3
Técnica do Furo Cego ou Hole Drilling

A técnica do furo cego é uma das mais utilizadas na medição de tensões residuais, por ser de fácil aplicação na maior parte dos casos, ter uma relação custo-exatidão adequada, e por ter seus procedimentos de medição e tratamento de resultados normalizados. É uma técnica considerada semidestrutiva, pois o dano causado por sua execução é muito localizado, não comprometendo o pleno funcionamento do equipamento medido na maior parte das vezes [19].

A usinagem de um furo na medição de tensões residuais pode ser associada a técnicas experimentais para determinação das redistribuições de tensões por ele causadas. Tais técnicas são a extensometria com uso de extensômetros de resistência elétrica, a Fotoelasticidade por Reflexão, a Holografia Eletrônica e o Moiré Interferométrico. Estas últimas podem ser aplicadas em medições de peças com tamanhos reduzidos ou na medição em pequenos domínios. Os espécimes medidos neste trabalho são tubos de dimensões razoáveis. Além disso, as tensões alvo são macroscópicas. A técnica utilizada neste trabalho e descrita neste capítulo é aquela que se utiliza da usinagem de um furo não passante associado à medição de deformações por extensômetros de resistência elétrica.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

3.1. Extensometria

A técnica mais aplicada para medição de tensões em equipamentos industriais é a extensometria, que utiliza extensômetros de resistência elétrica (figura 3.1), mais conhecidos como *strain gages* [8].

O principal equipamento da extensometria é o condicionador (ou indicador de deformações), que contém uma ou mais Pontes de Weatstone, nas quais são ligados os extensômetros. O condicionador permite a determinação das mudanças de potencial geradas pelas variações de resistências elétricas dos sensores, induzidas pelas variações de seus comprimentos. A figura 3.1 ilustra um extensômetro em instalado em um componente que sofre um carregamento uniaxial. A deformação é transmitida para o *strain gage* através de um adesivo.

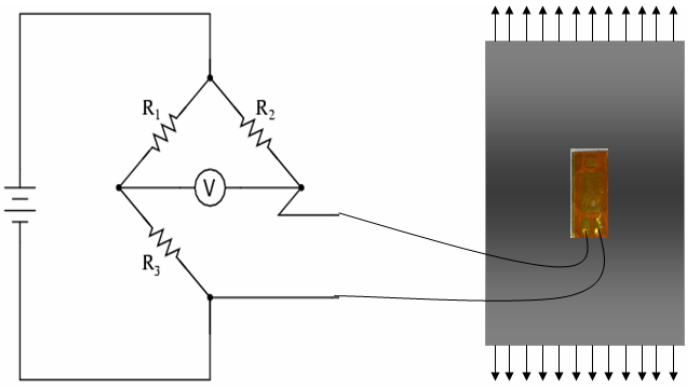

Figura 3.1 – Esquema simplificado de uma ligação de um extensômetro a uma Ponte de Wheatstone

Embora a extensometria seja uma técnica já consolidada e bastante confiável, ela exige grande habilidade por parte de seu executor, que deve cumprir com máximo esmero as etapas de marcação e preparação da superfície (lixamento e limpeza) e colagem, e deve conhecer muito bem os equipamentos utilizados.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

3.2. Histórico da Técnica

Elencaram-se neste tópico alguns dos principais trabalhos e suas contribuições para consolidar a técnica do furo cego como uma das mais confiáveis e a mais utilizada no âmbito industrial e que serviram de base para a Norma ASTM 837, que rege o tratamento dos dados obtidos com a técnica do furo cego associada à extensometria.

No início da década de 30, o pesquisador alemão J. Mathar apresentou um artigo descrevendo a teoria e a técnica experimental da medição de tensões residuais a partir da usinagem de um furo [9]. Seu experimento consistiu em medir o alívio elástico, nas vizinhanças de um furo usinado com 6 mm de diâmetro por meio de um extensômetro mecânico de 157 mm de comprimento distando 8 mm do centro do furo, em uma placa tencionada unixialmente.

- Em 1936, Campus desenvolveu a generalização do método do furo cego aplicável a condições nos casos onde as direções das tensões principais fossem conhecidas [9].
- Em meados da década de 40, os professores W. Soete e R. Vancrombrugge da *Ghente University* da Bélgica usaram extensômetros

de resistência elétrica no método. O *strain gage* usado tinha 8 mm de comprimento e o diâmetro do furo 6 mm. A medição das deformações teve uma melhora significativa [9].

- A aplicação moderna do método para medição de tensões residuais uniformes teve início com o trabalho de Rendler e Vigness em 1966 [7]. Eles desenvolveram um procedimento sistemático e de fácil reprodução, definiram a configuração das rosetas indicadas pela Norma ASTM 837 e propuseram a adimensionalização dos parâmetros geométricos do método para expandir sua aplicação.
- Em 1981, Schajer realizou a primeira análise generalizada de elementos finitos para o método [7], estabelecendo um procedimento numérico para obtenção dos coeficientes de alívio.
- Em 1988, o mesmo Schajer comparou quatro métodos de cálculo de tensões não-uniformes ao longo da espessura com a técnica do furo cego [12], assunto este que teve Kelsey como o primeiro interessado em 1956 [7].
- Em 1989, Lu e Flavenot [10] propuseram a execução do furo de forma incremental.
- Em 1990, Schajer [22] propôs um procedimento e um algorítimo para tratamento dos dados de deformações causadas pela execução furo para obtenção das tensões residuais, os quais são usados na Norma ASTM E837;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

3.3. Princípios Fundamentais e Modelamento Matemático

A usinagem do furo provoca uma modificação no estado de tensão interna da peça que se traduz em deslocamentos e deformações na vizinhança do furo.

