



Este exemplar corresponde à redação  
final da tese defendida pelo Eng  
Sergio Espel de Oliveira e aprovada pela  
Comissão Julgadora em 18 de Dezembro de  
1984.

TRANSDUTOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO

18/12/84

Augusto Ruy de Oliveira Pinto  
o Orientador.

/ 1984

AUTOR: Sergio Espel de Oliveira

Orientador: Augusto Ruy de Oliveira Pinto

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Augusto Ruy de Oliveira Pinto, orientador desta tese, pela ajuda, incentivo e apoio irrestrito, sem o qual este trabalho jamais seria realizado.

Ao técnico em usinagem José Luiz Ribeiro pelo interesse e eficiente colaboração.

À OFICINA MECÂNICA W.O. & D. E. O. Ltda. pelos serviços prestados durante a construção do protótipo.

À PANAMBRA S.A. pela doação dos extensômetros elétricos resistivos usados no desenvolvimento deste estudo.

À EMBRAER - Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A. por toda a assistência que me foi dispensada em várias etapas deste trabalho e pela rigorosa aferição dos padrões adotados no levantamento experimental.

Ao grupo técnico da INTERFACE - Instrumentação Científica e Industrial Ltda. pelo decisivo apoio, colocando à minha disposição a sua experiência e seus equipamentos.

À Gabi Gama, à Cleide de Fátima Pinto e ao colega Isidro da Silva Vieira Lima pela colaboração na preparação final deste texto.

E, por último, a minha gratidão a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Sergio Espel de Oliveira

*Dedico aos  
meus pais.*

## RESUMO

Apesar do grande uso dos transdutores de pressão diferencial na moderna engenharia, pouco se conhece no Brasil sobre sua concepção construtiva e suas características estáticas de desempenho. Procurando contribuir para o preenchimento desta lacuna, este trabalho apresenta e discute uma solução original para um transdutor resistivo de pressão diferencial.

A solução proposta emprega dois diafragmas planos independentes como elementos sensíveis e uma conveniente ligação de extensômetros elétricos resistivos como elemento de transdução. Expondo em detalhes a dedução teórica das equações e otimizando os parâmetros envolvidos, este estudo poderá servir de roteiro para o projeto e fabricação de transdutores similares.

No sentido de melhorar as características estáticas de desempenho, este trabalho desenvolve um circuito elétrico acessório que permite o ajuste e a compensação de parâmetros da função transferência do transdutor de pressão diferencial.

Com base em exaustivos ensaios de um transdutor que foi construído conforme o desenvolvimento teórico, é possível avaliar o seu desempenho e a influência do circuito acessório de ajuste.

## ABSTRACT

The differential pressure transducers are applied to many fields in modern engineering, although its design and static performance characteristics are unknown in Brazil, as yet. This work shows and develops an original design configuration for resistive differential pressure transducer, therefore this study should contribute to the national technology development.

The design configuration employs two independent flat diaphragms working as the sensing element and a special strain gage linkage as the transduction element. A complete systematic study concerning to this transducer is presented, where the several theoretical expressions necessary to the understanding have been deduced. This work also gives all information related to the design and construction of this device.

It is shown that the static performance characteristics can be improved if an accessory adjustment electrical circuit is used to calibrate the transfer function parameters.

The performance of the prototype was obtained after extensive experimental tests and with those measurements we were able to evaluate the importance of the adjustment circuit.

## NOTAÇÃO

- $A$  - Área da seção transversal do condutor elétrico.
- $A$  - Ponto do circuito elétrico adotado.
- $A_f$  - Área final da seção transversal do condutor elétrico.
- $A_i$  - Ponto (i) da superfície do diafragma definida por:  $(z = -t/2)$ .
- $B$  - Resistência elétrica ligada em paralelo ao extensômetro.
- $B$  - Ponto do circuito elétrico adotado.
- $B_i$  - Ponto (i) da superfície do diafragma definida por:  $(z = +t/2)$ .
- $C$  - Ponto do circuito elétrico adotado.
- $C_i$  - Ponto (i) do plano de análise do diafragma.
- $C_i$  - Constante (i) de integração usada.
- $c$  - Diâmetro da seção transversal circular do condutor.
- $D$  - Ponto do circuito elétrico adotado.
- DP - Diferença de Pressão entre dois pontos. Pressão diferencial.
- DV - Desvio de um sinal elétrico de saída em relação à média aritmética das leituras, para o mesmo valor da grandeza.
- $du_a$  - Variação de potencial elétrico entre os pontos (C) e (D) provocada pela mudança das resistências elétricas. Sinal elétrico de saída do transdutor de pressão diferencial com circuito interno de ajuste.
- $du_0$  - Variação de potencial elétrico entre os pontos (C) e (D) provocada pela mudança das resistências elétricas. Sinal elétrico de saída do transdutor de pressão diferencial.
- $E$  - Módulo de elasticidade do material do diafragma.
- $E$  - Ponto do circuito elétrico adotado.

- e - Diferença entre as constantes globais relativas aos diafragmas 1 e 2.
- $F$  - Ponto do circuito elétrico adotado.
- FE - Fundo de Escala.
- $F_{cy}$  - Tensão limite de escoamento a compressão.
- $F_{su}$  - Tensão limite de resistência ao cisalhamento.
- $F_{tu}$  - Tensão limite de resistência a tração.
- $F_{ty}$  - Tensão limite de escoamento a tração.
- $G$  - Ponto do circuito elétrico adotado.
- $G$  - Resistência elétrica de ajuste.
- $G_i$  - Valor (i) da grandeza física medida.
- $H$  - Ponto do circuito elétrico adotado.
- HI - Histerese.
- $H_{ijt}$  - Constante elástica global na direção tangencial, associada ao ex tensômetro elétrico (ij).
- $H_r$  - Constante elástica global na direção radial.
- $H_t$  - Constante elástica global na direção tangencial.
- $I$  - Corrente elétrica em um condutor ou circuito.
- $I_G$  - Corrente elétrica no galvanômetro.
- $I_i$  - Corrente elétrica no braço (i) da ponte de Wheatstone.
- i - Número inteiro. Como Índice define parte de um grupo.
- J - Ponto de análise no diafragma.
- j - Número inteiro. Como Índice define parte de um grupo.
- k - Fator do extensômetro.
- L - Comprimento do condutor elétrico.
- M - Resistência elétrica de ajuste.
- $M_r$  - Momento no plano radial, por unidade de comprimento.
- $M_t$  - Momento no plano tangencial, por unidade de comprimento.

- N - Resistência elétrica de ajuste.
- O - Ponto central do diafragma.
- P - Pressão Relativa.
- P - Ponto do circuito elétrico adotado.
- P<sub>a</sub> - Pressão Absoluta.
- P<sub>1</sub> - Pressão Relativa atuando sobre o diafragma 1.
- P<sub>2</sub> - Pressão Relativa atuando sobre o diafragma 2.
- Q - Esforço cortante, por unidade de comprimento.
- Q<sub>e</sub> - Carga eletrostática gerada ou armazenada.
- R - Resistência elétrica do extensômetro.
- RE - Repetibilidade.
- R<sub>e<sub>ij</sub></sub> - Resistência elétrica equivalente associada ao extensômetro (ij).
- R<sub>G</sub> - Resistência elétrica do galvanômetro.
- $\bar{R}_i$  - Resistência elétrica do braço (i) da ponte de Wheatstone.
- R<sub>i</sub> - Resistência elétrica do resistor (i).
- R<sub>ij</sub> - Resistência elétrica do extensômetro (ij).
- R<sub>p</sub> - Resistência elétrica equivalente da ponte.
- r - Coordenada cilíndrica do ponto analisado.
- r<sub>d</sub> - Raio externo do diafragma.
- S - Resistência elétrica de ajuste.
- s - Sensibilidade de um transdutor.
- T - Resistência total do potenciômetro.
- t - Espessura do diafragma.
- U - Potencial elétrico aplicado ao transdutor e constante no tempo.
- u - Diferença de potencial elétrico medido entre dois pontos e tomado como sinal de saída.
- u<sub>G</sub> - Diferença de potencial indicada no galvanômetro.

- $V$  - Potencial elétrico aplicado ao transdutor e alternante no tempo.
- $v$  - Diferença de potencial elétrico medido entre dois pontos e toma do como saída do transdutor.
- $W_t$  - Constante global associada aos diafragmas 1 e 2, após ajuste.
- $W_{1t}$  - Constante global na direção tangencial e associada ao diafragma 1.
- $W_{2t}$  - Constante global na direção tangencial e associada ao diafragma 2.
- $w$  - Deslocamento na direção (Z).
- $z$  - Coordenada na direção (Z) medida a partir do plano médio do diafragma.
- $\alpha$  - Ângulo de rotação da normal à superfície média do diafragma.
- $\beta$  - Variável que define a posição do cursor do potenciômetro.
- $\epsilon$  - Deformação específica do material do condutor.
- $\epsilon_{ij}$  - Deformação específica imposta ao extensômetro (ij).
- $\epsilon_r$  - Deformação específica na direção radial do diafragma.
- $\epsilon_t$  - Deformação específica na direção tangencial do diafragma.
- $\eta_{ij}$  - Constante global de ajuste associada ao extensômetro (ij).
- $\mu_i$  - Razão entre a resistência (R) e a equivalente do braço (i) da ponte de Wheatstone.
- $\nu$  - Número de Poisson.
- $\rho$  - Resistividade elétrica do material do condutor.
- $\sigma$  - Tensão normal a seção considerada.
- $\sigma_r$  - Tensão na direção radial do diafragma.
- $\sigma_t$  - Tensão na direção tangencial do diafragma.
- $\tau$  - Tensão de cisalhamento da seção considerada.
- $\phi$  - Coordenada cilíndrica do ponto analisado.

## INDICE

Pág.

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 1 - <u>INTRODUÇÃO</u> .....                               | 1  |
| 2 - <u>CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE TRANSDUTORES</u> .....  | 4  |
| 2.1 - Sistema Básico de Medida .....                      | 4  |
| 2.2 - Definição Básica de Transdutor .....                | 6  |
| 2.3 - Função de Transferência do Transdutor .....         | 7  |
| 2.4 - Tipos de Transdutores .....                         | 7  |
| 2.4.1 - Descrição de um Transdutor .....                  | 7  |
| 2.4.2 - Elementos de Transdução .....                     | 8  |
| 2.5 - Características Elétricas de um Transdutor .....    | 13 |
| 2.6 - Características Estáticas de Desempenho .....       | 13 |
| 2.6.1 - Condições Ambientais .....                        | 14 |
| 2.6.2 - Calibração .....                                  | 14 |
| 2.6.3 - Fundo de Escala (FE) .....                        | 15 |
| 2.6.4 - Padrão de Referência .....                        | 15 |
| 2.6.5 - Erro .....                                        | 15 |
| 2.6.6 - Histerese (HI) .....                              | 15 |
| 2.6.7 - Repetibilidade (RE) .....                         | 16 |
| 2.6.8 - Não-Linearidade (NL) .....                        | 17 |
| 2.6.9 - Sensibilidade (s) .....                           | 20 |
| 2.6.10 - Mobilidade .....                                 | 20 |
| 2.6.11 - Desvio Máximo (DV) .....                         | 21 |
| 3 - <u>TRANSDUTORES DE PRESSÃO</u> .....                  | 22 |
| 3.1 - Definição da Grandeza Medida .....                  | 22 |
| 3.2 - Elemento Sensível dos Transdutores de Pressão ..... | 22 |
| 3.3 - Tipos de Transdutores de Pressão .....              | 24 |
| 3.4 - Desempenho Exigido numa Aplicação Industrial .....  | 25 |
| 4 - <u>ESTUDO DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS</u> .....         | 26 |
| 4.1 - Elemento de Transdução Resistivo .....              | 26 |
| 4.1.1 - Fator de Extensômetro .....                       | 27 |

|                                                                                           | <u>Pág.</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 4.2 - Elemento Sensível .....                                                             | 31          |
| 4.2.1 - Comportamento Elástico do Diafragma Plano .....                                   | 31          |
| 4.3 - Solução Construtiva Adotada .....                                                   | 50          |
| 4.3.1 - Função Transferência .....                                                        | 53          |
| 4.3.1.3 - Circuito Elétrico de Ajuste das Constantes ( $W_{1t}$ )<br>e ( $W_{2t}$ ) ..... | 61          |
| 5 - <u>OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS</u> .....                                    | 68          |
| 5.1 - Deformação Específica Radial ou Tangencial .....                                    | 68          |
| 5.2 - Definição Geométrica do Diafragma .....                                             | 69          |
| 6 - <u>PROJETO DE UM TRANSDUTOR DIFERENCIAL DE PRESSÃO</u> .....                          | 73          |
| 6.1 - Faixa de Aplicação do Transdutor Protótipo .....                                    | 73          |
| 6.2 - Detalhes Construtivos do Transdutor Protótipo .....                                 | 73          |
| 6.3 - Material do Diafragma .....                                                         | 77          |
| 6.4 - Espessura do Diafragma .....                                                        | 77          |
| 6.5 - Dimensionamento do Raio Externo do Diafragma .....                                  | 77          |
| 7 - <u>ESTIMATIVA DO DESEMPENHO PARA O TRANSDUTOR PROTÓTIPO</u> .....                     | 80          |
| 7.1 - Construção do Transdutor Protótipo .....                                            | 80          |
| 7.2 - Parâmetros Alcançados no Transdutor Protótipo .....                                 | 80          |
| 7.3 - Desempenho com Circuito de Ajuste Desconectado .....                                | 83          |
| 7.4 - Desempenho com Circuito de Ajuste Conectado .....                                   | 84          |
| 8 - <u>ENSAIO DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL</u> .....                              | 85          |
| 8.1 - Banco de Ensaio .....                                                               | 85          |
| 8.2 - Etapas do Ensaio do Transdutor de Pressão Diferencial .....                         | 87          |
| 9 - <u>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</u> .....                                                 | 88          |
| 9.1 - Circuito Interno de Ajuste Conectado .....                                          | 88          |
| 9.2 - Circuito Interno de Ajuste Desconectado .....                                       | 88          |
| 9.3 - Características Estáticas de Desempenho do Protótipo .....                          | 88          |
| 10 - <u>CONCLUSÕES</u> .....                                                              | 121         |
| <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u> .....                                                   | 124         |

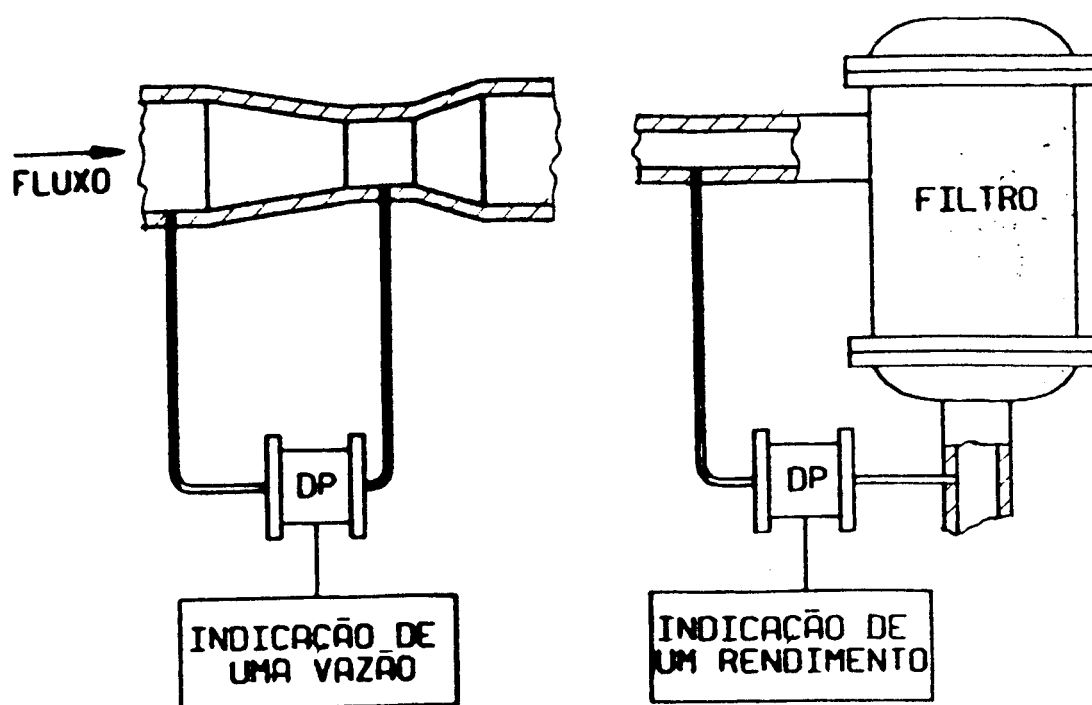


Figura 1.0.1 - Duas Aplicações Industriais dos Transdutores de Pressão Diferencial.

A maior parte dos transdutores empregados no Brasil é de procedência estrangeira. Para repor o material danificado, dependemos quase que exclusivamente da sua importação. Pouco se fez para o desenvolvimento dos transdutores resistivos de pressão diferencial, embora já se conheça nos meios industriais e acadêmicos brasileiros a fabricação e o desempenho dos transdutores resistivos de pressão relativa.

A tecnologia necessária ao projeto e construção dos transdutores de pressão diferencial é mais ampla e complexa. Somam-se aos problemas normalmente encontrados na conversão da pressão em sinal elétrico problemas mais específicos, relacionados com o ajuste e a diferenciação destes sinais.

Este trabalho pretende apresentar e discutir estes problemas, desenvolvendo um transdutor resistivo de pressão diferencial capaz de atender aos requisitos mínimos exigidos nas aplicações industriais de alta responsabilidade.

A solução construtiva é original e utiliza dois diafragmas planos independentes como elementos sensíveis. O elemento de transdução é formado por extensômetros elétricos resistivos (*strain gages*) ligados de forma conveniente. A dedução detalhada das equações teóricas e a otimização dos parâmetros envolvidos no problema podem ajudar e servir de roteiro para o projeto e a construção de transdutores similares.

Para minimizar o erro introduzido pela natural diferença de comportamento do elemento sensível à pressão 1 e do elemento sensível à pressão 2 e assim melhorar as características estáticas do desempenho do transdutor, este trabalho desenvolve um circuito elétrico acessório que permite o ajuste e a compensação de parâmetros da função transferência do transdutor de pressão diferencial.

A fim de garantir a exata compreensão do assunto apresentado, este estudo parte de um contexto amplo, onde define e classifica os transdutores. Segue apresentando soluções construtivas baseadas na utilização dos extensômetros elétricos resistivos como elemento de transdução, desenvolve o equacionamento fundamental da solução adotada e finaliza com o projeto e construção de um transdutor protótipo.

O transdutor construído conforme desenvolvimento teórico foi submetido a exaustivos ensaios, e os resultados experimentais foram confrontados com os valores teóricos para avaliar o desempenho e o equacionamento do transdutor resistivo de pressão diferencial proposto. Os valores obtidos são aqui apresentados e poderão servir de referência e orientação aos interessados no assunto.

Diante da complexa tecnologia envolvida, o trabalho agora apresentado pretende ser apenas uma contribuição inicial ao estudo dos transdutores de pressão diferencial e um pequeno passo no sentido de sua nacionalização.

## 2 - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE TRANSDUTORES

O uso dos transdutores em diversos segmentos da moderna engenharia vem se tornando cada vez mais comum. Apesar disto, a maioria dos conceitos básicos envolvidos ainda não estão bem compreendidos e as similados. Agravando ainda mais este quadro, lembramos que por muitos anos a linguagem ligada aos transdutores foi tão confusa e imprecisa que somente alguns poucos técnicos e pesquisadores tinham uma clara visão da grande variedade de tipos e aplicações existentes. Sérios esforços estão sendo desenvolvidos na busca de uma terminologia unificada e simples para os muitos tipos de características gerais dos transdutores. Em 1960, a *INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA* instituiu um grupo de trabalho para es tudar a normalização dos transdutores no campo aeroespacial. A norma bã sica que primeiro surgiu regulamentava a terminologia relativa ao assunto e foi inicialmente designada RP 37.1, mais tarde substituída pela nor ma S 37.1.

Tomando por base esse trabalho, desenvolvido pela *I.S.A.*, apresentaremos agora a definição dos conceitos e termos técnicos no sen tido de facilitar o entendimento e garantir a exata interpretação dos resultados. [REF. 18 ]

Recentemente foi constituída uma comissão da *ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS* para estudar a normalização na área dos transdutores de força. O *TEXTO BASE* que está sendo desenvolvido pela *ABNT* ajudou a definir a terminologia deste trabalho. [REF. 26 ]

### 2.1 - SISTEMA BÁSICO DE MEDIDA

O mais elementar sistema eletrônico de medida de uma gran deza física pode ser esquematicamente subdividido em quatro partes: fon te de energia, transdutor, condicionador de sinal e mostrador. A divi são pode ser melhor visualizada na figura 2.0.1.

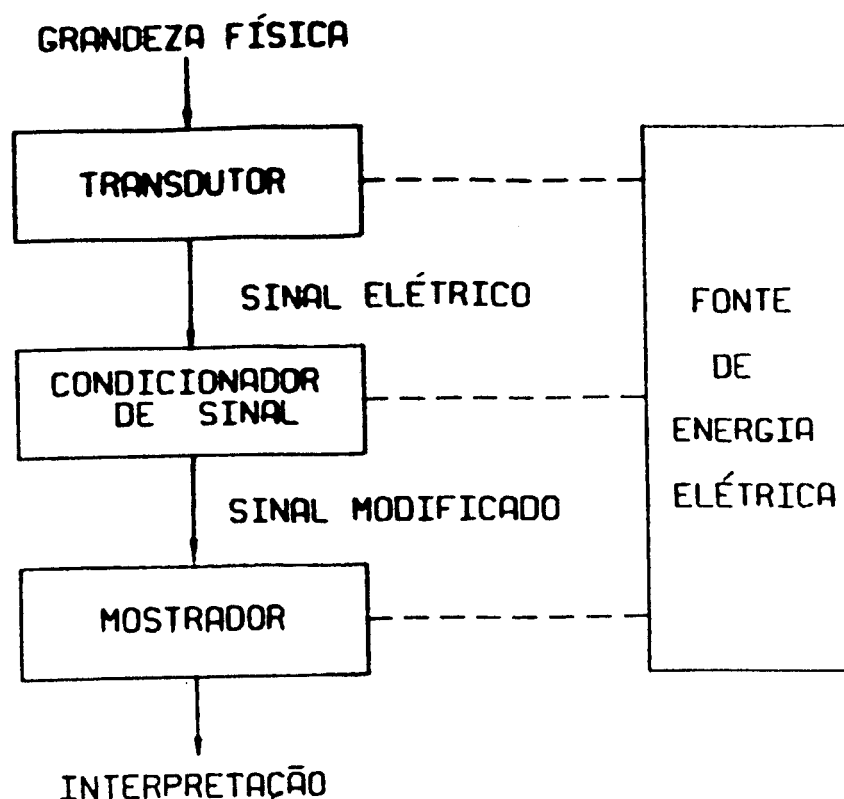


Figura 2.0.1 - Sistema Básico de Medida.

O transdutor converte a grandeza física em sinal elétrico de saída.

O condicionador de sinal transforma a saída do transdutor em um sinal adequado ao mostrador.

O mostrador indica uma informação passível de interpretação. O deslocamento de um ponteiro, a impressão de um valor ou a plotagem de um ponto gráfico são as formas mais comuns de indicação.

A fonte de energia fornece a alimentação elétrica, se necessária.

Em alguns sistemas, o condicionador de sinal vem montado junto com o mostrador em um único módulo. Em outros, pode estar montado no corpo do transdutor, variando em forma e complexidade desde um sim-

ples resistor a completos circuitos de amplificação, desmodulação e conversão analógico-digital. Uma análise criteriosa permitirá identificar todas as partes mencionadas em qualquer sistema eletrônico de medida.

O *TRANSDUTOR*, quase sempre específico para cada grandeza e condição de medida, é sem dúvida alguma a parte mais característica de cada sistema eletrônico de medida. [ REF. 18 ]

## 2.2 - DEFINIÇÃO BÁSICA DE TRANSDUTOR

Em termos gerais, o transdutor pode ser definido como um dispositivo capaz de transferir energia entre dois ou mais sistemas.

Este conceito geral, quando aplicado a um campo de trabalho, faz relacionar a palavra *TRANSDUTOR* a um particular grupo de instrumentos. Assim sendo, na eletroacústica a palavra *TRANSDUTOR* faz referência a um alto falante ou qualquer irradiador de som capaz de transformar energia elétrica em energia sonora.

Na medição e controle, a palavra *TRANSDUTOR* define um dispositivo capaz de fornecer uma única resposta a um determinado valor da grandeza medida ou controlada. [ REF. 18 ]

Outros termos têm sido usados incorretamente no lugar da palavra *TRANSDUTOR*. O único que merece consideração como alternativa aceitável é a palavra *SENSOR*. [ REF. 25 ]

Desta forma, o nome de transmissor de pressão diferencial só se aplica aos instrumentos que efetivamente transmitem pressão. Aos instrumentos que convertem diferença de pressão em sinal elétrico de saída devemos usar a palavra *TRANSDUTOR*. [ REF. 09 ]

## 2.3 - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO TRANSDUTOR

A conversão da grandeza medida em uma resposta útil é em geral um fenômeno que envolve um grande número de parâmetros físicos. A função de transferência de um transdutor é a expressão teórica baseada nestes parâmetros, capaz de relacionar a cada valor da grandeza física uma única resposta do transdutor. No caso de um transdutor de temperatura, é a expressão que a cada particular valor de temperatura determina o correspondente sinal elétrico de saída. [REF. 12]

A função transferência permite discutir a influência de cada um dos parâmetros, dimensionar o transdutor e, ainda, prever o seu desempenho para cada aplicação específica.

## 2.4 - TIPOS DE TRANSDUTORES

Cada transdutor é concebido para responder a uma determinada grandeza física em condições específicas.

O interesse em medir as várias grandezas físicas existentes nas diversas condições fez surgirem ao longo do tempo inúmeros tipos de transdutores.

Somente como orientação apresentaremos agora uma sistemática de classificação e descrição dos diversos tipos de transdutores. [REF. 18]

2.4.1 - DESCRIÇÃO DE UM TRANSDUTOR. O tipo do transdutor é definido por um conjunto de informações fundamentais que o caracterizam. Para uma correta descrição preliminar que permita uma classificação imediata, apresentaremos agora as informações consideradas fundamentais ao transdutor.

2.4.1.1 - GRANDEZA FÍSICA. No campo da medição e controle, é a quantidade, propriedade, intensidade ou condição que se pretende medir. Exemplo: força, velocidade, pressão, temperatura, ruído, deslocamento etc.

2.4.1.2 - PRINCÍPIO DE TRANSDUÇÃO. Pode ser definido como sendo o fenômeno físico responsável pela conversão da grandeza em resposta útil. Exemplo: princípio piezoelétrico, capacitivo, eletromagnético, indutivo, fotocondutor, resistivo, fotovoltaico etc.

2.4.1.3 - ELEMENTO DE TRANSDUÇÃO. É a parte do transdutor que dá origem ao sinal elétrico. Exemplo: capacitor variável, potenciômetro, extensômetro resistivo, solenóide etc.

2.4.1.4 - ELEMENTO SENSÍVEL. É a parte do transdutor que responde diretamente ao valor da grandeza física. Exemplo: barra de torção, tubo de Bourdon, diafragma, contato deslizante etc. Os cristais fotossensíveis ou termossensíveis são, ao mesmo tempo, elementos de transdução e elementos sensíveis do transdutor.

2.4.1.5 - ACESSÓRIOS ESPECIAIS. São partes capazes de modificar o sinal elétrico de resposta. Exemplo: desmodulador, amplificador etc.

2.4.1.6 - FAIXA DE APLICAÇÃO. É o intervalo definido entre o maior e o menor valor da grandeza a ser medida, com suas respectivas unidades.

A descrição de um transdutor com base nas características apresentadas permite uma visualização do seu funcionamento e de suas possíveis aplicações.

Para facilitar a identificação e a classificação, é recomendável que o nome do transdutor em desenhos, arquivos e catálogos já contenha parte das informações fundamentais. O nome "transdutor resistivo de pressão absoluta 0,5 até 2,0 kgf/cm<sup>2</sup>" já define em linhas gerais o tipo de transdutor.

2.4.2 - ELEMENTOS DE TRANSDUÇÃO. A conversão da grandeza física em sinal elétrico de saída só é compreendida com a análise do elemento de transdução usado. Por esta razão, faremos uma breve descrição dos elementos de transdução mais comuns. [REF. 18 ]

2.4.2.1 - TRANSDUÇÃO CAPACITIVA. Um capacitor é essencialmente formado por duas placas condutoras separadas por um meio isolante. A capacitância é uma propriedade associada à quantidade de elétrons armazenada nas placas quando o capacitor é submetido a uma diferença de potencial elétrico ( $U$ ). Ao se modificar a posição relativa dos condutores, pela ação de um elemento sensível qualquer, ou trocar a propriedade dielétrica do meio isolante, a capacitância se altera, fazendo surgir uma corrente ( $I$ ) entre as placas. O capacitor como elemento de transdução pode ser melhor entendido através da figura 2.0.2. [REF. 24]

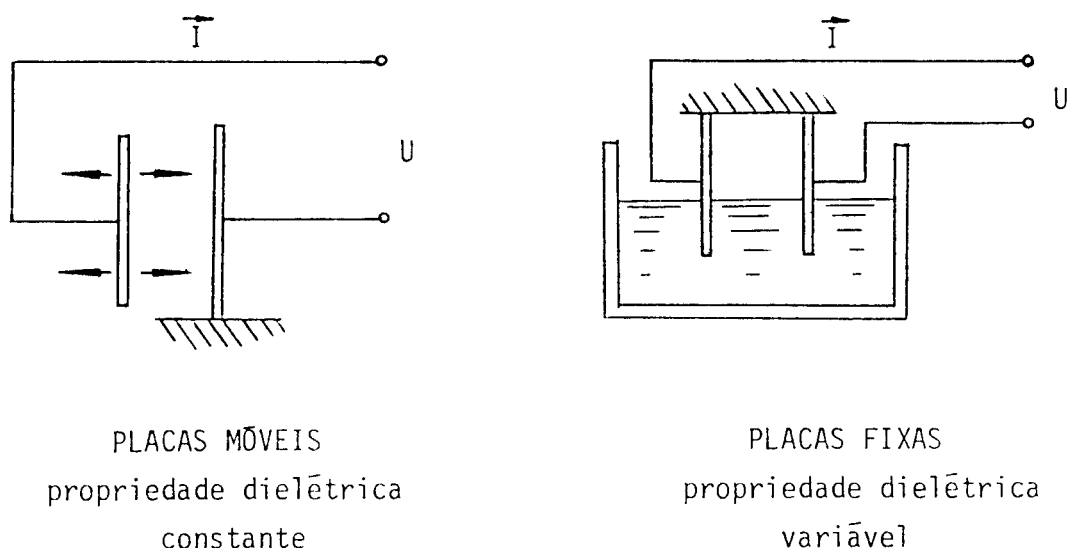


Figura 2.0.2 - Transdução Capacitiva.

2.4.2.2 - TRANSDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA. Em torno de um corpo imantado atua um campo magnético permanente. Ao se movimentar este ímã nas proximidades de um condutor, a indução eletromagnética faz surgir uma diferença de potencial elétrico ( $u$ ) entre os terminais do condutor. A figura 2.0.3 mostra o elemento de transdução formado pelo condutor e o corpo imantado. Para este caso não é necessário alimentar externamente o transdutor com energia elétrica.

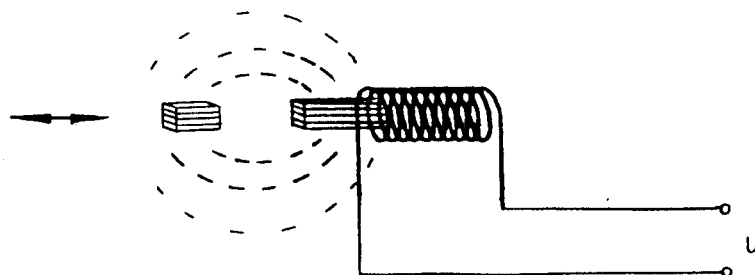


Figura 2.0.3 - Transdução Eletromagnética.

2.4.2.3 - TRANSDUÇÃO INDUTIVA. Quando um fio condutor envolve um corpo ferromagnético, a corrente elétrica ( $I$ ) passa a sofrer influência do efeito de auto-indução associado à propriedade de indutância do conjunto. A figura 2.0.4 mostra que, ao se mudar a posição do corpo ferromagnético, a conseqüente variação da indutância provoca uma alteração na corrente ( $I$ ). Quando o corpo ferromagnético está ligado a um elemento sensível qualquer, o deslocamento obtido pode ser convertido em sinal elétrico.

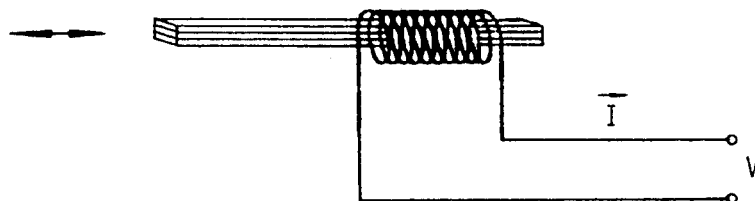


Figura 2.0.4 - Transdução Indutiva.

2.4.2.4 - TRANSDUÇÃO FOTOCONDUTIVA. Certos materiais semicondutores têm sua resistividade elétrica alterada com a variação da quantidade de luz incidente. Este efeito faz mudar o valor da resistência elétrica do componente, provocando uma variação da corrente ( $I$ ), conforme figura 2.0.5.

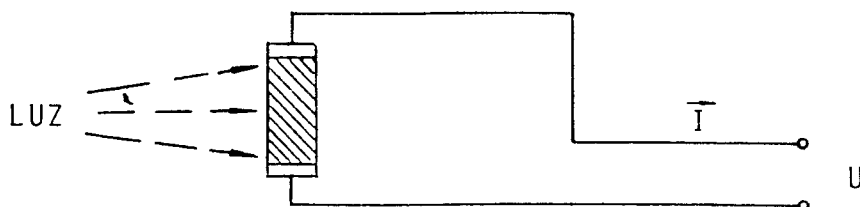


Figura 2.0.5 - Transdução Fotocondutiva.

2.4.2.5 - TRANSDUÇÃO PIEZOELÉTRICA. Certos cristais, quando submetidos a esforços mecânicos, geram uma carga eletrostática ( $Q_e$ ) ou uma diferença de potencial ( $u$ ). O esforço é aplicado por um elemento sensível qualquer no sentido de comprimir, tracionar ou flexionar o cristal, conforme mostra a figura 2.0.6.

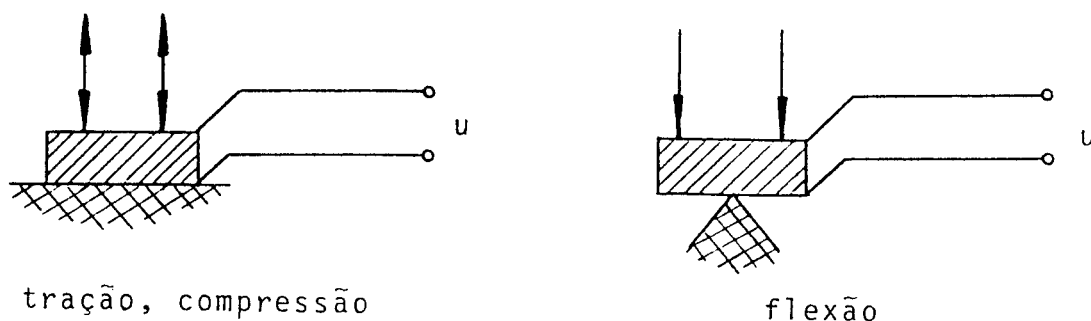


Figura 2.0.6 - Transdução Piezoelétrica.

2.4.2.6 - TRANSDUÇÃO POTENCIOMÉTRICA. Um potenciômetro é basicamente formado por um contato capaz de deslizar sobre um resistor. A figura 2.0.6 mostra como é possível obter uma diferença de potencial ( $u$ ) relacionada com a posição do contato deslizante. Conectando um elemento sensível qualquer, poderemos converter em sinal elétrico o deslocamento obtido. [REF. 24 ]

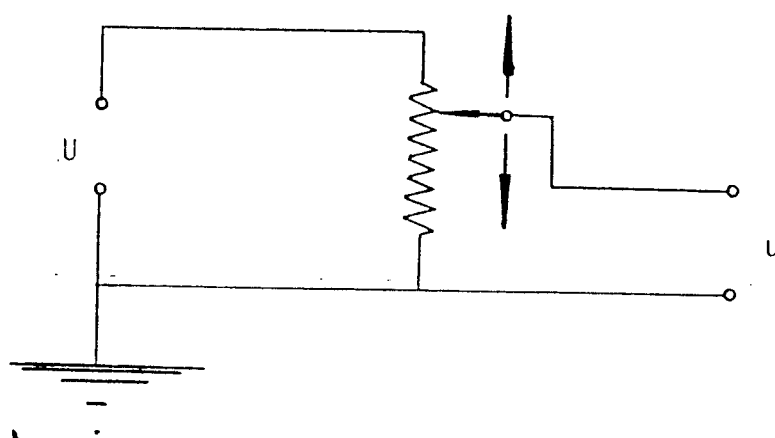


Figura 2.0.6 - Transdução Potenciométrica.

2.4.2.7 - TRANSDUÇÃO POR RELUTÂNCIA. Sempre que uma bobina é submetida a uma diferença de potencial alternada ( $V$ ) surge em torno dela um campo magnético variável. Em qualquer outra bobina vizinha aparecerá, por efeito de indução magnética, uma diferença de potencial alternada ( $v$ ). O valor ( $v$ ) depende da relutância do meio compreendido entre as bobinas. Lembrando que a relutância quantifica a resistência magnética do meio, basta movimentar um corpo ferromagnético na região indicada pela figura 2.0.7 para obter, para cada posição deste corpo, os correspondentes valores ( $v$ ). [REF. 24 ]

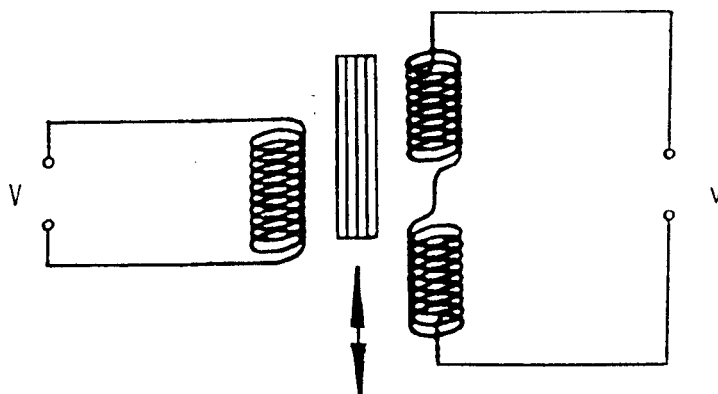


Figura 2.0.7 - Transdução por Relutância.

2.4.2.8 - TRANSDUÇÃO RESISTIVA. Quando um condutor ou semicondutor tem sua resistência elétrica ( $R$ ) modificada por efeito do calor ou esforço mecânico, a corrente ( $I$ ) se altera, dando origem aos elementos de transdução resistivos apresentados na figura 2.0.8. Destacamos aqui a grande utilização dos extensômetros elétricos resistivos (*strain gages*) como elementos de transdução. Constituídos basicamente por um fio metálico delgado montado sobre uma base isolante, os extensômetros elétricos resistivos podem ser colados diretamente sobre a superfície do elemento sensível, variando sua resistência elétrica com a deformação mecânica local.

A conveniente ligação dos extensômetros em ponte de Whetstone fornece uma diferença de potencial ( $u$ ) variando ( $\bar{R}_i$ ).

