

Sys 2128658

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO MECÂNICO

PROJETO DE UMA CÉLULA DE CARGA PARA UMA MÁQUINA
DE ENSAIOS TRIAXIAIS EM SOLOS

AUTOR : SERGIO RUBENS STANCATI DE SOUZA

ORIENTADOR: PROF. RONALDO DE BREYNE SALVAGNI

1982

SOUZA, Sergio Rubens Stancati de

Projeto de uma célula de carga para uma máquina de ensaios tria_{xiais}^{le} ~~solos~~; Orientador Prof. Ronaldo de Breyne Salvagni - São Paulo, EPUSP, 1982 28 p. e anexos, ilustr. graf. tab. 30 cm Bibliografia p. 29.

RESUMO

O presente trabalho trata do projeto de uma célula de carga para uma máquina de ensaios triaxiais em solos. A célula de carga em questão deve ser colocada dentro da câmara de ensaios e submetida a um esforço axial de , no máximo , 400 Kgf , que deve ser medido com precisão de 2,5 Kgf . Além disso, a célula de carga é submetida a uma pressão de 14 Kgf/cm², pois a câmara de ensaios é pressurizada com água.

A célula de carga desenvolvida é do tipo diafragma. Inicialmente, busca-se desenvolver um programa de computador para dimensionamento de células de carga do tipo diafragma, a partir / da teoria das placas e cascas. A seguir , calcula-se a célula de carga requerida usando-se o método desenvolvido , com vistas à determinação de suas dimensões, bem como das posições dos extensômetros no diafragma. Posteriormente, faz-se a análise / das deformações do diafragma para um dado carregamento, utilizando-se o método dos elementos finitos para reposicionar os extensômetros, com base nos resultados mais precisos obtidos através deste método. Finalmente, apresenta-se o desenho para fabricação da célula de carga projetada.

A G R A D E C I M E N T O S

Meus sinceros agradecimentos ao professor Dr. Ronaldo de Breyne Salvagni e ao Físico Chefe da Seção de Desenvolvimento e Produção de Equipamentos do Agrupamento de Fundações , Moacyr Sampaio Xavier Filho, pela orientação e apoio recebidos durante o desenvolver dos trabalhos.

Agradeço também , ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT pela cessão de horas de computador e recursos para produção de um protótipo da célula de carga , em especial, ao Chefe da Divisão de Engenharia Civil , Dr. Faíçal Massad , ao Chefe do Grupo de Sistemas Computacionais, Waldemar Bon Júnior e ao chefe do Agrupamento de Fundações , Emir Massad.

Agradeço ainda a todos os que colaboraram para que eu realizasse este trabalho da melhor maneira possível .

O autor

PROJETO DE UMA CÉLULA DE CARGA PARA UMA MÁQUINA DE ENSAIOS TRIAXIAIS EM SOLOS

C O N T E Ú D O

1. DEFINIÇÃO DO PROJETO - ASPECTOS GERAIS

- 1.1. *Considerações iniciais*
- 1.2. *Definições do projeto*
- 1.3. *Criação de soluções*
- 1.4. *Comentários sobre as soluções*

2. PROJETO PRELIMINAR DA CÉLULA DE CARGA

- 2.1. *Introdução*
- 2.2. *Proposta de programa de computador para o pré-dimensionamento*
- 2.3. *Preparação dos dados para pré-dimensionamento*
- 2.4. *Resultados da execução do programa*
- 2.5. *Conclusões iniciais*

3. REFINAMENTO DA SOLUÇÃO USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTO FINITOS

- 3.1. *Introdução*
- 3.2. *Preparação dos dados*
- 3.3. *Resultados da execução do programa*
- 3.4. *Análise dos resultados obtidos e eventuais correções*

4. DETALHAMENTO DO PROJETO

- 4.1. *Considerações iniciais sobre a câmara triaxial e adaptações a serem feitas*
- 4.2. *Desenhos para fabricação*

5. SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO

6. BIBLIOGRAFIA

7. APÊNDICES

7.A. Base teórica para o programa de dimensionamento

- A.1. Definição de uma equação da linha elástica para a so
lução 2
- A.2. Definição de uma equação da linha elástica para a so
lução 3
- A.3. Cálculo das deformações nas direções radial e tangencial
para os casos das soluções 2 e 3
- A.4. Fórmula geral para as deformações lidas pelos extensôme
tros - definição dos fatores K_{1R} , K_{1T} , K_{2R} , K_{2T}
- A.5. Determinação analítica dos valores de K_{2R} e K_{2T}
- A.6. Otimização da saída dos strain gages
- A.7. Fórmulas para dimensionamento do diafragma no caso
de uso de extensômetros tipo diafragma (bidirecionais)
- A.8. Fórmulas para dimensionamento do diafragma no caso de
uso de extensômetros unidirecionais

7.B. Resumo de "The strain gage primer"

- B.1. Introdução à medição de deformações
- B.2. Extensômetros elétricos de resistência
- B.3. A ponte de Wheatstone
- B.4. Compensação de temperatura nas instalações de extensô
metros
- B.5. Instalações de extensômetros a longo prazo
- B.6. Instrumentação
- B.7. Instalações à prova de umidade

PROJETO DE CÉLULA DE CARGA DE DIAFRAGMA

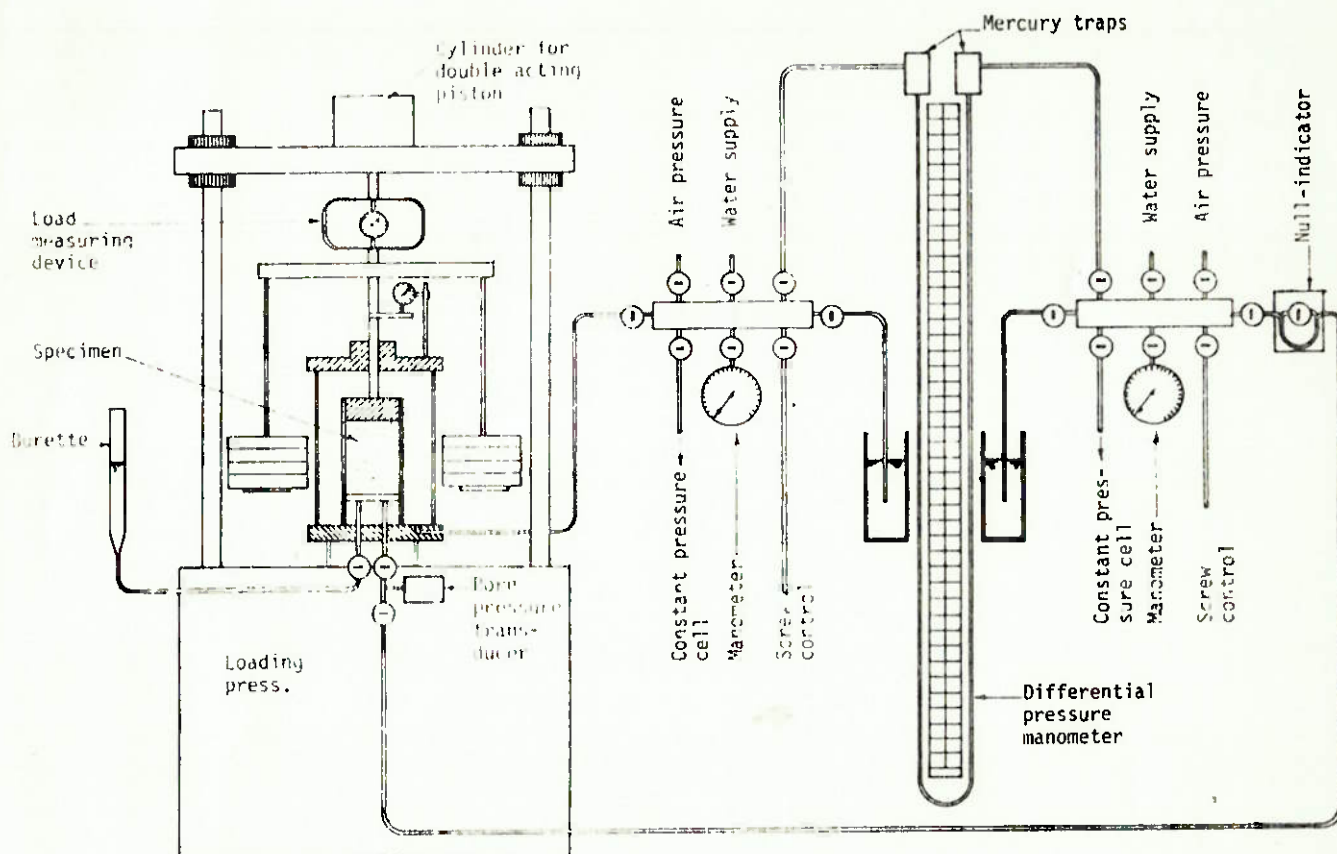
1. DEFINIÇÃO DO PROJETO - ASPECTOS GERAIS

1.1. Considerações Iniciais

A máquina que vai ser modificada pertence ao Labo
ratório de Pavimentos da Divisão de Engenharia Civil - IPT.

1.2. Definição do Projeto

A máquina de ensaios triaxiais é mostrada esquema
ticamente na figura abaixo



A amostra a ser ensaiada é padronizada, tendo diâmetro e comprimento fixos. Seu formato é cilíndrico, tendo diâmetro de 7,1cm. A amostra, depois de convenientemente preparada, conforme o tipo de ensaio, é colocada entre os cabeçotes da máquina de ensaio e o conjunto amostra-cabeçotes é envolto por uma membrana de borracha, que é lacrada para impedir que o corpo de prova se comunique fisicamente com a câmara triaxial. No ensaio, são medidas tensões e deslocamentos. Os instrumentos medidores são um anel dinamométrico para a medição de forças (e, a partir disso, tensões) e um relógio medidor de deslocamentos. Essa instrumentação utilizada apresenta problemas: as folgas existentes entre a haste aplicadora de esforços e o cabeçote introduzem imprecisões nas medidas de deslocamentos, uma vez que o relógio medidor é fixado à haste e não diretamente ao cabeçote. Por outro lado, as tensões medidas também apresentaram erros, uma vez que entre o anel dinamométrico e o cabeçote existem pontos de aplicação de forças que mascaram os resultados. Um deles é o ponto de entrada da haste na câmara de ensaio. Como a câmara é pressurizada com água, passa a existir a necessidade de uma boa vedação para não se perder pressão. Essa vedação é conseguida no orifício de passagem da haste aplicadora de esforços, mas introduz atrito. A equipe do laboratório de pavimentos, ao qual pertence a máquina, decidiu que valia a pena reformar a instrumentação com a finalidade de se conseguir ganho de precisão nas medidas. A minha tarefa ficou definida como sendo a de reformar esse sistema medidor de forças, procurando eliminar as possíveis imperfeições.

As especificações para este projeto são as seguintes:

- Sensibilidade 2,5kgf
- Sensibilidade elétrica 1,0mV/V
- Diâmetro do corpo de prova: 3,6cm
- Força máxima aplicável: 400kgf
- Fator de segurança: 1,25
- Frequência máxima de oscilações: 2 ciclos por segundo
- Diâmetro máximo disponível: 100mm
- Altura máxima disponível, do cabeçote à tampa da câmara: 45mm

1.3. Criação de Soluções

As soluções para esse projeto podem ser mecânicas, ópticas ou elétricas. Apenas serão tratadas soluções elétricas por duas razões:

- 1 - Por serem mais confiáveis do que as demais; e
- 2 - Por haver interesse por parte do IPT no sentido de se desenvolver instrumentação à base de "strain gages".

Outro aspecto da solução a ser pensado foi o da colocação do instrumento, e chegou-se à conclusão de que o melhor lugar é dentro da câmara triaxial, que contém água pressurizada, pois nesse lugar não há problemas com o atrito. As soluções possíveis levantadas funcionam usando "strain gages", ou, traduzindo, extensômetros elétricos. O princípio de funcionamento das soluções adotadas é o da variação do valor de uma resistência elétrica colocada a uma superfície que se deforma. Maiores detalhes sobre as técnicas empregadas envolvendo strain gages podem ser encontrados no livro "The strain gage primer" de H.R. Lissner e C.C. Perry. Um resumo dessas técnicas vem como anexo, ao final do trabalho.

As soluções sugeridas estão esquematizadas abaixo:

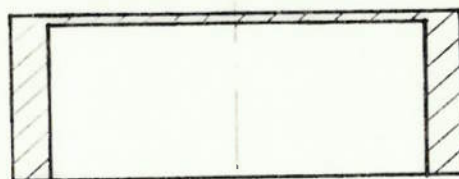
- 1 - Estreitamento da haste aplicadora de esforços, esquemati
zado abaixo:



A idéia é medir a deformação da parte estreita da haste aplicadora de esforços. Deve-se ter um compromisso de não gerar tensões muito elevadas no local estreitado, que possam comprometer a haste e, por outro lado,

gerar deformações altas o suficiente para se ter a sensibilidade requerida nas medições. Não há problemas graves quanto à possibilidade de ruptura quando a haste se choca com o cabeçote no início da aplicação da carga.

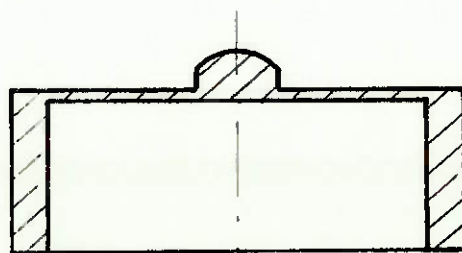
- 2 - Célula de carga de diafragma com carga distribuída embutida no cabeçote. O diafragma está esquematizado abaixo:



A idéia consiste em medir a deformação de um diafragma que se deforma pela aplicação de uma pressão igualmente distribuída em sua superfície. A pressão, no óleo, é aplicada por um êmbolo que está em contato com a haste aplicadora de carga.

Consegue-se menor sensibilidade à deformação do que na solução 1, pois a distribuição das deformações sobre a superfície do elemento sensível é menos uniforme. Enquanto no caso da solução 1, as deformações são praticamente constantes, na atual solução apresentam distribuições parabólicas. Esta solução é a mais indicada para a medida de pressões. Apresenta dificuldades construtivas, pois o óleo na câmara de pressão da célula não pode ter bolhas.

- 3 - Célula de carga de diafragma com carga concentrada em área menor no centro do diafragma, embutida no cabeçote. O diafragma é esquematizado abaixo:



Mede-se a deformação de um diafragma que se deforma pela aplicação de uma carga distribuída num sobressalto de sua região central. Conse -
gue-se menos sensibilidade que as soluções anteriores, pois o campo de deformações no elemento sensível é menos uniforme nesta solução.

1.4. Comentários sobre as Soluções

Existeviability física para as três soluções, em bora os graus de dificuldade de execução sejam variáveis. A primeira solução é a de mais fácil execução e a segunda a de mais difícil. O material a ser gasto na execução de qual quer uma das soluções é pouco e seu custo pode ser considerado desprezível em relação ao custo de usinagem. O custo total de uma unidade é baixo, não sendo necessário recursos financeiros especiais para a sua fabricação. Em termos de estratégia, há interesse maior no desenvolvimento de projeto de células de carga de diafragma do que no de projetos de simples instrumentação na haste aplicadora de carga da máqui na, de maneira que fica descartada inicialmente, a solução 1, ou seja a instrumentação de um estreitamento da haste a aplicadora de esforços. A partir de agora, passa-se a ^{conside-} ~~consi-~~ ~~derar~~ ^{que} a célula de carga a ser projetada é de diafragma e os processos de dimensionamento utilizados levarão em conta este fato.

2. PROJETO PRELIMINAR DA CÉLULA DE CARGA

2.1. Introdução

Nesta fase do projeto preliminar da célula de car ga, pretende-se desenvolver um método de comparação entre células de carga que funcionam com carga distribuída ao lon go do diafragma ou com carga concentrada em apoio central. A teoria utilizada como base é a teoria das placas e cascas e as equações desenvolvidas levarão em conta que os diafrag mas são axissimétricos e de espessura constante. Após o de senvolvimento da base teórica, vamos procurar sistematizar o método de comparação das soluções, desenvolvendo, ao fi nal, um programa de computador que faça essa comparação, vol tado para a seleção de uma solução cuja resolução (força má

xima/sensibilidade) seja máxima.

No estudo desenvolvido a seguir, a célula de carga de tipo construtivo com carga distribuída pela superfície do diafragma, será chamada de solução 2, e a de tipo construtivo com carga concentrada em apoio central, de solução 3.

2.2. Proposta de Programa de Computador para o Pré-Dimensionamento

I. Proposta de um programa de pré-dimensionamento - DIMCEL

O presente programa visa selecionar uma célula de carga para trabalhar num dado intervalo de solicitações, dispondo de um certo espaço físico e usando um dado tipo de extensômetro. Nesse programa, são escolhidas as dimensões do diafragma e a colocação dos extensômetros e, para um dimensionamento completo da célula de carga, ficam faltando os detalhes estruturais e construtivos do conjunto da célula. O programa se baseia num modelo matemático simplificado e passível de imprecisão. Não se justifica, no entanto, o aperfeiçoamento do modelo usado, pois as imprecisões de fabricação são mais significativas do que aquelas provenientes do uso de um modelo matemático simplificado e o custo do desenvolvimento do modelo matemático não iria compensar o benefício obtido. A ^{afirmação} ~~colocação~~ acima foi feita considerando que a produção dessas células é praticamente artesanal e provavelmente não seria válida no caso de produção em larga escala. As simplificações ^{admitidas} ~~assumidas~~ no modelo são as seguintes:

- no cálculo, é usada a teoria das placas e cascas
- para o caso de carregamento distribuído, a ^{adotada} ~~distribuição assumida~~ é a uniforme
- para o caso de carregamento aplicado em apoio central, ^{suposto} ~~é assumida~~ que este apoio funciona como um engastamento perfeito na borda da célula, estando indeformado ao passo que a parte do diafragma que está junto dele está deformada. Isto em verdade não acontece, pois o apoio se deforma. Em consequência disto, perde-se precisão nos casos em que extensômetros pequenos, em relação ao diafragma, estão ali posicionados e as leituras reais são menores que as previstas. O

- mesmo acontece em relação à borda engastada externa.
- para os extensômetros circulares, a área para a qual se calcula a deformação média é a coroa circular ocupada pelo filamento.
 - para os extensômetros unidirecionais, a deformação média ^{adotada} ~~assumida~~ é a do ponto central da grade. Isto leva a imprecisões no caso de o extensômetro estar instalado num ponto do diafragma onde as deformações são relativamente baixas.

Apesar das limitações impostas pelas simplificações ^{feitas} ~~assumidas~~ e dos pontos de instabilidade citados acima, o programa cumpre a sua finalidade, selecionando o diâmetro e a espessura do diafragma, bem como a colocação dos extensômetros.

A partir dos resultados obtidos, pode-se partir para uma análise usando o método dos elementos finitos visando obter, na estrutura da célula de carga, uma distribuição de tensões com um mínimo de pontos de concentração. Nesse caso, seria beneficiada a durabilidade da célula.

O método dos elementos finitos permite a determinação das frequências de ressonância do diafragma, o que permite se determinar com segurança a frequência máxima de excitação que pode ser medida com precisão pela célula de carga. Os valores das deformações na área onde vai ser aplicado o extensômetro podem ser usados para o cálculo da deformação a ser lida. A partir dos resultados obtidos para a análise acima, pode-se obter, com precisão, a resposta, em termos de deformação medida, a uma determinada solicitação e, se o processo de fabricação foi preciso, a célula vai fornecer as respostas previstas com boa aproximação.

Resumindo, o programa DIMCEL pode ser usado como ponto de partida para o dimensionamento de uma célula de carga de diafragma.

II. Conceitos básicos no programa DIMCEL

Neste parágrafo será exposto o processo utilizado pelo programa DIMCEL para especificar os parâmetros do

diafragma e as posições dos extensômetros. A leitura deste item é fundamental para uma boa compreensão dos resultados fornecidos pelo programa, bem como da maneira de fornecer a ele as informações necessárias. Inicialmente, será exposto o formato de entrada dos dados necessários. O arquivo de entrada deve ter 8 registros (cartões ou linhas) contendo as seguintes informações:

1º cartão: RMAX, AMIN, IUNI (2F10.0,i5)

onde RMAX = raio máximo que o diafragma pode ter, que é função do espaço disponível ou das recomendações do fabricante do extensômetro.

AMIN = raio mínimo que o apoio central pode ter, para que o esforço a ser medido não seja aplicado numa área muito pequena, no caso de aplicação de carga em apoio central.

IUNI = indicador do uso de extensômetros bidirecionais:

= 1 - indica extensômetros unidimensionais

= 0 - indica extensômetros bidirecionais

2º cartão: PMAX, PMIN (2F10.0,i5)

PMAX = força máxima requerida para a célula de carga.

PMIN = força ^{mínima} ~~máxima~~ ou menor divisão, requerida para a célula de carga.

IPRES= indica-se PMAX, PMIN são forças ou pressões.

Se IPRES=0, PMAX e PMIN são forças, se IPRES=1, pressões

3º cartão: Se IUNI = 1, esse cartão não vai ser lido, sendo pulado e podendo ser deixado em branco

Se IUNI = 0, os dados que contém são os seguintes:

REPR, RIPR, REPT, RIPT, RER, RIR, RET, RIT (8F10.0)

onde: REPR, RIPR = raios externo e interno da placa do extensômetro radial

REPT, RIPT = raios externo e interno da placa do extensômetro tangencial

RER, RIR = raios externo e interno do extensômetro radial

RET, RIT = raios externo e interno do extensômetro tangencial

4º cartão:

Se IUNI=1, contém os seguintes dados:

COMP, ALARG, DG, DCB, DC (8F10.0)

onde COMP = comprimento da placa do extensômetro u
nidirecional

ALARG = largura da placa do extensômetro

DG = distância da borda da placa à borda da
grade no lado que vai ficar voltado pa
ra o apoio ou o engastamento externo

DCB = distância do centro da grade à borda da
placa nesse mesmo lado

DC = distância mínima que se impõe entre o
centro da grade do extensômetro e o apoio
ou o engastamento externo

Se IUNI=0, pula esse cartão, que pode ser deixado
em branco.

5º cartão: REPD, NT, IML, NSOL (2F10.0,i5)

onde REPD = relação máxima espessura por diâmetro
admissível

NT = nº de casos estudados para a solução 2
ou para a solução 3

NT=0-estuda os casos gerados

NT>0-estuda NT casos. Dependendo dos
dados, o programa pode estudar até 300
casos para cada solução. O valor de NT
deve ser menor ou igual a 300.

IML = indicador da posição relativa entre os
extensômetros:

IML=0-indica que todos podem estar do
mesmo lado ou que se pode ter dois
em um lado e dois em outro lado do
diafragma

IML=1-indica que os extensômetros devem
estar do mesmo lado do diafragma
obrigatoriamente.

IML=2-indica que cada par de extensôme-
tros deve estar em um lado diferente
do diafragma.

NSOL = indica a solução a ser estudada:

NSOL=0 estuda aplicação de carga concentr
ada e distribuída

NSOL=2 estuda aplicação de carga distri
buída

NSOL=3 estuda aplicação de carga concen
trada

6º cartão DMINM, DMAXA, E, PN (8F10.0)

DMINM = soma, das deformações ^{do extensômetro} da ponte, mínima mensu-
rável, determinada pela sensibilidade elé-
trica do aparelho medidor de corrente de des-
balanceamento da ponte. É da ordem de 10^{-6} .

DMAXA = deformação máxima admissível no ponto de
maior deformação do diafragma. É determina-
da pelo material do diafragma.

E = módulo de elasticidade do material do dia-
fragma

PN = nº de Poisson do material do diafragma

7º cartão:

Se IUNI=1, esse cartão é pulado, podendo ser deixa-
do em branco

Se IUNI=0, então lê:

DMAXP, IDMP (F10.0, 2i5)

onde:

DMAXP: Se IDMP=1, é o valor da deformação na borda
na placa mais externa do extensômetro, caso
contrário, esse valor não é levado em conta
nos cálculos.

IDMP: indica se vai ou não ser imposta a deformação
na borda da placa do extensômetro:

Se IDMP=1, impõe

Se IDMP=0, não impõe

8º cartão: F, SENS (8F10.0)

F = "gage factor" do extensômetro, em (V/ϵ) , com
 ϵ [m/m]

SENS=Se SENS > 0, é o fundo de escala da célula de
carga (para carga máxima) por volt de alimenta-
ção da ponte de Wheatstone. É dado em V/V.

II.1. Procedimentos adotados na seleção de uma célula de carga

Aqui se pretende explicar a sequência das operações realizadas no programa. Essa sequência é a seguinte:

1. Leitura dos dados, já explicada

2. Verifica a consistência das medidas fornecidas:

No caso dos extensômetros unidirecionais, deve-se ter:

- Distância do centro do extensômetro à borda do diafragma (DC) > 0
- Comprimento da placa do extensômetro ($COMP$) > 0
- Distância da grade do extensômetro à borda da placa do extensômetro (DG) > 0
- $DC > DG$
- Distância do centro do extensômetro à borda da placa do extensômetro (DCB) $> DG$
- $COMP > DCB$
- $DCB \leq DC$
- Largura da placa do extensômetro ($ALARG$) > 0
- $COMP1 = COMP - DCB + DC + ALARG/2$, calculado para se poder colocar 4 extensômetros de placas com dimensões $COMP \times ALARG$ no diafragma de raio máximo $RMAX$ e apoio mínimo $AMIN$.
 $COMP1 \leq RMAX - AMIN$
- Relação máxima de espessura do diafragma pelo diâmetro ($REPD$) $\leq 0,2$
- Deformação mínima média mensurável ($DMINM$) $\leq$ Deformação máxima admissível na placa ($DMAXA$)
- Número de casos testados (NT) ≥ 0
- Força máxima a ser medida ($PMAX$) $\geq$ Força mínima a ser medida (sensibilidade) ($PMIN$)
- $PMIN > 0$
- Gage factor (F) > 0
- Sensibilidade elétrica ($SENS$) ≥ 0

No caso dos extensômetros bidirecionais, de
ve-se ter:

- raio interno da placa do extensômetro radial (RIPR) $\leq$ raio externo da placa do extensômetro radial (REPR)
- raio interno da placa do extensômetro tangencial (RIPT) $\leq$ raio externo da placa do extensômetro tangencial (REPT)
- raio interno da grade radial (RIR) $\leq$ raio externo da grade radial (RER)
- raio interno da grade tangencial (RIT) $\leq$ raio externo da grade tangencial (RET)
- $RER \leq REPR$
- $RET \leq REPT$
- $RIPR \leq RIR$
- $RIPT \leq RIT$
- $RIPR \geq 0$
- $RIPT \geq 0$
- Raio máximo das placas do extensômetro ($RPMAX = AMAX1 (REPT, REPR)$) $>$ raio máximo (RMAX)
- raio mínimo do apoio (AMIN) $< 0,8 \times RMAX$
- relação espessura do diafragma por diâmetro (REPD) $\leq 0,2$
- deformação mínima média mensurável (DMINM) $\leq$ deformação máxima admissível (DMAXA)
- número de casos a estudar (NT) ≥ 0
- força máxima aplicada (PMAX) $\geq$ força mínima aplicada (sensibilidade) (PMIN)
- $PMIN > 0$
- $RIR \neq RER$
- $RIT \neq RET$
- $DMAXA \geq$ deformação máxima na borda da placa do extensômetro (DMAXP)
- Gage factor (F) > 0
- Sensibilidade elétrica (SENS) ≥ 0

3. Monta tabelas de sensibilidade à deformação para o modelo com carga concentrada ou distribuída, conforme o caso. As tabelas são monta

das da seguinte maneira:

A. Monta-se uma tabela de valores de R_1 (raio externo) e A_1 (raio de apoio), variando R_1 de R_{MIN} a R_{MAX} de modo a se ter 10 valores de R_1 e A_1 de A_{MIN} a A_{MAX} de modo a se ter 10 valores de A_1 para cada valor de R_1 . R_{MAX} e A_{MIN} são dados e R_{MIN} e A_{MAX} são calculados da seguinte maneira:

No caso de se usar extensômetros unidirecionais, $R_{MIN} = A_{MIN} + COM_1$ (valor gerado durante a verificação de consistência)

$$A_{MAX} = R_1 - COM_1$$

No caso de se usar extensômetros bidirecionais,

$$R_{MIN} = A_{MAX} \cdot (R_{PMAX}, A_{MIN}/0,8)$$

$$A_{MAX} = 0,8R_1$$

B. Os termos AK_{1R} , AK_{2R} , AK_{1T} , AK_{2T} são definidos da seguinte maneira:

No caso de extensômetros unidirecionais:

AK_{1R} é a relação entre a deformação máxima radial verificada e o fator

$$\frac{-3_p R^2 (1-\nu)^2}{8Eh^2} ; \text{ depende da geometria do diafragma}$$

AK_{2R} não é usado

AK_{1T} , para um dado ponto de aplicação dos extensômetros, é a relação entre a deformação no ponto e o fator

$$\frac{-3_p R^2 (1-\nu)^2}{8Eh^2}$$

AK_{2T} é definido da mesma maneira que AK_{1T} para o outro ponto de aplicação dos extensômetros.

No caso de extensômetros bidirecionais:

AK_{1R} é definido do mesmo modo que para o caso de extensômetros unidirecionais.

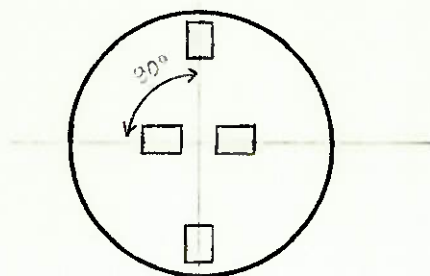
AK1T é definido do mesmo modo que AK1R, só que para deformações tangenciais

AK2R é a relação entre a deformação média na área do extensômetro radial e a deformação máxima.

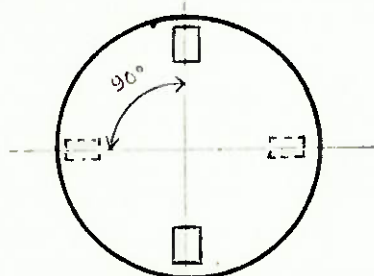
AK2T se define do mesmo modo que AK2R só que para o extensômetro tangencial

C. Os pontos de aplicação dos extensômetros unidirecionais são assumidos os seguintes:

Quando os extensômetros estão no mesmo lado do diafragma, as localizações assumidas são 2 extensômetros colocados a uma distância RS1 do centro e 2 colocados a uma distância RS2 de acordo com esta montagem:



Quando os extensômetros estão em lados opostos do diafragma, as localizações assumidas são os 4 extensômetros à mesma distância do centro do diafragma, estando os extensômetros do mesmo lado do diafragma separados por 130° , de acordo com esta montagem:



D. A sensibilidade à deformação (TAB) é calculada da seguinte maneira:

Para o caso de se usar extensômetros unidirecionais:

- no mesmo lado do diafragma, $TAB = AK1T - AK2T$
- Em lados opostos do diafragma, $TAB = 2 \times$ máximo entre AK1T e AK2T

Para o caso de se usar extensômetros bidirecionais:

- no mesmo lado do diafragma, $TAB = AK1R * AK2R - AK1T * AK2T$
- em lados opostos do diafragma, $TAB = AK1R * AK2R + AK1T * AK2T$

4. Ordena os indicadores dos dados da tabela de sensibilidade à deformação da maior para a menor sensibilidade, para posterior estudo de casos. Os NT primeiros casos serão estudados.
5. Estuda os NT primeiros casos, representados pelos NT primeiros elementos da tabela de sensibilidade à deformação. Se $NT=0$, estuda todos os casos. O estudo de casos é interrompido pela satisfação de uma ou mais das seguintes condições:

- $i > NT$
- $TAB \text{ estudado} = 0$
- $TAB/TAB_{\text{máx}} < 0,1$

Para um dado caso, os cálculos feitos são os seguintes:

- calcula os valores máximo e mínimo admissíveis de pressões no diafragma. Se as pressões requeridas estão fora desses limites, o caso estudado não vai cobrir o campo de variação requerido
- calcula as pressões máximas e mínimas no caso em que a relação espessura sobre raio do diafragma é aquela em que se dá a troca do critério que impõe deformação máxima admissível pelo que impõe deflexão máxima admissível para limitação das pressões máximas aceitáveis no diafragma.
- através da aplicação do critério do produto, seleciona a espessura do diafragma. Inicialmente, a cada caso, está associado um raio do diafragma e um raio de apoio, quando é o caso. O critério do produto apenas escolhe

uma espessura de diafragma para a qual $PMAXD \times PMIND = PMAXR \times PMINR$, dessa forma, haverá igual margem de segurança tanto para cima da pressão máxima requerida como para baixo da pressão mínima requerida.

- calcula a resolução da célula de carga $CV = PMAXD/PMIND$
- Seleciona a célula de carga de maior resolução
- Imprime dados relativos ao caso estudado

6. Imprime dados relativos ao caso estudado de maior resolução

A listagem do programa é mostrada a seguir.

2.3. Preparação dos Dados para Pré-Dimensionamento

Devido a uma maior simplicidade no processo construtivo, vamos escolher a alternativa 3 como solução a ser desenvolvida. Os parâmetros de entrada são os seguintes:

- Quanto às dimensões do diafragma:
 - raio externo máximo: 3,00 cm
 - raio do apoio mínimo: 0,5 cm
- Quanto às dimensões dos extensômetros:
 - comprimento total: 0,72 cm
 - distância do centro do filamento à borda da placa: 0,36 cm
 - distância da borda da grade à borda da placa: 0,26 cm
 - distância mínima do centro do extensômetro à borda do diafragma: 0,41 cm
 - largura da placa do extensômetro: 0,4 cm
- Quanto às propriedades do material:
 - módulo de elasticidade $E = 21000000 \text{ kgf/cm}^2$
 - número de Poisson = 0,28
 - deformação máxima admissível = $1,5 \times 10^{-3} \text{ m/m}$

2.4. Resultados da Execução do Programa

O programa DIMCEL foi executado a partir dos dados listados anteriormente. A listagem obtida é mostrada a seguir. Ao final da listagem, apresenta-se a solução selecionada pelo programa.

C		PROGRAMA PARA DIMENSIONAMENTO DE UMA CELULA DE CARGA	DIM000010
C			DIM000020
C		RAIO EXTERNO MAXIMO ADMISSIVEL	RMAX
C		MENOR VALOR DO RAIO DO APOIO 'A', SOLUCAO '3'	AMIN
C		MAXIMA CARGA APLICADA	PMAX
C		VALOR DA MENOR DIVISAO LEGIVEL	PMIN
C		INDICADOR DE LEITURA DE PRESSES	
C		FORÇAS	
C			IPRES = 0
C			IPRES = 1
C		RAIOS EXTERNO E INTERNO DA PLACA ONDE ESTA O STRAIN GAGE RADIAL	
C			REPR,RIPR
C		STRAIN GAGE TANGENCIAL	
C			REPT,RIPT
C		RAIOS EXTERNO E INTERNO DO STRAIN GAGE RADIAL	
C			RET,RIR
C		RAIOS EXTERNO E INTERNO DO STRAIN GAGE TANGENCIAL	
C			RET,RII
C		DEFORMACOES MINIMA MEDIA E MAXIMA ADMISSIVEL	
C			DMINM,DMAX
C		ANULO DE FLASTICIDADE DO MATERIAL	E
C			PN
C		RELACAO MAXIMA DISEJAVEL DE ESPESSURA POR DIAMETRO	REPDI
C		NUNO DE CASOS DIFERENTES A SEREM ANALISADOS	NT
C		INDICADOR IMPONDO SE OS STRAIN GAGES DEVEM ESTAR	
C		DO MESMO LADO :	
C			IML = 0
C			IML = 1
C			IML = 2
C		SOLUCAO A SER ESTUDADA	
C			NSOL = 2
C			NSOL = 3
C			NSOL = 0
C		DEFORMACAO MAXIMA NA BORDA DA PLACA	DMAXP
C		INDICADOR IMPONDO DEFORMACAO MAXIMA NA BORDA DA	
C		PLACA :	
C			IDMP = 0
C			IDMP = 1
C		SENSIBILIDADE ELÉTRICA (V / U)	
C		SE SENS -NÚ- 0 , IMPOE A SENSIBILIDADE	SENS
C		GAGE FACTOR F	F
C		INDICADOR DO USO DE EXTENSOMETROS UNIDIRECIONAIS	
C		BIDIRECIONAIS	IUNI = 0
C			IUNI = 1
C		COMP	
C		CONFINEMENTO DO EXTENSOMETRO UNIDIRECIONAL	
C		LARGURA	ALARG
C		DISTANCIA DO CENTRO DO EXTENSOMETRO A BORDA DA	
C		PLACA DO EXTENSOMETRO	DCB
C		DISTANCIA DO CENTRO DO EXTENSOMETRO A BORDA DO	
C		DIAF RAGHA	DC
C			
C		DIMENSION TAB(300) , TAB1(300)	
C		DIMENSION IORD(300)	
C		DIMENSION AK1R(100) , AK1T(100) , AK2R(100) , AK2T(100)	
C		DIMENSION A(100) , R(100)	
C		DIMENSION CON(10;12) , ICOM(S) , ICOMH(S)	
C		DIMENSION C1(100) , C2(100)	
C		DIMENSION RXT(100) , RS1(100) , RS2(100)	
C		REAL K1R2 , K1T2 , K1R3 , K1T3 , K2R2 , K2T2 , K2R3 , K2T3	
C			DIM000460
C			DIM000470
C			DIM000480
C			DIM000490
C			DIM000500
C			DIM000510
C			DIM000520
C			DIM000530
C			DIM000540
C			DIM000550

```

COMMON /CONS/ RMAX,AMIN,PMAX,PMIN,REPR,RIPR,REPT,RIPT,RER,RIR,
1 RET,RIT,DMINM,DMAXA,REPD,NT
COMMON /FEST/ TAB , TAB1 , AK1R , AK1T , AK2R ,
1 AK2I , IORD
COMMON /TAB1/ RPRMAX,RPEHIN,KPRMAX,RMIN,A,R,NV1,IML
COMMON /C/ C1 , C2
COMMON /ITC/ E , PN , C3 , AK3 , PMAXD , PMIND , HSR , IMEM , ICONDTH00620
COMMON /MAX/ CUMAX,NSOLM,RH,AM,PMIND1,PMAXD1,PORHX,POTMX,
1 DMAXN,DMAXPM,SENSM,ICOMM
COMMON /DLIM/ DMAXP , DMAX , DMAXP1 , RDPDM , IDMP
COMMON /EL/ F , SENS , SENS1
COMMON /UHI/ DC,DG,DCB,COMP,COMP1,ALARG,RXTH,RXT,IUNI,RS1,RS2,
1 RS1M,RS2M

READ(5,3) PMAX , AMIN , IUNI
READ(5,3) PMAX , PMIN , IPRES
IF (IUNI.NE.1) READ(5,1) REPR, RIPR, REPT, RIPT, RER, RIR, RET, RITDTH00720
IF (IUNI.EQ.1) READ(5,4)
IF (IUNI.EQ.1) READ(5,1) COMP , ALARG , DG , DCB , DC
IF (IUNI.NE.1) READ(5,4)
READ(5,2) REPD , NT , IML , NSOL
READ(5,1) DMINM , DMAXA , E , PN
IF (IUNI.NE.1) READ(5,2) DMAXP , IDMP
IF (IUNI.EQ.1) READ(5,4)
READ(5,1) F , SENS I
IF (IUNI.NE.1) CALL CONCEL (RPMAX , RPEHIN , RPIMAX , IML)
IF (IUNI.EQ.1) CALL CHCELU
CUMAX = 0.
IF (NSOL.NE.2.AND.NSOL.NE.3) NSOL = 0
NSOL1 = NSOL
IF (CHCELU.EQ.0) NSOL1 = 3
60 IF (IUNI.NE.1) CALL TABCEL(NSOL1)
IF (IUNI.EQ.1) CALL TABCELU(NSOL1)
CALL ORDCEL
CUMAX = 0.
NSOL1 = NSOL1
HA = 0.
PM = 0.
CUMAX = 0.
DMAXPM = 0.
CN = 0.
PACPD1 = 0.
FACPD1 = 0.
RTH = 0.
RS.M = 0.
SENSM = 0.
ICORH(1) = NSOL1
ICORH(2) = 9
DO 80 I = 3,5
80 ICOMH(1) = 1
CALL ITICFL(NSOL1,IPRES)
IF (NSOL.NE.0) GO TO 50
IF (CHCELU.EQ.0.AND.NSOL1.EQ.2) GO TO 50
NSOL1 = 2

```

DIM00560
 DIM00570
 DIM00580
 DIM00590
 DIM00600
 DIM00610
 DIM00620
 DIM00630
 DIM00640
 DIM00650
 DIM00660
 DIM00670
 DIM00680
 DIM00690
 DIM00700
 DIM00710
 DIM00720
 DIM00730
 DIM00740
 DIM00750
 DIM00760
 DIM00770
 DIM00780
 DIM00790
 DIM00800
 DIM00810
 DIM00820
 DIM00830
 DIM00840
 DIM00850
 DIM00860
 DIM00870
 DIM00880
 DIM00890
 DIM00900
 DIM00910
 DIM00920
 DIM00930
 DIM00940
 DIM00950
 DIM00960
 DIM00970
 DIM00980
 DIM00990
 DIM01000
 DIM01010
 DIM01020
 DIM01030
 DIM01040
 DIM01050
 DIM01060
 DIM01070
 DIM01080
 DIM01090
 DIM01100

49

```

110 R1 = R(IND)
    IF (NEOL.FQ.2) GO TO 130
    IF (JUNI.FQ.1) GO TO 130
    IF (MOD(ITAB,3).NE.0) GO TO 130
    IF (AK2R(IND).NE.0.OR.AK2T(IND).NE.0.) GO TO 110
    ICOM(IND) = 12
    IMEN = IMEN + 1
    GO TO 20
110 IF (AK2T(IND).NE.0.) GO TO 120
    ICOM(IMEN) = 6
    IMEN = IMEN + 1
    GO TO 310
120 IF (AK2R(IND).NE.0.) GO TO 130
    ICOM(IMEN) = 7
    IMEN = IMEN + 1
    GO TO 310
130 IF (MOD(ITAB,3).NE.2) GO TO 140
    ICOM(IMEN) = 5
    IMEN = IMEN + 1
    GO TO 310
140 IF (MOD(ITAB,3).NE.1) GO TO 310
    ICOM(IMEN) = 4
    IMEN = IMEN + 1
    GO TO 310
310 IF (NSOL.FQ.2) GO TO 150
    C3 = (1.-2.*LOG(R1))*LOG(A1) + 2.*LOG(R1)**2 - LOG(R1)
    C3 = (C3**2.*A1*A1 + A1*A1 - R1*R1) * R1*R1
    C3 = C3/(A1*A1 - R1*R1)
    AK3 = C1(IND)*A1*A1 + C2(IND)*LOG(A1) + C3 + 2.*A1*A1*(LOG(A1)-1.)
    AK3 = AK3 / (R1*R1)
    CC WRITE(6,5000) AK3,C3',4F10.4)
    CC5000 FORMAT('AK3,C3',4F10.4)
    GO TO 160
150 AK3 = 0.25
    PHINR = PHIN
    PHAXR = PHAX
    IF (IPRES.NE.0) GO TO 180
    PHINR = PHIN/(PI*R1*R1)
    PHAXR = PHAX/(PI*R1*R1)
    CONTINUE
180 CALL VALCEL(NSOL,ITAB,IND,PHINR,PHAXR)
    IF (ICOM(IMEN-1).EQ.8) GO TO 20
    CALL POLCEL(NSOL,ITAB,IND)
    ISUP = 0
    CC WRITE(6,6000) PHIND,PHAXD
    CC6000 FORMAT('PHIND,PHAXD',2F15.4)
    IF (PHINR/PHIND.GT. PHAXD/PHAXR) ISUP = 1
    CALL PROCCEL(NSOL,ITAB,IND,ISUP,PHINR,PHAXR)
C
C PREPARA INFORMACOES PARA IMPRESSAO
    PHIND = ABS(PHIND)
    PHAXD = ABS(PHAXD)
    IF (IPRES.NE.0) GO TO 190
    PHIND = ABS(PHIND) * PI*R1*R1
    PHAXD = ABS(PHAXD) * PI*R1*R1
    CV = PHAXD / PHIND
    IF (CV.GE.CVREQ) GO TO 200
190