O método do furo para determinação de tensões residuais tem como base teórica as equações de Kirsch, formuladas em 1898, para determinação do estado de tensões ao redor de um furo passante existente numa placa infinita com carregamento conhecido.

O estado de tensões (σ') medido através da usinagem de um furo passante num espécime pode ser representado pela subtração do campo de concentração de

tensões (σ''), dado pela solução de Kirsch, do estado de tensões na placa sem furo (σ). A figura 3.2 traz uma ilustração desta subtração.

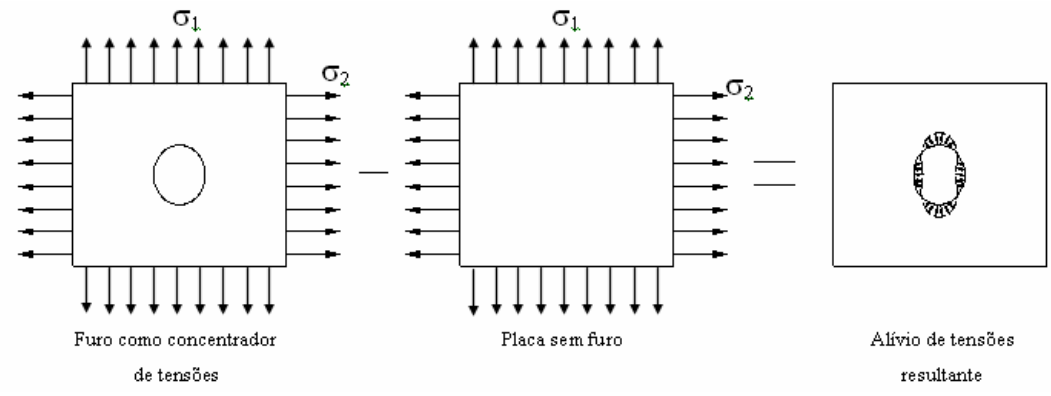

Figura 3.2. Obtenção do estado de tensões resultante do alívio provocado pelo furo.

3.3.1. Cálculo de Tensões para Furo Passante.

As tensões atuantes em planos ortogonais r e θ que passam por um ponto P(r, θ) qualquer, em uma placa submetida a um estado biaxial de tensões, definido pelas tensões principais σ_1 e σ_2, são dadas pelas equações 3.1:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\cos 2\theta \qquad (3.1)\ a$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\cos 2\theta \qquad (3.1)\ b$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\operatorname{sen} 2\theta \qquad (3.1)\ c$$

As equações de Kirsh para a concentração de tensões em um ponto P (r, θ) para uma placa infinita carregada biaxialmente (figura 3.2), que tem sua dedução descrita em vários livros de Teoria da Elasticidade, são expressas das seguintes formas:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

$$\sigma_r'' = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\left(1 - 4\frac{R^2}{r^2} + 3\frac{R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta$$

$$\sigma_\theta'' = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \qquad (3.2)\ \text{a-c}$$

$$\tau_{r\theta}'' = -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\left(2\frac{R^2}{r^2} - 3\frac{R^4}{r^4}\right)\text{sen}2\theta$$

A figura 3.3 mostra um gráfico que representa a variação da intensidade da concentração de tensões, nas direções radial e circunferencial, nas posições 0 e 90º, a partir da borda de um furo, em uma placa carregada uniaxialmente, usando as equações de Kirsh.