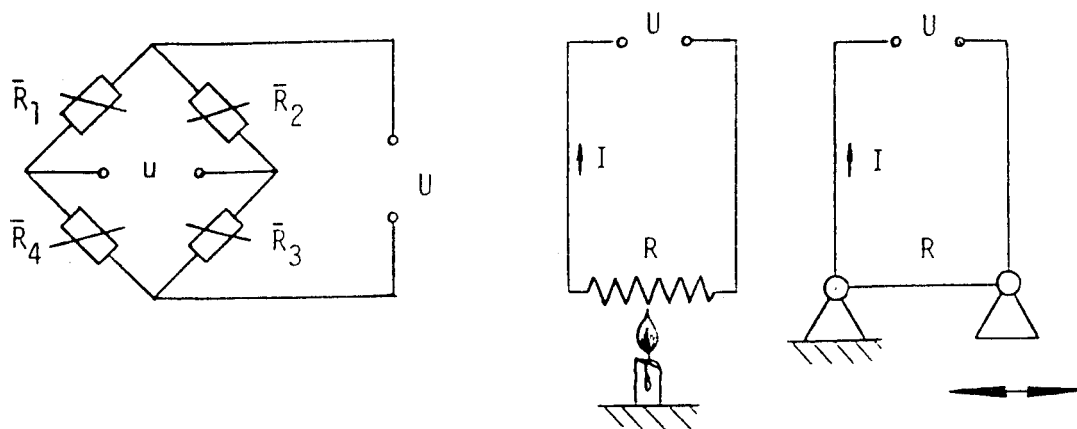


Figura 2.0.8 - Transdução Resistiva.

## 2.5 - CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE UM TRANSDUTOR

2.5.1 - EXCITAÇÃO. A maioria dos transdutores exigem uma fonte externa de alimentação elétrica. A energia necessária é fornecida excitando o transdutor com uma diferença de potencial alternada (V) ou contínua (U). Esta tensão de excitação é também conhecida por *TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO*. Somente os transdutores autogeradores de sinal, como os piezoelétricos e eletromagnéticos, não necessitam de fonte externa de alimentação. [REF. 26]

2.5.2 - SAÍDA. A diferença de potencial ou corrente elétrica fornecida em função da grandeza medida é o sinal elétrico de saída, ou simplesmente saída do transdutor (*output*). Esta saída é, em geral, uma função contínua dos valores da grandeza medida, e por isso chamada de saída analógica.

2.5.3 - PONTOS FINAIS. O maior e o menor valor de saída encontrados em uma determinada faixa de aplicação de um transdutor são os chamados pontos finais. São em geral obtidos com base na média aritmética de leituras sucessivas, e devem ser indicados juntamente com suas respectivas unidades e tolerâncias. Como exemplo:  $(0,00 \pm 0,01)$  e  $(0,80 \pm 0,01) V_{cc}$ .

## 2.6 - CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DE DESEMPENHO

Apresentaremos agora as principais definições e conceitos relacionados com as características estáticas de desempenho de um transdutor.

2.6.1 - CONDIÇÕES AMBIENTAIS. São as condições de pressão, temperatura e umidade do meio em torno do transdutor. [REF. 18] [REF. 26]

2.6.1.1 - CONDIÇÕES PADRÃO DE TESTE. Condições ambientais nas quais as medições devem ser efetuadas:

Temperatura:  $25 \pm 10^{\circ}\text{C}$ ,

Umidade Relativa: 90% ou menos,

Pressão Barométrica: (710 até 810) mm Hg.

2.6.2 - CALIBRAÇÃO. Consiste na determinação experimental do sinal elétrico de saída para um determinado número de valores da grandeza medida. Partindo do menor valor na faixa de aplicação do transdutor, devemos iniciar o *CARREGAMENTO* aplicando valores sucessivamente maiores e registrando a cada valor aplicado o respectivo sinal elétrico. Ao atingirmos o valor máximo, devemos iniciar o *DESCARREGAMENTO*, aplicando valores sucessivamente menores até retornar ao menor valor da faixa de aplicação do transdutor. Este procedimento define um ciclo de calibração, ou ciclo de ensaio. O registro gráfico com base nos valores obtidos é chamado de *CURVA DE CALIBRAÇÃO*. A figura 2.0.9 apresenta uma curva de calibração típica para um transdutor com faixa de aplicação compreendida entre ( $G_1$ ) e ( $G_7$ ).

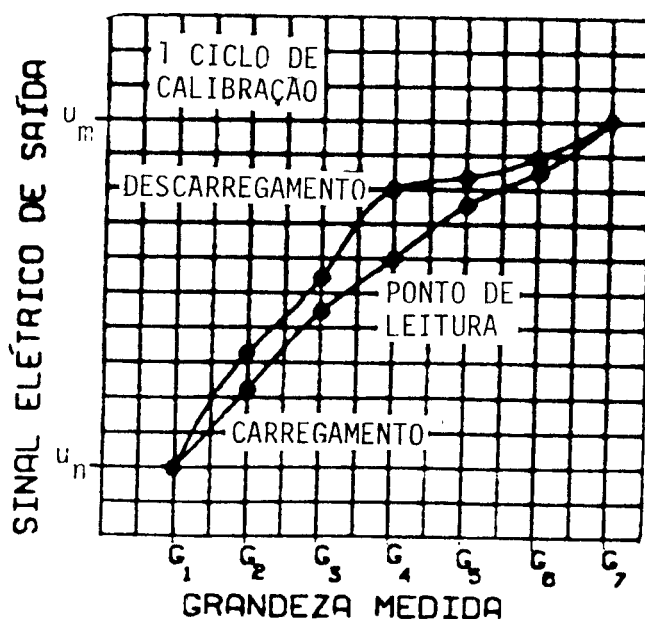


Figura 2.0.9 - Curva de Calibração Típica.

2.6.3 - FUNDO DE ESCALA (FE). É a diferença algébrica entre as médias aritméticas dos pontos finais obtidos na calibração de transdutor. Para a curva apresentada na figura 2.0.9, temos:

$$FE = u_m - u_n \quad \text{Equação 2.0.1}$$

No estudo dos transdutores de pressão diferencial consideraremos o valor do fundo de escala em módulo.

2.6.4 - PADRÃO DE REFERÊNCIA. É um dispositivo ou instrumento de medição capaz de fornecer valores da grandeza física medida que, dentro das precisões pretendidas para a calibração do transdutor, podem ser considerados isentos de erro.

2.6.5 - ERRO. Diferença algébrica entre o valor da grandeza indicado pelo transdutor e o valor fornecido pelo padrão de referência considerado.

2.6.6 - HISTERESE (HI). Diferença algébrica entre o sinal de saída obtido no carregamento e o obtido no descarregamento para um mesmo valor da grandeza medida. O maior valor de histerese encontrado entre todos os ciclos de calibração efetuados é a histerese do transdutor. Na figura 2.0.10, ( $G_H$ ) é o particular valor considerado no cálculo de histerese. O valor (HI) pode ser expresso como uma porcentagem do fundo de escala.

$$HI = \frac{u_d - u_c}{FE} \cdot 100 \quad (\text{em \% FE}) \quad \text{Equação 2.0.2}$$

No estudo dos transdutores de pressão diferencial consideraremos o valor da histerese em módulo.

Uma verificação numérica deste cálculo pode ser feita com base nos resultados apresentados nas tabelas incluídas na parte 9.0 deste trabalho.

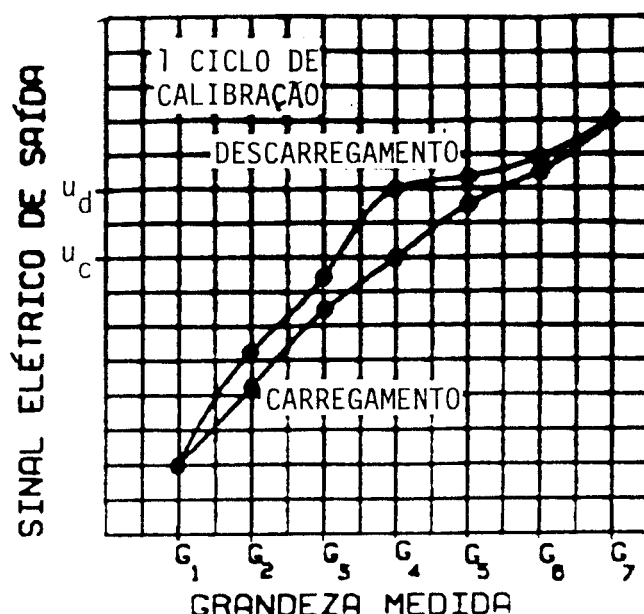


Figura 2.0.10 - Histerese para o valor ( $G_4$ ) da grandeza.

2.6.7 - REPETIBILIDADE (RE). Diferença entre o sinal de saída obtido em um ciclo de calibração e o sinal de saída obtido em outro ciclo de calibração para um mesmo valor da grandeza medida.

Os sinais de saída obtidos no carregamento não devem ser usados no cálculo juntamente com os do descarregamento. O maior valor em contradição é a repetibilidade do transdutor. Na figura 2.0.11, ( $G_4$ ) é o particular valor considerado no cálculo da repetibilidade. O valor (RE) pode ser expresso como uma porcentagem do fundo de escala.

$$RE = \frac{u_p - u_s}{FE} \cdot 100 \quad (\text{em \% FE}) \quad \text{Equação 2.0.3}$$

No estudo dos transdutores de pressão diferencial consideraremos o valor da repetibilidade em módulo.

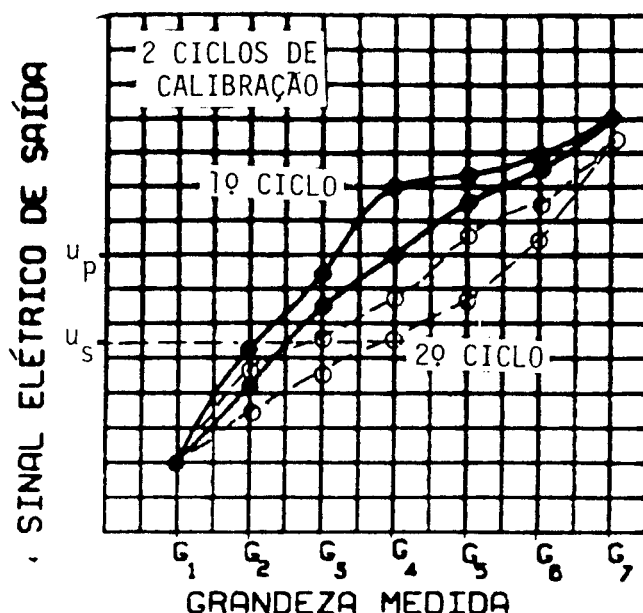


Figura 2.0.11 - Repetibilidade para o valor ( $G_4$ ).

2.6.8 - NÃO-LINEARIDADE (NL). Em geral o transdutor é projetado para fornecer uma relação linear entre a grandeza medida e o sinal elétrico de saída. Na prática esta linearidade nunca é obtida, e os valores lidos apresentam um ligeiro desvio em relação ao valor teórico esperado. A NÃO-LINEARIDADE para um determinado valor da grandeza medida é a diferença algébrica entre o sinal de saída encontrado e o valor teórico calculado com base em uma RETA DE REFERÊNCIA adotada. O valor de (NL) pode ser expresso como uma porcentagem do fundo de escala.

$$NL = \frac{u - u_r}{FE} \cdot 100 \quad (\text{em \% FE}) \quad \text{Equação 2.0.4}$$

Ao afirmar que uma curva de calibração apresentou uma não-linearidade de 1,5% do fundo de escala, nada podemos concluir sobre o desempenho do transdutor, pois é necessário esclarecer sob qual critério a RETA DE REFERÊNCIA foi definida. Assim sendo, apresentaremos agora os critérios mais importantes.

2.6.8.1 - CRITÉRIO DOS PONTOS TEÓRICOS (*terminal linearity*). A reta de referência é obtida unindo os pontos finais teóricos calculados com base na função de transferência do transdutor. A figura 2.0.12 apresenta a não-linearidade definida por este critério para o valor ( $G_4$ ) da grandeza medida.

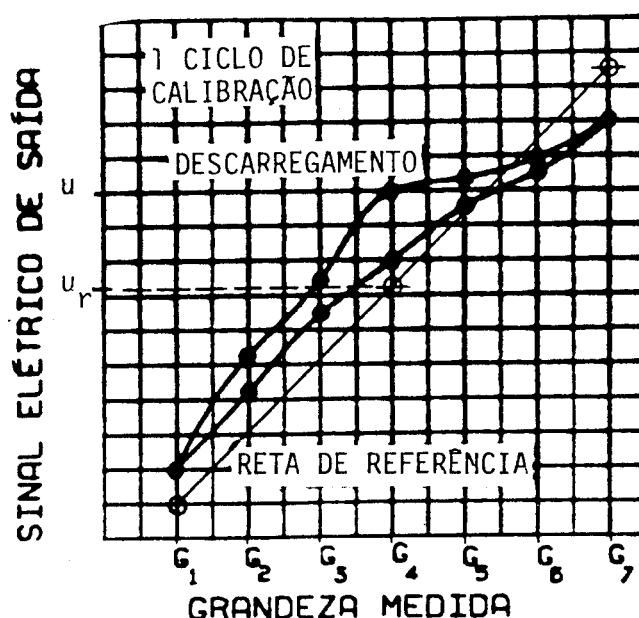


Figura 2.0.12 - Não-Linearidade para o valor ( $G_4$ ).  
Critérios dos Pontos Teóricos.

2.6.8.2 - CRITÉRIO DOS PONTOS FINAIS (*end-point linearity*). A reta de referência é obtida unindo os pontos finais lidos no ciclo de calibração analisado, ou pela média aritmética dos pontos finais lidos em ciclos consecutivos. A figura 2.0.13 apresenta a não-linearidade definida por este critério para o valor ( $G_4$ ) da grandeza medida.

2.6.8.3 - CRITÉRIO DA RETA INDEPENDENTE (*independent linearity*). É tomada como referência a linha reta média traçada entre duas outras retas paralelas, posicionadas de forma a conter todos os pontos obtidos na calibração. A figura 2.0.14 apresenta a não-linearidade definida por este critério para o valor ( $G_4$ ) da grandeza medida.

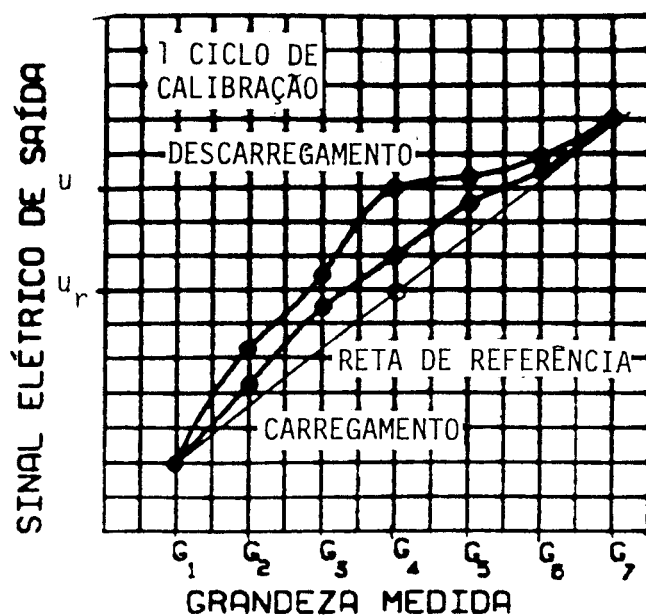


Figura 2.0.13 - Não-Linearidade para o valor ( $G_4$ ).  
Critérios dos Pontos Finais.

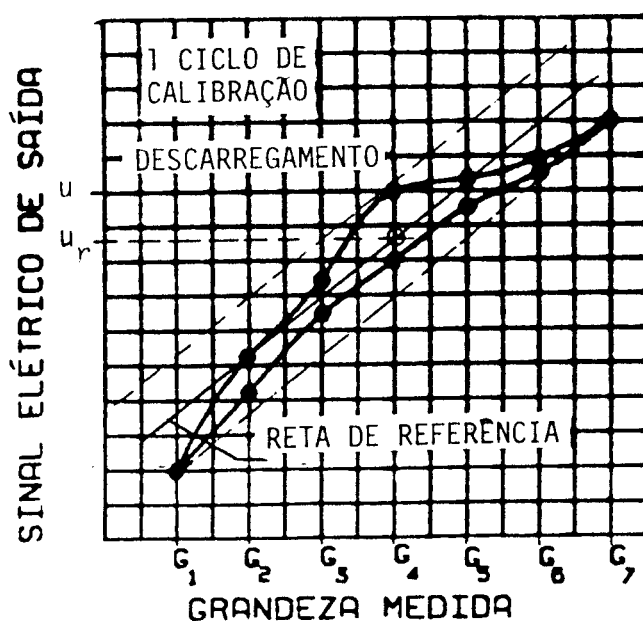


Figura 2.0.14 - Não-Linearidade para o valor ( $G_4$ ).  
Critério da Reta Independente.

2.6.8.4 - CRITÉRIO DOS MÍNIMOS QUADRADOS (*least-squares linearity*). A reta de referência é obtida através de uma regressão utilizando o método dos mínimos quadrados. A figura 2.0.15 apresenta a não-linearidade definida por este critério para o valor ( $G_4$ ) da grandeza medida.

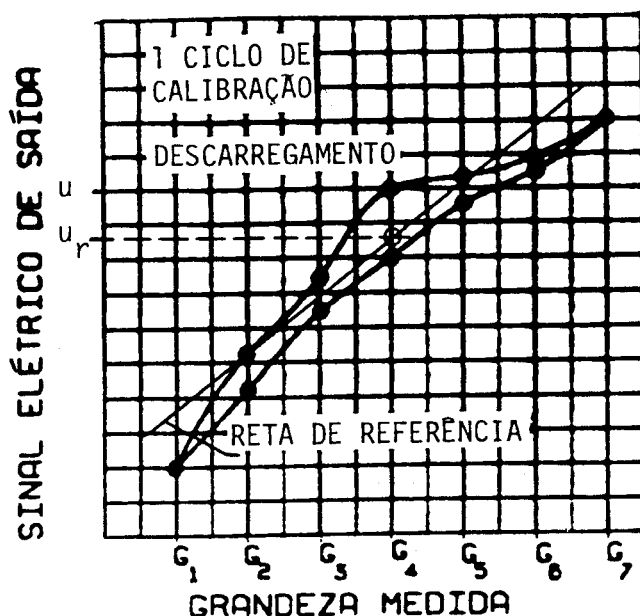


Figura 2.0.15 - Não-Linearidade para o valor ( $G_4$ )  
Critério dos Mínimos Quadrados

2.6.9 - SENSIBILIDADE ( $s$ ). O valor da sensibilidade de um transdutor resistivo é dado pelo quociente entre o sinal de saída, em milivolts, obtido no fundo de escala e a diferença de potencial, em volts, aplicada na sua alimentação. De maneira geral, a sensibilidade pode ser expressa como a relação entre a variação do sinal de saída e a equivalente variação da grandeza medida.

2.6.10 - MOBILIDADE. O erro de mobilidade é dado pela menor variação da grandeza a ser medida, capaz de produzir uma variação no sinal elétrico de saída, possível de ser indicada pelo mostrador.

Na verdade, este erro não depende apenas do transdutor, mas do sistema básico de medida usado.

2.6.11 - DESVIO MÁXIMO (DV). É a maior diferença encontrada entre um sinal de saída e a média aritmética de todos os sinais elétricos obtidos para o mesmo valor da grandeza medida. O valor do desvio máximo pode ser expresso como uma porcentagem do fundo de escala.

### 3 - TRANSDUTORES DE PRESSÃO

Um transdutor é projetado para responder a uma determinada grandeza física, em condições específicas.

Por esta razão, os transdutores capazes de fornecer um sinal de saída em função de uma mesma grandeza física apresentam caracte-rísticas semelhantes, principalmente na concepção do elemento sensível. Mostraremos agora alguns aspectos comuns aos transdutores de pressão, bem como a definição básica de seus tipos. [REF. 18 ] [REF. 12 ]

#### 3.1 - DEFINIÇÃO DA GRANDEZA MEDIDA

Pressão é força agindo sobre uma superfície. O valor da pressão atuante em um ponto é dado pelo quociente da força por unidade de área. [REF. 18 ]

3.1.1 - PRESSÃO ABSOLUTA ( $P_a$ ). É a força por unidade de área medida a partir do valor zero de pressão.

3.1.2 - PRESSÃO RELATIVA (P). É a força por unidade de área medida a par-tir do valor da pressão atmosférica ambiente.

3.1.3 - PRESSÃO DIFERENCIAL (DP). É a diferença entre os valores de pres-são em dois pontos distintos. O valor da pressão em um dos pontos é to-mado como *PRESSÃO DE REFERÊNCIA*. A partir dele a pressão diferencial as-sume valores positivos, negativos ou nulos.

#### 3.2 - ELEMENTO SENSÍVEL DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO

O elemento sensível é basicamente formado por um corpo elástico sujeito, de um lado, a uma *PRESSÃO DE REFERÊNCIA*, e de outro a uma pressão que se pretende *MEDIR*. Ao se variar um dos valores de pres-são, as forças resultantes se alteram e o corpo elástico se deforma, bus-cando uma nova posição de equilíbrio. As deformações e os movimentos as-sim obtidos podem agir sobre um dos muitos elementos de transdução exis-tentes.

Na figura 3.0.1 este conceito é aplicado a corpos elásticos de diversas formas, dando origem aos elementos sensíveis mais comumente usados.

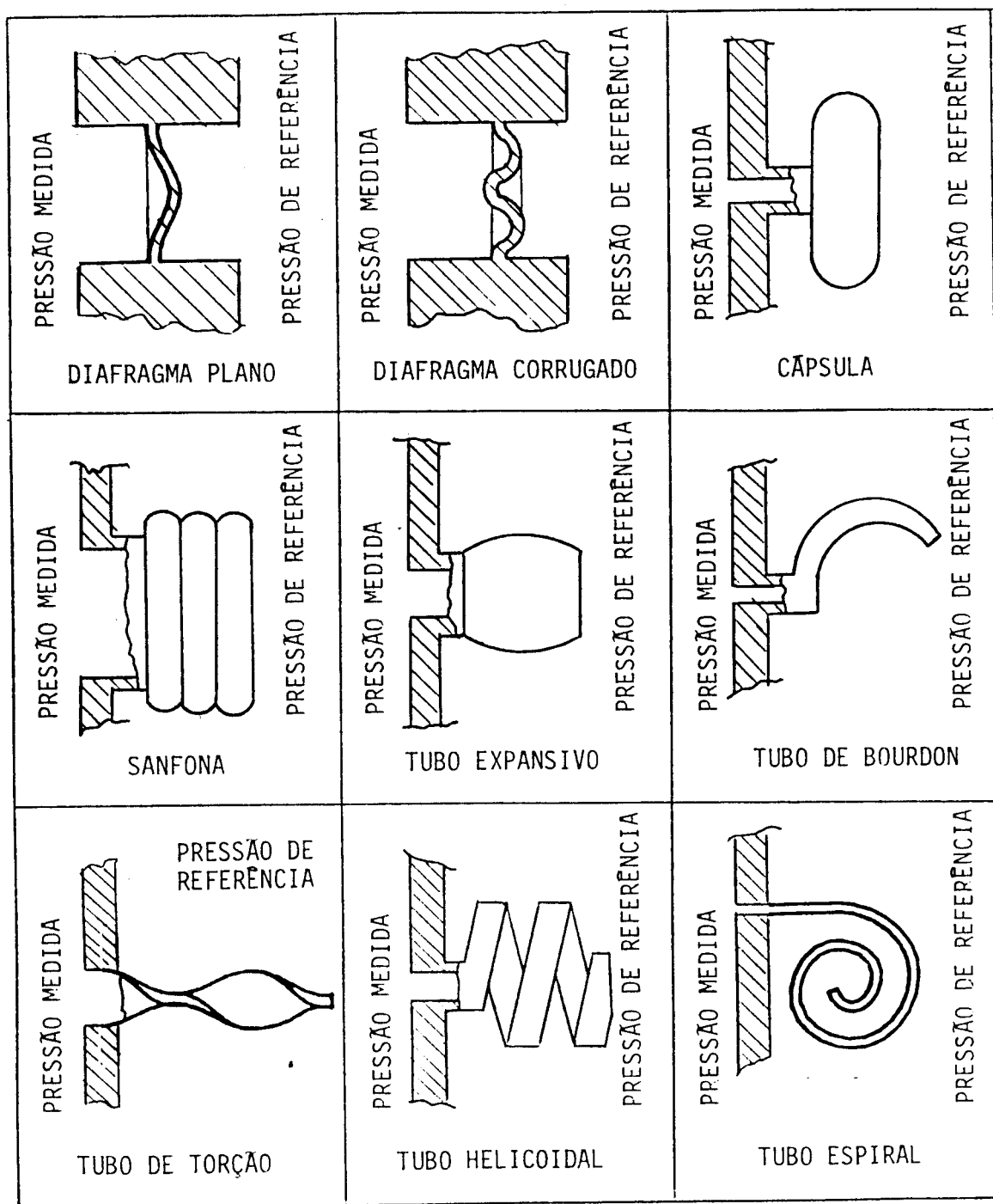


Figura 3.0.1 - Elementos Sensíveis à Pressão.

Somente os diafragmas e tubos expansivos admitem uma análise completa pela teoria da elasticidade dos materiais, enquanto as demais formas sô podem ser desenvolvidas e dimensionadas com auxílio de tabelas e fórmulas empíricas. [REF. 12]

### 3.3 - TIPOS DE TRANSDUTORES DE PRESSÃO

A figura 3.0.2 apresenta, de maneira esquemática, os tipos de transdutores de pressão definidos pelo valor da *PRESSÃO DE REFERÊNCIA* adotado em cada uma das configurações. [REF. 18]

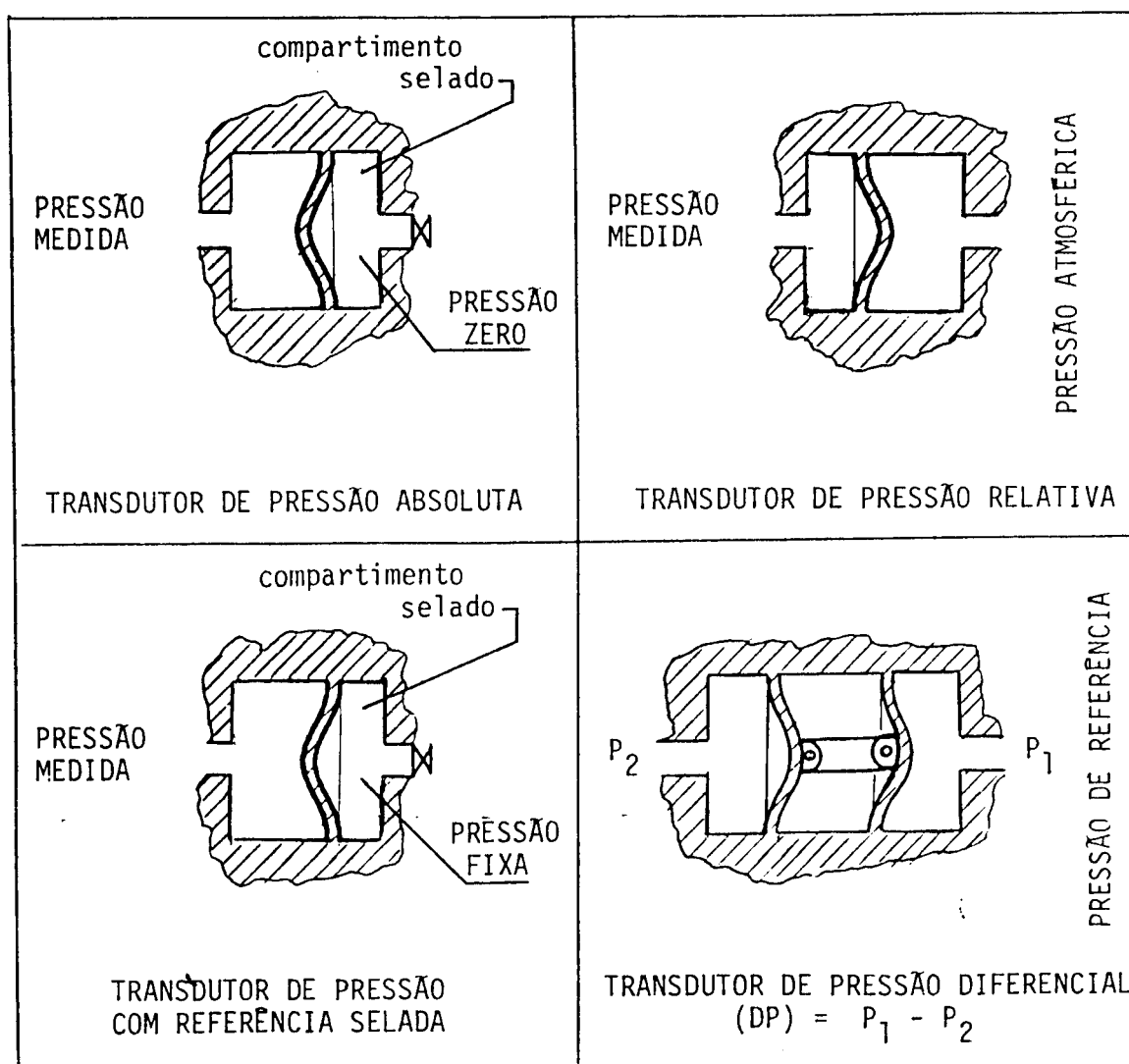


Figura 3.0.2 - Tipos de Transdutores de Pressão

Na verdade todos os transdutores de pressão fornecem um sinal elétrico de saída em função da diferença entre uma pressão de referência e uma pressão a ser medida, porém, somente aqueles capazes de fornecer uma saída em função da diferença entre dois valores *ARBITRADOS* de pressão podem ser classificados como *TRANSDUTORES DE PRESSÃO DIFERENCIAL*.

Nestes casos, é necessário manter o elemento de transdução fora de contato com o meio submetido à pressão, evitando o natural ataque de agentes ativos. Por esta razão os transdutores de pressão diferencial usam em geral dois elementos sensíveis distintos, criando um compartimento *ISOLADO* que garante integridade do elementos de transdução adotado.

### 3.4 - DESEMPENHO EXIGIDO NUMA APLICAÇÃO INDUSTRIAL

É difícil definir as características estáticas de desempenho normalmente exigidas nas aplicações industriais dos transdutores diferenciais de pressão. Para cada uma das possíveis aplicações um estudo deve ser realizado no sentido de determinar o máximo erro admissível do transdutor a ser usado. De maneira geral, podemos afirmar que uma não-linearidade máxima em torno de 1% do fundo de escala em relação a uma reta de referência definida pelo critério dos pontos finais e um desvio máximo em torno de 1,0% do fundo de escala em relação à média aritmética das saídas obtidas para um mesmo valor da grandeza medida são suficientes para atender às aplicações industriais mais exigentes. [REF. 21]

#### 4 - ESTUDO DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS

A pesquisa de uma solução construtiva para um transdutor é, sem dúvida alguma, a parte mais importante do seu desenvolvimento. É nesta fase que se analisa o comportamento do elemento sensível e se define a função de transferência do transdutor. Tendo sempre como objetivo final estudar os transdutores de pressão diferencial através do desenvolvimento de um transdutor resistivo de pressão diferencial, várias soluções construtivas foram estudadas, e durante esta fase surgiu a idéia de se utilizar como elemento sensível dois diafragmas independentes e como elemento de transdução uma conveniente ligação entre extensômetros elétricos resistivos (*strain gages*).

Esta solução construtiva, depois de analisada, mostrou-se mais viável e satisfatória do que as outras formas estudadas. Partindo de uma análise geral dos extensômetros elétricos resistivos como elemento de transdução e do diafragma plano como elemento sensível, apresentamos nesta parte do trabalho um estudo completo da solução construtiva adotada para o transdutor de pressão diferencial. [REF. 11] [REF. 18]

##### 4.1 - ELEMENTO DE TRANSDUÇÃO RESISTIVO

O grande uso dos extensômetros elétricos resistivos (*strain gages*) na concepção de transdutores de pressão é justificado pelas seguintes considerações:

4.1.0.1 - A relação entre a deformação específica aplicada ao extensômetro e a variação da resistência elétrica obtida é linear e pouco sensível ao tempo e a pequenas variações de temperatura.

4.1.0.2 - A vida útil é longa mesmo em medidas dinâmicas.

4.1.0.3 - É grande a variedade de formas e características, permitindo solucionar problemas de espaço e desempenho.

4.1.0.4 - A técnica de aplicação já é bastante estudada e conhecida.

4.1.0.5 - Produzidos em alta escala, podem ser encontrados a custos mais baixos que outros elementos de transdução. [REF. 01]

4.1.1 - FATOR DE EXTENSÔMETRO. Considere um condutor de seção transversal constante, de área (A) e comprimento (L), construído de material homogêneo de resistividade ( $\rho$ ). [REF. 01] Sua resistência elétrica (R) será dada por:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad \text{Equação 4.0.1}$$

Ao submetemos este condutor a uma tração ou compressão notaremos uma mudança no valor da sua resistência elétrica. Esta variação, provocada pelas deformações mecânicas, é dada por:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial R}{\partial L} dL + \frac{\partial R}{\partial A} dA$$

Conforme a equação 4.0.1:

$$\frac{\partial R}{\partial \rho} = \frac{L}{A} \quad \frac{\partial R}{\partial L} = \frac{\rho}{A} \quad \frac{\partial R}{\partial A} = - \frac{L \rho}{A^2}$$

Substituindo:

$$dR = \frac{L}{A} d\rho + \frac{\rho}{A} dL - \frac{L \rho}{A^2} dA$$

Dividindo por (R), temos:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad \text{Equação 4.0.2}$$

Admitindo uma seção circular de diâmetro (c), temos:

$$A = \frac{\pi}{4} c^2$$

$$+ dc = - \nu \frac{dL}{L} c$$

Logo:

$$c + dc = c \left( 1 - v \frac{dL}{L} \right)$$

A seção final ficará:

$$A_f = \frac{\pi}{4} c^2 \left( 1 - v \frac{dL}{L} \right)^2$$

$$A_f = \frac{\pi}{4} c^2 \left[ 1 - 2v \frac{dL}{L} + \left( v \frac{dL}{L} \right)^2 \right]$$

$$\left( v \frac{dL}{L} \right)^2 \approx 0$$

$$A_f = \frac{\pi}{4} c^2 \left( 1 - 2v \frac{dL}{L} \right)$$

$$dA = \frac{\pi}{4} c^2 \left( 1 - 2v \frac{dL}{L} \right) - \frac{\pi}{4} c^2$$

$$\frac{dA}{A} = - 2v \frac{dL}{L}$$

Substituindo na equação 4.0.2:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} + 2v \frac{dL}{L}$$

Dividindo pela deformação específica ( $dL/L$ ):

$$\frac{dR/R}{dL/L} = 1 + 2v + \frac{d\rho/\rho}{dL/L} \quad \text{Equação 4.0.3}$$

Fazendo  $\left( \frac{dR/R}{dL/L} \right) = k$  na expressão 4.0.3, este valor passa a representar a variação de resistência elétrica com a deformação específica.

Ao adimensional obtido na equação 4.0.3 dá-se o nome de *FATOR DO EXTENSÔMETRO* ( $k$ ):

$$k = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{dL/L}$$

$$k = (I) + (II) + (III)$$

Parcela (I): Variação da resistência elétrica devido a mudança no comprimento do condutor.

Parcela (II): Variação da resistência elétrica devido a mudança na seção transversal do condutor.

Parcela (III): Variação da resistência elétrica devido a mudança na resistividade ( $\rho$ ) provocada pela deformação do condutor (efeito piezoresistivo).

Nos extensômetros metálicos a parcela (III) é pequena, e por isso desprezada nos cálculos.

Nos extensômetros semicondutores a parcela (III) é a mais importante na determinação do valor ( $k$ ).

Pela equação 4.0.3:

$$\frac{dR/R}{dL/L} = k \rightarrow dR/R = k(dL/L)$$

Lembrando que ( $dL/L$ ) é a deformação específica ( $\epsilon$ ) aplicada ao condutor:

$$dR = R k \epsilon$$

Equação 4.0.4

Os fabricantes dos extensômetros elétricos resistivos procuram desenvolver ligas metálicas capazes de conferir ao extensômetro altos valores para ( $k$ ) e grande estabilidade às variações de temperatura. Como exemplo podemos citar a liga *CONSTANTAN* (55% Cu e 45% Ni), que confere ao extensômetro produzido valores de ( $k$ ) entre 2.0 e 2.1.

4.1.2 - EXTENSÔMETROS NÃO COLADOS. São formados basicamente por fios condutores ligados a dois corpos rígidos. Ao se movimentar um corpo em relação ao outro, os condutores sofrem deformação elástica e têm sua resistência elétrica alterada, conforme exposto em 4.1.1. A figura 4.0.1 esquematiza este tipo de extensômetro. [REF. 02]

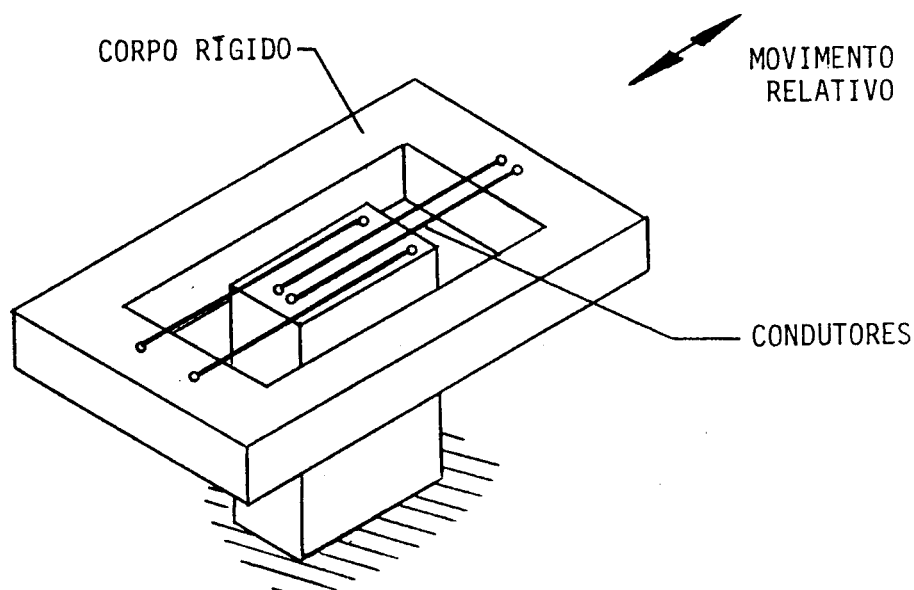


Figura 4.0.1 - Extensômetro Elétrico Resistivo.  
Tipo Não Colado.

4.1.3 - EXTENSÔMETROS COLADOS. O condutor é convenientemente posicionado e fixado sobre uma base flexível, que posteriormente será intimamente colada a um corpo elástico. Desta maneira, as deformações se transferem da superfície do corpo para o condutor, provocando a variação de sua resistência elétrica, conforme exposto em 4.1.1. A Figura 4.0.2 mostra os tipos mais comuns de transdutores colados. [REF. 02]

Os extensômetros com grade de fio são, em geral, maiores no comprimento e portanto adequados para as aplicações em superfícies onde o estado de tensões é relativamente uniforme. Os extensômetros com grade lâmina sofrem menor influência dos esforços transversais e, como são menores, adequados ao estado de tensões não uniforme.

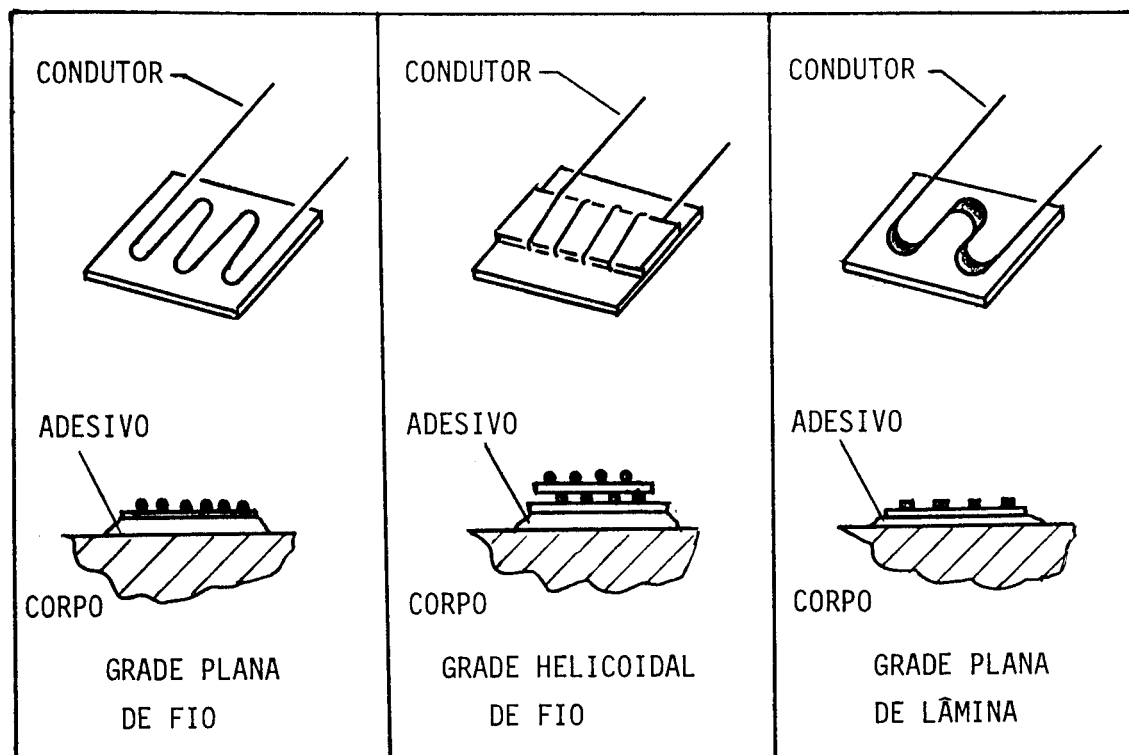


Figura 4.0.2 - Extensômetro Elétrico Resistivo.  
Tipo Colado.