```

DIM01660
 DIM01670
 DIM01680
 DIM01690
 DIM01700
 DIM01710
 DIM01720
 DIM01730
 DIM01740
 DIM01750
 DIM01760
 DIM01770
 DIM01780
 DIM01790
 DIM01800
 DIM01810
 DIM01820
 DIM01830
 DIM01840
 DIM01850
 DIM01860
 DIM01870
 DIM01880
 DIM01890
 DIM01900
 DIM01910
 DIM01920
 DIM01930
 DIM01940
 DIM01950
 DIM01960
 DIM01970
 DIM01980
 DIM01990
 DIM02000
 DIM02010
 DIM02020
 DIM02030
 DIM02040
 DIM02050
 DIM02060
 DIM02070
 DIM02080
 DIM02090
 DIM02100
 DIM02110
 DIM02120
 DIM02130
 DIM02140
 DIM02150
 DIM02160
 DIM02170
 DIM02180
 DIM02190
 DIM02200

```

200 ICOM(IMEN) = 9
    IMEN = IMEN + 1
    CONTINUE
    H = HSR * P1
    IF (CV.LE.CVMAX) GO TO 850
    CVMAX = CV
    NSOL = NSOL
    PM = R1
    R1M = PXT(IND)
    RSM = RS1(IND)
    RSM = RS2(IND)
    DMAX = DMAX
    DMXP = DMXP1
    PM = H
    IF (NSOL.EQ.2) DMAXM = -DMAXM
    IF (NSOL.EQ.2) DMXP = -DMAX
    DMXP1 = DMXP
    IF (NSOL.EQ.3) AM = A1
    AM = 0.
    PMIND1 = PMIND
    PMAXD1 = PMAXD
    GO TO 30
850 CV = 0.
    WRITE(6,1) CV, NSOL, IML1, R1, A1, CV, CV, CV, CV, (COM(J,3), J=1,10)
    CALL IMPCEL(CV, CV, R1, A1, CV, CV, CV, ICOM, CV, IUNI, CV, CV, ITAB,
    1 IPRES)
    GO TO 10
30 CONTINUE
    WRITE(6,1) CV, NSOL, IML1, R1, A1, PMIND, PMAXD, HSR, POR, POT,
    1 (COM(J,3), J=1,10), DMAX, DMXP1
    CALL IMPCEL(PMAXD, PMIND, CV, R1, A1, H, DMXP1, DMXP, SENS1, ICOM, RXT(IND),
    1 IUNI, RS1(IND), RS2(IND), ITAB, IPRES)
    CONTINUE
    WRITE(6,4)
    WRITE(6,3)
    1 WRITE(6,1) CVMAX, NSOL, IML1, RM, AM, PMIND1, PMAXD1, HSRM,
    1 FORMX, POTMX, (COM(J,3), J=1,10), DMAXM, DMAXPM
    CALL IMPCEL(PMAXD1, PMIND1, CVMAX, RM, AM, HM, DMAXPM, DMAXM, SENS1,
    1 ICOM, RXTM, IUNI, RSTM, RSEM, ITAB, IPRES)
    RETURN
    FORMAT(T4,F10.3,T20.2,F5.4,(F9.3,1X),/ ,T5,3(F9.3,1X),10A4,/,
    1 T4,2E15.4,/)
    3 FORMAT(T5,'PARAMETROS PARA CAMPO DE VARIACAO MAXIMO')
    4 FORMAT(1H1)
    5 FORMAT(T5,'ESTUDO DE CASOS PARA CARREGAMENTO DISTRIBUIDO',/////)
    6 FORMAT(T5,'ESTUDO DE CASOS PARA CARREGAMENTO CONCENTRADO EM APOIO
    1 CENTRAL',/////)
    END
    SUBROUTINE VALCEL (NSOL, ITAB, IND, PMINR, PMAXR)
    DIMENSION TAB(300), TAB1(300)
    DIMENSION IORD(300)
    DIMENSION AK1R(100), AK1T(100), AK2R(100), AK2T(100)

```

DIM02210
 DIM02220
 DIM02230
 DIM02240
 DIM02250
 DIM02260
 DIM02270
 DIM02280
 DIM02290
 DIM02300
 DIM02310
 DIM02320
 DIM02330
 DIM02340
 DIM02350
 DIM02360
 DIM02370
 DIM02380
 DIM02390
 DIM02400
 DIM02410
 DIM02420
 DIM02430
 DIM02440
 DIM02450
 DIM02460
 DIM02470
 DIM02480
 DIM02490
 DIM02500
 DIM02510
 DIM02520
 DIM02530
 DIM02540
 DIM02550
 DIM02560
 DIM02570
 DIM02580
 DIM02590
 DIM02600
 DIM02610
 DIM02620
 DIM02630
 DIM02640
 DIM02650
 DIM02660
 DIM02670
 DIM02680
 DIM02690
 DIM02700
 DIM02710
 DIM02720
 DIM02730
 DIM02740
 DIM02750

```

DIMENSION A(100), R(100)
DIMENSION COM(10,12), ICOM(5), ICOMX(5)
DIMENSION C1(100), C2(100)
DIMENSION RXT(100), RS1(100), RS2(100)
PRT1 = 1.0, K1T2, K1T3, K1T4, K2T2, K2T3, K2T4
C1 = COM(10,1) * RMAX, AMIN, PMAX, PMIN, REPR, R1PR, REPT, R1PT, RER, RIR,
1 RET, RIT, DMIN, DMAX, REPD, NT
COMMON /TEST1/ TAB, TAB1, AK1R, AK1T, AK2R,
1 AK2T, IORD
COMMON /TAB1/ RPHAX, RPEMIN, RPHMAX, RMIN, A, R, NV1, IML
COMMON /C1/ C1, C2
COMMON /ITC/ E, PN, C3, AK3, PHAXD, PHIND, HSR, IMEN, ICOMD1, ICOM2, ICOM3
COMMON /MAX/ CUMAX, NSOLM, RM, AM, PHIND1, PHAXD1, PORMX, POTMX,
1 DMAX, DMAXP, DMAX, DMAXP1, RDPDM, IDMP
COMMON /DLIM/ DMAXP, DMAX, DMAXP1, RDPDM, IDMP
COMMON /EL/ F, SENS, SENS1
COMMON /UNI/ DC, DG, DGB, COMP1, ALARG, RXTM, RXT, IUNI, RS1, RS2,
1 RS1M, RS2M
PRTM = 4. * E * DMIN * DMAX * AK3 / ((1. - PN * PN) * TAB1(IITAB))
PRTM = ABS(PRTM)
IF (PRTM .LE. PMIR) GO TO 50
ICOM(IEN) = B
IMEN = IMEN + 1
CONTINUE
LMAX = DMAX
SENS1 = SENS
IF (SENS1 .EQ. 0.) GO TO 150
DMAX = 2. * SENS * AK1R(IND) / (F * TAB1(IITAB))
IF (DMAX .LE. DMAXA) GO TO 160
ICOM(IEN) = 10
IMEN = IMEN + 1
SENS1 = 0.
DMAX = DMAXA
CONTINUE
IF (IUNIT .EQ. 1) GO TO 200
IF (NSOL .NE. 2) GO TO 250
RDPDM = 3. * RPHAX * RPHAX - R(IND) * R(IND)
RDPDM = - RDPDM / (R(IND) * R(IND) * AK1R(IND))
GO TO 300
RDPDM = 2. * C1(IND) - C2(IND) / (RPHAX * RPHAX)
RDPDM = (RDPDM * 2. * (2. * LOG(RPHAX) + 1.)) / AK1R(IND)
IF (RDPDM * DMAXP .LE. 0.) GO TO 350
IF (IDMP1 .EQ. 0) GO TO 350
IF (DMAXF / RDPDM .GT. DMAXA) GO TO 350
DMAX = DMAXP / RDPDM
DMAXF = DMAXP
GO TO 200
DMAXF1 = DMAX * RDPDM
IF (IDMP .EQ. 0) GO TO 200

```

FILE: DINCEN IMPRI A INTEREE CERUTOS I TOA


```

END
SUBROUTINE PROCEL (NSOL , ITAB , IND , ISUP , PHINR , PHAXR )
  DIMENSION TAB(300) , TAB1(300)
  DIMENSION IORD(300)
  DIMENSION AK1R(100) , AK1T(100) , AK2R(100) , AK2T(100)
  DIMENSION A(100) , R(100)
  DIMENSION COM(10,12) , ICOM(5) , ICOMM(5)
  DIMENSION C1(100) , C2(100)
  DIMENSION EX1(100) , RS1(100) , RS2(100)
  REAL K1K2 , K1T2 , K1R3 , K1T3 , K2R2 , K2T2 , K2R3 , K2T3
  COMMON /CONS/ RMAX,AMIN,PHAX,PHIN,REPR,K1R1,REPT,K1R1,K1R2,
1    RET,RIT,DMINH,DHAXA,REPD,NT
  COMMON /TEST/ TAB , TAB1 , AK1R , AK1T , AK2R ,
1    AK2T , IORD
  COMMON /TAB1/ RPHAX,RPENIN,RPIMAX,RHIN,A,R,NV1,IML
  COMMON /C/ C1 , C2
  COMMON /ITC/ E , PH , C3 , AK3 , PHAXD , PHIND , HSR , IMEN , ICOMD
  COMMON /MAX/ CVMAX,RSOLH,RH,AM,PHIND1,PHAXD1,PORMX,POTMX,
1    DMAXH,DMAXPH,SENSM,ICOMH
  COMMON /DLIM/ DMAXP ,DMAX , DMAXP1 , RDPDM , IDMP
  COMMON /EL/ F , SENS , SENS1
  COMMON /UNI/ PC,DG,DCB,COMP,COMP1,ALARG,RXTM,RXT,IUNI,RS1,RS2,
1    RS1M,RS2M
  IF (ISUP.EQ.0.) GO TO 300
  IF (SENS1.NE.0.) GO TO 400
  HSR = PHINR*PHAXR**9.*(1.-PN*PN)**2*AK1R(IND)*TAB1(ITAB)
  HSR = HSR/(32.*F*E*DMAX*DMINH)
  HSR = ABS(HSR) ** 0.25
  PHAXD = 8.*HSR*HSR*E*DMAX/(3.*(1.-PN*PN)*AK1R(IND))
  GO TO 200
400  FER = 3.*PHAXR*F*TAB1(ITAB)/(16.*E*SENS1)
  HSR = ABS(HER*(1.-PN*PN)) ** 0.5
  PHAXD = PHAXR
  GO TO 200
500  HSR = PHINR*PHAXR**27.*(1.-PN*PN)**2*AK3*TAB1(ITAB)
  HSR = HSR/(16.*E*E*DMINH)
  HSR = ABS(HSR) ** (1./6.)
  PHAXD = 4.*HSR**4*E/(9.*(1.-PN*PN)*AK3)
  IF (SENS1.EQ.0.) GO TO 200
  SENS1 = 0.
  ICOM(IND) = 10
  ICOM(IND) = 1
  ICOM(IND) = 1
  CONTINUE
  PHAXD = 4.*DMINH*HSR*HSR*E/(3.*TAB1(ITAB)*(1.-PN*PN))
  IF (SENS1.NE.0.) GO TO 100
  SENS1 = 3.*F*PHAXD*(1.-PN*PN)*TAB1(ITAB)/(16.*E*HSR*HSR)
  SENS1 = ABS(SENS1)
  DMAX = 2.*SENS1*AK1R(IND)/(F*TAB1(ITAB))
  DMAX = ABS(DMAX)
  DMAXP1 = DMAX*RDPDM
  CONTINUE
100  WRITE(6,5000) HSR,ITAB , ISUP
  GO TO 100
50000  FORMAT(' HSR , ITAB , ISUP ,F15.4,2I5)
  RETURN

```

DIM03860
 DIM03870
 DIM03880
 DIM03890
 DIM03900
 DIM03910
 DIM03920
 DIM03930
 DIM03940
 DIM03950
 DIM03960
 DIM03970
 DIM03980
 DIM03990
 DIM04000
 DIM04010
 DIM04020
 DIM04030
 DIM04040
 DIM04050
 DIM04060
 DIM04070
 DIM04080
 DIM04090
 DIM04100
 DIM04110
 DIM04120
 DIM04130
 DIM04140
 DIM04150
 DIM04160
 DIM04170
 DIM04180
 DIM04190
 DIM04200
 DIM04210
 DIM04220
 DIM04230
 DIM04240
 DIM04250
 DIM04260
 DIM04270
 DIM04280
 DIM04290
 DIM04300
 DIM04310
 DIM04320
 DIM04330
 DIM04340
 DIM04350
 DIM04360
 DIM04370
 DIM04380
 DIM04390
 DIM04400


```

END
SUBROUTINE TABCEL(NSOL)
  DIMENSION TAB(300), TAB1(300)
  DIMENSION IORD(300)
  DIMENSION AK1R(100), AK1T(100), AK2R(100), AK2T(100)
  DIMENSION A(100), R(100)
  DIMENSION COM(10,12), ICOM(5), ICOMH(5)
  DIMENSION C1(100), C2(100)
  DIMENSION RXI(100), RS1(100), RS2(100)
  REAL K1R2, K1T2, K1R3, K1T3, K2R2, K2T2, K2R3, K2T3
  COMMON /CONS/ RMAX,AMIN,PMAX,PMIN,REPR,RIPR,REPT,RIPT,REX,RIR,
1  RET,RII,DHINH,DHAXA,REPD,NT
  COMMON /TEST/ TAB, TAB1, AK1R, AK1T, AK2R,
1  AK2T, IORD
  COMMON /TAB1/ RPHAX,RPENIN,RPIMAX,RHIN,A,R,NV1,IML
  COMMON /C/ C1, C2
  COMMON /IIC/ I, PN, C3, AK3, PMAXD, PHIND, HSR, IMEN, ICOND
  COMMON /MAX/ CUMAX,NSOLM,RH,AM,PHIND1,PMAXD1,PORHX,POTMX,
1  DHAXM,DHAXPM,SENSH,ICOMH
  COMMON /DIM/ DHAXP, DHAX, DMAXP1, RDPDM, IDMP
  COMMON /EL/ F, SENS, SENS1
  COMMON /UNI/ DC,DG,DCB,COMP,COMP1,ALARG,RXTM,RXT,IUNI,RS1,RS2,
1  RS1H,RS2H
  C
  RHIN = AMAX1(RPHAX,AMIN/D.B)
  NV = 9
  DELR = (RMAX - RHIN)/FLOAT(NV)
  NV1 = NV + 1
  DO 10 I = 1, NV1
    R1 = FMIN + FLOAT(I-1)*DELR
    DELA = (D.B*R1 - AMIN)/FLOAT(NV)
    IND = NV1*(I-1) + 1
    IF(NSOL.NE.2) GO TO 110
    AK1R(IND) = K1R2(R1)
    AK1T(IND) = K1T2(R1)
    AK2R(IND) = K2R2(R1,REX,RIR)
    AK2T(IND) = K2T2(R1,REX,RIR)
    CONTINUE
    DO 20 J = 1, NV1
      IND = NV1*(I-1) + J
      A1 = AMIN + DELA * FLOAT(J-1)
      C1(IND) = 2. * (R1*R1*LOG(R1) - A1*A1*LOG(A1)) + A1*A1 - R1*R1
      C1(IND) = C1(IND) / (A1*A1 - R1*R1)
      C2(IND) = 4. * A1*A1*R1*R1 * (LOG(A1) - LOG(R1))
      C2(IND) = C2(IND) / (A1*A1 - R1*R1)
      IF(NSOL.EQ.2) A1 = 0.
      A(IND) = A1
      R(IND) = R1
      TAB(3*IND) = 0.
      TAB1(3*IND) = 0.
      TAB(3*IND-1) = 0.
      TAB1(3*IND-1) = 0.
      TAB(3*IND-2) = 0.
      TAB1(3*IND-2) = 0.
      RXT(IND) = 0.

```

```

100 IF (NSOL.EQ.2) GO TO 100
    AK1F(IND) = K1R3(R1,A1,C1(IND),C2(IND))
    AK1T(IND) = K1T3(R1,A1,C1(IND),C2(IND))
    AK2R(IND) = K2R3(RER,R1R,A1,C1(IND),C2(IND))
    AK2T(IND) = K2T3(RET,R1T,A1,C1(IND),C2(IND))
    CONTINUE
30 IF (IML.EQ.2) GO TO 30
    TAB(IND*3-2) = AK1T(IND) * AK2T(IND) - AK1R(IND) * AK2R(IND)
    TAB1(IND*3-2) = ABS(TAB(IND*3-2))
    IF (IML.EQ.1.OR.A1.GT.RFIMAX.OR.NSOL.EQ.2) GO TO 40
    TAB(3*IND-1) = AK1T(IND) * AK2T(IND) + AK1R(IND) * AK2R(IND)
    TAB1(3*IND-1) = ABS(TAB(3*IND-1))
    IF (AK2T(IND)*AK2R(IND).NE.0.) GO TO 40
    IF (AK2R(IND).EQ.0..AND.AK2T(IND).EQ.0.) GO TO 40
    IF (AK2R(IND).EQ.0.) GO TO 50
    TAB(3*IND) = 2.*AK1R(IND)*AK2R(IND)
    GO TO 40
50 TAB(3*IND) = 2.*AK1T(IND)*AK2T(IND)
40 CONTINUE
20 TAB(3*IND) = ABS(TAB(3*IND))
10 CONTINUE
    RETURN
END
SUBROUTINE ORDCEL
    DIMENSION TAB(300), TAB1(300)
    DIMENSION IORD(300)
    DIMENSION AK1R(100), AK1T(100), AK2R(100), AK2T(100)
    DIMENSION A(100), R(100)
    DIMENSION CON(10,12), ICON(5), ICONH(5)
    DIMENSION C1(100), C2(100)
    DIMENSION RX1(100), RS1(100), RS2(100)
    REAL K1R2, K1T2, K1R3, K1T3, K2R2, K2T2, K2R3, K2T3
    COMMON /CONS/ RMAX,AMIN,PHAX,PHIN,REPR,RIPR,REPT,RIPT,RER,RIR,
1    RET,RT,DMIN,DMAX,REPD,NT
1    COMMON /TEST/ TAB, TAB1, AK1R, AK1T, AK2R,
        AK2T, IORD
    COMMON /IAB1/ PFMAX,RFEMIN,RPIMAX,RMIN,A,R,NV1,IHL
    COMMON /C/ C1, C2
    COMMON /IIC/ E, PH, C3, AK3, PHAXD, PMIND, HSR, INEN, ICOMB
    COMMON /MAX/ CMAX,NSOLM,RM,AM,PHIND1,PMAXD1,PORHX,POTNX,
1    DMAX,DMAXPM,SENSM,ICOMH
    COMMON /DLM/ DMAXP,DMAX, DMXP1, RDPDM, IDMP
    COMMON /EI/ F, SENS, SENS1
    COMMON /UNI/ DC,DC,DCB,COMP,COMP1,ALARG,RXTM,RXT,IUNI,RS1,RS2,
1    RS1M,RS2M
    NV2 = NV1 * NV1 * 3
    DO 10 I = 1, NV2
        IORD(I) = IND
        NV21 = NV2 - 1
        DO 20 J = 1, NV21
            I1 = J + 1
            DO 30 J = I1, NV2

```

FILE: DIMCEL IMPRI A INTERTEC SERVICOS LTDA.

```

IF (TAB1(IORD(I)).GE.TAB1(IORD(J))) GO TO 300
IORD1 = IORD(J)
IORD(J) = IORD(I)
IORD1 = IORD(J)

```

DIM05510
DIM05520
DIM05530

DIM04960
DIM04970
DIM04980
DIM04990
DIM05000
DIM05010
DIM05020
DIM05030
DIM05040
DIM05050
DIM05060
DIM05070
DIM05080
DIM05090
DIM05100
DIM05110
DIM05120
DIM05130
DIM05140
DIM05150
DIM05160
DIM05170
DIM05180
DIM05190
DIM05200
DIM05210
DIM05220
DIM05230
DIM05240
DIM05250
DIM05260
DIM05270
DIM05280
DIM05290
DIM05300
DIM05310
DIM05320
DIM05330
DIM05340
DIM05350
DIM05360
DIM05370
DIM05380
DIM05390
DIM05400
DIM05410
DIM05420
DIM05430
DIM05440
DIM05450
DIM05460
DIM05470
DIM05480
DIM05490
DIM05500

```

IF(TAB1(IORD(I)),GE,TAB1(IORD(J))) GO TO 300
IORD1 = IORD(J)
IORD(J) = IORD(I)
IORD(I) = IORD1
CONTINUE
300 CONTINUE
30 CONTINUE
20 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE TACELU (NSOL)
  DIMENSION TAB(300), TAB1(300)
  DIMENSION IORD(300)
  DIMENSION AK1R(100), AK1T(100), AK2R(100), AK2T(100)
  DIMENSION A(100), R(100)
  DIMENSION COM(10,12), ICOM(5), ICOMK(5)
  DIMENSION C1(100), C2(100)
  DIMENSION RXT(100), RS1(100), RS2(100)
  REAL K1R2, K1T2, K1R3, K1T3, K2R2, K2T2, K2R3, K2T3
  COMMON /CONS/ RMAX,AMIN,PMAX,PMIN,REPR,RIPT,REPR,RIR,
1 RET,RTI,DWINH,DHAXA,REPD,NT
1 COMMON /TEST/ TAB, TAB1, AK1R, AK1T, AK2R,
1 AK2T, IORD
COMMON /TAB1/ RPHAX,RPENIN,RPIMAX,RMIN,A,R,NV1,IML
COMMON /C/ C1, C2
COMMON /ITC/ E, PN, C3, AK3, PMAXD, PMIND, HSR, IMEN, ICOND
COMMON /MAX/ CUMAX,NSOLH,RH,AN,PHIND1,PMAXD1,PORHX,POTMX,
1 DHAXH,DHAXPH,SENSH,ICOMH
COMMON /DLIM/ DHAXP, DHAX, DHAXP1, ROPDM, IDMP
COMMON /EL/ F, SENS, SENS1
COMMON /UNI/ DC,DG,DCB,COMP,COMP1,ALARB,RXTM,RXT,IUNI,RS1,RS2,
1 RS1M,RS2M
C AKR2(RS1,R1) = (3.*RS1*RS1-R1*R1)/(R1*R1)
C AKR3(RS1,A1,CA1,CA2) = 2.*CA1-CA2/(RS1*RS1)+2.*(2.*LOG(RS1)+1.)
RMIN = AMIN + COMP1
NV = 9
DELR = (RMAX - RMIN)/FLOAT(NV)
NV1 = NV + 1
DO 10 I = 1,NV1
  R1 = SMIN + FLOAT(I-1) * DELR
  DELA = (R1-COMP1-AMIN)/FLOAT(NV)
  IND = NV1*(I-1) + 1
  IF(NSOL.NE.2) GO TO 110
  AK1R(IND) = K1R2(R1)
  RS1(IND) = R1 - DC
  RS2(IND) = DC
  AK1T(IND) = AKR2(RS1(IND),R1)
  AK2T(IND) = AKR2(RS2(IND),R1)
  CONTINUE
  DO 20 J = 1,NV1
    IND = NV1*(I-1) + J
    A1 = AMIN + DELA * FLOAT(J-1)
    IF(NSOL.EQ.2) A1 = 0.
    A(IND) = A1
110

```

DIM05510
 DIM05520
 DIM05530
 DIM05540
 DIM05550
 DIM05560
 DIM05570
 DIM05580
 DIM05590
 DIM05600
 DIM05610
 DIM05620
 DIM05630
 DIM05640
 DIM05650
 DIM05660
 DIM05670
 DIM05680
 DIM05690
 DIM05700
 DIM05710
 DIM05720
 DIM05730
 DIM05740
 DIM05750
 DIM05760
 DIM05770
 DIM05780
 DIM05790
 DIM05800
 DIM05810
 DIM05820
 DIM05830
 DIM05840
 DIM05850
 DIM05860
 DIM05870
 DIM05880
 DIM05890
 DIM05900
 DIM05910
 DIM05920
 DIM05930
 DIM05940
 DIM05950
 DIM05960
 DIM05970
 DIM05980
 DIM05990
 DIM06000
 DIM06010
 DIM06020
 DIM06030
 DIM06040
 DIM06050

```

R(IND) = R1
TAB(3*IND) = 0.
TAB1(3*IND) = 0.
TAB(3*IND-1) = 0.
TAB1(3*IND-1) = 0.
TAB(3*IND-2) = 0.
TAB1(3*IND-2) = 0.
RXT(IND) = 0.
IF(NSOL.EQ.2) GO TO 100
RS1(IND) = A1 + DC
RS2(IND) = R1 - DC
IF(ABS(DELA).LT.1.E-06.AND.I.61.1) GO TO 40
C1(IND) = 2.*(R1*R1*LOG(R1)-A1*A1*LOG(A1))+A1*A1-R1*R1
C1(IND) = C1(IND) / (A1*A1-R1*R1)
C2(IND) = 4.*A1*A1*R1*R1*(LOG(A1)-LOG(R1))
C2(IND) = C2(IND) / (A1*A1 - R1*R1)
AK1R(IND) = K1R3(R1,A1,C1(IND),C2(IND))
AK1T(IND) = AKR3(RS1(IND),A1,C1(IND),C2(IND))
AK2T(IND) = AKR3(RS2(IND),A1,C1(IND),C2(IND))
CONTINUE
100 IF(1ML.EQ.2.AND.NSOL.NE.2) GO TO 30
TAB(IND*3-2) = AK1T(IND) - AK2T(IND)
TAB1(IND*3-2) = ABS(TAB(IND*3-2))
IF(1ML.EQ.1.OR.NSOL.EQ.2) GO TO 40
TAB(3*IND-1) = 2.*AK1T(IND)
RXT(IND) = RS1(IND)
IF(ABS(AK1T(IND)).GT.ABS(AK2T(IND))) GO TO 50
TAB(3*IND-1) = 2.*AK2T(IND)
FXT(IND) = RS2(IND)
100 TAB1(3*IND-1) = ABS(TAB(3*IND-1))
CONTINUE
40 CONTINUE
20 CONTINUE
10 CONTINUE
END
SUBROUTINE CANCEL
COMMON /CONS/ RNAX,AMIN,PHAX,PMIN,REPR,RIPR,REPT,RIPT,RR,RIR,
1 CORAN /IIC/ E, FN, C3, AK3, PHAXD, PMIND, HSR, IMEN, ICOND
COMMON /DIH/ DHAXP, DMAX, DHAXP1, IDMP
COMMON /EL/ F, SENS
COMMON /UNI/ DC,DG,DCB,COMP,COMP1,ALARG,RXTM,RXT,IUNI,RS1,RS2,
1 RS1H,RS2H
DIMENSION RXT(100), RS1(100), RS2(100)
IF(DC.GT.0.) GO TO 10
CALL ERCEL(5,4H 0.,4H DC)
10 IF(COMP.GT.0.) GO TO 20
CALL ERCEL(5,4H 0.,4HCOMP)
20 IF(DG.GT.0.) GO TO 30
CALL ERCEL(5,4H 0.,4H DG)
30 IF(DC.GT.DG) GO TO 40
CALL ERCEL(5,4H DG,4H DC)
40 IF(DCB.GT.DG) GO TO 50
CALL ERCEL(5,4H DG,4H DCB)
50 IF(COMP.GT.DCB) GO TO 60

```

```

CALL ERCEL(5,4H DCB,4HCOMP)
60 IF (DCB.LE.DC) GO TO 70
CALL ERCEL(1,4H DCB,4H DC)
70 COMP = COMP - DCB + DC + ALARG/2.
IF (ALARG.GT.0.) GO TO 80
CALL ERCEL(5,4H 0.,4HARG)
80 IF (COMP.LE.PMAX.AMIN) GO TO 90
CALL ERCEL(1,4HCOMP,4H R-A)
90 IF (SEPD.LE.0.2) GO TO 130
CALL ERCEL(3,4HSEPD,4H0.2)
130 IF (DHINM.LE.DMAXA) GO TO 140
CALL ERCEL(1,4HDMAXA,4HDMAXA)
140 IF (0.LE.NT) GO TO 150
CALL ERCEL(1,4H 0.,4H NT)
150 IF (PHIN.LE.PMAX) GO TO 160
CALL ERCEL(1,4HPHIN,4HPPMAX)
160 IF (PMIN.GT.0.) GO TO 170
CALL ERCEL(5,4H 0.,4HPPMIN)
170 ICMP = 0
DMAXP = 0.
IF (F.GI.0.) GO TO 210
CALL ERCEL(5,4H 0.,4H F)
210 IF (SENS.GE.0.) GO TO 220
CALL ERCEL(1,4H 0.,4HSENS)
220 CONTINUE
CUREQ = PMAX/PMIN
WRITE(6,1) RHAX,AMIN,COMP,DCB,DG,DC,ALARG,
1 DMAXA,DHINM
WRITE(6,2) PMAX,PHIN,CVREQ,SENS,F,E,PN
RETURN
1
FORMAT(1H,15,'DESCRICAO DO PROBLEMA',/,
1 15,'RAIOS DO DIAFRAGMA PESQUISADOS (CM) :',/,
2 15,'EXTERNO MAXIMO =',F12.3,/,
3 15,'DIMENSOES DO EXTENSOMETRO NA DIRECAO DO FILAMENTO (CM) :',/,
4 15,'COMPRIMENTO =',F12.3,/,
5 15,'DISTANCIA CENTRO/BORDA DA PLACA DO EXTENSOMETRO =',F12.3,/,
6 15,'DISTANCIA BORDA DA GRADE / BORDA DA PLACA =',F12.3,/,
7 15,'DISTANCIA CENTRO EXTENSOMETRO/BORDA DIAFRAGMA =',F12.3,/,
8 15,'LARGURA DA PLACA DO EXTENSOMETRO =',F12.3,/,
9 15,'DEFORMACOES :',/,
A 15,'MAXIMA ADMISSIVEL =',E12.4,/,
FORMAT(15,'FORÇAS (KGF) :',/,
1 15,'MAXIMA =',F12.3,/,
2 15,'MAXIMA / MINIMA =',F12.3,/,
3 15,'SENSIBILIDADE =',E12.4,/,
4 15,'GAGE FACTOR F =',F12.3,/,
5 15,'MATERIAL :',/,
6 15,'E (KGF/CM2) =',E12.4,/,
7 15,'NUMERO DE POISSON =',F12.3,/)
END
SUBROUTINE CONCEL (RPMAX,RPMIN,RPIMAX,IML)
COMMON /CONS/ RHAX,AMIN,PHAX,PHIN,REPR,RIPR,REPT,RIPT,RR,RIR,
1 RET,RII,DHINM,DMAXA,REPD,NT
COMMON /ITC/ E,PN,C3,AK3,PMAXD,PMIND,HSR,IMEN,ICOMD
COMMON /DLIN/ DMAXP,DMAX,DMAXP1,DMPP

```

```

DIM06610
DIM06620
DIM06630
DIM06640
DIM06650
DIM06660
DIM06670
DIM06680
DIM06690
DIM06700
DIM06710
DIM06720
DIM06730
DIM06740
DIM06750
DIM06760
DIM06770
DIM06780
DIM06790
DIM06800
DIM06810
DIM06820
DIM06830
DIM06840
DIM06850
DIM06860
DIM06870
DIM06880
DIM06890
DIM06900
DIM06910
DIM06920
DIM06930
DIM06940
DIM06950
DIM06960
DIM06970
DIM06980
DIM06990
DIM07000
DIM07010
DIM07020
DIM07030
DIM07040
DIM07050
DIM07060
DIM07070
DIM07080
DIM07090
DIM07100
DIM07110
DIM07120
DIM07130
DIM07140
DIM07150

```



```

COMMON /EL/ F , SENS
IF(RIPR.LE.REPR) GO TO 10
CALL ERCEL(1,4HRIPR,4HREPR)
10 IF(RIPT.LE.REPT) GO TO 20
CALL ERCEL(1,4HRIPT,4HREPT)
20 IF(RIR.LE.RER) GO TO 30
CALL ERCEL(1,4HIR,4H RER)
30 IF(RIT.LE.RET) GO TO 40
CALL ERCEL(1,4HRI,4H RET)
40 IF(RER.LE.REPR) GO TO 50
CALL ERCEL(1,4HRER,4HREPR)
50 IF(REPT.LE.REPT) GO TO 60
CALL ERCEL(1,4HRET,4HREPT)
60 IF(RIPR.LE.RIR) GO TO 70
CALL ERCEL(1,4HRIPR,4HIR)
70 IF(RIPT.LE.RIT) GO TO 80
CALL ERCEL(1,4HRIPT,4HRI)
80 IF(O..LE.RIPR) GO TO 90
CALL ERCEL(1,4H O.,4HRIPR)
90 IF(O..LE.RIPT) GO TO 100
CALL ERCEL(1,4H O.,4HRIPT)
100 RPRMAX = AMAX1(KEPT,REPR)
RPERIN = AMIN(KEPT,REPR)
IF(RPRMAX.LE.RMAX) GO TO 110
CALL ERCEL(1,4HPRMA,4HRMAX)
110 IF(AMIN.LT.O.8*RMAX) GO TO 120
CALL ERCEL(2,4HAMIN,4HO.8*)
120 IF(RIPR.LE.O.2) GO TO 130
CALL ERCEL(3,4HREPR,4HO.2)
130 IF(AMIN.LE.DMAXA) GO TO 140
CALL ERCEL(1,4HDMNA,4HDMXA)
140 IF(O.LE.NT) GO TO 150
CALL ERCEL(1,4H O.,4H NT)
150 IF(RIPR.LE.RMAX) GO TO 160
CALL ERCEL(1,4HPRIN,4HRMAX)
160 IF(PHIN.GT.O.) GO TO 170
CALL ERCEL(5,4H O.,4HPHIN)
170 IF(RIR.NE.RER) GO TO 180
CALL ERCEL(4,4HRIR,4H RER)
180 IF(RIT.NE.RET) GO TO 190
CALL ERCEL(4,4HRI,4HRET)
190 IF(DMAXA.GE.ABS(DMAXP)) GO TO 200
CALL ERCEL(1,4HDMXP,4HDMXA)
200 RPIHAX = AMAX1(RIPT,RIPR)
IF(.GT.O.) GO TO 210
CALL ERCEL(5,4H O.,4H F)
210 IF(SENS.GE.O.) GO TO 220
CALL ERCEL(1,4H O.,4HSENS)
220 CONTINUE
CUREQ = PMAX/PHIN
WRITE(6,1) RMAX,AMIN,REPR,RIPR,RER,RIR,REPT,RIPT,RET,RIT,
1 DMAXA,DMINH,DMAXP
WRITE(6,2) PMAX,PHIN,CUREQ,SENS,F,E,PN
IF(RPERIN.GT.RPIHAX) IML = 2
RETURN

```

DIM07160
 DIM07170
 DIM07180
 DIM07190
 DIM07200
 DIM07210
 DIM07220
 DIM07230
 DIM07240
 DIM07250
 DIM07260
 DIM07270
 DIM07280
 DIM07290
 DIM07300
 DIM07310
 DIM07320
 DIM07330
 DIM07340
 DIM07350
 DIM07360
 DIM07370
 DIM07380
 DIM07390
 DIM07400
 DIM07410
 DIM07420
 DIM07430
 DIM07440
 DIM07450
 DIM07460
 DIM07470
 DIM07480
 DIM07490
 DIM07500
 DIM07510
 DIM07520
 DIM07530
 DIM07540
 DIM07550
 DIM07560
 DIM07570
 DIM07580
 DIM07590
 DIM07600
 DIM07610
 DIM07620
 DIM07630
 DIM07640
 DIM07650
 DIM07660
 DIM07670
 DIM07680
 DIM07690
 DIM07700

DIM07710 DIM07720 DIM07730 DIM07740 DIM07750 DIM07760 DIM07770 DIM07780 DIM07790 DIM07800 DIM07810 DIM07820 DIM07830 DIM07840 DIM07850 DIM07860 DIM07870 DIM07880 DIM07890 DIM07900 DIM07910 DIM07920 DIM07930 DIM07940 DIM07950 DIM07960 DIM07970 DIM07980 DIM07990 DIM08000 DIM08010 DIM08020 DIM08030 DIM08040 DIM08050 DIM08060 DIM08070 DIM08080 DIM08090 DIM08100 DIM08110 DIM08120 DIM08130 DIM08140 DIM08150 DIM08160 DIM08170 DIM08180 DIM08190 DIM08200 DIM08210 DIM08220 DIM08230 DIM08240 DIM08250

```

B 4HNAO,4HATIN,4HBE 0,4H CAM,4HPO D,4HE VA,4HRIAC,4HAO R,
C 4HEQUE,4HRIDO,4HNAO,4HATIN,4HSE A,4H SEN,4HSIBI,4HLIDA,
D 4HRE R,4HEQUE,4HRIDO,4H 4HDEF0,4HRMAC,4HAO N,4HA BO,
E 4HIDA,4H NA,4HO E,4HA KE,4HQUER,4HIDA,4HEXTE,4HNSOM,
F 4HRO,4H EN,4HLOCA,4HL IN,4HDEF0,4HRMAD,4HO,4H /
IF (CIPRES.EQ.0) WRITE(6,6) FMAX,FMIN,CV
IF (CIPRES.NE.0) WRITE(6,7) FMAX,FMIN,CV
IF (IUNI.RE.1) WRITE(6,1) R1,A1,H,DHAXP,DHAX,SENS,
1 ((CCH(J,ICOM(I))),J=1,10),I=1,5)
IF (IUNI.EQ.1) WRITE(6,2) R1,A1,H,DHAX,SENS
IF (IUNI.EQ.1.AND.MOD(ITAB,3).EQ.2) WRITE(6,3) RXT
IF (IUNI.EQ.1.AND.MOD(ITAB,3).NE.2) WRITE(6,5) RS1,RS2
RETURN
2 FORMAT (15,'GEOMETRIA DO DIAFRAGMA :',
1 /15,'RAIO EXTERNO (CM) =',F12.3,
2 /15,'RAIO INTERNO (CM) =',F12.3,
3 /15,'ESPESSURA (CM) =',F12.3,
4 /15,'DEFORMACOES PARA CARGA MAXIMA :',
5 /15,'DEFORMACAO NA BORDA DA PLACA =',E12.4,
6 /15,'DEFORMACAO MAXIMA =',E12.4,
7 /15,'SENSIBILIDADE (V/V) =',E12.4,
8 /15,'COMENTARIOS :',T30,'EXTENSOMETROS BIDIRECIONAIS',
9 /5(T30,10A4,/)
2 FORMAT (15,'GEOMETRIA DO DIAFRAGMA :',
1 /15,'RAIO EXTERNO (CM) =',F12.3,
2 /15,'RAIO INTERNO (CM) =',F12.3,
3 /15,'ESPESSURA (CM) =',F12.3,
4 /15,'DEFORMACOES PARA CARGA MAXIMA :',
5 /15,'DEFORMACAO MAXIMA =',E12.4,
6 /15,'SENSIBILIDADE (V/V) =',E12.4)
3 FORMAT (15,'POSICAO DOS 4 EXTENSOMETROS R=',F12.3)
4 FORMAT (15,'COMENTARIOS :',T30,'EXTENSOMETROS UNIDIRECIONAIS',
1 /5(T30,10A4,/)
5 FORMAT (15,'2 EXTENSOMETROS COLOCADOS EM R=',F12.3,
1 /15,'2 EXTENSOMETROS COLOCADOS EM R=',F12.3)
6 FORMAT(/15,'FORCA MAXIMA MEDIDA (KGF) =',F12.3,
1 /15,'FORCA MINIMA MEDIDA (KGF) =',F12.3,
2 /15,'FORCA MAXIMA / MINIMA =',F12.3)
7 FORMAT(/15,'PRESSAO MAXIMA MEDIDA-KGF/CM2 =',F12.3,
1 /15,'PRESSAO MINIMA MEDIDA-KGF/CM2 =',F12.3,
2 /15,'PRESSAO MAXIMA / MINIMA =',F12.3)
END
REAL FUNCTION K1R2(REXT)
K1R2 = 2.
RETURN
END
REAL FUNCTION K1T2(REXT)
K1T2 = -1.
RETURN
END
REAL FUNCTION K1R3(REXT,A,C1,C2)
K1R3 = 2.*C1-C2/(A*A)+2.*(2.*LOG(A)+1.)
RETURN
END

```

```

REAL FUNCTION K1T3(EXT,A,C1,C2)
  K1T3 = 2.*C1 + 2.*LOG(C2/2.)
  RETURN
END
REAL FUNCTION K2R2(EXT,RESG,RISG)
  K2R2 = RESG*RESG+RISG*RISG+RISG*RESG-EXT*EXT
  K2R2 = K2R2/(EXT*EXT*2.)
  K2R2 = K2R2/(EXT*EXT*K1R2(EXT))
C
C
  ONCE K1R2(EXT) = 2.  SEMPRE
  RETURN
END
REAL FUNCTION K2T2(EXT,RESG,RISG)
  K2T2 = RESG*RESG+RISG*RISG-2.*EXT*EXT
  K2T2 = K2T2/(2.*EXT*EXT*(-1.))
  K2T2 = K2T2/(2.*EXT*EXT*K1T2(EXT))
C
C
  ONCE K1T2(EXT) = -1.  SEMPRE
  RETURN
END
REAL FUNCTION K2R3(RESG1,RISG1,A,C1,C2)
  IF(A.GT.RESG1) GO TO 10
  RESG = RESG1
  RISG = RISG1
  IF(A.LT.RISG1) GO TO 20
  RISG = A
  K2R3 = 2.*C1*(RESG-RISG)+C2*(RISG-RESG)/(RISG*RESG)
  K2R3 = K2R3+2.*(RESG-RISG)
  K2R3 = K2R3+4.*(RESG*(LOG(RESG)-1.))-RISG*(LOG(RISG)-1.)
  K2R3 = K2R3/(RESG1-RISG1)
  K2R3 = K2R3/(2.*C1-C2/(A*A))+2.*(2.*LOG(A)+1.)
  K2R3 = K2R3/K1R3(EXT,A)
  GO TO 30
10 K2R3 = 0.
30 CONTINUE
  RETURN
END
REAL FUNCTION K2T3(RESG1,RISG1,A,C1,C2)
  IF(A.GT.RESG1) GO TO 10
  RESG = RESG1
  RISG = RISG1
  IF(A.LT.RISG1) GO TO 20
  RISG = A
  K2T3 = (C1-2.)*(RESG*RESG-RISG*RISG)+C2*(LOG(RESG)-LOG(RISG))
  K2T3 = K2T3+2.*(RESG*RESG*LOG(RESG)-RISG*RISG*LOG(RISG))
  K2T3 = K2T3/(RESG1*RESG1-RISG1*RISG1)
  K2T3 = K2T3/(C1+LOG(C2/2.))
  K2T3 = K2T3*K2R2/(K1T3(EXT,A))
  GO TO 30
10 K2T3 = 0.
30 CONTINUE
  RETURN
END

```

DIM08810
 DIM08820
 DIM08830
 DIM08840
 DIM08850
 DIM08860
 DIM08870
 DIM08880
 DIM08890
 DIM08900
 DIM08910
 DIM08920
 DIM08930
 DIM08940
 DIM08950
 DIM08960
 DIM08970
 DIM08980
 DIM08990
 DIM09000
 DIM09010
 DIM09020
 DIM09030
 DIM09040
 DIM09050
 DIM09060
 DIM09070
 DIM09080
 DIM09090
 DIM09100
 DIM09110
 DIM09120
 DIM09130
 DIM09140
 DIM09150
 DIM09160
 DIM09170
 DIM09180
 DIM09190
 DIM09200
 DIM09210
 DIM09220
 DIM09230
 DIM09240
 DIM09250
 DIM09260
 DIM09270
 DIM09280
 DIM09290
 DIM09300
 DIM09310
 DIM09320
 DIM09330

[illegible]

DISTANCIA CENTRO/BORDA DA PLACA DO EXTENSOMETRO = 0.360
 DISTANCIA BORDA DA GRADE / BORDA DA PLACA = 0.260
 DISTANCIA CENTRO EXTENSOMETRO/BORDA DIAFRAGMA = 0.410
 LARGURA DA PLACA DO EXTENSOMETRO = 0.400
 DEFORMACOES :
 MAXIMA ADMISSIVEL = 0.1500E-02 MINIMA MEDIA = 0.1000E-04
 FORÇAS (KGF) :
 MAXIMA = 500.000 MINIMA = 2.500
 MAXIMA / MINIMA = 200.000
 SENSIBILIDADE = 0.1000E-02
 GAGE FACTOR F = 2.000
 MATERIAL :
 E (KGF/CM2) = 0.2100E+07
 NUMERO DE POISSON = 0.280

ESTUDO DE CASOS PARA CARREGAMENTO CONCENTRADO EM APOIO CENTRAL

FORÇA MÁXIMA MEDIDA (KGF) = 462.775
FORÇA MÍNIMA MEDIDA (KGF) = 2.702
FORÇA MÁXIMA / MÍNIMA = 171.301
GEOMETRIA DO DIAFRAGMA :
RAIO EXTERNO (CM) = 3.000 RAIO INTERNO (CM) = 0.500
ESPESURA (CM) = 0.417
DEFORMAÇÕES PARA CARGA MÁXIMA :
DEFORMAÇÃO MÁXIMA = 0.1500E-02
SENSIBILIDADE (V/V) = 0.8565E-03
2 EXTENSÔMETROS COLOCADOS EM R = 0.910
2 EXTENSÔMETROS COLOCADOS EM R = 2.590
COMENTÁRIOS :
EXTENSÔMETROS UNIDIRECIONAIS :
CARGA CONCENTRADA EM APOIO CENTRAL
EXTENSÔMETROS NO MESMO LADO :
NÃO ATINGE A SENSIBILIDADE REQUERIDA
NÃO ATINGE O CAMPO DE VARIAÇÃO REQUERIDO