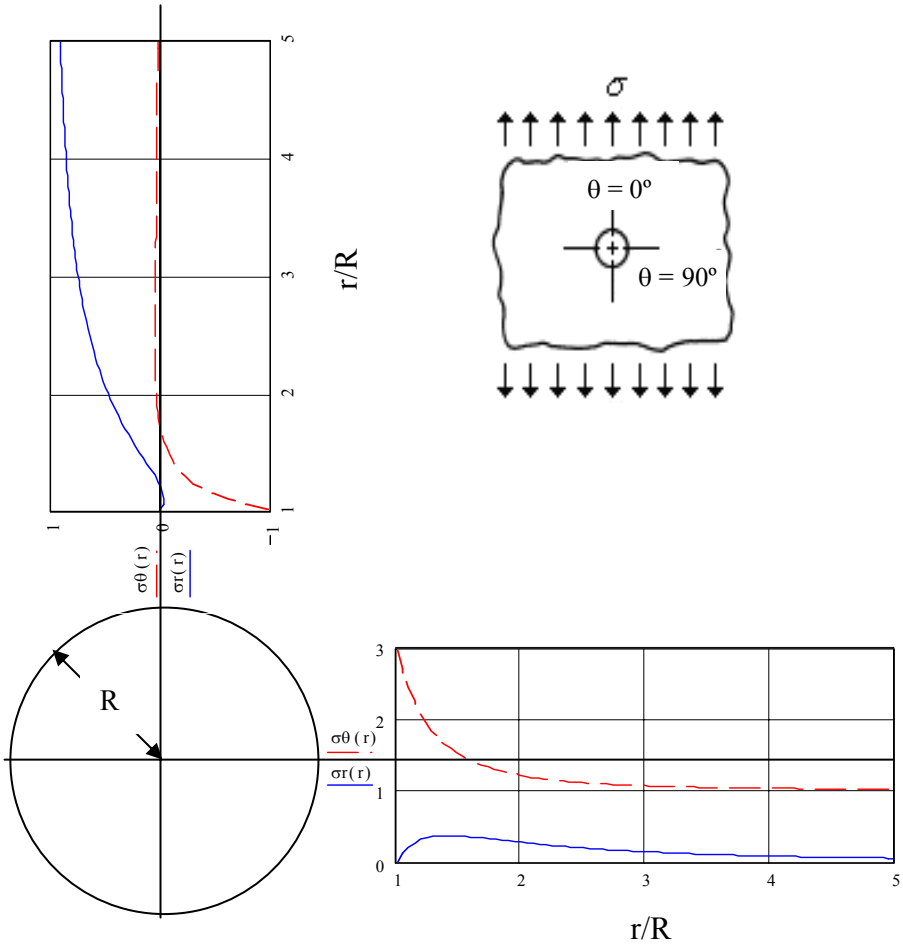

Figura 3.3. Variação das relações entre tensões radial e circunferencial e tensão nominal.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

Sabendo que $\sigma' = \sigma'' - \sigma$ (figura 3.2), pode-se escrever o estado de tensões aliviadas (σ') em uma dada posição (r, θ), gerado pela usinagem de um furo em uma placa carregada biaxialmente:

$$\sigma_r' = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}\left(\frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\left(-4\frac{R^2}{r^2} + 3\frac{R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta$$

$$\sigma_\theta' = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}\left(\frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\left(3\frac{R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \qquad (3.3)\ a\text{-}c$$

$$\tau_{r\theta}' = -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\left(2\frac{R^2}{r^2} - 3\frac{R^4}{r^4}\right)\mathrm{sen}2\theta$$

As deformações na borda do furo podem ser descritas pelas equações constitutivas de Hooke. Pelo fato de as rosetas utilizadas neste trabalho serem todas radiais, essa será a única direção que terá sua deformação expressa:

$$\varepsilon_r' = \frac{1}{E}\left(\sigma_r' - \upsilon\sigma_\theta'\right) \qquad (3.4)$$

Inserindo as equações 3.3 (a) e (b) em 3.4 e já dispensando o índice "'", chega-se às seguintes expressões:

$$\varepsilon_r = \left(A + B\cos 2\theta\right)\sigma_1 + \left(A - B\cos 2\theta\right)\sigma_2 \qquad (3.5)$$

As constantes A e B são conhecidas como coeficientes de alívio e assumem as seguintes expressões:

$$A = -\frac{1-\upsilon}{2E}\left(\frac{R}{r}\right)^2$$

$$B = -\frac{1+\upsilon}{2E}\left[\frac{4}{1+\upsilon}\left(\frac{R}{r}\right)^2 - 3\left(\frac{R}{r}\right)^4\right] \qquad (3.6)\ a\text{-}b$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

Em seu artigo em 1966, Rendler e Vigness [13], propuseram uma configuração de roseta mostrada na figura 3.5, colaborando para a solução da equação 3.23. Tal configuração é até hoje utilizada pelos fabricantes de rosetas.

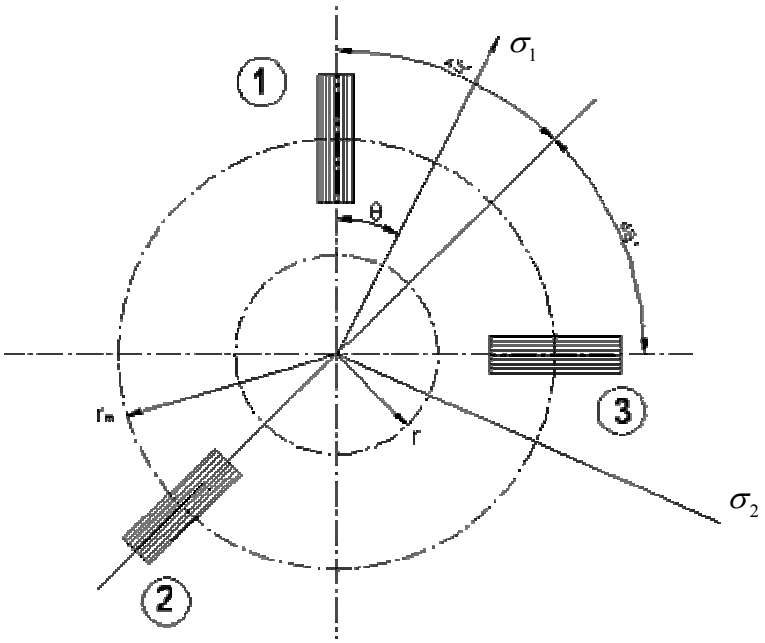

Figura 3.5. Configuração da roseta proposta por Rendler e Vigness

Determinando as deformações nas direções 1 e 3 indicadas na roseta da figura 3.5, a partir da equação 16, tem-se:

$$\varepsilon_1 = \mathrm{A}(\sigma_1 + \sigma_2) + \mathrm{B}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta$$

$$\varepsilon_2 = \mathrm{A}(\sigma_1 + \sigma_2) + \mathrm{B}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2(\theta + 45^0) \qquad (3.7)\ \text{a-c}$$

$$\varepsilon_3 = \mathrm{A}(\sigma_1 + \sigma_2) + \mathrm{B}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2(\theta + 90^0)$$

Resolvendo as equações 3.25, chega-se às equações:

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4\mathrm{A}} - \frac{1}{4\mathrm{B}}\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}$$

$$(3.8)\ \text{a-b}$$

$$\sigma_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4\mathrm{A}} + \frac{1}{4\mathrm{B}}\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}$$