## 4.2 - ELEMENTO SENSÍVEL

Um diafragma metálico do tipo circular plano de espessura constante e engastado na borda sofre deformação elástica quando submetido a determinados valores de pressão. As deformações que surgem na superfície do diafragma e o deslocamento do seu ponto central podem atuar sobre um dos muitos elementos de transdução, dando origem a um elemento sensível de construção simples e passível de análise pela teoria da elasticidade dos materiais. Desenvolveremos aqui as suas equações fundamentais e determinaremos, através deste estudo, o seu comportamento elástico quando submetido a uma pressão uniforme. [REF. 04] [REF. 23] [REF. 19]

4.2.1 - COMPORTAMENTO ELÁSTICO DO DIAFRAGMA PLANO. Visando obter as equações que relacionam a pressão com as deformações do diafragma, as seguintes hipóteses foram consideradas:

4.2.1.0.1 - Os materiais estudados são perfeitamente homogêneos e isótrópicos.

4.2.1.0.2 - O diafragma é perfeitamente plano, engastado na borda e de espessura constante.

4.2.1.0.3 - Os pontos situados sobre uma mesma reta normal à superfície média do diafragma formam, depois da deformação, uma nova reta normal à superfície média deformada.

4.2.1.0.4 - As deformações estão perfeitamente contidas no campo elástico do material.

4.2.1.0.5 - Na dedução das equações só será considerada a teoria da *FLEXÃO EM PLACAS* circulares simetricamente carregadas. Não será levado em conta o efeito de *MEMBRANA* do diafragma.

4.2.1.0.6 - A pressão aplicada está *UNIFORMEMENTE* distribuída sobre toda a superfície do diafragma.

4.2.1.1 - DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES TEÓRICAS. A figura 4.0.3 mostra uma seção transversal do diafragma onde se define a espessura ( $t$ ), o raio externo do diafragma ( $r_d$ ), o raio que define a posição do ponto analisado ( $r$ ), o ângulo de rotação da normal à superfície média ( $\alpha$ ), o deslocamento ( $w$ ) na direção ( $Z$ ) do ponto considerado e a coordenada cilíndrica ( $\phi$ ). [REF. 19] Os valores de ( $w$ ) e ( $\alpha$ ) são funções do raio ( $r$ ), e podem ser relacionados entre si pela equação:

$$\alpha = - \frac{dw}{dr} \quad \text{Equação 4.0.5}$$

A figura 4.0.4 representa uma seção transversal do diafragma antes e depois da flexão causada pela pressão ( $P$ ). O segmento  $\overline{C_1C_2}$  sofrerá uma deformação segundo a equação:

$$z(\alpha + d\alpha) - z\alpha = z d\alpha$$

É importante observar que o valor da coordenada ( $z$ ) define a posição do segmento analisado, e é medido a partir da interseção do eixo ( $Z$ ) com o plano médio do diafragma.

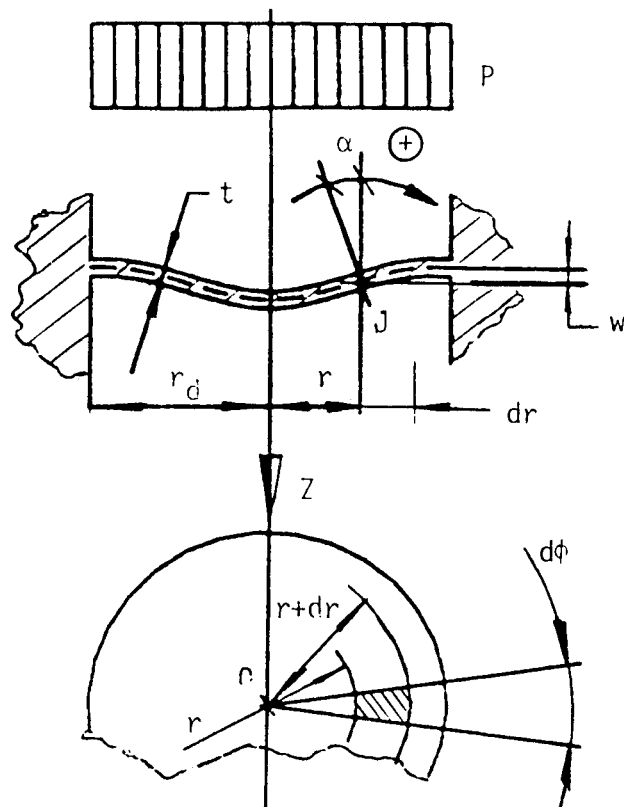


Figura 4.0.3 - Definição do Diafragma Considerado

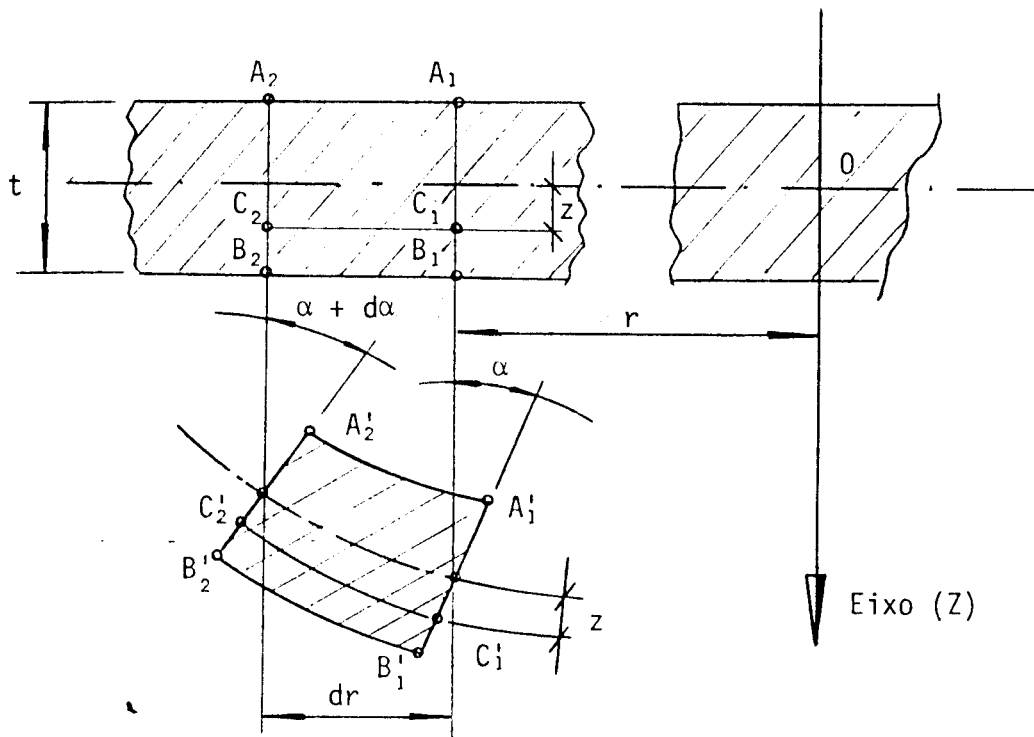


Figura 4.0.4 - Seção Transversal do Diafragma  
Seção Transversal Flexionada

A deformação específica na direção radial será dada por:

$$\epsilon_r = z \frac{d\alpha}{dr} \quad \text{Equação 4.0.6}$$

A deformação específica na direção tangencial será dada pela relação dos comprimentos da circunferência que passa pelo ponto ( $C_1$ ) antes e depois da deformação:

$$\epsilon_t = \frac{(z \alpha + r) 2\pi - r 2\pi}{2 \pi r}$$

$$\epsilon_t = z \frac{\alpha}{r} \quad \text{Equação 4.0.7}$$

Em um plano médio e nos paralelos a ele as deformações se relacionam com as tensões pelas expressões:

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

$$\epsilon_t = \frac{1}{E} (\sigma_t - \nu \sigma_r)$$

Onde:

- ( $\nu$ ) é o número de Poisson do material do diafragma,
- ( $E$ ) é o Módulo de elasticidade do material do diafragma,
- ( $\sigma_r$ ) é a Tensão na direção radial, e
- ( $\sigma_t$ ) é a Tensão na direção circunferencial ou tangencial.

A figura 4.0.5 mostra o estado de tensão no elemento analisado.

As relações entre tensões e deformações são válidas para uma análise no campo elástico, como foi previsto na hipótese simplificada 4.2.1.0.4.

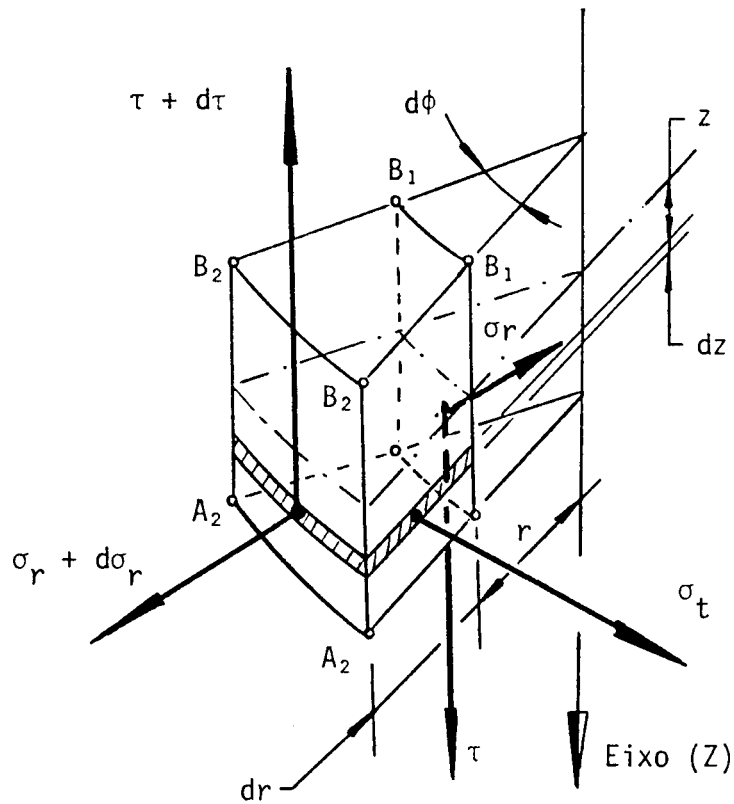


Figura 4.0.5 - Estado de Tensão no Elemento Analisado.

Vamos isolar nas equações  $(\epsilon_r)$  e  $(\epsilon_t)$  os termos  $(\sigma_r)$  e  $(\sigma_t)$ :

$$\epsilon_r E = \sigma_r - \nu \sigma_t$$

$$\epsilon_t E = \sigma_t - \nu \sigma_r$$

$$\sigma_t = \epsilon_t E + \nu \sigma_r$$

Substituindo na equação  $\epsilon_r E = \sigma_r - \nu \sigma_t$ :

$$\epsilon_r E = \sigma_r - \nu(\epsilon_t E + \nu \sigma_r)$$

$$\epsilon_r E + \nu \epsilon_t E = (1 - \nu^2) \sigma_r$$

$$\sigma_r = \frac{E}{(1 - \nu^2)} (\epsilon_r + \nu \epsilon_t)$$

De forma semelhante, obtemos:

$$\sigma_t = \frac{E}{(1 - \nu^2)} (\epsilon_t + \nu \epsilon_r)$$

Substituindo as equações 4.0.5 e 4.0.6, temos:

$$\sigma_r = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \left( z \frac{d\alpha}{dr} + \nu z \frac{\alpha}{r} \right)$$

$$\sigma_r = \frac{E z}{(1 - \nu^2)} \left( \frac{d\alpha}{dr} + \nu \frac{\alpha}{r} \right) \quad \text{Equação 4.0.8}$$

$$\sigma_t = \frac{E z}{(1 - \nu^2)} \left( \frac{\alpha}{r} + \nu \frac{d\alpha}{dr} \right) \quad \text{Equação 4.0.9}$$

Nas faces de um prisma elementar atuam tensões normais ( $\sigma$ ) e tensões de cisalhamento ( $\tau$ ). Da condição de simetria imposta pelo carregamento uniforme conclui-se que as tensões de cisalhamento  $\bar{\sigma}$  podem aparecer em planos perpendiculares a ( $r$ ) e orientadas na direção de ( $z$ ). (Ver figura 4.0.5)

Analisaremos agora o equilíbrio de tal prisma elementar. As tensões tangenciais na face do prisma indicada na figura 4.0.6 pelas letras ( $A_1B_1A_1B_1$ ) darão origem a uma força resultante de intensidade igual a ( $Q r d\phi$ ); na face ( $A_2B_2A_2B_2$ ) essa força será igual a  $[(Q + dQ) \cdot (r + dr) d\phi]$ . [REF. 19]

( $M_r$ ) é o momento por unidade de comprimento agindo na direção radial nas faces do prisma elementar considerado.

( $M_t$ ) é o momento por unidade de comprimento agindo na direção tangencial nas faces do prisma elementar considerado.

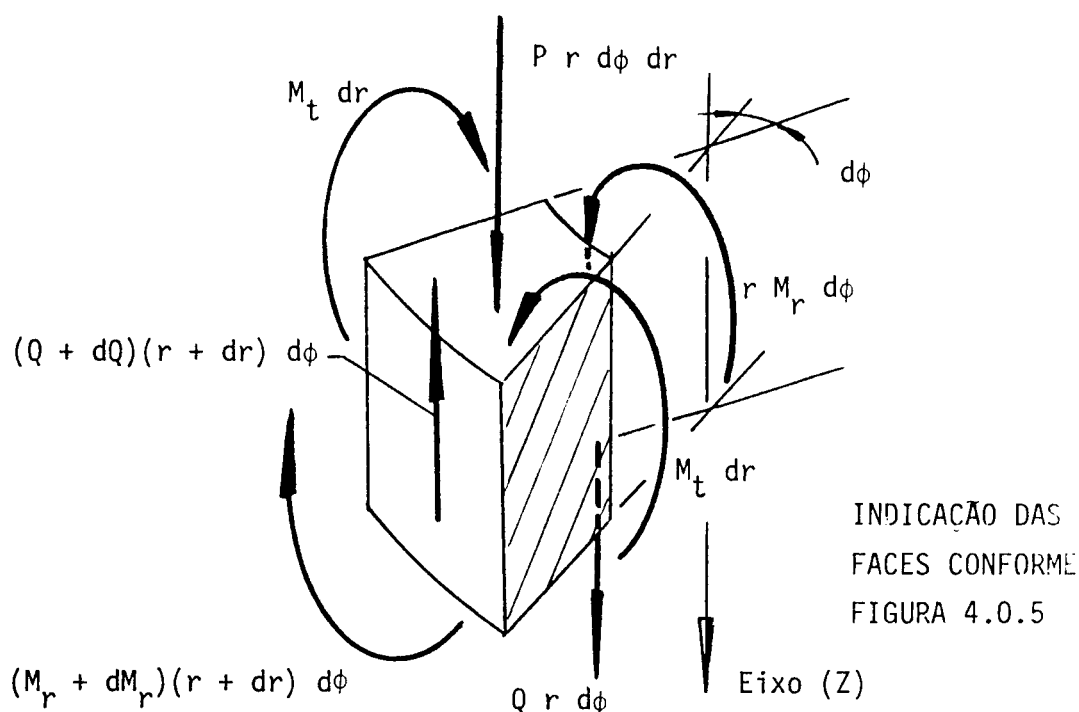


Figura 4.0.6 - Equilíbrio do Prisma Elementar.

$(Q)$  é a força cortante atuante no ponto definido pela coordenada  $(r)$ , também por unidade de comprimento.

O momento  $(M_r)$  é equilibrado pelas tensões que surgem no material do diafragma ao longo de toda a face considerada. Deste equilíbrio, temos:

$$M_r r d\phi = r d\phi \int_{-t/2}^{+t/2} \sigma_r z dz$$

Portanto:

$$M_r = \int_{-t/2}^{+t/2} \sigma_r z dz$$

Substituindo a equação 4.0.8:

$$M_r = \int_{-t/2}^{+t/2} \frac{E z}{1 - \nu^2} \left( \frac{d\alpha}{dr} + \nu \frac{\alpha}{r} \right) z dz$$

$$M_r = \frac{E}{1 - \nu^2} \left( \frac{d\alpha}{dr} + \nu \frac{\alpha}{r} \right) \int_{-t/2}^{+t/2} z^2 dz$$

$$M_r = \frac{E}{1 - \nu^2} \left( \frac{d\alpha}{dr} + \nu \frac{\alpha}{r} \right) \frac{1}{3} z^3 \Big|_{-t/2}^{+t/2}$$

$$M_r = \frac{E}{1 - \nu^2} \left( \frac{d\alpha}{dr} + \nu \frac{\alpha}{r} \right) \left[ \frac{t^3}{24} + \frac{t^3}{24} \right]$$

$$M_r = \frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)} \left( \frac{d\alpha}{dr} + \nu \frac{\alpha}{r} \right)$$

Equação 4.0.10

Da mesma forma, o momento ( $M_t$ ) é equilibrado pelas tensões que surgem no material do diafragma ao longo de toda a face considerada. Deste equilíbrio, temos:

$$M_t dr = dr \int_{-t/2}^{+t/2} \sigma_t z dz$$

Portanto:

$$M_t = \int_{-t/2}^{+t/2} \sigma_t z dz$$

Substituindo a equação 4.0.9:

$$M_t = \int_{-t/2}^{+t/2} \frac{E z}{1 - \nu^2} \left( \frac{\alpha}{r} + \nu \frac{d\alpha}{dr} \right) z dz$$

Integrando de forma análoga à anterior, temos:

$$M_t = \frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)} \left( \frac{\alpha}{r} + \nu \frac{d\alpha}{dr} \right)$$

Equação 4.0.11

Englobando todas as constantes das equações 4.0.11 e 4.0.10 em uma única constante (D), temos:

$$M_r = D \left( \frac{d\alpha}{dr} + \nu \frac{\alpha}{r} \right) \quad \text{Equação 4.0.12}$$

$$M_t = D \left( \frac{\alpha}{r} + \nu \frac{d\alpha}{dr} \right) \quad \text{Equação 4.0.13}$$

$$D = \frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)} \quad \text{Equação 4.0.14}$$

O elemento analisado está sujeito a uma força externa ( $P r d\phi dr$ ), que nada mais é que a resultante das forças de pressão atuantes na superfície elementar do diafragma. Fazendo a somatória de forças igual a zero, temos:

$$(Q + dQ)(r + dr) d\phi - Q r d\phi - P r d\phi dr = 0$$

$$Q r d\phi + r dQ d\phi + Q dr d\phi + dQ dr d\phi - Q r d\phi - P r d\phi dr = 0$$

Abandonando os termos de ordem superior, resulta:

$$r dQ d\phi + Q dr d\phi - P r d\phi dr = 0$$

$$(r dQ + Q dr) d\phi - P r d\phi dr = 0$$

$$d(Q r) d\phi - P r d\phi dr = 0$$

$$[ d(Q r) - P r dr ] \cdot d\phi = 0$$

Pela figura 4.0.3, observamos que  $d\alpha \neq 0$ . Logo:

$$d(Q r) - P r dr = 0$$

Que se reduz a:

$$P r = \frac{d}{dr} (Q r) \quad \text{Equação 4.0.15}$$

Fazendo a somatória de momentos igual a zero, temos:

$$\begin{aligned} (M_r + dM_r)(r + dr) d\phi - M_r r d\phi - P r dr d\phi \frac{dr}{2} - M_t dr d\phi + \\ + (Q + dQ)(r + dr) d\phi dr = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_r r d\phi + r dM_r d\phi + M_r dr d\phi + dr dM_r d\phi - M_r r d\phi - \\ - P r \frac{dr^2}{2} d\phi + Q r dr d\phi + r dr dQ d\phi + \\ + Q dr^2 d\phi + dQ d^2 r d\phi - M_t dr d\phi = 0 \end{aligned}$$

Abandonando os termos de ordem superior, resulta:

$$r dM_r d\phi + M_r dr d\phi + Q r dr d\phi - M_t dr d\phi = 0$$

Colocando  $d\phi$  em evidência, temos:

$$(r dM_r + M_r dr + Q r dr - M_t dr) \cdot d\phi = 0$$

Pela figura 4.0.3, observamos que  $d\phi \neq 0$ . Logo:

$$r dM_r + M_r dr + Q r dr - M_t dr = 0$$

$$M_t dr - (r dM_r + M_r dr) = Q r dr$$

$$M_t dr - d(r M_r) = Q r dr$$

Temos, assim:

$$M_t - \frac{d}{dr} (M_r r) = Q r \quad \text{Equação 4.0.16}$$

Substituindo na equação 4.0.16 as expressões 4.0.12 e 4.0.13, temos:

$$D \left( \frac{\alpha}{r} + \nu \frac{d\alpha}{dr} \right) - \frac{d}{dr} \left[ D \left( \frac{d\alpha}{dr} + \nu \frac{\alpha}{r} \right) r \right] = Q r$$

$$D \left[ \left( \frac{\alpha}{r} + \nu \frac{d\alpha}{dr} \right) - \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\alpha}{dr} + \nu \alpha \right) \right] = Q r$$

$$\frac{\alpha}{r} + \nu \frac{d\alpha}{dr} - \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\alpha}{dr} + \nu \alpha \right) = \frac{Q r}{D}$$

$$\frac{\alpha}{r} + \nu \frac{d\alpha}{dr} - r \frac{d^2\alpha}{dr^2} - \nu \frac{d\alpha}{dr} - \frac{d\alpha}{dr} = \frac{Q r}{D}$$

$$- r \frac{d^2\alpha}{dr^2} - \frac{d\alpha}{dr} + \frac{\alpha}{r} = \frac{Q r}{D}$$

$$r \frac{d^2\alpha}{dr^2} + \frac{d\alpha}{dr} - \frac{\alpha}{r} = - \frac{Q r}{D}$$

$$\frac{1}{r} \left( r \frac{d^2\alpha}{dr^2} + \frac{d\alpha}{dr} - \frac{\alpha}{r} \right) = - \frac{Q}{D}$$

$$\frac{d^2\alpha}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\alpha}{dr} - \frac{\alpha}{r^2} = - \frac{Q}{D}$$

$$\frac{d^2\alpha}{dr^2} + \left[ \frac{r \frac{d\alpha}{dr} - \alpha}{r^2} \right] = - \frac{Q}{D}$$

$$\frac{d^2\alpha}{dr^2} + \frac{d}{dr} \left( \frac{\alpha}{r} \right) = - \frac{Q}{D}$$

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

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \left( r \frac{d\alpha}{dr} + \alpha \right) \right] = - \frac{Q}{D}$$

Que se reduz a:

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (\alpha r) \right] = - \frac{Q}{D} \quad \text{Equação 4.0.17}$$

Integrando a equação 4.0.17, temos:

$$\int \frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (\alpha r) \right] dr = - \int \frac{Q}{D} dr + C_1$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (\alpha r) = - \frac{1}{D} \int Q dr + C_1$$

$$\frac{d}{dr} (\alpha r) = - \frac{r}{D} \int Q dr + C_1 r$$

Integrando pela segunda vez a equação 4.0.17, chegamos a:

$$\int \left[ \frac{d}{dr} (\alpha r) \right] dr = - \int \left[ \frac{r}{D} \int Q dr \right] dr + \int r C_1 dr + C_2$$

$$\alpha r = - \frac{1}{D} \int \left[ r \int Q dr \right] dr + C_1 \int r dr + C_2$$

$$\alpha r = - \frac{1}{D} \int \left[ r \int Q dr \right] dr + \frac{C_1}{2} r^2 + C_2$$

$$\alpha = - \frac{1}{r D} \int \left[ r \int Q dr \right] dr + \frac{C_1}{2} r + \frac{C_2}{r}$$

$$\alpha = C_1 r + \frac{C_2}{r} - \frac{1}{D r} \int \left[ r \int Q dr \right] dr \quad \text{Equação 4.0.18}$$

Em um carregamento uniforme, a relação entre a cortante (Q) e a pressão (P) pode ser dada por:

$$Q \, 2\pi r = P \, \pi r^2$$

Logo:

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

Substituindo na expressão (4.0.18) e efetuando a integração indicada, temos:

$$\alpha = C_1 \, r + \frac{C_2}{r} - \frac{1}{2 \, D \, r} \int \left[ r \int P \, r \, dr \right] dr$$

$$\alpha = C_1 \, r + \frac{C_2}{r} - \frac{1}{4 \, D \, r} \int P \, r^3 \, dr$$

$$\alpha = C_1 \, r + \frac{C_2}{r} - \frac{P \, r^3}{16 \, D} \quad \text{Equação 4.0.19}$$

Considerando as condições de contorno definidas na figura 4.0.3, encontramos: [REF. 23 ]

Condição de contorno (I): para  $r = 0 \rightarrow \alpha = 0$

Condição de contorno (II): para  $r = r_d \rightarrow \alpha = 0$

Substituindo a condição de contorno (I) na equação 4.0.19, determinamos a constante  $C_2$ :

$$C_2 = 0$$

Substituindo a condição de contorno (II) na equação 4.0.19, determinamos a constante  $C_1$ :

$$C_1 = \frac{P \, r_d^2}{16 \, D}$$

Introduzindo as constantes calculadas na equação 4.0.19, resulta:

$$\alpha = \frac{P r_d^2}{16 D} r - \frac{P}{16 D} r^3$$

$$\alpha = \frac{P}{16 D} (r_d^2 r - r^3)$$

Equação 4.0.20

Retomando a equação 4.0.12:

$$M_r = D \left( \frac{d\alpha}{dr} + \nu \frac{\alpha}{r} \right)$$

Substituindo a equação 4.0.20:

$$M_r = D \left[ \frac{P r_d^2}{16 D} - \frac{3 P}{16 D} r^2 + \nu \frac{P r_d^2}{16 D} - \nu \frac{P}{16 D} r^2 \right]$$

$$M_r = \frac{D P}{16 D} \left[ r_d^2 - 3 r^2 + \nu r_d^2 - \nu r^2 \right]$$

$$M_r = \frac{P}{16} \left[ r_d^2 (1 + \nu) - r^2 (3 + \nu) \right]$$

Equação 4.0.21

Retomando a equação 4.0.13:

$$M_t = D \left( \frac{\alpha}{r} + \nu \frac{d\alpha}{dr} \right)$$

Substituindo a equação 4.0.20:

$$M_t = D \left[ \frac{P r_d^2}{16 D} - \frac{P r^2}{16 D} + \nu \frac{P r_d^2}{16 D} - \nu \frac{3 P r^2}{16 D} \right]$$

$$M_t = \frac{D P}{16 D} \left[ r_d^2 - r^2 + \nu r_d^2 - \nu 3 r^2 \right]$$

$$M_t = \frac{P}{16} \left[ r_d^2 (1 + \nu) - r^2 (1 + 3 \nu) \right]$$

Equação 4.0.22

4.2.1.1.1 - TENSÕES NA SUPERFÍCIE DO DIAFRAGMA. Retomando a equação 4.0.12 e a equação 4.0.13 e dividindo ambos os membros pela constante global (D), temos:

$$\frac{M_r}{D} = \left( \frac{d\alpha}{dr} + \nu \frac{\alpha}{r} \right) \quad \text{Equação 4.0.23}$$

$$\frac{M_t}{D} = \left( \frac{\alpha}{r} + \nu \frac{d\alpha}{dr} \right) \quad \text{Equação 4.0.24}$$

Substituindo nas equações 4.0.8 e 4.0.9, encontramos:

$$\sigma_r = \frac{E z}{(1 - \nu^2)} \frac{M_r}{D} \quad \text{Equação 4.0.25}$$

$$\sigma_t = \frac{E z}{(1 - \nu^2)} \frac{M_r}{D} \quad \text{Equação 4.0.26}$$

Substituindo as equações 4.0.21, 4.0.22 e 4.0.14, temos:

$$\sigma_t = \frac{3 P r_d^2 z \nu}{4 t^3} \left[ \left( \frac{1}{\nu} + 1 \right) - \left( \frac{1}{\nu} + 3 \right) \left( \frac{r}{r_d} \right)^2 \right] \quad \text{Equação 4.0.27}$$

$$\sigma_r = \frac{3 P r_d^2 z \nu}{4 t^3} \left[ \left( \frac{1}{\nu} + 1 \right) - \left( \frac{3}{\nu} + 1 \right) \left( \frac{r}{r_d} \right)^2 \right] \quad \text{Equação 4.0.28}$$

Considerando a orientação do eixo (Z) mostrada na figura 4.0.3, as superfícies do diafragma são definidas pelos valores ( $z = -t/2$ ) e ( $z = +t/2$ ). Substituindo nas equações 4.0.27 e 4.0.28 o valor da coordenada (z) por (+ t/2), encontramos:

$$\sigma_t = \frac{3 P r_d^2 \nu}{8 t^2} \left[ \left( \frac{1}{\nu} + 1 \right) - \left( \frac{1}{\nu} + 3 \right) \left( \frac{r}{r_d} \right)^2 \right] \quad \text{Equação 4.0.29}$$

$$\sigma_r = \frac{3 P r_d^2 \nu}{8 t^2} \left[ \left( \frac{1}{\nu} + 1 \right) - \left( \frac{3}{\nu} + 1 \right) \left( \frac{r}{r_d} \right)^2 \right] \quad \text{Equação 4.0.30}$$

A figura 4.0.7 mostra as equações  $(\sigma_t)$  e  $(\sigma_r)$  plotadas em função da relação  $(r/r_d)$ .

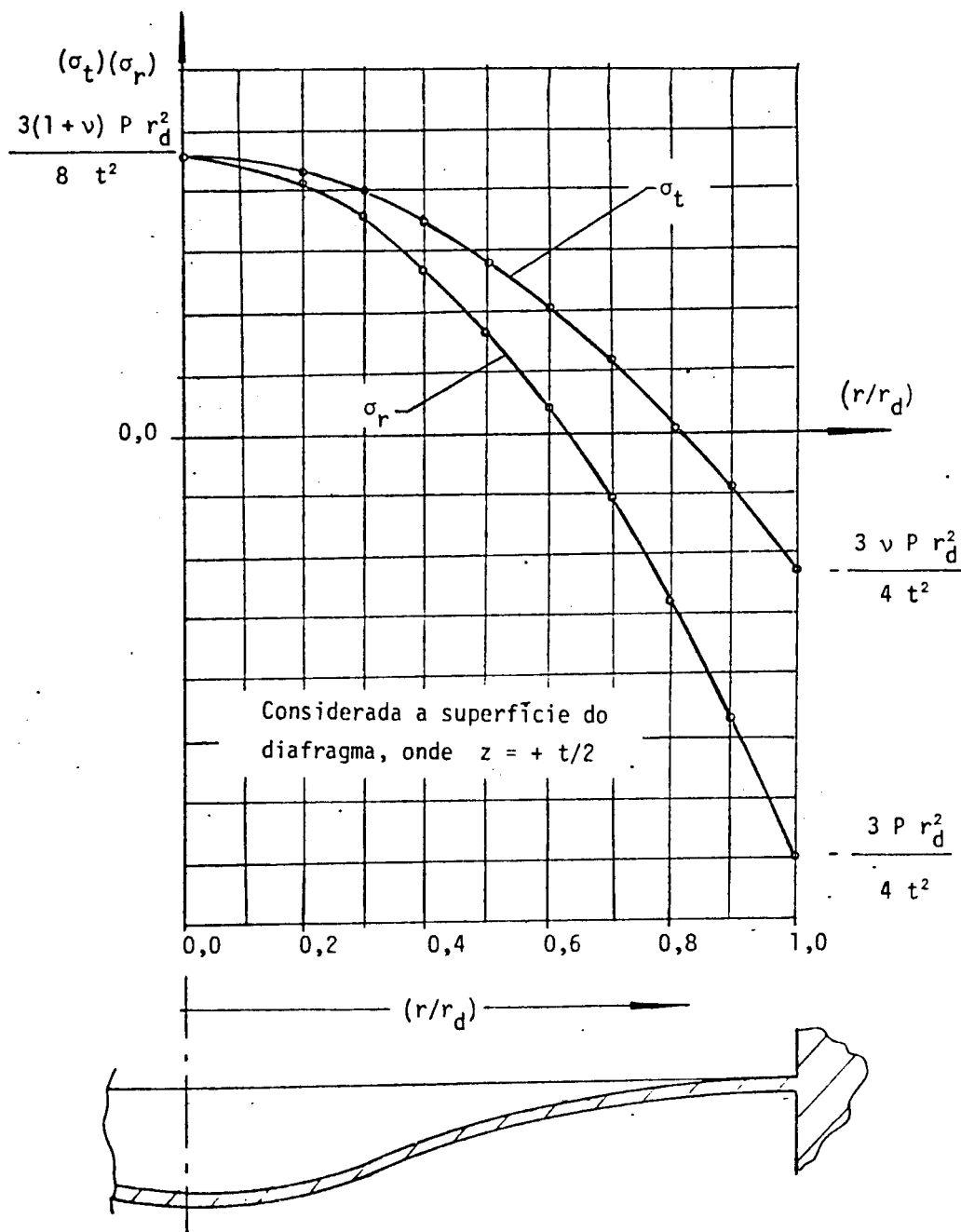


Figura 4.0.7 - Tensões Radiais e Tangenciais  $(\sigma_r)$  e  $(\sigma_t)$   
Diafragma Submetido à Pressão  $(P)$

4.2.1.1.2 - DEFORMAÇÕES NA SUPERFÍCIE DO DIAFRAGMA. O desenvolvimento apresentado em 4.2.1.1.1 mostrou que o diafragma submetido a uma pressão uniforme está sujeito a um estado duplo de tensões. A deformação específica em um ponto qualquer no estado duplo de tensões é dada por:

- Direção tangencial (ou circunferencial) [REF. 04 ]

$$\epsilon_t = \frac{\sigma_t - \nu \sigma_r}{E} \quad \text{Equação 4.0.31}$$

- Direção radial [REF. 04 ]

$$\epsilon_r = \frac{\sigma_r - \nu \sigma_t}{E} \quad \text{Equação 4.0.32}$$

Substituindo as equações 4.0.29 e 4.0.30 para em seguida efetuar as simplificações necessárias, temos:

$$\epsilon_t = \frac{3 r_d^2 (1 - \nu^2)}{8 t^2 E} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_d} \right)^2 \right] \cdot P \quad \text{Equação 4.0.33}$$

$$\epsilon_r = \frac{3 r_d^2 (1 - \nu^2)}{8 t E} \left[ 1 - 3 \left( \frac{r}{r_d} \right)^2 \right] \cdot P \quad \text{Equação 4.0.34}$$

Considerando as hipóteses apresentadas em 4.2.1 e o abandono dos termos de ordem superior, as equações 4.0.33 e 4.0.34 encontradas representam uma relação linear entre a pressão (P) aplicada e a deformação específica radial ou tangencial na superfície do diafragma. A figura 4.0.8 mostra as equações ( $\epsilon_r$ ) e ( $\epsilon_t$ ) plotadas em função da relação ( $r/r_d$ ), para um determinado valor da pressão (P).

4.2.1.1.4 - DESLOCAMENTO DO PONTO CENTRAL DO DIAFRAGMA. Para determinar o deslocamento na direção (Z) do ponto central do diafragma, retomaremos a equação 4.0.20:

$$\alpha = \frac{P r_d^2}{16 D} r - \frac{P}{16 D} r^3$$

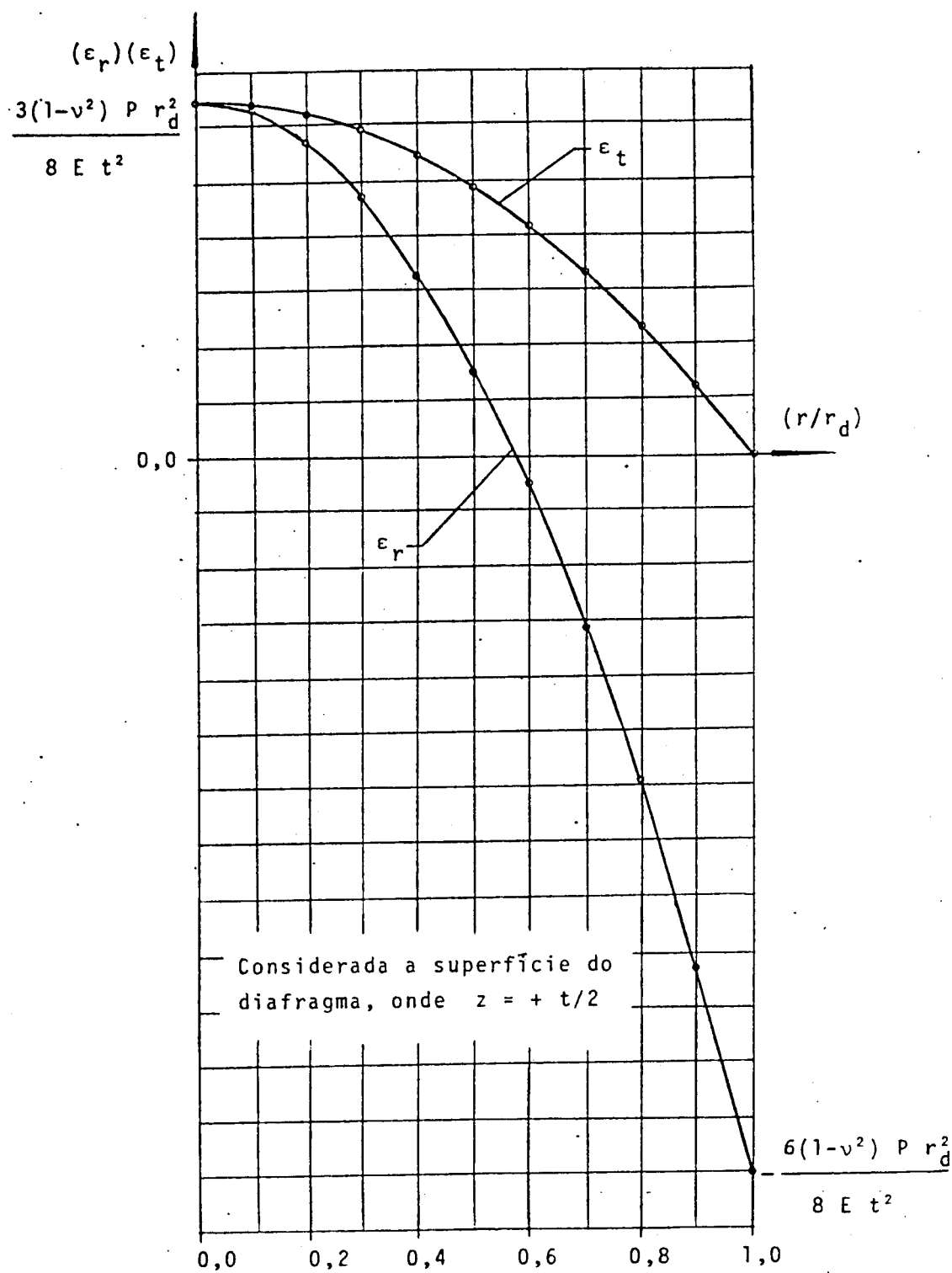


Figura 4.0.8 - Deformações Radiais e Tangenciais ( $\epsilon_r$ ) e ( $\epsilon_t$ )  
Diafragma Submetido à Pressão (P)

Pela equação 4.0.5, temos:

$$\alpha = - \frac{dw}{dr}$$

Logo:

$$dw = - \left( \frac{P r_d^2}{16 D} r - \frac{P}{16 D} r^3 \right) dr$$

Integrando:

$$\int dw = - \int \left( \frac{P r_d^2}{16 D} r - \frac{P}{16 D} r^3 \right) dr - C_3$$

$$w = - \frac{P r_d^2}{32 D} r^2 + \frac{P}{64 D} r^4 + C_3$$

$$w = \frac{P}{16 D} \left( - \frac{r_d^2 r^2}{2} + \frac{r^4}{4} \right) + C_3$$

Equação 4.0.35

Considerando as condições de contorno definidas na figura 4.0.3, encontramos:

Condição de contorno (III): para  $r = r_d \rightarrow w = 0$

Substituindo na equação 4.0.35:

$$w = 0 = \frac{P}{16 D} \left( - \frac{r_d^4}{2} + \frac{r_d^4}{4} \right) + C_3$$

$$C_3 = \frac{P r_d^4}{64 D}$$

Substituindo a constante  $C_3$  na equação 4.0.35:

$$w = \frac{P}{16 D} \left( - \frac{r_d^2 r^2}{2} + \frac{r^4}{4} + \frac{r_d^4}{4} \right)$$

$$w = \frac{P}{16 D} \left( r_d^2 - r^2 \right)^2 \quad \text{Equação 4.0.36}$$

Considerando que no ponto central  $r = 0$ , o deslocamento ( $w_0$ ) deste ponto será dado por:

$$w_0 = \frac{r_d^4}{64 D} P = \frac{3 r_d^4 (1 - \nu^2)}{16 E t^3} P \quad \text{Equação 4.0.37}$$

Considerando as hipóteses apresentadas em 4.2.1 e o abandono dos termos de ordem superior, a equação 4.0.37 encontrada representa uma relação linear entre a pressão ( $P$ ) aplicada e o deslocamento na direção ( $z$ ) do ponto central do diafragma.