FORÇA MÁXIMA MEDIDA (KGF) = 457.957
FORÇA MÍNIMA MEDIDA (KGF) = 2.730
FORÇA MÁXIMA / MÍNIMA = 167.753
GEOMETRIA DO DIAFRAGMA :
RAIO EXTERNO (CM) = 2.880 RAIO INTERNO (CM) = 0.500
ESPESURA (CM) = 0.406
DEFORMAÇÕES PARA CARGA MÁXIMA :
DEFORMAÇÃO MÁXIMA = 0.1500E-02
SENSIBILIDADE (V/V) = 0.8388E-03
2 EXTENSÔMETROS COLOCADOS EM R = 0.910
2 EXTENSÔMETROS COLOCADOS EM R = 2.420
COMENTÁRIOS :
EXTENSÔMETROS UNIDIRECIONAIS :
CARGA CONCENTRADA EM APOIO CENTRAL
EXTENSÔMETROS NO MESMO LADO :
NÃO ATINGE A SENSIBILIDADE REQUERIDA
NÃO ATINGE O CAMPO DE VARIAÇÃO REQUERIDO

FORÇA MÁXIMA MEDIDA (KGF) = 489.364
FORÇA MÍNIMA MEDIDA (KGF) = 2.555
FORÇA MÁXIMA / MÍNIMA = 191.551
GEOMETRIA DO DIAFRAGMA :
RAIO EXTERNO (CM) = 3.000 RAIO INTERNO (CM) = 0.670
ESPESURA (CM) = 0.384
DEFORMAÇÕES PARA CARGA MÁXIMA :
DEFORMAÇÃO MÁXIMA = 0.1500E-02
SENSIBILIDADE (V/V) = 0.9578E-03
2 EXTENSÔMETROS COLOCADOS EM R = 1.080
2 EXTENSÔMETROS COLOCADOS EM R = 2.590
COMENTÁRIOS :
EXTENSÔMETROS UNIDIRECIONAIS :
CARGA CONCENTRADA EM APOIO CENTRAL
EXTENSÔMETROS NO MESMO LADO :
NÃO ATINGE A SENSIBILIDADE REQUERIDA
NÃO ATINGE O CAMPO DE VARIAÇÃO REQUERIDO

FORÇA MÁXIMA MEDIDA (KGF) = 451.968
FORÇA MÍNIMA MEDIDA (KGF) = 2.766
FORÇA MÁXIMA / MÍNIMA = 163.394
GEOMETRIA DO DIAFRAGMA :
RAIO EXTERNO (CM) = 2.660 RAIO INTERNO (CM) = 0.500
ESPESURA (CM) = 0.395
DEFORMAÇÕES PARA CARGA MÁXIMA :
DEFORMAÇÃO MÁXIMA = 0.1500E-02
SENSIBILIDADE (V/V) = 0.8170E-03

SENSIBILIDADE (V/V) = 0.1500E-02
2 EXTENSOMETROS COLOCADOS EM R= 0.8170E-03
2 EXTENSOMETROS COLOCADOS EM R= 0.910
COMENTARIOS : 2.250
EXTENSOMETROS UNIDIRECIONAIS
CARGA CONCENTRADA EM APOIO CENTRAL
EXTENSOMETROS NO MESMO LADO
NAO ATINGE A SENSIBILIDADE REQUERIDA
NAO ATINGE O CAMPO DE VARIAÇÃO REQUERIDO

FORÇA MAXIMA MEDIDA (KGF) = 480.827
FORÇA MINIMA MEDIDA (KGF) = 2.600
FORÇA MAXIMA / MINIMA = 184.926
GEOMETRIA DO DIAFRAGMA :
RAIO EXTERNO (CM) = 2.830 RAO INTERNO (CM) = 0.651
ESPESURA (CM) = 0.376
DEFORMACOES PARA CARGA MAXIMA :
SENSIBILIDADE (V/V) = 0.1500E-02
2 EXTENSOMETROS COLOCADOS EM R= 0.9246E-03
2 EXTENSOMETROS COLOCADOS EM R= 1.061
COMENTARIOS : 2.420
EXTENSOMETROS UNIDIRECIONAIS
CARGA CONCENTRADA EM APOIO CENTRAL
EXTENSOMETROS NO MESMO LADO
NAO ATINGE A SENSIBILIDADE REQUERIDA
NAO ATINGE O CAMPO DE VARIAÇÃO REQUERIDO

FORÇA MAXIMA MEDIDA (KGF) = 444.375
FORÇA MINIMA MEDIDA (KGF) = 2.813
FORÇA MAXIMA / MINIMA = 157.950
GEOMETRIA DO DIAFRAGMA :
RAIO EXTERNO (CM) = 2.490 RAO INTERNO (CM) = 0.500
ESPESURA (CM) = 0.382
DEFORMACOES PARA CARGA MAXIMA :
SENSIBILIDADE (V/V) = 0.1500E-02
2 EXTENSOMETROS COLOCADOS EM R= 0.7897E-03
2 EXTENSOMETROS COLOCADOS EM R= 0.910
COMENTARIOS : 2.080
EXTENSOMETROS UNIDIRECIONAIS
CARGA CONCENTRADA EM APOIO CENTRAL
EXTENSOMETROS NO MESMO LADO
NAO ATINGE A SENSIBILIDADE REQUERIDA
NAO ATINGE O CAMPO DE VARIAÇÃO REQUERIDO

FORÇA MAXIMA MEDIDA (KGF) = 470.942
FORÇA MINIMA MEDIDA (KGF) = 2.655
FORÇA MAXIMA / MINIMA = 177.401
GEOMETRIA DO DIAFRAGMA :
RAIO EXTERNO (CM) = 2.660 RAO INTERNO (CM) = 0.632
ESPESURA (CM) = 0.367
DEFORMACOES PARA CARGA MAXIMA :
SENSIBILIDADE (V/V) = 0.1500E-02
2 EXTENSOMETROS COLOCADOS EM R= 0.8870E-03
2 EXTENSOMETROS COLOCADOS EM R= 1.042
COMENTARIOS : 2.250
EXTENSOMETROS UNIDIRECIONAIS
CARGA CONCENTRADA EM APOIO CENTRAL
EXTENSOMETROS NO MESMO LADO
NAO ATINGE A SENSIBILIDADE REQUERIDA
NAO ATINGE O CAMPO DE VARIAÇÃO REQUERIDO

FORÇA MÁXIMA MEDIDA (KGF) = 500.000
 FORÇA MÍNIMA MEDIDA (KGF) = 2.500
 FORÇA MÁXIMA / MÍNIMA = 200.000
 GEOMETRIA DO DIAFRAGMA :
 RAIO EXTERNO (CM) = 3.000 RAIO INTERNO (CM) = 0.840
 ESPESSURA (CM) = 0.356
 DEFORMAÇÕES PARA CARGA MÁXIMA :
 DEFORMAÇÃO MÁXIMA = 0.1460E-02
 SENSIBILIDADE (V/V) = 0.1000E-02
 2 EXTENSÔMETROS COLOCADOS EM R = 1.250
 2 EXTENSÔMETROS COLOCADOS EM R = 2.590
 COMENTÁRIOS :
 EXTENSÔMETROS UNIDIRECIONAIS
 CARGA CONCENTRADA EM APOIO CENTRAL
 EXTENSÔMETROS NO MESMO LADO

FORÇA MÁXIMA MEDIDA (KGF) = 495.704
 FORÇA MÍNIMA MEDIDA (KGF) = 2.522
 FORÇA MÁXIMA / MÍNIMA = 196.547
 GEOMETRIA DO DIAFRAGMA :
 RAIO EXTERNO (CM) = 2.830 RAIO INTERNO (CM) = 0.802
 ESPESSURA (CM) = 0.347
 DEFORMAÇÕES PARA CARGA MÁXIMA :
 DEFORMAÇÃO MÁXIMA = 0.1460E-02
 SENSIBILIDADE (V/V) = 0.9827E-03
 2 EXTENSÔMETROS COLOCADOS EM R = 1.212
 2 EXTENSÔMETROS COLOCADOS EM R = 2.420
 COMENTÁRIOS :
 EXTENSÔMETROS UNIDIRECIONAIS
 CARGA CONCENTRADA EM APOIO CENTRAL
 EXTENSÔMETROS NO MESMO LADO
 NÃO Atinge a SENSIBILIDADE REQUERIDA
 NÃO Atinge o CAMPO DE VARIAÇÃO REQUERIDO

FORÇA MÁXIMA MEDIDA (KGF) = 434.516
 FORÇA MÍNIMA MEDIDA (KGF) = 2.877
 FORÇA MÁXIMA / MÍNIMA = 151.019
 GEOMETRIA DO DIAFRAGMA :
 RAIO EXTERNO (CM) = 2.320 RAIO INTERNO (CM) = 0.500
 ESPESSURA (CM) = 0.367
 DEFORMAÇÕES PARA CARGA MÁXIMA :
 DEFORMAÇÃO MÁXIMA = 0.1460E-02
 SENSIBILIDADE (V/V) = 0.7551E-03
 2 EXTENSÔMETROS COLOCADOS EM R = 0.910
 2 EXTENSÔMETROS COLOCADOS EM R = 1.910
 COMENTÁRIOS :
 EXTENSÔMETROS UNIDIRECIONAIS
 CARGA CONCENTRADA EM APOIO CENTRAL
 EXTENSÔMETROS NO MESMO LADO
 NÃO Atinge a SENSIBILIDADE REQUERIDA
 NÃO Atinge o CAMPO DE VARIAÇÃO REQUERIDO

FORÇA MAXIMA MEDIDA (KGF) = 500.000
FORÇA MINIMA MEDIDA (KGF) = 2.500
FORÇA MAXIMA / MINIMA = 200.000
GEOMETRIA DO DIAFRAGMA :
RAIO EXTERNO (CM) = 3.000
RAIO INTERNO (CM) = 0.840
ESPESSURA (CM) = 0.356
DEFORMACOES PARA CARGA MAXIMA :
DEFORMACAO MAXIMA = 0.1460E-02
SENSIBILIDADE (V/V) = 0.1000E-02
2 EXTENSOMETROS COLOCADOS EM R= 1.250
2 EXTENSOMETROS COLOCADOS EM R= 2.590
COMENTARIOS :
EXTENSOMETROS UNIDIRECIONAIS
CARGA CONCENTRADA EM APOIO CENTRAL
EXTENSOMETROS NO MESMO LADO

2.5. Conclusões Iniciais

A partir da execução do programa DIMCEL com os dados apresentados anteriormente, chegamos às seguintes especificações, inicialmente:

- diâmetro do diafragma 60mm
- diâmetro do apoio central 16,8mm
- espessura do diafragma $3,56 \pm 0,02$ mm
- raios de colocação dos extensômetros, na face interna do diafragma:
 - $r_1 = 12,5$ mm
 - $r_2 = 25,9$ mm
- deformação máxima que ocorre no diafragma = 15×10^{-3} mm
- força máxima admissível sobre o apoio = 500kgf
- valor da menor divisão = 2,5kgf
- sensibilidade elétrica = 1mV/V de alimentação
- material - aço SAE 4340

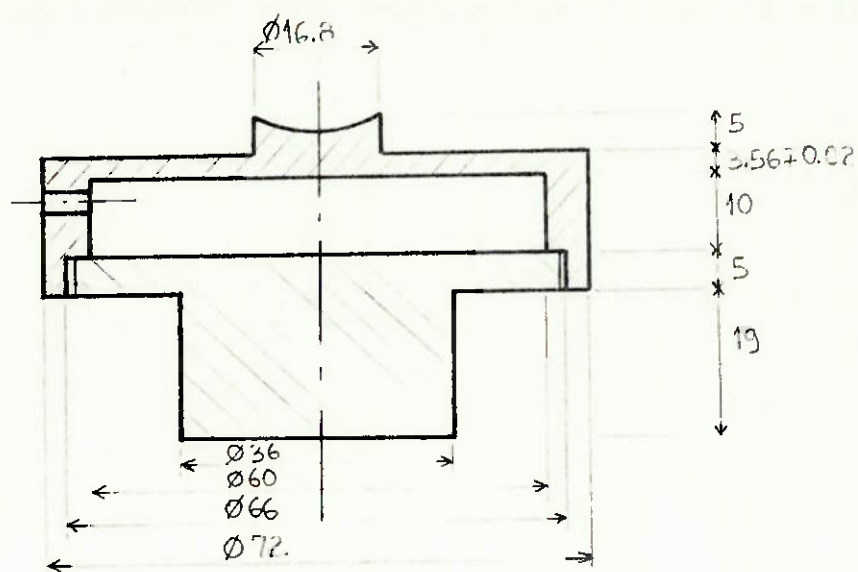
Pretendemos aferir estes resultados confrontando-os com os obtidos a partir de cálculo usando o método dos elementos finitos. Para este cálculo, precisamos ter em mãos as medidas da peça que conterá o diafragma e as suas vinculações com as demais. Assim sendo, torna-se necessário esquematizar toda a célula de carga, incluindo o diafragma.

Fizemos medidas no interior da câmara triaxial e chegamos aos seguintes resultados:

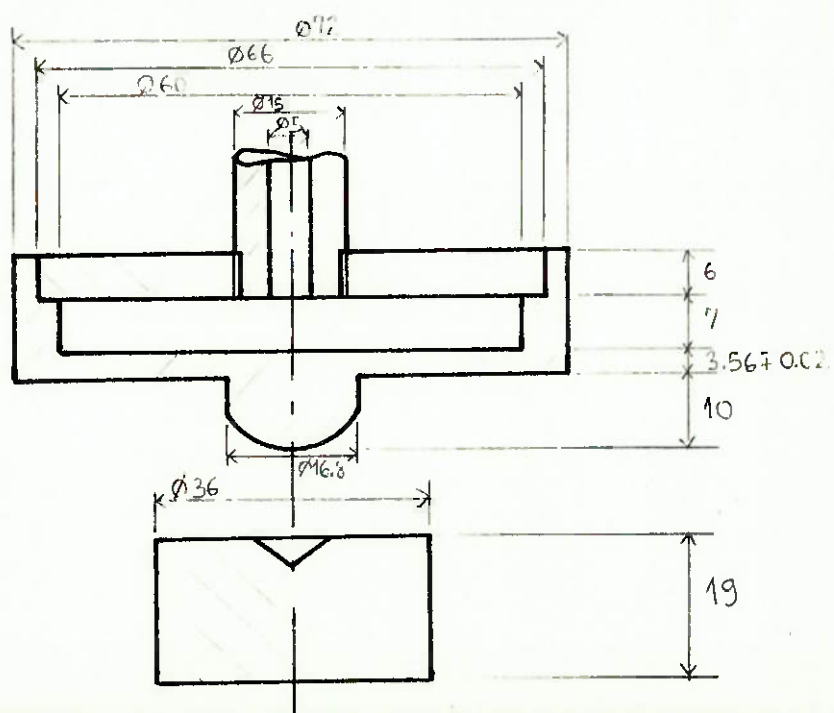
- diâmetro máximo disponível = 100mm
- altura máxima disponível, do cabeçote até a tampa da câmara = 45mm

As concepções de célula de carga idealizadas são as seguintes:

Concepção 1: célula de carga montada no cabeçote do corpo de prova, segundo esquema abaixo:



Concepção 2: Célula de carga separada do cabeçote montada rosqueada na haste aplicadora de esforços



As vantagens e desvantagens das duas concepções são as seguintes:

Concepção 1:

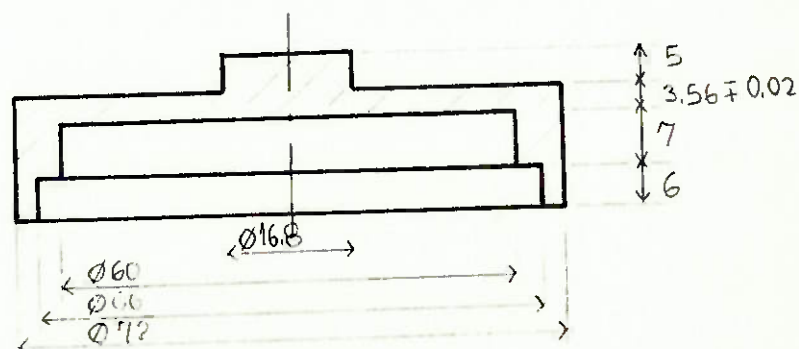
- maior facilidade de remoção da célula de uma câmara para outra
- não exige modificações profundas nas câmaras usadas atualmente
- exige acessórios especiais para proteção dos circuitos elétricos contra água, tais como conexões e tomadas, de alto custo. Além disso, não há espaço disponível para a colocação destes acessórios.

Concepção 2:

- exige modificações profundas na tampa da câmara usada atualmente, mas o resultado obtido será de manutenção simples e barata
- o conjunto é de execução relativamente simples
- os fios saem pelo interior da haste aplicadora de esforços, o que elimina a necessidade de acessórios especiais para a proteção dos circuitos elétricos
- execução mais barata.

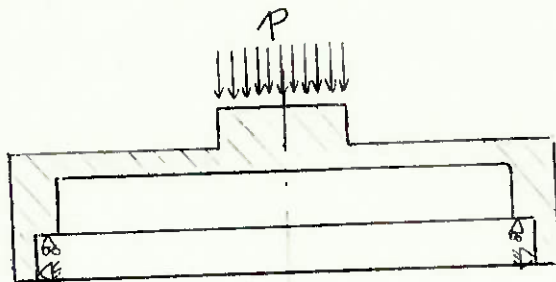
Em vista da impossibilidade física de se executar a concepção 1 à colocação dos acessórios de proteção dos circuitos elétricos e do seu maior preço, preferimos executar a concepção 2.

O diafragma, a ser estudado usando-se método dos elementos finitos é esquematizado desta maneira:



A vinculação desta peça com as demais é dada de acordo com este esquema:

onde p = carga distribuída aplicada



3. REFINAMENTO DA SOLUÇÃO USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

3.1. Introdução

Pretendemos aqui verificar a validade dos resultados obtidos com o nosso modelo teórico anteriormente escolhido através da comparação desses resultados com os resultados da análise do diafragma usando o método dos elementos finitos. Para isso, o diafragma anteriormente esquematizado será discretizado em elementos e será feito o cálculo das deformações que surgem nos pontos de aplicação dos extensômetros quando se exerce um esforço unitário sobre ele. As deformações assim obtidas serão confrontadas com as previstas pela teoria, na fase de projeto preliminar e a posição dos extensômetros eventualmente será corrigida com a finalidade de se obter as deformações anteriormente previstas pela teoria.

Além disso, pretendemos determinar o local e o valor da tensão máxima que surge quando o diafragma está sob esforço. De posse desses resultados, pretendemos diminuir os erros envolvidos na solução.

3.2. Preparação dos Dados

A análise será feita através do uso de programa de análise estrutural por elementos finitos SAP4. Antes de tudo, é preciso discretizar a estrutura da célula de carga e escolher o tipo de elemento a ser usado. A célula de carga é axissimétrica e pode-se usar elementos quadrangulares planos. A discretização será feita sobre um semi corte diametral do diafragma. A primeira proposta de discretização é feita na malha nº 1. Nessa proposta, procura-se detalhar mais as regiões próximas ao engastamento e sob o apoio. A espessura do diafragma é representada em três elementos. Esta malha tem 141 nós. Procurando reduzir o número de nós da malha, pode-se propor a malha nº 2, na qual se procura desenhar linhas de fluxo e equipotenciais (como se fosse um fenômeno de troca de calor ou escoamento) na tentativa de se reduzir o número de nós. No entanto, a malha desenhada possui elementos bastante distorcidos e deve ser descartada. A terceira proposta é equivalente à primeira, embora menos detalhada. Tem 94 nós. A numeração feita nos nós é tal que os números de nós adjacentes diferem de, no máximo, 7. Na análise não será considerado o peso próprio do diafragma e a pressão aplicada no apoio central será de 1kgf/cm^2 . Para se obter o comportamento do diafragma sob qualquer outra pressão, basta multiplicar os resultados obtidos pelo fator pressão aplicada/ $1(\text{kgf/cm}^2)$, pois existe linearidade. Os dados de entrada para o SAP4 são mostrados em folha de codificação, a seguir. As malhas nº 1, 2 e 3 também são apresentadas adiante.

3.3. Resultados da Execução do Programa

Executou-se o SAP4 com os dados listados anteriormente e a listagem obtida é apresentada a seguir.

3.4. Análise dos Resultados Obtidos

Obtenção das deformações radiais e tangenciais

O programa SAP4 fornece os estados de tensão nos pontos médios das faces dos elementos mas não fornece os estados de deformação. As deformações das superfícies de interesse, ou seja das superfícies externa e interna do dia

FOLHA DE PROGRAMAÇÃO

IPT

DATA

03-09-88

PROGRAMADOR

Sr. José Stancati

PROGRAMA

SISTEMA

INSTRUÇÕES P/ PERFURAÇÃO

IDENTIFICAÇÃO

73 74 75 76 77 78 79 80

81 82 83 84 85 86 87 88 89 90

91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

101 102 103 104 105 106 107 108 109 110

111 112 113 114 115 116 117 118 119 120

121 122 123 124 125 126 127 128 129 130

131 132 133 134 135 136 137 138 139 140

141 142 143 144 145 146 147 148 149 150

151 152 153 154 155 156 157 158 159 160

161 162 163 164 165 166 167 168 169 170

171 172 173 174 175 176 177 178 179 180

181 182 183 184 185 186 187 188 189 190

191 192 193 194 195 196 197 198 199 200

201 202 203 204 205 206 207 208 209 210

211 212 213 214 215 216 217 218 219 220

221 222 223 224 225 226 227 228 229 230

231 232 233 234 235 236 237 238 239 240

241 242 243 244 245 246 247 248 249 250

251 252 253 254 255 256 257 258 259 260

261 262 263 264 265 266 267 268 269 270

271 272 273 274 275 276 277 278 279 280

281 282 283 284 285 286 287 288 289 290

291 292 293 294 295 296 297 298 299 300

301 302 303 304 305 306 307 308 309 310

311 312 313 314 315 316 317 318 319 320

321 322 323 324 325 326 327 328 329 330

331 332 333 334 335 336 337 338 339 340

341 342 343 344 345 346 347 348 349 350

351 352 353 354 355 356 357 358 359 360

361 362 363 364 365 366 367 368 369 370

371 372 373 374 375 376 377 378 379 380

381 382 383 384 385 386 387 388 389 390

391 392 393 394 395 396 397 398 399 400

401 402 403 404 405 406 407 408 409 410

411 412 413 414 415 416 417 418 419 420

421 422 423 424 425 426 427 428 429 430

431 432 433 434 435 436 437 438 439 440

441 442 443 444 445 446 447 448 449 450

451 452 453 454 455 456 457 458 459 460

461 462 463 464 465 466 467 468 469 470

471 472 473 474 475 476 477 478 479 480

481 482 483 484 485 486 487 488 489 490

491 492 493 494 495 496 497 498 499 500

501 502 503 504 505 506 507 508 509 510

511 512 513 514 515 516 517 518 519 520

521 522 523 524 525 526 527 528 529 530

531 532 533 534 535 536 537 538 539 540

541 542 543 544 545 546 547 548 549 550

551 552 553 554 555 556 557 558 559 560

561 562 563 564 565 566 567 568 569 570

571 572 573 574 575 576 577 578 579 580

581 582 583 584 585 586 587 588 589 590

591 592 593 594 595 596 597 598 599 600

601 602 603 604 605 606 607 608 609 610

611 612 613 614 615 616 617 618 619 620

621 622 623 624 625 626 627 628 629 630

631 632 633 634 635 636 637 638 639 640

641 642 643 644 645 646 647 648 649 650

651 652 653 654 655 656 657 658 659 660

661 662 663 664 665 666 667 668 669 670

671 672 673 674 675 676 677 678 679 680

681 682 683 684 685 686 687 688 689 690

691 692 693 694 695 696 697 698 699 700

701 702 703 704 705 706 707 708 709 710

711 712 713 714 715 716 717 718 719 720

721 722 723 724 725 726 727 728 729 730

731 732 733 734 735 736 737 738 739 740

741 742 743 744 745 746 747 748 749 750

751 752 753 754 755 756 757 758 759 760

761 762 763 764 765 766 767 768 769 770

771 772 773 774 775 776 777 778 779 780

781 782 783 784 785 786 787 788 789 790

791 792 793 794 795 796 797 798 799 800

801 802 803 804 805 806 807 808 809 810

811 812 813 814 815 816 817 818 819 820

821 822 823 824 825 826 827 828 829 830

831 832 833 834 835 836 837 838 839 840

841 842 843 844 845 846 847 848 849 850

851 852 853 854 855 856 857 858 859 860

861 862 863 864 865 866 867 868 869 870

871 872 873 874 875 876 877 878 879 880

881 882 883 884 885 886 887 888 889 890

891 892 893 894 895 896 897 898 899 900

901 902 903 904 905 906 907 908 909 910

911 912 913 914 915 916 917 918 919 920

921 922 923 924 925 926 927 928 929 930

931 932 933 934 935 936 937 938 939 940

941 942 943 944 945 946 947 948 949 950

951 952 953 954 955 956 957 958 959 960

961 962 963 964 965 966 967 968 969 970

971 972 973 974 975 976 977 978 979 980

981 982 983 984 985 986 987 988 989 990

991 992 993 994 995 996 997 998 999 1000

1001 1002 1003 1004 1005 1006 1007 1008 1009 1010

1011 1012 1013 1014 1015 1016 1017 1018 1019 1020

1021 1022 1023 1024 1025 1026 1027 1028 1029 1030

1031 1032 1033 1034 1035 1036 1037 1038 1039 1040

1041 1042 1043 1044 1045 1046 1047 1048 1049 1050

1051 1052 1053 1054 1055 1056 1057 1058 1059 1060

1061 1062 1063 1064 1065 1066 1067 1068 1069 1070

1071 1072 1073 1074 1075 1076 1077 1078 1079 1080

1081 1082 1083 1084 1085 1086 1087 1088 1089 1090

1091 1092 1093 1094 1095 1096 1097 1098 1099 1100

1101 1102 1103 1104 1105 1106 1107 1108 1109 1110

1111 1112 1113 1114 1115 1116 1117 1118 1119 1120

1121 1122 1123 1124 1125 1126 1127 1128 1129 1130

1131 1132 1133 1134 1135 1136 1137 1138 1139 1140

1141 1142 1143 1144 1145 1146 1147 1148 1149 1150

1151 1152 1153 1154 1155 1156 1157 1158 1159 1160

1161 1162 1163 1164 1165 1166 1167 1168 1169 1170

1171 1172 1173 1174 1175 1176 1177 1178 1179 1180

1181 1182 1183 1184 1185 1186 1187 1188 1189 1190

1191 1192 1193 1194 1195 1196 1197 1198 1199 1200

1201 1202 1203 1204 1205 1206 1207 1208 1209 1210

1211 1212 1213 1214 1215 1216 1217 1218 1219 1220

1221 1222 1223 1224 1225 1226 1227 1228 1229 1230

1231 1232 1233 1234 1235 1236 1237 1238 1239 1240

1241 1242 1243 1244 1245 1246 1247 1248 1249 1250

1251 1252 1253 1254 1255 1256 1257 1258 1259 1260

1261 1262 1263 1264 1265 1266 1267 1268 1269 1270

1271 1272 1273 1274 1275 1276 1277 1278 1279 1280

1281 1282 1283 1284 1285 1286 1287 1288 1289 1290

1291 1292 1293 1294 1295 1296 1297 1298 1299 1300

1301 1302 1303 1304 1305 1306 1307 1308 1309 1310

1311 1312 1313 1314 1315 1316 1317 1318 1319 1320

1321 1322 1323 1324 1325 1326 1327 1328 1329 1330

1331 1332 1333 1334 1335 1336 1337 1338 1339 1340

1341 1342 1343 1344 1345 1346 1347 1348 1349 1350

1351 1352 1353 1354 1355 1356 1357 1358 1359 1360

1361 1362 1363 1364 1365 1366 1367 1368 1369 1370

1371 1372 1373 1374 1375 1376 1377 1378 1379 1380

1381 1382 1383 1384 1385 1386 1387 1388 1389 1390

1391 1392 1393 1394 1395 1396 1397 1398 1399 1400

1401 1402 1403 1404 1405 1406 1407 1408 1409 1410

1411 1412 1413 1414 1415 1416 1417 1418 1419 1420

1421 1422 1423 1424 1425 1426 1427 1428 1429 1430

1431 1432 1433 1434 1435 1436 1437 1438 1439 1440

1441 1442 1443 1444 1445 1446 1447 1448 1449 1450

1451 1452 1453 1454 1455 1456 1457 1458 1459 1460

1461 1462 1463 1464 1465 1466 1467 1468 1469 1470

1471 1472 1473 1474 1475 1476 1477 1478 1479 1480

1481 1482 1483 1484 1485 1486 1487 1488 1489 1490

1491 1492 1493 1494 1495 1496 1497 1498 1499 1500

1501 1502 1503 1504 1505 1506 1507 1508 1509 1510

1511 1512 1513 1514 1515 1516 1517 1518 1519 1520

1521 1522 1523 1524 1525 1526 1527 1528 1529 1530

1531 1532 1533 1534 1535 1536 1537 1538 1539 1540

1541 1542 1543 1544 1545 1546 1547 1548 1549 1550

1551 1552 1553 1554 15

PROGRAMADOR

PROGRAMA

INSTRUÇÕES P/ PERFURAÇÃO

IDENTIFICAÇÃO

[illegible]

FOLHA DE PROGRAMAÇÃO²

STENA

PROGRAMA

PROGRAMADOR

DATA 03-09-82

STRUCOES P/PERFURAO

IDENTIFICAÇÃO

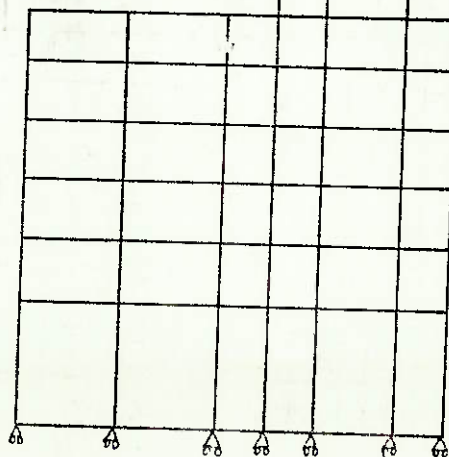
[illegible]

IDENTIFICAÇÃO		73	74	75	76	77	78	79	80
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80

3.6	3.6	3.3	3.3	3.3	3.3	3.6			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1	1	1			
1	1	1	1	1					

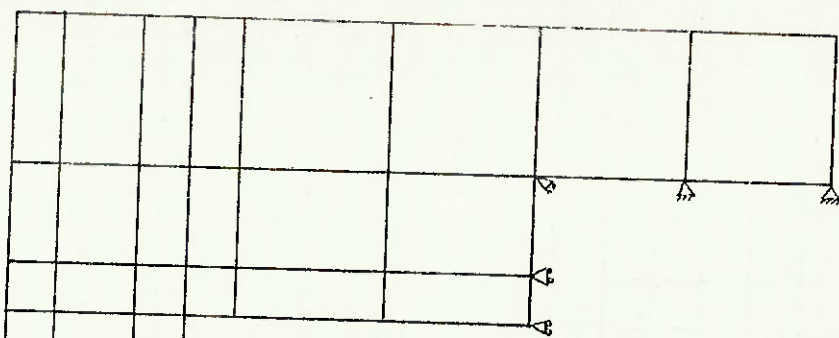
[illegible]

MALHA 1



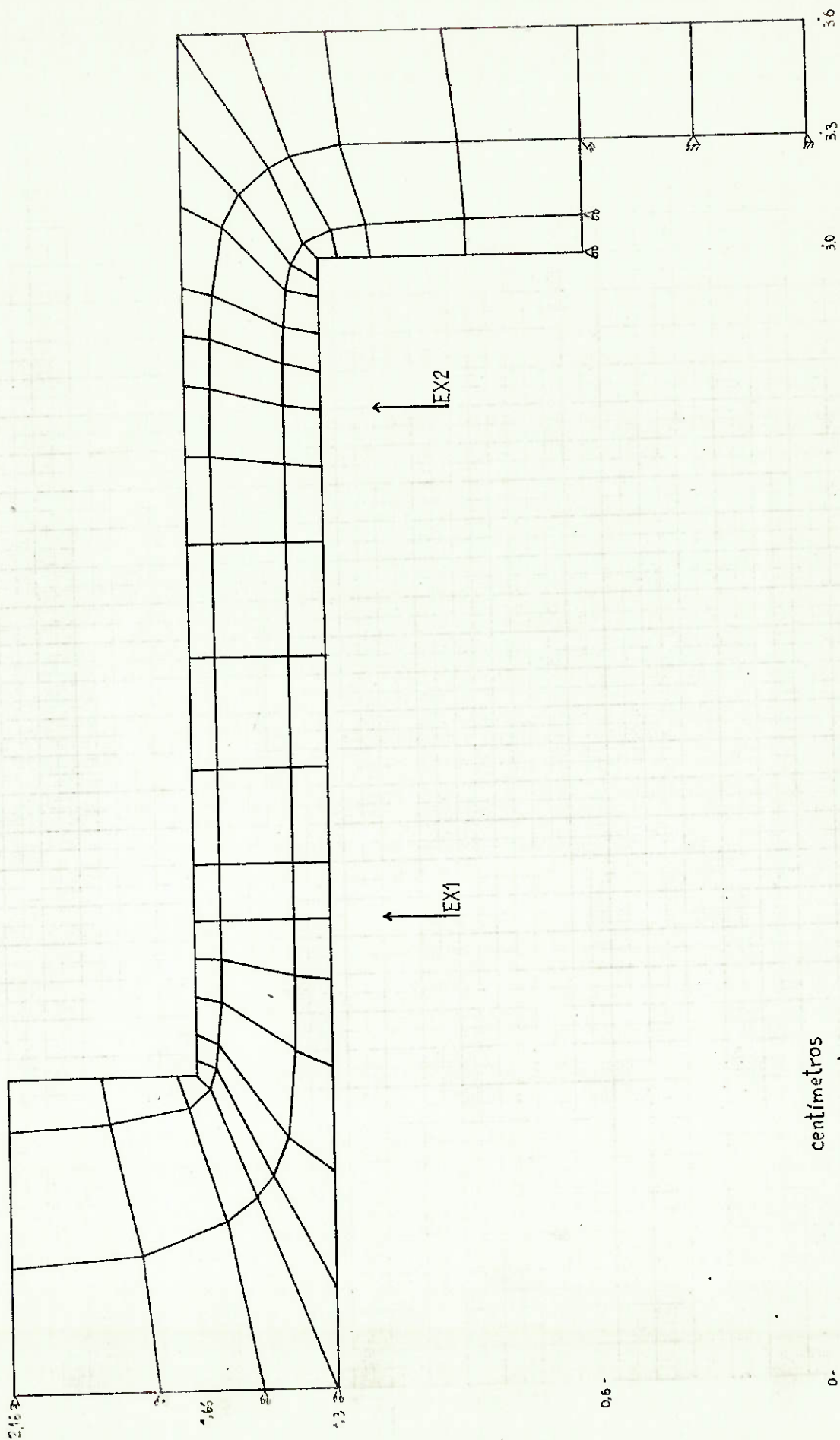
EX1

EX2



escala 10:1

MALHA 2

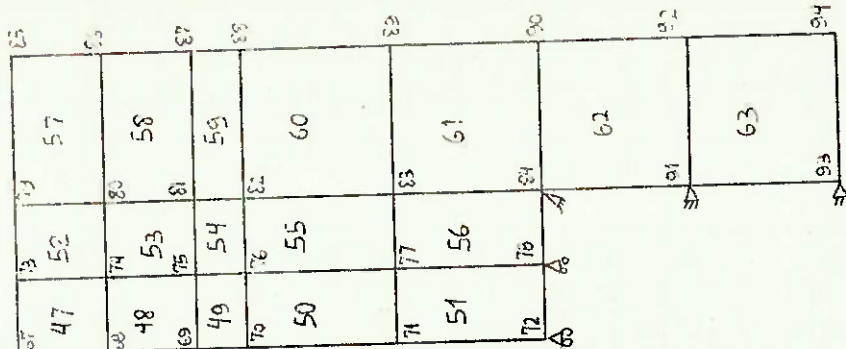
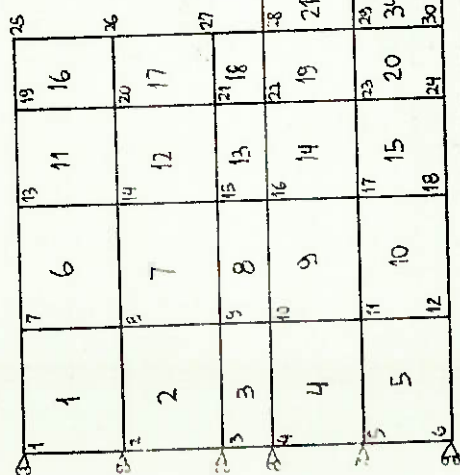


0.6 -

centímetros
0.84

0 - 0

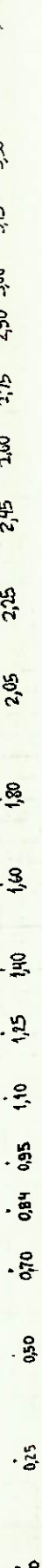
MALHA 3



EX2

EX1

centímetros



[illegible][illegible]

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

POINT	X	Y	Z	T
1	0.000	0.000	2.160	0.000
2	0.000	0.000	1.640	0.000
3	0.000	0.000	1.760	0.000
4	0.000	0.000	1.640	0.000
5	0.000	0.000	1.300	0.000
6	0.000	0.000	2.160	0.000
7	0.000	0.000	1.960	0.000
8	0.000	0.000	1.960	0.000
9	0.000	0.000	1.640	0.000
10	0.000	0.000	1.640	0.000
11	0.000	0.000	1.400	0.000
12	0.000	0.000	1.300	0.000
13	0.000	0.000	2.160	0.000
14	0.000	0.000	1.960	0.000
15	0.000	0.000	1.760	0.000
16	0.000	0.000	1.640	0.000
17	0.000	0.000	1.400	0.000
18	0.000	0.000	1.300	0.000
19	0.000	0.000	2.160	0.000
20	0.000	0.000	1.960	0.000
21	0.000	0.000	1.760	0.000

[illegible]

[illegible]

1.8 000

[illegible]

FLY (REF) 50104 (F)	T	J	K	I	MATL TYPE	REFERENCE TEMPERATURE	I-J FACE PRESSURE	STRESS OPTION	KG	THICKNESS
1	1	7	4	2	1	0.000	.100E+01	20	1	0.0000
2	2	9	0	3	1	0.000	0.	20	1	0.0000
3	3	0	10	4	1	0.000	0.	20	1	0.0000
4	4	1	11	5	1	0.000	0.	20	1	0.0000
5	5	2	12	6	1	0.000	0.	20	1	0.0000
6	6	3	13	7	1	0.000	.100E+01	20	1	0.0000
7	7	4	14	8	1	0.000	0.	20	1	0.0000
8	8	5	15	9	1	0.000	0.	20	1	0.0000
9	9	6	16	10	1	0.000	0.	20	1	0.0000
10	10	7	17	11	1	0.000	0.	20	1	0.0000
11	11	8	18	12	1	0.000	0.	20	1	0.0000
12	12	9	19	13	1	0.000	.100E+01	20	1	0.0000
13	13	0	20	14	1	0.000	0.	20	1	0.0000
14	14	1	21	15	1	0.000	0.	20	1	0.0000
15	15	2	22	16	1	0.000	0.	20	1	0.0000
16	16	3	23	17	1	0.000	0.	20	1	0.0000
17	17	4	24	18	1	0.000	0.	20	1	0.0000
18	18	5	25	19	1	0.000	0.	20	1	0.0000
19	19	6	26	20	1	0.000	0.	20	1	0.0000
20	20	7	27	21	1	0.000	0.	20	1	0.0000
21	21	8	28	22	1	0.000	0.	20	1	0.0000
22	22	9	29	23	1	0.000	0.	20	1	0.0000
23	23	0	30	24	1	0.000	0.	20	1	0.0000
24	24	1	31	25	1	0.000	0.	20	1	0.0000
25	25	2	32	26	1	0.000	0.	20	1	0.0000
26	26	3	33	27	1	0.000	0.	20	1	0.0000
27	27	4	34	28	1	0.000	0.	20	1	0.0000
28	28	5	35	29	1	0.000	0.	20	1	0.0000
29	29	6	36	30	1	0.000	0.	20	1	0.0000
30	30	7	37	31	1	0.000	0.	20	1	0.0000
31	31	8	38	32	1	0.000	0.	20	1	0.0000
32	32	9	39	33	1	0.000	0.	20	1	0.0000
33	33	0	40	34	1	0.000	0.	20	1	0.0000
34	34	1	41	35	1	0.000	0.	20	1	0.0000
35	35	2	42	36	1	0.000	0.	20	1	0.0000
36	36	3	43	37	1	0.000	0.	20	1	0.0000
37	37	4	44	38	1	0.000	0.	20	1	0.0000
38	38	5	45	39	1	0.000	0.	20	1	0.0000
39	39	6	46	40	1	0.000	0.	20	1	0.0000
40	40	7	47	41	1	0.000	0.	20	1	0.0000
41	41	8	48	42	1	0.000	0.	20	1	0.0000
42	42	9	49	43	1	0.000	0.	20	1	0.0000
43	43	0	50	44	1	0.000	0.	20	1	0.0000
44	44	1	51	45	1	0.000	0.	20	1	0.0000
45	45	2	52	46	1	0.000	0.	20	1	0.0000
46	46	3	53	47	1	0.000	0.	20	1	0.0000
47	47	4	54	48	1	0.000	0.	20	1	0.0000
48	48	5	55	49	1	0.000	0.	20	1	0.0000
49	49	6	56	50	1	0.000	0.	20	1	0.0000
50	50	7	57	51	1	0.000	0.	20	1	0.0000
51	51	8	58	52	1	0.000	0.	20	1	0.0000
52	52	9	59	53	1	0.000	0.	20	1	0.0000
53	53	0	60	54	1	0.000	0.	20	1	0.0000
54	54	1	61	55	1	0.000	0.	20	1	0.0000
55	55	2	62	56	1	0.000	0.	20	1	0.0000
56	56	3	63	57	1	0.000	0.	20	1	0.0000
57	57	4	64	58	1	0.000	0.	20	1	0.0000
58	58	5	65	59	1	0.000	0.	20	1	0.0000
59	59	6	66	60	1	0.000	0.	20	1	0.0000
60	60	7	67	61	1	0.000	0.	20	1	0.0000
61	61	8	68	62	1	0.000	0.	20	1	0.0000
62	62	9	69	63	1	0.000	0.	20	1	0.0000
63	63	0	70	64	1	0.000	0.	20	1	0.0000
64	64	1	71	65	1	0.000	0.	20	1	0.0000
65	65	2	72	66	1	0.000	0.	20	1	0.0000
66	66	3	73	67	1	0.000	0.	20	1	0.0000
67	67	4	74	68	1	0.000	0.	20	1	0.0000
68	68	5	75	69	1	0.000	0.	20	1	0.0000
69	69	6	76	70	1	0.000	0.	20	1	0.0000
70	70	7	77	71	1	0.000	0.	20	1	0.0000
71	71	8	78	72	1	0.000	0.	20	1	0.0000
72	72	9	79	73	1	0.000	0.	20	1	0.0000
73	73	0	80	74	1	0.000	0.	20	1	0.0000
74	74	1	81	75	1	0.000	0.	20	1	0.0000
75	75	2	82	76	1	0.000	0.	20	1	0.0000
76	76	3	83	77	1	0.000	0.	20	1	0.0000
77	77	4	84	78	1	0.000	0.	20	1	0.0000
78	78	5	85	79	1	0.000	0.	20	1	0.0000
79	79	6	86	80	1	0.000	0.	20	1	0.0000
80	80	7	87	81	1	0.000	0.	20	1	0.0000
81	81	8	88	82	1	0.000	0.	20	1	0.0000
82	82	9	89	83	1	0.000	0.	20	1	0.0000
83	83	0	90	84	1	0.000	0.	20	1	0.0000
84	84	1	91	85	1	0.000	0.	20	1	0.0000
85	85	2	92	86	1	0.000	0.	20	1	0.0000
86	86	3	93	87	1	0.000	0.	20	1	0.0000
87	87	4	94	88	1	0.000	0.	20	1	0.0000
88	88	5	95	89	1	0.000	0.	20	1	0.0000
89	89	6	96	90	1	0.000	0.	20	1	0.0000
90	90	7	97	91	1	0.000	0.	20	1	0.0000
91	91	8	98	92	1	0.000	0.	20	1	0.0000
92	92	9	99	93	1	0.000	0.	20	1	0.0000
93	93	0	100	94	1	0.000	0.	20	1	0.0000

94	1	0.	-.2502E-08	-.1010E-07	0.	0.	0.
93	1	0.	0.	0.	0.	0.	0.
92	1	0.	-.3443E-08	-.13971E-07	0.	0.	0.
91	1	0.	0.	0.	0.	0.	0.
90	1	0.	-.3704E-07	-.30075E-07	0.	0.	0.
89	1	0.	-.11040E-05	-.11119E-07	0.	0.	0.
88	1	0.	-.31547E-07	-.15743E-06	0.	0.	0.
87	1	0.	-.50003E-07	-.21179E-05	0.	0.	0.
86	1	0.	-.25032E-06	-.26997E-06	0.	0.	0.
85	1	0.	-.42033E-06	-.28090E-06	0.	0.	0.
84	1	0.	0.	0.	0.	0.	0.
83	1	0.	-.14047E-06	-.39423E-07	0.	0.	0.
82	1	0.	-.10720E-06	-.41474E-07	0.	0.	0.
81	1	0.	-.15054E-07	-.27072E-07	0.	0.	0.
80	1	0.	-.26225E-06	-.61640E-08	0.	0.	0.
79	1	0.	-.52731E-06	-.77816E-08	0.	0.	0.
78	1	0.	-.32115E-07	0.	0.	0.	0.
77	1	0.	-.11263E-06	-.58004E-07	0.	0.	0.
76	1	0.	-.15779E-06	-.19155E-06	0.	0.	0.
75	1	0.	-.10175E-06	-.17476E-06	0.	0.	0.
74	1	0.	-.26074E-06	-.16515E-06	0.	0.	0.
73	1	0.	-.60035E-06	-.19751E-06	0.	0.	0.