Onde:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

σ_1 e σ_2 são as tensões máxima e mínima presentes na superfície do componente. A direção principal, ângulo θ da figura 3.5, é descrita por:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)}\right) \tag{3.9}$$

3.3.2. Considerações sobre a Técnica com Furo Passante Associada à Extensometria

Nas medições extensométricas das deformações ao redor do furo passante é importante que se verifique a extensão da região que sofre um alívio de tensões, além da variação da concentração de tensões provocados pelo furo. A primeira consideração importante a ser feita é que os coeficientes A e B das equações 3.7, são usados para o cálculo de tensões a partir de deformações pontuais, o que não condiz com a extensometria, que trabalha com a deformação que ocorre em toda a área sobre a qual o *strain gage* está colado. Em 1981 Schajer [14] definiu dimensões, mostradas na figura 3.6, para considerar a área finita dos extensômetros e integrou as equações 3.7 com relação a essas dimensões obtendo as equações:

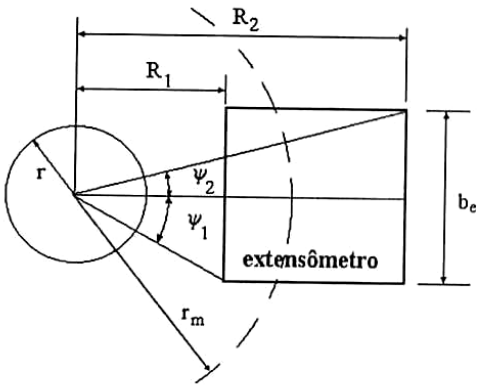

Figura 3.6. Representação dos parâmetros geométricos finitos do extensômetro.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

$$\bar{A} = \frac{(1+\upsilon)r^2}{E(R_2 - R_1)b_e}(\psi_2 - \psi_1)$$

$$\bar{B} = \frac{(1+\upsilon)r^2}{E(R_2 - R_1)b_e}\left[\frac{2(1-\upsilon)}{1+\upsilon}(\psi_2 - \psi_1) + (\text{sen}2\psi_2 - \text{sen}2\psi_1)\right] \qquad (3.10)\ \text{a-b}$$

$$-\frac{1}{8}\left(\frac{r}{R_1}\right)^2(2\text{sen}2\psi_1 + \text{sen}4\psi_1) + \frac{1}{8}\left(\frac{r}{R_2}\right)^2(2\text{sen}2\psi_2 + \text{sen}4\psi_2)$$

Rendler e Vigness [13], em 1966, através de seus experimentos, concluíram que a adimensionalização era um meio para o uso dos coeficientes de alívio para qualquer dimensão de furo. Eles usaram o diâmetro do furo para adimensionalizar os resultados de suas medições e mostraram alguns resultados de A e B encontrados a partir de suas experiências. Com a normalização da fabricação de rosetas, Schajer [14] sugeriu o uso de um raio médio (r_m[1]) para estas, mostrado na figura 3.6, e adotou-o como o fator em relação ao qual os parâmetros da técnica seriam adimensionalisadas.

O valor das deformações causadas pela execução do furo segue o mesmo comportamento do campo das concentrações de tensão gerado (mostrado no gráfico da figura 3.4). Elas diminuem abruptamente com o aumento da distância da borda do furo. Isto poderia induzir ao desejo de colar o extensômetro à menor distância possível do furo (dimensão R_1 da figura 3.6), no intuito de ler o máximo possível da deformação gerada. Porém, com o extensômetro muito próximo da borda do furo, qualquer excentricidade faria R_1 e R_2 tornarem-se diferentes dos especificados pelos fabricantes. As equações 3.20 mostram a importância da utilização dos valores corretos de R_1 e R_2, já que essas distâncias relacionam-se quadraticamente com os coeficientes $\bar{A}$ e $\bar{B}$, usados nos cálculos das tensões. Schajer [14] definiu valores de R_1 e R_2 que, proporcionam a leitura de um percentual significativo da deformação aliviada com a execução do furo, sem variações destes raios. Schajer também propôs o uso de novos coeficientes de alívio, dependentes exclusivamente das dimensões da roseta, cujas equações são:

[1] As rosetas mais comuns no mercado são a MM062-RE e a MM125-RE e possuem raios médios de 2,57 e 3,15 mm, respectivamente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

$$\bar{a} = -\frac{2E\bar{A}}{1+\upsilon}$$

$$\bar{b} = -2E\bar{B} \qquad (3.11)\ a\text{-}b$$

Estes coeficientes são praticamente independentes do material do espécime, isto é, não variam com o módulo de elasticidade e têm variações inferiores a 1% para coeficientes de Poisson entre 0,28 e 0,33 [19].

3.3.3. Análise Extensométrica para o Furo Cego

Os tópicos anteriores forneceram toda a base necessária para o entendimento de como as informações de alívio de deformação, geradas pela execução de um furo em um espécime, são associadas à magnitude e distribuição das tensões existentes no espécime. Porém, todas as análises feitas consideraram a hipótese de um furo passante, o que é impraticável em grande parte das medições. Por isso a opção por um furo não passante (cego) na grande maioria das medições.

A execução de um furo cego em um espécime carregado gera um campo de tensões complexo, que não possui solução exata na teoria da elasticidade [20]. Rendler e Vigness [13] demonstraram que a deformação aliviada pela execução de um furo cego também varia de forma senoidal ao longo de um círculo concêntrico ao furo, na maneira descrita pela equação 3.25 para um furo passante. Isto significa que as equações 3.28 podem ser usadas para o furo cego, contanto que se utilizem os coeficientes de alívio adequados.