### 4.3 - SOLUÇÃO CONSTRUTIVA ADOTADA

Uma solução construtiva é, na verdade, um arranjo físico funcional em que dispomos os elementos de maneira a atender um compromisso. No estudo das possíveis soluções construtivas, para um transdutor resistivo de pressão diferencial, foram consideradas as seguintes premissas:

4.3.0.1 - Todas as soluções construtivas estudadas empregam diafragma circular plano engastado na borda como *ELEMENTO SENSÍVEL*. Isto porque é ele que apresenta menores dificuldades de fabricação entre todos os elementos sensíveis à pressão normalmente usados. Além disto, foi possível encontrar relações lineares entre as deformações e a pressão ( $P$ ) aplicada, considerando as hipóteses simplificadas apresentadas em 4.2.1. [REF. 19]

4.3.0.2 - Todas as soluções construtivas estudadas empregam extensômetros elétricos resistivos como *ELEMENTO DE TRANSDUÇÃO*. O seu uso é justificado pelas inúmeras vantagens relacionadas em 4.1. [REF. 01]

4.3.0.3 - Todas as soluções construtivas estudadas permitem o *ISOLAMENTO TOTAL* do elemento de transdução. Isto implica na necessidade do uso de dois elementos sensíveis, criando um compartimento isolado, para proteger o elemento de transdução do natural ataque de agentes ativos normalmente encontrados nos produtos químicos industriais sob pressão.

Com base nestas considerações, várias formas para o transdutor foram pesquisadas, discutidas, analisadas e comparadas. Este assunto é tratado de maneira superficial nos livros e catálogos consultados, e em geral os transdutores diferenciais encontrados utilizam uma ou outra variação da solução com *DIAFRAGMAS INTERLIGADOS*. Esta interligação permite obter um movimento em função da diferença entre as pressões atuantes em cada diafragma. O movimento assim obtido pode agir sobre um dos muitos elementos de transdução existentes. [REF. 11] [REF. 12]

A figura 4.0.9 mostra, de maneira esquemática, um transdutor de pressão diferencial, no qual o movimento obtido na interligação dos diafragmas provoca a flexão de uma viga engastada, e em consequência deforma o extensômetro elêtrico resistivo nela colado. Esta solução construtiva foi estudada e os resultados teóricos mostraram a existência de uma relação linear entre a diferença de pressão ( $P_1 - P_2$ ) e o sinal de saída ( $u$ ). No entanto, sua construção é demasiadamente complexa, e a influência do desgaste e do atrito entre as partes em contato é grande, podendo afetar o desempenho do transdutor. [REF. 11] [REF. 13]

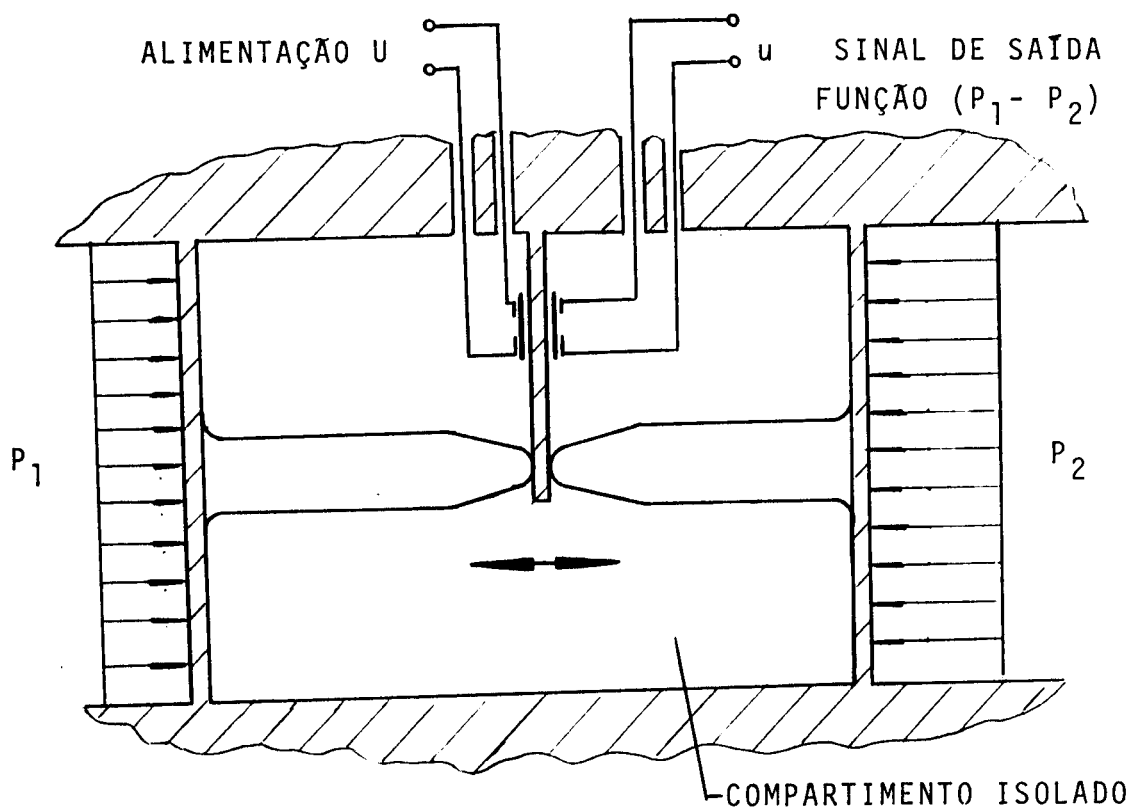


Figura 4.0.9 - Transdutor de Pressão Diferencial.  
Solução Empregando Diafragmas Interligados.

Durante esta fase de análise das soluções construtivas, surgiu a idéia de se colar extensômetros elétricos resistivos diretamente sobre a superfície não exposta de dois *DIAFRAGMAS INDEPENDENTES*, e buscar uma forma de ligação em ponte de *WHEATSTONE* capaz de fornecer *DIRETAMENTE* um sinal elétrico em função da diferença entre as pressões atuantes em cada diafragma.

A idéia, depois de desenvolvida, resultou numa *SOLUÇÃO ORIGINAL* mais simples do que as demais soluções estudadas.

Sem contatos ou qualquer outro tipo de ligação mecânica, o transdutor de pressão diferencial construído com *DIAFRAGMAS INDEPENDENTES* não sofre influência do atrito ou do desgaste das partes. Esta solução simples e prática foi adotada para o transdutor resistivo de pressão diferencial, e está apresentada de maneira esquemática na figura 4.0.10.

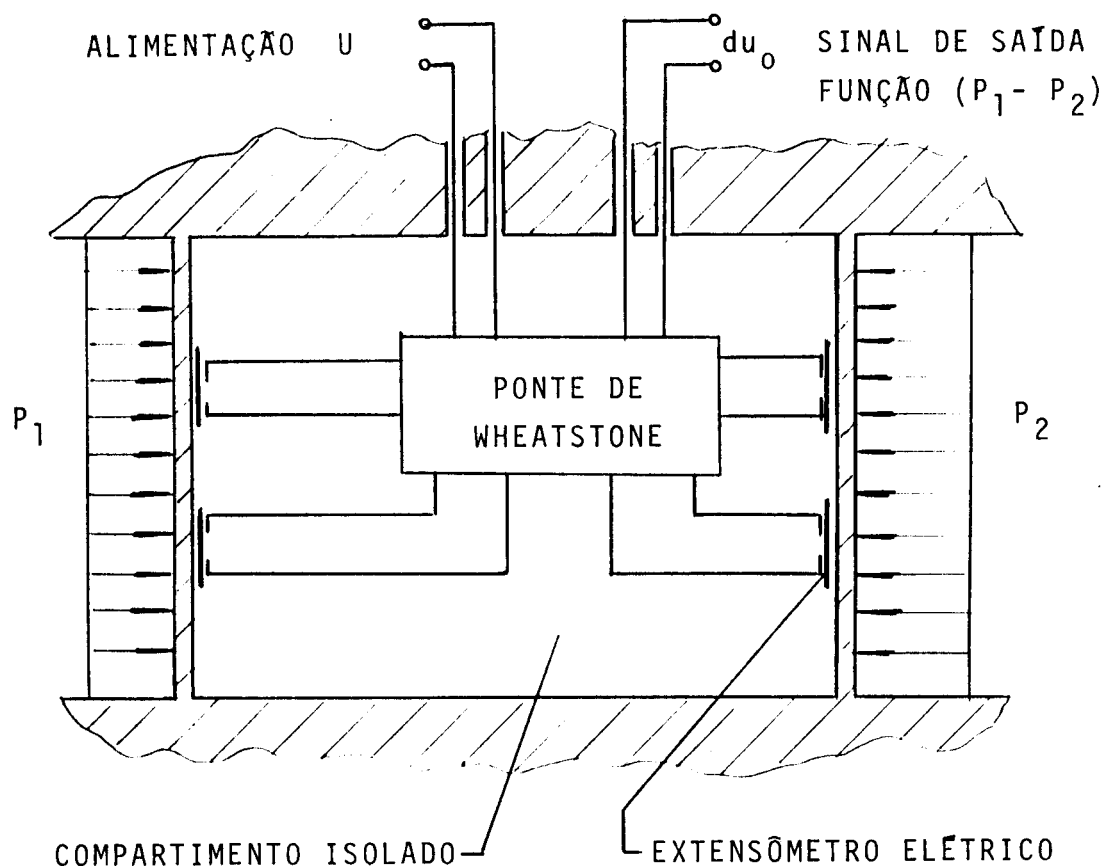


Figura 4.0.10 - Transdutor de Pressão Diferencial.  
Solução Empregando Diafragmas Independentes.

4.3.1 - FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA. Tomando por base a solução construtiva que emprega diafragmas independentes, apresentaremos agora a dedução da função transferência do transdutor de pressão diferencial.

As seguintes considerações foram aplicadas no desenvolvimento das equações:

4.3.1.0.1 - O diafragma 1 e o diafragma 2 são planos e perfeitamente en-  
gastados na borda.

4.3.1.0.2 - A pressão  $P_1$  atua somente sobre o diafragma 1 e a pressão  $P_2$  somente sobre o diafragma 2.

4.3.1.0.3 - A espessura ( $t_1$ ) do diafragma 1 é igual à espessura ( $t_2$ ) do diafragma 2, e ambas passam a ser indicadas por ( $t$ ).

4.3.1.0.4 - O raio externo ( $r_{d1}$ ) do diafragma 1 é igual ao raio externo ( $r_{d2}$ ) diafragma 2, e ambos passam a ser indicados por ( $r_d$ ).

4.3.1.0.5 - O módulo de elasticidade ( $E_1$ ) é igual ao módulo de elasticidade ( $E_2$ ), e ambos passam a ser indicados por ( $E$ ).

4.3.1.0.6 - O número de Poisson ( $\nu_1$ ) é igual a ( $\nu_2$ ), e ambos passam a ser indicados por ( $\nu$ ).

4.3.1.0.7 - O equacionamento não leva em conta os efeitos provocados pela variação de temperatura do ambiente ou dos fluidos em contato com os diafragmas.

4.3.1.1 - TEORIA DA PONTE DE WHEATSTONE DESBALANCEADA. A figura 4.0.11 mostra um circuito em ponte desbalanceada. Nesta condição, não é mais válida a relação entre as resistências elétricas de braços opostos:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \quad \text{Equação 4.0.38}$$

Onde: ( $R_i$ ) é a resistência elétrica equivalente do braço ( $i$ ) da ponte.

Para a determinação das equações, usaremos as leis de *KIRCHOFF* para circuitos elétricos, em seguidas apresentadas:

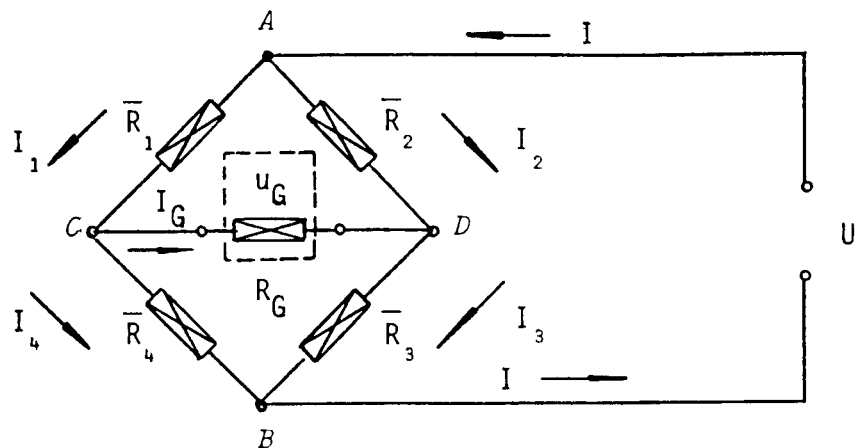


Figura 4.0.11 - Ponte de Wheatstone Desbalanceada.

4.3.1.1.1 - Para qualquer nó do circuito, a soma das correntes que nele chegam deve ser igual à soma das correntes que dele saem. [REF. 20]

$$I = I_1 + I_2 \quad I_4 = I_1 - I_G$$

$$I_3 = I_2 + I_G \quad I = I_4 + I_3$$

4.3.1.1.2 - A soma das quedas de potencial para um circuito fechado deve ser nula. [REF. 20]

$$\bar{R}_1 I_1 + \bar{R}_4 (I_1 - I_G) = U$$

$$\bar{R}_1 I_1 + R_G I_G - \bar{R}_2 I_2 = 0$$

$$R_G I_G + \bar{R}_3 (I_2 + I_G) - \bar{R}_4 (I_1 - I_G) = 0$$

Isolando o termo ( $I_G$ ), temos:

$$I_G = \frac{U(\bar{R}_1 \bar{R}_3 - \bar{R}_2 \bar{R}_4)}{(\bar{R}_1 + \bar{R}_2)(\bar{R}_3 + \bar{R}_4)} \cdot \frac{1}{(R_G + R_P)}$$

Equação 4.0.39

Onde ( $R_P$ ) é a resistência elétrica da ponte, dada por:

$$R_p = \frac{\bar{R}_2 \bar{R}_3}{(\bar{R}_2 + \bar{R}_3)} + \frac{\bar{R}_1 \bar{R}_4}{(\bar{R}_1 + \bar{R}_4)}$$

Multiplicando a equação 4.0.39 por  $(R_G)$ , teremos a tensão nos terminais do galvanômetro ( $u_G$ ):

$$I_G R_G = u_G = \frac{U (\bar{R}_1 \bar{R}_3 - \bar{R}_2 \bar{R}_4)}{(\bar{R}_1 + \bar{R}_2)(\bar{R}_3 + \bar{R}_4)} \cdot \frac{1}{(1 + R_p/R_G)} \quad \text{Equação 4.0.40}$$

Consideraremos que o valor de  $(\bar{R}_i)$  é muito menor que o valor de  $(R_G)$ . O valor da resistência elétrica do galvanômetro é, em geral, 10.000 vezes maior que os valores de  $(\bar{R}_i)$  em pontes de extensômetros elétricos comerciais. [REF. 24] Portanto, o valor de  $(R_p)$  é, também, muito menor que  $(R_G)$ . Dentro das precisões usuais, podemos aproximar o termo da equação 4.0.40  $(R_p/R_G)$  para 1. Logo, temos:

$$\frac{1}{(1 + R_p/R_G)} \cong 1$$

A equação 4.0.40 se reduz a:

$$u_G = \frac{U(\bar{R}_1 \bar{R}_3 - \bar{R}_2 \bar{R}_4)}{(\bar{R}_1 + \bar{R}_2)(\bar{R}_3 + \bar{R}_4)} \quad \text{Equação 4.0.41}$$

Observando a equação 4.0.41, fica fácil concluir que, quando  $\bar{R}_1 \bar{R}_3 = \bar{R}_2 \bar{R}_4$ , o valor de  $(u_G)$  se anula. Esta é a conhecida relação das resistências opostas da ponte balanceada, onde  $(I_G)$  é igual a zero. (Equação 4.0.38) [REF. 20] Admitindo que as resistências elétricas  $(\bar{R}_1)$ ,  $(\bar{R}_2)$ ,  $(\bar{R}_3)$  e  $(\bar{R}_4)$  sofram variação, a diferencial da expressão de  $(u_G)$  após algumas transformações algébricas resulta:

$$du_G = U \left[ + \frac{\bar{R}_2 d\bar{R}_1}{(\bar{R}_1 + \bar{R}_2)^2} - \frac{\bar{R}_1 d\bar{R}_2}{(\bar{R}_1 + \bar{R}_2)^2} + \frac{\bar{R}_4 d\bar{R}_3}{(\bar{R}_3 + \bar{R}_4)^2} - \frac{\bar{R}_3 d\bar{R}_4}{(\bar{R}_3 + \bar{R}_4)^2} \right]$$

$$\text{Equação 4.0.42}$$

4.3.1.2 - LIGAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS EM PONTE DE WHEATSTONE. Admitindo uma ligação em Ponte de Wheatstone, conforme mostra a figura 4.0.12, on de dois extensômetros são montados em sêrie em cada um dos braços da ponte.

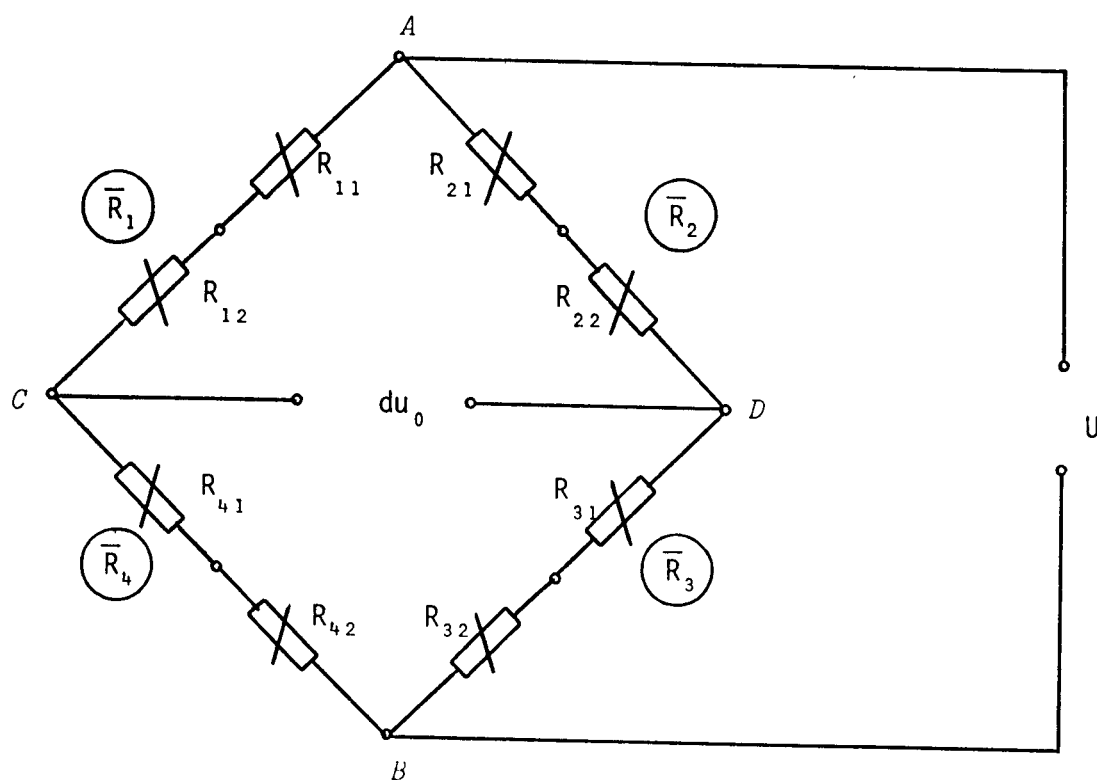


Figura 4.0.12 - Extensômetros Elêtricos Resistivos. Ligação em Ponte de Wheatstone.

Onde as resistências elêtricas são dadas por:

$$\bar{R}_1 = R_{11} + R_{12}$$

$$\bar{R}_2 = R_{21} + R_{22}$$

$$\bar{R}_3 = R_{31} + R_{32}$$

$$\bar{R}_4 = R_{41} + R_{42}$$

Considerando o diferencial das resistências elêtricas, temos:

$$d\bar{R}_1 = dR_{11} + dR_{12}$$

$$d\bar{R}_2 = dR_{21} + dR_{22}$$

$$d\bar{R}_3 = dR_{31} + dR_{32}$$

$$d\bar{R}_4 = dR_{41} + dR_{42}$$

Retomando a equação 4.0.4 e aplicando-a para o extensômetro ( $R_{ij}$ ) submetido à deformação específica ( $\epsilon_{ij}$ ), temos:

$$dR_{11} = R_{11} k_{11} \epsilon_{11} \quad d\bar{R}_1 = R_{11} k_{11} \epsilon_{11} + R_{12} k_{12} \epsilon_{12}$$

Admitindo que os oito extensômetros são iguais, resulta:

$$R_{11} = R_{12} = R_{21} = R_{22} = R_{31} = R_{32} = R_{41} = R_{42} = R$$

$$k_{11} = k_{12} = k_{21} = k_{22} = k_{31} = k_{32} = k_{41} = k_{42} = k$$

Portanto:

$$d\bar{R}_1 = Rk (\epsilon_{11} + \epsilon_{12})$$

$$d\bar{R}_2 = Rk (\epsilon_{21} + \epsilon_{22})$$

$$d\bar{R}_3 = Rk (\epsilon_{31} + \epsilon_{32})$$

$$d\bar{R}_4 = Rk (\epsilon_{41} + \epsilon_{42})$$

$$\bar{R}_1 = \bar{R}_2 = \bar{R}_3 = \bar{R}_4 = 2R$$

Substituindo na equação 4.0.42:

$$du_0 = \frac{U k}{8} \left[ (\epsilon_{11} + \epsilon_{12}) - (\epsilon_{21} + \epsilon_{22}) + (\epsilon_{31} + \epsilon_{32}) - (\epsilon_{41} + \epsilon_{42}) \right]$$

Equação 4.0.43

As equações 4.0.33 e 4.0.34 nos permitem calcular os valores das deformações específicas nas direções tangencial ( $\epsilon_t$ ) e radial ( $\epsilon_r$ ) em um ponto qualquer da superfície de um diafragma plano de espessura constante engastado na borda:

$$\epsilon_t = \frac{3 r_d^2 (1 - \nu^2)}{8 t^2 E} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_d} \right)^2 \right] \cdot P$$

$$\epsilon_r = \frac{3 r_d^2 (1 - \nu^2)}{8 t^2 E} \left[ 1 - 3 \left( \frac{r}{r_d} \right)^2 \right] \cdot P$$

Ao definirmos o ponto da superfície, a geometria do diafragma e as suas propriedades elásticas, os parâmetros  $(r)$ ,  $(r_d)$ ,  $(t)$ ,  $(E)$  e  $(\nu)$  passam a ser considerados constantes na determinação de  $(\epsilon_t)$  e  $(\epsilon_r)$ . Assim sendo, o termo  $(H_t)$  da equação 4.0.44 e o termo  $(H_r)$  da equação 4.0.45 são, também, considerados constantes.

$$\epsilon_t = H_t \cdot P \quad \text{Equação 4.0.44}$$

$$\epsilon_r = H_r \cdot P \quad \text{Equação 4.0.45}$$

Onde:

$$H_t = \frac{3 r_d^2 (1 - \nu^2)}{8 t^2 E} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_d} \right)^2 \right]$$

$$H_r = \frac{3 r_d^2 (1 - \nu^2)}{8 t^2 E} \left[ 1 - 3 \left( \frac{r}{r_d} \right)^2 \right]$$

As equações 4.0.44 e 4.0.45 desenvolvidas com base nas hipóteses apresentadas em 4.2.1 mostram uma relação linear entre a pressão aplicada  $(P)$  e a deformação específica radial ou tangencial na superfície do diafragma. Por esta razão, tanto a deformação na direção radial como a deformação na direção tangencial são adequadas para atuar na direção ativa do extensômetro elétrico colado na superfície. Consideraremos nesta dedução somente a direção tangencial, lembrando que um desenvolvimento análogo pode ser encontrado adotando a direção radial. Para cada extensômetro  $(R_{ij})$  colado sobre um particular ponto da superfície do diafragma, sujeito à deformação específica  $(\epsilon_{ijt})$ , podemos calcular a constante  $(H_{ijt})$  pela equação 4.0.44. Desta forma, para o particular ponto da superfície do diafragma submetido à pressão  $(P_1)$ , temos:

$$\epsilon_{ijt} = H_{ijt} \cdot P_1 \quad \text{Equação 4.0.46}$$

E, para o particular ponto da superfície do diafragma 2 submetido à pressão ( $P_2$ ), temos:

$$\epsilon_{ij_t} = H_{ij_t} \cdot P_2 \quad \text{Equação 4.0.47}$$

Retomando a equação 4.0.43 e agrupando os termos de mesmo sinal, temos:

$$du_0 = \frac{U \cdot k}{8} \left[ + \epsilon_{11} + \epsilon_{12} + \epsilon_{31} + \epsilon_{32} - \epsilon_{21} - \epsilon_{22} - \epsilon_{41} - \epsilon_{42} \right]$$

$$\text{Equação 4.0.48}$$

Observando a equação 4.0.48 e a figura 4.0.12, notamos que as deformações específicas impostas aos extensômetros ligados nos *BRAÇOS OPOSTOS* da ponte possuem o *MESMO SINAL ALGÉBRICO*, e as deformações específicas impostas aos extensômetros ligados nos *BRAÇOS ADJACENTES* possuem *SINAIS ALGÉBRICOS OPOSTOS*. Esta característica da ponte de *WHEATSTONE* foi o caminho encontrado para obter um valor ( $du_0$ ) em função da diferença de pressão ( $P_1 - P_2$ ).

Para isso, devemos montar sobre um *MESMO DIAFRAGMA* os extensômetros ligados aos *BRAÇOS OPOSTOS* da ponte de *WHEATSTONE*. Considerando que ( $\epsilon_{11}$ ), ( $\epsilon_{12}$ ), ( $\epsilon_{31}$ ) e ( $\epsilon_{32}$ ) sejam as deformações específicas na direção tangencial (circunferencial) do diafragma 1, sujeito à pressão ( $P_1$ ), e que ( $\epsilon_{21}$ ), ( $\epsilon_{22}$ ), ( $\epsilon_{41}$ ) e ( $\epsilon_{42}$ ) sejam as deformações específicas na direção tangencial do diafragma 2, sujeito à pressão ( $P_2$ ), e substituindo na equação 4.0.48 as relações lineares entre a deformação específica e as pressões ( $P_1$ ) e ( $P_2$ ) representadas pelas equações 4.0.46 e 4.0.47, temos:

$$du_0 = \frac{U \cdot k}{8} \left[ \left( H_{11_t} \cdot P_1 + H_{12_t} \cdot P_1 + H_{31_t} \cdot P_1 + H_{32_t} \cdot P_1 \right) - \left( H_{21_t} \cdot P_2 + H_{22_t} \cdot P_2 + H_{41_t} \cdot P_2 + H_{42_t} \cdot P_2 \right) \right]$$

Agrupando os termos:

$$du_0 = \frac{U k}{8} \left[ \left( H_{11t} + H_{12t} + H_{31t} + H_{32t} \right) P_1 - \left( H_{21t} + H_{22t} + H_{41t} + H_{42t} \right) P_2 \right] \quad \text{Equação 4.0.49}$$

As equações 4.0.50 e 4.0.51 permitem determinar a constante global relativa ao diafragma 1 ( $W_{1t}$ ) e a constante global relativa ao diafragma 2 ( $W_{2t}$ ):

$$(H_{11t} + H_{12t} + H_{31t} + H_{32t}) = W_{1t} \quad \text{Equação 4.0.50}$$

$$(H_{21t} + H_{22t} + H_{41t} + H_{42t}) = W_{2t} \quad \text{Equação 4.0.51}$$

Substituindo as equações 4.0.50 e 4.0.51 na equação 4.0.49:

$$du_0 = \frac{U k}{8} \left( W_{1t} \cdot P_1 - W_{2t} \cdot P_2 \right) \quad \text{Equação 4.0.52}$$

Seria desejável que  $W_{1t}$  fosse igual a  $W_{2t}$ . Porém, mesmo com as mais apuradas técnicas de fabricação é muito difícil obter esta igualdade. Temos, portanto:

$$W_{1t} = W_{2t} + e \quad \text{Equação 4.0.53}$$

Substituindo a equação 4.0.53 em 4.0.52, temos:

$$du_0 = \frac{U k}{8} \left( W_{2t} \cdot P_1 + e \cdot P_1 - W_{2t} \cdot P_2 \right)$$

Colocando em evidência a constante  $W_{2t}$ , temos:

$$du_0 = \frac{U}{8} k \left[ W_{2t} (P_1 - P_2) + e \cdot P_1 \right] \quad \text{Equação 4.0.54}$$

Onde:

$$W_{2t} = (H_{21t} + H_{22t} + H_{41t} + H_{42t})$$

$$H_{ij t} = \frac{3 r_d^2 (1 - \nu^2)}{8 t^2 E} \left[ 1 - \left( \frac{r_{ij}}{r_d} \right)^2 \right]$$

A equação 4.0.54 representa a *FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA* do transdutor diferencial de pressão com diafragmas independentes descrito em 4.3.1. Cuidados especiais na construção e projeto podem reduzir o valor (e) da equação 4.0.54, aproximando assim a função transferência de uma relação linear entre a diferença de pressão ( $P_1 - P_2$ ) e o sinal elétrico de saída do transdutor ( $du_0$ ). Para melhorar ainda mais as características estáticas de desempenho do transdutor diferencial de pressão, podemos introduzir na Ponte de *WHEATSTONE* da figura 4.0.12 um circuito elétrico capaz de ajustar os valore ( $W_{1t}$ ) e ( $W_{2t}$ ), reduzindo o valor de (e) a zero.

4.3.1.3 - CIRCUITO ELÉTRICO DE AJUSTE DAS CONSTANTES ( $W_{1t}$ ) E ( $W_{2t}$ ). A figura 4.0.13 mostra o extensômetro ( $R_{ij}$ ) ligado em paralelo ao resistor (B) através de um potenciômetro (trimpot) de resistência elétrica total (T). Deslocando o cursor do potenciômetro fazemos variar os valores das resistências elétricas (M) e (N), buscando ajustar o valor da constante ( $W_{1t}$ ) ao valor de ( $W_{2t}$ ). Analisaremos, agora, o comportamento do resistor equivalente ( $R_{eij}$ ). [REF. 24 ]

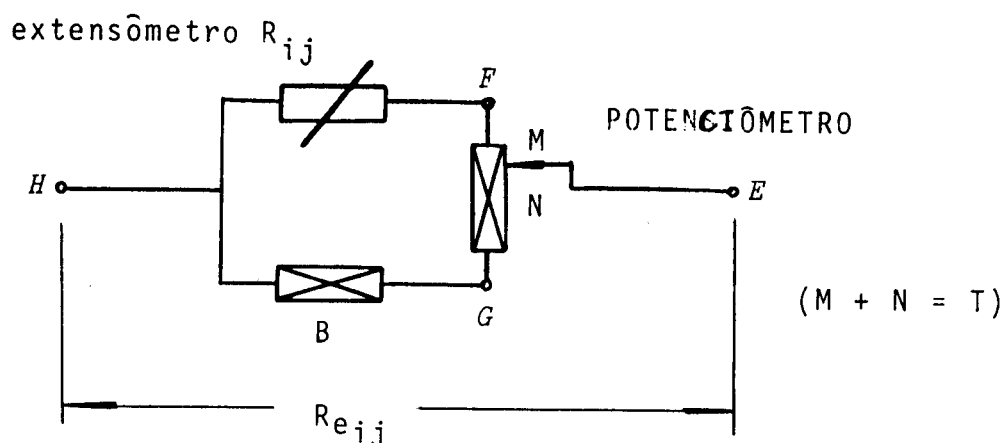


Figura 4.0.13 - Resistor Equivalente ( $R_e$ ).

Ao fim da operação de ajuste, o cursor do potenciômetro não será mais movimentado, e a resistência elétrica equivalente poderá ser calculada por:

$$\frac{1}{R_{eij}} = \frac{1}{R_{ij} + M} + \frac{1}{B + N}$$

$$R_{eij} = \frac{R_{ij} B + BM + R_{ij} N + MN}{R_{ij} + M + N + B}$$

Equação 4.0.55

Ao submetermos o extensômetro ( $R_{ij}$ ) a uma deformação mecânica, a resistência elétrica equivalente sofrerá uma variação ( $dR_{eij}$ ) dada por:

$$dR_{eij} = \frac{\partial R_e}{\partial R_{ij}} dR_{ij} + \frac{\partial R_e}{\partial M} dM + \frac{\partial R_e}{\partial N} dN + \frac{\partial R_e}{\partial B} dB$$

Lembrando que ao fim da operação de ajuste os valores (M), (N) e (B) permanecem constantes, a equação ( $dR_{eij}$ ) se reduz a:

$$dR_{eij} = \frac{\partial R_e}{\partial R_{ij}} dR_{ij}$$

Aplicando na equação 4.0.55, temos:

$$dR_{eij} = \frac{(B + N)(R_{ij} + N + M + B) - (RB + BM + RN + MN)}{(R_{ij} + M + N + B)^2} dR_{ij}$$

Que se reduz a:

$$dR_{eij} = \frac{(B + N)^2}{(R_{ij} + M + N + B)^2} dR_{ij} \quad \text{Equação 4.0.56}$$

Considerando que a posição do cursor é definida pela variável ( $\beta$ ) do potenciômetro ( $0 \leq \beta \leq 1$ ), temos:

$$M = \beta T \quad \text{Equação 4.0.57}$$

$$N = T - \beta T \quad \text{Equação 4.0.58}$$

Substituindo na equação 4.0.56, temos:

$$dR_{eij} = \left( \frac{B + T - \beta T}{R_{ij} + T + B} \right)^2 dR_{ij} \quad \text{Equação 4.0.59}$$

Observando a equação 4.0.59 e a figura 4.0.13, notamos que ( $dR_{eij}$ ) é função da posição do cursor, definida pela variável ( $\beta$ ). O máximo valor de ( $dR_e$ ) é obtido para ( $\beta$ ) igual a zero ( $M = 0$ ). Ao fim da operação de ajuste, os valores ( $\beta$ ), ( $T$ ), ( $R_{ij}$ ) e ( $B$ ) podem ser englobados em uma única constante ( $\eta_{ij}$ ):

$$dR_{eij} = \eta_{ij} dR_{ij} \quad \text{Equação 4.0.60}$$

Onde:

$$\eta_{ij} = \left( \frac{B + T - \beta T}{R_{ij} + T + B} \right)^2$$

Admitindo uma ligação em ponte de *WHEATSTONE*, onde o resistor equivalente ( $R_e$ ) é montado em dois braços adjacentes, e ainda um terceiro potenciômetro capaz de balancear a ponte quando  $(P_1 - P_2)$  é igual a zero, montado conforme mostra a figura 4.0.14.

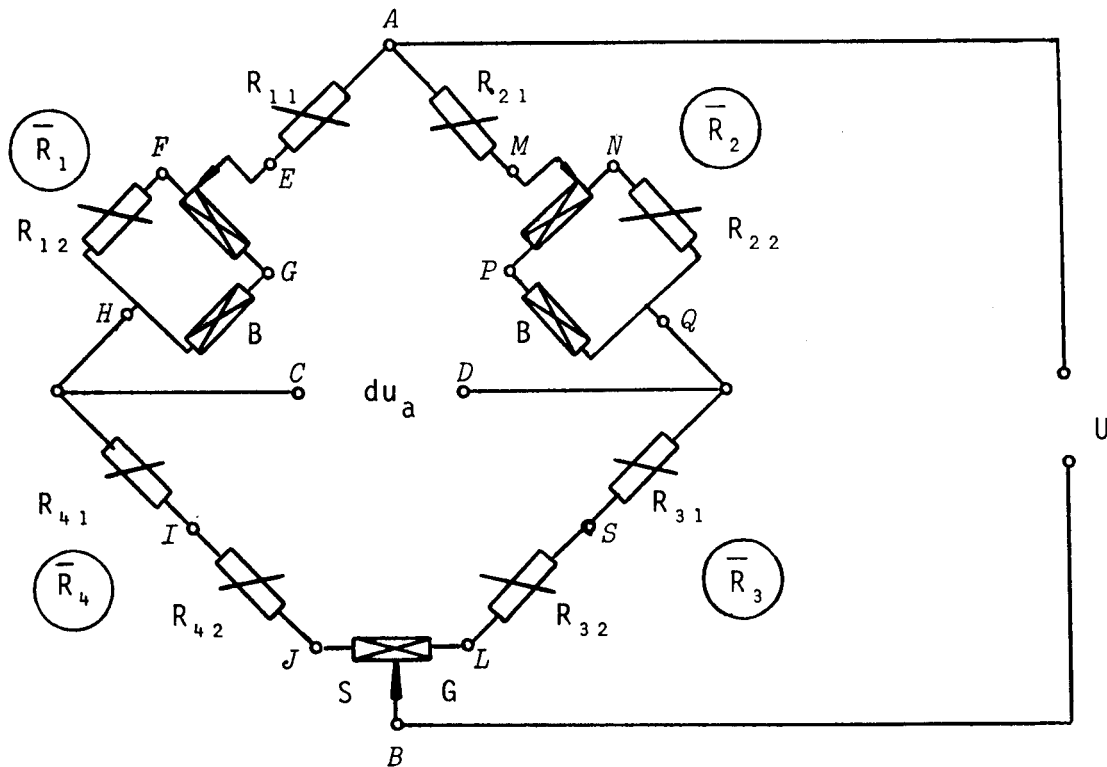


Figura 4.0.14 - Extensômetros Ligados em Ponte de *WHEATSTONE* Com Circuito de Ajuste das Constantes.