73	1	0.	-0.20074E-05	-0.18515E-05	0.	0.	0.
72	1	0.	-0.60035E-05	-0.19751E-06	0.	0.	0.
71	1	0.	0.33342E-07	0.	0.	0.	0.
70	1	0.	0.02620E-07	-0.57575E-07	0.	0.	0.
69	1	0.	0.12531E-06	-0.27168E-06	0.	0.	0.
68	1	0.	0.20150E-06	-0.42150E-06	0.	0.	0.
67	1	0.	-0.26756E-06	-0.50473E-06	0.	0.	0.
66	1	0.	-0.96136E-06	-0.53144E-06	0.	0.	0.
65	1	0.	0.52637E-06	-0.10194E-05	0.	0.	0.
64	1	0.	-0.30023E-06	-0.91659E-06	0.	0.	0.
63	1	0.	-0.11734E-05	-0.10178E-05	0.	0.	0.
62	1	0.	0.10050E-05	-0.19447E-05	0.	0.	0.
61	1	0.	-0.27339E-06	-0.14395E-05	0.	0.	0.
60	1	0.	-0.15612E-05	-0.19409E-05	0.	0.	0.
59	1	0.	0.17771E-05	-0.32526E-05	0.	0.	0.
58	1	0.	-0.26153E-06	-0.31750E-05	0.	0.	0.
57	1	0.	-0.10616E-05	-0.32111E-05	0.	0.	0.
56	1	0.	0.17154E-05	-0.47920E-05	0.	0.	0.
55	1	0.	-0.21205E-06	-0.47339E-05	0.	0.	0.
54	1	0.	-0.21613E-05	-0.47518E-05	0.	0.	0.
53	1	0.	0.21065E-05	-0.72216E-05	0.	0.	0.
52	1	0.	-0.17093E-05	-0.71317E-05	0.	0.	0.
51	1	0.	-0.24448E-05	-0.71814E-05	0.	0.	0.

50	1	0.	0.	0.	0.
51	1	0.	0.	0.	0.
52	1	0.	0.	0.	0.
53	1	0.	0.	0.	0.
54	1	0.	0.	0.	0.
55	1	0.	0.	0.	0.
56	1	0.	0.	0.	0.
57	1	0.	0.	0.	0.
58	1	0.	0.	0.	0.
59	1	0.	0.	0.	0.
60	1	0.	0.	0.	0.
61	1	0.	0.	0.	0.
62	1	0.	0.	0.	0.
63	1	0.	0.	0.	0.
64	1	0.	0.	0.	0.
65	1	0.	0.	0.	0.
66	1	0.	0.	0.	0.
67	1	0.	0.	0.	0.
68	1	0.	0.	0.	0.
69	1	0.	0.	0.	0.
70	1	0.	0.	0.	0.
71	1	0.	0.	0.	0.
72	1	0.	0.	0.	0.
73	1	0.	0.	0.	0.
74	1	0.	0.	0.	0.
75	1	0.	0.	0.	0.
76	1	0.	0.	0.	0.
77	1	0.	0.	0.	0.
78	1	0.	0.	0.	0.
79	1	0.	0.	0.	0.
80	1	0.	0.	0.	0.
81	1	0.	0.	0.	0.
82	1	0.	0.	0.	0.
83	1	0.	0.	0.	0.
84	1	0.	0.	0.	0.
85	1	0.	0.	0.	0.
86	1	0.	0.	0.	0.
87	1	0.	0.	0.	0.
88	1	0.	0.	0.	0.
89	1	0.	0.	0.	0.
90	1	0.	0.	0.	0.
91	1	0.	0.	0.	0.
92	1	0.	0.	0.	0.
93	1	0.	0.	0.	0.
94	1	0.	0.	0.	0.
95	1	0.	0.	0.	0.
96	1	0.	0.	0.	0.
97	1	0.	0.	0.	0.
98	1	0.	0.	0.	0.
99	1	0.	0.	0.	0.
100	1	0.	0.	0.	0.

[illegible]

11	1	0.	.11123E-06	-.24644E-04	0.	0.	0.
10	1	0.	-.41430E-07	-.24620E-04	0.	0.	0.
9	1	0.	-.10031E-06	-.24560E-04	0.	0.	0.
8	1	0.	-.18507E-06	-.24475E-04	0.	0.	0.
7	1	0.	-.28844E-06	-.24424E-04	0.	0.	0.
6	1	0.	0.	-.24660E-04	0.	0.	0.
5	1	0.	0.	-.24664E-04	0.	0.	0.
4	1	0.	0.	-.24675E-04	0.	0.	0.
3	1	0.	0.	-.24666E-04	0.	0.	0.
2	1	0.	0.	-.24654E-04	0.	0.	0.
1	1	0.	0.	-.24697E-04	0.	0.	0.

```

.....
OF DATA REDUCED = 30304 WORDS
.....
OF DATA REDUCED = 60741 WORDS
.....
OF DATA TOTAL = 91115 WORDS
.....
TOTAL
.....

```

TWO-DIMENSIONAL FINITE ELEMENTS

1. CERTAIN STRESSES REFERENCED TO LOCAL Y-Z COORDINATES.
 2. SHEARING STRESSES ARE NORMAL AND PARALLEL TO ELEMENT EDGES.

T A B L E O F I N T E R M E D I A T E F I N I T E E L E M E N T S

- 1. CHARTOIN STRESSES REFERENCED TO LOCAL Y-Z COORDINATES.
- 2. MID-SIDE STRESSES ARE NORMAL AND PARALLEL TO FIBRE EDGES.

ELEMENT (1)									
LOAD	LOC	S11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE	
1	C-0	-.25161E+01	-.01100E+01	-.15745E+01	.51442E+00	-.02868E+00	-.26950E+01	71.39	
1	C-1	-.04770E+01	-.31329E+01	-.24470E+01	.10444E+01	-.26239E+01	-.53793E+01	86.56	
1	J-0	-.12005E+01	-.22054E+00	-.14001E+01	-.46566E-12	-.22054E+00	-.12964E+01	-90.00	
1	J-1	-.18657E+01	-.30760E+01	-.42250E+01	.05933E+00	-.15825E+01	-.41592E+01	19.36	
1	K-1	-.18657E+01	-.26704E+01	-.20194E+01	-.18748E+01	-.35056E+00	-.41855E+01	-38.94	
ELEMENT (2)									
LOAD	LOC	S11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE	
1	C-0	-.13545E+01	-.13545E+00	-.87648E+00	.35272E+00	-.36012E+01	-.14579E+01	74.67	
1	C-1	-.26523E+01	-.16154E+01	-.24829E+01	.72501E+00	-.10462E+01	-.30121E+01	65.54	
1	J-0	-.66540E+00	.51202E+00	-.69449E+00	.86057E-12	.51292E+00	-.86590E+00	90.00	
1	J-1	-.55553E+00	-.26095E+01	-.22742E+01	.33446E+00	-.48529E+00	-.21667E+01	11.84	
1	K-1	-.55553E+00	-.16590E+01	-.15436E+01	-.10837E+01	.14620E+00	-.21666E+01	-33.45	
ELEMENT (3)									
LOAD	LOC	S11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE	
1	C-0	-.42335E+00	.60374E+00	-.44487E+00	.20565E-01	.40415E+00	-.52386E+00	88.85	
1	C-1	-.80047E+00	-.31453E+00	-.83449E+00	.41131E-01	-.31162E+00	-.89747E+00	85.97	
1	J-0	-.46531E+00	.10145E+01	-.37046E+00	.87556E-12	.10145E+01	-.45914E+00	90.00	
1	J-1	.33227E+00	-.10420E+01	-.10258E+01	.17730E+00	.35476E+00	-.10646E+01	7.24	
1	K-1	.33227E+00	-.34702E+00	-.33156E+00	-.21451E+00	.39642E+00	-.41194E+00	-16.36	
ELEMENT (4)									
LOAD	LOC	S11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE	
1	C-0	.52352E+00	.39941E+00	.62944E+00	-.22716E+00	.70012E+00	-.22741E+00	-37.07	
1	C-1	.85642E+00	.30642E+00	.85642E+00	-.45542E+00	.11365E+01	.11952E+00	-31.66	
1	J-0	.37254E+00	.57111E+00	.46530E+00	.39733E-12	.57111E+00	.37254E+00	90.00	
1	K-1	.51302E+00	-.25100E+00	-.17640E+00	-.42272E-01	.52277E+00	-.26055E+00	-6.07	
		.51302E+00	.15381E+01	.15195E+01	.53564E+00	.17674E+01	.28432E+00	66.83	
ELEMENT (5)									
LOAD	LOC	S11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE	
1	C-0	.19203E+01	.41303E+00	.13465E+01	-.96420E-01	.19253E+01	.40889E+00	-3.27	
1	C-1	.34427E+01	.19407E+01	.34427E+01	-.17204E+00	.35004E+01	.18304E+01	-5.97	
1	J-0	.11160E+01	-.27204E+00	.11562E+01	.85524E-12	.11069E+01	-.27206E+00	.00	
1	J-1	.01314E+00	.17475E+01	.19643E+01	-.94027E+00	.23135E+01	.34715E+00	-57.55	
1	K-1	.01314E+00	.30910E+01	.33126E+01	.10531E+01	.35246E+01	.48035E+00	67.85	

PROPERTY (6)

LOG	U	S11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	0.0	-0.12244E+01	-0.66665E+00	-0.1716E+01	-0.0000E+00	-0.20470E+00	-0.16452E+01	56.25
1	0.1	-0.10955E+01	-0.31570E+00	-0.14616E+01	-0.0000E+00	-0.24379E+00	-0.16951E+01	56.60
1	0.2	-0.10000E+01	-0.11197E+00	-0.17725E+01	-0.0000E+00	-0.29456E+00	-0.17731E+01	55.53
1	0.3	-0.72767E+00	-0.00414E+00	-0.14453E+01	-0.1309E+00	-0.62233E+00	-0.10434E+01	-28.33
1	0.4	-0.72767E+00	-0.16007E+01	-0.10019E+01	-0.11591E+01	-0.83830E+00	-0.24120E+01	-34.76

PROPERTY (7)

LOG	U	S11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	0.0	-0.14513E+01	-0.13612E+00	-0.14513E+01	-0.0000E+00	-0.61590E+00	-0.19642E+01	96.03
1	0.1	-0.13612E+01	-0.10065E+00	-0.12771E+01	-0.0000E+00	-0.74357E+00	-0.22527E+01	61.51
1	0.2	-0.12771E+01	-0.01000E+00	-0.14664E+01	-0.5356E+00	-0.51563E+00	-0.16849E+01	72.30
1	0.3	-0.12771E+01	-0.12761E+01	-0.14331E+01	-0.53170E+00	-0.33101E+00	-0.14873E+01	-19.89
1	0.4	-0.12761E+00	-0.10001E+01	-0.15873E+01	-0.13340E+01	-0.77594E+00	-0.25945E+01	-26.17

PROPERTY (8)

LOG	U	S11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	0.0	-0.15111E+01	-0.1200E+00	-0.10054E+01	-0.0000E+00	-0.86013E+00	-0.14600E+01	92.37
1	0.1	-0.14600E+01	-0.0000E+00	-0.0000E+00	-0.0000E+00	-0.67349E+00	-0.15849E+01	79.83
1	0.2	-0.12640E+01	-0.12165E+01	-0.0000E+00	-0.0000E+00	-0.11340E+01	-0.12655E+01	85.12
1	0.3	-0.0000E+00	-0.16725E+01	-0.1426E+01	-0.17370E+00	-0.8160E+00	-0.16444E+01	-3.49
1	0.4	-0.0000E+00	-0.11011E+01	-0.75655E+00	-0.43712E+00	-0.89623E+00	-0.12826E+01	-11.83

PROPERTY (9)

LOG	U	S11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	0.0	-0.76753E+01	-0.6550E+00	-0.0320E+00	-0.3514E+00	-0.94222E+00	-0.19169E+00	-71.60
1	0.1	-0.16747E+00	-0.0000E+00	-0.34655E+00	-0.4544E+00	-0.66892E+00	-0.43090E+00	-60.67
1	0.2	-0.75744E+01	-0.13867E+01	-0.35425E+00	-0.2344E+00	-0.14254E+01	-0.35024E+01	-80.15
1	0.3	-0.64721E+00	-0.11653E+01	-0.71741E+00	-0.2700E+00	-0.89304E+00	-0.12025E+01	7.61
1	0.4	-0.5721E+00	-0.1000E+01	-0.12831E+01	-0.4281E+00	-0.13620E+01	-0.49464E+00	49.74

PROPERTY (10)

LOG	U	S11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	0.0	-0.2474E+01	-0.2700E+00	-0.0575E+01	-0.5143E+00	-0.23784E+01	-0.19676E+00	-14.19
1	0.1	-0.2474E+01	-0.2600E+00	-0.1302E+01	-0.4911E+00	-0.26794E+01	-0.45514E+00	-17.30
1	0.2	-0.2100E+01	-0.2400E+00	-0.20473E+01	-0.4055E+00	-0.22484E+01	-0.24694E+00	-10.31
1	0.3	-0.0000E+00	-0.2700E+00	-0.11147E+01	-0.1234E+01	-0.82770E+00	-0.40342E+00	88.30
1	0.4	-0.4000E+00	-0.3010E+01	-0.33474E+01	-0.1024E+01	-0.41031E+01	-0.12030E+00	74.53

PROPERTY (11)

LOG	U	S11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	0.0	-0.2474E+00	-0.10749E+01	-0.12674E+01	-0.5071E+00	-0.62964E+00	-0.13456E+01	27.54
1	0.1	-0.2474E+00	-0.2456E+00	-0.1345E+01	-0.5071E+00	-0.30064E+00	-0.10442E+01	27.54
1	0.2	-0.2474E+00	-0.1503E+01	-0.1274E+01	-0.5071E+00	-0.30064E+00	-0.10442E+01	27.54

FILE: 01 (27)

LOC	S11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	-.3713E+01	.6695E+02	-.1563E+01	.5093E+00	.46830E+00	-.55880E+00	47.96
2	-.6539E+02	.17637E+00	-.1530E+01	.7424E+00	.63547E+00	-.46565E+00	49.78
3	-.1077E+00	-.1600E+00	-.1539E+01	.7570E+00	.29361E+00	-.66024E+00	45.87
4	.7033E+02	.37260E+00	-.2091E+01	-.63520E+00	.66301E+00	-.28258E+00	-56.35
5	.7033E+02	-.5340E+00	-.2615E+01	-.5340E+00	.37032E+00	-.9311E+00	-31.45

FILE: 01 (28)

LOC	S11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	.6220E+00	.1243E+01	-.1144E+01	.4501E+00	.86647E+00	-.23050E+00	28.14
2	.7017E+00	.12030E+00	-.1145E+01	.4773E+00	.98695E+00	-.10292E+00	30.68
3	.6375E+00	.1543E+00	-.1116E+01	.6365E+00	.74632E+00	-.36422E+00	25.65
4	.1333E+01	.1701E+00	-.1138E+01	-.4091E+00	.14713E+01	-.76063E+01	-77.61
5	.1333E+01	-.5361E+00	-.2339E+00	-.5031E+00	.31296E+00	-.43551E+00	-30.70

FILE: 01 (29)

LOC	S11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	.1102E+01	.1040E+01	-.7757E+00	.4164E+00	.13156E+01	-.12235E+00	17.72
2	.1262E+01	.1227E+00	-.8364E+00	.4365E+00	.18095E+01	-.24065E+01	19.66
3	.1006E+01	-.1040E+00	-.7319E+00	.4991E+00	.12165E+01	-.22731E+00	16.78
4	.1120E+01	.2080E+01	-.1239E+01	-.3470E+00	.29322E+01	-.80261E+01	-82.45
5	.1102E+01	-.5357E+00	-.3110E+00	-.4995E+00	.26620E+00	-.77048E+00	-29.74

FILE: 01 (30)

LOC	S11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	.1620E+01	.6503E+02	-.4720E+00	.3495E+00	.17094E+01	-.82566E+01	12.89
2	.1630E+01	.1201E+00	-.5305E+00	.4011E+00	.17780E+01	.23041E+01	13.60
3	.1500E+01	-.1120E+00	-.4457E+00	.3701E+00	.16385E+01	-.19155E+00	12.20
4	.7307E+02	.3733E+01	-.6119E+00	.3727E+00	.37868E+01	-.29458E+01	-84.37
5	.7307E+02	-.5376E+00	-.3242E+00	-.4054E+00	.23099E+00	-.73116E+00	-29.43

FILE: 01 (31)

LOC	S11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	.1670E+01	.6300E+01	-.2343E+00	.3427E+00	.20441E+01	-.30140E+01	10.83
2	.2030E+01	.7457E+01	-.2504E+00	.3945E+00	.21065E+01	-.16280E+02	10.96
3	.1903E+01	.1397E+02	-.15470E+00	.3720E+00	.19785E+01	-.61857E+01	10.69
4	.6313E+01	.4476E+01	-.53720E+01	-.3758E+00	.45061E+01	-.11544E+01	-85.19
5	.6313E+01	-.5325E+00	-.3385E+00	-.34970E+00	.23986E+00	-.72901E+00	-26.78

FILE: 01 (32)

LOC	S11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
-----	-----	-----	-----	-----	-------	-------	-------

NAME	UNIT	Q22	Q23	Q12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	1	-27.0365+00	-17.0004-01	32.0644+00	23223F+01	-24405E+00	7.24
1	2	1.7112+00	2.0045F-02	4.4948F+00	29413F+01	1.2020E+00	8.46
1	3	-1.5710E+01	-4.4034F-01	3.1242E+00	22537F+01	-6.1745E+00	6.24
1	4	2.1135E+01	4.3111E+00	-7.1701E+00	51301F+01	-2.9114E+00	-86.57
1	5	1.6131E+01	3.3113E+00	-32.207F+00	-6.61595F-02	-7.3519E+00	-31.94

ANGLE	S-MIN	S-MAX	S-12	S-13	S-22	S-23
-3.04	-32346E+00	25970E+01	-1.1577E+00	1.1570E+00	-2.1553E+00	-2.1553E+00
-2.95	-32908E+00	26372E+01	-1.1574E+00	1.1570E+00	-6.2019E+00	-6.2019E+00
-3.15	-32140E+00	26551E+01	-1.1571E+00	1.1570E+00	-2.1116E+00	-2.1116E+00
88.26	-32100E+00	46190E+01	1.0011E+00	1.0023E+00	-2.1115E+00	-2.1115E+00
88.01	-32479E+00	56876E+01	1.1565E+00	1.1569E+00	-4.4367E+00	-4.4367E+00

[illegible]

	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	-0.756E+00	0.160E+01	0.205E+00	0.3539E+01	-0.0497E+00	13.3H
2	-0.1151E+01	0.2024E+01	0.0770E+00	0.3537E+01	-0.1344E+01	12.0H
3	0.0425E+00	0.3376E+01	0.0167E+00	0.3537E+01	0.1493E+00	15.29
4	-0.1115E+01	0.0000E+00	-0.1071E+00	0.5206E+00	-0.2005E+01	-36.43
5	0.0793E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.7794E+00	-0.0264E+00	-95.44

	S=MIN	S=MAX	ANGLE
19.02	--26131E+00	25550F+01	19.51
18.51	--58910E+00	25528F+01	18.49
18.49	--11001E+00	25717F+01	18.20
18.20	--15339E+01	27662F+00	18.30
18.30	--10522E+01	54921F+01	

[illegible]

79.66
79.20
80.13
-29.38
-5.95
-23019E+01
-24050E+01
-21910E+01
-76412E+00
-27580E+00
-39701E+01

64476E-01
39611E-01
17620E+00
39490E+00
-42320E+00
-61214E+00

1.1414E+00
-22021E+00
-32243E-01
-32372E+00
-50335E+00

-11407E-01
-17266E+00
10660E+00
-22045E+00
-30272E+01

-22057E-01
-39020E+01
-21214E+01
-12660E+00
-12661E-01

FILE NO (40)	C11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	-26431E+01	12005E-02	-14054E+00	30644E+00	56843E-01	-26915E+01	81.82
1	-27705E+01	-12103E+00	-14434E+00	39434E+00	-60715E-01	-27669E+01	81.44
1	-29416E+01	12677E+00	22043E+00	47540E+00	17820E+00	-26112E+01	82.20
1	-66733E-04	-51076E+00	-33241E+00	-34124E+00	28262E+00	-11342E+00	-28.06
1	-16783E-04	-67830E+01	-47041E-01	-30354E+00	32223E-01	-47961E+01	-4.69

FILE NO (40)	C11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	-23053E+01	-12206E-01	-45727E+00	45014E+00	28644E-01	-30077E+01	83.33
1	-33051E+01	-67775E-01	-63579E+00	37094E+00	-14875E-01	-30740E+01	83.20
1	-20055E+01	66730E-01	-21470E+00	44041E+00	75714E-01	-29360E+01	83.47
1	-21305E-01	-65605E+00	-36242E+00	-33643E+00	14644E+00	-71631E+00	-25.50
1	-13382E-01	-33004E+01	-57600E+00	-39582E+00	11765E-01	-34052E+01	-3.88

FILE NO (40)	C11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	-39020E+01	-27003E-01	-7251E+00	47403E+00	21557E-01	-33053E+01	83.52
1	-31205E+01	-13161E+00	-50674E+00	34243E+00	-86282E-01	-33780E+01	83.26
1	-31860E+01	62172E-01	-27003E+00	30113E+00	13241E+00	-32340E+01	83.77
1	-22241E-01	-47229E+00	-35250E+00	-48940E+00	16473E+00	-56322E+00	-28.63
1	-22251E-01	-60866E+01	-11040E+01	-39814E+00	36389E-02	-60824E+01	-3.74

FILE NO (40)	C11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	-36705E+01	-12707E-01	-13314E+01	81924E+00	-10084E-01	-38325E+01	72.27
1	-26053E+01	-27100E-01	-45434E+00	43113E+00	10950E+00	-37931E+01	77.36
1	-26330E+01	-27459E+01	22043E+00	47540E+00	-20270E-01	-39614E+01	61.82
1	-12301E+01	10379E+00	-53457E+00	-77006E+00	53300E+00	-15954E+01	-66.47
1	-12301E+01	-23065E+01	-20860E+01	-65942E+00	-11364E+01	-64262E+01	-7.23

FILE NO (47)	C11	S22	S33	S12	S-MAX	S-MIN	ANGLE
1	23053E+01	-10426E+00	14045E+00	-51494E+00	21216E+01	-31442E+00	-12.61
1	20860E+01	-60425E+00	41744E-01	-53159E+00	21597E+01	-51440E+00	-11.71
1	10055E+01	65655E-02	23437E+00	-50627E+00	20819E+01	-11443E+00	-13.70
1	-10055E+01	36403E+01	43075E+00	51490E+00	39325E+01	-26404E+00	92.90
1	-10055E+01	13065E+00	-11493E+00	-52295E+00	51968E+00	-57999E+00	53.99

[illegible]

fragma, são obtidas a partir das tensões de acordo com as seguintes equações

Deformações radiais:

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \sigma_T)$$

Deformações tangenciais:

$$\epsilon_T = \frac{1}{E} (\sigma_T - \nu \sigma_r)$$

Na face interna do diafragma, as tensões de interesse são colhidas na face K-L dos elementos, sendo $\sigma_r = S_{22}$ e $\sigma_T = S_{33}$.

Na face externa do diafragma, as tensões de interesse são colhidas na face i-j dos elementos, sendo $\sigma_r = S_{22}$ e $\sigma_T = S_{33}$.

Sinais positivos são assumidos de tração e negativos, de compressão.

Lembrando que os resultados obtidos são para um carregamento de 1 kgf/cm^2 , monta-se as seguintes tabelas:

Face interna do diafragma: ($z=1,3\text{cm}$) - $\gamma = 0,28$; $E=2100000\text{kgf/cm}^2$

$r(\text{cm})$	elemento	$\sigma_r(\text{kgf/cm}^2)$	$\sigma_T(\text{kgf/cm}^2)$	$\varepsilon_r(\mu\varepsilon)$	$\varepsilon_T(\mu\varepsilon)$
0,125	5	3,0918	3,3126	1,0306	1,1652
0,375	10	3,8195	3,3874	1,3672	1,1038
0,60	15	6,6350	4,7444	2,5269	1,3746
0,77	20	8,2840	5,7279	3,1810	1,6230
0,895	34	8,2641	6,0925	3,1230	1,7993
1,025	35	7,7463	6,3244	2,8455	1,9788
1,175	36	5,4171	5,8684	1,7971	2,0722
1,325	37	3,5186	5,1584	0,9877	1,9872
1,50	38	1,7440	4,3123	0,2555	1,8209
1,70	39	0,069452	3,3737	-0,4168	1,5973
1,925	40	-1,5182	2,3458	-1,0357	1,3195
2,15	41	-2,8654	1,4007	-1,5512	1,0491
2,35	42	-3,9272	0,60336	-1,9505	0,8109
2,525	43	-4,7638	-0,047853	-2,2621	0,6124
2,675	44	-5,3804	-0,57600	-2,4853	0,4431
2,825	45	-6,0565	-1,1080	-2,7363	0,2799
2,95	46	-7,3065	-2,0860	-3,2012	-0,0191

Face externa do diafragma ($z=1,66\text{cm}$)

$r(\text{cm})$	elemento	$\sigma_r(\text{kgf/cm}^2)$	$\sigma_T(\text{kgf/cm}^2)$	$\varepsilon_r(\mu\varepsilon)$	$\varepsilon_T(\mu\varepsilon)$
0,895	21	-14,069	-7,3138	-5,7244	-1,6069
1,025	22	-9,5066	-6,1818	-3,7027	-1,6762
1,175	23	-6,9407	-5,8473	-2,5255	-1,8590
1,325	24	-5,0034	-5,3540	-1,6687	-1,8824
1,50	25	-3,0912	-4,6533	-0,8515	-1,8037
1,70	26	-1,3010	-3,8240	-0,1097	-1,6475
1,925	27	-0,37260	-2,8817	0,5617	-1,4219
2,15	28	1,7816	-1,9965	1,1146	-1,1883
2,35	29	2,8809	-1,2396	1,5371	-0,9744
2,525	30	3,7496	-0,61196	1,8671	-0,7914
2,675	31	4,4745	-0,069720	2,1400	-0,6298
2,825	32	5,1110	0,36311	2,3854	-0,5086
2,95	33	4,6144	0,44223	2,1384	-0,4047
3,075	47	3,8683	0,46475	1,7801	-0,2945
3,225	52	2,3631	0,27796	1,0882	-0,1827
3,45	57	0,72525	-0,045966	0,3515	-0,1186

Deformações radiais

Comparamos os valores obtidos de ε_r , usando o método dos elementos finitos com os valores obtidos anteriormente, da solução 3, para pressão aplicada = 1kgf/cm².

Nesse caso, temos:

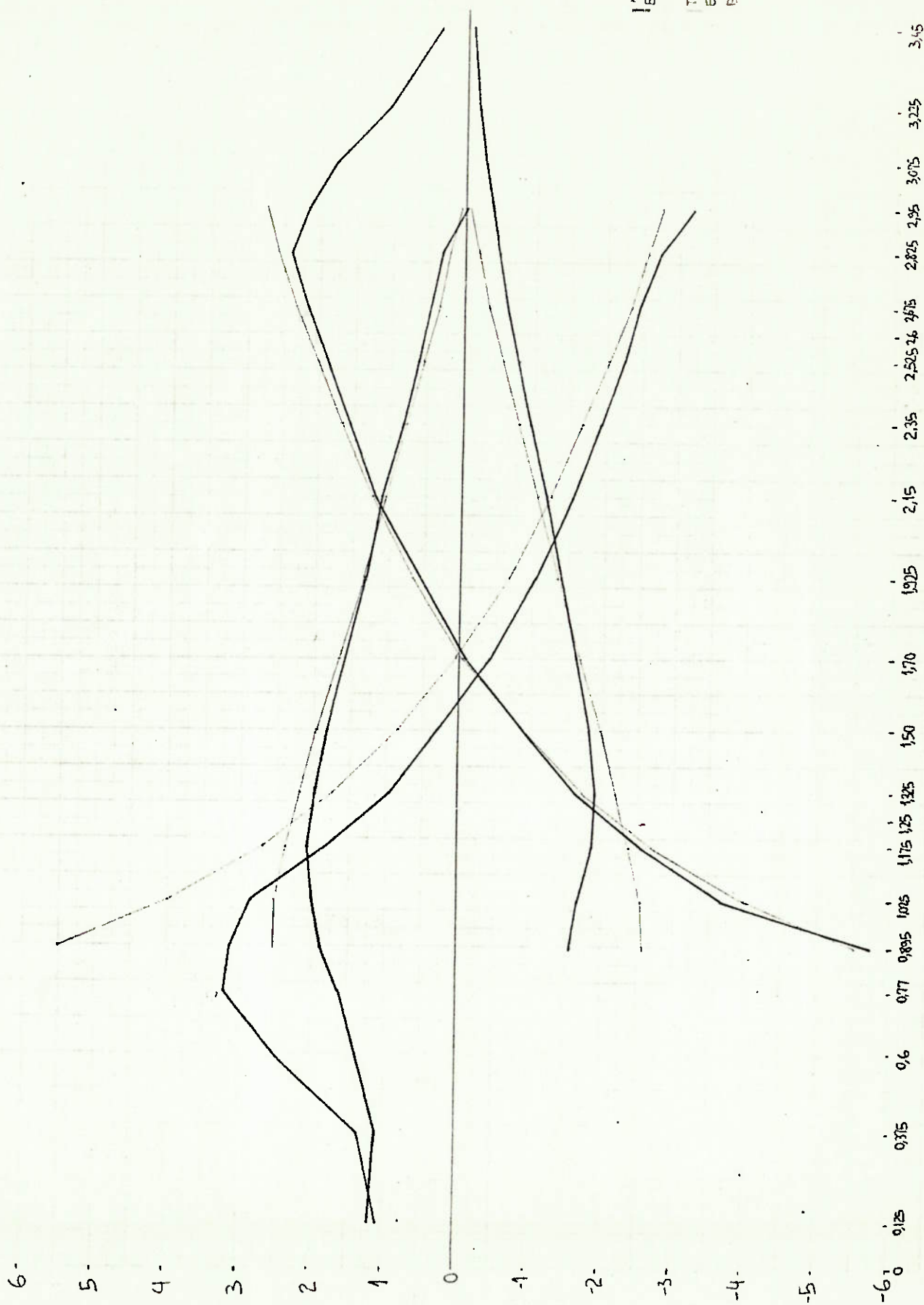
$$\varepsilon_r = \frac{-3pR^2(1-\nu)^2}{8Eh^2} \left[2C_1 - \frac{C_2}{r^2} + 2(2\ln r + 1) \right]$$

$$\text{onde: } C_1 = \frac{2(R^2 \ln R - a^2 \ln a)}{a^2 - R^2} + \frac{(a^2 - R^2)}{a^2 - R^2}$$

$$C_2 = \frac{4a^2 R^2 (\ln a - \ln R)}{a^2 - R^2}$$

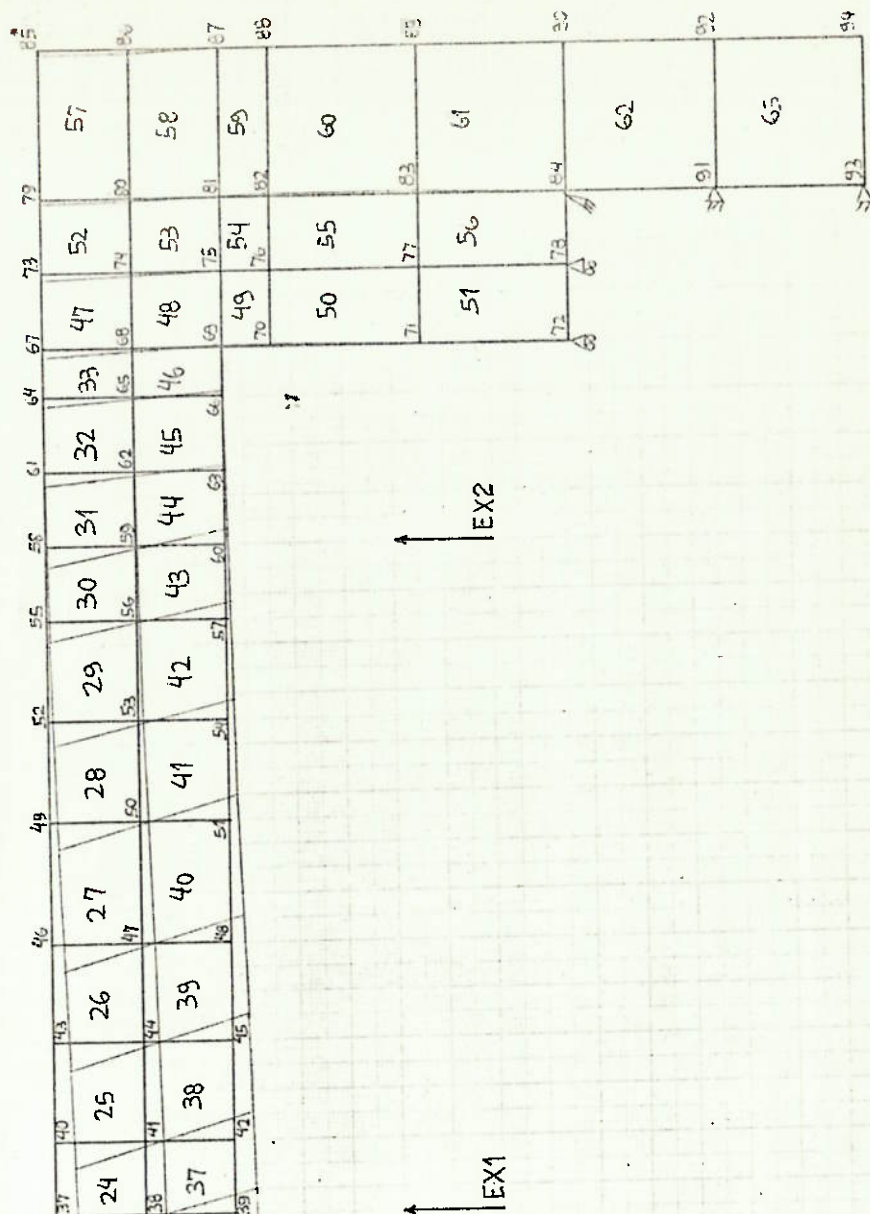
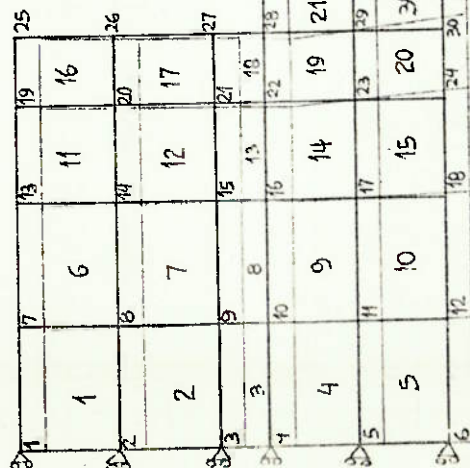
r	$\varepsilon_r (\mu\varepsilon)$	r	$\varepsilon_r (\mu\varepsilon)$	r	$\varepsilon_r (\mu\varepsilon)$	r	$\varepsilon_r (\mu\varepsilon)$
0,895	5,4998	1,325	1,7226	2,15	-1,2462	2,675	-2,2968
1,025	3,9777	1,50	0,8408	2,35	-1,6882	2,825	-2,5428
1,175	2,6936	1,70	0,0484	2,525	-2,0302	2,95	-2,7343
1,25	2,1773	1,925	-0,6631	2,60	-2,1663		

Os valores de deformações radiais e tangenciais calculados pelo método dos elementos finitos e pela teoria desenvolvida para a solução 3 são comparados em gráficos mostrados a seguir. A teoria desenvolvida para a solução 3, usada no cálculo, é mostrada em apêndice sob o título "Cálculo das Deformações". A título de curiosidade, mostra-se, também, a deformada da estrutura.



MÉTODOS
ELEMENTARES PARA
TEORIA DAS EQUAÇÕES
DIFERENCIAIS
BI-ENGENHARIA

1900 (cm)



deslocamentos



centímetros

escala 10:1

Agora temos dados mais precisos para estabelecermos as posições dos extensômetros e garantirmos que a célula de carga vai fornecer as respostas esperadas. Sendo assim, vamos recalcular as posições dos extensômetros a partir das posições fornecidas pelo programa de pré-dimensionamento, levando em conta que os extensômetros vão ser instalados na face interna do diafragma. Para esse recálculo, as restrições são essas:

$$0 \leq r \leq 2,59$$

$$(\xi_{r_1} + \xi_{r_2}) \text{ pré-dimensionamento} = (\xi_{r_1} + \xi_{r_2}) \text{ elementos finitos}$$

$$\xi_{r_1} + \xi_{r_2} \text{ no pré-dimensionamento} = 2,1773 + 2,1663 = 4,3436$$

No cálculo com elementos finitos, $r_1 = ?$ e $r_2 = 2,59\text{cm}$

$$\xi_{r_1} + \xi_{r_2} = \xi_{r_1} + 2,3737 = 4,3436$$

$$\xi_{r_1} = 1,9699$$

Sabendo que $\xi_{r_1} = 1,9699$

obtendo o valor de r_1 , por interpolação linear (pois o comprimento da grade do extensômetro é relativamente pequeno, da ordem de 2mm).

$$r_1 = 1,15\text{cm}$$

Verificação das tensões

Nesse item, vamos verificar os valores e os locais onde aparecem as maiores tensões principais, com a finalidade de se verificar se os seus valores são aceitáveis. Para um carregamento aplicado de 1kgf/cm^2 , as maiores tensões principais surgidas foram:

ELEMENTO	LOCAL (LADO OU CENTRO)	VALOR(KGF/CM ²)
21	entre os nós 28 e 31	-14,32
18	entre os nós 28 e 22	-10,89
18	entre os nós 27 e 28	-10,71

Para os outros pontos da discretização analisada, as tensões são menores que 9kgf/cm^2 . A força máxima a ser aplicada na célula de carga é 500kgf e corresponde a uma

pressão de $225,56 \text{ kgf/cm}^2$.

A maior tensão no diafragma, sob esta carga, será de 3230 kgf/cm^2 , próximo ao raio de curvatura de apoio interno. Este local é o mais sujeito a danos do diafragma.

4. DETALHAMENTO DO PROJETO

4.1. Considerações Iniciais sobre a Câmara Triaxial e Adaptações a serem Feitas

Basicamente, as modificações a serem feitas são no sentido de simplificar a câmara anteriormente existente e adaptá-la à célula de carga que vai ser usada. A diferença maior é o diâmetro da haste aplicadora de esforços, que, anteriormente, era 11mm e será mudado para 15mm. Anteriormente, como o sistema medidor de forças era colocado fora da câmara, existia a necessidade de que o atrito da haste aplicadora de esforços com a tampa da câmara triaxial fosse minimizado e paralelamente, o vazamento de água na câmara deveria ser nulo. Estas condições eram satisfeitas fazendo-se na tampa da câmara um mancal girante por onde passava haste de aplicação de esforços. A haste e o mancal eram retificados na superfície de contato, que permanecia imersa em óleo.

A atual proposta, de colocar o sistema medidor de forças dentro da câmara triaxial permite que o atrito entre a haste aplicadora de esforços e a tampa da câmara seja maior do que no caso anterior e, com isso, pode-se simplificar o sistema de vedação, que passa a se constituir de dois anéis de borracha colocados na tampa da câmara. Para se obter firmeza total na haste aplicadora de esforços, pode-se montar uma guia sobre a tampa da câmara triaxial. Desse modo, consegue-se obter um sistema de vedação de manutenção mais fácil e barata do que no caso anterior. A haste aplicadora de esforços é vazada para que os fios dos extensômetros possam ser conduzidos do interior da câmara triaxial para fora. Esses fios são protegidos da água por anéis de borracha que, colocados entre as peças que constituem a célula de carga, funcionam como vedação. As rosca entre essas peças são finas para permitir bom travamento e dificultar, desse modo, que elas se soltem entre si. O desenho

das peças, apresentado a seguir, é baseado nas considerações acima.

5. SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO

Neste item, apresentamos algumas sugestões que poderão ser seguidas de modo a se ter continuidade no trabalho executado até agora. As sugestões apresentadas estão classificadas hierarquicamente, por grau de complexidade de modo que cada sugestão apresentada engloba as seguintes e não as precessoras.

A sugestão de caráter mais global é a de pesquisa de tipos de célula de carga mais eficientes, em termos de resolução, o que significa pesquisar células de carga que forneçam respostas com maior precisão para um determinado fundo de escala. A maior eficiência, em termos de resolução, está relacionada a dois aspectos: um deles, externo, é o ligado à sensibilidade do aparelho que lê a saída elétrica da célula de carga. Se o aparelho de leitura for de pouca sensibilidade, o fundo de escala terá menor número de divisões e a precisão obtida na leitura é relativamente pequena. Se o aparelho de leitura for de alta sensibilidade, dar-se-á o contrário. O outro, interno, é ligado ao maior valor de deformação média sob o extensômetro que o elemento sensível pode atingir. Esse valor será mais alto quanto mais uniforme for a distribuição das deformações no elemento sensível. A pouca concentração de tensões torna o elemento sensível mais durável também. Deve-se então, pesquisar elementos sensíveis com distribuição de deformações o mais uniforme possível, para se conseguir o aumento de eficiência procurado.

Subordinada a essa sugestão, enquadra-se o de automatizar, da mesma forma, o dimensionamento de todos os tipos de elementos sensíveis que se precisa usar. Desse modo, fica bem mais rápido e confiável o projeto de uma possível célula de carga. Para a automatização do dimensionamento, pode-se usar o mesmo princípio de raciocínio usado no pré-dimensionamento de elementos sensíveis de diafragma: variando-se as dimensões significativas do elemento sensível dentro de limites fisicamente impostos e procurando-se o conjunto de dimensões para o qual se tem a melhor resolução.

A próxima sugestão é a de aperfeiçoar o modelo de pré-dimensionamento de elementos sensíveis em forma de diafragma, desenvolvido neste trabalho. O atual modelo se baseia na teoria das placas e cascas, com condições de contorno ideais, tais como engastamentos perfeitamente rígidos. O aperfeiçoamento sugerido é que as deformações que surgem distribuídas ao longo do diafragma sejam baseadas em resultados de simulações usando o método dos elementos finitos. Ao invés de termos um conjunto de funções que calculam as deformações nos diversos pontos do diafragma, para as condições de contorno ideais, teremos um conjunto de tabelas de valores de deformações em cada ponto da placa, que deverá ser devidamente interpolado para fornecer as deformações procuradas no caso específico em questão. Os resultados assim obtidos poderão ser aferidos, de maneira semelhante à feita neste trabalho, com o método dos elementos finitos, para se ter maior precisão. A precisão obtida no processo de cálculo acima, antes da aferição, aumenta se as dimensões dos elementos sensíveis (diafragmas) forem padronizadas ou seguirem alguma padronização. Esta é a última sugestão apresentada: padronizar as dimensões dos diafragmas. Com a padronização, pode-se guiar o programa do pré-dimensionamento no sentido de já fornecer todas as dimensões do diafragma.

Para o caso de se seguir algumas dessas sugestões, afirmamos que não é absolutamente necessário que, para executar a sugestão número 1, a de pesquisa, deva-se antes executar as três sugestões seguintes. No entanto, se isto acontecer, no nosso ponto de vista, o trabalho, como um todo, ficará melhor estruturado.

Sergio Rubens Stancati de Souza.

6. BIBLIOGRAFIA

1. *The Strain Gage Primer* - C.C. Perry e H.R. Lissner Mc Graw -
- Hill Book Company - 1962.
2. *Formulas for Stress and Strain* - Raymond J. Roark Warren
C. Yoyng - Mc Graw - Hill - 1975
3. *The design of diaphragms for pressure gages which use the
bonded Wire resistance strain gage* - F. D. Werner - Proc.
SESA. Vol. II n° 1, 1954, pag. 137.

ANEXOS

APÊNDICE A

BASE TEÓRICA PARA O PROGRAMA DE DIMENSIONAMENTO

A.1. Definição de uma Equação da Linha Elástica para a Solução 2 para Posterior Estudo de Sensibilidade

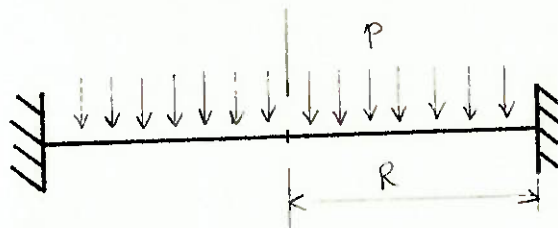
A solução 2 é definida como uma placa circular en gastada externamente sob carregamento distribuído e uniforme.