Neste tópico, será mostrada a inclusão do parâmetro de profundidade do furo na determinação dos coeficientes de alívio $\bar{a}$ e $\bar{b}$, tornando as formulações demonstradas anteriormente aplicáveis à Técnica do Furo Cego.

Determinação Experimental dos coeficientes $\bar{a}$ e $\bar{b}$

Será apresentado aqui o procedimento experimental proposto por Rendler e Vigness [13], que embora tenha sido apresentado inicialmente para um furo passante, serve perfeitamente para determinação dos coeficientes de alívio para a análise extensométrica do método do furo cego.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

O método proposto segue os seguintes passos:

1) Colagem da roseta;
2) Balanceamento do indicador de deformações;
3) Aplicação de uma carga conhecida P, que produzirá uma tensão (de calibração) σ_c no espécime;
4) Leitura das deformações ε_{1a} e ε_{3a} na placa sem o furo;
5) Descarregamento do espécime e usinagem do furo;
6) Re-balanceamento do indicador de deformações[2];
7) Nova aplicação da carga P;
8) Leitura das deformações ε_{1d} e ε_{3d}.

A deformação aliviada pelo furo na região sob a área dos extensômetros da roseta é dada pela diferença entre as deformações lidas antes e depois da usinagem do furo:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1d} - \varepsilon_{1a}$$
$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{3d} - \varepsilon_{3a} \qquad (3.12)\text{ a-b}$$

Simplificando a equação 3.25 para um estado uniaxial, que é o caso do experimento proposto, e aplicando-as para θ = 0º e θ = 90º, tem-se:

$$\overline{A} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2}$$
$$\overline{B} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2} \qquad (3.13)\text{ a-b}$$

Substituindo-se os valores encontrados nas equações 3.30, pode-se determinar os coeficientes de alívio adimensionais $\overline{a}$ e $\overline{b}$. A figura 3.7 apresenta um gráfico com valores destes coeficientes para rosetas RE e UL, que são as mais utilizadas.

[2] O rebalanceamento do indicador de deformações após a usinagem do furo elimina a influência de tensões residuais, que possam existir no espécime, na determinação dos coeficientes de alívio.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

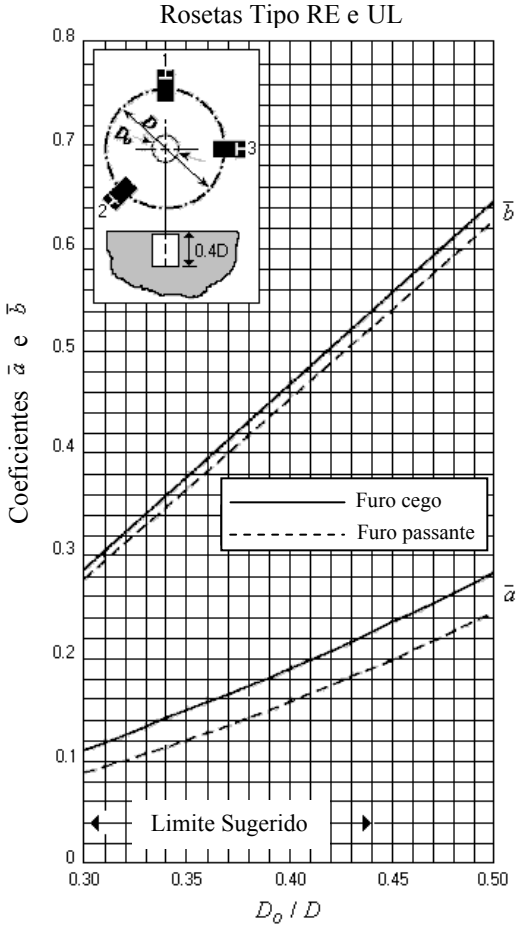

Figura 3.7. Gráfico para determinação dos coeficientes $\bar{a}$ e $\bar{b}$ para furos usinados em passo único para rosetas tipo RE e UL.

Determinação Numérica dos Coeficientes $\bar{a}$ e $\bar{b}$

Trabalhos como os de Schajer [14], de Flaman e Boag [21] e de Soares [16], apresentam uma investigação numérica, para determinação dos coeficientes de alívio ao longo da profundidade do furo. Dentre estes, vale destacar o artigo de Schajer, que aplicando numericamente os procedimentos sugeridos por Rendler e Vigness [13] a um modelo Elementos Finitos, apresentou gráficos (figura 3.8) mostrando a variação dos coeficientes $\bar{a}$ e $\bar{b}$ com a profundidade do furo normalizada pelo raio médio da roseta (z/r_m).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