Na figura 4.0.14 as resistências elétricas são dadas por:

$$\bar{R}_1 = R_{11} + R_{e_{12}}$$

$$\bar{R}_2 = R_{21} + R_{e_{22}}$$

$$\bar{R}_3 = R_{31} + R_{32} + G$$

$$\bar{R}_4 = R_{41} + R_{42} + V$$

Admitindo que os oito extensômetros são iguais, temos:

$$R_{11} = R_{12} = R_{21} = R_{22} = R_{32} = R_{31} = R_{41} = R_{42} = R$$

Equação 4.0.61

$$k_{11} = k_{12} = k_{21} = k_{22} = k_{31} = k_{32} = k_{41} = k_{42} = k$$

Equação 4.0.62

Para facilitar o equacionamento, escrevemos ( $\bar{R}_i$ ) em função da resistência ( $R$ ) do extensômetro:

$$\bar{R}_1 = \mu_1 R$$

$$\bar{R}_2 = \mu_2 R$$

Equação 4.0.63

$$\bar{R}_3 = \mu_3 R$$

$$\bar{R}_4 = \mu_4 R$$

Considerando o diferencial das resistências elétricas, temos:

$$d\bar{R}_1 = dR_{11} + dR_{e12}$$

$$d\bar{R}_2 = dR_{21} + dR_{e22}$$

$$d\bar{R}_3 = dR_{31} + dR_{32}$$

$$d\bar{R}_4 = dR_{41} + dR_{42}$$

Aplicando a equação 4.0.60, temos:

$$d\bar{R}_1 = dR_{11} + \eta_{12} dR_{12}$$

$$d\bar{R}_2 = dR_{21} + \eta_{22} dR_{22}$$

Retomando a equação 4.0.4 e aplicando-a para o extensômetro ( $R_{ij}$ ) submetido à deformação específica ( $\epsilon_{ij}$ ), temos:

$$dR_{11} = R_{11} k_{11} \epsilon_{11}$$

$$d\bar{R}_1 = R_{11} k_{11} \epsilon_{11} + \eta_{12} \cdot R_{12} k_{12} \epsilon_{12}$$

Substituindo as equações 4.0.61 e 4.0.62, temos:

$$dR_{11} = R k \epsilon_{11}$$

$$d\bar{R}_1 = R k \epsilon_{11} + \eta_{12} R k \epsilon_{12}$$

Equação 4.0.64

Substituindo na equação 4.0.42 as relações 4.0.63 e 4.0.64:

$$du_a = U k \left[ + \frac{\mu_2}{(\mu_1 + \mu_2)^2} \left( \epsilon_{11} + \eta_{12} \epsilon_{12} \right) - \right]$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{\mu_1}{(\mu_1 + \mu_2)^2} \left( \epsilon_{21} + \eta_{22} \epsilon_{22} \right) + \frac{\mu_4}{(\mu_3 + \mu_4)^2} \left( \epsilon_{31} + \epsilon_{32} \right) - \\
 & - \frac{\mu_3}{(\mu_3 + \mu_4)^2} \left( \epsilon_{41} + \epsilon_{42} \right) \Big] \quad \text{Equação 4.0.65}
 \end{aligned}$$

Substituindo na equação 4.0.65 os valores ( $\eta_{ij} = 1$ ) e ( $\mu_i = 2$ ), a expressão se reduz à equação 4.0.43 (circuito sem ajuste das constantes).

Procedendo a um desenvolvimento análogo ao realizado em 4.3.1.2, a equação 4.0.65 passa a ser:

$$\begin{aligned}
 du_a = U k \Bigg[ & \left( \frac{\mu_2 H_{11}t}{(\mu_1 + \mu_2)^2} + \frac{\mu_2 \eta_{12} H_{12}t}{(\mu_1 + \mu_2)^2} + \frac{\mu_4 H_{31}t}{(\mu_3 + \mu_4)^2} + \right. \\
 & \left. + \frac{\mu_4 H_{32}t}{(\mu_3 + \mu_4)^2} \right) \cdot P_1 - \left( \frac{\mu_1 H_{21}t}{(\mu_1 + \mu_2)^2} + \frac{\mu_1 \eta_{22} H_{22}t}{(\mu_1 + \mu_2)^2} + \right. \\
 & \left. + \frac{\mu_3 H_{41}t}{(\mu_3 + \mu_4)^2} + \frac{\mu_3 H_{42}t}{(\mu_3 + \mu_4)^2} \right) \cdot P_2 \Big] \quad \text{Equação 4.0.66}
 \end{aligned}$$

Da mesma maneira que foi feito em 4.3.1.2, agruparemos os termos constantes em ( $\bar{W}_{1t}$ ) e ( $\bar{W}_{2t}$ ):

$$du_a = U k (\bar{W}_{1t} \cdot P_1 - \bar{W}_{2t} \cdot P_2) \quad \text{Equação 4.0.67}$$

Durante a operação de ajustagem é possível, deslocando convenientemente o cursor do potenciômetro, encontrar um valor de ( $\eta_{12}$ ) ou ( $\eta_{22}$ ) capaz de satisfazer a equação 4.0.68.

$$\bar{W}_{1t} = \bar{W}_{2t} = W_t \quad \text{Equação 4.0.68}$$

Substituindo na equação 4.0.67, temos:

$$du_a = U k W_t (P_1 - P_2)$$

Equação 4.0.69

Onde:

$$W_t = \left( \frac{\mu_2 H_{11}t}{(\mu_1 + \mu_2)^2} + \frac{\mu_2 \eta_{12} H_{12}t}{(\mu_1 + \mu_2)^2} + \frac{\mu_4 H_{31}t}{(\mu_3 + \mu_4)^2} + \frac{\mu_4 H_{32}t}{(\mu_3 + \mu_4)^2} \right)$$

ou

$$W_t = \left( \frac{\mu_1 H_{21}t}{(\mu_1 + \mu_2)^2} + \frac{\mu_1 \eta_{22} H_{22}t}{(\mu_1 + \mu_2)^2} + \frac{\mu_3 H_{41}t}{(\mu_3 + \mu_4)^2} + \frac{\mu_3 H_{42}t}{(\mu_3 + \mu_4)^2} \right)$$

$$H_{ij}t = \frac{3 r_d^2 (1 - \nu^2)}{8 t^2 E} \left[ 1 - \left( \frac{r_{ij}}{r_d} \right)^2 \right]$$

$$\mu_1 = \bar{R}_1/R$$

$$\mu_2 = \bar{R}_2/R$$

$$\mu_3 = \bar{R}_3/R$$

$$\mu_4 = \bar{R}_4/R$$

$$\eta_{12} = \left( \frac{B + T - \beta T}{R_{12} + T + B} \right)^2$$

$$\eta_{22} = \left( \frac{B + T - \beta T}{R_{22} + T + B} \right)^2$$

Ao final da operação de ajuste das constantes, o cursor do potenciômetro é fixado e, daí para frente, a equação 4.0.69 passa a representar a *FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA* do transdutor diferencial de pressão, com diafragmas independentes e circuito interno de ajuste das constantes, conforme descrito em 4.3.1 e 4.3.1.3. Nesta configuração, a função transferência encontrada representa uma relação linear entre a diferença de pressão ( $P_1 - P_2$ ) e o sinal elétrico de saída do transdutor ( $du_a$ ).

## 5 - OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

A função transferência, desenvolvida em 4.3.1, definiu os parâmetros geométricos pertinentes ao transdutor analisado. Com base em um estudo simplificado, através de análise das equações, passaremos a pesquisar agora os valores mais adequados para estes parâmetros. Esta otimização considera somente os critérios de *MÁXIMA SENSIBILIDADE* e *MELHOR DESEMPENHO*, conforme 5.0.1 e 5.0.2.

5.0.1 - *MÁXIMA SENSIBILIDADE*. Por este critério, buscamos encontrar os valores geométricos que garantam o maior sinal elétrico de saída, para um mesmo valor de pressão.

5.0.2 - *MELHOR DESEMPENHO*. Por este critério, buscamos encontrar os valores geométricos que garantam melhores características estáticas de desempenho do transdutor.

### 5.1 - DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA RADIAL OU TANGENCIAL

Na discussão das equações 4.0.44 e 4.0.45, apresentada em 4.3.1.2, ficou claro que tanto a deformação específica tangencial como a radial são adequadas para atuar na direção ativa do extensômetro elétrico resistivo (colado sobre a superfície de um diafragma plano de espessura constante engastado na borda).

5.1.1 - *DIREÇÃO DE MÁXIMA SENSIBILIDADE*. A equação 4.0.48, apresentada em 4.3.1.2, mostrou que, para uma mesma pressão aplicada sobre um dos diafragmas, o valor do sinal elétrico de saída ( $du_0$ ) cresce com o aumento do valor da deformação específica ( $\epsilon_{ij}$ ). Observando as equações 4.0.33 e 4.0.34 e a figura 4.0.8, notamos que os maiores valores para as deformações específicas são obtidos na direção radial, com a relação  $(r/r_d)$  próxima do valor 1. [REF. 25] [REF. 12] [REF. 03]

5.1.2 - DIREÇÃO DE MELHOR DESEMPENHO. A não-linearidade da equação 4.0.54, mostrada em 4.3.1.2, é representada pela parcela (e), função da posição de montagem do extensômetro definida pela variável (r). Observando as equações 4.0.33 e 4.0.34 e a figura 4.0.8, notamos que, para valores da relação  $(r/r_d)$  próximos de 1, a deformação específica na direção radial sofre grande influência do erro de posicionamento do extensômetro, já que a derivada da curva nesta região é a maior encontrada. Qualquer variação no valor (r) provoca acentuadas modificações nos valores de  $(\epsilon_r)$ . Para valores da relação  $(r/r_d)$  próximos de zero, a deformação específica na direção tangencial sofre muito pouco com o erro de posicionamento do extensômetro, já que a derivada da curva nesta região é a menor encontrada (praticamente zero). Qualquer variação de (r) na colagem do extensômetro provoca pequenas variações de  $(\epsilon_t)$ . Esta característica é fundamental para o controle e redução do valor da parcela (e) associada à não-linearidade. Portanto, para melhor desempenho a direção tangencial é a mais adequada.

5.1.3 - ESCOLHA DA DIREÇÃO. No sentido de atender aos estreitos valores apresentados em 3.4, consideraremos mais indicado neste caso o uso da direção de melhor desempenho, conforme o argumentado em 5.1.2. Assim sendo, a DIREÇÃO ATIVA do extensômetro resistivo deve ser montada na DIREÇÃO TANGENCIAL do diafragma.

## 5.2 - DEFINIÇÃO GEOMÉTRICA DO DIAFRAGMA

A equação 4.0.54, apresentada em 4.3.1.2, mostrou que o diâmetro externo ( $r_d$ ), a espessura (t) e o raio de posicionamento do extensômetro (r), têm grande influência no valor do sinal elétrico de saída ( $du_0$ ), pois afeta a constante  $H_{ijt}$ .

5.2.1 - GEOMETRIA DEFINIDA PELA MÁXIMA SENSIBILIDADE. A equação 4.0.49 mostra que, para uma pressão constante aplicada em apenas um dos diafragmas, o valor do sinal elétrico de saída ( $du_0$ ) cresce com o aumento da constante ( $H_{ijt}$ ).

Retomando a equação 4.0.54, que nos dá o valor da constante ( $H_{ij_t}$ ), temos:

$$H_{ij_t} = \frac{3 r_d^2 (1 - \nu^2)}{8 t^2 E} \left[ 1 - \left( \frac{r_{ij}}{r_d} \right)^2 \right]$$

Efetuada o produto, temos:

$$H_{ij_t} = \frac{3 (1 - \nu^2)}{8 t^2 E} r_d^2 - \frac{3 (1 - \nu^2)}{8 t^2 E} r_{ij}^2 \quad \text{Equação 5.0.1}$$

A figura 5.0.1 mostra a superfície definida pela variação do valor de ( $H_{ij_t}$ ) em função do raio externo do diafragma ( $r_d$ ) e do raio de posicionamento do extensômetro ( $r_{ij}$ ), para uma particular espessura do diafragma ( $t_0$ ). Na verdade, a equação 5.0.1 caracteriza uma família de superfícies, cada uma delas definidas por um particular valor da espessura ( $t$ ).

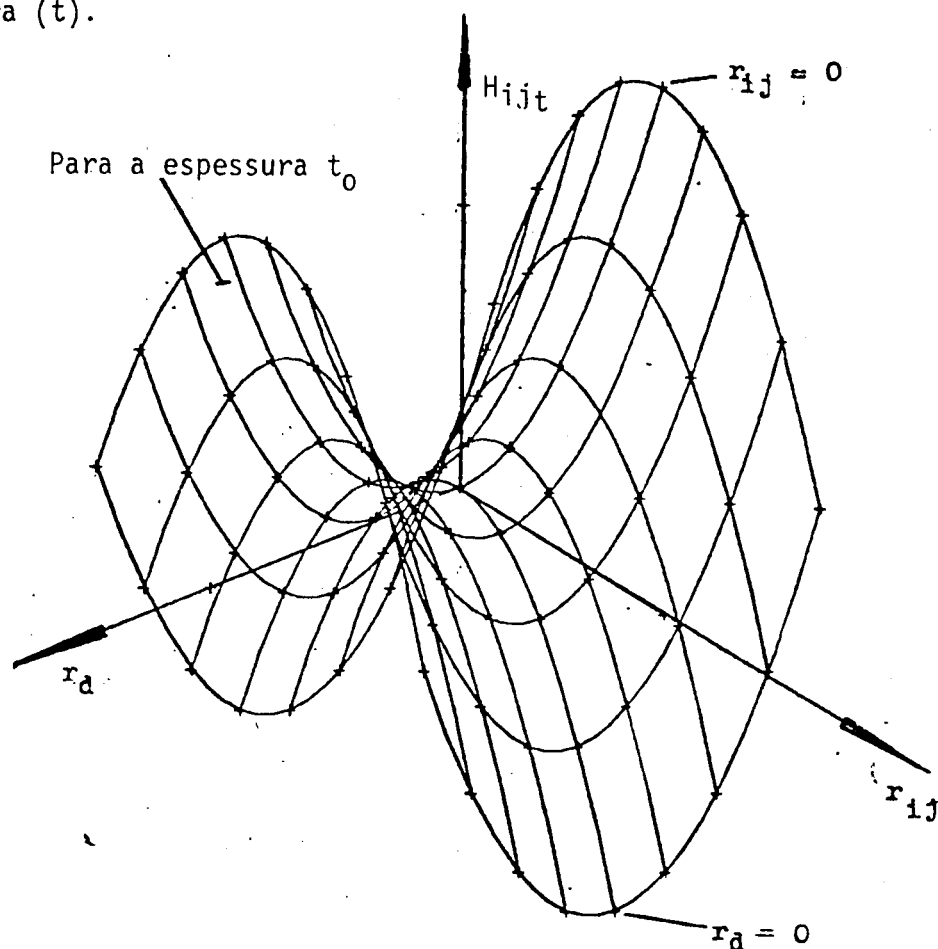


Figura 5.0.1 - Superfície Definida pela Variação de ( $H_{ij_t}$ ) .

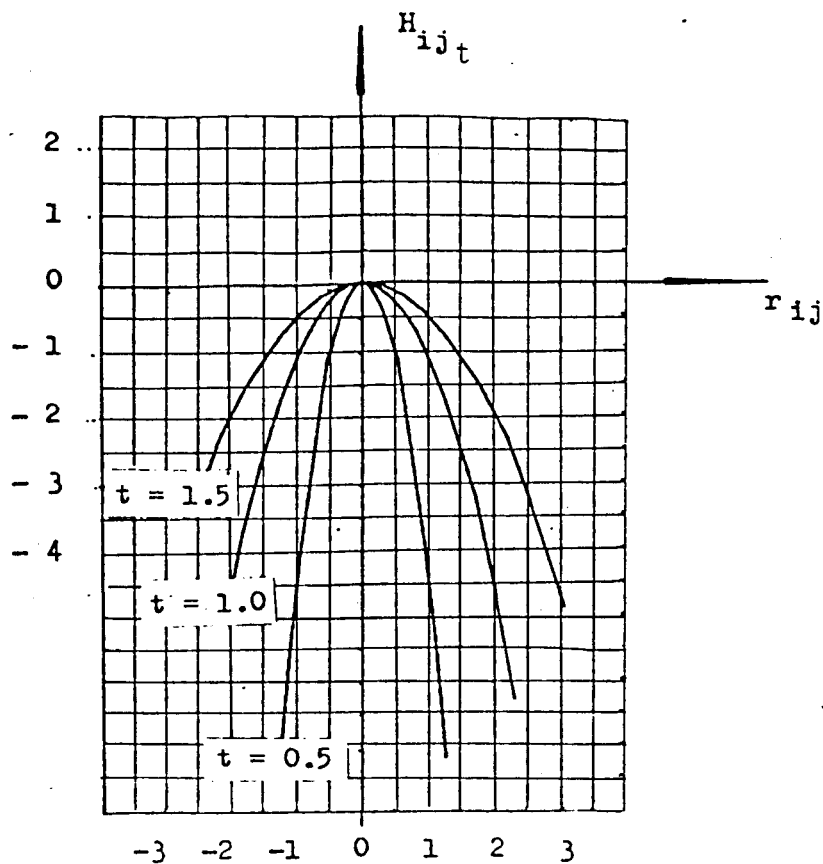


Figura 5.0.2 - Interseção das Superfícies ( $t = 0,5$ ), ( $t = 1,0$ ) e ( $t = 1,5$ ) com o Plano ( $r_{ij} = 0$ )

A variação do valor de ( $H_{ij_t}$ ) em função da espessura ( $t$ ) do diafragma, pode ser melhor compreendida analisando as seções apresentadas nas figuras 5.0.2 e 5.0.3.

Analisando a equação 5.0.1 e as figuras 5.0.1, 5.0.2 e 5.0.3 e, ainda, lembrando que, quanto maior o valor da constante ( $H_{ij_t}$ ), maior é o valor do sinal elétrico de saída ( $du_0$ ) do transdutor, temos:

5.2.1.1 - Quanto *MENOR* o valor da espessura ( $t$ ) do diafragma, *MAIOR* é o valor do sinal de saída, ( $du_0$ ).

5.2.1.2 - Quanto *MAIOR* o valor do raio externo ( $r_d$ ) do diafragma, *MAIOR* é o valor do sinal de saída, ( $du_0$ ).

5.2.1.3 - Quanto *MENOR* o valor do raio ( $r_{ij}$ ) de posicionamento no diafragma, *MAIOR* é o valor do sinal elétrico de saída, ( $du_0$ ). Significa dizer que devemos colar os extensômetros resistivos na direção tangencial e nas proximidades do centro do diafragma.

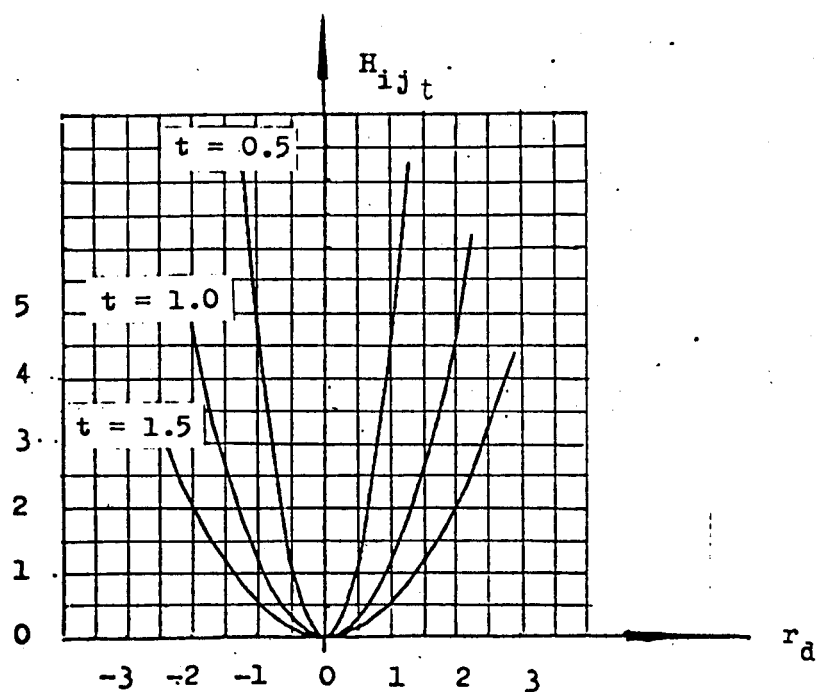


Figura 5.0.3 - Interseção das Superfícies  $(t = 0,5)$ ,  $(t = 1,0)$  e  $(t = 1,5)$  com o Plano  $(r_d = 0)$ .

## 6 - PROJETO DE UM TRANSDUTOR DIFERENCIAL DE PRESSÃO

Com a finalidade de mostrar os detalhes construtivos de um transdutor de pressão diferencial, apresentaremos agora algumas informações relativas ao projeto do transdutor protótipo.

### 6.1 - FAIXA DE APLICAÇÃO DO TRANSDUTOR PROTÓTIPO

Visando sempre às condições usualmente encontradas nas aplicações industriais, os seguintes valores foram adotados para o protótipo do transdutor diferencial de pressão.

6.1.1 - PRESSÃO NOMINAL NO DIAFRAGMA 1. É a máxima pressão atuante sobre o diafragma 1, em condições normais de operação. O valor adotado para o protótipo será de 5,00 kgf/cm<sup>2</sup>.

6.1.2 - PRESSÃO NOMINAL NO DIAFRAGMA 2. É a máxima pressão atuante sobre o diafragma 2, em condições normais de operação. O valor adotado para o protótipo será de 5,00 kgf/cm<sup>2</sup>.

6.1.3 - SOBREPRESSÃO ADMISSÍVEL. É o maior valor de pressão que pode ser aplicado, ultrapassando o valor da pressão nominal, sem produzir uma mudança permanente nas características estáticas de desempenho do transdutor. Para os diafragmas 1 e 2 adotaremos um valor de sobrepressão igual a 15% da pressão nominal.

### 6.2 - DETALHES CONSTRUTIVOS DO TRANSDUTOR PROTÓTIPO

O projeto do transdutor protótipo está baseado na solução construtiva que emprega diafragmas independentes e nas considerações apresentadas em 4.3.1. A figura 6.0.1 mostra os detalhes mais importantes do transdutor protótipo, e a tabela 6.1 descreve cada uma das partes indicadas.

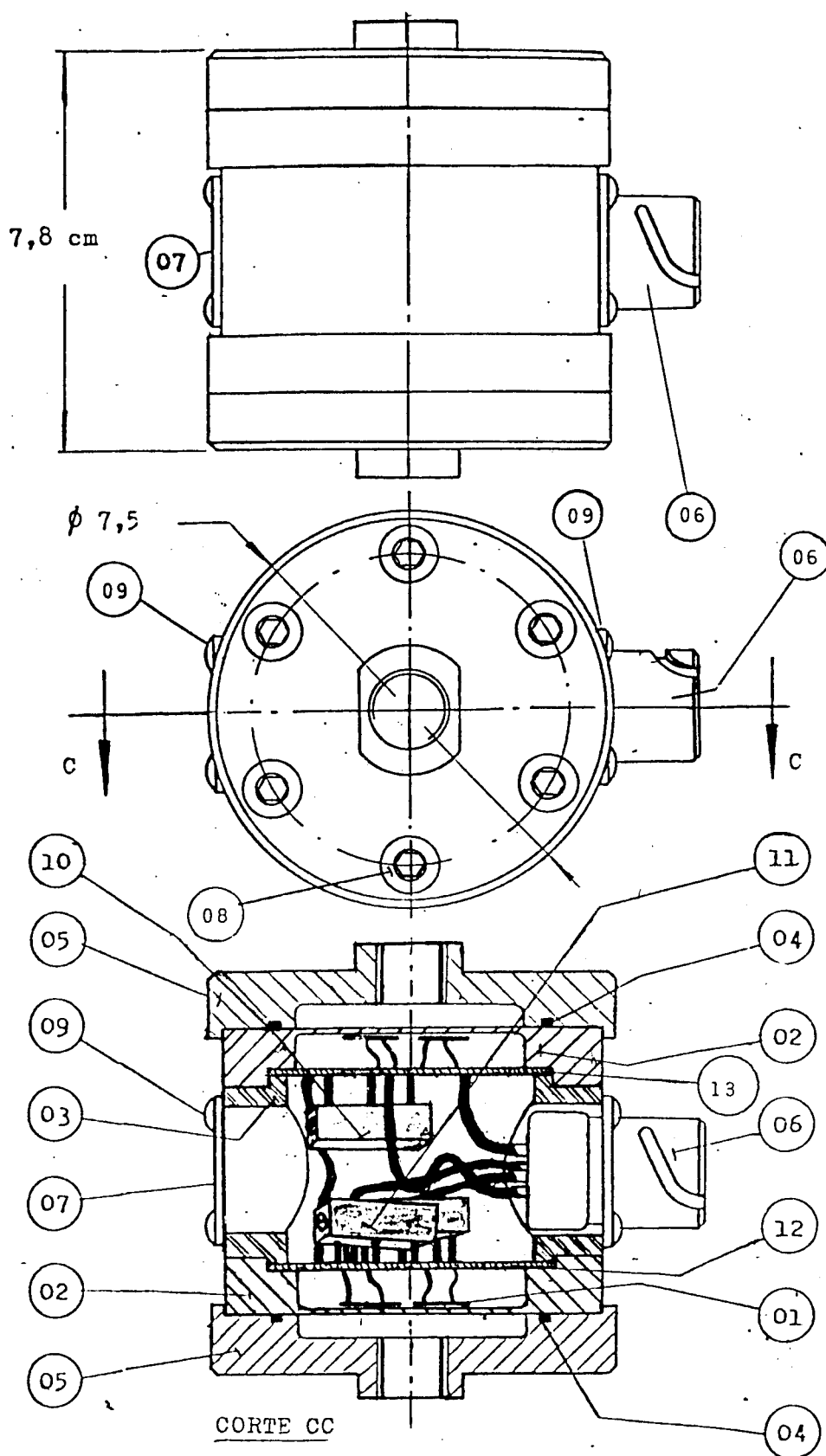
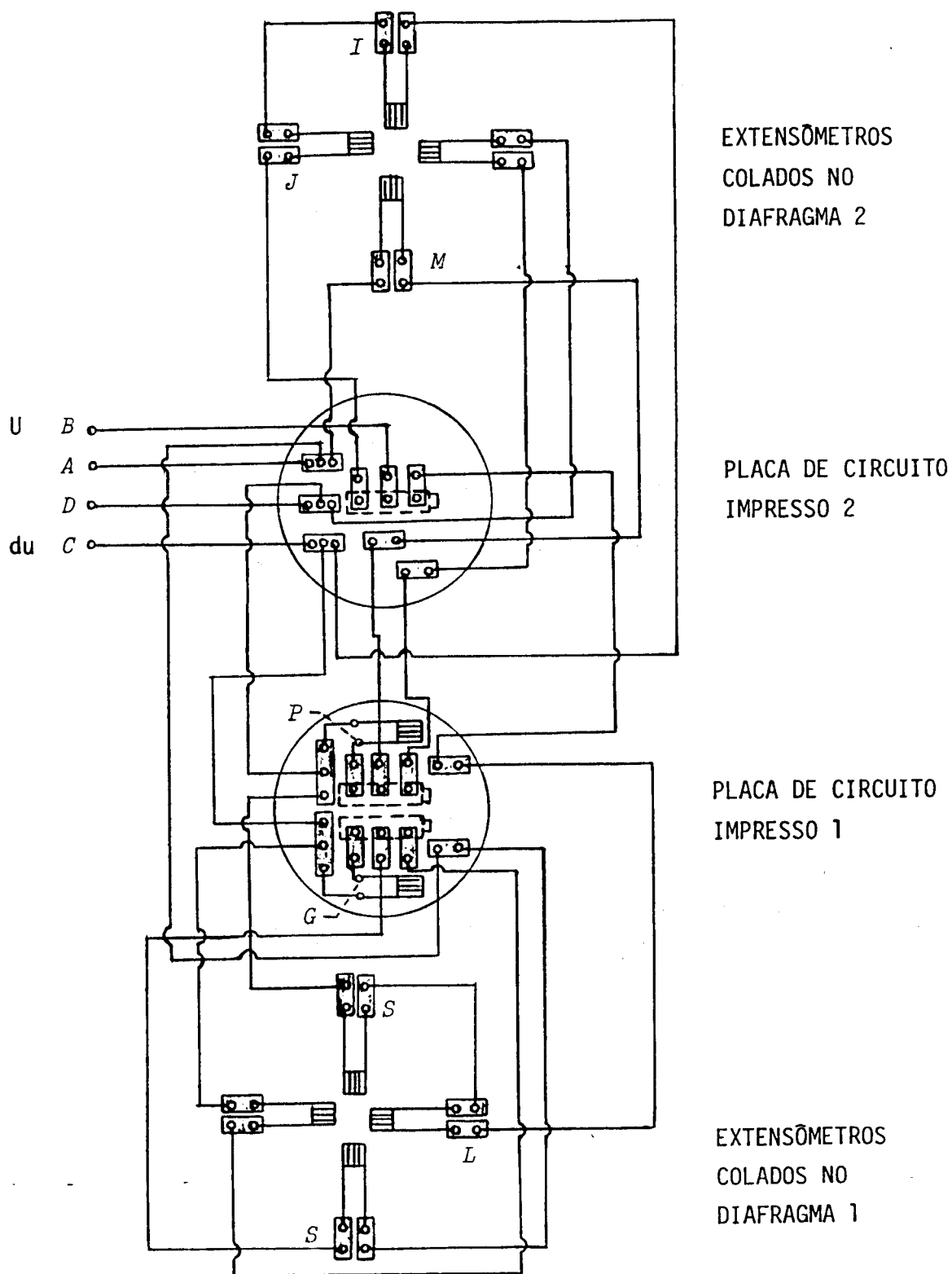


Figura 6.0.1 - Protótipo do Transdutor Diferencial de Pressão. Detalhes Construtivos.

| PROTÓTIPO DO TRANSDUTOR DIFERENCIAL DE PRESSÃO |            | TABELA 6.0.1                                                    |
|------------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------------|
| NÚMERO                                         | QUANTIDADE | DESCRIÇÃO DA PARTE INDICADA NA FIGURA 6.0.1                     |
| 01                                             | 08         | Extensômetro Resistivo KYOWA (KFC-1-C1-11)                      |
| 02                                             | 02         | Diafragma Engastado na Base Anular Rígida                       |
| 03                                             | 01         | Corpo Central Rígido                                            |
| 04                                             | 02         | Retentor Cilíndrico de Borracha                                 |
| 05                                             | 02         | Tampa de Conexão e Fechamento do Diafragma                      |
| 06                                             | 01         | Conector WINNER Tipo Fêmea de Sete Pinos (WSF-7F)               |
| 07                                             | 01         | Tampa de Acesso e Inspeção                                      |
| 08                                             | 12         | Parafuso de Cabeça Cilíndrica M5 × 22,0 (P 0,8)                 |
| 09                                             | 08         | Parafuso de Cabeça Redonda M3 × 6,0 (P 0,5)                     |
| 10                                             | 01         | Potenciômetro de Balanceamento ( <i>TRIMPOT</i> - 10 $\Omega$ ) |
| 11                                             | 02         | Potenciômetro de Ajuste ( <i>TRIMPOT</i> - 100 $\Omega$ )       |
| 12                                             | 01         | Placa de Circuito Impresso 1                                    |
| 13                                             | 01         | Placa de Circuito Impresso 2                                    |

Um esquema completo das ligações elétricas do transdutor pode ser visto na figura 6.0.2. É importante notar que o esquema de ligações adotado está de acordo com o circuito elétrico da figura 4.0.14. Nesta configuração, o sistema de ajuste das constantes ( $\bar{W}_{1t}$ ) e ( $\bar{W}_{2t}$ ) está *CONECTADO* ao extensômetro. Ao se desligar o condutor nos pontos (*G*) e (*P*) do esquema de ligações adotado, o circuito se reduz ao apresentado na figura 4.0.12. Nesta configuração, o sistema de ajuste das constantes está *DESCONECTADO* do extensômetro.



Pontos (G) e (P) CONECTADOS: Circuito conforme figura 4.0.14

Pontos (G) e (P) DESCONECTADOS: Circuito conforme figura 4.0.12

Figura 6.0.2 - Esquema das Ligações Elétricas do Transdutor Protótipo.

### 6.3 - MATERIAL DO DIAFRAGMA

O material usado na confecção dos diafragmas deve, necessariamente, possuir um Módulo de Elasticidade estável e conhecido, sem apresentar o fenômeno de histerese das deformações mecânicas e o fenômeno da fluência em temperatura de até 70°C. É também importante, nas aplicações industriais, que o material do diafragma tenha alta resistência à corrosão em meios ácidos e básicos.

Os aços inoxidáveis classificados como austeníticos, quanto à microestrutura, e identificados segundo SAE/AISI como do grupo 3XX são os mais indicados para atender a estes requisitos. Dentro do grupo SAE/AISI 3XX foi escolhido o aço inoxidável SAE/AISI 304, e suas características estão relacionadas na tabela 6.2.

### 6.4 - ESPESSURA DO DIAFRAGMA

Conforme orientação apresentada em 5.2.1.1, a espessura (t) do diafragma deve ser a menor possível. Os processos de usinagem usualmente disponíveis permitem em geral uma boa precisão em valores de espessuras superiores a 0,08 cm. Este valor mínimo será o valor adotado para a espessura dos diafragmas 1 e 2.

### 6.5 - DIMENSIONAMENTO DO RAO EXTERNO DO DIAFRAGMA

Conforme orientação apresentada em 5.2.1.2, o raio externo ( $r_d$ ) do diafragma deve ser o maior possível. As equações 4.0.29 e 4.0.30 mostraram que as tensões ( $\sigma_t$ ) e ( $\sigma_r$ ) crescem com o valor do raio externo ( $r_d$ ). Para o campo elástico, vale dizer que um ponto da superfície do diafragma está solicitado conforme mostra a figura 6.0.3. [REF. 14] [REF. 22]

Analisando este estado duplo de tensões, concluímos que a tensão crítica ( $\sigma_{cr}$ ) é de compressão, na direção radial, para ( $r = r_d$ ), e seu valor pode ser calculado pela equação 6.0.1:

$$-\sigma_{cr} = \frac{3 P r_d^2}{4 t^2} \quad \text{Equação 6.0.1}$$

| CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL DOS DIAFRAGMAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | TABELA 6.2 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| ESPECIFICAÇÃO: SAE/AISI 304                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |            |
| CONDIÇÃO: RECOZIDO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |            |
| <p>COMPOSIÇÃO QUÍMICA: Cromo (Cr) 18,0-20,0%; Níquel (Ni) 8,0-11,0%; Carbono (C) máx. 0,08%; Manganês (Mn) máx. 2,0%; Fósforo (P) máx. 0,04%; Enxofre (S) máx. 0,03%; Silício (Si) 1,0%; e outros em menor teor. [ REF. 15 ]</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |
| <p>CORROSÃO: O ataque gradual e contínuo do material pelo meio circunvizinho, tendo como resultado óxidos ou sais, é função da temperatura, da capacidade oxidante do meio e da composição química do material. O SAE/AISI 304 permite a sua utilização na maioria dos meios habitualmente encontrados, apresentando excelente comportamento em meios ácidos oxidantes e em soluções básicas. Um comportamento muito ruim é esperado em ácidos redutores, em meios que contenham cloretos, iodetos, fluoretos, sulfetos ou, ainda, em soluções alcalinas concentradas em alta temperatura.</p>                                                                    |            |
| <p>USINAGEM: Na dureza de 150 a 250 Brinell, apresenta de 70 a 90% de usinabilidade quando comparado ao padrão AISI B1112, conforme <i>ASM - METAIS HANDBOOK</i>, o que garante boa usinagem e precisão.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |            |
| <p>PROPRIEDADES MECÂNICAS: (somente obtidas na direção do grão)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Tensão Limite de resistência e tração <math>F_{tu} = 5.270 \text{ kgf/cm}^2</math></li> <li>● Tensão Limite de resistência ao cisalhamento <math>F_{su} = 2.810 \text{ kgf/cm}^2</math></li> <li>● Tensão Limite de escoamento a tração <math>F_{ty} = 2.100 \text{ kgf/cm}^2</math></li> <li>● Tensão Limite de escoamento a compressão <math>F_{cy} = 2.460 \text{ kgf/cm}^2</math></li> <li>● Módulo de Elasticidade <math>E = 1.968.400 \text{ kgf/cm}^2</math></li> <li>● Coeficiente de Poisson <math>\nu = 0,30</math> [ REF. 15 ]</li> </ul> |            |

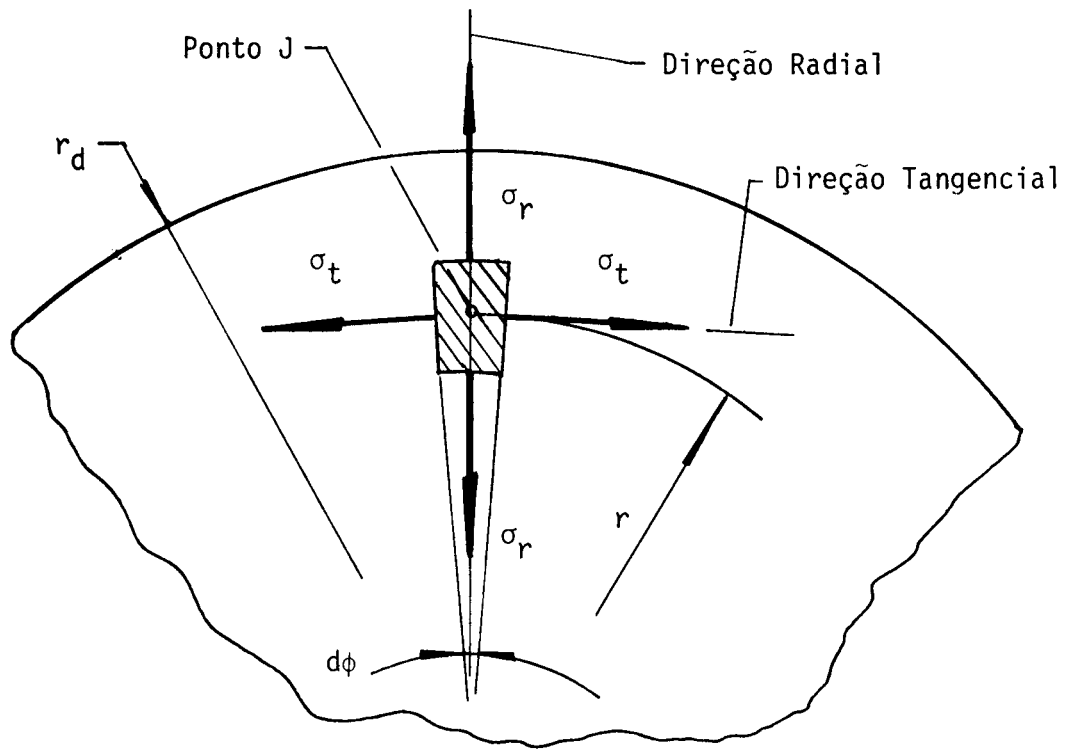


Figura 6.0.3 - Estado de Solicitação na Superfície do Diafragma.

Fazendo a tensão crítica ( $\sigma_{cr}$ ), obtida para uma pressão igual à soma da pressão nominal com a sobrepressão (15%), assumir o valor da tensão limite de escoamento a compressão do material, temos:

$$- 2.460 = - \frac{3 \cdot 5,75 \cdot r_d^2}{4 \cdot 0,08^2} \qquad r_d = 1,90 \text{ cm}$$

## 7 - ESTIMATIVA DO DESEMPENHO PARA O TRANSDUTOR PROTÓTIPO

Com base nos parâmetros efetivamente obtidos na fabricação do transdutor diferencial de pressão construído conforme figura 6.0.1, estimaremos o sinal elétrico de saída usando a função transferência de senvolvida em 4.3.1.

### 7.1 - CONSTRUÇÃO DO TRANSDUTOR PROTÓTIPO

A fabricação do transdutor de pressão diferencial foi iniciada com a usinagem das partes apresentadas na figura 6.0.1. Cuidados especiais foram tomados no sentido de obter uma *espessura constante* ao longo de todo o diafragma. Foi também nesta etapa de fabricação que as partes foram ajustadas e o conjunto montado, como mostra a figura 7.0.1.

Na etapa seguinte foi feita a preparação da superfície conforme o procedimento indicado para obter uma boa colagem dos extensôme-tros. De acordo com a orientação apresentada em 5.2.1.3, os extensôme-tros foram colados o mais próximo possível do centro, conforme mostra a figura 7.0.2.

Na última etapa foram feitas as ligações elétricas de acordo com o circuito da figura 6.0.2.

### 7.2 - PARÂMETROS ALCANÇADOS NO TRANSDUTOR PROTÓTIPO

A figura 7.0.3 e a tabela 7.1 apresentam os valores efetivamente alcançados no transdutor diferencial de pressão construído.

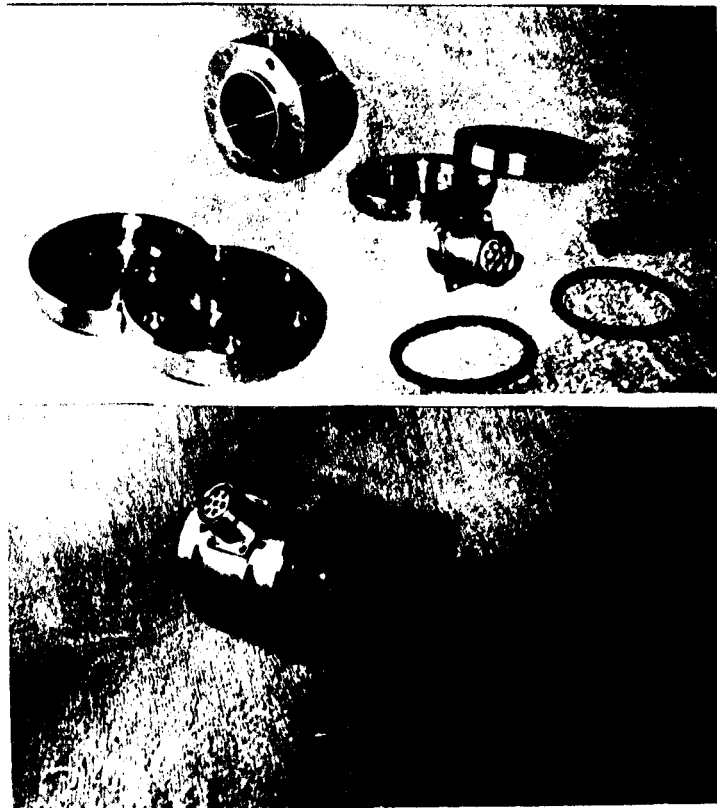


Figura 7.0.1 - Partes Fabricadas e Conjunto Montado.  
Transdutor Diferencial de Pressão.