Análise inicial das soluções

- Para a análise das soluções 2 e 3 será usada a teoria das plcas e cascas.

Inicialmente será desenvolvida a equação da linha elástica dos diafragmas circulares e o estudo da sensibilidade das soluções será feito posteriormente.

1. Vamos considerar inicialmente a solução 2. O modelo elástico adotado é esquematizado abaixo:



Para o cálculo da equação da linha elástica, será usada a equação de Lagrange para coordenadas polares, que tem a seguinte forma:

$$\frac{d}{dr} - \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) = \frac{Q}{D}$$

onde w representa a linha elástica, Q é a força cortante por unidade de comprimento, positiva como indicada acima, na posição r genérica e

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

Para maiores detalhes, essa formulação pode ser encontrada na apostila "Teoria das Placas e Cascas" do Prof. Dr. Décio de Zagottis-EPUSP.

No caso de carregamentos axissimétricos, a força cortante e os momentos de torção são nulos em cortes radiais e os momentos de torção também são nulos em cortes tangenciais. Posteriormente, serão calculadas as deformações. Nos nossos casos, o carregamento é axissimétrico, valendo a equação de Lagrange na forma dada acima.

Para o nosso caso, as condições de contorno são:

$$(w)_r = R = 0 \quad (1)$$

$$\left(\frac{dw}{dr}\right)_{r=0} = 0 \quad (2)$$

$$\left(\frac{dw}{dr}\right)_{r=R} = 0 \quad (3)$$

Façamos a integração da equação

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{Q}{D} \quad \text{segundo as condições de contorno acima}$$

ma

Dando um valor a Q em relação à carga distribuída:

$$2 \gamma_{rQ} = \gamma_{r^2p}$$

Integrando uma primeira vez:

$$\int_0^r d \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \int_0^r \frac{rp}{2D} dr$$

sai:

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) = \frac{r^3 p}{4D} + C_1 r$$

Integrando a segunda vez:

$$\int_0^r d \left(r \frac{dw}{dr} \right) = \int_0^r \frac{r^3 p}{4D} + C_1 r dr$$

e sai:

$$\frac{dw}{dr} = \frac{r^3 p}{16D} + \frac{C_1 r}{2} + \frac{C_2}{r}$$

Integrando a última vez:

$$\int_0^r dw = \int_0^r \frac{r^3 p}{16D} + \frac{C_1 r}{2} + \frac{C_2}{r} dr$$

e sai:

$$w = \frac{r^4 p}{64D} + \frac{C_1 r^2}{4} + C_2 \ln r + C_3$$

Devo aplicar agora as condições de contorno:

Inicialmente, da condição 2, sai:

$$\left(\frac{dw}{dr} \right)_{r=0} = 0 = \frac{r^3 p}{16D} + \frac{C_1 r}{2} + \frac{C_2}{r} \rightarrow C_2 = 0$$

Aplico a condição de contorno 3:

$$\left(\frac{dw}{dr} \right)_{r=R} = 0 = \frac{R^3 p}{16D} + \frac{C_1 R}{2}$$

$$C_1 = - \frac{R^3 p \cdot 2}{16D \cdot R} = - \frac{R^2 p}{8D}$$

Aplico então a condição de contorno nº 1:

$$(w)_{r=R} = 0 = \frac{R^4 p}{64D} - \frac{R^4 p}{32D} + C_3$$

$$e \quad C_3 = - \frac{R^4 p + 2R^4 p}{64D} = \frac{R^4 p}{64D}$$

A equação da linha elástica fica dada por:

$$w = \frac{r^4 p}{64D} - \frac{R^2 r^2 p}{32D} + \frac{R^4 p}{64D}$$

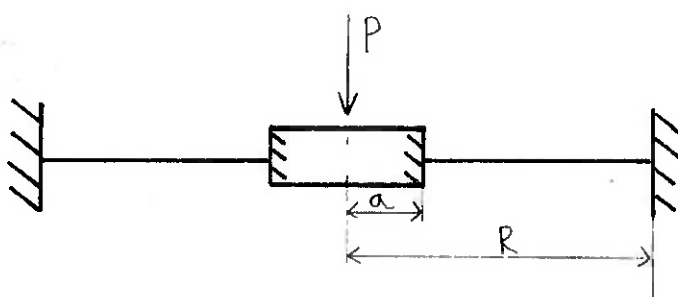
finalmente

$$w = \frac{p(r^2 - R^2)^2}{64D} = \frac{3p(r^2 - R^2)^2 (1 - \frac{1}{2})^2}{16Eh^3}$$

A.2. Definição de uma Equação da Linha Elástica para a Solução 3 para posterior Estudo de Sensibilidade

A solução 3 é definida por uma placa circular bi engastada, externamente e internamente, sendo que o engastamento interno está sob carga, aplicada no centro.

Para a solução 3 uma aproximação preliminar seria a obtida utilizando-se este modelo elástico:



Este modelo representa um diafragma engastado em seu diâmetro interno e externo e sob a ação de força concentrada sobre o engastamento (se fosse distribuída, não haveria diferença)

Vamos integrar a equação:

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \frac{dw}{dr}) \right) = \frac{Q}{D}$$

segundo as seguintes condições de contorno:

$$(w)_{r=R} = 0 \quad (4)$$

$$\left(\frac{dw}{dr} \right)_{r=a} = 0 \quad (5)$$

$$\left(\frac{dw}{dr} \right)_{r=R} = 0 \quad (6)$$

Achamos o valor de Q , para $r \geq a$

$$P = 2\pi rQ$$

$$Q = \frac{P}{2\pi r}$$

Então, integrando a 1ª vez:

$$\int_0^r d \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \int_0^r \frac{P}{2\pi rD} dr$$

sai:

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) = \frac{Pr}{2\pi D} \ln r + C_1$$

Integrando a 2ª vez:

$$\int_0^r d \left(r \frac{dw}{dr} \right) = \int_0^r \frac{Pr}{2\pi D} \ln r + C_1 r dr$$

teremos:

$$r \frac{dw}{dr} = \frac{C_1 r^2}{2} + \frac{P}{2\pi D} \int_0^r r \ln r dr = C_1 r + \frac{P}{2\pi D} \left(\frac{r^2}{2} \ln r - \frac{r^2}{4} \right) + C_2$$

$$e \quad \frac{dw}{dr} = \frac{C_1 r}{2} + \frac{C_2}{r} + \frac{Pr}{8\pi D} (2 \ln r - 1)$$

Integrando a última vez:

$$\int_0^r dw = \int_0^r \frac{C_1 r}{2} + \frac{C_2}{r} + \frac{Pr}{8\pi D} (2 \ln r - 1) dr$$

$$w = \frac{C_1 r^2}{4} + C_2 \ln r - \frac{Pr^2}{16\pi D} + \frac{P}{4\pi D} \int_0^r r \ln r dr$$

e sai:

$$w = \frac{C_1 r^2}{4} + C_2 \ln r - \frac{Pr^2}{16\pi D} + \frac{Pr^2}{16\pi D} (2 \ln r - 1) + C_3$$

$$w = \frac{C_1 r^2}{4} + C_2 \ln r + C_3 + \frac{Pr^2}{8\pi D} (\ln r - 1)$$

$$De \quad w = \frac{C_1 r^2}{4} + C_2 \ln r + C_3 + \frac{Pr^2}{8\pi D} (\ln r - 1)$$

Aplico as condições de contorno (5)

$$\left(\frac{dw}{dr}\right)_{r=a} = 0$$

$$\left(\frac{dw}{dr}\right)_{r=a} = \frac{C_1 a}{2} + \frac{C_2}{a} + \frac{Pa}{8\eta D} (2 \ln a - 1) = 0$$

e a condição de contorno (6):

$$\left(\frac{dw}{dr}\right)_{r=R} = \frac{C_1 R}{2} + \frac{C_2}{R} + \frac{PR}{8\eta D} (2 \ln R - 1) = 0$$

resolve-se este sistema de equações:

$$-\frac{C_1 a R}{2} - \frac{C_2 R}{R} = \frac{PaR}{8\eta D} (2 \ln a - 1)$$

$$-\frac{C_1 a R}{2} - \frac{C_2 R}{R} = -\frac{PaR}{8\eta D} (2 \ln R - 1)$$

somando as duas equações do sistema, sai:

$$C_2 \left(\frac{a}{R} - \frac{R}{a}\right) = \frac{2PaR}{8\eta D} (\ln a - \ln R)$$

$$C_2 \left(\frac{a^2 - R^2}{aR}\right) = \frac{PaR}{4\eta D} (\ln a - \ln R)$$

$$C_2 = \frac{Pa^2 R^2 (\ln a - \ln R)}{4\eta D (a^2 - R^2)}$$

Acho C_1 :

$$\frac{C_1 R}{2} = \frac{-Pa^2 R (\ln a - \ln R) - PR (2 \ln R - 1)}{4\eta D (a^2 - R^2)}$$

$$C_1 = \frac{-2Pa^2 (\ln a - \ln R) - P(a^2 - R^2) (2 \ln R - 1)}{4\eta D (a^2 - R^2)}$$

$$C_1 = \frac{-2Pa^2 \ln a + 2Pa^2 \ln R - 2Pa^2 \ln R + Pa^2 + PR^2 (2 \ln R - 1)}{4\eta D (a^2 - R^2)}$$

$$C_1 = \frac{Pa^2 (-2 \ln a + 1) + PR^2 (2 \ln R - 1)}{4\eta D (a^2 - R^2)}; \quad C_1 = \frac{P(2(R^2 \ln R - a^2 \ln a) + (a^2 - R^2))}{4\eta D (a^2 - R^2)}$$

$$\frac{dw}{dr} = \frac{P}{8\eta D r (a^2 - R^2)} [r^2 (2(R^2 \ln R - a^2 \ln a) + (a^2 - R^2)) + 2a^2 R^2 (\ln a - \ln R) + r^2 (2 \ln r - 1) \cdot (a^2 - R^2)]$$

Procuro o valor de C_3 aplicando a condição de contorno (4)

$$(w)_{r=R} = 0$$

$$C_3 = - \frac{C_1 r^2}{4} - C_2 \ln r - \frac{Pr^2}{8\eta D} (\ln r - 1)$$

$$C_3 = - \frac{PR^2(2(R^2 \ln R - a^2 \ln a) + (a^2 - R^2))}{16\eta D (a^2 - R^2)} - \frac{Pa^2 R^2 (\ln a - \ln R) \ln R}{4\eta D (a^2 - R^2)} - \frac{PR^2 (\ln R - 1)}{8\eta D}$$

$$C_3 = \frac{PR^2(2(a^2 \ln a - R^2 \ln R) + (R^2 - a^2))}{16\eta D (a^2 - R^2)} + \frac{Pa^2 R^2 (\ln R - \ln a) \ln R}{4\eta D (a^2 - R^2)} + \frac{PR^2 (1 - \ln R)}{8\eta D}$$

$$C_3 = \frac{PR^2}{16\eta D (a^2 - R^2)} [2(a^2 \ln a - R^2 \ln R) + (R^2 - a^2) + 4a^2 (\ln R - \ln a) \ln R + 2(a^2 - R^2)(1 - \ln R)]$$

$$C_3 = \frac{PR^2}{16\eta D (a^2 - R^2)} [a^2 - R^2 + 2a^2 (\ln a (1 - 2 \ln R) + 2 (\ln R)^2 - \ln R)]$$

acho a equação da linha elástica:

$$w = \frac{P}{16\eta D} [C_1 r^2 + C_2 \ln r + C_3 + 2r^2 (\ln r - 1)]$$

com

$$C_1 = \frac{2(R^2 \ln R - a^2 \ln a) + (a^2 - R^2)}{a^2 - R^2}$$

$$C_2 = \frac{4a^2 R^2 (\ln a - \ln R)}{(a^2 - R^2)}$$

$$C_3 = \frac{R^2 [a^2 - R^2 + 2a^2 (\ln a (1 - 2 \ln R) + 2 (\ln R)^2 - \ln R)]}{a^2 - R^2}$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

A.3. Cálculo das deformações nas direções radial e tangencial para o caso das soluções 2 e 3:

1- Fórmulas de Derivação

A partir das fórmulas de momentos radiais e tangenciais:

$$M_r = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \quad \text{com} \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

$$M_\theta = -D \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right)$$

e sabendo que:

$$M_r = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_r z dz \quad \text{com} \quad \sigma_r = Krz \quad \text{e}$$

$$M_\theta = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_\theta z dz \quad \sigma_\theta = K\theta z$$

Chega-se a :

$$\sigma_r = -\frac{E}{1-\nu^2} z \left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{-E}{1-\nu^2} z \left[\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right]$$

Sabendo que:

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu \sigma_\theta]$$

$$\epsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \nu \sigma_r]$$

pode-se deduzir as fórmulas das deformações:

Deformação tangencial

$$\epsilon_\theta = \frac{1}{E} \left[\frac{E}{1-\nu^2} z \left[\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right] + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right] \right]$$

$$\epsilon_\theta = \frac{z}{1-\nu^2} \left[-\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} - \nu \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\nu^2}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right]$$

$$\epsilon_\theta = \frac{z}{1-\nu^2} \left[\frac{\nu^2 - 1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right]$$

$$\epsilon_\theta = -\frac{z}{r} \frac{\partial w}{\partial r}$$

Deformação Radial

$$\xi_r = \frac{1}{E} \left[-\frac{E}{1-\nu^2} z \left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\nu}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right] + \frac{\nu E z}{1-\nu^2} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right] \right]$$

$$\xi_r = \frac{z}{1-\nu^2} \left[-\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} - \frac{\nu}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\nu}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \nu^2 \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right]$$

$$\xi_r = \frac{z}{1-\nu^2} (\nu^2 - 1) \frac{\partial^2 w}{\partial r^2}$$

$$\xi_r = -z \frac{\partial^2 w}{\partial r^2}$$

Resumo das fórmulas

Tensões $\sigma_r = -\frac{E}{1-\nu^2} z \left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\nu}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right]$

$$\sigma_\theta = -\frac{E}{1-\nu^2} z \left[\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right]$$

Deformações $\xi_r = -z \frac{\partial^2 w}{\partial r^2}$

$$\xi_\theta = \frac{z}{r} \frac{\partial w}{\partial r}$$

Dedução da equação da deformação para a solução 2 na superfície inferior do diafragma

Para a solução 2, temos

$$w = \frac{p(r^2 - R^2)^2}{64D} \quad \text{com } D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad h = \text{espessura do diafragma}$$

$$\frac{\partial w}{\partial r} = \frac{pr(r^2 - R^2)}{16D}, \quad \xi_\theta = -\frac{z}{r} \frac{\partial w}{\partial r}$$

Para $z = \frac{h}{2}$

$$\xi_\theta = \frac{-hpr(r^2 - R^2)}{2r16D} = \frac{-hpr(r^2 - R^2)}{32D} = \frac{-12(1-\nu^2)hp(r^2 - R^2)}{Eh^3 32}$$

$$\xi_{\theta} = \frac{-3(1-\nu^2)(r^2-R^2)p}{8Eh^2}$$

Deformação radial:

$$\xi_r = z \frac{\partial^2 w}{\partial r^2}$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} = \frac{p}{16D} (r^2 - R^2 + 2r^2) = \frac{p}{16D} (3r^2 - R^2)$$

Para $z = \frac{h}{2}$

$$\xi_r = -\frac{h}{2} \frac{p}{16Eh^3} (3r^2 - R^2)$$

$$\xi_r = \frac{-3p}{8Eh^2} (1-\nu^2) (3r^2 - R^2)$$

Dedução da equação da deformação para a solução 3 na superfície inferior do diafragma

Para a solução 3 temos: $w = \frac{p}{16\pi D} [C_1 r^2 + C_2 \ln r + C_3 + 2r^2(\ln r - 1)]$

com

$$C_1 = \frac{2(R^2 \ln R - a^2 \ln a) + (a^2 - R^2)}{a^2 - R^2}$$

$$C_2 = \frac{4a^2 R^2 (\ln a - \ln R)}{a^2 - R^2}$$

$$C_3 = \frac{R^2 [a^2 - R^2 + 2a^2 (\ln a (1 - 2 \ln R) + 2(\ln R)^2 - \ln R)]}{a^2 - R^2}$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

Calculando as derivadas:

$$\frac{\partial w}{\partial r} = \frac{p}{16\pi D} \left[2C_1 r + \frac{C_2}{r} + 2r(2\ln r - 1) \right]$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} = \frac{p}{16\pi D} \left[2C_1 - \frac{C_2}{r^2} + 2(2\ln r + 1) \right]$$

Cálculo das deformações:

Radial:

$$\xi_r = -z \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \quad \text{para } z = \frac{h}{2}$$

$$\xi_r = -\frac{Ph \cdot 12(1-\nu)^2}{32\pi E h^3} \left[2C_1 - \frac{C_2}{r^2} + 2(2\ln r + 1) \right]$$

$$*\xi_r = -\frac{3P(1-\nu)^2}{8\pi E h^2} \left[2C_1 - \frac{C_2}{r^2} + 2(2\ln r + 1) \right]$$

Tangencial: $\xi_\theta = (z/r)(\partial w / \partial r)$ para $z = h/2$

$$\xi_\theta = -\frac{Ph \cdot 12(1-\nu)^2}{32\pi E h^3} \left[2C_1 + \frac{C_2}{r^2} + 2(2\ln r - 1) \right]$$

$$*\xi_\theta = -\frac{3P(1-\nu)^2}{8\pi E h^2} \left[2C_1 + \frac{C_2}{r^2} + 2(2\ln r - 1) \right]$$

A.4. Fórmula Geral para as Deformações Lidas pelos Extensômetros-Definição dos Fatores K_{1R} , K_{1T} , K_{2R} e K_{2T}

A.4.1. Inicialmente, vamos fazer uma tabela de variação das deformações radial e tangencial:

solução 3:

$$\xi_r = \frac{3P(1-\nu)^2}{8\pi E h^2} \left[2C_1 - \frac{C_2}{r^2} + 2(2\ln r + 1) \right]$$

Radial

Dados: $E = 1$ $h = 0,01$ $\nu = 0$ $R = 1$ $a = 0,5; 0,25; 0,1; 0,05$ $P = 1$

ξ_r :

r	a=0,05 (0,05)23904,2	a=0,1	a =0,25	a=0,5
0,1	9840,1	17435,5	-	-
0,2	3841,9	5797,2	(0,25)9346,0	-
0,3	1408,1	2318,8	6318,2	-
0,4	- 139,8	405,4	2799,5	-
0,5	-1285,9	- 909,9	741,2	4050,8
0,6	-2200,2	-1916,1	- 668,6	1831,9
0,7	-2962,6	-2734,0	-1729,8	282,9
0,8	-3617,4	-3424,6	-2578,5	- 882,3
0,9	-4191,5	-4023,4	-3285,5	-1806,5
1	-4703,0	-4552,5	-3892,1	-2568,3

Deformações tangenciais:

$$\xi_{\theta} = -\frac{3P(1-\nu)^2}{8\pi E h^2} \left[2C_1 + \frac{C_2}{r^2} + 2(2\ln r - 1) \right]$$

Mesmos dados que o caso anterior:

 ξ_{θ} :

r	a=0,05	a=0,1	a=0,25	a=0,5
0,05	0	-	-	-
0,1	7445,0	0	-	-
0,2	6824,1	5019,3	(0,25)0	-
0,3	5386,1	4625,7	1286,8	-
0,4	4186,8	3791,9	2058,3	-
0,5	3202,0	2976,4	1985,7	0
0,6	2375,3	2241,6	1654,5	477,8
0,7	1665,7	1587,4	1243,7	554,8
0,8	1045,3	1003,0	817,2	444,9
0,9	494,7	477,0	399,6	244,3
1	0	0	0	0

Uma observação da tabela de valores de ξ_r indica que a deformação máxima ocorre junto à borda engastada interna

e que os valores de deformação caem rapidamente. Junto à borda engastada externamente, os valores das deformações variam mais lentamente mas atingem menores valores absolutos.

Quanto às deformações tangenciais, são nulas nas bordas engastadas, passando por um valor máximo proximamente à borda engastada internamente.

Este máximo pode ser obtido derivando-se a equação:

$$\xi_{\theta} = \frac{-3p(1-\nu)^2}{8\eta Eh^2} \left[2C_1 + \frac{C_2}{r^2} + 4\ln r - 2 \right] \text{ em relação a } r \text{ e igualando a zero.}$$

$$\frac{d\xi_{\theta}}{dr} = -\frac{3p(1-\nu)^2}{8\eta Eh^2} \left[-\frac{2C_2}{r^3} + \frac{4}{r} \right] = 0$$

Temos então

$$\frac{2C_2}{r^3} = \frac{4}{r}$$

$$\text{e } r = \sqrt{\frac{C_2}{2}}$$

A deformação máxima é encontrada substituindo-se o valor de r encontrado na equação de ξ_{θ} :

$$\xi_{\theta\max} = -\frac{3p(1-\nu)^2}{8\eta Eh^2} \left[2C_1 + 2\ln \left(\frac{C_2}{2} \right) \right]$$

Este valor $\xi_{\theta\max}$ deve ser usado como critério de dimensionamento à deformação tangencial máxima.

Estudo da variação das deformações radial e tangencial para a solução 2.

Deformação Radial:

$$\xi_r = -\frac{3p}{8Eh^2} (1-\nu)^2 (3r^2 - R^2)$$

Os dados serão os mesmos. Obtém-se as seguintes respostas:

	r	ξ_r	r	ξ_r
E = 1				
h = 0,01	0	3750	0,5	937,5
$\nu = 0$	0,1	3637,5	0,6	- 300
R = 1	0,2	3300	0,7	-1762,5
p = 1	0,3	2737,5	0,8	- 3450
	0,4	1950	0,9	-5362,5
			1,0	-7500

Deformação Tangencial:

$$\xi_{\theta} = -\frac{3p(1-\nu)^2(r^2-R^2)}{8Eh^2}$$

Os dados usados são os mesmos que no caso anterior.
As respostas obtidas são as seguintes:

r	ξ_{θ}	r	ξ_{θ}
0	3750	0,6	2400
0,1	3712,5	0,7	1912,5
0,2	3600	0,8	1350
0,3	3412,5	0,9	712,5
0,4	3150	1,0	0
0,5	2812,5		

Observando as tabelas das deformações radial e tangencial, observa-se que as deformações radiais têm maior valor absoluto na proximidade da borda engastada. Quanto às deformações tangenciais, os maiores valores encontrados estão na proximidade do centro do diafragma caindo a zero na borda engastada. Para efeito de dimensionamento, $\xi_{r\max}$ está na borda engastada, enquanto $\xi_{\theta\max}$ está no centro do diafragma.

A.4.2. Estudo das Deformações Médias sobre Áreas

1 - Considerações iniciais

Este estudo das deformações médias sobre áreas de coroas circulares vai ser feito com vistas à determinação da

deformação média que um strain gage vai sofrer se colado sobre elas. As fórmulas das deformações são as seguintes:

Solução 2:

$$\xi_r = -\frac{3p(1-\nu)^2}{8Eh^2} (3r^2 - R^2)$$

$$\xi_\theta = -\frac{3p(1-\nu)^2}{8Eh^2} (r^2 - R^2) \quad \text{onde } p \text{ é a carga por unidade de área.}$$

Solução 3:

$$\xi_r = -\frac{3P(1-\nu)^2}{8\pi Eh^2} \left[2C_1 - \frac{C_2}{r^2} + 2(2\ln r + 1) \right]$$

$$\xi_\theta = -\frac{3P(1-\nu)^2}{8\pi Eh^2} \left[2C_1 + \frac{C_2}{r^2} + 2(2\ln r - 1) \right]$$

onde C_1 e C_2 podem ser encontrados na folha 07 e P é a carga concentrada no engastamento interior do diafragma.

Pode-se observar que as fórmulas das deformações são proporcionais a um valor dependente do raio em que se quer a deformação por um fator $3(1-\nu)^2/8Eh^2$, que será desprezado, por ser constante. As deformações médias são dadas por:

$$\bar{\xi}_r = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \xi_r d_r}{\int_{r_1}^{r_2} d_r}$$

$$\bar{\xi}_\theta = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \xi_\theta r d_r}{\int_{r_1}^{r_2} r d_r}$$

O fator r aparece multiplicando ξ_θ no denominador da última expressão porque o comprimento do fio do strain gage na direção tangencial é proporcional ao raio. A deformação obtida é a deformação média no fio. Uma outra maneira de se obter as deformações médias em strain gages é saber o espaçamento entre as espiras e fazer o cálculo discretamente, fazendo a soma dos produtos das deformações pelo comprimento do fio e dividindo-se o resultado pelo comprimento total do fio. Essa, aliás, é a forma mais correta, dada por:

$$\bar{\epsilon}_{r,e} = \frac{\sum_{i=1}^m \epsilon_{ir,e}}{\sum_{i=1}^m \lambda_i}, \text{ onde } m \text{ é o nº de segmentos do fio no espaço considerado}$$

2 - Obtenção das tabelas de deformações médias/deformações máxi-
mas em áreas. Considerando-se que o raio do diafragma pode ser
dividido em 20 pontos discretos, a deformação média pela defor-
mação máxima pode ser encontrada pelo seguinte programa, que
vai tirar as deformações médias para todos os pares de raios
entre os 20 designados. Nesse caso, entre os raios r_1 e r_2 ,
 $r_1 \leq r_2$, cobertos pelos strain gages, serão consideradas divi-
sões de $0,05R$ para os cálculos discretos. Esta formulação vai
nos facilitar a comparação entre as diversas posições de strain
gages sobre o diafragma numa primeira análise. Posteriormente,
poderão ser feitas outras formulações, se for o caso. O progra-
ma usado aparece na página seguinte.

A partir da saída do programa listado anteriormen-
te, monta-se a seguinte tabela, para fins comparativos:

Raios Cobertos pelo Extensôme- tro Diafragma (%)	Solução 2		Solução 3 (a/R=0,1)		Solução 3 (a/R=0,25)	
	K_{2r}	K_{2T}	K_{2r}	K_{2T}	K_{2r}	K_{2T}
5 a 5	-0,49625	0,99750	-	-	-	-
5 a 10	-0,49063	0,99250	0,50000	0	-	-
5 a 15	-0,48250	0,98500	0,51171	0,41934	-	-
5 a 20	-0,47188	0,97500	0,46690	0,64933	-	-
5 a 25	-0,45875	0,96250	0,41633	0,75998	0,20000	0
5 a 30	-0,44313	0,94750	0,36911	0,80466	0,27934	0,17639
5 a 35	-0,42500	0,93000	0,32667	0,81235	0,30487	0,35437
5 a 40	-0,40437	0,91000	0,28874	0,79876	0,30421	0,49506
5 a 45	-0,38125	0,88750	0,25473	0,77273	0,29012	0,59512
5 a 50	-0,35562	0,86250	0,22404	0,73944	0,26904	0,66013
5 a 55	-0,32750	0,83500	0,19615	0,70199	0,24439	0,69699
5 a 60	-0,29687	0,80500	0,17065	0,66231	0,21806	0,71188
5 a 65	-0,26375	0,77250	0,14718	0,62161	0,19114	0,70981
5 a 70	-0,22812	0,73750	0,12547	0,58066	0,16427	0,69473
5 a 75	-0,19000	0,70000	0,10528	0,53995	0,13780	0,66968

[illegible]

5 a 80	-0,14937	0,6600	0,08642	0,49980	0,11195	0,63702
5 a 85	-0,10625	0,61750	0,06874	0,46041	0,08682	0,59857
5 a 90	-0,06062	0,57250	0,05210	0,42189	0,06246	0,55574
5 a 95	-0,01250	0,52500	0,03639	0,38432	0,03890	0,50963
5 a 100	0,03813	0,47500	0,02152	0,34772	0,01614	0,46109

A tabela acima é válida para qualquer valor do raio externo do diafragma R. Os valores de K_{2r} e K_{2T} são definidos como sendo os fatores aos quais se deve multiplicar as deformações radial e tangencial máximas do diafragma para se obter as deformações radiais e tangenciais médias na área coberta pelos filamentos radial e tangencial de um extensômetro tipo diafragma.

A.4.3. Semelhança e generalização dos dados obtidos

A.4.3.1. Semelhança geométrica nos valores de deformação média/deformação máxima

Sobre a tabela da página 16, existem duas observações importantes para um mesmo material:

- Na solução 2, para qualquer raio externo, as relações entre deformação num raio qualquer e deformação máxima são constantes quando r/R é constante, isto é, os efeitos de deformação média são os mesmos qualitativamente para qualquer raio externo, podendo a tabela ser usada para qualquer raio externo.
- Na solução 3, verifica-se um efeito análogo, mas devemos ter a/R constante e r/R constante.

Resumindo: -Para $R=4$, com raio (%) de 5 a 50, encontramos o mesmo valor de deformação média na área/deformação máxima que para $R=1$ com raio (%) de 5 a 50.

-Para $R=4$ e $a=0,2$, com raio (%) de 5 a 50, encontramos o mesmo valor de deformação média na área/deformação máxima que para $R=1$ $a=0,05$ com raio (%) de 5 a 50.

Sendo assim, posso obter uma boa descrição do comportamento de deformação média na área/deformação máxima na solução 3 apenas tomando valores distintos de a/R .

Resta estudar o comportamento das deformações máxi

mas, procurando ver se existe esse tipo de semelhança.

A.4.3.2. Estudo de semelhança geométrica nos valores das de formações máximas.

O material, nesse estudo, será sempre o mesmo, definido por $E=1$ e $\nu=0$

Solução 2:

Para a solução 2, tenho o seguinte:

$$\epsilon_r = - \frac{3p}{8Eh^2} (1-\nu)^2 (3r^2 - R^2)$$

$$\epsilon_\theta = - \frac{3p}{8Eh^2} (1-\nu)^2 (r^2 - R^2)$$

Para um mesmo material e peso aplicado por unidade de área constante, as deformações máximas são:

$$\epsilon_{rmax} = - \frac{3p}{8Eh^2} \frac{2R^2(1-\nu)^2}{2}$$

$$\epsilon_{\theta max} = \frac{3pR^2}{8Eh^2} \frac{(1-\nu)^2}{2}$$

Das fórmulas acima pode-se verificar que as deformações máximas são constantes quando pR^2/h^2 é constante, ou seja, elas são diretamente proporcionais ao fator pR^2/h^2 .

Solução 3

Para a solução 3, vale o seguinte:

$$\epsilon_r = - \frac{3p(1-\nu)^2}{8\tilde{\eta} E h^2} \left[2C_1 - \frac{C_2}{r^2} + 2(2\ln r + 1) \right]$$

$$\epsilon_\theta = - \frac{3p(1-\nu)^2}{8\tilde{\eta} E h^2} \left[2C_1 + \frac{C_2}{r^2} + 2(2\ln r - 1) \right]$$

$$\text{com } C_1 = \frac{2(R^2 \ln R - a^2 \ln a) + (a^2 - R^2)}{a^2 - R^2}$$

$$\text{e } C_2 = \frac{4a^2 R^2 (\ln a - \ln R)}{(a^2 - R^2)}$$

As deformações máximas são:

$$\xi_{r\max} = \frac{3P(1-\nu)^2}{8\pi Eh^2} \left[2C_1 - \frac{C_2}{a^2} + 2(2\ln a + 1) \right]$$

$$\xi_{\theta\max} = -\frac{3P(1-\nu)^2}{8\pi Eh^2} \left[2C_1 + 2 + 2(2\ln \sqrt{\frac{C_2}{2}} - 1) \right]$$

Os valores dos termos entre colchetes se mantêm constantes quando a/R se mantém constante. Nesse caso, as deformações ficam dependendo de $P/\pi h^2$. Cada família de a/R tem um comportamento semelhante análogo ao caso da solução 2, pois o fator pR^2/h^2 (onde $pR^2 =$ carga total/ π) é igual ao fator $P/\pi h^2$ (onde P é a carga total) da solução 3.

Sabendo que as deformações totais máximas, para uma dada geometria, variam com o mesmo fator de proporcionalidade, no tocante à carga total aplicada e à espessura do diafragma, resta-nos estudar os valores das deformações máximas e as relações deformação média/deformação máxima mais convenientes em cada solução (2 ou 3) para se poder comparar efetivamente as duas soluções, no caso em que o raio externo dos dois diafragmas coincide.

Reexplicando: Sabendo que as deformações totais máximas ^{variam} do mesmo modo (com relação à carga total aplicada e espessura do diafragma) para uma determinada família de a/R (solução 3), ou para um dado R , pode-se fazer a comparação das duas soluções (2 e 3) para um determinado valor de R (solução 2) e vários valores de a/R (solução 3) e aceitar a comparação como sendo válida para qualquer outro raio, respeitando as relações de proporcionalidade indicadas a seguir:

Solução 2:

$$\text{Dados } \xi_{r1\max} = \xi_{r1}(r_1, h_1, p_1)$$

$$\xi_{\theta 1\max} = \xi_{\theta 1}(r_1, h_1, p_1)$$

$$\text{Tenho: } \xi_{r2\max} = \xi_{r1\max} \frac{p_2 R_2^2 h_1^2}{h_2^2 p_1 R_1^2} = \xi_{r1\max} \frac{p_2 h_1^2}{h_2^2 p_1}$$

$$\text{e } \xi_{\theta 2\max} = \xi_{\theta 1\max} \frac{p_2 R_2^2 h_1^2}{h_2^2 p_1 R_1^2} = \xi_{\theta 1\max} \frac{p_2 h_1^2}{h_2^2 p_1}$$

com p = carga distribuída por unidade de área
e P = carga total aplicada

Se p (carga distribuída) for constante:

$$\xi_{r2\max} = \xi_{r1\max} \frac{R_2^2 h_1^2}{R_1^2 h_2^2}$$

$$\xi_{\theta 2\max} = \xi_{\theta 1\max} \frac{R_2^2 h_1^2}{R_1^2 h_2^2}$$

Solução 3:

$$\text{Dados: } \xi_{r1\max} = \xi_{r1}(r_1, h_1, p_1)$$

e

$$\xi_{\theta 1\max} = \xi_{\theta 1}(r_1, h_1, p_1)$$

para uma fórmula de a/R ,

$$\text{tenho: } \xi_{r2\max} = \xi_{r1\max} \frac{p_2 h_1^2}{h_2^2 p_1}$$

$$\text{e } \xi_{\theta 2\max} = \xi_{\theta 1\max} \frac{p_1 h_1^2}{h_2^2 p_1}$$

com P = carga total aplicada

Pode-se ver que as fórmulas das deformações máximas, tanto na solução 2 como numa mesma família de (a/R)

na solução 3, estão ligadas exatamente pela mesma relação, considerando-se a carga total aplicada na solução 2. Além disso, foi observado acima que os valores

$$2C_1 - \frac{C_2}{a^2} + 2(2\ln a + 1)$$

$$2C_1 + 2 + 2(2\ln \sqrt{\frac{C_2}{2}} - 1)$$

são constantes para a/R constante. Podemos propor a seguinte forma, válida para as duas soluções:

$$\xi_{r_{\max}} = - \frac{3P(1-\nu^2)K_1}{8\pi Eh^2}$$

$$\xi_{\theta_{\max}} = - \frac{3P(1-\nu^2)K_1}{8\pi Eh^2}$$

onde P é a carga total aplicada e

K_1 é um fator de forma representando os seguintes termos:

Solução 2:

Deformações radiais:

$$K_1 = (3r^2 - R^2)/R^2 \quad \text{para } r=R$$

Deformações tangenciais:

$$K_1 = (r^2 - R^2)/R^2 \quad \text{para } r=0$$

Solução 3:

Deformações radiais:

$$K_1 = 2C_1 - \frac{C_2}{r^2} + 2(2\ln r + 1) \quad \text{para } r=a$$

Deformações tangenciais:

$$K_1 = 2C_1 + \frac{C_2}{r^2} + 2(2\ln r - 1) \quad \text{para } r = \sqrt{\frac{C_2}{2}}$$

Os valores de K são os seguintes:

Solução 2:

Deformações radiais: $r=R \rightarrow K_1=2$
 $r=0 \rightarrow K_1=-1$

Solução 3:

Para deformações radiais, $r=a$ e para deformações tangenciais, $r=\sqrt{C_2/2}$. Para as várias famílias de a/R , os resultados são os seguintes:

valores de K_1 : (valores de K_1 para $a/R=0$ ou $=1$ não existem)

$a/R(\%)$	Radial	Tangencial
2,5	-25,529	-8,767
5	-20,026	-6,427
10	-14,607	-4,229
15	-11,526	-3,051
20	-9,412	-2,286
25	-7,830	-1,746
30	-6,584	-1,346
35	-5,571	-1,041
40	-4,727	-0,8031
45	-4,010	-0,6162
50	-3,394	-0,4682
55	-2,857	-0,3505
60	-2,385	-0,2573
65	-1,968	-0,1837
70	-1,595	-0,1263
75	-1,260	-0,08238
80	-0,9587	-0,04966
85	-0,6852	-0,02637
90	-0,4362	-0,01109
95	-0,2087	-0,00263

A.4.3.3. Fórmula geral para as deformações médias nas soluções 2 e 3: definição de K_1 e K_2

Resumindo os dados anteriores,

po

de-se obter os valores das deformações lidas nos strain gages (ou seja, os valores médios na superfície do diafragma em contato com os strain gages) usando-se as seguintes fórmulas:

$$\epsilon_{rmed} = \frac{-3P(1-\nu^2)K_1K_2}{8\pi E h^2}$$

$$\epsilon_{\theta med} = \frac{-3P(1-\nu^2)K_1K_2}{8\pi E h^2}$$

sendo P = carga total aplicada

K_1 = fator de forma ligado à família (solução 2, solução 3, a/R), indicador de magnitude relativa da deformação máxima no diafragma.

K_2 = fator ao qual se deve multiplicar a deformação máxima do diafragma para se obter as deformações médias na área coberta pelos strain gages.

A.5. Determinação Analítica de K_{2R} e K_{2T}

O valor K_2 tinha sido definido anteriormente da seguinte maneira:

$$K_2 = \frac{\bar{\epsilon}}{\epsilon_{max}}$$

Anteriormente, na página 16, tinha sido desenvolvida uma determinação discreta de K_2 . Vamos retomar o problema e desenvolver uma fórmula analítica para K_2 . Para deformações radiais temos:

$$K_{2R} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \epsilon_r dr}{\int_{r_1}^{r_2} dr \cdot \epsilon_{rmax}}$$

Para deformações tangenciais, temos:

$$K_{2T} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \epsilon_{\theta} 2\pi r dr}{\int_{r_1}^{r_2} 2\pi r dr \cdot \epsilon_{\theta max}}$$

Vamos desenvolver valores de K_2 para a solução

$$\epsilon_{r\max} = \frac{-3pR^2(1-\nu^2)K_{1r}}{8Eh^2}$$

$$\epsilon_{\theta\max} = \frac{-3pR^2(1-\nu^2)K_{1T}}{8Eh^2}$$

$$\epsilon_r = \frac{-3p}{8Eh^2} (1-\nu^2)(3r^2 - R^2)$$

$$\epsilon_{\theta} = \frac{-3p}{8Eh^2} (1-\nu^2)(r^2 - R^2)$$

Cálculo de K_{2r}

$$\begin{aligned} \int_{r_1}^{r_2} \epsilon_r dr &= \int_{r_1}^{r_2} \left(\frac{-3p}{8Eh^2} (1-\nu^2)(3r^2 - R^2) \right) dr = \frac{-3p(1-\nu^2)}{8Eh^2} \int_{r_1}^{r_2} 3r^2 - R^2 dr = \frac{-3p(1-\nu^2)}{8Eh^2} \left[r^3 - R^2 r \right]_{r_1}^{r_2} = \\ &= \frac{-3p(1-\nu^2)}{8Eh^2} ((r_2^3 - r_1^3) - R^2(r_2 - r_1)) \end{aligned}$$

$$\int_{r_1}^{r_2} dr = r_2 - r_1$$

$$K_{2r} = \frac{\frac{-3p(1-\nu^2)}{8Eh^2} ((r_2^3 - r_1^3) - R^2(r_2 - r_1))}{\frac{-3pR^2(1-\nu^2)K_{1r}}{8Eh^2} (r_2 - r_1)}$$

$$K_{2r} = \frac{r_2^3 + r_1 r_2 + r_1^2 - R^2}{R^2 K_{1r}}$$

$$\text{Se } r_1 = \alpha r_2$$

$$K_{2r} = \frac{r_2^3(1 + \alpha + \alpha^2) - R^2}{R^2 K_{1r}}$$

Cálculo de K_{2T}

$$\begin{aligned} \int_{r_1}^{r_2} \epsilon_{\theta} 2\pi r dr &= \int_{r_1}^{r_2} \frac{-3p}{8Eh^2} (1-\nu^2)(r^2 - R^2) 2\pi r dr = \frac{-3p2\pi(1-\nu^2)}{8Eh^2} \int_{r_1}^{r_2} r^3 - R^2 r dr = \\ &= \frac{-6p\pi(1-\nu^2)}{8Eh^2} \left[\frac{r^4}{4} - \frac{R^2 r^2}{2} \right]_{r_1}^{r_2} = \frac{-6p\pi(1-\nu^2)}{8Eh^2} \left(\frac{1}{4}(r_2^4 - r_1^4) - \frac{R^2}{2}(r_2^2 - r_1^2) \right) \end{aligned}$$

$$\int_{r_1}^{r_2} 2\pi r dr = 2\pi \left[\frac{r^2}{2} \right]_{r_1}^{r_2} = 2\pi \frac{1}{2} (r_2^2 - r_1^2)$$

$$K_{2T} = \frac{\frac{-3P(1-\nu^2)}{8Eh^2} \left(\frac{1}{4} (r_2^4 - r_1^4) - \frac{R^2}{2} (r_2^2 - r_1^2) \right)}{\frac{-3PR^2(1-\nu^2)K_{1T}}{8Eh^2} \quad 2\pi \frac{1}{2} (r_2 - r_1)(r_2 + r_1)}$$

$$K_{2T} = \frac{r_2^2 + r_1^2 - 2R^2}{2R^2 K_{1T}}$$

$$\text{Se } r_1 = \alpha r_2 :$$

$$K_{2T} = \frac{r_2^2 (1 + \alpha^2) - 2R^2}{2R^2 K_{1T}}$$

Valores de K_2 para a solução 3:

$$\epsilon_{r\max} = \frac{-3P(1-\nu^2)}{8\pi E h^2} \left(2C_1 - \frac{C_2}{a^2} + 2(2\ln a + 1) \right)$$

$$\epsilon_{\theta\max} = \frac{-3P(1-\nu^2)}{8\pi E h^2} \left(2C_1 + 2\ln \left(\frac{C_2}{2} \right) \right)$$

$$\epsilon_r = \frac{-3P(1-\nu^2)}{8\pi E h^2} \left(2C_1 - \frac{C_2}{r^2} + 2(2\ln r + 1) \right)$$

$$\epsilon_{\theta} = \frac{-3P(1-\nu^2)}{8\pi E h^2} \left(2C_1 + \frac{C_2}{r^2} + 2(2\ln r - 1) \right)$$

Cálculo de K_{2T} para a solução 3:

$$K_{2T} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \epsilon_r dr}{\int_{r_1}^{r_2} dr \epsilon_{r\max}}$$

$$\begin{aligned}
 \int_{r_1}^{r_2} \epsilon_r dr &= \int_{r_1}^{r_2} \frac{-3P(1-\nu^2)}{8\pi E h^2} \left(2C_1 - \frac{C_2}{r^2} + 2(2\ln r + 1) \right) dr = \\
 &= \frac{-3P(1-\nu^2)}{8\pi E h^2} \left[\int_{r_1}^{r_2} 2C_1 dr + \int_{r_1}^{r_2} -\frac{C_2}{r^2} dr + \int_{r_1}^{r_2} 2 dr + \int_{r_1}^{r_2} 4\ln r dr \right] = \\
 &= \frac{-3P(1-\nu^2)}{8\pi E h^2} \left[2C_1 r + \frac{C_2}{r} + 2r + 4(r\ln r - r) \right]_{r_1}^{r_2} = \\
 &= \frac{-3P(1-\nu^2)}{8\pi E h^2} \left(2C_1(r_2-r_1) + \frac{C_2(r_1-r_2)}{r_2 r_1} + 2(r_2-r_1) + 4(r_2\ln r_2 - r_2 - r_1\ln r_1 + r_1) \right)
 \end{aligned}$$

$$\int_{r_1}^{r_2} dr = r_2 - r_1$$

$$K_{2r} = \frac{\left(2C_1(r_2-r_1) + \frac{C_2(r_1-r_2)}{r_2 r_1} + 2(r_2-r_1) + 4(r_2\ln r_2 - r_2 - r_1\ln r_1 + r_1) \right)}{(r_2-r_1) \left(2C_1 - \frac{C_2}{a^2} + 2(2\ln a + 1) \right)}$$

Cálculo de K_{2T} para a solução 3:

$$K_{2T} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \epsilon_\theta 2\pi r dr}{\int_{r_1}^{r_2} 2\pi r dr \epsilon_{\theta \max}}$$

$$\begin{aligned}
 \int_{r_1}^{r_2} \epsilon_\theta 2\pi r dr &= \int_{r_1}^{r_2} \frac{-3P(1-\nu^2)}{8\pi E h^2} \left(2C_1 2\pi r + \frac{2C_2 \pi}{r} + 2(4\pi r \ln r - 2\pi r) \right) dr = \\
 &= \frac{-3P(1-\nu^2)}{8\pi E h^2} \left[\int_{r_1}^{r_2} 2C_1 2\pi r dr + \int_{r_1}^{r_2} \frac{2C_2 \pi}{r} dr + \int_{r_1}^{r_2} 8\pi r \ln r dr - \int_{r_1}^{r_2} 4\pi r dr \right] = \\
 &= \frac{-3P(1-\nu^2)}{8\pi E h^2} \left[2\pi C_1 r^2 + 2\pi C_2 \ln r + 2\pi r^2 (2\ln r - 1) - 2\pi r^2 \right]_{r_1}^{r_2} = \\
 &= \frac{-3P(1-\nu^2) 2\pi}{8\pi E h^2} \left[C_1(r_2^2 - r_1^2) + C_2(\ln r_2 - \ln r_1) + 2r_2^2 \ln r_2 - 2r_1^2 \ln r_1 - 2(r_2^2 - r_1^2) \right]
 \end{aligned}$$

$$\int_{r_1}^{r_2} 2\pi r dr = 2\pi \cdot \frac{1}{2} (r_2^2 - r_1^2)$$

$$K_{2T} = \frac{(C_1(r_2^2 - r_1^2) + C_2(\ln r_2 - \ln r_1) + 2r_2^2 \ln r_2 - 2r_1^2 \ln r_1 - 2(r_2^2 - r_1^2))}{(r_2^2 - r_1^2) \left(C_1 + \ln\left(\frac{C_2}{2}\right) \right)}$$

A.6. Otimização da Saída dos Strain Gages

A saída obtida dos strain gages é proporcional a $\text{abs}(\epsilon_r \pm \epsilon_\theta)$.