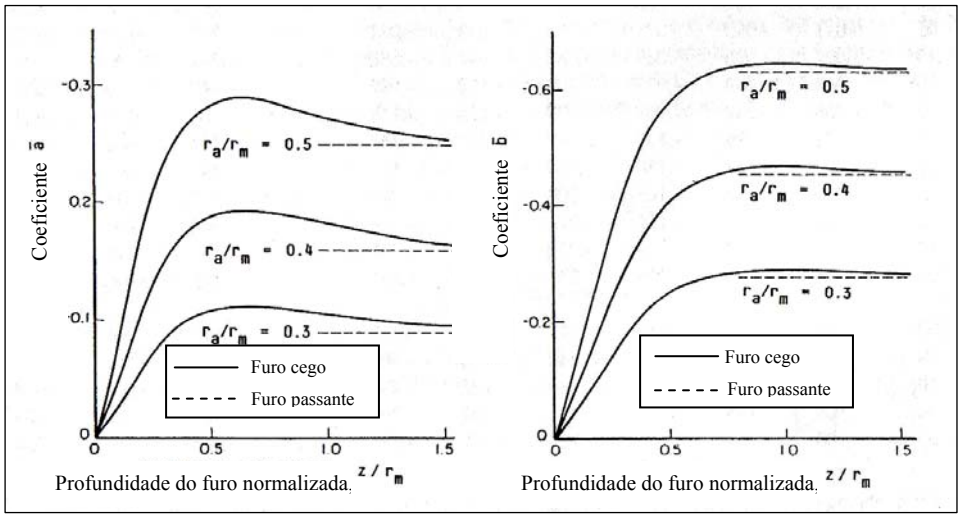

Figura 3.8. Variação dos coeficientes $\bar{a}$ e $\bar{b}$ com a profundidade do furo [7]

Pelos gráficos da figura 3.8 pode-se perceber que para profundidades maiores os coeficientes de alívio para o furo cego aproximam-se dos valores dos coeficientes para um furo passante.

A Norma ASTM E 837 apresenta uma tabela de valores dos coeficientes de alívio $\bar{a}$ e $\bar{b}$ determinados numericamente para os três tipos de roseta apresentados em seu texto. A tabela 3.1 apresenta a parte referente às rosetas, definidas pela norma como de Tipo A, que foram as usadas nas medições deste trabalho.

Tabela 3.1. Determinação dos coeficientes $\bar{a}$ e $\bar{b}$ para rosetas do Tipo A [19]

	$\bar{a}$						$\bar{b}$					
	D_0/D						D_0/D					
h/D	0,030	**0,031**	0,035	0,040	0,045	0,050	0,030	**0,031**	0,035	0,040	0,045	0,050
0	0	**0**	0	0	0	0	0	**0**	0	0	0	0
0,05	0,027	**0,029**	0,037	0,049	0,063	0,080	0,051	**0,055**	0,069	0,090	0,113	0,140
0,10	0,059	**0,063**	0,081	0,108	0,138	0,176	0,118	**0,126**	0,159	0,206	0,255	0,317
0,15	0,085	**0,091**	0,115	0,151	0,192	0,238	0,180	**0,192**	0,239	0,305	0,375	0,453
0,20	0,101	**0,108**	0,137	0,177	0,223	0,273	0,227	**0,241**	0,299	0,377	0,459	0,545
0,25	0,110	**0,117**	0,147	0,190	0,238	0,288	0,259	**0,275**	0,339	0,425	0,513	0,603
0,30	0,113	**0,120**	0,151	0,195	0,243	0,293	0,279	**0,296**	0,364	0,454	0,546	0,638
0,35	0,113	**0,120**	0,151	0,195	0,242	0,292	0,292	**0,309**	0,379	0,472	0,566	0,657
0,40	0,111	**0,149**	0,149	0,192	0,239	0,289	0,297	**0,315**	0,387	0,482	0,576	0,668
Passante	0,090		0,122	0,160	0,203	0,249	0,288		0,377	0,470	0,562	0,651

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

Na tabela 3.1, *h* é a profundidade do furo, *D* diâmetro médio da roseta e D_0 o diâmetro do furo. Os valores em **negrito** são interpolações realizadas para determinar os coeficientes $\bar{a}$ e $\bar{b}$ referentes às dimensões da roseta utilizada neste trabalho.

3.4. Etapas de execução da técnica do furo cego

A figura 3.9 apresenta um fluxograma com as etapas de execução da técnica do furo cego. A seguir disserta-se sobre cada uma das etapas e suas influências dentro do processo para a obtenção de uma medição confiável.

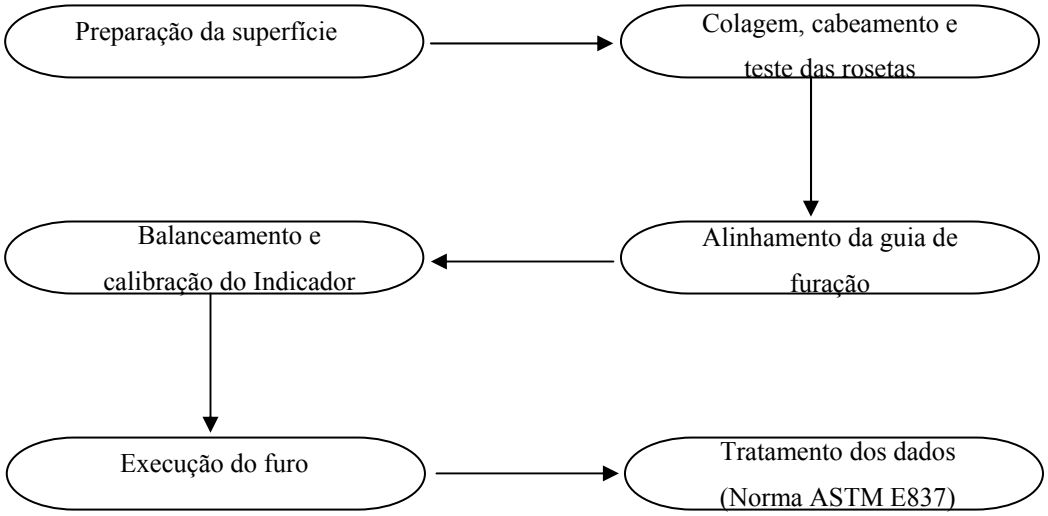

Figura 3.9. Fluxograma de aplicação da técnica do furo cego

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

3.4.1. Preparação da superfície

Esta etapa engloba as atividades de retificação e limpeza da superfície onde será colada a roseta. O lixamento feito para retificar a superfície de medição pode gerar novas tensões residuais ou mudar o estado das já existentes, principalmente no processo de furação incremental [17]. Mas como é uma etapa necessária para a medição, o que se deve fazer é adotar metodologias com menor grau de agressividade possível à superfície de medição, algumas até recomendadas pelos próprios fabricantes das rosetas.