Figura 7.0.2 - Diafragma 1 e Diafragma 2.  
Extensômetros Colados Sobre a Superfície.

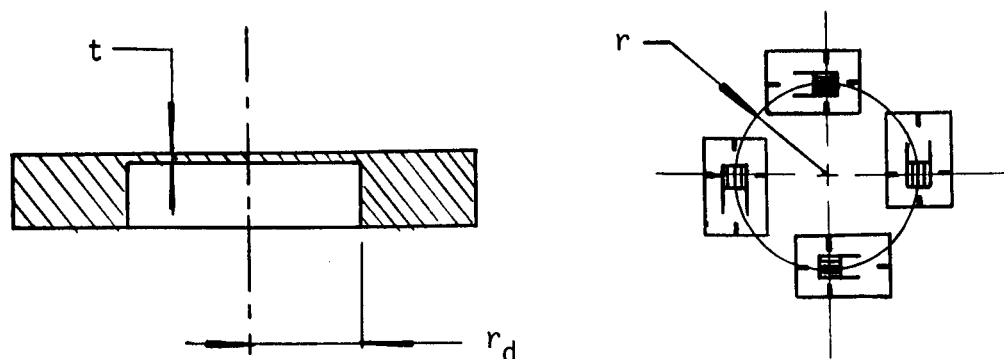


Figura 7.0.3 - Parâmetros Medidos no Transdutor Construído.

| VALORES DOS PARÂMETROS MEDIDOS<br>(MÉDIA ARITMÉTICA DE 4 LEITURAS)                                                                                                                                                             |          |                     | TABELA 7.1 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------------|------------|
| DIAFRAGMA                                                                                                                                                                                                                      | t (cm)   | r <sub>d</sub> (cm) | r (cm)     |
| 1                                                                                                                                                                                                                              | 0,078    | 1,90                | 0,35       |
| 2                                                                                                                                                                                                                              | 0,079    | 1,90                | 0,35       |
| RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS: (Valor Nominal)                                                                                                                                                                                        |          |                     |            |
| T = 100Ω                                                                                                                                                                                                                       | B = 120Ω | S = 10Ω             | G = 10Ω    |
| ALIMENTAÇÃO EXTERNA EMPREGADA: U = 10,076 Volts                                                                                                                                                                                |          |                     |            |
| Marca do Extensômetro: KYOWA<br>Tipo: KFC-1-C1-11<br>Comprimento da Grade: 0,1 cm<br>Resistência Elétrica: 120,0 ± 0,3Ω<br>Fator do Extensômetro: 2,15 ± 1,0%<br>Lote: Y737 - 330<br>Adesivo: M BOND 200 da Micro Measurements |          |                     |            |

### 7.3 - DESEMPENHO COM CIRCUITO DE AJUSTE DESCONECTADO

Substituindo os valores encontrados na equação 4.0.54, temos:

$$H_{12t} = H_{11t} = H_{31t} = H_{32t} = 0,00009938 \text{ cm}^2/\text{kgf} \quad \text{Equação 7.0.1}$$

$$H_{21t} = H_{22t} = H_{41t} = H_{42t} = 0,00009688 \text{ cm}^2/\text{kgf} \quad \text{Equação 7.0.2}$$

Portanto:

$$W_{1t} = 0,0003754 \text{ cm}^2/\text{kgf}$$

$$W_{2t} = 0,0003875 \text{ cm}^2/\text{kgf}$$

Pela equação 4.0.53, temos:

$$e = 0,00001003 \text{ cm}^2/\text{kgf}$$

A equação 4.0.54 se reduz a:

$$du_0 = 0,0010493 (P_1 - P_2) + 0,0000271 P_1 \quad \text{Equação 7.0.3}$$

A tabela 7.2 apresenta o valor do sinal de saída esperado para dois valores de pressão diferencial.

| TRANSDUTOR COM CIRCUITO DE AJUSTE DESCONECTADO |                              | TABELA 7.2 |
|------------------------------------------------|------------------------------|------------|
| DP = (P <sub>1</sub> - P <sub>2</sub> )        | ESTIMATIVA DO SINAL DE SAÍDA |            |
| + 5,00 kgf/cm <sup>2</sup>                     | + 5,38 mV                    |            |
| - 5,00 kgf/cm <sup>2</sup>                     | - 5,24 mV                    |            |

#### 7.4 - DESEMPENHO COM CIRCUITO DE AJUSTE CONECTADO

Ajustando as constantes para o máximo sinal de saída, a variável ( $\beta$ ) da equação 4.0.60 assume o valor zero e:

$$\eta_{12} = \eta_{22} = 0,4187$$

Ajustando as constantes para o menor sinal de saída, a variável ( $\beta$ ) da equação 4.0.60 assume o valor 1,0 e:

$$\eta_{12} = \eta_{22} = 0,1246$$

Substituindo os valores de resistências elétricas na equação 4.0.63, temos:

$$\mu_1 = \mu_2 = 1,64$$

$$\mu_3 = \mu_4 = 2,08$$

Retomando os resultados apresentados pelas equações 7.0.1 e 7.0.2 e substituindo na equação 4.0.69, temos:

##### 7.4.1 - CONDIÇÃO DE MÁXIMO SINAL DE SAÍDA:

$$du_a = 0,0009707 (P_1 - P_2)$$

Equação 7.0.4

##### 7.4.2 - CONDIÇÃO DE MENOR SINAL DE SAÍDA:

$$du_a = 0,0008750 (P_1 - P_2)$$

Equação 7.0.5

A tabela 7.3 apresenta o valor do sinal de saída esperado para dois valores de pressão diferencial.

| TRANSDUTOR COM CIRCUITO DE AJUSTE CONECTADO |                              | TABELA 7.3   |
|---------------------------------------------|------------------------------|--------------|
| DP ( $P_1 - P_2$ )                          | ESTIMATIVA DO SINAL DE SAÍDA |              |
|                                             | MÁXIMO SINAL                 | MÍNIMO SINAL |
| + 5,00 kgf/cm <sup>2</sup>                  | + 4,85 mV                    | + 4,37 mV    |
| - 5,00 kgf/cm <sup>2</sup>                  | - 4,85 mV                    | - 4,37 mV    |

## 8 - ENSAIO DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL

Apresentaremos agora, de maneira resumida, alguns detalhes do ensaio do transdutor de pressão diferencial, construído conforme os estudos apresentados. A finalidade básica do ensaio é determinar o desempenho estático do transdutor nas condições ambientais descritas em 2.6.1.1.

### 8.1 - BANCO DE ENSAIO

A figura 8.0.1 mostra o banco de ensaio usado, e o esquema da figura 8.0.2 define suas partes principais. A tabela 8.1 apresenta as especificações relativas aos instrumentos utilizados.

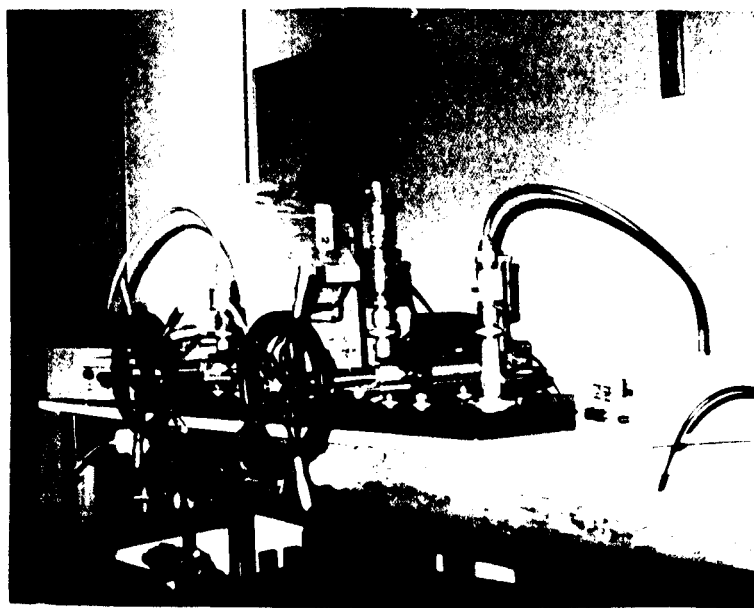


Figura 8.0.1 - Banco de Ensaio do Transdutor.

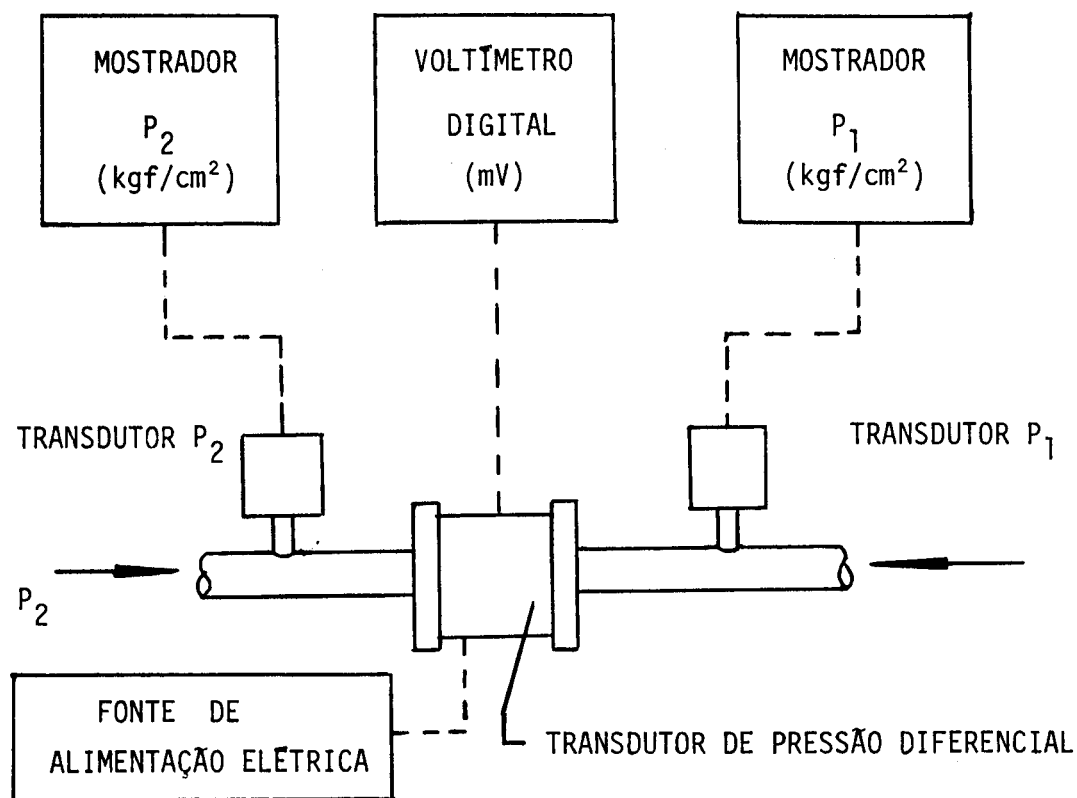


Figura 8.0.2 - Esquema do Banco de Ensaio do Transdutor.

| CARACTERÍSTICAS DA INSTRUMENTAÇÃO DO BANCO DE ENSAIO |                                                                                                                                    | TABELA 8.1 |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| INSTRUMENTO                                          | DESCRIÇÃO                                                                                                                          |            |
| TRANSDUTOR $P_1$                                     | Transdutor de pressão relativa 20,00 kgf/cm <sup>2</sup><br>Fabricante: INTERFACE      Tipo: PT-20<br>Número de identificação: 27A |            |
| TRANSDUTOR $P_2$                                     | Transdutor de pressão relativa 20,00 kgf/cm <sup>2</sup><br>Fabricante: INTERFACE      Tipo: PT-20<br>Número de identificação: 27  |            |
| MOSTRADOR $P_1$                                      | Mostrador e condicionador de sinal (kgf/cm <sup>2</sup> )<br>Fabricante: INTERFACE      Tipo: IA-02<br>Número de identificação: 26 |            |

(Continua)

(Continuação da Tabela 8.1)

| CARACTERÍSTICAS DA INSTRUMENTAÇÃO DO BANCO DE ENSAIO |                                                                                                                                   | TABELA 8.1 |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| MOSTRADOR $P_2$                                      | Mostrador e condicionador de sinal ( $\text{kgf/cm}^2$ )<br>Fabricante: INTERFACE      Tipo: IA-01<br>Número de identificação: 88 |            |
| VOLTÍMETRO                                           | Voltímetro digital<br>Fabricante: DATA PRECISION      Tipo: 248<br>Número de identificação: 06                                    |            |
| FONTE                                                | Fonte de alimentação do transdutor diferencial<br>Fabricante: LABO      Tipo: 2025<br>Número de identificação: 49753              |            |

## 8.2 - ETAPAS DO ENSAIO DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL

Durante o ensaio do transdutor de pressão diferencial, as seguintes etapas foram cumpridas:

8.2.1 - BALANCEAMENTO E AJUSTE DAS CONSTANTES. Após algumas tentativas foi possível encontrar para cada um dos cursores uma posição que gatan-tisse um sinal de saída igual a zero quando  $(P_1) = (P_2) = 5,00 \text{ kgf/cm}^2$ , e também quando  $(P_1) = (P_2) = 0,00 \text{ kgf/cm}^2$ . Nestas condições, o circui-to apresentado em 4.0.14 está ajustado e balanceado, possibilitando a leitura do sinal de saída para o transdutor com circuito interno de ajus-te *CONECTADO*.

8.2.2 - DESCONECÇÃO DO CIRCUITO DE AJUSTE DAS CONSTANTES. Para desati-var o circuito de ajuste das constantes, o condutor indicado na figura 6.0.2 foi interrompido nos ponto (G) e (P).

8.2.3 - BALANCEAMENTO SEM AJUSTE DAS CONSTANTES. Para o valor da pres-são  $(P_1) = P_2) = 0,00 \text{ kgf/cm}^2$ , o circuito foi balanceado, fazendo o si-nal de saída igual a zero, com a movimentação do cursor ainda ativo do potenciômetro de balanceamento. Nesta condição, o circuito 4.0.12 está balanceado, possibilitando a leitura do sinal de saída para o transdutor com circuito interno de ajuste *DESCONECTADO*.

## 9 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os valores obtidos no ensaio do transdutor resistivo de pressão diferencial estão apresentados nesta parte do trabalho. A determinação da não-linearidade, histerese e repetibilidade está de acordo com a formulação desenvolvida em 2.6.

### 9.1 - CIRCUITO INTERNO DE AJUSTE CONECTADO

Os resultados obtidos nesta configuração, em três ciclos sucessivos de *CARREGAMENTO* e *DESCARREGAMENTO*, são mostrados nas tabelas 9.01, 9.02, 9.03, 9.04, 9.05, 9.06, 9.07, 9.08, 9.09, 9.10, 9.11, 9.12 e 9.13. Nestas tabelas, podemos verificar a não-linearidade, histerese e repetibilidade em cada condição de medida.

Nas tabelas 9.14, 9.15, 9.16, 9.17 e 9.18, os valores do sinal de saída estão agrupados em função da diferença de pressão aplicada.

A figura 9.0.1 mostra uma curva de calibração típica para esta configuração do transdutor.

### 9.2 - CIRCUITO INTERNO DE AJUSTE DESCONECTADO

Os resultados obtidos nesta configuração, em três ciclos sucessivos de *CARREGAMENTO* e *DESCARREGAMENTO*, são mostrados nas tabelas 9.20, 9.21, 9.22, 9.23 e 9.24. Nestas tabelas, podemos verificar a não-linearidade, histerese e repetibilidade em cada condição de medida.

Nas tabelas 9.25, 9.26, 9.27 e 9.28, os valores do sinal elétrico de saída estão agrupados em função da diferença de pressão aplicada.

A figura 9.0.3 mostra uma curva de calibração típica para esta configuração do transdutor.

### 9.3 - CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DE DESEMPENHO DO PROTÓTIPO

Os *MÁXIMOS VALORES* de não-linearidade, histerese, repetibilidade e desvio em relação à média aritmética das leituras estão apresentados na tabela 9.30, e definem as *CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DE DESEMPENHO DO TRANSDUTOR PROTÓTIPO*.

RESULTADOS DO ENSAIO NA CONDICAO P1 = 0,00 KGF/CM2 CONSTANTE TABELA

ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS TEMPERATURA = 26,5 C 9.01

| (P1)    | (P2)    | (DP)    | (DU)  | (DE)   | N-LIN. | HISTER. | REPET. |
|---------|---------|---------|-------|--------|--------|---------|--------|
| KGF/CM2 | KGF/CM2 | KGF/CM2 | NV    | PV     | O/D FE | O/D FE  | C/D FE |
| 0,00    | 0,00    | 0,00    | 0,00  | 0,000  | 0,00   | -       | 0,00   |
| 0,00    | 0,50    | -0,50   | -0,46 | -0,466 | 0,13   | -       | 0,00   |
| 0,00    | 1,00    | -1,00   | -0,91 | -0,932 | 0,47   | -       | 0,00   |
| 0,00    | 1,50    | -1,50   | -1,37 | -1,398 | 0,60   | -       | 0,00   |
| 0,00    | 2,00    | -2,00   | -1,83 | -1,864 | 0,73   | -       | 0,00   |
| 0,00    | 2,50    | -2,50   | -2,29 | -2,330 | 0,85   | -       | 0,00   |
| 0,00    | 3,00    | -3,00   | -2,76 | -2,796 | 0,77   | -       | 0,43   |
| 0,00    | 3,50    | -3,50   | -3,22 | -3,262 | 0,90   | -       | 0,21   |
| 0,00    | 4,00    | -4,00   | -3,70 | -3,728 | 0,60   | -       | 0,43   |
| 0,00    | 4,50    | -4,50   | -4,19 | -4,194 | 0,08   | -       | 0,00   |
| 0,00    | 5,00    | -5,00   | -4,66 | -4,660 | 0,00   | -       | 0,00   |
| 0,00    | 4,50    | -4,50   | -4,18 | -4,194 | 0,30   | 0,21    | 0,21   |
| 0,00    | 4,00    | -4,00   | -3,71 | -3,728 | 0,38   | 0,21    | 0,21   |
| 0,00    | 3,50    | -3,50   | -3,23 | -3,262 | 0,68   | 0,21    | 0,21   |
| 0,00    | 3,00    | -3,00   | -2,77 | -2,796 | 0,56   | 0,21    | 0,43   |
| 0,00    | 2,50    | -2,50   | -2,30 | -2,330 | 0,64   | 0,21    | 0,21   |
| 0,00    | 2,00    | -2,00   | -1,84 | -1,864 | 0,51   | 0,21    | 0,21   |
| 0,00    | 1,50    | -1,50   | -1,37 | -1,398 | 0,60   | 0,00    | 0,00   |
| 0,00    | 1,00    | -1,00   | -0,91 | -0,932 | 0,47   | 0,00    | 0,00   |
| 0,00    | 0,50    | -0,50   | -0,47 | -0,466 | 0,08   | 0,21    | 0,21   |
| 0,00    | 0,00    | 0,00    | -0,01 | 0,000  | -0,21  | 0,21    | 0,21   |

C I R C U I T O I N F E R N O D E A J U S T E C O N E C T A D C  
(P1) = PRESSAO 1 (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (F1-P2)  
(P2) = PRESSAO 2 (DU) = MEDIA ARITMETICA PARA 3 LEITURAS  
(FE) = FUNDO DE ESCALA (DE) = RETA DE REFERENCIA PELO C.COS PONTO FINAIS

RESULTADOS DO ENSAIO NA CONDICAO P2 = 0,00 KGF/CM2 CONSIANTE TABELA

ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS TEMPERATURA = 26,5 C 9.02

| (P1)    | (P2)    | (CP)    | (DU) | (DE)  | N.LIN. | HISTER. | REPE.  |
|---------|---------|---------|------|-------|--------|---------|--------|
| KGF/CM2 | KGF/CM2 | KGF/CM2 | MV   | MV    | O/O FE | O/O FE  | O/O FE |
| 0,00    | 0,00    | 0,00    | 0,00 | 0,000 | 0,00   | -       | 0,00   |
| 0,50    | 0,00    | 0,50    | 0,45 | 0,465 | -0,32  | -       | 0,00   |
| 1,00    | 0,00    | 1,00    | 0,90 | 0,930 | -0,64  | -       | 0,21   |
| 1,50    | 0,00    | 1,50    | 1,37 | 1,395 | -0,54  | -       | 0,00   |
| 2,00    | 0,00    | 2,00    | 1,82 | 1,860 | -0,86  | -       | 0,00   |
| 2,50    | 0,00    | 2,50    | 2,29 | 2,325 | -0,75  | -       | 0,00   |
| 3,00    | 0,00    | 3,00    | 2,76 | 2,790 | -0,64  | -       | 0,00   |
| 3,50    | 0,00    | 3,50    | 3,24 | 3,255 | -0,32  | -       | 0,21   |
| 4,00    | 0,00    | 4,00    | 3,70 | 3,720 | -0,43  | -       | 0,43   |
| 4,50    | 0,00    | 4,50    | 4,17 | 4,185 | -0,32  | -       | 0,00   |
| 5,00    | 0,00    | 5,00    | 4,65 | 4,650 | 0,00   | -       | 0,21   |
| 4,50    | 0,00    | 4,50    | 4,16 | 4,165 | -0,54  | 0,21    | 0,21   |
| 4,00    | 0,00    | 4,00    | 3,69 | 3,720 | -0,64  | 0,21    | 0,43   |
| 3,50    | 0,00    | 3,50    | 3,22 | 3,255 | -0,75  | 0,43    | 0,21   |
| 3,00    | 0,00    | 3,00    | 2,75 | 2,790 | -0,86  | 0,21    | 0,21   |
| 2,50    | 0,00    | 2,50    | 2,28 | 2,325 | -0,97  | 0,21    | 0,21   |
| 2,00    | 0,00    | 2,00    | 1,82 | 1,860 | -0,86  | 0,00    | 0,21   |
| 1,50    | 0,00    | 1,50    | 1,36 | 1,395 | -0,75  | 0,21    | 0,21   |
| 1,00    | 0,00    | 1,00    | 0,90 | 0,930 | -0,64  | 0,00    | 0,21   |
| 0,50    | 0,00    | 0,50    | 0,44 | 0,465 | -0,54  | 0,21    | 0,00   |
| 0,00    | 0,00    | 0,00    | 0,00 | 0,000 | 0,00   | 0,00    | 0,00   |

C I R C U I T O I N T E R N O D E A J U S T E C O N E C T A D O

(P1) = PRESSAO 1 (OP) = PRESSAO DIFERENCIAL (F1-P2)

(P2) = PRESSAO 2 (DU) = MEDIA ARITMETICA PARA 3 LEITURAS

(FE) = FUNCO DE ESCALA (DE) = RETA DE REFERENCIA PELO C.DOS PONTOS FINAIS

RESULTADOS DO ENSAIO NA CONDICAÇÃO P1 = 1.00 KGF/CM2 CONSTANTE TABELA

ALIMENTAÇÃO = 10.076 VOLTS TEMPERATURA = 26.5 C 9.03

| (P1)    | (P2)    | (DP)    | (DUO) | (DE)   | N-LIN. | HISTER. | REPET. |
|---------|---------|---------|-------|--------|--------|---------|--------|
| KGF/CM2 | KGF/CM2 | KGF/CM2 | PV    | PV     | O/O FE | O/C FE  | C/O FE |
| 1.00    | 0.00    | 1.00    | 0.89  | 0.890  | 0.00   | -       | 0.21   |
| 1.00    | 0.50    | 0.50    | 0.44  | 0.425  | 0.32   | -       | 0.00   |
| 1.00    | 1.00    | 0.00    | -0.01 | -0.040 | 0.64   | -       | 0.43   |
| 1.00    | 1.50    | -0.50   | -0.48 | -0.505 | 0.54   | -       | 0.21   |
| 1.00    | 2.00    | -1.00   | -0.94 | -0.570 | 0.64   | -       | 0.21   |
| 1.00    | 2.50    | -1.50   | -1.40 | -1.435 | 0.75   | -       | 0.21   |
| 1.00    | 3.00    | -2.00   | -1.87 | -1.900 | 0.64   | -       | 0.21   |
| 1.00    | 3.50    | -2.50   | -2.34 | -2.365 | 0.54   | -       | 0.21   |
| 1.00    | 4.00    | -3.00   | -2.81 | -2.830 | 0.43   | -       | 0.43   |
| 1.00    | 4.50    | -3.50   | -3.29 | -3.295 | 0.11   | -       | 0.21   |
| 1.00    | 5.00    | -4.00   | -3.76 | -3.760 | 0.00   | -       | 0.21   |
| 1.00    | 4.50    | -3.50   | -3.29 | -3.295 | 0.11   | 0.00    | 0.21   |
| 1.00    | 4.00    | -3.00   | -2.81 | -2.830 | 0.43   | 0.00    | 0.43   |
| 1.00    | 3.50    | -2.50   | -2.34 | -2.365 | 0.54   | 0.00    | 0.21   |
| 1.00    | 3.00    | -2.00   | -1.87 | -1.900 | 0.64   | 0.00    | 0.21   |
| 1.00    | 2.50    | -1.50   | -1.41 | -1.435 | 0.54   | 0.21    | 0.21   |
| 1.00    | 2.00    | -1.00   | -0.95 | -0.970 | 0.43   | 0.21    | 0.43   |
| 1.00    | 1.50    | -0.50   | -0.47 | -0.505 | 0.75   | 0.21    | 0.43   |
| 1.00    | 1.00    | 0.00    | -0.02 | -0.040 | 0.43   | 0.21    | 0.86   |
| 1.00    | 0.50    | 0.50    | 0.45  | 0.425  | 0.54   | 0.21    | 0.43   |
| 1.00    | 0.00    | 1.00    | 0.89  | 0.890  | 0.00   | 0.00    | 0.43   |

CIRCUITO INTERNO DE AJUSTE CONECTADO  
(P1) = PRESSÃO 1 (DP) = PRESSÃO DIFERENCIAL (F1-P2)  
(P2) = PRESSÃO 2 (DU) = MÉDIA ARITMÉTICA PARA 3 LEITURAS  
(FE) = FUNDAMENTO DE ESCALA (DE) = RETA DE REFERÊNCIA PELO C-DOS PONTOS FINAIS

RESULTADOS DO ENSAIO NA CONDICA O P2 = 1.00 KGF/CM2 CONSTATANTE

ALIMENTACAO = 10.076 VOLTS

| (P1) | (P2) | (CP) | (OU) | (CE) | N-LIN. | HISTER. | REFET. |
|------|------|------|------|------|--------|---------|--------|
|------|------|------|------|------|--------|---------|--------|

|    | KGF/CM <sup>2</sup> | KGF/CM <sup>2</sup> | NV | O/O FE | O/C FE | O/O FE |
|----|---------------------|---------------------|----|--------|--------|--------|
| 0  | 0                   | 0                   | 0  | 0      | 0      | 0      |
| 1  | 1                   | 1                   | 1  | 1      | 1      | 1      |
| 2  | 2                   | 2                   | 2  | 2      | 2      | 2      |
| 3  | 3                   | 3                   | 3  | 3      | 3      | 3      |
| 4  | 4                   | 4                   | 4  | 4      | 4      | 4      |
| 5  | 5                   | 5                   | 5  | 5      | 5      | 5      |
| 6  | 6                   | 6                   | 6  | 6      | 6      | 6      |
| 7  | 7                   | 7                   | 7  | 7      | 7      | 7      |
| 8  | 8                   | 8                   | 8  | 8      | 8      | 8      |
| 9  | 9                   | 9                   | 9  | 9      | 9      | 9      |
| 10 | 10                  | 10                  | 10 | 10     | 10     | 10     |
| 11 | 11                  | 11                  | 11 | 11     | 11     | 11     |
| 12 | 12                  | 12                  | 12 | 12     | 12     | 12     |
| 13 | 13                  | 13                  | 13 | 13     | 13     | 13     |
| 14 | 14                  | 14                  | 14 | 14     | 14     | 14     |
| 15 | 15                  | 15                  | 15 | 15     | 15     | 15     |
| 16 | 16                  | 16                  | 16 | 16     | 16     | 16     |
| 17 | 17                  | 17                  | 17 | 17     | 17     | 17     |
| 18 | 18                  | 18                  | 18 | 18     | 18     | 18     |
| 19 | 19                  | 19                  | 19 | 19     | 19     | 19     |
| 20 | 20                  | 20                  | 20 | 20     | 20     | 20     |
| 21 | 21                  | 21                  | 21 | 21     | 21     | 21     |
| 22 | 22                  | 22                  | 22 | 22     | 22     | 22     |
| 23 | 23                  | 23                  | 23 | 23     | 23     | 23     |
| 24 | 24                  | 24                  | 24 | 24     | 24     | 24     |
| 25 | 25                  | 25                  | 25 | 25     | 25     | 25     |
| 26 | 26                  | 26                  | 26 | 26     | 26     | 26     |
| 27 | 27                  | 27                  | 27 | 27     | 27     | 27     |
| 28 | 28                  | 28                  | 28 | 28     | 28     | 28     |
| 29 | 29                  | 29                  | 29 | 29     | 29     | 29     |
| 30 | 30                  | 30                  | 30 | 30     | 30     | 30     |
| 31 | 31                  | 31                  | 31 | 31     | 31     | 31     |
| 32 | 32                  | 32                  | 32 | 32     | 32     | 32     |
| 33 | 33                  | 33                  | 33 | 33     | 33     | 33     |
| 34 | 34                  | 34                  | 34 | 34     | 34     | 34     |
| 35 | 35                  | 35                  | 35 | 35     | 35     | 35     |
| 36 | 36                  | 36                  | 36 | 36     | 36     | 36     |
| 37 | 37                  | 37                  | 37 | 37     | 37     | 37     |
| 38 | 38                  | 38                  | 38 | 38     | 38     | 38     |
| 39 | 39                  | 39                  | 39 | 39     | 39     | 39     |
| 40 | 40                  | 40                  | 40 | 40     | 40     | 40     |
| 41 | 41                  | 41                  | 41 | 41     | 41     | 41     |
| 42 | 42                  | 42                  | 42 | 42     | 42     | 42     |
| 43 | 43                  | 43                  | 43 | 43     | 43     | 43     |
| 44 | 44                  | 44                  | 44 | 44     | 44     | 44     |
| 45 | 45                  | 45                  | 45 | 45     | 45     | 45     |
| 46 | 46                  | 46                  | 46 | 46     | 46     | 46     |
| 47 | 47                  | 47                  | 47 | 47     | 47     | 47     |
| 48 | 48                  | 48                  | 48 | 48     | 48     | 48     |
| 49 | 49                  | 49                  | 49 | 49     | 49     | 49     |
| 50 | 50                  | 50                  | 50 | 50     | 50     | 50     |
| 51 | 51                  | 51                  | 51 | 51     | 51     | 51     |
| 52 | 52                  | 52                  | 52 | 52     | 52     | 52     |
| 53 | 53                  | 53                  | 53 | 53     | 53     | 53     |
| 54 | 54                  | 54                  | 54 | 54     | 54     | 54     |
| 55 | 55                  | 55                  | 55 | 55     | 55     | 55     |
| 56 | 56                  | 56                  | 56 | 56     | 56     | 56     |
| 57 | 57                  | 57                  | 57 | 57     | 57     | 57     |
| 58 | 58                  | 58                  | 58 | 58     | 58     | 58     |
| 59 | 59                  | 59                  | 59 | 59     | 59     | 59     |
| 60 | 60                  | 60                  | 60 | 60     | 60     | 60     |
| 61 | 61                  | 61                  | 61 | 61     | 61     | 61     |
| 62 | 62                  | 62                  | 62 | 62     | 62     | 62     |
| 63 | 63                  | 63                  | 63 | 63     | 63     | 63     |
| 64 | 64                  | 64                  | 64 | 64     | 64     | 64     |
| 65 | 65                  | 65                  | 65 | 65     | 65     | 65     |
| 66 | 66                  | 66                  | 66 | 66     | 66     | 66     |
| 67 | 67                  | 67                  | 67 | 67     | 67     | 67     |
| 68 | 68                  | 68                  | 68 | 68     | 68     | 68     |
| 69 | 69                  | 69                  | 69 | 69     | 69     | 69     |
| 70 | 70                  | 70                  | 70 | 70     | 70     | 70     |
| 71 | 71                  | 71                  | 71 | 71     | 71     | 71     |
| 72 | 72                  | 72                  | 72 | 72     | 72     | 72     |
| 73 | 73                  | 73                  | 73 | 73     | 73     | 73     |
| 74 | 74</                |                     |    |        |        |        |

|      |      |       |       |        |       |      |      |
|------|------|-------|-------|--------|-------|------|------|
| 0.00 | 1.00 | -1.00 | -0.92 | -0.920 | 0.00  | -    | 0.00 |
| 0.50 | 1.00 | -0.50 | -0.46 | -0.458 | -0.04 | -    | 0.00 |
| 1.00 | 1.00 | 0.00  | -0.01 | +0.004 | -0.30 | -    | 0.00 |
| 1.50 | 1.00 | +0.50 | +0.44 | +0.466 | -0.56 | -    | 0.21 |
| 2.00 | 1.00 | +1.00 | +0.89 | +0.528 | -0.82 | -    | 0.21 |
| 2.50 | 1.00 | +1.50 | +1.37 | +1.390 | -0.43 | -    | 0.00 |
| 3.00 | 1.00 | +2.00 | +1.82 | +1.852 | -0.69 | -    | 0.64 |
| 3.50 | 1.00 | +2.50 | +2.29 | +2.314 | -0.52 | -    | 0.21 |
| 4.00 | 1.00 | +3.00 | +2.77 | +2.776 | -0.13 | -    | 0.21 |
| 4.50 | 1.00 | +3.50 | +3.24 | +3.238 | +0.04 | -    | 0.21 |
| 5.00 | 1.00 | +4.00 | +3.70 | +3.700 | 0.00  | -    | 0.43 |
| 4.50 | 1.00 | +3.50 | +3.23 | +3.238 | -0.17 | 0.22 | 0.21 |
| 4.00 | 1.00 | +3.00 | +2.76 | +2.776 | -0.35 | 0.22 | 0.21 |
| 3.50 | 1.00 | +2.50 | +2.28 | +2.314 | -0.74 | 0.22 | 0.64 |
| 3.00 | 1.00 | +2.00 | +1.81 | +1.852 | -0.91 | 0.22 | 0.64 |
| 2.50 | 1.00 | +1.50 | +1.35 | +1.390 | -0.87 | 0.43 | 0.64 |
| 2.00 | 1.00 | +1.00 | +0.89 | +0.928 | -0.82 | 0.00 | 0.64 |
| 1.50 | 1.00 | +0.50 | +0.44 | +0.466 | -0.56 | 0.00 | 0.21 |
| 1.00 | 1.00 | 0.00  | -0.02 | +0.004 | -0.35 | 0.22 | 0.21 |
| 0.50 | 1.00 | -0.50 | -0.46 | -0.458 | -0.04 | 0.00 | 0.21 |
| 0.00 | 1.00 | -1.00 | -0.92 | -0.920 | -0.00 | 0.00 | 0.43 |

C I R C U I T O I N T E R N O D E A J U S T E C O N E C T A D O

(P1) = PRESSAO 1 (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL ( F1- P2 )

(P2) = PRESSAO 2 (DU) = MEDIA ARITMETICA PARA 3 LEITURAS

(FE) = FUNDO DE ESCALA (DE) = REJA DE REFERENCIA PELO C-DOS PONTOS FINAIS

RESULTADOS DO ENSAIO NA CONDICAO P1 = 200 KGF/CM2 CONSTANTE TABELA

ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS TEMPERATURA = 27,0 C 9-05

| (P1)    | (P2)    | (DP)    | (DU)  | (DE)   | N.LIN. | HIST.  | REFET. |
|---------|---------|---------|-------|--------|--------|--------|--------|
| KGF/CM2 | KGF/CM2 | KGF/CM2 | MV    | MV     | O/O FE | O/O FE | O/O FE |
| 200     | 0,00    | 2,00    | +1,82 | +1,820 | 0,00   | -      | 0,43   |
| 200     | 0,50    | +1,50   | +1,37 | +1,354 | +0,34  | -      | 0,21   |
| 200     | 1,00    | +1,00   | +0,90 | +0,888 | +0,26  | -      | 0,21   |
| 200     | 1,50    | +0,50   | +0,44 | +0,422 | +0,39  | -      | 0,21   |
| 200     | 2,00    | 0,00    | -0,01 | -0,044 | +0,73  | -      | 0,21   |
| 200     | 2,50    | -0,50   | -0,47 | -0,510 | +0,86  | -      | 0,21   |
| 200     | 3,00    | -1,00   | -0,96 | -0,976 | +0,34  | -      | 0,21   |
| 200     | 3,50    | -1,50   | -1,42 | -1,442 | +0,47  | -      | 0,21   |
| 200     | 4,00    | -2,00   | -1,88 | -1,908 | +0,60  | -      | 0,21   |
| 200     | 4,50    | -2,50   | -2,35 | -2,374 | +0,51  | -      | 0,21   |
| 200     | 5,00    | -3,00   | -2,84 | -2,840 | 0,00   | -      | 0,21   |
| 200     | 4,50    | -2,50   | -2,36 | -2,374 | +0,30  | 0,21   | 0,21   |
| 200     | 4,00    | -2,00   | -1,89 | -1,908 | +0,39  | 0,21   | 0,21   |
| 200     | 3,50    | -1,50   | -1,43 | -1,442 | +0,26  | 0,21   | 0,21   |
| 200     | 3,00    | -1,00   | -0,97 | -0,976 | +0,13  | 0,21   | 0,43   |
| 200     | 2,50    | -0,50   | -0,46 | -0,510 | +1,07  | 0,21   | 0,21   |
| 200     | 2,00    | 0,00    | -0,01 | -0,044 | +0,73  | 0,00   | 0,21   |
| 200     | 1,50    | +0,50   | +0,44 | +0,422 | +0,39  | 0,00   | 0,21   |
| 200     | 1,00    | +1,00   | +0,89 | +0,888 | +0,04  | 0,01   | 0,21   |
| 200     | 0,50    | +1,50   | +1,35 | +1,354 | -0,09  | 0,43   | 0,21   |
| 200     | 0,00    | +2,00   | +1,82 | +1,820 | 0,00   | 0,00   | 0,86   |

CIRCUITO INTERNO DE AJUSTE CONECTADO

(P1) = PRESSAO 1 (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (F1-P2)

(P2) = PRESSAO 2 (DU) = MEDIA ARITMETICA PARA 3 LEITURAS

(FE) = FUNCO DE ESCALA (DE) = RETA DE REFERENCIA PELO C.COS PONTO FINAIS

RESULTADOS DO ENSAIO NA CONDICAO P2 = 2,00 KGF/CM2 CONSTANTE

ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS TEMPERATURA = 27,0 C

IAEELA

9.06

API1 (P2) (CP) (BU) (DE) N-LIN- HISTER- REPE-

KGF/CM2 KGF/CM2 KGF/CM2 MV MV O/G FE O/G FE C/O FE

|      |      |       |       |        |       |      |      |
|------|------|-------|-------|--------|-------|------|------|
| 0,00 | 2,00 | -2,00 | -1,87 | -1,870 | 0,00  | -    | 0,21 |
| 0,50 | 2,00 | -1,50 | -1,41 | -1,407 | -0,01 | -    | 0,21 |
| 1,00 | 2,00 | -1,00 | -0,95 | -0,544 | -0,13 | -    | 0,21 |
| 1,50 | 2,00 | -0,50 | -0,48 | -0,481 | +0,01 | -    | 0,43 |
| 2,00 | 2,00 | 0,00  | -0,04 | -0,018 | -0,47 | -    | 0,64 |
| 2,50 | 2,00 | +0,50 | +0,42 | +0,445 | -0,54 | -    | 0,64 |
| 3,00 | 2,00 | +1,00 | +0,88 | +0,508 | -0,60 | -    | 0,64 |
| 3,50 | 2,00 | +1,50 | +1,34 | +1,371 | -0,67 | -    | 0,64 |
| 4,00 | 2,00 | +2,00 | +1,82 | +1,834 | -0,30 | -    | 0,21 |
| 4,50 | 2,00 | +2,50 | +2,30 | +2,297 | +0,06 | -    | 0,21 |
| 5,00 | 2,00 | +3,00 | +2,76 | +2,760 | 0,00  | -    | 0,86 |
| 4,50 | 2,00 | +2,50 | +2,29 | +2,297 | -0,15 | 0,21 | 0,21 |
| 4,00 | 2,00 | +2,00 | +1,82 | +1,834 | -0,30 | 0,00 | 0,21 |
| 3,50 | 2,00 | +1,50 | +1,35 | +1,371 | -0,45 | 0,21 | 0,43 |
| 3,00 | 2,00 | +1,00 | +0,89 | +0,508 | -0,38 | 0,21 | 0,86 |
| 2,50 | 2,00 | +0,50 | +0,42 | +0,445 | -0,54 | 0,00 | 0,21 |
| 2,00 | 2,00 | 0,00  | -0,03 | -0,018 | -0,26 | 0,21 | 0,21 |
| 1,50 | 2,00 | -0,50 | -0,47 | -0,481 | +0,24 | 0,21 | 0,21 |
| 1,00 | 2,00 | -1,00 | -0,94 | -0,944 | +0,09 | 0,21 | 0,21 |
| 0,50 | 2,00 | -1,50 | -1,40 | -1,407 | +0,15 | 0,21 | 0,21 |
| 0,00 | 2,00 | -2,00 | -1,86 | -1,870 | +0,21 | 0,21 | 0,21 |

C I R C U I T O I N T E R N O D E A J U S T E C O N E C T A D O

(P1) = PRESSAO 1 (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (FI-P2)

(P2) = PRESSAO 2 (DU) = MEDIA ARITMETICA PARA 3 LEITURAS

(FE) = FUNDO DE ESCALA (DE) = RETA DE REFERENCIA PELO C.DOS PONTOS FINAIS

RESULTADOS DO ENSAIO NA CONDICAO P1 = 3,00 KGF/CM2 CONSTANTE TABELA

ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS TEMPERATURA = 27,0 C 9.C7

(P1) (P2) (DP) (DU) (DE) N.LIN. HISTER. REPET.