Para minimizar a saída é necessário minimizar $\text{abs}(\epsilon_r \pm \epsilon_\theta)$.

O interesse, no caso, não é obter os valores máximos dessa função, mas procurar a região dos valores mais próximos desse máximo. Sabemos que podemos obter o valor máximo de $\text{abs}(\epsilon_r \pm \epsilon_\theta)$ simplesmente posicionando os strain gages de modo a medirem ϵ_r e ϵ_θ máximos. No entanto, isso não é possível, pois eles ocupam uma área sobre o diafragma, onde o correm variações nos valores das deformações e, na prática, só se obtêm valores abaixo desse máximo.

Não é desejável que a área ocupada seja muito pequena, pois pode haver problemas de contato entre o strain gage e o diafragma, como o deslizamento, por exemplo. Uma grande área de contato é desejável porque minimiza esses problemas e, embora a saída obtida seja menor, é também mais confiável.

Uma outra observação a ser feita é que, no caso da solução 3 pode-se ter parte do strain gage colada sobre uma porção indeformada do diafragma, sob o apoio central, correspondente ao engastamento interno. Nesse caso, o comprimento total do fio permanece o mesmo, mas a parte correspondente a $\int_{r_1}^{r_2} \epsilon_r dr$ ou $\int_{r_1}^{r_2} \epsilon_\theta 2\pi r dr$ na fórmula, é modificada, pois só haverá deformações para $r \geq a$.

Se $a > r_2$, então a deformação média medida no strain gage será igual a zero. Quando $r_1 \leq a \leq r_2$, deve-se calcular $\int_a^{r_2} \epsilon_r dr$ ou $\int_a^{r_2} \epsilon_\theta 2\pi r dr$. Se $a < r_1$, teremos o cálculo normal.

Uma observação final é que os valores de K_{2r} , $K_{2\theta}$ obtidos são constantes quando r_2/R , r_1/R e a/R são constantes no caso da solução 3 e quando r_2/R e r_1/R o são no caso da solução 2.

A.7. Fórmulas para Dimensionamento do Diafragma no Caso de Uso de Extensômetros Tipo Diafragma

Aqui se propõe critérios de dimensionamento do diafragma e suas formulações matemáticas, dados alguns parâmetros de entrada.

A.7.1. Critério da pressão máxima admissível

Consiste em se determinar para as duas soluções, em cada situação, a relação entre a carga máxima admissível e a mínima admissível. Desse modo, pode-se ver em cada caso, qual é a melhor solução a ser adotada. As comparações serão feitas para diferentes características geométricas h/R e a/R .

Os fatores limitantes usados serão os seguintes:

- (1) $\left(\frac{h}{R}\right)_{max} = 2 \cdot \star R \cdot \rho$ (relação espessura por diâmetro)
- (2) $w_{max} = \frac{h}{3}$
- (3) $|\epsilon|_{max} = \epsilon_{max}$
- (4) $|\epsilon|_{méd. média} = \epsilon_{méd. média}$

As equações serão desenvolvidas para as soluções 2 e 3, levando em conta os seguintes aspectos:

- $w_{mín}$ ocorre para $r=0$ na solução 2 e $r=a$ na solução 3
- ϵ_{max} , nas duas soluções, é deformação radial, sendo que na solução 2, ocorre para $r=R$ e na solução 3, ocorre $r=a$.
- As deformações mínimas médias dependem da região coberta pelo strain gage e da sensibilidade elétrica do aparelho que faz as leituras da ponte. Assim sendo, depende dos valores de deformação radial e tangencial.
- As soluções 2 e 3 podem ser estudadas da mesma maneira pois a solução 2 e cada família de semelhança da solução 3 apresentam comportamentos semelhantes. As fórmulas a serem usadas são as seguintes:

$$\epsilon_r = \frac{-3pR^2(1-\nu^2)K_{1r}K_{2r}}{8Eh^3}$$

$$\epsilon_T = \frac{-3pR^2(1-\nu^2)K_{1T}K_{2T}}{8Eh^3}$$

sendo p a força aplicada dividido pela área do diafragma e K_{1r} , K_{1T} , K_{2r} , K_{2T} fatores que definem os valores máximos de deformação na superfície do diafragma e a relação entre a deformação média na área do strain gages e a máxima, respectivamente, definidos em A.4 e em A.5.

- A saída elétrica da ponte de Wheatstone formada pelos strain gages será proporcional a $1/2 (\epsilon_r + \epsilon_T)$ sendo o sinal negativo para o caso de estarem colocados no mesmo lado do diafragma e o positivo para o caso de estarem posicionados em lados opostos. Nesse caso, os strain gages estão em ponte completa.
- A sensibilidade elétrica do conjunto, montado, é medida para o caso de deformação máxima admissível e dada por:

$e_o = \frac{F}{2} (\epsilon_r + \epsilon_T)_{max}$, sendo F o gage factor e e_o a relação entre potencial de entrada e o de saída, dada em V/V . Em geral, a diferença de potencial na saída é da ordem de mili volts por volt de alimentação da ponte.

Vamos desenvolver fórmulas para as quatro relações citadas acima:

para a relação (1)

$$\left(\frac{h}{R}\right)_{max} = 2 + REPD$$

Para a relação 2, ou seja, para $w_{max} \leq \frac{h}{3}$, temos:
no caso da solução 2, $w(r=0) \leq \frac{h}{3}$:

$$w = \frac{3p(r^2 - R^2)^2(1-\nu^2)}{16Eh^3}$$

$$w_{max} = \frac{3pR^4(1-\nu^2)}{16Eh^3} \leq \frac{h^4}{R^4}$$

ou:

$$\frac{9p(1-\nu^2)}{16E} \leq \frac{h^4}{R^4}$$

Para ter deflexões de menos que $h/3$:

$$\frac{h^4}{R^4} \geq \frac{9p(1-\nu^2)}{16E}$$

ou seja, sendo $K_3=1/4$, fica:

$$\frac{h^4}{R^4} \geq \frac{9p(1-\nu^2)K_3}{4E}$$

no caso da solução 3, $w_{r=a} \leq \frac{h}{3}$: e, sendo $P=pR^2\pi$

$$w = \frac{P}{16\pi D} [C_1 r^2 - C_2 \ln r + C_3 + 2r^2(\ln r - 1)]$$

com

$$C_1 = \frac{2(R^2 \ln R - a^2 \ln a) + (a^2 - R^2)}{a^2 - R^2}$$

$$C_2 = \frac{4a^2 R^2 (\ln a - \ln R)}{a^2 - R^2}$$

$$C_3 = \frac{R^2 [a^2 - R^2 + 2a^2 (\ln a (1 - 2 \ln R) + 2(\ln R)^2 - \ln R)]}{a^2 - R^2}$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

para $r=a$:

$$w_{\max} = \frac{3P(1-\nu^2)}{4\pi E h^3} [C_1 a^2 + C_2 \ln a + C_3 + 2a^2(\ln a - 1)]$$

isso pode ser escrito, lembrando que $P=p\pi R^2$, assim:

$$w_{\max} = \frac{3pR^2(1-\nu^2)}{4Eh^3} [C_1 a^2 + C_2 \ln a + C_3 + 2a^2(\ln a - 1)]$$

Na expressão acima, o valor $[C_1 a^2 + C_2 b a + C_3 - 2a(h_0 - 1)]/R^2$ é constante e o seu valor depende apenas da família a/R. Este valor será chamado de K_3 . Então:

$$K_3 = [C_1 a^2 + C_2 b a + C_3 - 2a(h_0 - 1)]/R^2$$

a tabela a seguir mostra os valores de K_3 para diferentes a/R:

a/R	K_3	a/R	K_3	a/R	K_3	a/R	K_3
0,05	0,90753	0,30	0,33655	0,55	0,07748	0,80	$5,9161 \times 10^{-3}$
0,1	0,77578	0,35	0,26207	0,60	0,05288	0,85	$2,4303 \times 10^{-3}$
0,15	0,64613	0,40	0,20031	0,65	0,03444	0,90	$7,0149 \times 10^{-4}$
0,20	0,52828	0,45	0,14989	0,70	0,02109	0,95	$8,5459 \times 10^{-5}$
0,25	0,42502	0,50	0,10940	0,75	0,01187		

Substituindo K_3 na fórmula de w_{max} acima, sai:

$$w_{max} = \frac{3pR^3(1-\nu^2)K_3}{4Eh^3}$$

de

$$\frac{3pR^3(1-\nu^2)K_3}{4Eh^3} \leq \frac{h}{3}$$

sai:

$$\frac{K_3}{R^3} \geq \frac{3p(1-\nu^2)}{4Eh}$$

Essa fórmula, para a solução 3 é idêntica à deduzida para a solução 2 a menos do valor de K_3 , que difere da maneira indicada acima.

Para a relação 3: $|E|_{max} \leq E_{max} = E_{máxima admissível}$

lembrando que $|E|_{max}$ é radial, teremos:

$$E_{max} \geq \left| \frac{-3pR^3(1-\nu^2)K_3}{8Eh^3} \right|$$

ou

$$\frac{K_3}{R^3} \geq \left| \frac{-3p(1-\nu^2)K_3}{8Eh^3} \right|$$

Para a relação 4: $|E|_{max} \geq E_{max} = E_{máxima admissível}$

Essa relação é ditada pela sensibilidade elé -

trica do aparelho medidor de deformações. A deformação equivalente, resultante da soma das deformações lidas pelos quatro strain gages, deve ser maior do que a média. Estamos usando um medidor de deformações composto por dois strain gages radiais e dois tangenciais simétricos. Nesse caso, (4) pode ser escrito desse modo:

$$|2(\epsilon_r + \epsilon_r)| > \epsilon_{média}$$

lembrando que:

$$\epsilon_{rmax} = \frac{3p_{max}(1-\nu^2)K_{ir}K_{ir}}{8E\left(\frac{h^2}{R^2}\right)}$$

$$\epsilon_{rmin} = \frac{3p_{min}(1-\nu^2)K_{it}K_{it}}{8E\left(\frac{h^2}{R^2}\right)}$$

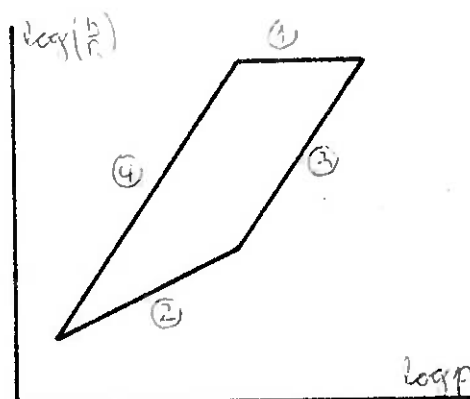
então:

$$\epsilon_{média} \leq \left| \frac{3p_{max}(1-\nu^2)}{4E\left(\frac{h^2}{R^2}\right)} (K_{ir}K_{ir} \pm K_{it}K_{it}) \right|$$

ou:

$$\frac{h^2}{R^2} \leq \left| \frac{3p_{max}(1-\nu^2)(K_{ir}K_{ir} \pm K_{it}K_{it})}{4E\epsilon_{média}} \right|$$

Observando as fórmulas deduzidas para as relações (1) a (4), chega-se à conclusão de que todos os diafragmas de uma família de a/R são semelhantes entre si e que cada família de h^2/R^2 constante representa um mesmo comportamento de deformações para uma dada pressão equivalente p . Podemos então montar gráficos de h/R por p para cada família de a/R para representar os campos de variação de p para diferentes dimensões de diafragma. As inequações deduzidas para as relações (1), (2), (3) e (4) delimitam uma região no gráfico de p por h/R dentro da qual se pode construir uma célula de carga com resposta linear para as cargas aplicadas. O gráfico mencionado acima pode ser esquematizado abaixo:



A região de validade para os valores de geometria da célula de carga h/R e de pressões equivalentes à carga aplicada dividida pela área do diafragma é a hachurada. A solução 2 é governada por um gráfico desses, e da mesma forma, cada família de a/R da solução 3 também é.

Em cada gráfico desses, variando a geometria dos strain gages, provoca o deslocamento das curvas (3) e (4) segundo os valores de K_{1r} , K_{2r} , K_{1T} e K_{2T} . Os pontos desse gráfico que são importantes para o dimensionamento de uma célula de carga são:

- a pressão mínima admissível e o valor de h/R mínimo admissível, representado pela interseção da curva (4) com a curva (2).
- a pressão máxima admissível, bem como o máximo h/R admissível, representado pela interseção da curva (1) com a curva (3).
- os valores de pressões máxima e mínima para o valor de h/R em que ocorre a transição do critério limitante (2) (deflexão máxima) para o critério limitante (3) (deformação máxima), no ponto de interseção entre a curva (2) e a curva (3).
- os valores de pressões máximas e mínimas para um dado h/R acima do ponto de transição citado acima.
- os valores de pressões máximas e mínimas para um dado h/R abaixo do ponto de transição citado acima.

Pressão mínima admissível e valor mínimo de h/R admissível

Sai da interseção entre os critérios (2) e (4):

$$\frac{h^2}{R^2} \geq \frac{3p(1-\nu^2)K_3}{4E} \quad (2)$$

$$\frac{h^2}{R^2} \leq \left| \frac{3p(1-\nu^2)(K_{1r}K_{2r} \mp K_{1T}K_{2T})}{4E \varepsilon_{\text{máx média}}} \right| \quad (4)$$

e se obtém:

$$p_{\text{min}} = \left| \frac{4E^2 \varepsilon_{\text{máx média}} \mp K_3}{(1-\nu^2)(K_{1r}K_{2r} \mp K_{1T}K_{2T})^2} \right|$$

$$\left(\frac{h}{R} \right)_{\text{min}} = \left| \frac{3 \varepsilon_{\text{máx média}} K_3}{(K_{1r}K_{2r} \mp K_{1T}K_{2T})} \right|$$

Pressão máxima admissível

Sai da interseção entre os critérios (1) e (3).

$$\left(\frac{h}{R}\right) < 2 \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

$$\frac{h^2}{R^2} \geq \left| \frac{-3p(1-\nu^2)K_r}{8E\epsilon_{max}} \right| \quad (3)$$

e se obtém:

$$p_{max} = \left| \frac{32(E\epsilon_{max})^2 E \epsilon_{max}}{3(1-\nu^2)K_r} \right|$$

Pressões máxima e mínima para h/R de transição entre os critérios de deflexão máxima e deformação máxima.

A pressão máxima e o valor de h/R de transição saem da interseção entre os critérios (2) e (3):

$$\frac{h^4}{R^4} \geq \left| \frac{9p(1-\nu^2)K_r}{4E} \right| \quad (2)$$

$$\frac{h^2}{R^2} \geq \left| \frac{-3p(1-\nu^2)K_r}{8E\epsilon_{max}} \right| \quad (3)$$

obtendo-se o seguinte:

$$p_{max} = \left| \frac{16E\epsilon_{max}^2 K_r}{(1-\nu^2)K_r} \right| \quad 2$$

$$\left(\frac{h}{R}\right) = \left| \frac{6\epsilon_{max} K_r}{K_r} \right|$$

Substituindo-se o valor de h^2/R^2 na expressão das deformações mínimas, critério (4), dado por:

$$\frac{h^2}{R^2} \leq \left| \frac{5p(1-\nu^2)(K_r K_{rt} + K_{rt} K_{rt})}{4E\epsilon_{min}} \right|$$

sai:

$$p_{min} = \left| \frac{8E\epsilon_{min} \epsilon_{max} K_r}{(1-\nu^2)K_r (K_r K_{rt} + K_{rt} K_{rt})} \right|$$

Valores de pressões máximas e mínimas para

$$p_{min} = \left| \frac{4\epsilon_{min} \epsilon_{max} \left(\frac{h}{R}\right)^2 E}{3(1-\nu^2)(K_r K_{rt} + K_{rt} K_{rt})} \right| \quad \left(\frac{h^2}{R^2} > \left| \frac{6\epsilon_{max} K_r}{K_r} \right| \right) \quad \text{(da relação (4))}$$

$$p_{max} = \left| \frac{8\left(\frac{h}{R}\right)^2 E \epsilon_{max}}{3(1-\nu^2)K_r} \right| \quad \text{(da relação (3))}$$

Valores de pressões máximas e mínimas para $\frac{h^2}{R^2} \leq \left| \frac{6\epsilon_{max} K_r}{K_r} \right|$

$$p_{\text{max}} = \left| \frac{4 \varepsilon_{\text{min m\u00e9dia}} \left(\frac{h^2}{R^2}\right) E}{3(1-\nu^2)(K_{ir}K_{or} + K_{ir}K_{or})} \right| \quad (\text{da rela\u00e7\u00e3o (4)})$$

$$p_{\text{max}} = \left| \frac{4 \left(\frac{h^2}{R^2}\right) E}{3(1-\nu^2)K_2} \right| \quad (\text{da rela\u00e7\u00e3o (2)})$$

C\u00e1lculo dos campos de varia\u00e7\u00e3o

O campo de varia\u00e7\u00e3o \u00e9 definido como sendo a rela\u00e7\u00e3o entre a press\u00e3o m\u00e1xima mensur\u00e1vel e a m\u00ednima mensur\u00e1vel para um dado (h/R) , ou seja, quantas divis\u00f5es tem o fundo de escala.

Para valores p de press\u00f5es m\u00e1ximas num dado h/R tais que:

$$p_{\text{m\u00e1x m\u00e9dia}} \leq p \leq \frac{16 E \varepsilon_{\text{m\u00e1x}} K_{ir}}{(1-\nu^2)K_{ir}}$$

$$\frac{p_{\text{m\u00e1x}}}{p_{\text{m\u00edn}}} = \frac{\left(\frac{h^2}{R^2}\right)(K_{ir}K_{or} + K_{ir}K_{or})}{3 \varepsilon_{\text{m\u00edn m\u00e9dia}} K_2}$$

Para valores p de press\u00f5es m\u00e1ximas num dado h/R tais que:

$$\frac{16 E \varepsilon_{\text{m\u00e1x}} K_2}{(1-\nu^2)K_{ir}} \leq p \leq p_{\text{m\u00e1x m\u00e9dia}}$$

$$\frac{p_{\text{m\u00e1x}}}{p_{\text{m\u00edn}}} = \frac{2 \varepsilon_{\text{m\u00e1x}} (K_{ir}K_{or} + K_{ir}K_{or})}{2 \varepsilon_{\text{m\u00edn m\u00e9dia}} K_{ir}}$$

A partir das duas f\u00f3rmulas de varia\u00e7\u00e3o deduzidas acima, chega-se \u00e0s seguintes conclus\u00f5es:

- Para valores de press\u00e3o m\u00e1xima abaixo da press\u00e3o m\u00e1xima de transi\u00e7\u00e3o, o campo de varia\u00e7\u00e3o \u00e9 diretamente proporcional a (h^2/R^2) .
- Para valores de press\u00e3o m\u00e1xima acima da press\u00e3o m\u00e1xima de transi\u00e7\u00e3o, o campo de varia\u00e7\u00e3o \u00e9 constante e m\u00e1ximo, portanto, o ideal \u00e9 se trabalhar com press\u00f5es acima das de transi\u00e7\u00e3o.

Escolha de um valor de h/R conveniente: crit\u00e9rio do produto

Fixada a geometria dos strain gages e os di\u00e2metros das placas, externo e interno (caso da solu\u00e7\u00e3o 3), resta a escolha do valor de h/R mais conveniente. Para isso, \u00e9 usado o crit\u00e9rio do produto, que consiste em se escolher um valor de h/R tal que $\frac{p_{\text{m\u00e1x m\u00e9dia}}}{p_{\text{m\u00e1x m\u00e9dia}}} = \frac{p_{\text{m\u00e1x m\u00e9dia}}}{p_{\text{m\u00e1x m\u00e9dia}}} \geq 1$. Assim, ter\u00e9 i

qual margem de segurança tanto para cima da pressão máxima requerida como para baixo da pressão mínima requerida.

As pressões requeridas são dados do problema e as disponíveis são as pressões máximas e mínimas para o valor de h/R que se procura.

Se as relações citadas são menores que 1, então a célula de carga com a geometria dada não alcançará a pressão máxima requerida nem possuirá a sensibilidade requerida. Para se determinar se o valor conveniente de h/R deve ser procurado acima de h/R de transição ou não, faz-se o seguinte:

$$\text{Se } \frac{p_{\text{req. min}}}{p_{\text{trans. min}}} < \frac{p_{\text{trans. max}}}{p_{\text{req. max}}}, \text{ a prova é feita para } \frac{h}{R} < \left(\frac{h}{R}\right)_{\text{transição}}$$

$$\text{Se } \frac{p_{\text{req. min}}}{p_{\text{trans. min}}} > \frac{p_{\text{trans. max}}}{p_{\text{req. max}}}, \text{ a prova é feita para } \frac{h}{R} \geq \left(\frac{h}{R}\right)_{\text{transição}}$$

Escrevendo o critério do produto para $\frac{h}{R} < \left(\frac{h}{R}\right)_{\text{transição}}$

$$p_{\text{min. req.}} p_{\text{max. req.}} = \left| \frac{4E}{9(1-\nu^2)K_2} \left(\frac{h^4}{R^4}\right) \frac{4E \epsilon_{\text{min. média}}}{3(1-\nu^2)(K_{1r}K_{2r} + K_{1t}K_{2t})} \left(\frac{h^2}{R^2}\right) \right|$$

ou:

$$\frac{h}{R} = \sqrt[6]{p_{\text{min. req.}} p_{\text{max. req.}} \left| \frac{27(1-\nu^2)^2 K_2 (K_{1r}K_{2r} + K_{1t}K_{2t})}{16E^2 \epsilon_{\text{min. média}}} \right|}$$

Escrevendo o critério do produto para $\frac{h}{R} > \left(\frac{h}{R}\right)_{\text{transição}}$

$$p_{\text{min. req.}} p_{\text{max. req.}} = \left| \frac{8E \epsilon_{\text{max.}}}{3(1-\nu^2)K_r} \left(\frac{h^2}{R^2}\right) \frac{4E \epsilon_{\text{min. média}}}{3(1-\nu^2)(K_{1r}K_{2r} + K_{1t}K_{2t})} \left(\frac{h^2}{R^2}\right) \right|$$

ou:

$$\frac{h}{R} = \sqrt[4]{p_{\text{min. req.}} p_{\text{max. req.}} \left| \frac{6(1-\nu^2)^2 K_r (K_{1r}K_{2r} + K_{1t}K_{2t})}{32E^2 \epsilon_{\text{max.}} \epsilon_{\text{min. média}}} \right|}$$

A.7.2. Critério da deformação máxima na borda da placa dos strain gages

Esse critério é usado com a finalidade de se facilitar o cálculo, feito manualmente no caso da solução 2. Como o objetivo da presente formulação é apresentar um método generalizado de cálculo para células de carga dos tipos construtivos dados por solução 2 e 3, pode-se fazer com que esse método recaia no anterior mediante algumas transformações em alguns dados de entrada. Para isso, tendo em mãos o valor da deformação imposta na borda da placa e a relação entre es

ta deformação e a deformação máxima, imponho um novo valor de deformação máxima admissível, desde que este seja menor do que o valor original de deformação máxima admissível.

Caso o valor calculado pela imposição exceda o original, toma-se como deformação máxima admissível a estabelecida originalmente e calcula-se, em função desta, a deformação na borda da placa.

A relação entre deformação na borda da placa, a um raio R_{PMAX} e a deformação máxima é dada por:

na solução 2: $RDPDM = (3R_{PMAX}^2 - R^2) / (R^2 \times K_{Ir})$

na solução 3: $RDPDM = (2C_1 - \frac{C_2}{R_{PMAX}^2} + 2(2\ln(R_{PMAX}) + 1)) / K_{Ir}$

$$\epsilon_{max} = \frac{\epsilon_{placa, na borda}}{RDPDM}$$

Se $\epsilon_{max} > \epsilon_{max, admissível}$, $\epsilon_{placa} = \epsilon_{max} \times RDPDM$

A formulação acima só é válida se:

$RDPDM \times \epsilon_{placa} \times \epsilon_{max} > 0$, caso contrário teremos a relação entre a deformação da borda da placa e a máxima (RDPDM) com sinal oposto ao da relação $\epsilon_{placa} / \epsilon_{max}$ e as relações entre ϵ_{max} e ϵ_{placa} não serão válidas.

A.7.3. Critério da sensibilidade

Através desse critério, impõe-se a sensibilidade de elétrica da ponte de Wheatstone formada pelos strain gages, dada em volts por volt de alimentação.

Com isso, impõe-se um fundo de escala para a ponte de Wheatstone. Seja e_0 a sensibilidade, F o gage factor e ϵ_r e ϵ_t as deformações radial e tangencial.

A partir da equação $e_0 = \frac{F}{2} (\epsilon_r + \epsilon_t)_{max}$, com

$$\epsilon_r = \frac{-3p(1-\nu^2)K_r K_{2r}}{8E \left(\frac{h^3}{R^2}\right)}$$

$$\epsilon_T = \frac{-3p(1-\nu^2)K_{1T} K_{2T}}{8E \left(\frac{h^3}{R^2}\right)}$$

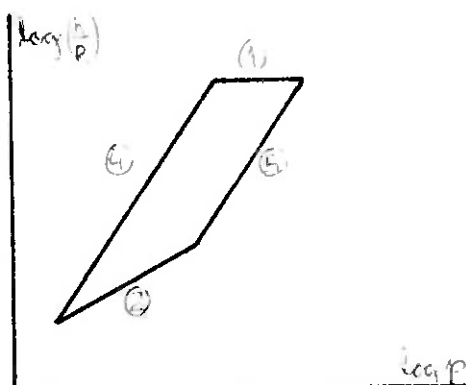
sai:

$$e_v = \left| \frac{3F_p(1-\nu^2)(K_r K_{2r} + K_{1T} K_{2T})}{16E \left(\frac{h^3}{R^2}\right)} \right|$$

ou

$$\frac{h^3}{R^2} = \left| \frac{3F_p(1-\nu^2)(K_r K_{2r} + K_{1T} K_{2T})}{16E e_v} \right|$$

A curva acima substitui a curva (3) no gráfico de $p \times h/R$:



Para fins de dimensionamento, só vamos encontrar a sensibilidade requerida se o valor de h/R for maior do que (h/R) transição entre as curvas 2 e 5. A curva (5) é equivalente à curva (3) para

$$\epsilon_{max} = \left| \frac{2e_v K_r}{F(K_r K_{2r} + K_{1T} K_{2T})} \right|$$

Se $\frac{h}{R} < \left(\frac{h}{R}\right)_{transição}$, a célula de carga não alcançará a sensibilidade requerida, calculemos as pressões máximas e mínimas no ponto de transição, e sensibilidade fixa, ou seja, entre:

$$\frac{h^2}{R^2} = \left| \frac{3p F(1-\nu^2) (K_{1r} K_{2r} + K_{1t} K_{2t})}{16E e_0} \right| \quad (5)$$

$$\frac{h^4}{R^4} = \frac{9p(1-\nu^2)K_3}{4E} \quad (2)$$

Nesse ponto, temos

$$p_{max} = \left| \frac{64E e_0^3 K_3}{F^2(1-\nu^2)(K_{1r} K_{2r} + K_{1t} K_{2t})^2} \right|$$

e

$$\frac{h^2}{R^2} = \left| \frac{12e_0 K_3}{F(K_{1r} K_{2r} + K_{1t} K_{2t})} \right|$$

A pressão mínima é achada substituindo-se o valor de h^2/R^2 na curva de pressões mínimas (4):

$$p_{min} = \left| \frac{4E_{min} \text{ média } E \left(\frac{h^2}{R^2} \right)}{3(1-\nu^2)(K_{1r} K_{2r} + K_{1t} K_{2t})} \right| \quad (4)$$

sai:

$$p_{min} = \left| \frac{E_{min} \text{ média } E e_0 K_3 16}{F(1-\nu^2)(K_{1r} K_{2r} + K_{1t} K_{2t})^2} \right|$$

O campo de variação na região em que se alcança a sensibilidade requerida, ou seja, para $\frac{12e_0 K_3}{F(K_{1r} K_{2r} + K_{1t} K_{2t})} \leq \frac{h^2}{R^2} \leq 4REPD^2$

é dado por

$$\frac{p_{max}}{p_{min}} = \frac{4e_0}{F E_{min} \text{ média}}$$

ou seja, não depende da geometria de diafragma.

A.7.4. Roteiro de cálculo para o dimensionamento

Inicialmente, devem estar determinados os seguintes valores:

- raio externo do diafragma R
- raio do engastamento interno do diafragma a
- força máxima que vai ser aplicada no diafragma $p_{max \text{ req}}$
- valor da menor divisão, em força $p_{min \text{ req}}$
- material: E, ν , E_{max} admissível

- deformação mínima média, dada por questões de sensibilidade do medidor da tensão na saída da ponte - *Ensaio média*
 - eventualmente, deformação requerida na borda da placa do extensômetro, DMAXP
 - eventualmente, sensibilidade elétrica requerida *e*
 - se os strain gages são posicionados no mesmo lado ou em la dos opostos do diafragma, considerando que no caso da solução 2, eles devem obrigatoriamente estar na mesma face.
 - tipo construtivo: se é a solução 2 ou se é a solução 3.
1. Calcula os valores K_{1r} , K_{2r} , K_{1T} , K_{2T} , K_3 , C_1 , C_2 , C_3 e $(K_{1r}K_{2r} - K_{1T}K_{2T})$ se os strain gages estão do mesmo lado ou $(K_{1r}K_{2r} + K_{1T}K_{2T})$ se os strain gages estão em lados o postos
 2. Verifica o tipo de análise a ser feito
 - Deformação máxima admissível imposta no diafragma- entrada 3 (critério A.7.1.)
 - Deformação imposta na borda do diafragma - entrada 8 (critério A.7.2.)
 - Sensibilidade requerida para esforço máximo-passo 9 (critério A.7.3.)
 3. Calcula pressões máxima e mínima admissível, verificando se as forças máxima e mínima requeridas, divididas pela área do diafragma (πR^2) estão no intervalo de validade das equações.
 4. Calcula pressões máxima e mínima no ponto de transição do diafragma, bem como a espessura/raio correspondente.
 5. Com os valores disponíveis de 4 e as pressões requeridas, a plica o critério do produto para achar o intervalo de pressões (em forças) mensuráveis.
 6. Com os valores calculados em 5 acho o campo de variação da célula de carga, comparando com o requerido. A solução é escrita se $CV_{disp} \geq CV_{req}$.
 7. Fim
 8. Impondo a deformação na borda da placa dos strain gages,

acho a deformação máxima do diafragma. Se for maior do que a admissível, recalculo a deformação na borda do diafragma; nesse caso o critério não estará satisfeito. A seguir, segue-se os passos 3 a 7.

9. Impondo a sensibilidade, calculo a deformação máxima no diafragma. Se essa deformação for maior que a deformação máxima admissível, o critério não estará satisfeito e recai-se no caso 2a. Caso contrário, segue-se os passos 3 e 4. Se a pressão máxima requerida for maior que a pressão máxima, na transição, o critério estará satisfeito e calcula-se h/R e p_{min} utilizando as deduzidas do critério 5; a seguir, calcula-se o campo de variação. Se a pressão máxima requerida for menor que a pressão máxima na transição o critério não estará satisfeito e segue-se os passos 5, 6 e 7.

A.7.5. Resumo das fórmulas deduzidas:

- Critério A.7.1.

Pressões admissíveis e relações h/R limite:

$$p_{min} = \left| \frac{4 E^2 \epsilon_{min} \text{ média } E K_3}{(1-\nu^2)(K_{ir} K_{or} \pm K_{it} K_{ot})^2} \right| \quad ; \quad \left(\frac{h}{R} \right)_{min} = \left| \frac{3 \epsilon_{min} \text{ média } K_3}{(K_{ir} K_{or} \pm K_{it} K_{ot})} \right|$$

$$p_{max} = \left| \frac{32 (REPD)^2 E \epsilon_{max}}{3 (1-\nu^2) K_{ir}} \right| \quad ; \quad \left(\frac{h}{R} \right)_{max} = 2 \cdot REPD$$

Pressões máxima e mínima e relação h/R no ponto de transição do diagrama

$$p_{max} = \left| \frac{16 E^2 \epsilon_{max} K_3}{(1-\nu^2) K_{ir}} \right|$$

$$p_{min} = \left| \frac{8 E \epsilon_{min} \text{ média } \epsilon_{max} K_3}{K_{ir} (1-\nu^2)(K_{ir} K_{or} \pm K_{it} K_{ot})} \right|$$

$$\left(\frac{h}{R} \right)_{transição} = \left| \frac{6 \epsilon_{max} K_3}{K_{ir}} \right|$$

Pressões máxima e mínima para um dado $\frac{h^2}{R^2} > \left| \frac{6 E_{max} K_3}{K_{ir}} \right|$

$$p_{min} = \left| \frac{4 E_{min} média \left(\frac{h^2}{R^2} \right) E}{3(1-\nu^2)(K_{ir}K_{or} + K_{ir}K_{or})} \right|$$

$$p_{max} = \left| \frac{8 \left(\frac{h^2}{R^2} \right) E E_{max}}{3(1-\nu^2)K_{ir}} \right|$$

Pressões máxima e mínima para um dado $\frac{h^2}{R^2} < \left| \frac{6 E_{max} K_3}{K_{ir}} \right|$

$$p_{min} = \left| \frac{4 E_{min} média \left(\frac{h^2}{R^2} \right) E}{3(1-\nu^2)(K_{ir}K_{or} + K_{ir}K_{or})} \right|$$

$$p_{max} = \left| \frac{4 \left(\frac{h^2}{R^2} \right) E}{3(1-\nu^2)K_3} \right|$$

Critério do produto e campo de variação para $\frac{h^2}{R^2} > \left| \frac{6 E_{max} K_3}{K_{ir}} \right|$

$$\frac{h}{R} = \sqrt[4]{\frac{p_{max} - p_{min}}{32 E^2 E_{max} E_{min} média} \cdot \frac{9(1-\nu^2)K_{ir}(K_{ir}K_{or} + K_{ir}K_{or})}{32 E^2 E_{max} E_{min} média}}$$

$$\frac{p_{max}}{p_{min}} = \frac{2 E_{max}(K_{ir}K_{or} + K_{ir}K_{or})}{E_{min} média K_{ir}}$$

Critério do produto e campo de variação para $\frac{h^2}{R^2} < \left| \frac{6 E_{max} K_3}{K_{ir}} \right|$

$$\frac{h}{R} = \sqrt[4]{\frac{p_{max} - p_{min}}{16 E^2 E_{min} média} \cdot \frac{27(1-\nu^2)^2 K_3(K_{ir}K_{or} + K_{ir}K_{or})}{16 E^2 E_{min} média}}$$

$$\frac{p_{max}}{p_{min}} = \frac{\left(\frac{h^2}{R^2} \right) (K_{ir}K_{or} + K_{ir}K_{or})}{5 E_{min} média K_3}$$

Critério A.7.2.

Determinação da deformação em função da deformação no bordo da placa:

Solução 2:

$$RDFDM = \frac{3 R D_{MAX}^2 - R^2}{R^2 K_{ir}}$$

Solução 3:

$$RDFDM = \frac{2 C_1 - \frac{C_2}{R D_{MAX}^2} + 2(2 \ln(R D_{MAX}) + 1)}{K_{ir}}$$

$$E_{max} = \frac{\epsilon_{placa}}{RDFDM}$$

Critério A.7.3.

Deformação máxima quando é imposta a sensibilidade:

$$\epsilon_{max} = \left| \frac{2 \epsilon_0 K_{11}}{F (K_{1r} K_{2r} \mp K_{1t} K_{2t})} \right|$$

Pressões máxima e mínima no ponto de transição do diagrama:

$$p_{max} = \left| \frac{64 E \epsilon_0^2 K_3}{F^2 (1-\nu^2) (K_{1r} K_{2r} \mp K_{1t} K_{2t})^2} \right|$$

$$p_{min} = \left| \frac{16 E_{min} \epsilon_0 E \epsilon_0 K_3}{F (1-\nu^2) (K_{1r} K_{2r} \mp K_{1t} K_{2t})^2} \right|$$

$$\frac{h^2}{R^2} = \left| \frac{12 \epsilon_0 K_3}{F (K_{1r} K_{2r} \mp K_{1t} K_{2t})} \right|$$

Valores de h^2/R^2 e campo de variação quando $\frac{h^2}{R^2} > \frac{12 \epsilon_0 K_3}{F (K_{1r} K_{2r} \mp K_{1t} K_{2t})}$

$$\frac{h^2}{R^2} = \left| \frac{3 p F (1-\nu^2) (K_{1r} K_{2r} \mp K_{1t} K_{2t})}{16 E \epsilon_0} \right|$$

$$\frac{p_{max}}{p_{min}} = \frac{4 \epsilon_0}{F E_{min} \epsilon_0}$$

A.8. Fórmulas para Dimensionamento do Diafragma no Caso de Uso de Extensômetros Unidirecionais

Propõe critérios de dimensionamento de um diafragma e suas formulações matemáticas a partir de alguns dados de entrada.

A.8.1. Critério da Pressão Máxima Admissível

Nesse critério, impõe-se uma pressão máxima admissível que não deve ser ultrapassada. A formulação feita aqui será semelhante à feita para o dimensionamento usando strain gages bidirecionais. Os fatores limitantes serão os seguintes:

$$(1) \left(\frac{h}{R}\right)_{\max} = 2 \cdot \sigma_{\text{RECD}}$$

$$(2) w_{\max} = \frac{h}{3}$$

$$(3) |\varepsilon|_{\max} = \varepsilon_{\max}$$

$$(4) |\varepsilon|_{\text{média}} = \varepsilon_{\text{média}}$$

Esses fatores limitantes levam a equações que delimitam uma região dentro da qual temos pressões aceitáveis e relações h/R aceitáveis. Para a dedução das relações que exprimem os quatro fatores limitantes acima devem ser levados em conta os seguintes aspectos:

- $w_{\max}$ ocorre para $r=0$ na solução 2 e $r=a$ na solução 3.
- $\varepsilon_{\max}$, nas duas soluções, é deformação radial, sendo que na solução 2, ocorre para $r=R$ e na solução 3, ocorre para $r=a$.
- será assumido que as leituras dos strain gages não vão diferir significativamente da leitura feita no ponto central da grade. Essa simplificação é feita considerando que a perda de precisão das leituras não é significativa, comparada à causada por outros fatores ^{ligados} à fabricação da célula, como, por exemplo, colagem dos strain gages.
- somente serão medidas deformações radiais, pois as deformações tangenciais não são simétricas em relação ao centro do strain gage.

- a deformação mínima média depende da sensibilidade do aparelho que faz a leitura da saída elétrica da ponte.
- a colocação dos strain gages no diafragma será formando ângulo de 90° entre eles, sendo que os membros opostos da ponte de Wheatstone estão a 180° entre si. Os strain gages **deverão** estar do mesmo lado do diafragma no caso da solução 2 e do mesmo lado ou opostos no caso da solução 3.
- a saída elétrica da ponte de Wheatstone será proporcional a $\frac{F}{2} (\epsilon_1 + \epsilon_2)$, sendo o sinal negativo válido para o caso de os membros estarem colocados no mesmo lado do diafragma e o sinal positivo, válido para o caso de membro da ponte colocados em lados opostos do diafragma.
- a sensibilidade elétrica do conjunto, montado, será dada por

$$e_v = \frac{F}{2} (\epsilon_1 + \epsilon_2)$$

onde e_v é dada em V/V

- as fórmulas de ϵ_r são as seguintes:

$$\epsilon_r = \frac{-3pR^2(1-\nu^2)K_r}{2Eh^3}$$

Sendo, para a solução 2:

$$K_r = \frac{3r^2 - R^2}{R^2}$$

para a solução 3

$$K_r = \frac{2C_1 - C_2}{r^2} + 2(2hr + 1)$$

Desenvolvamos as quatro relações citadas acima:

Para a relação 1:

$$\left(\frac{h}{R}\right)_{\max} = 2 \cdot \sqrt{2E\pi D}$$

Para a relação 2, ou seja, para $w_{\max} = h/3$, teremos analogamente ao caso estudado para os strain gages bidirecionais:

$$\frac{h^4}{R^4} \geq \frac{9p(1-\nu^2)K_2}{4E}$$

Sendo, para a solução 2:

$$K_3 = \frac{1}{4}$$

para a solução 3:

$$K_3 = [C_1 a^2 + C_2 h a + (3 + 2a^2 (\ln a - 1))] / R^2$$

$$C_1 = \frac{2(R^2 \ln R - a^2 \ln a) + (a^2 - R^2)}{a^2 - R^2}$$

$$C_2 = \frac{4aR^2 (\ln a - \ln R)}{a^2 - R^2}$$

$$C_3 = \frac{R^2 [a^2 - R^2 + 2a^2 (\ln a (1 - 2 \ln R) + 2 (\ln R)^2 - \ln R)]}{a^2 - R^2}$$

Para a relação 3: $|\epsilon|_{max} \leq \epsilon_{máximo admissível}$

$$\epsilon_{max} \geq \left| \frac{-3pR^2(1-\nu^2)K_{ir}}{8Eh^2} \right|$$

ou:

$$\frac{h^2}{R^2} \geq \left| \frac{-3p(1-\nu^2)K_{ir}}{8E\epsilon_{max}} \right|$$

analogamente ao caso estudado para os strain gages bidirecionais.

Para a relação (4): $|\epsilon|_{min\ média} \geq \epsilon_{min\ média}$

Como essa relação é : devida à limitação da sensibilidade elétrica do aparelho que mede a saída elétrica da ponte, define-se $|2(\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2})| = |\epsilon|_{min\ média}$ e a relação (4) pode ser reescrita desse modo:

$$|2(\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2})| \geq \epsilon_{min\ média}$$

sendo

$$\epsilon_{r1} = \frac{-3pR^2(1-\nu^2)K_{r1}}{8Eh^2}$$

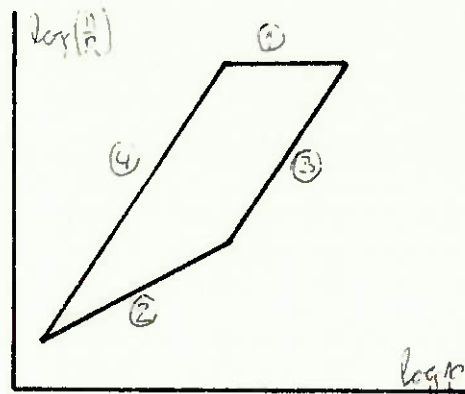
Então, a relação pode ser reescrita assim:

$$\epsilon_{min\ média} \leq \left| \left[\frac{3p(1-\nu^2)}{4E\left(\frac{h^2}{R^2}\right)} \right] (K_{r1} + K_{r2}) \right|$$

ou:

$$\frac{h^2}{R^2} \leq \left| \frac{3p_{min}(1-\nu^2)}{4E\epsilon_{min\ média}} (K_{r1} + K_{r2}) \right|$$

Como já foi dito, as 4 relações delimitam uma região no gráfico de $p \times h/R$ na qual existe linearidade de reposta da célula de carga. Esse gráfico é esquematizado abaixo:



As ponderações feitas para o caso de strain gauges bidirecionais são todas válidas para o presente caso. Determinemos então a pressão mínima admissível e o valor de h/R admissível:

Saem da interseção entre as equações dos critérios (2) e (4):

$$\frac{h^4}{R^4} > \frac{\sigma_p (1-\nu^2) K_3}{4E} \quad (2)$$

$$\frac{h^2}{R^2} \leq \left| \frac{3 p_{min} (1-\nu^2) (K_{r1} + K_{r2})}{4E \epsilon_{min} média} \right|$$

Obtém-se:

$$p_{min} = \left| \frac{4E \epsilon_{min} média K_3}{(1-\nu^2) (K_{r1} + K_{r2})^2} \right|$$

$$\left(\frac{h^2}{R^2} \right)_{min} = \frac{3 K_3 \epsilon_{min} média}{K_{r1} + K_{r2}}$$

Pressão máxima admissível

Sai da interseção entre as curvas 1 e 3:

$$\left(\frac{h}{R}\right) \leq 2 \cdot \text{REFD} \quad (1)$$

$$\left(\frac{h^2}{R^2}\right) \geq \left| \frac{-3p(1-\nu^2)K_{ir}}{3E\varepsilon_{max}} \right| \quad (3)$$

e se obtém:

$$p_{max} = \left| \frac{32(\text{REFD}^2) E \varepsilon_{max}}{3(1-\nu^2)K_{ir}} \right|$$

Pressões mínima e máxima para h/R de transição entre os critérios de deflexão máxima e deformação máxima.