3.4.2. Colagem, Cabeamento e Teste das Rosetas

Com a superfície devidamente retificada e muita bem limpa, a roseta é colada segundo instruções do fabricante de forma a garantir que as deformações ocorridas na superfície sob as grades de medição de seus extensômetros serão totalmente lidas. Após a colagem da roseta, que normalmente é feita com cianoacrilato, é realizado o cabeamento dos terminais de seus extensômetros por meio de soldagem para ligá-los ao indicador de deformações. As resistências dos seus três extensômetros são medidas para verificar se estão conforme especificadas pelo fabricante, bem como sua condutância para certificar a ausência de corrente entre eles e a superfície de medição. Tais testes ajudam a avaliar se a colagem e a soldagem dos cabos foram realizadas com sucesso.

3.4.3. Balanceamento e Calibração do Indicador de Deformações

Se os testes com a roseta mostrarem a adequação de sua instalação, os três extensômetros são ligados às Pontes de Weatstone do indicador de deformações. As Pontes são balanceadas e os sistemas de medição dos extensômetros são calibrados com o auxílio de uma resistência padrão.

3.4.4. Alinhamento da guia de furação

Esta é uma das etapas mais críticas do processo, pois como foi visto há pouco na explanação teórica da técnica, os valores das deformações variam muito nos pontos próximos ao furo, sendo muito sensíveis à sua distância da borda do furo. Assim, qualquer excentricidade na furação pode acarretar em erros consideráveis na deformação medida. Wang [18], em seu artigo "The aligment Error of the Hole-Drilling Method", avaliou o efeito de excentricidade em medições com furo cego usando rosetas do tipo EA-09-062-RE-120, similares às usadas nas medições desta tese: como conclusão deste artigo tem-se que, para excentricidades de cerca de 10% do raio do furo (algo em torno de oito centésimos de milímetro), pode-se chegar a erros de até 5% no cálculo das tensões.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

A guia de furação é acoplada a um tripé, que deve ser colado na superfície da medição com o mesmo cuidado com que se cola a roseta. Com o auxílio de uma lupa e uma mesa de translação acoplada ao tripé é possível tornar a guia de furação concêntrica à roseta. O esquema de alinhamento é mostrado na figura 3.10.

Figura 3.10. Alinhamento do suporte da furadeira com o centro da roseta

3.4.5. Execução do furo

Após a devida centralização da guia, a luneta é retirada para dar lugar à ferramenta de furação. O processo de furação pode introduzir tensões maiores que as existentes. Estas tensões são, normalmente, trativas e são provocadas pela camada de material deformada plasticamente ou alterada estruturalmente [6]. Segundo Rodakoski [6], a região de influência para o surgimento dessas tensões residuais varia de 0.15 a 0.4 milímetros.

Dentre os principais parâmetros estudados visando à redução de tensões geradas pela execução do furo estão: a qualidade da geometria do furo cilíndrico usinado e a velocidade de rotação na furação. A ferramenta recomendada é a Fresa de Topo e a mais usada é a do tipo Cônica Invertida, tal como a que foi a usada nas medições desta tese e está mostrada na figura 3.11. Quanto à velocidade de furação, Flaman [20] (1982), em seu artigo "Brief Investigation of Induced Drilling Stresses in the Center-Hole Method of Residual Stress Measurement",

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

apresentou uma ferramenta para furação em altíssima rotação (acima de 400.000 rpm usando uma turbina a ar) e realizou um estudo no qual mediu e comparou as tensões geradas na usinagem do furo com a sua ferramenta e com uma furação à baixa rotação (abaixo de 1000 rpm). Flaman conclui que a furação a altíssimas rotações gera tensões menores do que com rotações baixas. Este foi um artigo importante, pois uma boa parte dos usuários da técnica do furo cego faz uso da ferramenta proposta por Flaman. Entretanto, é equivocado tomar suas conclusões como definitivas. Por exemplo, Lu e Flavenot [10], em 1989, no artigo "Aplications of The Incremental Hole-Drilling Method for Measurement of Residual-Stresses Distribuition", testaram o método com altíssima e baixa rotações e colocaram os dois no mesmo patamar de eficiência para a execução do furo de forma incremental. As medições desta tese foram feitas com furação à baixa rotação.