KGF/CM2 KGF/CM2 KGF/CM2 MV PV D/O FE D/O FE D/O FE

|      |      |       |       |        |       |      |      |
|------|------|-------|-------|--------|-------|------|------|
| 3,00 | 0,00 | 3,00  | 2,75  | 2,750  | 0,00  | -    | 0,21 |
| 3,00 | 0,50 | 2,50  | 2,30  | 2,284  | 0,34  | -    | 0,21 |
| 3,00 | 1,00 | 2,00  | 1,83  | 1,818  | 0,26  | -    | 0,21 |
| 3,00 | 1,50 | 1,50  | 1,37  | 1,352  | 0,39  | -    | 0,00 |
| 3,00 | 2,00 | 1,00  | 0,91  | 0,886  | 0,51  | -    | 0,00 |
| 3,00 | 2,50 | 0,50  | 0,45  | 0,420  | 0,64  | -    | 0,00 |
| 3,00 | 3,00 | 0,00  | -0,01 | -0,046 | 0,77  | -    | 0,21 |
| 3,00 | 3,50 | -0,50 | -0,48 | -0,512 | 0,69  | -    | 0,00 |
| 3,00 | 4,00 | -1,00 | -0,95 | -0,578 | 0,60  | -    | 0,21 |
| 3,00 | 4,50 | -1,50 | -1,43 | -1,444 | 0,30  | -    | 0,21 |
| 3,00 | 5,00 | -2,00 | -1,91 | -1,910 | 0,00  | -    | 0,21 |
| 3,00 | 4,50 | -1,50 | -1,43 | -1,444 | 0,30  | 0,00 | 0,21 |
| 3,00 | 4,00 | -1,00 | -0,96 | -0,578 | 0,39  | 0,21 | 0,21 |
| 3,00 | 3,50 | -0,50 | -0,47 | -0,512 | 0,90  | 0,21 | 0,21 |
| 3,00 | 3,00 | 0,00  | -0,02 | -0,046 | 0,56  | 0,21 | 0,43 |
| 3,00 | 2,50 | 0,50  | 0,44  | 0,420  | 0,43  | 0,21 | 0,21 |
| 3,00 | 2,00 | 1,00  | 0,90  | 0,886  | 0,30  | 0,21 | 0,21 |
| 3,00 | 1,50 | 1,50  | 1,36  | 1,352  | 0,17  | 0,21 | 0,21 |
| 3,00 | 1,00 | 2,00  | 1,83  | 1,818  | 0,26  | 0,00 | 0,21 |
| 3,00 | 0,50 | 2,50  | 2,28  | 2,284  | -0,08 | 0,43 | 0,21 |
| 3,00 | 0,00 | 3,00  | 2,74  | 2,750  | -0,21 | 0,21 | 0,21 |

C I R C U I T O I N T E R N O D E A J U S T E C O N T E C T A D C

(P1) = PRESSAO 1 (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (F1-P2)

(P2) = PRESSAO 2 (DU) = MEDIA ARITMETICA PARA 3 LEITURAS

(FE) = FUNDO DE ESCALA (DE) = RETA DE REFERENCIA PELO C.DOS PONTOS FINAIS

RESULTADOS DO ENSAIO NA COMPRESSION P2 = 3.00 KGF/CM2 CONSTANTE TABELA

ALIMENTACAO = 10.076 VOLTS TEMPERATURA = 27.0 C 9.08

(P1) (P2) (DP) (DU) (DE) N.LIN. HISTER. REPET.

KGF/CM2 KGF/CM2 KGF/CM2 MV MV O/O FE O/C FE C/O FE

|      |      |       |       |        |       |      |      |
|------|------|-------|-------|--------|-------|------|------|
| 0.00 | 3.00 | -3.00 | -2.79 | -2.790 | 0.00  | -    | 0.21 |
| 0.50 | 3.00 | -2.50 | -2.31 | -2.325 | +0.32 | -    | 0.21 |
| 1.00 | 3.00 | -2.00 | -1.85 | -1.860 | +0.21 | -    | 0.21 |
| 1.50 | 3.00 | -1.50 | -1.41 | -1.395 | -0.32 | -    | 0.21 |
| 2.00 | 3.00 | -1.00 | -0.96 | -0.930 | -0.64 | -    | 0.21 |
| 2.50 | 3.00 | -0.50 | -0.47 | -0.465 | -0.11 | -    | 0.43 |
| 3.00 | 3.00 | 0.00  | -0.02 | 0.000  | -0.43 | -    | 0.43 |
| 3.50 | 3.00 | +0.50 | +0.45 | +0.465 | -0.32 | -    | 0.21 |
| 4.00 | 3.00 | +1.00 | +0.92 | +0.930 | -0.21 | -    | 0.21 |
| 4.50 | 3.00 | +1.50 | +1.39 | +1.395 | -0.11 | -    | 0.43 |
| 5.00 | 3.00 | +2.00 | +1.86 | +1.860 | 0.00  | -    | 0.21 |
| 4.50 | 3.00 | +1.50 | +1.38 | +1.395 | -0.39 | 0.21 | 0.43 |
| 4.00 | 3.00 | +1.00 | +0.91 | +0.930 | -0.43 | 0.21 | 0.21 |
| 3.50 | 3.00 | +0.50 | +0.46 | +0.465 | -0.11 | 0.21 | 0.21 |
| 3.00 | 3.00 | 0.00  | -0.02 | 0.000  | -0.42 | 0.00 | 0.43 |
| 2.50 | 3.00 | -0.50 | -0.47 | -0.465 | -0.11 | 0.00 | 0.43 |
| 2.00 | 3.00 | -1.00 | -0.96 | -0.930 | -0.06 | 0.00 | 0.21 |
| 1.50 | 3.00 | -1.50 | -1.40 | -1.395 | -0.11 | 0.21 | 0.43 |
| 1.00 | 3.00 | -2.00 | -1.85 | -1.860 | +0.21 | 0.00 | 0.43 |
| 0.50 | 3.00 | -2.50 | -2.31 | -2.325 | +0.32 | 0.00 | 0.43 |
| 0.00 | 3.00 | -3.00 | -2.78 | -2.790 | +0.21 | 0.21 | 0.43 |

C I R C U I T O I N T E R N O D E A J U S T E C O N E C T A D O

(P1) = PRESSAO 1

(P2) = PRESSAO 2

(FE) = FUNDO DE ESCALA

(DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (P1-P2)

(DU) = MEDIDA ARTIMETICA PARA 3 LEITURAS

(DE) = RETA DE REFERENCIA PELO C.DOS PONTOS FINAIS

RESULTADOS DO ENSAIO NA CONDICAO P2 = 4.00 MGF/CM2 CONSTANTE

ALIMENTACAO = 10.076 VOLTS TEMPERATURA = 27.5 C

(P1) (P2) (DP) (DU) (DE) N.LIN. HISTER. REPEI.

MGF/CM2 MGF/CM2 KGF/CM2 MV MV O/O FE O/O FE O/O FE

|      |      |       |       |        |       |      |      |
|------|------|-------|-------|--------|-------|------|------|
| 0.00 | 4.00 | -4.00 | -3.73 | -3.730 | 0.00  | -    | 0.21 |
| 0.50 | 4.00 | -3.50 | -3.27 | -3.264 | -0.13 | -    | 0.21 |
| 1.00 | 4.00 | -3.00 | -2.81 | -2.798 | -0.26 | -    | 0.21 |
| 1.50 | 4.00 | -2.50 | -2.35 | -2.332 | -0.39 | -    | 0.21 |
| 2.00 | 4.00 | -2.00 | -1.89 | -1.866 | -0.51 | -    | 0.43 |
| 2.50 | 4.00 | -1.50 | -1.42 | -1.400 | -0.43 | -    | 0.21 |
| 3.00 | 4.00 | -1.00 | -0.97 | -0.934 | -0.77 | -    | 0.21 |
| 3.50 | 4.00 | -0.50 | -0.49 | -0.468 | -0.47 | -    | 0.43 |
| 4.00 | 4.00 | 0.00  | -0.02 | -0.002 | -0.39 | -    | 0.43 |
| 4.50 | 4.00 | 0.50  | 0.46  | 0.464  | -0.09 | -    | 0.43 |
| 5.00 | 4.00 | 1.00  | 0.93  | 0.930  | 0.00  | -    | 0.64 |
| 4.50 | 4.00 | 0.50  | 0.47  | 0.464  | 0.13  | 0.21 | 0.43 |
| 4.00 | 4.00 | 0.00  | -0.02 | -0.002 | -0.39 | 0.00 | 0.43 |
| 3.50 | 4.00 | -0.50 | -0.48 | -0.468 | -0.26 | 0.21 | 0.43 |
| 3.00 | 4.00 | -1.00 | -0.96 | -0.934 | -0.56 | 0.21 | 0.43 |
| 2.50 | 4.00 | -1.50 | -1.43 | -1.400 | -0.64 | 0.21 | 0.43 |
| 2.00 | 4.00 | -2.00 | -1.90 | -1.866 | -0.73 | 0.21 | 0.64 |
| 1.50 | 4.00 | -2.50 | -2.36 | -2.332 | -0.60 | 0.21 | 0.43 |
| 1.00 | 4.00 | -3.00 | -2.83 | -2.798 | -0.69 | 0.43 | 0.43 |
| 0.50 | 4.00 | -3.50 | -3.28 | -3.264 | -0.34 | 0.21 | 0.21 |
| 0.00 | 4.00 | -4.00 | -3.73 | -3.730 | -0.00 | 0.00 | 0.00 |

CIRCUITO INTERNO DE AJUSTE CONECTADO

(P1) = PRESSAO 2 (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (P1-P2)

(P2) = PRESSAO 2 (DU) = MEDIA ARITMETICA PARA 3 LEITURAS

(FE) = FUNCO DE ESCALA (DE) = RETA DE REFERENCIA PELO C.DOS PONTOS FINAIS

RESULTADOS DO ENSAIO NA COMPRESSÃO P1 = 5,00 KGf/cm2 CONSTANTE TABELA

ALIMENTAÇÃO = 10,076 VOLTS TEMPERATURA = 27,5 C 9.11

| (P1)    | (P2)    | (DP)    | (DU)  | (DE)   | N.LIN. | HIST.  | REPET. |
|---------|---------|---------|-------|--------|--------|--------|--------|
| KGf/cm2 | KGf/cm2 | KGf/cm2 | MV    | MV     | O/G FE | O/G FE | C/O FE |
| 5,00    | 0,00    | 5,00    | 4,62  | 4,620  | 0,00   | -      | 0,00   |
| 5,00    | 0,50    | 4,50    | 4,17  | 4,155  | 0,32   | -      | 0,00   |
| 5,00    | 1,00    | 4,00    | 3,71  | 3,690  | 0,43   | -      | 0,00   |
| 5,00    | 1,50    | 3,50    | 3,25  | 3,225  | 0,53   | -      | 0,00   |
| 5,00    | 2,00    | 3,00    | 2,78  | 2,760  | 0,43   | -      | 0,00   |
| 5,00    | 2,50    | 2,50    | 2,32  | 2,295  | 0,54   | -      | 0,00   |
| 5,00    | 3,00    | 2,00    | 1,85  | 1,830  | 0,43   | -      | 0,00   |
| 5,00    | 3,50    | 1,50    | 1,37  | 1,365  | 0,10   | -      | 0,00   |
| 5,00    | 4,00    | 1,00    | 0,89  | 0,900  | -0,21  | -      | 0,00   |
| 5,00    | 4,50    | 0,50    | 0,45  | 0,435  | 0,32   | -      | 0,00   |
| 5,00    | 5,00    | 0,00    | -0,03 | -0,030 | 0,00   | -      | 0,21   |
| 5,00    | 4,50    | 0,50    | 0,46  | 0,435  | 0,54   | 0,21   | 0,21   |
| 5,00    | 4,00    | 1,00    | 0,89  | 0,900  | -0,21  | 0,00   | 0,21   |
| 5,00    | 3,50    | 1,50    | 1,36  | 1,365  | -0,10  | 0,21   | 0,00   |
| 5,00    | 3,00    | 2,00    | 1,84  | 1,830  | 0,21   | 0,21   | 0,00   |
| 5,00    | 2,50    | 2,50    | 2,30  | 2,295  | 0,10   | 0,43   | 0,00   |
| 5,00    | 2,00    | 3,00    | 2,76  | 2,760  | 0,00   | 0,43   | 0,00   |
| 5,00    | 1,50    | 3,50    | 3,22  | 3,225  | -0,11  | 0,64   | 0,00   |
| 5,00    | 1,00    | 4,00    | 3,68  | 3,690  | -0,21  | 0,64   | 0,00   |
| 5,00    | 0,50    | 4,50    | 4,14  | 4,155  | -0,32  | 0,64   | 0,00   |
| 5,00    | 0,00    | 5,00    | 4,61  | 4,620  | -0,21  | 0,21   | 0,00   |

CIRCUITO INTERNO DE AJUSTE CONECTADO  
 (P1) = PRESSAO 1 (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (F1-P2)  
 (P2) = PRESSAO 2 (DU) = MEDIA ARITMETICA PARA 3 LEITURAS  
 (FE) = FUNCO DE ESCALA (DE) = RETA DE REFERENCIA PELO C.DOS PONTOS FINAIS

RESULTADOS DO ENSAIO NA CONDICAO P2 = 5,00 KGf/cm2 CONSTANTE TABELA

ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS TEMPERATURA = 27,0 C 9.12

(P1) (P2) (DP) (DU) (DE) N.LIN. HISTER. REFET.

KGf/cm2 KGf/cm2 KGf/cm2 MV MV O/O FE O/C FE O/O FE

|      |      |       |       |        |      |      |      |
|------|------|-------|-------|--------|------|------|------|
| 0,00 | 5,00 | -5,00 | -4,68 | -4,680 | 0,00 | -    | 0,43 |
| 0,50 | 5,00 | -4,50 | -4,21 | -4,214 | 0,09 | -    | 0,21 |
| 1,00 | 5,00 | -4,00 | -3,75 | -3,748 | 0,04 | -    | 0,21 |
| 1,50 | 5,00 | -3,50 | -3,29 | -3,282 | 0,17 | -    | 0,21 |
| 2,00 | 5,00 | -3,00 | -2,83 | -2,816 | 0,30 | -    | 0,43 |
| 2,50 | 5,00 | -2,50 | -2,36 | -2,350 | 0,21 | -    | 0,21 |
| 3,00 | 5,00 | -2,00 | -1,89 | -1,884 | 0,12 | -    | 0,21 |
| 3,50 | 5,00 | -1,50 | -1,43 | -1,418 | 0,25 | -    | 0,00 |
| 4,00 | 5,00 | -1,00 | -0,97 | -0,952 | 0,39 | -    | 0,00 |
| 4,50 | 5,00 | -0,50 | -0,49 | -0,486 | 0,09 | -    | 0,00 |
| 5,00 | 5,00 | 0,00  | -0,02 | -0,020 | 0,00 | -    | 0,00 |
| 4,50 | 5,00 | -0,50 | -0,49 | -0,486 | 0,09 | 0,00 | 0,00 |
| 4,00 | 5,00 | -1,00 | -0,98 | -0,952 | 0,60 | 0,21 | 0,00 |
| 3,50 | 5,00 | -1,50 | -1,43 | -1,418 | 0,26 | 0,00 | 0,21 |
| 3,00 | 5,00 | -2,00 | -1,89 | -1,884 | 0,13 | 0,00 | 0,21 |
| 2,50 | 5,00 | -2,50 | -2,36 | -2,350 | 0,21 | 0,00 | 0,43 |
| 2,00 | 5,00 | -3,00 | -2,83 | -2,816 | 0,30 | 0,00 | 0,43 |
| 1,50 | 5,00 | -3,50 | -3,29 | -3,282 | 0,17 | 0,00 | 0,43 |
| 1,00 | 5,00 | -4,00 | -3,76 | -3,748 | 0,26 | 0,21 | 0,64 |
| 0,50 | 5,00 | -4,50 | -4,22 | -4,214 | 0,13 | 0,21 | 0,21 |
| 0,00 | 5,00 | -5,00 | -4,68 | -4,680 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

C I R C U I T O I N T E R N O D E A J U S T E C O N E C T A D O

(P1) = PRESSAO 1 (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (F1-P2)

(P2) = PRESSAO 2 (DU) = MEDIA ARITMETICA PARA 3 LEITURAS

(FE) = FUNDO DE ESCALA (DE) = REIA DE REFERENCIA PELO C.C.O.S PONTOS FINAIS



DESVIO MAXIMO EM RELACAO A MEDIA PCF VALOR DE PRESSAO DIFERENCIAL TABELA

ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS TEMPERATURA = 26,5-27,0 C 9-14

(DP) (P1) (P2) (SC) (SC) (P1) (P2) (SC) (SC) (DV) (CV)

KG/CM2 KG/CM2 KG/CM2 MV MV KG/CM2 KG/CM2 MV MV (SM) (MV)

|      |      |       |       |      |      |       |       |       |       |       |
|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,00 | 0,00 | 0,00  | -0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 0,50 | 0,50 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| 1,00 | 1,00 | -0,01 | -0,02 | 1,00 | 1,00 | 0,00  | 0,00  | -0,01 | 0,00  | 0,00  |
| 1,00 | 1,00 | -0,01 | -0,02 | 1,50 | 1,50 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| 2,00 | 2,00 | -0,01 | -0,01 | 2,00 | 2,00 | 0,00  | 0,00  | -0,01 | 0,00  | 0,00  |
| 2,00 | 2,00 | -0,04 | -0,03 | 2,50 | 2,50 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| 3,00 | 3,00 | -0,01 | -0,02 | 3,00 | 3,00 | 0,01  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| 3,00 | 3,00 | -0,02 | -0,02 | 3,50 | 3,50 | 0,00  | 0,00  | -0,01 | 0,00  | 0,00  |
| 4,00 | 4,00 | -0,03 | -0,04 | 4,00 | 4,00 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| 4,00 | 4,00 | -0,02 | -0,02 | 4,50 | 4,50 | -0,01 | -0,01 | -0,01 | -0,01 | -0,01 |
| 5,00 | 5,00 | -0,03 | -     | 5,00 | 5,00 | 0,00  | 0,00  | -     | -     | -     |
| 5,00 | 5,00 | -0,02 | -     | -    | -    | -     | -     | -     | -     | -     |
| -    | -    | -     | -     | -    | -    | -     | -     | -     | -     | -     |

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,50 | 0,00 | 0,45 | 0,44 | 3,00 | 2,50 | 0,45 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 |
| 1,00 | 0,50 | 0,44 | 0,45 | 3,50 | 3,00 | 0,45 | 0,46 | 0,46 | 0,46 | 0,46 |
| 1,50 | 1,00 | 0,44 | 0,44 | 4,00 | 3,50 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,43 |
| 2,00 | 1,50 | 0,42 | 0,44 | 4,50 | 4,00 | 0,46 | 0,47 | 0,47 | 0,47 | 0,45 |
| 2,50 | 2,00 | 0,42 | 0,42 | 5,00 | 4,50 | 0,45 | 0,46 | 0,46 | 0,46 | 0,46 |
| -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |

CIRCUITO INTERNO DE AJUSTE CONECTIVO

(P1) = PRESSAO 1 (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (P1-P2)  
(P2) = PRESSAO 2 (DV) = MAXIMO DESVIO EM RELACAO A MEDIA ARITMETICA  
(FE) = FUNDO DE ESCALA (SC) = MEDIA DE 3 LEITURAS NO CARREGAMENTO  
(SP) = MEDIA ART.SINAL (SD) = MEDIA DE 3 LEITURAS NO DESCARREGAMENTO

DESVIO MAXIMO EM RELACAO A MEDIA POR VALOR DE PRESSAO DIFERENCIAL \* TABELA \*

ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS TEMPERATURA = 26,5-27,0 C \* 9.15 \*

(DP) \* (P1) (P2) (SC) (SD) \* (P1) (P2) (SC) (SD) \* (OV) \*  
G/C FE

KG/CM2 \* KG/CM2 KG/CM2 MV MV \* KG/CM2 KG/CM2 PV MV \* (SP) \*  
MV

0,00 0,50 -0,46 -0,47 3,00 3,50 -0,48 -0,47  
1,00 1,50 -0,48 -0,47 2,50 3,00 -0,47 -0,47  
-0,50 0,50 1,00 -0,46 -0,46 4,00 4,50 -0,48 -0,47 0,43  
2,00 2,50 -0,47 -0,46 3,50 4,00 -0,49 -0,48 -0,47  
1,50 2,00 -0,48 -0,47 4,50 5,00 -0,49 -0,49

0,00 1,00 -0,91 -0,91 3,00 4,00 -0,95 -0,96  
1,00 2,00 -0,94 -0,95 2,00 3,00 -0,96 -0,96  
-1,00 0,00 1,00 -0,92 -0,92 4,00 5,00 -0,97 -0,96 0,64  
2,00 3,00 -0,96 -0,97 3,00 4,00 -0,97 -0,96 -0,95  
1,00 2,00 -0,95 -0,94 4,00 5,00 -0,97 -0,98

1,00 0,00 0,90 0,90 3,00 2,00 0,91 0,90  
1,00 0,00 0,89 0,89 4,00 3,00 0,92 0,91  
+1,00 2,00 1,00 0,89 0,89 4,00 3,00 0,91 0,90 -0,64  
2,00 1,00 0,90 0,89 5,00 4,00 0,93 - - 0,90  
3,00 2,00 0,88 0,89 5,00 4,00 0,89 0,89

CIRCUITO INTERNO DE AJUSTE CONECTADO  
(P1) = PRESSAO 1 (OP) = PRESSAO DIFERENCIAL (F1-P2)  
(P2) = PRESSAO 2 (OV) = MAXIMO DESVIO EM RELACAO A MEDIA ARITMETICA  
(FE) = FUNCO DE ESCALA (SC) = MEDIA DE 3 LEITURAS NO CARREGAMENTO  
(SP) = MEDIA ARITMETICA (SD) = MEDIA DE 3 LEITURAS NO DESCARREGAMENTO

DESVIC MAXIMO EM RELACAO A MEDIA POR VALOR DE PRESSAO DIFERENCIAL TABELA

ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS TEMPERATURA = 26,5-27,0 C 9-16

(DP) (P1) (P2) (SC) (SD) (P1) (P2) (SC) (SD) (DV) (DV) (DV)

KG/CM2 KG/CM2 KG/CM2 KG/CM2 MV KG/CM2 KG/CM2 KG/CM2 KG/CM2 MV (SN) MV

1,50 0,00 +1,37 +1,36 3,00 1,50 +1,37 +1,36  
2,50 1,00 +1,37 +1,35 4,50 3,00 +1,35 +1,38 -0,64  
2,00 0,50 +1,37 +1,35 4,00 2,50 +1,37 +1,36 +1,36  
3,50 2,00 +1,34 +1,35 5,00 3,50 +1,37 +1,36

0,00 1,50 -1,37 -1,37 3,00 4,50 -1,43 -1,43  
1,00 2,50 -1,40 -1,41 1,50 3,00 -1,41 -1,40 +0,43  
2,00 3,50 -1,42 -1,43 2,50 4,00 -1,42 -1,43 -1,41  
0,50 2,00 -1,41 -1,40 3,50 5,00 -1,43 -1,43

2,00 0,00 +1,82 +1,82 3,00 1,00 +1,83 +1,83  
3,00 1,00 +1,82 +1,81 5,00 3,00 +1,86 - -0,64  
2,00 0,00 +1,82 +1,82 4,00 2,00 +1,83 +1,83 +1,83  
4,00 2,00 +1,82 +1,82 5,00 3,00 +1,85 +1,84

0,00 2,00 -1,83 -1,84 3,00 5,00 -1,91 -  
1,00 3,00 -1,87 -1,87 1,00 3,00 -1,85 -1,85 +0,86  
2,00 4,00 -1,88 -1,89 2,00 4,00 -1,89 -1,90 -1,87  
0,00 2,00 -1,87 -1,86 3,00 5,00 -1,89 -1,89

CIRCULO INTERNO DE AJUSTE CONECTADO  
(P1) = PRESSAO 1 (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (P1-P2)  
(P2) = PRESSAO 2 (DV) = MAXIMO DESVIC EM RELACAO A MEDIA ARITMETICA  
(FE) = FUNDO DE ESCALA (SC) = MEDIA DE 3 LEITURAS NO CARREGAMENTO  
(SN) = MEDIA ARITMETICA (SD) = MEDIA DE 3 LEITURAS NO DESCARREGAMENTO

DESVIC MAXIMO EM RELACAO A MEDIA POR VALOR DE PRESSAO DIFERENCIAL TABELA

ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS TEMPERATURA = 26,5-27,0 C 9.17

(DP) (P10) (P2) (SC) (SD) (P1) (P2) (SC) (SD) (DV)

KG/CM2 KG/CM2 KG/CM2 MV MV KG/CM2 KG/CM2 PV MV (SN) PV

2.50 0.00 2.29 2.28 3.00 0.50 2.30 2.28

3.50 1.00 2.29 2.28 4.00 1.50 2.30 2.29 -0.64

4.50 2.00 2.30 2.29 5.00 2.50 2.32 2.30 2.29

0.00 2.50 2.29 2.30 0.50 3.00 2.31 2.31

1.00 3.50 2.34 2.34 1.50 4.00 2.35 2.36 0.53

2.00 4.50 2.35 2.36 2.50 5.00 2.36 2.36 -2.33

3.00 0.00 2.76 2.75 3.00 0.00 2.75 2.74

4.00 1.00 2.77 2.76 4.00 1.00 2.76 2.75 -0.43

5.00 2.00 2.76 2.76 5.00 2.00 2.78 2.76 2.76

0.00 3.00 2.76 2.77 0.00 3.00 2.79 2.78

1.00 4.00 2.81 2.81 1.00 4.00 2.81 2.83 0.64

2.00 5.00 2.84 2.84 2.00 5.00 2.83 2.83 -2.81

3.50 0.00 3.24 3.22 4.00 0.50 3.23 3.21 -0.43

4.50 1.00 3.24 3.23 5.00 1.50 3.25 3.22 3.23

CIRCUITO INTERNO DE AJUSTE CONECTA DO

(P1) = PRESSAO (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (FI-P2)

(P2) = PRESSAO (DV) = MAXIMO DESVIC EM RELACAO A MEDIA ARITMETICA

(FE) = FUNDO DE ESCALA (SC) = MEDIA DE 3 LEITURAS NO CARREGAMENTO

(SP) = MEDIA ARI. SINAL (SD) = MEDIA DE 3 LEITURAS NO DESCARREGAMENTO

DESVIO MAXIMO EM RELACAO A MEDIA POR VALOR DE PRESSAO DIFERENCIAL \* TABELA \*

ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS TEMPERATURA = 26,5-27,0 C \* 9,18 \*

(DP) \* (P1) (P2) (SC) (SD) \* (P1) (P2) (SC) (SD) \* (DV) \*

KGF/CM2 \* KGF/CM2 KGF/CM2 MV PV \* KGF/CM2 KGF/CM2 PV MV \* (SP) \*

-3,50 \* 0,00 3,50 -3,22 -3,23 \* 0,50 4,00 -3,27 -3,28 \* 0,43 \*

\* 1,00 4,50 -3,29 -3,29 \* 1,50 5,00 -3,29 -3,29 \* -3,27 \*

+4,00 \* 4,00 0,00 3,70 3,69 \* 4,00 0,00 3,68 3,67 \* -0,43 \*

\* 5,00 1,00 3,70 - \* 5,00 1,00 3,71 3,68 \* 3,69 \*

-4,00 \* 0,00 4,00 -3,70 -3,71 \* 0,00 4,00 -3,73 -3,73 \* 0,64 \*

\* 1,00 5,00 -3,76 - \* 1,00 5,00 -3,75 -3,76 \* -3,73 \*

+4,50 \* 4,50 0,00 4,17 4,16 \* 5,00 0,50 4,17 4,14 \* -0,21 \*

\* - \* - \* - \* - \* - \* - \* 4,16 \*

-4,50 \* 0,00 4,50 -4,19 -4,18 \* 0,50 5,00 -4,21 -4,22 \* 0,43 \*

\* - \* - \* - \* - \* - \* - \* -4,20 \*

+5,00 \* 5,00 0,00 4,65 - \* 5,00 0,00 4,62 4,61 \* -0,43 \*

\* - \* - \* - \* - \* - \* - \* 4,63 \*

-5,00 \* 0,00 5,00 -4,66 - \* 0,00 5,00 -4,68 -4,68 \* 0,21 \*

\* - \* - \* - \* - \* - \* - \* -4,67 \*

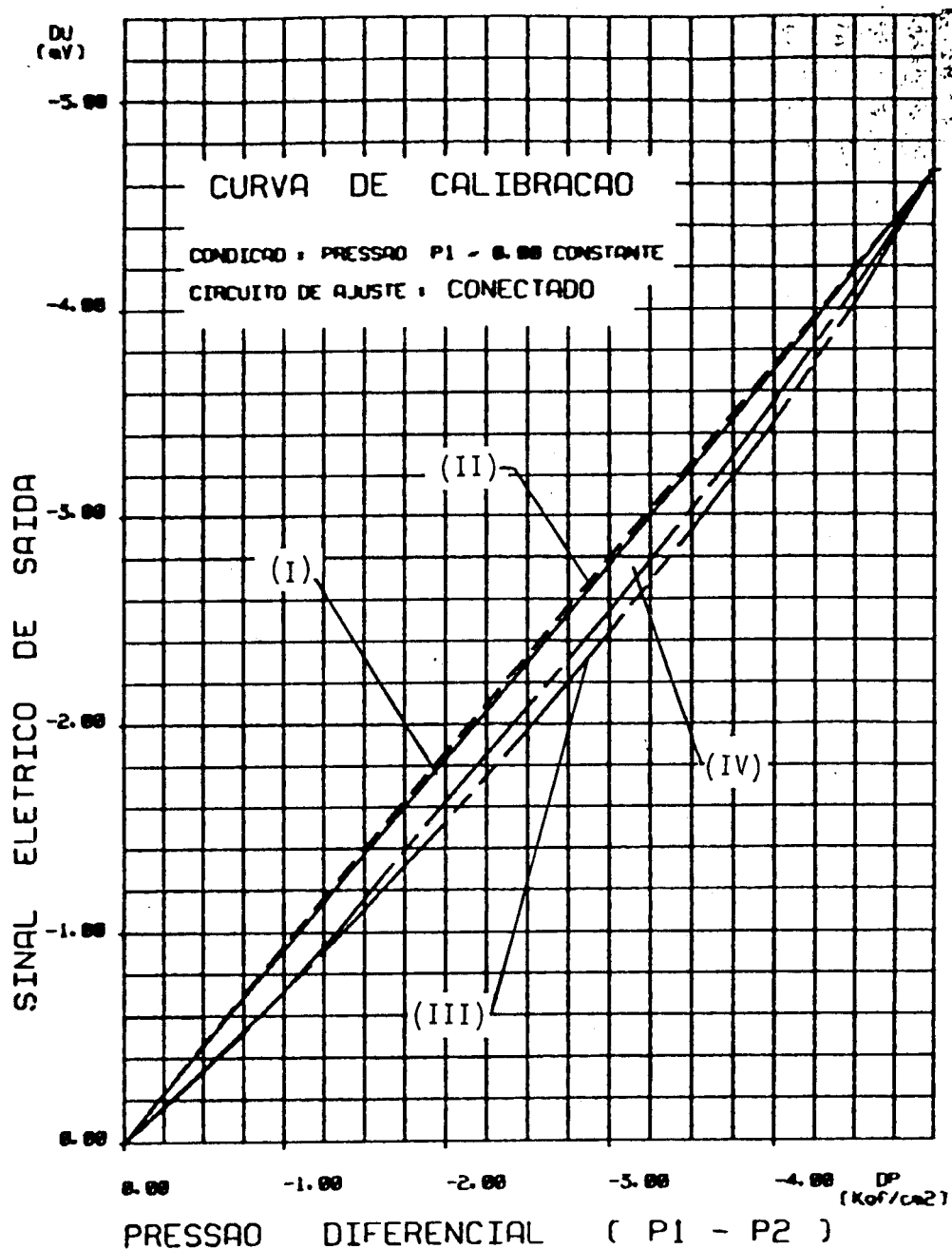
C I R C U I T O I N T E R N O D E A J U S T E C O N E C T A D O

(P1) = PRESSAO 1 (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (F1-P2)

(P2) = PRESSAO 2 (DV) = MAXIMO DESVIO EM RELACAO A MEDIA ARITMETICA

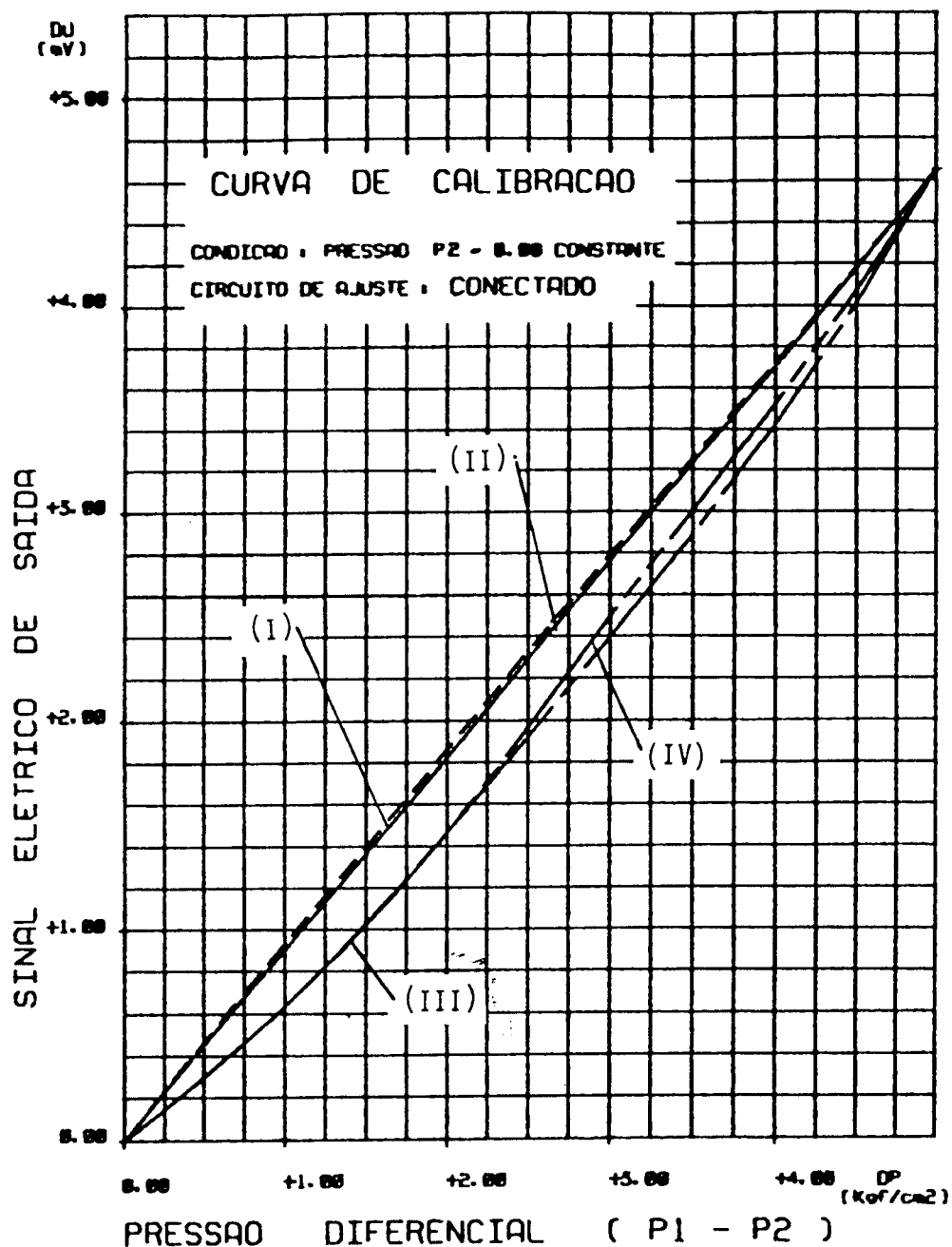
(FE) = FUNDO DE ESCALA (SC) = MEDIA DE 3 LEITURAS NO CARREGAMENTO

(SP) = MEDIA ARITMETICA (SD) = MEDIA DE 3 LEITURAS NO DESCARREGAMENTO



- (I) = CARREGAMENTO.
- (II) = RETA DE REFERENCIA PELO CRITERIO DOS PONTOS FINAIS.
- (III) = CARREGAMENTO COM A ESCALA DOS ERROS 10 VEZES MAIOR.
- (IV) = DESCARREGAMENTO COM A ESCALA DOS ERROS 10 VEZES MAIOR.

Figura 9.0.1 - Sinal Elétrico de Saída.  
Circuito Interno de Ajuste *CONECTADO*.



- (I) = CARREGAMENTO.
- (II) = RETA DE REFERÊNCIA PELO CRITÉRIO DOS PONTOS FINAIS.
- (III) = CARREGAMENTO COM ESCALA DOS ERROS 10 VEZES MAIOR.
- (IV) = DESCARREGAMENTO COM ESCALA DOS ERROS 10 VEZES MAIOR.

Figura 9.0.2 - Sinal Elétrico de Saída.  
Circuito Interno de Ajuste *CONECTADO*.

RESULTADOS DO ENSAIO NA CONDICAO P1 = 0.00 KGF/CM2 CONSTANTE TABELA

ALIMENTACAO = 10.076 VOLTS TEMPERATURA = 27.0 C 9.20

(P1) (P2) (CP) (DU) (DE) N.LIN. HISTER. REPT.