A pressão máxima e o valor de h/R de transição saem da interseção entre os critérios (2) e (3):

$$\frac{h^4}{R^4} \geq \left| \frac{9p(1-\nu^2)K_3}{4E} \right| \quad (2)$$

$$\frac{h^2}{R^2} \geq \left| \frac{3p(1-\nu^2)K_{ir}}{8E\varepsilon_{max}} \right| \quad (3)$$

e se obtém isso:

$$p_{max} = \left| \frac{16E\varepsilon_{max}K_3}{(1-\nu^2)K_{ir}} \right|$$

e

$$\left(\frac{h^2}{R^2}\right) = \left| \frac{6\varepsilon_{max}K_3}{K_{ir}} \right|$$

A pressão mínima é encontrada substituindo-se o valor de (h^2/R^2) na expressão das deformações mínimas, critério (4); dada por:

$$\frac{h^2}{R^2} \leq \left| \frac{3p_{min}(1-\nu^2)(K_{r1} + K_{r2})}{4E\varepsilon_{min\text{ média}}} \right| \quad (4)$$

Então:

$$p_{min} = \left| \frac{8E\varepsilon_{min\text{ média}}\varepsilon_{max}K_3}{(1-\nu^2)K_{ir}(K_{r1} + K_{r2})} \right|$$

Valores de pressões máximas e mínimas para $\frac{h^2}{R^2} > \left| \frac{6\varepsilon_{max}K_3}{K_{ir}} \right|$

$$p_{min} = \left| \frac{4 \varepsilon_{min} \text{ média } \left(\frac{h^2}{R^2}\right) E}{3(1-\nu^2)(K_{r1} + K_{r2})} \right| \quad (\text{da relação 4})$$

$$p_{max} = \left| \frac{8 \left(\frac{h^2}{R^2}\right) E \varepsilon_{max}}{3(1-\nu^2)K_{r1}} \right| \quad (\text{da relação 3})$$

Valores de pressões máximas e mínimas para $\frac{h^2}{R^2} < \left| \frac{6 \varepsilon_{max} K_3}{K_{r1}} \right|$

$$p_{min} = \left| \frac{4 \varepsilon_{min} \text{ média } \left(\frac{h^2}{R^2}\right) E}{3(1-\nu^2)(K_{r1} + K_{r2})} \right| \quad (\text{da relação 4})$$

$$p_{max} = \left| \frac{4 \left(\frac{h^2}{R^2}\right) E}{9(1-\nu^2)K_3} \right| \quad (\text{da relação 2})$$

Cálculo dos campos de variação

As ponderações feitas no cálculo do campo de variação para o caso de strain gages bidirecionais são válidas para o presente caso:

$$\text{para } \frac{h^2}{R^2} < \left| \frac{6 \varepsilon_{max} K_3}{K_{r1}} \right|$$

$$\frac{p_{max}}{p_{min}} = \frac{\left(\frac{h^2}{R^2}\right) (K_{r1} + K_{r2})}{3 \varepsilon_{min} \text{ média } K_3}$$

$$\text{para } \frac{h^2}{R^2} > \left| \frac{6 \varepsilon_{max} K_3}{K_{r1}} \right|$$

$$\frac{p_{max}}{p_{min}} = \frac{2 \varepsilon_{max} (K_{r1} + K_{r2})}{\varepsilon_{min} \text{ média } K_{r1}}$$

Escolha de um valor de h/R conveniente: critério do produto.

Nesse caso, igualmente, as ponderações feitas para o caso de strain gages bidirecionais são válidas.

Então:

$$\text{se } \frac{p_{eq-min}}{p_{trans-min}} < \frac{p_{trans-max}}{p_{eq-max}}, \text{ a procura é feita para } \frac{h}{R} < \left(\frac{h}{R}\right)_{transição}$$

$$\text{se } \frac{p_{eq-min}}{p_{trans-min}} > \frac{p_{trans-max}}{p_{eq-max}}, \text{ a procura é feita para } \frac{h}{R} \geq \left(\frac{h}{R}\right)_{transição}$$

Escrevendo o critério do produto para $\frac{h}{R} < \left(\frac{h}{R}\right)_{transição}$

$$p_{min\ req} - p_{max\ req} = \left| \frac{4E}{3(1-\nu^2)K_2} \left(\frac{h^4}{R^4}\right) \frac{4E\epsilon_{min\ média}}{3(1-\nu^2)(K_{r1} + K_{r2})} \left(\frac{h^2}{R^2}\right) \right|$$

ou:

$$\frac{h}{R} = \sqrt[6]{\frac{p_{min\ req} - p_{max\ req}}{16E^2\epsilon_{min\ média}} \frac{27(1-\nu^2)^2 K_2 (K_{r1} + K_{r2})}{16E^2\epsilon_{min\ média}}}$$

Escrevendo o critério do produto para $\frac{h}{R} > \left(\frac{h}{R}\right)_{transição}$

$$p_{min\ req} - p_{max\ req} = \left| \frac{3E\epsilon_{max}}{3(1-\nu^2)K_{1r}} \left(\frac{h^2}{R^2}\right) \frac{4E\epsilon_{min\ média}}{3(1-\nu^2)(K_{r1} + K_{r2})} \left(\frac{h^2}{R^2}\right) \right|$$

ou:

$$\frac{h}{R} = \sqrt[6]{\frac{p_{min\ req} - p_{max\ req}}{32E^2\epsilon_{max}\epsilon_{min\ média}} \frac{9(1-\nu^2)^2 K_{1r} (K_{r1} + K_{r2})}{32E^2\epsilon_{max}\epsilon_{min\ média}}}$$

A.8.2. Critério da sensibilidade

Nesse caso, a sensibilidade elétrica da ponte de Wheatstone formada pelos strain gages, para a força máxima, é imposta, em volts por volt de alimentação. Assim, é imposto um fundo de escala para a ponte de Wheatstone.

Sendo e_s a sensibilidade,

F o gage factor,

ϵ_{r1} e ϵ_{r2} as deformações radiais lidas,

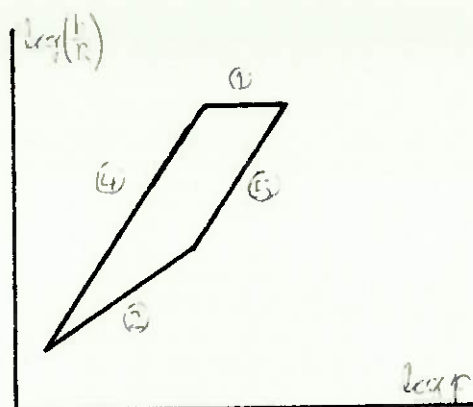
Sai:

$$e_s = \frac{F}{2} (\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}) = \left| \frac{3Fp(1-\nu^2)(K_{r1} + K_{r2})}{16E \left(\frac{h^2}{R^2}\right)} \right|$$

ou:

$$\frac{h^2}{R^2} = \left| \frac{3Fp(1-\nu^2)(K_{r1} + K_{r2})}{16Ee_s} \right| \quad (5)$$

A curva 5 acima substitui a carga 3 no gráfico de $p \times h/R$:



Para fins ^{de} dimensionamento, só vamos atingir a sensibilidade requerida se o valor de h/R for maior do que $(h/R)_{\text{transição}}$ entre as curvas (2) e (5).

A curva (5) é equivalente à curva (3) para

$$\epsilon_{\text{max}} = \left| \frac{2e_0 K_3}{F(K_1 + K_2)} \right|$$

Se h/R $(h/R)_{\text{transição}}$, a célula de carga não alcançará a sensibilidade requerida. Calculemos as pressões máxima e mínima no ponto de transição, bem como h/R . Esse ponto é o da interseção entre as curvas de sensibilidade fixa e de flexão máxima, ou seja, entre:

$$\frac{h^2}{R^2} = \left| \frac{3pF(1-\nu^2)(K_1 + K_2)}{16Ee_0} \right| \quad (5)$$

e

$$\frac{h^4}{R^4} = \frac{9p(1-\nu^2)K_3}{4E}$$

Nesse ponto, temos:

$$p_{\text{max}} = \left| \frac{64Ee_0^3 K_3}{F^2(1-\nu^2)(K_1 + K_2)} \right|$$

ou

$$\frac{h^2}{R^2} = \left| \frac{12e_0 K_3}{F(K_1 + K_2)} \right|$$

A pressão mínima é achada substituindo-se o valor de h^2/R^2 na curva de pressões máximas (4):

$$p_{min} = \left| \frac{4 E_{máx média} E \left(\frac{h^2}{R^2} \right)}{3(1-\nu^2)(K_1 + K_2)} \right| \quad (4)$$

sai:

$$p_{max} = \left| \frac{16 E_{máx média} E e_0 K_2}{F(1-\nu^2)(K_1 + K_2)^2} \right|$$

O campo de variação na região em que se alcança a sensibilidade requerida, ou seja, para $\frac{12 \nu_0 K_2}{F(K_1 + K_2)} \leq \frac{h^2}{R^2} \leq 4 R E D^2$ é dada por:

$$\frac{p_{max}}{p_{min}} = \frac{4 e_0}{F E_{máx média}}$$

A.8.3. Roteiro de cálculo

É basicamente o mesmo utilizado no caso de strain gages bidirecionais.

A diferença existente é que não se impõe deformação na borda da placa.

A.8.4. Resumo das fórmulas

Valores de K_r

Solução 2:

$$K_r = \frac{3r^2 - R^2}{R^2}$$

Solução 3:

$$K_r = 2C_1 - \frac{C_2}{r^2} + 2(2 \ln r + 1)$$

$$C_1 = \frac{2(R^2 \ln R - a^2 \ln a) + (a^2 - R^2)}{a^2 - R^2}$$

$$C_2 = \frac{4a^2 R^2 (\ln a - \ln R)}{a^2 - R^2}$$

$$C_3 = \frac{R^2 [a^2 - R^2 + 2a^2 (\ln a (1 - 2 \ln R) + 2(\ln R)^2 - \ln R)]}{a^2 - R^2}$$

Critério A.8.1.

Pressões admissíveis e relação h/R limite:

$$p_{\min} = \left| \frac{4 \varepsilon_{\min}^{\text{média}} E K_3}{(1-\nu^2)(K_{r1} + K_{r2})^2} \right| ; \quad \left(\frac{h^2}{R^2} \right)_{\min} = \left| \frac{3 \varepsilon_{\min}^{\text{média}} K_3}{K_{r1} + K_{r2}} \right|$$

$$p_{\max} = \left| \frac{32 (R E \nu)^2 E \varepsilon_{\max}}{3 (1-\nu^2) K_{1r}} \right|$$

$$\left(\frac{h}{R} \right)_{\max} = 2 \cdot R E \nu$$

Pressões máxima e mínima e relação h/R no ponto de transição do diagrama

$$p_{\max} = \left| \frac{16 E \varepsilon_{\max}^2 K_3}{(1-\nu^2) K_{1r}} \right|$$

$$p_{\min} = \left| \frac{3 E \varepsilon_{\min}^{\text{média}} \varepsilon_{\max} K_3}{K_{1r} (1-\nu^2) (K_{r1} + K_{r2})} \right|$$

$$\left(\frac{h^2}{R^2} \right)_{\text{transição}} = \left| \frac{6 \varepsilon_{\max} K_3}{K_{1r}} \right|$$

Pressões máxima e mínima para um dado $\frac{h^2}{R^2} > \left| \frac{6 \varepsilon_{\max} K_3}{K_{1r}} \right|$

$$p_{\min} = \left| \frac{4 \varepsilon_{\min}^{\text{média}} \left(\frac{h^2}{R^2} \right) E}{3 (1-\nu^2) (K_{r1} + K_{r2})} \right|$$

$$p_{\max} = \left| \frac{8 \left(\frac{h^2}{R^2} \right) E \varepsilon_{\max}}{3 (1-\nu^2) K_{1r}} \right|$$

Pressões máxima e mínima quando $\frac{h^2}{R^2} < \left| \frac{6 \varepsilon_{\max} K_3}{K_{1r}} \right|$

$$p_{\min} = \left| \frac{4 \varepsilon_{\min}^{\text{média}} \left(\frac{h^2}{R^2} \right) E}{3 (1-\nu^2) (K_{r1} + K_{r2})} \right|$$

$$p_{\max} = \left| \frac{4 \left(\frac{h^2}{R^2} \right) E}{3 (1-\nu^2) K_3} \right|$$

Critério do produto e campo de variação para $\frac{h^2}{R^2} > \left| \frac{6 \varepsilon_{\max} K_3}{K_{1r}} \right|$

$$\frac{h}{R} = \sqrt[4]{p_{\min \text{ req}} \cdot p_{\max \text{ req}} \cdot \frac{9 (1-\nu^2)^2 K_{1r} (K_{r1} + K_{r2})}{32 E^2 \varepsilon_{\max} \varepsilon_{\min}^{\text{média}}}}$$

$$\frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{2 \varepsilon_{\max} (K_{r1} + K_{r2})}{\varepsilon_{\min}^{\text{média}} K_{1r}}$$

Critério do produto e campo de variação para $\frac{h^2}{R^2} < \left| \frac{6 \varepsilon_{\max} K_3}{K_{1r}} \right|$

$$\frac{h}{R} = \sqrt[6]{p_{\min \text{ req}} \cdot p_{\max \text{ req}} \cdot \frac{27 (1-\nu^2)^2 K_3 (K_{r1} + K_{r2})}{16 E^2 \varepsilon_{\min}^{\text{média}}}}$$

$$\frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{\left(\frac{h^2}{R^2} \right) (K_{r1} + K_{r2})}{3 \varepsilon_{\min}^{\text{média}} K_3}$$

Critério A.8.2.

Deformação máxima quando é imposta a sensibilidade:

$$\varepsilon_{max} = \left| \frac{2e \cdot K_1}{F(K_1 + K_2)} \right|$$

Pressões máxima e mínima no ponto de transição do diagrama:

$$p_{max} = \left| \frac{64 E e^3 K_3}{F^2 (1-\nu^2) (K_1 + K_2)^2} \right|$$

$$p_{min} = \left| \frac{16 \varepsilon_{max} média E e K_3}{F (1-\nu^2) (K_1 + K_2)^2} \right|$$

$$\frac{h^2}{R^2} = \left| \frac{12 e \cdot K_3}{F (K_1 + K_2)} \right|$$

Valores de h^2/R^2 e campo de variação quando $\frac{h^2}{R^2} > \left| \frac{12 e \cdot K_3}{F (K_1 + K_2)} \right|$

$$\frac{h^2}{R^2} = \left| \frac{3 p F (1-\nu^2) (K_1 + K_2)}{16 E e} \right|$$

$$\frac{p_{max}}{p_{min}} = \frac{4e}{F \varepsilon_{max} média}$$

APÊNDICE B

RESUMO DE "THE STRAIN GAGE PRIMER"

B.1. INTRODUÇÃO À MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÕES:

B.1.1. Características Desejáveis a um Medidor de Deformações

Um medidor de deformações deve ter as seguintes características:

- a) Dimensões reduzidas - Muito pequeno em tamanho
- b) Massa insignificante
- c) De fácil instalação na estrutura a ser analisada
- d) Alta sensibilidade à deformação
- e) Pouca sensibilidade à temperatura, vibração, umidade ou outras condições encontradas nas estruturas a serem instrumentadas
- f) Capaz de medir deformações causadas por solicitações estáticas e dinâmicas
- g) Capaz de medição remota e gravação em fita magnética
- h) Baixo custo
- i) Possibilidade de instalação em pequenas superfícies

O medidor ideal deverá ser utilizado na instrumentação de um produto acabado, e em operação normal, não apenas em testes de laboratório dos materiais usados em sua fabricação.

Os extensômetros existentes atualmente ainda não atingem o ideal nas especificações 3, 4, 5 e 9, mas são superiores aos seus predecessores.

B.1.2. Tipos de Medidores

B.1.2.1. Medidor Mecânico

As tentativas mais antigas usadas na medida das deformações mecânicas envolveram o uso de um parafuso micrométrico, o qual quantificava a variação total do comprimento de um corpo de prova sob

carregamento. Dividindo-se essa medida pelo comprimento do corpo, tinha-se a deformação média e não a puntual do corpo de prova, o que implica em afirmar que as regiões de altas deformações seriam englobadas por outras de pequena deformação, que passariam despercebidos numa medição de conjunto.

Num aperfeiçoamento posterior, surgiram instrumentos chamados extensômetros, os quais empregavam sistemas de alavancas para amplificar as pequenas deformações. Com o passar do tempo, foram adicionados arranjos de luzes e espelhos aumentando a sensibilidade e diminuindo o peso e o número de pontos móveis.

O mais alto nível de amplificação puramente mecânica de deformações foi atingido por extensômetros do tipo "Huggenberger" e "Porter-Lipp", alcançando amplificações de 2000 a 3000 vezes e deformações de 0,00001 m/m. O tamanho atingido foi de 1/2 polegada.

B.1.2.2. Extensômetros elétricos de resistência

Consistem de um fio de diâmetro muito pequeno colado entre duas folhas de papel muito fino. As deformações desse fio causam variações em sua resistência elétrica, a qual deve ser medida por algum instrumento elétrico capaz de indicar pequenas variações de resistência elétrica, como uma ponte de "Wheatstone" por exemplo. Apresenta-se a seguir as especificações técnicas dos extensômetros elétricos de resistência:

<u>especificação</u>	<u>extensômetro elétrico</u>
a) Dimensões	muito pequenas
b) Peso	insignificante
c) facilidade de fixação na peça a ser testada	relativamente simples
d) Sensibilidade à deformação	boa, mas seria desejável uma melhora

<u>especificação</u>	<u>extensômetro elétrico</u>
e) Sensibilidade a varia <u>ções</u> ambientais	é pequena, mas o extensô <u>metro</u> pode ser protegido ou as variáveis, compensadas
f) Indicação estática ou dinâmica	facilmente realizável
g) Indicação remota ou gravação	facilmente realizável
h) Custos	é comparativamente barato
i) Comprimento de medição	Chega a menos de 1 mm.

B.2. EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA

Em se tratando de extensômetros elétricos de resistência, o interesse se volta para duas quantidades físicas; variação de resistência elétrica e de deformação, sendo o adimensional resultante dessa relação chamado de fator de resistência cuja expressão matemática é:

$$F = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$$

sendo (R) a resistência inicial (L) o comprimento inicial, (ΔR) e (ΔL), as variações de resistência e comprimento. O significado físico do fator de resistência (F) é a variação específica de resistência para uma deformação unitária. Quanto maior (F), maior a sensibilidade e a saída elétrica do dispositivo de medida. Por outro lado o valor de (F) é determinado pelo material do filamento e os materiais com altos valores de (F) possuem características indesejáveis, que tornam o seu uso impraticável em extensômetros.

O fio usado deve ter um diâmetro pequeno a ponto de o cimento que o envolve ser consideravelmente mais forte que ele. Dessa forma, o cimento consegue transmitir a deformação da parte que está sendo testada para o fio. Desse modo, podem-se medir deformações de até 0,03 de tração ou compressão.

Os materiais usados em strain gages são:

- Advance, as características dessa liga são:
 - . pouca sensibilidade à temperatura

- . bom para medições em longos períodos com a possibilidade de mudança de temperatura.
- . F relativamente baixo.
- Iso-elástico, suas características são:
 - . É usado somente em medições dinâmicas
 - . sensibilidade à temperatura relativamente alta
 - . F relativamente alto.

B.2.1. Aspectos da Construção de extensômetros

Aqui mostramos aspectos da construção de extensômetros SR4, como exemplo.

- Extensômetros de 1/2 polegada.
 - . Consiste de 5 polegadas de um fio de $\varnothing 0,001$ polegada colocado entre dois pedaços de papel fino.
 - . 2 fios de maior diâmetro são soldados nas pontas do fio.
 - . Um dormente de feltro é colocado por cima do strain gage.
- Extensômetro de menos de 3/8 de polegada.
 - . O arame sensível à deformação é enrolado num núcleo de papel cilíndrico em hélice.
 - . O núcleo de papel é achatado e colocado entre dormentes de papel para proteção e isolamento.

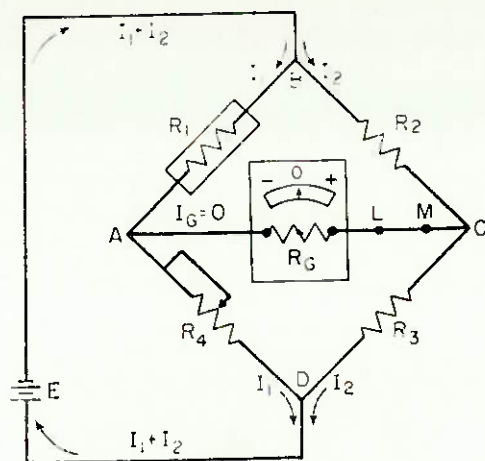
B.2.2. Instrumentação básica

Os instrumentos usados com os extensômetros elétricos devem ser capazes de medir variações de resistência de le com as deformações.

Sendo $\epsilon = \frac{\Delta R/R}{F}$, vamos ter ϵ a partir de F e R conhecidas.

(dados de fabricantes) e ΔR lido.

- Para se medir pequenas variações de resistência da ordem de 0,001 ohm pode se usar um instrumento conhecido como Ponte de Wheatstone, esquematizada a seguir:



Para ter-se corrente fluindo de A para B, deve-se ter:

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}$$

No caso de alguma variação de R_1 , há fluxo de corrente de A a B. Deve-se então variar uma das outras resistências da ponte para se ter de novo um estado de equilíbrio. Conhecendo a variação da resistência ajustada, usando a fórmula acima, pode-se descobrir a variação da resistência que está sendo medida.

B.2.3. Fatores envolvidos na escolha de um extensômetro elétrico

- O procedimento utilizado para a seleção de um extensômetro elétrico para uma aplicação particular é o seguinte:
 - a) Seleção do tipo de material da base do extensômetro elétrico, determinado pela máxima temperatura esperada.
 - b) Seleção do material do filamento com base na temperatura de operação, no campo de variação das temperaturas e das deformações e se as deformações são estáticas ou dinâmicas.
 - c) Seleção das configurações do retículo e dos terminais do extensômetro elétrico.
 - d) Consideração das características especiais necessitadas pela aplicação.
 - e) Seleção do tamanho do extensômetro elétrico.

A cola a ser usada com o extensômetro é determinada levando em conta o extensômetro selecionado, as temperaturas de operação e o tempo disponível para secagem da cola.

B.2.4. Técnicas básicas envolvendo extensômetros elétricos

B.2.4.1. Colagem

Para que o extensômetro elétrico tenha bom desempenho como medidor de deformação, é essencial que ele acompanhe as deformações da peça testada. Para isso, o filamento sensível deve receber integralmente a deformação da peça. No caso da colagem, a cola não deve absorver parte considerável da deformação, mas transmiti-la da peça ao filamento.

A escolha de uma cola apropriada é feita com base no seguinte:

- a) Material usados na construção do extensômetro elétrico (base, retículo).
- b) Condições ambientais de trabalho do extensômetro elétrico
- c) Tempo disponível para a instalação.

Os extensômetros elétricos comerciais podem ser classificados em três categorias de acordo com o material da base utilizado em sua construção e com a temperatura máxima de trabalho:

- a) Papel - com adesivo de nitrocelulose (T até 71°C).
- b) Bakelite - com fibra de celulose (T até 176°C) ou fibra de vidro (T até 232°C).
- c) Epoxi (T até 93°C).

As colas mais comuns utilizadas para aplicação em temperaturas até 176°C são as seguintes:

- a) Duco (nitrocelulose)
- b) epoxi

c) bakelite

d) acrílico

A tabela abaixo fornece um resumo das colas usadas em extensômetros, suas principais características e tipos de extensômetros compatíveis com elas.

Item	Organic								Ceramic		
	Solvent release, room-temperature curing		Thermo- plastic, melting	Chemical setting				Drying, heat curing	Chemical setting, heat curing	Fusing	
				Room-temperature curing		Heat curing				Molten spray	Heat curing
Base	Nitro-cellulose		Shellac	Acrylic	Epoxy	Epoxy	Phenolic	Silicate	Phosphate	Refractory oxide	Glass
Cements and properties	SR-4 and post yield	Duco	DeKhotinsky hard	Eastman 810, F-88	EPY-150	EPY-400	Bakelite	RX-1	Al-PI, PBX, Brimor	Bakelite A, Bakelite C	LGAC
Cure temper- ature, °F	Room to 150	Room to 150	Melts at 275	Room	Room to 150	250-500	250-350	220	600	None	1,800
Cure time	2-10 hr	12-48 hr	When cool	1-5 min	10-70 hr	2-10 hr	5-6 hr	1 hr at temper- ature	1 hr	None	30 hr
Cure pressure (psi)	1-5	1-5	1-15	1-15	5-15	5-50	50-100	None	None	None	None
Maximum operating temperature, °F	150	150	100	150	150	400 normal, 500 after proper cure	300 continuous, 500 for short time	500	>1,000	>1,000	Approx 1,500
Strain gage compatibility	Use with quick- drying thin paper-backed gages	All paper- backed gages	All	All except paper wrap-around construction	All	All that will stand cure temperature. Exception: all paper-backed	Phenolic- backed only	Strippable, transferable, and ceramic- insulated	Strippable, transferable, and ceramic- insulated	Strippable, transferable, and ceramic- insulated	Strippable, transferable, and ceramic- insulated
Specimen material compatibility	All except plas- tics soluble in MEK and acetone and unbondable plastics	All except plas- tics soluble in MEK and acetone and unbondable plastics	All except some plastics	All except some plastics	All except some plastics	All except some plastics and reactive metals	All except some plastics and reactive metals	All except some plastics and reactive metals	All except some plastics and reactive metals	All except some plastics	All metals that will stand cure temperature
Strain limit	>10% at room, ½% at -320 °F	>10% ½% at -320	2-3%	>2% ½% at -320	>2% ½% at -320	2% ½% at -320	2-3% ½% at -320	1-2%	1-2%	2%	½%
Electrical properties	Excellent over operating tem- perature range	Excellent over operating tem- perature range	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Deteriorates with increase in tempera- ture. Limits used at temper- ature	Deteriorates with increase in tempera- ture. Limits used at temper- ature	Deteriorates with increase in tempera- ture. Limits used at temper- ature	Excellent but deteriorates at high tem- perature	Excellent
Humidity re- sistance	Fair, absorbs up to 2% water	Fair, absorbs up to 2% water	Good	Fair, absorbs up to 0.3% water	Good, absorbs up to 0.1% water	Good, absorbs up to 0.1% water	Fair, absorbs up to 0.2% water	Fair, hygroscopic, soluble in water	Fair, hygroscopic	Good, is porous and somewhat hygroscopic	Excellent

Em linhas gerais, para extensômetros elétricos que tenham papel, colas de celulose, epoxi plástica ou cola acrílica podem ser usadas em temperaturas até 71°C para evitar deslizamento ou quebra de cola. Aplicações até 93°C e 177°C requerem extensômetros e colas de bakelite ou epoxi. A combinação extensômetro de bakelite/cola de bakelite é recomendada também para instalações por períodos longos. As colas de acrílico ou epoxi resultam de um esforço para se obter adesivos com

menores tempos de secagem.

B.2.4.2. Preparação da superfície para colagem.

Antes da colagem do extensômetro elétrico na superfície de teste, esta necessita estar completamente limpa e sem rugosidade, mas não espelhada pois isto dificulta a colagem. Pode se conseguir o polimento adequado com papel abrasivo. Depois de polida, completa-se a limpeza da superfície com acetona, tolueno ou tricloroetileno. Deve-se evitar ao máximo o contato dos dedos com a superfície e com o extensômetro elétrico, pois a gordura dos dedos podem inutilizar a colagem. Quanto à orientação dos extensômetros na superfície da peça, recomenda-se desenhar linhas-guia nessa superfície para facilitar, desde que essas linhas não passem por baixo do extensômetro elétrico.

B.2.4.3. Colas de nitrocelulose

São usadas com extensômetros elétricos de base de papel e não são apropriadas para uso com os extensômetros elétricos de base de bakelite ou epoxi impermeável. A cola "Ouro" também pode ser usada com esta finalidade. O procedimento de colagem é o seguinte:

- a) Passar uma grossa camada de cola tanto na superfície da peça como na do extensômetro elétrico.
- b) Colocar o extensômetro elétrico sobre a superfície a ser testada, posicioná-la nos primeiros segundos de aplicação e pressioná-lo para eliminar o excesso de cola, o que vai diminuir o tempo de secagem.
- c) Aplicar no extensômetro elétrico uma força de 0,5 kgf até a secagem. As pressões não podem ser maiores para não danificarem o extensômetro elétrico.
- d) Depois de algum tempo de secagem (1 hora no caso da cola Ouro), retira-se a pressão e

deixa-se secar 24 horas à temperatura ambiente.

A rapidez da secagem aumenta com a temperatura, portanto, baixas temperaturas devem ser evitadas. Além disso, o ambiente não deve ser úmido.

B.2.4.4. Cola de bakelite

É usada com extensômetros elétricos de bakelite. É recomendada para temperaturas entre 93°C e 177°C para medições estáticas e 93°C e 232°C para medições dinâmicas.

Os extensômetros elétricos de bakelite são pouco flexíveis e de comparativamente difícil aplicação a superfícies curvas devido a esta pouca flexibilidade. Por isso, só se recomenda a utilização deste tipo de cola nas seguintes condições:

- a) Temperaturas entre 65°C e 232°C
- b) Quando se requer estabilidade apesar da umidade.
- c) Quando se deseja estabilidade a longo prazo.

O procedimento de colagem é o seguinte:

- a) Segurar o extensômetro elétrico pelos fios terminais ou com pinças para evitar a contaminação.
- b) Aplicar uma camada de bakelite nas partes a serem coladas, eliminando possíveis bolhas de ar que tenham se formado.
- c) Colocar o extensômetro elétrico sobre a superfície da peça e orientá-lo enquanto a cola estiver úmida.
- d) Cobrir o extensômetro elétrico com um pedaço de feltro ou neoprene e aplicar uma pressão de 7 a 14 kg/cm^2 durante um ciclo de:
 - 1 hora a 60°C
 - 2 horas a 79°C
 - 2 horas a 121°C

- e) Pode-se melhorar a estabilidade do extensômetro elétrico com mais um estágio de 1 hora a 135°C depois de removida a pressão.

Para se acelerar a secagem, pode-se aplicar calor no metal da peça próxima ao extensômetro elétrico.

B.2.4.5. Colas de Epoxi

Podem ser usadas com extensômetros elétricos de papel, epoxi ou bakelite. A cola de epoxi com secagem à temperatura ambiente pode ser usada em temperatura até 93°C e absorve menos água do que colas de nitrocelulose. O adesivo é vendido separado em dois componentes resina e ativador, que devem ser misturados em quantidades iguais antes da colagem. Esse adesivo atinge metade de sua resistência em 16 horas de secagem à temperatura ambiente e toda a resistência em uma semana. Com aquecimento, pode-se aumentar a rapidez de secagem.

Existem colas epoxi para temperaturas mais altas, como 260°C . O procedimento de colagem é o seguinte:

- a) Espalhar cola sobre as superfícies a serem coladas e posicionar o extensômetro elétrico sobre a peça que será colada de acordo com as linhas-guia desenhadas na fase de preparação.
- b) Pressionar o extensômetro elétrico suavemente com um dedo para retirar o excesso de adesivo.
- c) Cobrir o extensômetro elétrico com uma fina folha de teflon e aplicar nela uma força normal. A força deve ser aplicada por um bloco de borracha esponjosa para ser bem distribuída. A força aplicada não deve ser grande.
- d) Aplicar a força até o tempo de cura sem movê-la, pois isso deslocaria o extensômetro elétrico da posição requerida.

B.2.4.6. Cola de secagem rápida

Pode-se evitar o grande tempo de secagem associado com a maior parte das colas para extensômetros elétricos usando-se uma cola de secagem rápida. Uma dessas colas é um monômero de cianoacrilato (marca: Eastman 910). O endurecimento da cola é provocado simplesmente pela aplicação de pressão a uma película do líquido. Pode-se acelerar a polimerização com um catalisador.

Essa cola pode ser usada com extensômetros elétricos de papel, epoxi ou bakelite e a temperatura máxima de utilização é aproximadamente 93°C para aplicações estáticas.

O procedimento para aplicação da cola é o seguinte:

- a) Monta-se o extensômetro elétrico sobre um pedaço de tamanho conveniente de fita adesiva.
- b) Passa-se uma fina camada de catalizador sobre a traseira do extensômetro elétrico
- c) Uma parte da fita adesiva é colada sobre a superfície da peça, adjacente no local de colagem, de modo que, ao se colar a fita, o extensômetro elétrico esteja posicionado corretamente sobre a superfície da peça.
- d) Passa-se uma camada de cola sobre a superfície da peça no local de colagem.
- e) Colar a fita adesiva à superfície com um movimento firme e progressivo.
- f) Aplicar uma leve pressão com o polegar na área do extensômetro elétrico.
- g) Depois de um minuto, pode-se retirar a fita adesiva, suavemente, puxando a fita paralelamente à superfície da peça.

Depois disso, pode-se conectar os fios nos terminais do extensômetro elétrico. A rapidez de secagem é aumentada com a temperatura. A cola é pre

judicada por umidade e agentes alcalinos e sua vida é prolongada se armazenada num refrigerador a 40°C ou 10°C . Para se remover o extensômetro elétrico, pode-se colocar a superfície em banho de dimetil-fornamida durante 5 a 15 minutos ou em água fervente.

B.2.4.7. Outros tipo de cola.

Entre os adesivos usados, deve-se mencionar os adesivos dentais. Um deles, a F-88 (disponível da American Consolidated Manufacturing Company, Industrial Division, Philadelphia, Pa) consiste em uma resina em pó e um líquido ativador. Após a preparação da superfície passa-se a cola, já misturada, nas superfícies de contato e aplica-se uma firme pressão com o polegar para retirar os excessos. A secagem se completa em poucos minutos. A vantagem dessa cola é poder ser usada em locais úmidos ou molhados.

Outro tipo de cola é chamado de Khotinsky, cuja propriedade é poder ser fundida para a remoção do extensômetro elétrico. Devido às temperaturas envolvidas no processo de colagem (140°C), só pode ser usada com extensômetros elétricos de bakelite.

B.2.4.8. Colagem dos fios terminais

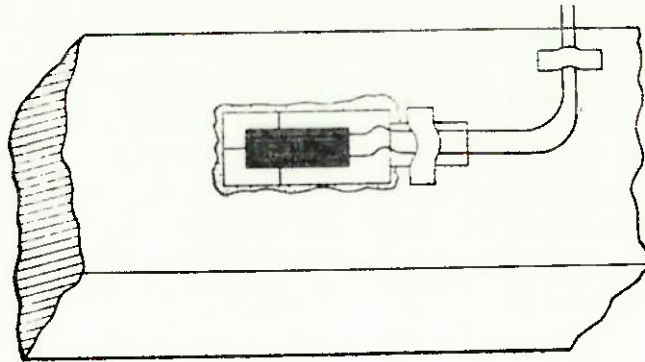
A instalação dos fios terminais requer muito cuidado para assegurar precisão e estabilidade da saída elétrica. Os fios devem ter baixa resistência elétrica, boa isolamento, flexibilidade e facilidade em se trabalhar com eles.

Para temperaturas normais, usa-se fio AWG-20 comum, coberto com isolamento termoplástico. Para altas temperaturas, a isolamento deve ser de cerâmica, fibra de vidro ou teflon.

Recomenda-se fixar o extensômetro elétrico à estrutura antes da colagem dos fios terminais para

diminuir a probabilidade de danificação do extensômetro elétrico

Deve-se também fazer pequenas voltas nos fios para diminuir as deformações que ele poderiam causar no extensômetro, como mostrado na figura abaixo:



Os fios devem estar bem colocados ou fixados à superfície da estrutura para que não ocorra nenhum movimento. Se for usado um número grande de fios, convém juntá-los num só cabo.

O material da solda também merece atenção: depende das temperaturas de operação do extensômetro elétrico. Soldas de estanho (50 - 50 ou 63 - 37) são usadas para temperaturas entre -18°C e 148°C , solda de antimônio/estanho para 204°C e solda de estanho/prata para 260°C .

O procedimento de soldagem é o usado para os demais componentes eletrônicos:

- a) passa-se o material de solda nos locais a serem soldados, deixando sobras.
- b) junta-se as duas partes a serem soldadas e aquece-se até a solda ficar líquida e brilhante.
- c) deixa-se esfriar, adicionando-se mais solda, se necessário.

Deve-se tomar cuidado com o aquecimento do extensômetro elétrico para não danificá-lo.

B.2.4.9. Proteção contra a umidade

Deve-se evitar que os extensômetros elétricos trabalhem sob umidade, porque uma vez que o seu princípio de funcionamento é a verificação de pequenas variações de resistência, as modificações das resistências entre os fios terminais ou entre eles e a superfície da peça introduzidas pela presença de umidade podem levar a leituras erráticas. O que se deve fazer então é isolá-las fisicamente do meio úmido.

B.2.4.10. Testes de instalações de extensômetros elétricos

Depois que o extensômetro elétrico foi instalado e a cola, curada, existem alguns testes rápidos para se certificar que a instalação está bem feita. Os testes são esses:

- a) Verificação da resistência do extensômetro elétrico: deve estar próxima do valor nominal. Caso o valor se distancie muito do nominal, o extensômetro pode ter sofrido dano no processo de instalação.
- b) Verificação da resistência entre o filamento do extensômetro e a superfície que se quer medir. Se a instalação foi correta, a resistência alcançada será de 10^9 ohms. Requer-se resistências maiores do que 5×10^7 ohms para medições precisas, só se tolerando valores abaixo deste em medições dinâmicas. Recomenda-se não usar equipamentos de testes de alta voltagem para não danificar o isolamento elétrico do extensômetro.
- c) Verificação da colagem é feita do seguinte modo: liga-se o extensômetro a um indicador estático de tensões e balanceia-se a ponte, trazendo a agulha para o zero. Pressiona-se levemente o extensômetro a agulha vai se desviar do zero. Ao se retirar a carga, a agulha deve retornar ao zero ou a próximo do zero. Se isso

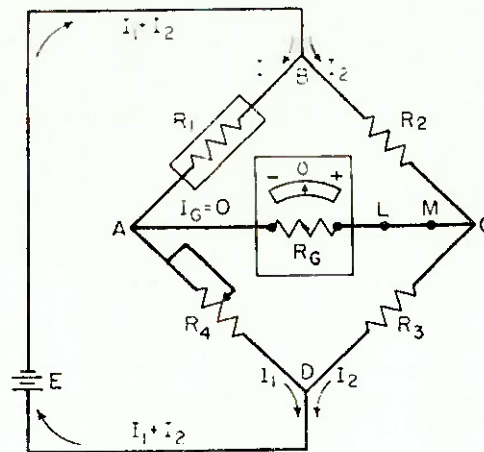
não acontecer, provavelmente será causado por uma colagem imperfeita.

B.3. A PONTE DE WHEATSTONE

B.3.1. Teoria da Ponte Balanceada

Uma das maneiras de se medir as pequenas variações de resistência dos extensômetros elétricos é o uso de um circuito denominado ponte de Wheatstone.

Esse circuito, esquematizado abaixo, tem a propriedade de anular a corrente entre A e C (quando a relação entre as resistências nas dois membros circuito é a mesma. Essa condição é chamada de equilíbrio.



Quando a ponte está equilibrada, $E_{B-A} = E_{B-C}$:

$$\text{ou: } i_1 R_1 = i_2 R_2 \quad (1)$$

$$\text{e } E_{A-C} = E_{C-D}$$

$$\text{ou: } i_1 R_4 = i_2 R_3 \quad (2)$$

Dividindo-se (1) por (2):

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}$$

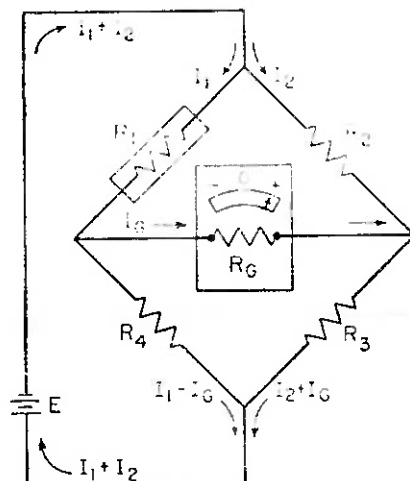
Supondo-se desconhecido o valor de R_1 , poderemos achá-lo deste modo:

$$R_1 = \frac{R_2}{R_3} R_4 \quad (3)$$

A precisão com que se pode determinar R_1 depende da sensibilidade do galvanômetro que vai determinar a corrente zero da ligação A-C. Na medição estática de deformações, uma das resistências, por exemplo, R_1 vai ser o extensômetro elétrico; sendo assim, uma das outras resistências do circuito deve ser ajustada para se balancear o circuito de acordo com (3). Se a peça que está sendo medida foi carregada estaticamente, a variação resultante no valor de R_1 será $\Delta R = R_1 F \Delta L / L$. Essa variação, de alguns centêsimos de ohm, vai desbalancear a ponte, o que é indicado por um desvio do zero da agulha do galvanômetro. Ajustando-se R_4 , a agulha vai retornar a zero. Nesse caso, R_4 deve ser uma resistência ajustável e bastante precisa. De posse do valor de R_4 , usando-se (3), pode-se chegar a um novo valor de R_1 . Para um dado valor de resistência R_1 , pode-se usar R_4 calibrada diretamente em deformações em vez de resistências. Para se conseguir um ajuste mais fino, pode-se usar R_4 em paralelo com uma resistência variável de alto valor e graduada. Pode-se usar o próprio galvanômetro para se medir a resistência, o que é mais fácil ainda, e será visto a seguir. O galvanômetro poderia ser graduado em unidades de deformação (m/m).

B.3.2. Teoria da ponte desbalanceada

Como dito acima, pode-se usar o galvanômetro para a medição de deformações a partir da corrente que passa entre os nós A e C da figura a seguir:



Quando há passagem de corrente pelo galvanômetro, a equação (3) não é mais válida e deve-se então desenvolver novas equações simulando a situação. Pode-se resolver o circuito da figura usando-se as leis de Kirchhoff, aplicáveis para circuitos em malha e que são as seguintes:

- a) A soma das correntes num determinado ponto do circuito é zero.
- b) A soma das voltagens ao longo de qualquer circuito fechado da malha é zero.

Aplicamos essas leis para o circuito de ponte desbalanceada.

Aplicando a primeira lei temos:

$$i_4 = i_1 - i_G$$

$$i_3 = i_2 + i_G$$

Da aplicação da segunda lei para as malhas, sai:

$$R_1 i_1 + R_4 (i_1 - i_G) = E; \quad (4)$$

$$R_1 i_1 + R_G i_G - R_2 i_2 = 0 \quad (5)$$

$$R_G i_G + R_3 (i_2 + i_G) - R_4 (i_1 - i_G) = 0 \quad (6)$$

Vamos resolver o sistema de equação formado por (4), (5) e (6), para obter i_G :

$$i_G = \frac{E (R_2 R_4 - R_1 R_3)}{R_2 (R_1 + R_4) (R_G + R_3 + R_4) + R_1 R_3 R_4 - R_2 R_4^2 + R_G R_3 (R_1 + R_4)} \quad (7)$$

Se desenharmos o gráfico de corrente i_G por R , na região de pequenas variações de resistências em torno de R_1 , veremos que se aproxima de uma reta, para fins práticos.

Para a ponte desbalanceada, devemos agora procurar descobrir para que valor de resistência de galvanômetro a sensibilidade da ponte é máxima ou seja, apresenta a

maior variação de diferença de potencial entre A e C para uma dada variação de resistência R_1 . Imaginando que isso fosse conseguido com resistência do galvanômetro zero, isso nos levaria sempre a um menor potencial entre A e C, independente dos valores de R_1 e R_2 . Verificando a sensibilidade para um valor de resistência de galvanômetro infinito, sai o seguinte:

$$E_o = E_{A-C} = i_1 R_1 - i_2 R_2 \quad (8)$$

Sendo que não há corrente no galvanômetro, então:

$$i_1 = \frac{E}{R_1 + R_4} \quad \text{e} \quad i_2 = \frac{E}{R_2 + R_3} \quad (9)$$

Aplicando-se (9) em (8):

$$\frac{ER_1}{R_1 + R_4} - \frac{ER_2}{R_2 + R_3} \quad (10)$$

Derivando em relação à resistência R_1 :

$$\frac{dE_o}{dR_1} = \frac{ER_4}{(R_1 + R_4)^2} \quad (11)$$

Lembrando que o fator de resistência F é dado por

$$F = \frac{dR/R}{DL/L} \quad \text{ou} \quad dR = FR \frac{dL}{L}$$

Substitui-se a equação acima em (11), chegando-se a:

$$dE_o = \frac{E R_1 R_4}{(R_1 + R_4)^2} F \frac{dL}{L} \quad (12)$$

A partir da relação acima, pode-se observar que a sensibilidade da ponte não depende das resistências nos membros dela.