KGF/CM2 KGF/CM2 KGF/CM2 MV MV O/G FE O/G FE C/O FE

|      |      |       |       |        |       |      |      |
|------|------|-------|-------|--------|-------|------|------|
| 0.00 | 0.00 | 0.00  | 0.00  | -0.000 | 0.00  | -    | 0.00 |
| 0.00 | 0.50 | -0.50 | -0.48 | -0.512 | +0.62 | -    | 0.00 |
| 0.00 | 1.00 | -1.00 | -0.99 | -1.024 | +0.66 | -    | 0.00 |
| 0.00 | 1.50 | -1.50 | -1.49 | -1.536 | +0.89 | -    | 0.21 |
| 0.00 | 2.00 | -2.00 | -2.00 | -2.048 | +0.93 | -    | 0.21 |
| 0.00 | 2.50 | -2.50 | -2.51 | -2.560 | +0.97 | -    | 0.21 |
| 0.00 | 3.00 | -3.00 | -3.02 | -3.072 | +1.01 | -    | 0.00 |
| 0.00 | 3.50 | -3.50 | -3.54 | -3.584 | +0.86 | -    | 0.21 |
| 0.00 | 4.00 | -4.00 | -4.06 | -4.096 | +0.70 | -    | 0.21 |
| 0.00 | 4.50 | -4.50 | -4.59 | -4.608 | +0.35 | -    | 0.21 |
| 0.00 | 5.00 | -5.00 | -5.12 | -5.120 | +0.00 | -    | 0.00 |
| 0.00 | 4.50 | -4.50 | -4.59 | -4.608 | +0.35 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 4.00 | -4.00 | -4.07 | -4.096 | +0.51 | 0.19 | 0.00 |
| 0.00 | 3.50 | -3.50 | -3.55 | -3.584 | +0.66 | 0.19 | 0.21 |
| 0.00 | 3.00 | -3.00 | -3.03 | -3.072 | +0.82 | 0.19 | 0.21 |
| 0.00 | 2.50 | -2.50 | -2.51 | -2.560 | +0.98 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 2.00 | -2.00 | -2.01 | -2.048 | +0.74 | 0.19 | 0.00 |
| 0.00 | 1.50 | -1.50 | -1.52 | -1.536 | +0.31 | 0.52 | 0.00 |
| 0.00 | 1.00 | -1.00 | -1.00 | -1.024 | +0.47 | 0.19 | 0.00 |
| 0.00 | 0.50 | -0.50 | -0.49 | -0.512 | +0.43 | 0.19 | 0.00 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00  | -0.01 | -0.000 | -0.19 | 0.19 | 0.00 |

C I R C U I T O I N T E R N O D E A J U S T E D E S C O N E C T A D O

(P1) = PRESSAO 1 (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (FI-P2)

(P2) = PRESSAO 2 (DU) = MEDIA ARITMETICA PARA 3 LEITURAS

(FE) = FUNCO DE ESCALA (DE) = RETA DE REFERENCIA PELO C.GOS PONTOS FINAIS

|       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ***** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

RESULTADOS DO ENSAIO NA CONDICAÇÃO P1 = 5.00 KGF/CM2 CONSTANTE TABELA

ALIMENTAÇÃO = 10.076 VOLTS TEMPERATURA = 27.0 C 9.22

(P1) (P2) (DP) (DU) (DE) N.LIN. HISTER. REPEL.

KGF/CM2 KGF/CM2 KGF/CM2 MV MV O/D FE O/C FE O/D FE

|      |      |      |      |       |      |      |      |      |
|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| 5.00 | 0.00 | 5.00 | 5.81 | 5.310 | 0.00 | -    | 0.00 | 0.00 |
| 5.00 | 0.50 | 4.50 | 4.82 | 4.796 | 0.47 | -    | 0.21 | 0.21 |
| 5.00 | 1.00 | 4.00 | 4.31 | 4.282 | 0.54 | -    | 0.21 | 0.21 |
| 5.00 | 1.50 | 3.50 | 3.81 | 3.768 | 0.82 | -    | 0.00 | 0.00 |
| 5.00 | 2.00 | 3.00 | 3.30 | 3.254 | 0.89 | -    | 0.00 | 0.00 |
| 5.00 | 2.50 | 2.50 | 2.79 | 2.740 | 0.97 | -    | 0.00 | 0.00 |
| 5.00 | 3.00 | 2.00 | 2.27 | 2.226 | 0.86 | -    | 0.00 | 0.00 |
| 5.00 | 3.50 | 1.50 | 1.76 | 1.712 | 0.93 | -    | 0.00 | 0.00 |
| 5.00 | 4.00 | 1.00 | 1.24 | 1.198 | 0.82 | -    | 0.00 | 0.00 |
| 5.00 | 4.50 | 0.50 | 0.71 | 0.684 | 0.51 | -    | 0.21 | 0.21 |
| 5.00 | 5.00 | 0.00 | 0.17 | 0.170 | 0.00 | -    | 0.43 | 0.43 |
| 5.00 | 4.50 | 0.50 | 0.71 | 0.684 | 0.51 | 0.00 | 0.21 | 0.21 |
| 5.00 | 4.00 | 1.00 | 1.23 | 1.198 | 0.62 | 0.18 | 0.00 | 0.00 |
| 5.00 | 3.50 | 1.50 | 1.75 | 1.712 | 0.74 | 0.18 | 0.21 | 0.21 |
| 5.00 | 3.00 | 2.00 | 2.25 | 2.226 | 0.46 | 0.36 | 0.21 | 0.21 |
| 5.00 | 2.50 | 2.50 | 2.78 | 2.740 | 0.78 | 0.18 | 0.00 | 0.00 |
| 5.00 | 2.00 | 3.00 | 3.28 | 3.254 | 0.51 | 0.36 | 0.00 | 0.00 |
| 5.00 | 1.50 | 3.50 | 3.80 | 3.768 | 0.62 | 0.18 | 0.00 | 0.00 |
| 5.00 | 1.00 | 4.00 | 4.30 | 4.282 | 0.35 | 0.18 | 0.00 | 0.00 |
| 5.00 | 0.50 | 4.50 | 4.82 | 4.796 | 0.46 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 5.00 | 0.00 | 5.00 | 5.31 | 5.310 | 0.00 | 0.00 | 0.21 | 0.21 |

CIRCUI TO INTERNO LE AJUSTE DE SCON ECTADO

(P1) = PRESSAO 1 (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (F1- P2)

(P2) = PRESSAO 2 (DU) = MEDIA ARITMETICA PARA 3 LEITURAS

(FE) = FUNDO DE ESCALA (DE) = RETA DE REFERENCIA PELO C-COS PONTOS FINAIS

RESULTADOS DO ENSAIO NA CONDICAO P2 = 5,00 KGF/CM2 CONSTANTE TABELA

ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS TEMPERATURA = 27,0 C 9.23

(CP1) (CP2) (CP) (DU) (DE) N-LIN. HISTER. REFEI-  
KGF/CM2 KGF/CM2 KGF/CM2 KGF/CM2 MV D/O FE D/C FE C/O FE

|      |      |       |       |        |       |      |      |
|------|------|-------|-------|--------|-------|------|------|
| 0,00 | 5,00 | -5,00 | -5,12 | -5,120 | 0,00  | -    | 0,00 |
| 0,50 | 5,00 | -4,50 | -4,59 | -4,588 | -0,03 | -    | 0,00 |
| 1,00 | 5,00 | -4,00 | -4,07 | -4,056 | -0,26 | -    | 0,00 |
| 1,50 | 5,00 | -3,50 | -3,54 | -3,524 | -0,30 | -    | 0,00 |
| 2,00 | 5,00 | -3,00 | -3,01 | -2,992 | -0,34 | -    | 0,21 |
| 2,50 | 5,00 | -2,50 | -2,47 | -2,460 | -0,19 | -    | 0,00 |
| 3,00 | 5,00 | -2,00 | -1,95 | -1,928 | -0,41 | -    | 0,00 |
| 3,50 | 5,00 | -1,50 | -1,42 | -1,396 | -0,45 | -    | 0,00 |
| 4,00 | 5,00 | -1,00 | -0,87 | -0,864 | -0,11 | -    | 0,00 |
| 4,50 | 5,00 | -0,50 | -0,33 | -0,332 | -0,04 | -    | 0,00 |
| 5,00 | 5,00 | 0,00  | 0,20  | 0,200  | 0,00  | -    | 0,43 |
| 4,50 | 5,00 | -0,50 | -0,35 | -0,332 | -0,34 | 0,37 | 0,00 |
| 4,00 | 5,00 | -1,00 | -0,88 | -0,864 | -0,30 | 0,19 | 0,00 |
| 3,50 | 5,00 | -1,50 | -1,42 | -1,396 | -0,45 | 0,00 | 0,00 |
| 3,00 | 5,00 | -2,00 | -1,95 | -1,928 | -0,41 | 0,00 | 0,21 |
| 2,50 | 5,00 | -2,50 | -2,47 | -2,460 | -0,19 | 0,00 | 0,21 |
| 2,00 | 5,00 | -3,00 | -3,03 | -2,992 | -0,71 | 0,37 | 0,21 |
| 1,50 | 5,00 | -3,50 | -3,53 | -3,524 | -0,11 | 0,19 | 0,21 |
| 1,00 | 5,00 | -4,00 | -4,06 | -4,056 | -0,07 | 0,19 | 0,21 |
| 0,50 | 5,00 | -4,50 | -4,60 | -4,588 | -0,25 | 0,19 | 0,21 |
| 0,00 | 5,00 | -5,00 | -5,11 | -5,120 | 0,18  | 0,19 | 0,21 |

C I R C U I T O I N T E R N O E A J U S T E D E S C O N E C T A D C

(P1) = PRESSAO 1 (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (FI- P2)

(P2) = PRESSAO 2 (DU) = MEDIA ARITMETICA PARA 3 LEITURAS

(FE) = FUNDO DE ESCALA (DE) = RETA DE REFERENCIA PELO C.DOS PONTOS FINAIS

RESULTADOS DO ENSAIO NA COMEÇAD P1 = P2 ( MAXIMO 5,00 MGF/CM2 ) TABELA

ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS TEMPERATURA = 27,0 C 9.24

| (P1)    | (P2)    | (DP)    | (DU) | (DE) | N.LIN. | HISTER. | REPET. |
|---------|---------|---------|------|------|--------|---------|--------|
| MGF/CM2 | MGF/CM2 | MGF/CM2 | MV   | MV   | O/O FE | O/O FE  | O/O FE |

|      |      |      |       |        |       |      |      |
|------|------|------|-------|--------|-------|------|------|
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 0.000  | 0.00  | -    | 0.00 |
| 0.50 | 0.50 | 0.00 | +0.03 | +0.018 | +0.23 | -    | 0.00 |
| 1.00 | 1.00 | 0.00 | +0.05 | +0.036 | +0.27 | -    | 0.21 |
| 1.50 | 1.50 | 0.00 | +0.08 | +0.054 | +0.49 | -    | 0.21 |
| 2.00 | 2.00 | 0.00 | +0.09 | +0.072 | +0.34 | -    | 0.21 |
| 2.50 | 2.50 | 0.00 | +0.11 | +0.090 | +0.39 | -    | 0.21 |
| 3.00 | 3.00 | 0.00 | +0.12 | +0.108 | +0.23 | -    | 0.21 |
| 3.50 | 3.50 | 0.00 | +0.13 | +0.126 | +0.08 | -    | 0.21 |
| 4.00 | 4.00 | 0.00 | +0.16 | +0.144 | +0.31 | -    | 0.21 |
| 4.50 | 4.50 | 0.00 | +0.16 | +0.162 | -0.04 | -    | 0.00 |
| 5.00 | 5.00 | 0.00 | +0.18 | +0.180 | 0.00  | -    | 0.00 |
| 4.50 | 4.50 | 0.00 | +0.16 | +0.162 | -0.04 | 0.00 | 0.21 |
| 4.00 | 4.00 | 0.00 | +0.16 | +0.144 | +0.31 | 0.00 | 0.21 |
| 3.50 | 3.50 | 0.00 | +0.12 | +0.126 | -0.11 | 0.00 | 0.21 |
| 3.00 | 3.00 | 0.00 | +0.11 | +0.108 | +0.04 | 0.19 | 0.21 |
| 2.50 | 2.50 | 0.00 | +0.10 | +0.090 | +0.19 | 0.19 | 0.21 |
| 2.00 | 2.00 | 0.00 | +0.06 | +0.072 | -0.23 | 0.57 | 0.21 |
| 1.50 | 1.50 | 0.00 | +0.04 | +0.054 | -0.26 | 0.77 | 0.21 |
| 1.00 | 1.00 | 0.00 | +0.03 | +0.036 | -0.11 | 0.38 | 0.00 |
| 0.50 | 0.50 | 0.00 | +0.02 | +0.018 | +0.04 | 0.19 | 0.21 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 0.000  | 0.00  | 0.00 | 0.00 |

CURCUI TO INTERNO CE AJUSTE DE SCDN ECTA C C

(P1) = PRESSAO 1 (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (F1-P2)

(P2) = PRESSAO 2 (DU) = MEDIA ARITMETICA PARA 3 LEITURAS

(FE) = FUNDO DE ESCALA (DE) = RETA DE REFERENCIA PELO C.COS PONTOS FINAIS

CESVID MAXIMO EM RELACAO A MEDIA POR VALOR DE PRESSAO DIFERENCIAL \* TABELA \*

ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS TEMPERATURA = 26,5-27,0 C \* 9-25 \*

| (DP)   | (P10)  | (P2)   | (SC)  | (SD)  | (P1)   | (P2)   | (SC)  | (SD)  | (CV)  |
|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
| KG/CM2 | KG/CM2 | KG/CM2 | MV    | PV    | KG/CM2 | KG/CM2 | PV    | MV    | (SM)  |
| 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00  | -0,01 | 2,00   | 2,00   | +0,09 | +0,06 |       |
| 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 2,50   | 2,50   | +0,11 | +0,10 |       |
| 5,00   | 5,00   | +0,17  | -     | -     | 3,00   | 3,00   | +0,12 | +0,11 |       |
| 5,00   | 5,00   | +0,20  | -     | -     | 3,50   | 3,50   | +0,13 | +0,12 | -2,30 |
| 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 4,00   | 4,00   | +0,16 | +0,16 | +0,08 |
| 0,50   | 0,50   | 0,50   | 0,03  | +0,02 | 4,50   | 4,50   | +0,16 | +0,16 |       |
| 1,00   | 1,00   | 1,00   | 0,05  | +0,03 | 5,00   | 5,00   | +0,18 | -     |       |
| 1,50   | 1,50   | 1,50   | 0,08  | +0,04 | -      | -      | -     | -     |       |
| 0,50   | 0,50   | 0,00   | +0,53 | +0,52 | 5,00   | 4,50   | +0,71 | +0,71 | -1,72 |
| -      | -      | -      | -     | -     | -      | -      | -     | -     | +0,62 |
| -0,50  | 0,00   | 0,50   | -0,48 | -0,49 | 4,50   | 5,00   | -0,33 | -0,35 | +1,53 |
| -      | -      | -      | -     | -     | -      | -      | -     | -     | -0,41 |
| 1,00   | 1,00   | 0,00   | +1,04 | +1,03 | 5,00   | 4,00   | +1,24 | +1,23 | -2,01 |
| -      | -      | -      | -     | -     | -      | -      | -     | -     | +1,13 |
| -1,00  | 0,00   | 1,00   | -0,99 | -1,00 | 4,00   | 5,00   | -0,87 | -0,88 | +1,25 |
| -      | -      | -      | -     | -     | -      | -      | -     | -     | -0,93 |

CIRCUITO INTERNO DE AJUSTE DE SCONECTADO

(P1) = PRESSAO 4 (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (P1-P2)

(P2) = PRESSAO 2 (CV) = MAXIMO DESVIO EM RELACAO A MEDIA ARITMETICA

(FE) = FUNDO DE ESCALA (SC) = MEDIA DE 3 LEITURAS NO CARREGAMENTO

(SP) = MEDIA ARITMETICA (SD) = MEDIA DE 3 LEITURAS NO DESCARREGAMENTO

DESVIO MAXIMO EM RELACAO A MEDIA POR VALOR DE PRESSAO DIFERENCIAL \* TABELA \*

ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS TEMPERATURA = 26,5-27,0 C \* 9.26 \*

(DP) \* (P1) (P2) (SC) (SD) \* (P1) (P2) (SC) (SC) \* (CV) \*

KGF/CM2 \* KGF/CM2 KGF/CM2 MV PV \* KGF/CM2 KGF/CM2 PV MV \* (SP) \*

+1,50 \* 1,50 0,00 +1,57 +1,57 \* 5,00 3,50 +1,76 +1,75 \* -1,92 \*

-1,50 \* 0,00 1,50 -1,49 -1,52 \* 3,50 5,00 -1,42 -1,42 \* +1,15 \*

+2,00 \* 2,00 0,00 +2,09 +2,08 \* 5,00 3,00 +2,27 +2,25 \* -1,92 \*

-2,00 \* 0,00 2,00 -2,00 -2,01 \* 3,00 5,00 -1,95 -1,95 \* +0,57 \*

+2,50 \* 2,50 0,00 +2,63 +2,62 \* 5,00 2,50 +2,79 +2,78 \* -1,63 \*

-2,50 \* 0,00 2,50 -2,51 -2,51 \* 2,50 5,00 -2,47 -2,47 \* +0,38 \*

+3,00 \* 3,00 0,00 +3,15 +3,15 \* 5,00 2,00 +3,30 +3,28 \* -1,53 \*

-3,00 \* 0,00 3,00 -3,00 -3,00 \* 5,00 2,00 -3,30 -3,30 \* +3,22 \*

CIRCUITO INTERNO CE AJUSTE DE SECCIONADO \*

(P1) = PRESSAO Y (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (P1-P2) \*

(P2) = PRESSAO Z (DV) = MAXIMO DESVIO EM RELACAO A MEDIA ARITMETICA \*

(FE) = FUNDO DE ESCALA (SC) = MEDIA DE 3 LEITURAS NO CIRRECAMENTO \*

(SP) = MEDIA ARI. SINAL (SD) = MEDIA DE 3 LEITURAS NO DESCARREGAMENTO \*

DESVC MAXIMO EM RELACAO A MEDIA POR VALOR DE PRESSAO DIFERENCIAL TABELA

ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS TEMPERATURA = 26,5-27,0 9,27

(DP) (P1) (P2) (SC) (SD) (P1) (P2) (SC) (SD) (SP) (DV) (FE)

KG/CM2 KG/CM2 KG/CM2 MV MV KG/CM2 KG/CM2 PV PV (SP) (DV)

-3,00 0,00 3,00 -3,02 -3,03 2,00 5,00 -3,01 -3,03 -3,03 -3,02

3,50 0,00 3,67 3,67 3,67 5,00 1,50 3,81 3,80 -1,34

-3,50 0,00 3,50 -3,54 -3,55 1,50 5,00 -3,54 -3,53 -3,54

4,00 0,00 4,23 4,23 4,23 5,00 1,00 4,31 4,30 -0,77

-4,00 0,00 4,00 -4,06 -4,07 1,00 5,00 -4,07 -4,06 -4,06

4,50 0,00 4,76 4,75 4,75 5,00 0,50 4,82 4,82 -0,57

-4,50 0,00 4,50 -4,59 -4,59 0,50 5,00 -4,59 -4,60 -4,59

CIRCUITO INTERNO E AJUSTE DE SCONECTADO

(P1) = PRESSAO 1 (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (F1-P2)

(P2) = PRESSAO 2 (DV) = MAXIMO DESVC EM RELACAO A MEDIA ARITMETICA

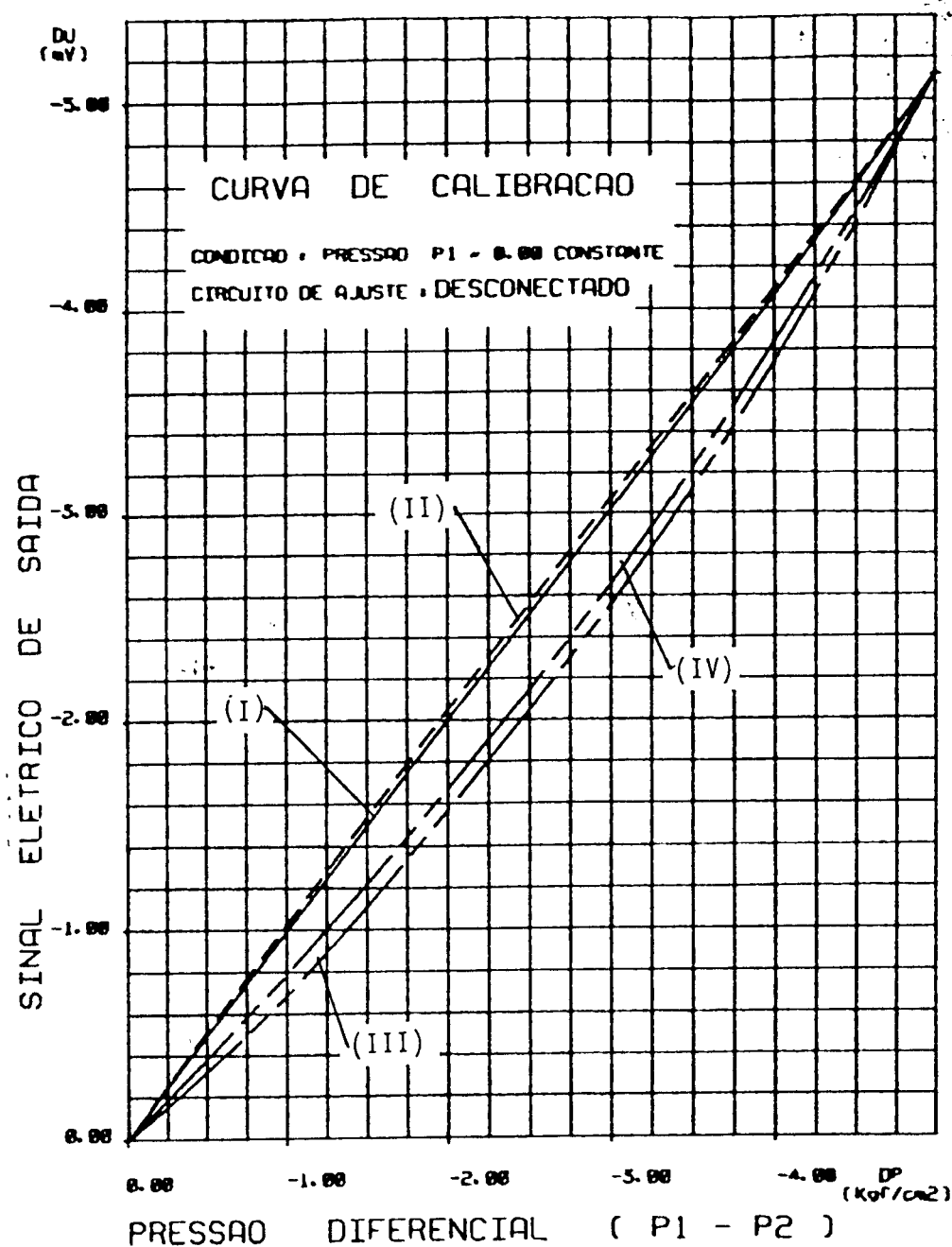
(FE) = FUNCO DE ESCALA (SC) = MEDIA DE 3 LEITURAS NO CARREGAMENTO

(SP) = MEDIA ARI.SINAL (SD) = MEDIA DE 3 LEITURAS NO DESCARREGAMENTO

```

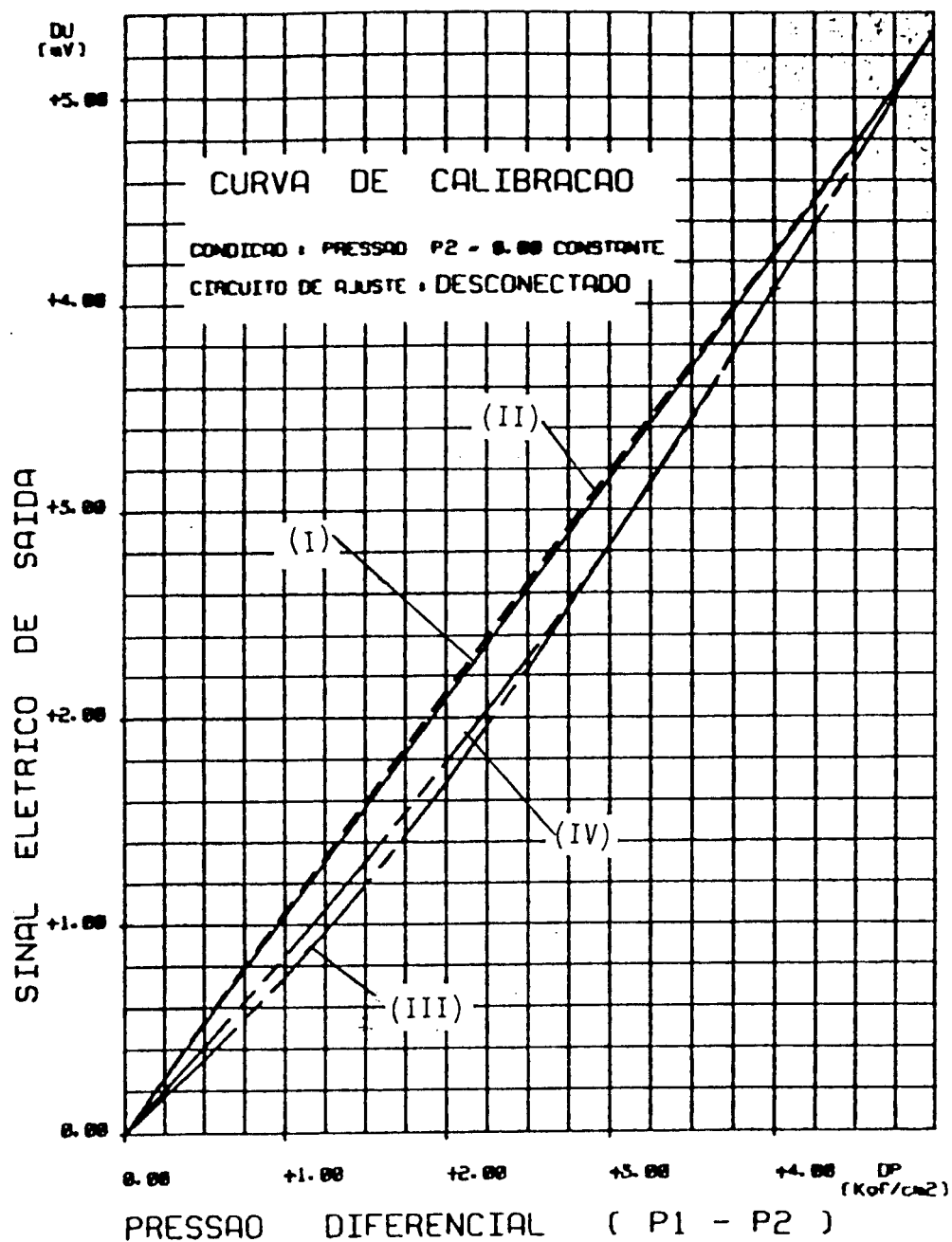
*****
*
*   DESVIO MAXIMO EM RELACAO A MEDIA POR VALOR DE PRESSAO DIFERENCIAL * TABELA *
*
*   ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS          TEMPERATURA = 26,5-27,0 C          9-28
*
*****
*
*   (DP) * (P1) * (P2) * (SC) * (SD) * (P1) * (P2) * (SC) * (SD) * (DV) *
*
*   KGF/CM2 * KGF/CM2 KGF/CM2 MV      MV * KGF/CM2 KGF/CM2 MV      MV * (SM) *
*
*****
*   +5,00 * 5,00 0,00 +5,31 - 5,00 0,00 +5,31 +5,31 * 0,00 *
*
*   -5,00 * 0,00 5,00 -5,12 - 5,00 0,00 -5,12 -5,11 * -0,20 *
*
*****
*   C I R C U I T O   I N T E R N O   D E   A J U S T E   D E   S C O N E C T A D O
*
*   (P1) = PRESSAO 1      (DP) = PRESSAO DIFERENCIAL (P1 - P2)
*   (P2) = PRESSAO 2      (DV) = MAXIMO DESVIO EM RELACAO A MEDIA ARITMETICA
*   (FE) = FUNDO DE ESCALA (SC) = MEDIA ARIT. DE 3 LEITURAS NO CARREGAMENTO
*   (SP) = MEDIA ARIT. SINAL (SD) = MEDIA ARIT. DE 3 LEITURAS NO DESCARREGAMENTO
*
*****
*
*   OBS (1) : DESCONECTADO = CIRCUITO ELETRICO CONFORME FIGURA 4.0-12
*
*   OBS (2) : CONECTADO      = CIRCUITO ELETRICO CONFORME FIGURA 4.0-14
*
*   OBS (3) : BANCO DE ENSAIO CONFORME ESQUEMA DA FIGURA 8.0-2
*
*   OBS (4) : CARACTERISTICAS DA INSTRUMENTACAO UTILIZADA CONFORME TABELA 8.1
*
*   OBS (5) : OS RESULTADOS ESTAO DE ACORDO COM A FORMULACAO APRESENTADA EM 2.6
*
*****

```



- (I) = CARREGAMENTO.
- (II) = RETA DE REFERENCIA PELO CRITÉRIO DOS PONTOS FINAIS.
- (III) = CARREGAMENTO COM ESCALA DOS ERROS 10 VEZES MAIOR.
- (IV) = DESCARREGAMENTO COM ESCALA DOS ERROS 10 VEZES MAIOR.

Figura 9.0.3 - Sinal Elétrico de Saída.  
Circuito Interno de Ajuste *DESCONECTADO*.



- (I) = CARREGAMENTO.
- (II) = RETA DE REFERÊNCIA PELO CRITÉRIO DOS PONTOS FINAIS.
- (III) = CARREGAMENTO COM ESCALA DOS ERROS 10 VEZES MAIOR.
- (IV) = DESCARREGAMENTO COM ESCALA DOS ERROS 10 VEZES MAIOR.

Figura 9.0.4 - Sinal Elétrico de Saída.  
Circuito Interno de Ajuste *DESCONECTADO*.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                           |        |         |        |        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------|---------|--------|--------|
| CARACTERISTICAS ESTATICAS DE DESEMPENHO DO TRANSDUTOR PROTOTIPO                                                                                                                                                                                                                                    |                           |        |         |        | TABELA |
| ALIMENTACAO = 10,076 VOLTS                                                                                                                                                                                                                                                                         | TEMPERATURA = 26,5-27,0 C |        |         |        | 9.30   |
| CONDICAO DE ENSAIO                                                                                                                                                                                                                                                                                 | SENSIBIL.                 | A.LIN. | HISTER. | REPET. | DESVIO |
| CO TRANSDUTOR                                                                                                                                                                                                                                                                                      | MV/VOLTS                  | O/C FE | O/O FE  | C/O FE | O/O FE |
| CIRCUITO INTERNO                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0,461                     | 1,07   | 0,64    | 0,86   | 0,86   |
| DE AJUSTE CONECTADO                                                                                                                                                                                                                                                                                |                           |        |         |        |        |
| CIRCUITO INTERNO                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0,517                     | 1,01   | 0,77    | 0,43   | -2,30  |
| DE AJUSTE DESCONECTADO                                                                                                                                                                                                                                                                             |                           |        |         |        |        |
| (SENSIBIL.) = SENSIBILIDADE MEDIA NO FUNDO DE ESCALA (FE) EM MV/VOLTS<br>(A.LIN.) = NAO LINEARIDADE MAX. E A RELACAO A REJA REF. PELOS PONTOS FINAIS<br>(REPET.) = REPRODUTIBILIDADE MAXIMA<br>(HISTER.) = HISTERESE MAXIMA<br>(DESVIO) = DESVIO MAXIMO EM RELACAO A MEDIA ARITMETICA DAS LEITURAS |                           |        |         |        |        |

## 10 - CONCLUSÕES

Com base na confrontação dos resultados experimentais com os valores teóricos, vamos destacar agora as conclusões mais importantes deste trabalho.

- 10.1 - A proposta original de uma solução construtiva utilizando *DIAFRAGMAS INDEPENDENTES* como elemento sensível a uma conveniente ligação de extensômetros elétricos resistivos como elemento de transdução, apresentada e discutida em 4.3, permitiu obter um *TRANSDUTOR RESISTIVO DE PRESSÃO DIFERENCIAL* capaz de atender aos requisitos exigidos nas aplicações industriais, conforme exposto em 3.4 e confirmado nos resultados mostrados na tabela 9.30.
- 10.2 - A ligação em uma *ÚNICA* ponte de Wheatstone, aproveitando os *SINAIS ALGÉBRICOS OPOSTOS* característicos dos extensômetros montados em *BRAÇOS ADJACENTES*, tornou possível obter um sinal elétrico em função da diferença de pressão, conforme demonstrado em 4.3.1.2, evitando a solução de interligação mecânica dos dois diafragmas, tão crítica e trabalhosa.
- 10.3 - Observando a tabela 9.30, é possível constatar que a utilização de um *CIRCUITO INTERNO DE AJUSTE* acessório permitindo a compensação de parâmetros da função transferência, semelhante ao desenvolvimento em 4.3.1.3, afeta o desempenho estático do transdutor nos aspectos:
  - 10.3.1 - A sensibilidade (s) do transdutor sofre uma redução de 12% do fundo de escala.
  - 10.3.2 - A não-linearidade, a histerese e a repetibilidade do transdutor não sofrem alteração apreciável.

- 10.3.3 - O desvio em relação à média aritmética das leituras melhorou sensivelmente, passando de 2,30% (FE) para 0,86% (FE). Esta melhoria permitiu atingir os requisitos propostos em 3.4, justificando assim o uso deste circuito interno de ajuste em transdutores de pressão diferencial.
- 10.4 - A disposição dos extensômetros empregada neste trabalho e proposta em 5.2.1.3 é original. Habitualmente, os extensômetros são dispostos de forma a atender ao critério de *MÁXIMA SENSIBILIDADE*, conforme exposto em 5.1.1. No caso dos transdutores de pressão diferencial, procurando reduzir os erros oriundos da imprecisão de colagem dos extensômetros, foi adotado o critério de *MELHOR DESEMPENHO*, e por esta razão os pontos escolhidos são próximos ao centro e na direção tangencial do diafragma, conforme 5.1.2. Isto levou a excelentes resultados, com a diferença de sensibilidade do diafragma 1 em relação ao 2 inferior a 3,64% (FE), conforme mostra a tabela 9.28.
- 10.5 - Comparando a tabela 7.2 com a tabela 9.28, observamos que a maior diferença entre o valor estimado com base na função de transferência e o valor médio obtido no ensaio é de 2,26%. A função transferência do transdutor diferencial de pressão sem circuito elétrico de ajuste representada pela equação 4.0.54 fica assim confirmada.
- 10.6 - Comparando a tabela 7.3 com a tabela 9.18, notamos que os valores médios obtidos no ensaio do transdutor de pressão diferencial com circuito elétrico de ajuste das constantes, estão perfeitamente contidos entre os valores teóricos máximos e mínimos calculados com base na função transferência representada pela equação 4.0.69. Desta forma, fica confirmado o equacionamento desenvolvido em 4.3.1.3.
- Durante o ensaio preliminar, vários testes foram efetuados buscando confirmar se outros ajustes, permitidos pelo circuito definido na figura 4.0.13, estavam de acordo com os valores determinados teoricamente. O resultado foi sempre satisfatório.

- 10.7 - A não-linearidade observada em todas as curvas de calibração do transdutor de pressão diferencial é, em sua maior parte, oriunda do efeito de membrana do diafragma. À medida que o plano médio do diafragma se desloca, surgem forças de tração provocadas pelo inevitável aumento das dimensões no sentido de seu raio. Este efeito é função do deslocamento central do diafragma, e foi abandonado na hipótese 4.2.1.0.5 do equacionamento.
- 10.8 - O aço inoxidável SAE/AISI 304 recozido possui uma tensão limite de escoamento baixa quando comparado com outros aços. Isto obriga o uso de menores diâmetros para o diafragma, conforme exposto em 6.5. Como resultado, as deformações tornam-se menores e reduzem o sinal elétrico de saída do transdutor. No sentido de aumentar muito a sensibilidade do transdutor, é aconselhável o emprego de aços inoxidáveis tratáveis ou submetidos a trabalho a frio (encruamento).
- 10.9 - Durante o ensaio preliminar, verificou-se que o aperto dos parafusos de fixação do diafragma afeta a não-linearidade. Sugerimos, então, o uso de maior número de parafusos na fixação do diafragma no corpo do transdutor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [REF. 01 ] - J. W. Dally and W. F. Riley, "EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS", McGraw Hill Book Company, USA, 1974.
- [REF. 02 ] - R. C. Dove and P. H. Adams, "EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS AND MOTION MEASUREMENT", Prentice-Hall of India, INDIA, 1965.
- [REF. 03 ] - L. Schaeffer, I. G. Borchardt e L. F. A. Carvalho, "PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA CÉLULA DE CARGA PARA MEDIÇÃO DE ESFORÇOS DE LAMINAÇÃO", Revista Brasileira de Tecnologia, periódico nº 10, CNPq, BRASIL, março 1979.
- [REF. 04 ] - S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, "TEORIA DA ELASTICIDADE", Guanabara Dois, BRASIL, 1980.
- [REF. 05 ] - R. J. Roark and W. Young, "FORMULAS FORS STRESS AND STRAIN", McGraw Hill Book Company, USA, 1975.
- [REF. 06 ] - Measurement Group, "DESIGN CONSIDERATIONS FOR DIAPHRAGM PRESSURE TRANSDUCER", Tech Note TN-129-3, Micro-Measurements, USA, 1974.
- [REF. 07 ] - I. H. Shames, "MECÂNICA DOS FLUIDOS - PRINCÍPIOS BÁSICOS", Edgard Blücher, BRASIL, 1973.
- [REF. 08 ] - Technical Group, "PRESSURE TRANSDUCERS", Catalog and Information, BLH Electronics, USA, 1978.
- [REF. 09 ] - Technical Group, "PRESSURE CELLS", Catalog and Information, BLH Electronics, USA, 1978.
- [REF. 10 ] - Technical Group, "300 SERIES PRESSURE TRANSDUCERS", Bulletin 300, Dynisco-A Bofors Company, USA, 1979.
- [REF. 11 ] - P. K. Stein, "MEASUREMENT ENGINEERING - BASIC PRINCIPLES", Stein Engineering Services Inc., USA, 1964.

- [REF. 12] - E. O. Doebelin, "MEASUREMENTS SYSTEMS: APPLICATION AND DESIGN", McGraw Hill Book Company, JAPAN, 1975.
- [REF. 13] - O. G. S. Ricardo, "TEORIA DAS ESTRUTURAS", Editora da Universidade de São Paulo, McGraw Hill, BRASIL, 1978.
- [REF. 14] - O. G. S. Ricardo, "INTRODUÇÃO À RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS", Editora da Universidade de Campinas, BRASIL, 1977.
- [REF. 15] - Military Standardization Handbook, "METALLIC MATERIALS AND ELEMENTS FOR AEROSPACE VEHICLE STRUCTURES", Norma MIL-HDBK-5B, Department of Defense, USA, 1974.
- [REF. 16] - V. Chiaverini, "AÇOS-CARBONO E AÇOS LIGAS", Publicação da Associação Brasileira de Metais, BRASIL, 1971.
- [REF. 17] - Technical Group, "PROPERTIES OF ARMC0 STAINLESS STEELS", The ARMC0 International Corporation, USA, 1973.
- [REF. 18] - H. N. Nordan, "HANDBOOK OF TRANSDUCERS FOR ELECTRONIC MEASURING SYSTEM", Prentice-Hall, USA, 1969.
- [REF. 19] - V. I. Feodosiev, "RESISTENCIA DE MATERIALES", Editora MIR, URSS, 1980.
- [REF. 20] - E. Wilner, "CORRENTE ELÉTRICA", Editora Livraria Nobel, Impresso por LPM, BRASIL, 1971.
- [REF. 21] - R. F. Wolny, "A ELETRÔNICA NOS TRANSMISSORES DE PRESSÃO DIFERENCIAL", C & I - Contrôl e Instrumentação, periódico de julho, Editora Técnica Gruenwald, BRASIL, 1983.
- [REF. 22] - E. F. Bruhn, "ANALYSIS AND DESIGN OF FLIGHT VEHICLE STRUCTURES", Tri-State Offset Company, USA, 1965.
- [REF. 23] - S. Timoshenko and W. Woinowsky, "THEORY OF PLATES AND SHELLS", McGraw Hill Book Company, Kōgakusha Company, JAPAN, 1959.
- [REF. 24] - B. D. Wedlock and J. K. Roberge, "ELECTRONIC COMPONENTS AND MEASUREMENTS", Prentice-Hall, USA, 1969.
- [REF. 25] - A. N. Gomes, "UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE CÉLULAS DE CARGA RESISTIVAS", Faculdade de Engenharia de Campinas, UNICAMP, BRASIL, 1982.

[REF. 26 ] - Associação Brasileira de Normas Técnicas, "CELULAS DE CARGA - TERMINOLOGIA E DEFINIÇÕES", Texto Base Para Normalização , ABNT, BRASIL, 1983.

SERGIO ESPEL DE OLIVEIRA  
Rua Ana Pereira de Mello, nº 118  
06000 - Osasco, SP  
BRASIL