Vamos desenvolver agora uma relação para uma resistência genérica do galvanômetro. Para isso, o artifício será o de se interromper a malha no fio que passa pelo galvanômetro, nos pontos L e M.

Com o circuito interrompido, o ponto L será eletricamente equivalente ao ponto A e o ponto M, equivalente a C. Para uma mudança na resistência R_1 , teremos uma voltagem entre A e C ou L e M igual a dE_0 , pois não há corrente no galvanômetro. Se L e M fossem ligados, a corrente através de R_g (galvanômetro), seria a que iria fluir devido à diferença de potencial dE_0 e uma impedância igual à da rede inteira, vista de L e M, de acordo com Thévenin. Essa impedância, calculada, é:

$$Z = R_g + \frac{(R_1 + R_2)(R_2 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (13),$$

supondo que todas as resistências R_1 e R_4 são ôhmicas. Supondo todas iguais, (13) se reduziria a $Z = R_g + R_1$ (14)

A corrente do galvanômetro, de acordo com Thévenin, é dada por:

$$i_g = \frac{dE_0}{Z} \quad (15)$$

e sendo $E_g = i_g R_g$, sai que:

$$E_g = \frac{R_g}{R_g + R_1} dE_0 \quad (16)$$

Combinando (16) e (12) sai:

$$E_g = \frac{R_g}{R_g + R_1} \frac{EFdL}{4L} \quad (17)$$

A voltagem indicada no galvanômetro será máxima para R_g infinito, como se pode ver a partir de (17). É desejável que R_g seja consideravelmente maior do que R_1 .

Sobre as limitações que a leitura de valores com a ponte desbalanceada pode ter em relação à leitura da ponte balanceada, elas se referem principalmente à precisão. O processo de rebalancear a ponte, antes de cada leitura pode ser usado se for necessária maior precisão nas leituras, eliminando desvios de zero que ocorrem com o passar do tempo. Outros motivos que podem causar imprecisões são os seguintes:

- a) A corrente do galvanômetro não varia linearmente com a variação de resistência, embora isso possa ser considerado sem perda considerável de precisão.
- b) A corrente no galvanômetro depende da tensão E fornecida pela bateria, que varia com o tempo.

B.4. COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA NAS INSTALAÇÕES DE EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS

Um dos aspectos das instalações de extensômetros elétricos que pode provocar imprecisões de razoável ordem de grandeza é o ligado à compensação de temperatura. A necessidade de compensação de temperatura aparece por dois motivos:

- a) O coeficiente de dilatação térmica do filamento difere, normalmente, do da estrutura à qual ele está colado.
- b) A resistência do filamento muda com a temperatura.

Isso quer dizer que, mesmo que a resistência do filamento fosse constante com a temperatura, a variação de temperatura causaria falsos valores de deformação, uma vez que os coeficientes de dilatação são diferentes.

A compensação desses efeitos pode ser conseguida pela instalação de um segundo extensômetro elétrico conhecido como extensômetro compensador numa peça do mesmo metal que aquela onde o extensômetro ativo está instalado. Se as duas peças de metal estão sujeitas às mesmas temperaturas durante os testes, os dois extensômetros elétricos passarão pelas mesmas mudanças de resistências térmicas. Para se anular esse efeito, pode-se usar esse extensômetro compensador como R_2 ou R_4 .

A relação

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \quad (1)$$

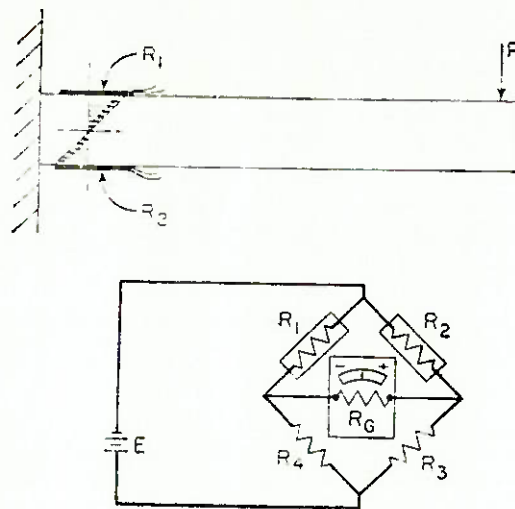
não é destruída pela dilatação térmica, pois as variações de resistência devidas a ela são proporcionais às resistências nominais dos extensômetros elétricos que se supõem ser do mesmo material. Com alguma dilatação térmica, teremos:

$$\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_4} = \frac{R_2 + \Delta R_2}{R_3} \quad (2)$$

Para $R_1' = R_1 + \Delta R_1$, e $R_2' = R_2 + \Delta R_2$, teremos uma relação análoga à (2):

$$\frac{R_1'}{R_4} = \frac{R_2'}{R_3} \quad (3)$$

Até agora, os extensômetros elétricos representados por R_2 ou R_4 estavam colados numa mesma peça indeformada do mesmo material à qual estava colado R_1 . No entanto, pode-se fazer com que esses strain gages também meçam deformações. Por exemplo, a montagem esquematizada na figura abaixo apresenta o extensôme



tro elétrico R_2 , que faz a compensação de temperatura medindo uma deformação em compressão, enquanto R_1 mede deformação em tração.

Se apenas R_1 ou R_2 estivessem medindo a deformação separadamente, ela seria dada por (7) (item teoria da ponte desbalanceada). As duas resistências medindo juntas têm o efeito aproximado de duplicar a saída da ponte. Isso pode ser verificado, tomando-se a equação (7):

$$i_g = \frac{E(R_2 R_4 - R_1 R_3)}{R_2(R_1 + R_4) + (R_g + R_3 + R_4) + R_1 R_3 R_4 - R_2 R_4^2 + R_g R_3 (R_1 + R_4)}$$

Como $R_2 R_4 - R_1 R_3 \approx 0$, pois a condição inicial de equilíbrio era $R_2 R_4 - R_1 R_3 = 0$, as variações de R_2 e R_1 foram pequenas e a mudança de valor de denominador foi pouco significativa no processo, vamos considerar que os valores de i_g , considerando-se a leitura sô de R_1 e de R_1 e R_2 , são proporcionais apenas ao numerador da expressão. Estudando o numerador da expressão para valores lidos sô de R_1 , e supondo iguais a R_1 as resistências de ponte, já havendo compensação de temperatura, teremos:

$$K i_{g_1} = R_1 R'_1 - R'_1 (R'_1 + \Delta R'_1) = -R_1 \Delta R'_1 \quad (4)$$

Para valores lidos de R_1 e R_2 (representados por R'_1 , devido à compensação):

$$K i_{g_{1,2}} = (R'_1 - \Delta R'_1) R'_1 - R'_1 (R'_1 + \Delta R'_1) = R'_1 R'_1 - R'_1 \Delta R'_1 - R'_1 R'_1 - R'_1 \Delta R'_1 = -2R'_1 \Delta R'_1 \quad (5)$$

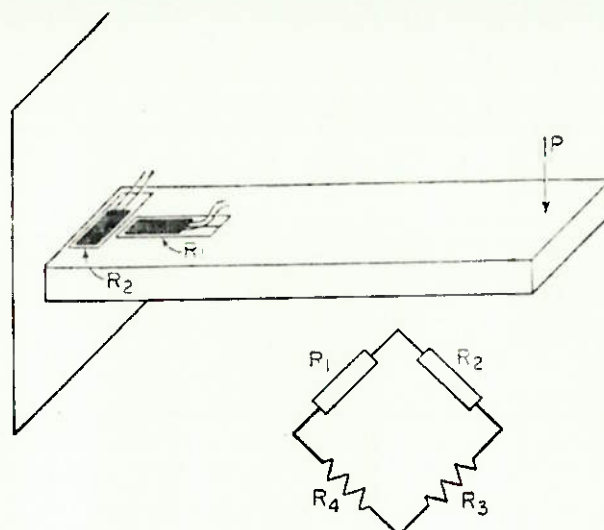
A partir de (4) e (5), vemos que $i_{g_{1,2}} \approx 2 i_{g_1}$ (pois há

pequenas diferenças no denominador da expressão que estava sendo analisada, como já foi dito). Para fins práticos, $\Delta R'_1$, tende a zero e o denominador tende, com isso, a permanecer constante, fazendo com que,

$$i_{g_{1,2}} = 2 i_{g_1} \quad (6)$$

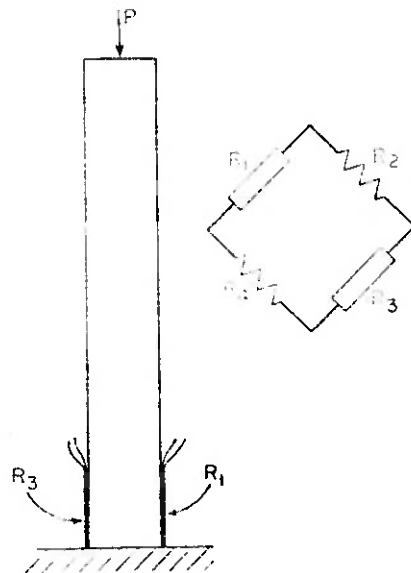
Usando o mesmo raciocínio, pode-se chegar à conclusão de que a ponte pode ser desbalanceada na proporção da diferença das variações de resistência em braços adjacentes e na proporção da soma de variações de resistências em braços opostos da ponte.

Outro tipo de montagem, às vezes chamado de montagem de "Poisson", é esquematizado na figura a seguir.

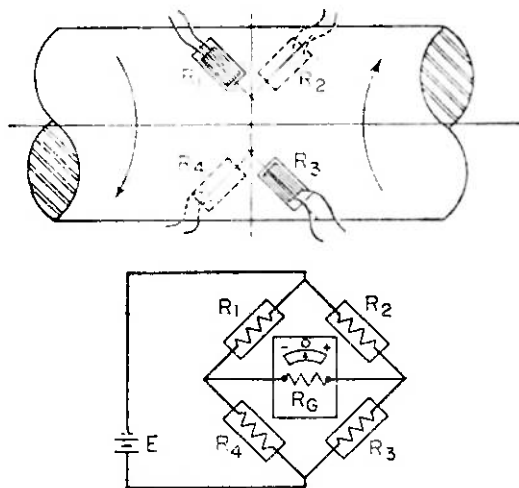


O extensômetro elétrico para compensação de temperatura é montado perpendicularmente ao que mede as deformações nas direções principais. Esse tipo de montagem é indicado para o caso em que as peças ensaiadas estão submetidas a esforços puros de tração ou compressão e nesse caso é a única maneira que se tem de fazer a compensação de temperatura sem se colocar o extensômetro elétrico de compensação numa peça indeformada. A saída da ponte é amplificada pela relação $(1 + \nu)$, onde ν é o coeficiente de Poisson do material onde o extensômetro elétrico está colado. Esse coeficiente varia de 0,25 a 0,35 nos metais. Para se conhecer o valor da deformação no extensômetro R_1 é necessário o conhecimento do valor do coeficiente de Poisson. A determinação desse valor é feita experimentalmente simplesmente se comparando as variações dos valores das resistências R_1 e R_2 para alguns esforços. Nesse tipo de montagem, ocorre compensação de temperaturas e a amplificação ocorre, pois a deformação transversal, de Poisson, tem sinal contrário ao da deformação principal. Pode-se comprovar essa amplificação de maneira análoga à usada para se comprovar a duplicação da saída da ponte.

Para se medir esforços de compressão em uma barra, cancelando as tensões devidas à flexão, pode-se fazer a montagem indicada na figura a seguir. Deve-se observar que, nesse caso, não há compensação de temperatura.



Para medição de esforços de torção, a montagem su
gerida abaixo, pode ser usada. Haverá compensação de temperatu
ra e a saída é amplificada em quatro vezes.

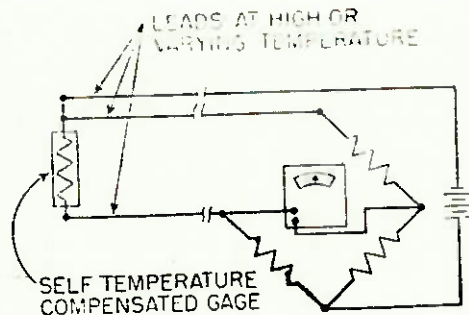


As recomendações sobre os extensômetros que não compõe a ponte são as seguintes:

- a) O extensômetro elétrico ativo e o de compensação devem ter a mesma resistência, o mesmo fator de resistência e a mesma variação de resistência com a temperatura. Isso pode ser satisfeito tomando-se dois extensômetros elétricos do mesmo lote de fabricação.
- b) É importante que as resistências inativas da ponte tenham total compensação de temperatura.

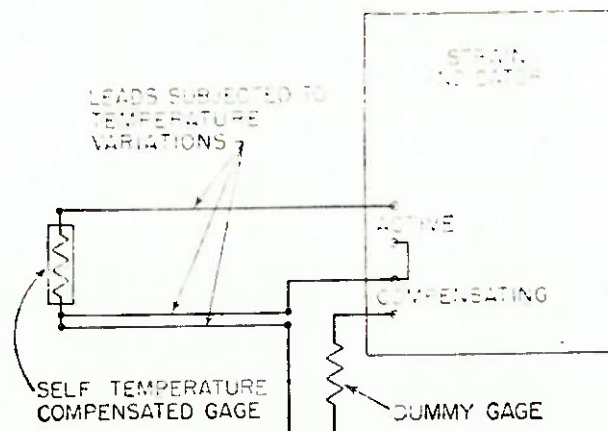
B.4.1. Extensômetros Auto Compensadores de Temperatura

Em alguns tipos de instalação, onde as temperaturas variam durante os testes, não é possível instalar o extensômetro elétrico de compensação de temperatura. Nesse caso, são usados extensômetros elétricos auto compensadores de temperatura. É montado em Bakelite, que tem baixíssima sensibilidade à temperatura, com filamentos de liga de cobre-níquel e níquel. Estes materiais em série são tais que em um deles a resistência aumenta com a temperatura e no outro a resistência diminui com a temperatura e a resistência do conjunto praticamente não muda no intervalo de temperaturas. A experiência recomenda que, para a obtenção de melhores resultados, deve-se usar um extensômetro elétrico auto compensador em um membro da ponte adjacente ao extensômetro elétrico ativo. O uso do extensômetro elétrico auto compensador introduz um problema no que se refere aos fios terminais, pois estes também serão submetidos a variações de temperatura e, conseqüentemente de resistência. Nas instalações de extensômetros elétricos convencionais, os fios terminais dos extensômetros elétricos ativo e de compensação são do mesmo comprimento. Isso não acontece com o auto compensador, pois apenas um dos extensômetros elétricos usa fios terminais longos. Isso pode ser corrigido como mostra a figura a seguir.



Na figura acima, temos uma ponte com um strain gage ativo. A compensação do comprimento dos fios terminais é feita adicionando-se a R_2 um comprimento de cabo igual ao adicionado a R_1 .

Na figura abaixo, temos uma ponte com dois membros externos. A compensação do comprimento dos fios terminais é feita adicionando a R_4 o mesmo comprimento de fio adicionado a R_1 .



A adição dessa resistência aos membros externos, representada pelos fios terminais, vai provocar uma atenua

ção da resposta da ponte, uma vez que a variação de resis
tência continuará a mesma para uma dada deformação, enquanto
aquele membro da ponte terá maior resistência total. Pode-se
levar em conta esta atenuação adotando-se novo fator
de resistência F' :

$$F' = F \left(\frac{R_G}{R_G + R_L} \right)$$

A resistência dos fios terminais em série com um
extensômetro ativo atenua a saída da ponte com o seguinte
fator:

$$D = \frac{R_G}{R_G + R_L}$$

onde:

R_G = resistência do extensômetro elétrico

R_L = resistência dos fios terminais

A deformação verdadeira é obtida da deformação indicada,
dividindo-a pelo valor de D. O erro introduzido
pela resistência dos fios terminais é:

$$e = \frac{R_L/R_G}{1 + R_L/R_G} \times 100$$

B.5. INSTALAÇÕES DE EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS A LONGO PRAZO

Em alguns casos, requer-se extensômetros elétricos
que forneçam indicações estáveis e precisas por um longo período.
As instabilidades em medidas estáticas podem ser causadas pelo exten
sômetro elétrico, pelos fios terminais, pela ponte, pelo amplificador
e pelo indicador e devem ser evitadas.

B.5.1. Desvio de Zero

Uma das maneiras de se medir instabilidade do sistema
é medir o desvio do ponto de balanceamento da ponte.
Desvio de zero é o termo para descrever esse fenômenos, causa

sado por qualquer outro fator que não deformação, ou seja, a agulha do galvanômetro deixa de apontar para zero na medição de uma peça indeformada com o tempo. Esse desvio pode ser causado pelos seguintes fatores:

- a) Compensação incompleta de temperatura
- b) Instabilidade da ponte de Wheatstone, amplificador ou fonte de energia.
- c) Extensômetros elétricos mal colados
- d) Deslizamento de um ou mais extensômetros elétricos (a cola cede um pouco).
- e) Proteção insuficiente contra umidade ou variação da resistência entre o filamento e a peça medida.
- f) Variações na impedância dos fios terminais.

Existem dois tipos de instalação de extensômetros elétricos a longo prazo:

- a) Aquelas em que só se ajusta o zero uma vez e não mais.
- b) Aquelas em que se tem a possibilidade de ajuste do zero antes de cada medida.

B.5.2. Compensação de Temperatura

Para uma eficiente compensação de temperatura requer-se que os extensômetros elétricos ativo e de compensação estejam localizados na mesma peça o mais próximo possível um do outro. Outra recomendação a ser seguida é retirar os dois extensômetros elétricos do mesmo lote de fabricação, pois, nesse caso, os filamentos saíram do mesmo carretel, foi usada a mesma mistura de cola e os processos de fabricação foram os mesmos. Recomenda-se também proteger os extensômetros elétricos de correntes de ar ou do sol.

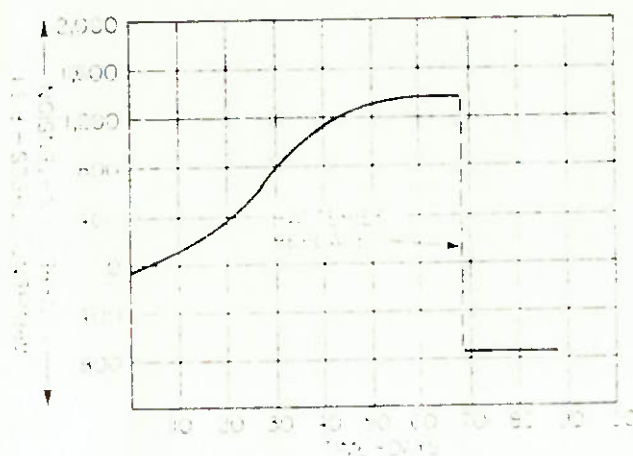
B.5.3. Instabilidade da Ponte de Wheatstone

Deve-se prever completa compensação de temperatura também dos membros internos da ponte de Wheatstone. As resistências internas da ponte de Wheatstone devem ter os mesmos coeficientes térmicos de resistência e estar sujei

tas às mesmas temperaturas.

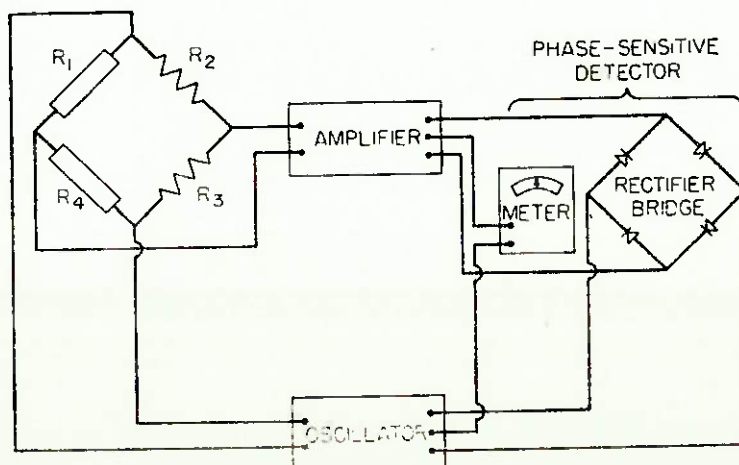
B.5.4. Instabilidade do indicador de deformação

Alguns dos indicadores de deformações usam baterias para fazê-los funcionar. Em muitos desses casos, usa-se um oscilador de áudio frequência para transformar a corrente contínua em alternada e fazer funcionar o circuito de ponte adequadamente. Esses instrumentos são instáveis, por exemplo, o potencial fornecido pela bateria decai com o uso. A figura abaixo mostra o efeito da queda de voltagem da bateria até ela ser substituída.



Pelo efeito notado na troca das baterias novas, vemos que no instante inicial, elas não eram exatamente novas no início dos testes.

Foi demonstrado, rigorosamente, que o equilíbrio da ponte de Wheatstone não depende da voltagem suprida. A causa da variação sentida está no circuito do instrumento indicador.



O diagrama de blocos da figura acima apresenta o instrumento indicador. O oscilador, o amplificador e o detector de fase contribuem para a tendência de desvio de zero. Esse arranjo é tal que o medidor de zero pode indicar que a ponte está balanceada mesmo quando ela não está. Neste caso, as equações válidas para a ponte balanceada não são válidas. Este desbalanceamento inicial, aliado à voltagem e frequência do oscilador e ao ganho do amplificador, são funções da voltagem da bateria e dão ao instrumento uma tendência ao desvio de zero com a queda da voltagem da bateria.

B.5.5. Instabilidade da Cola

Em instalações a longo prazo, o problema em relação à cola a ser usada é a absorção de umidade, que diminui a impedância entre o filamento e a peça à qual o extensômetro elétrico é colado. Recomenda-se então, boa proteção em relação à umidade nessas instalações.

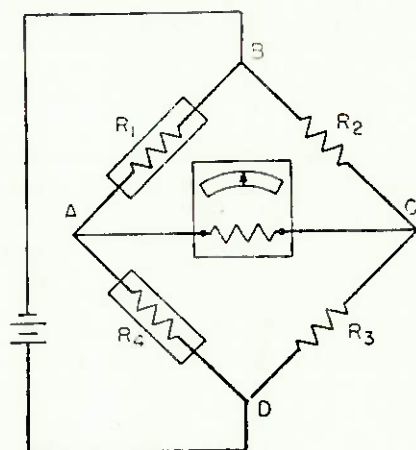
Outro problema que surge é o deslizamento da cola, isto é, a tendência da cola absorver deformações com o tempo, adulterando os resultados lidos. Recomenda-se o uso de extensômetros elétricos de maior área de contato para se diminuir a instabilidade das leituras (por problema de deslizamento).

B.5.6. Deteção do Desvio de Zero

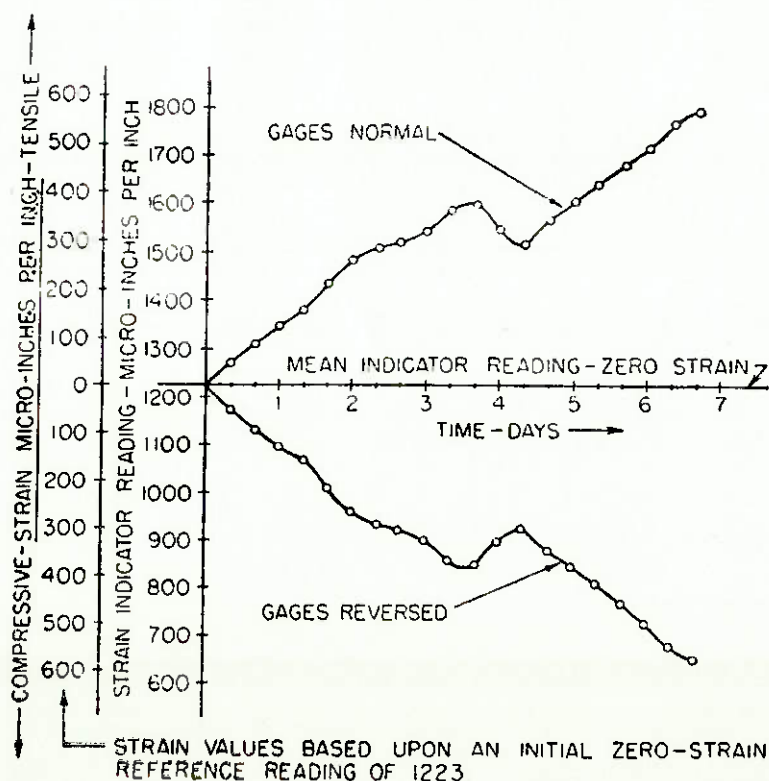
Num sistema de medição de deformação estável, assume-se que se possa medir as deformações de um corpo a partir do balanceamento inicial da ponte para deformação zero, por tempo indeterminado. Devido à instabilidade dos sistemas de medições, procura-se compensar eventuais desvios de zero rebalanceando-se a ponte antes de cada medição para deformação nula. Em alguns casos, não é possível descarregar o corpo de prova para o rebalanceamento da ponte e o que se faz, nesse caso, é inverter a posição, na ponte, dos extensômetros elétricos ativo e de compensação.

A explicação para esse procedimento é a seguinte: na ponte, quando R_1 (o extensômetro elétrico ativo) é de

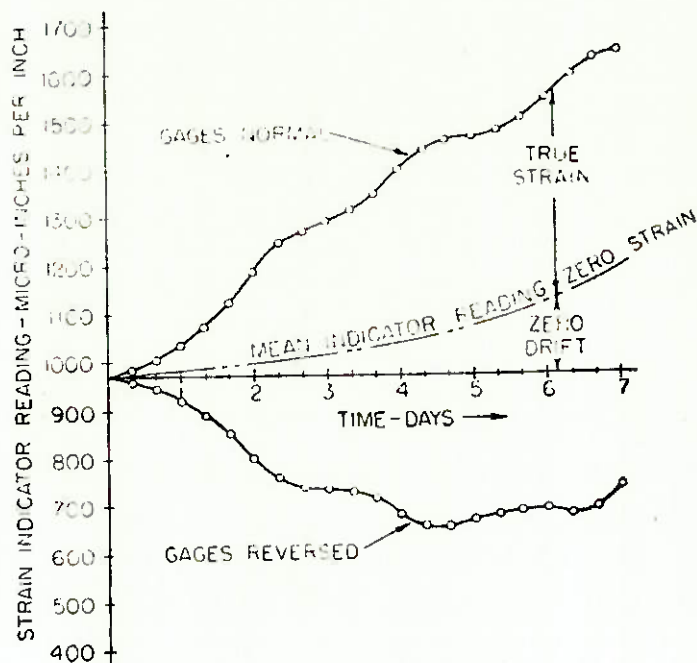
formado em tração, a sua resistência vai aumentar e a voltagem em A vai cair levemente em relação ao ponto C (ver figura abaixo). Sendo a voltagem em C maior, a deforma



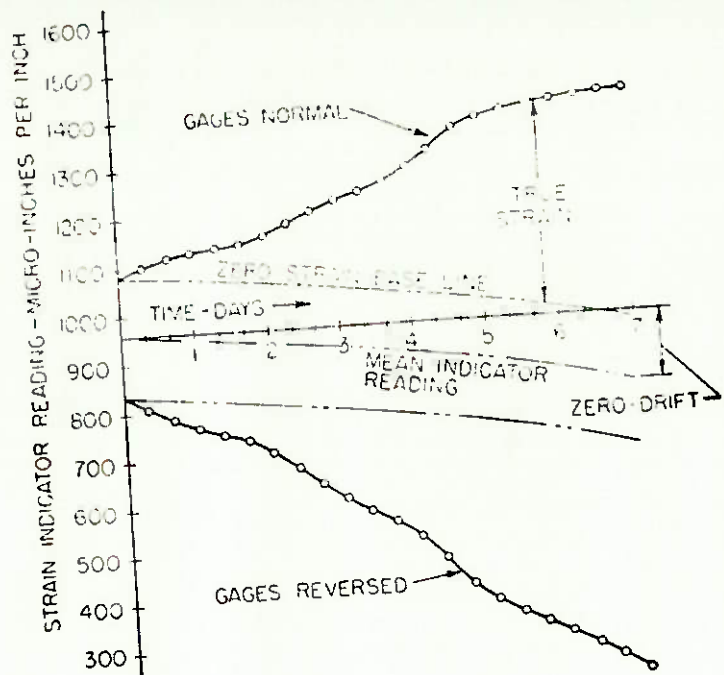
ção será de tração, se é maior em A, a deformação será de compressão. Se trocarmos a posição entre os extensômetros elétricos ativo e de compensação, a diferença de potencial entre A e C troca de sinal. Sendo assim, adota-se o procedimento de se inverter os extensômetros elétricos ativo e de compensação para cada leitura a ser feita. A média entre as leituras é o ponto de deformação zero. Quando não há desvio de zero, a aparência das curvas de leitura é a da figura abaixo. Quando há desvio de zero, a aparência das



curvas de leitura é a da figura a seguir. Observa-se a coincidência das origens no ponto de deformação zero, já que, no caso, as resistências dos extensômetros elétricos, trocados entre si são iguais. Quando as resistências dos extensômetros trocados entre si não são iguais, o ponto de deformação zero não é coincidente quando se troca as



posições dos mesmos. A aparência do gráfico com as medi-
das, quando isso ocorre, é a da figura a seguir. A linha de
deformação zero será a média entre as leituras, e o valor
da deformação será dado pela diferença entre a linha de de-
formações lidas e a linha de zero. Se a estrutura pudes-
se ser descarregada, o desvio de zero seria detectado sim-
plesmente se descarregando a estrutura, rebalanceando a
ponte e notando a indicação do instrumento para essas con-
dições.



B.5.7. Minimização do Desvio de Zero

Para se minimizar os efeitos de instabilidade do sistema de medição em medições de longa duração, po-de-se fazer o seguinte:

- a) Trocar o suprimento de potência da bateria por um de corrente alternada estabilizada. O uso de uma fonte de potência regulada reduz o desvio de zero do indicador a um mínimo.
- b) Inversão dos extensômetros elétricos ativos e de com-pensação, tirando-se a média das leituras, conside^{ra}ndo-as como o zero.
- c) Comparar as leituras da instalação com as leituras de uma instalação de referência, constituída por exten-sômetros elétricos instalados em peça indeformada com completa compensação de temperatura.

O procedimento acima não detecta desvios de zero devidos a defeitos de colagem ou a problemas não origina-dos no instrumento.

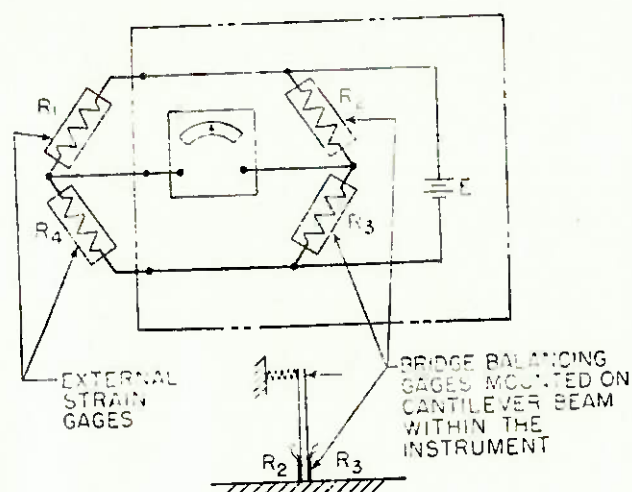
Recomenda-se, em instalações durante longos perío-dos, o uso de extensômetros elétricos de Bakelite e que a colagem seja feita de acordo com as recomendações dos fa-bricantes. Recomenda-se também que se proteja a instalação da ação da umidade.

Outro fator de considerável importância é a resis-tência entre o filamento do extensômetro elétrico e a peça à qual ele está colado. Por exemplo, um extensômetro elé-trico de 350 ohm com impedância de 10^7 ohm em relação à pe-ça tem resistência equivalente de 0.01225 ohm. Se o strain gage tivesse um fator de resistência igual a 2, isso signi-ficaria uma tensão de 35 kg/cm² no aço. É por isso que se recomendou impedâncias da ordem de 10^9 ohm.

B.6. INSTRUMENTAÇÃO

B.6.1. Instrumentos para medidas

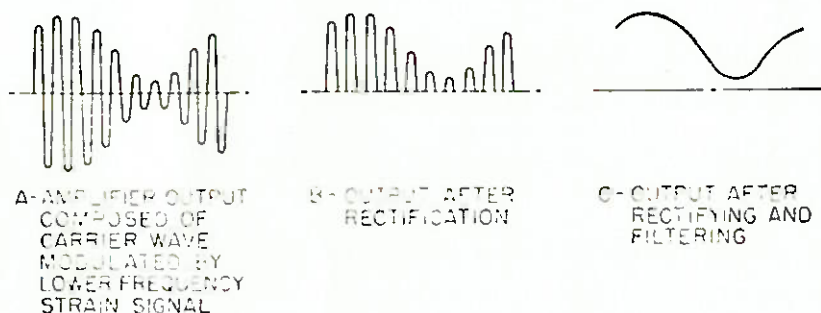
A instalação mais simples de extensômetros elé-tricos utilizada é a esquematizada na figura abaixo. Como



na maior parte das instalações, usa-se dois extensômetros elétricos externos, R_1 e R_4 , sendo um ativo e um de compensação de temperatura, e necessita-se de mais duas resistências R_2 e R_3 , sendo pelo menos uma delas variável para se completar a ponte. Essas duas resistências podem ser dois extensômetros elétricos colados em faces opostas de uma barra fina e engastada. A Deflexão dessa barra provoca a variabilidade das resistências R_2 e R_3 . A bateria, o galvanômetro e a barra com os extensômetros elétricos R_2 e R_3 são construídos no instrumento, enquanto R_1 e R_4 são extensômetros elétricos externos, podendo ser conectados ao instrumento quando se for medir deformações. Com os extensômetros elétricos R_1 e R_4 colados à superfície que se quer medir e conectados ao instrumento conforme indicado, deve-se balancear inicialmente a ponte defletindo-se a barra até o galvanômetro indicar o zero. A barra é carregada de um lado por uma mola e de outro por um parafuso de posição ajustável para permitir o ajuste nas duas direções. Depois de carregado o corpo de prova, deve-se balancear novamente a ponte pelo ajuste da deflexão da barra. Esse controle de ajuste da barra pode ser ca

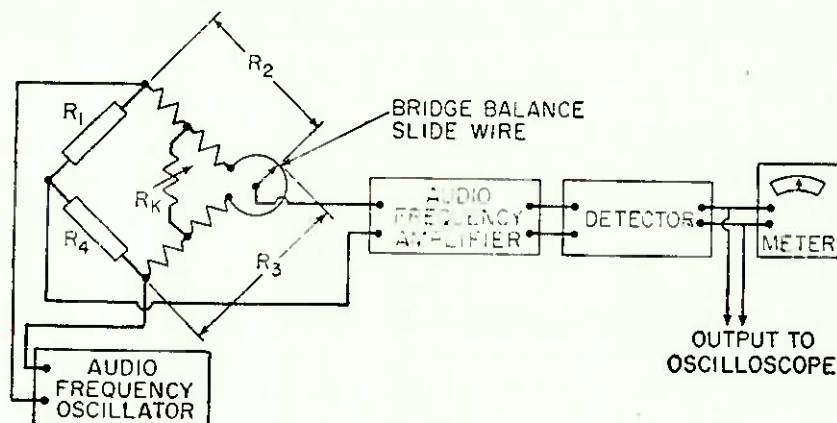
librado diretamente em unidades de deformação e será função do fator de resistência dos extensômetros elétricos utilizados. Deve-se observar que o instrumento usa a teoria da ponte balanceada.

A principal limitação no uso desse instrumento vem do fato das variações de resistência típica serem muito pequenas, sendo necessário um galvanômetro muito sensível para se detectar essas deformações. Com o uso de um galvanômetro muito sensível, a operação de balanceamento da ponte se torna muito trabalhosa. Se a saída da ponte pudesse ser amplificada antes de passar pelo galvanômetro seria necessário um instrumento menos sensível e delicado para a medida. A amplificação do sinal só é possível, em termos práticos, se for usada a corrente alternada. Desse modo, a saída da ponte pode ser amplificada por um amplificador de áudio-frequência, retificada e indicada num microamperímetro. O indicador de deformação típica é composto por um oscilador de áudio frequência (de 60 a 400 cps) para suprir o circuito de ponte, um amplificador, um circuito de detecção e um medidor. O circuito de detecção é composto basicamente de um retificador e um filtro. A ação do detector é mostrada na figura abaixo: o detector, inicialmente corta a metade de baixo de todas as ondas que transportam o sinal num processo conhecido como retificação.



Em seguida, o produto da retificação é filtrado de modo a só deixar passar as frequências mais baixas.

A figura abaixo mostra um diagrama de blocos de um indicador de deformação estática muito usado. O



cuito da figura acima mostra uma resistência variável que não aparecia em nenhum circuito de ponte anteriormente mostrado, que é o ajuste de fator de resistência R_k . A calibração do mostrador do indicador de deformações é exata somente se extensômetros elétricos de um determinado fator de resistência são usados. Se extensômetros elétricos com maior fator são usados, o indicador de deformação mostra menor deformação do que a existente, a menos que seja corrigido. A resistência R_k é calibrada para que os extensômetros elétricos de fator de resistência num determinado campo possam ser usados sem se perder precisão no balanceamento da ponte. Outra correção que poderia ser feita é multiplicar-se a deformação obtida pela relação entre os fatores de resistência do extensômetro elétrico a ser usado e o daquele para o qual o instrumento foi projetado. Por exemplo, se o instrumento foi calibrado para fator de resistência de 1,2 e se usam extensômetros elétricos de gage fator 3,6, a verdadeira deformação será:

$$\text{-Deformação verdadeira} = \text{deformação indicada} \times \frac{1,2}{3,6}$$

Para o ajuste de balanceamento da ponte, usa-se dois tipos de ajuste: um ajuste de ordem de grandeza da deformação, feito por um botão com posições discretas, e um

ajuste fino, feito por um fio deslizante.

Outro aspecto desse circuito é que nos circuitos de corrente contínua, o sinal da corrente fica bem detectado, porém, no circuito de corrente alternada o sentido da corrente é indeterminado, a menos que se detecte a fase da corrente. Num circuito de resistências ôhmicas a corrente estará ou em fase ou desfasada de 180° , dependendo do valor da resistência do extensômetro elétrico ativo estar maior ou menor do que o valor de equilíbrio. Os indicadores de deformação comerciais usam um retificador em ponte de modo que a fase da corrente é relacionada ao sinal da saída. Desse modo, pode-se associar o movimento da agulha numa determinada direção a um determinado sinal de deformação.

As limitações desse tipo de aparelho são:

- a) As baterias, quando usadas, descarregam-se com o tempo e são uma fonte de imprecisões.
- b) Devido à voltagem fixa aplicada à ponte, usando-se extensômetros elétricos de maior resistência, não se altera a sensibilidade do instrumento à deformação.

B.7. INSTALAÇÕES À PROVA DE UMIDADE

Frequentemente, as instalações de extensômetros elétricos são feitas em locais expostos à umidade, o que pode falsear os resultados das medidas. Tal ocorre porque a umidade pode ser absorvida pela cola ou pelo material que envolve os filamentos do extensômetro, provocando uma alteração da resistência elétrica envolvida. Outro motivo pode ser uma eventual condução de corrente elétrica entre os terminais do extensômetro elétrico no caminho proporcionado pela umidade. Tornar uma instalação de extensômetros à prova de umidade consiste simplesmente em isolá-la fisicamente do ambiente. O tipo de isolamento depende também do tipo de fonte de umidade e da precisão que se quer das medições.

Quanto à influência do tipo de extensômetro elétrico, os de Bakelite são de maior estabilidade durante longos períodos do que extensômetros elétricos de papel ou epoxi, devido à sua menor taxa de absorção de umidade. As condições de exposições à

umidade dos extensômetros elétricos podem ser subdivididas em quatro classes, ordenadas por crescente severidade do meio são:

- a) Instalações a longo prazo dentro de salas
- b) Instalações a céu aberto com possibilidade de submersão com água
- c) Instalações submersas em água
- d) Instalações submersas em outros meios que não água.

B.7.1. Instalações a Longo Prazo Dentro de Salas

A necessidade de estabilidade durante longos períodos obriga à proteção das instalações contra variações de umidade.

Para se conseguir a proteção desejada, basta se aplicar uma camada de 3 mm de cera protetora. Os fios terminais devem estar bem presos à chapa de metal. Após a aplicação da cera protetora, recomenda-se medir a resistência entre o filamento e a peça novamente, durante alguns períodos de tempo para se verificar se a proteção está realmente bem feita.

B.7.2. Instalações a Céu Aberto com Possibilidade de Submersão em Água

A proteção necessária, nesse caso de solicitação, normalmente é conseguida aumentando-se a espessura da camada protetora e aumentando a área coberta pela cera protetora. Depois disso, pode-se proteger o conjunto com fita isolante.

Um procedimento alternativo pode ser fechar a instalação toda num bolsão de borracha depois de ter aplicado uma camada isolante nela.

O rigor da proteção à umidade vai depender das condições às quais a instalação vai ser submetida.

B.7.3. Instalações Submersas em Água

Nesse caso, os extensômetros estão submersos em água, eventualmente a altas pressões. Um dos métodos para se proteger os extensômetros elétricos de danos é o se

guinte: (usado em David Taylor Model Basin).

- a) Preparar uma área de 39 cm^2 para aplicação do extensômetro elétrico e vedação contra a água.
- b) Depois de aplicado o extensômetro elétrico e curada a cola, corta-se uma rodela de borracha de 1 mm de espessura do mesmo tamanho do que a área preparada na peça. A rodela deve ter buracos para a passagem dos fios terminal com diâmetros pouco menores que estes.
- c) Revestir os extensômetros elétricos com cera protetora. Pode ser do mesmo tipo da usada no item 1. Proteger também a passagem dos fios terminais pela borracha.
- d) Colar a rodela de borracha à superfície da peça com uma faixa de cola de 2 cm de largura ao longo da borda.

Esse tipo de proteção é capaz de suportar pressões de água da ordem de 50 kgf/cm^2 durante 3 meses. Se as condições forem severas a ponto de este procedimento não ser mais suficiente para a proteção, pode-se usar um tratamento multicamada pela aplicação de cera, borracha, sintética, proteção de aço inoxidável e uma camada final de borracha sintética.

B.7.4. Instalações Submersas em Outros Meios que não Água

a. Concreto

Em alguns casos, necessita-se proteger a instalação contra meios que não água, para que elas não se danifiquem. Por exemplo, para medições de esforços no interior de estruturas reforçadas por concreto, os extensômetros elétricos são montados antes do concreto ser jogado nele. A instalação e os fios terminais devem ser protegidos contra danos mecânicos durante a colocação do concreto e posterior mau funcionamento, dada a impossibilidade de substituição de componentes danificados. Por exemplo, na instalação de extensômetros elétricos numa barra de ferragem o procedimento adotado, é esse:

- Limpa-se a área de acordo com o procedimento já indicado.

- Aplica-se o extensômetro elétrico e espera-se a cura da cola (no caso, de Bakelite).
- Amarra-se firmemente os fios terminais na barra.
- Solda-se os fios terminais dos extensômetros elétricos.
- Deve-se dar várias voltas no fio terminal de modo que um esforço aplicado neles não seja transmitido ao extensômetro elétrico.
- Proteger as vizinhanças da instalação dos extensômetros elétricos com cera protetora e, a seguir, enrolar ali uma fita de borracha.

Para se compensar o efeito da pressão do concreto no interior da estrutura pode-se usar um extensômetro para compensação, colado em local adjacente.

b. Óleo de máquina

O óleo de máquina, em geral não é condutor de corrente elétrica. Para se ter proteção contra longos períodos de exposição a óleo, mesmo aquecido, recomenda-se o uso de extensômetros elétricos de Bakelite e, após a finalização do processo de colagem, se recobrir a instalação com uma camada de cola de Bakelite, pulverizada, que é altamente resistente ao óleo.

B.7.5. Efeito de Pressão Hidrostática

Basicamente, os efeitos da pressão hidrostática podem ser dois: um deles ocorre quando, devido ao aumento da pressão, o extensômetro elétrico se amolda às eventuais irregularidades da superfície à qual ele está colado, dando assim uma falsa medida da deformação local. O outro efeito resulta da confinção de esforços sobre o filamento, tais como a pressão, a resistência da cola, a resistência do material no qual o filamento é montado, e a resistência da camada de proteção. Experiências realizadas com extensômetros elétricos de Bakelite na Universidade de Illinois mostraram que o efeito da pressão até 175 kg/cm^2 é da ordem de $(2 \text{ a } 5) \times 10^{-6} \text{ m/m}$ para cada 70 kg/cm . Isso quer dizer que o efeito da pressão é desprezível neste ti

po de extensômetro elétrico.

Recomenda-se usar extensômetros elétricos ativos para compensação de temperatura se a estrutura a ser instrumentada estiver sob pressão hidrostática. Se o extensômetro elétrico de compensação for inativo, estará colado a um bloco sujeito a um campo de deformações diferentes da quele existente na estrutura, o que poderá causar erros consideráveis.