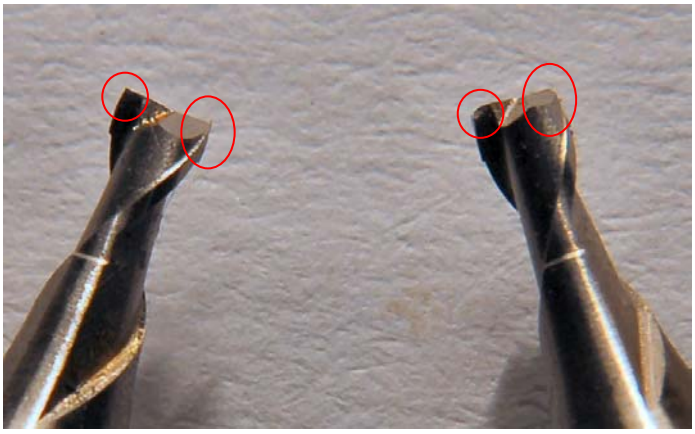

Figura 3.11. Duas Fresas de Topo do tipo Cônica Invertida, sendo que a da direita encontra-se bem desgastada, já imprópria para a técnica do furo cego

3.4.6. Tratamento dos Dados (Norma ASTM E837)

Os dados de deformação dos três extensômetros são aquisitados após cada incremento e são tratados segundo a Norma ASTM E 837 [19]. Uma observação importante desta Norma é que ela só é válida para espécimes com tensões uniformes ao longo da espessura. Ela recomenda um teste para verificação da uniformidade. O teste consiste na comparação de um gráfico plotado a partir das medições, com o furo executado incrementalmente com um gráfico padrão apresentado em seu *tópico 8.3.1*. Este gráfico, mostrado na figura 3.12, apresenta

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

resultados das relações percentuais entre os valores de $\varepsilon_1 + \varepsilon_3$ e $\max(\varepsilon_3 - \varepsilon_1, \varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)$ encontrados em cada incremento com os valores obtidos na profundidade final plotados contra a relação *profundidade do furo(Z)/diâmetro da roseta(D)*. A norma estabelece que desvios de 3% com relação ao gráfico padrão decretam a não uniformidade das tensões ao longo da espessura do espécime onde foi feito o furo.

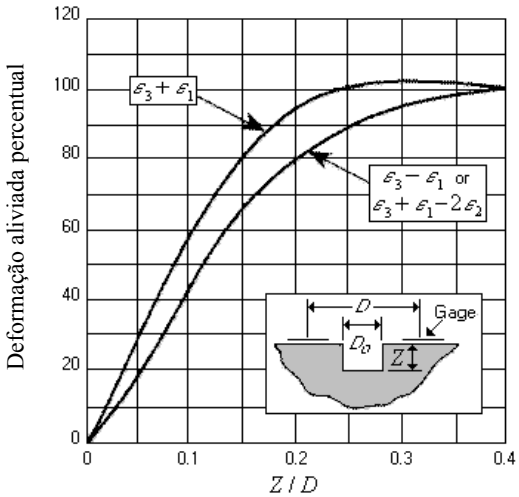

Figura 3.12. Gráfico comparativo para verificação da uniformidade das tensões ao longo da espessura do espécime avaliado

Após essa verificação, o procedimento para o cálculo das tensões e planos principais segue os seguintes passos:

Primeiro calcula-se as seguintes combinações de deformações para cada incremento:

$$p = \frac{(\varepsilon_3 + \varepsilon_1)}{2} \tag{3.14}$$

$$q = \frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)}{2} \tag{3.15}$$

$$t = \frac{(\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{2} \tag{3.16}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

Após a determinação dos coeficientes de alívio $\bar{a}$ e $\bar{b}$ na tabela 3.1 para cada incremento, calcula-se os termos:

$$P = -E\frac{\left(\sum \bar{a}.p\right)}{\left(\sum \bar{a}^2\right)(1+\upsilon)} \tag{3.17}$$

$$Q = -E\frac{\left(\sum \bar{b}.q\right)}{\left(\sum \bar{b}^2\right)} \tag{3.18}$$

$$T = -E\frac{\left(\sum \bar{b}.t\right)}{\left(\sum \bar{b}^2\right)} \tag{3.19}$$

onde Σ indica o somatório das quantidades indicadas para cada profundidade do furo.

Calcula-se agora o ângulo que indica a direção das tensões principais em relação ao extensômetro da posição 1 (equivalente a θ na figura 3.5). O sentido positivo para o ângulo β é o horário.

$$\beta = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{-T}{-Q}\right) = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{\sum \bar{b}.t}{\sum \bar{b}.q}\right) \tag{3.20}$$

Para determinar os valores das tensões principais usa-se:

$$\sigma_{max}, \sigma_{min} = P \pm \sqrt{(Q^2 + T^2)} \tag{3.21}$$

No caso de medições em tubos, as tensões que mais interessam são as das direções circunferencial e longitudinal, que são as direções das tensões principais de serviço. Por vezes as direções das tensões principais de fabricação medidas coincidem ou ficam muito próximas das direções circunferencial e longitudinal (β próximo de 0 ou 90º), outras vezes não. Por isso foi incluído no procedimento de tratamento dos dados de deformação deste trabalho, o cálculo das tensões nas direções circunferencial e longitudinal. Quando a colagem da roseta é feita de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA

modo que o extensômetro da direção 1 coincida com a direção longitudinal do tubo, este cálculo é dado por:

$$\sigma_{Rl} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} + \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}\cos(2(-\beta))$$

$$\sigma_{Rc} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} - \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}\cos(2(-\beta)) \qquad (3.22)\ a\text{-}b$$

Como última informação vale salientar que os valores de tensão medidos com o furo cego deixam de ser precisos quando a tensão no ponto de medição ultrapassa a metade da resistência ao escoamento (0,5 S_y) do material [19]. A partir deste valor o material começa a escoar na borda do furo por causa da concentração de tensões por ele gerada, invalidando o uso dos coeficientes de alívio $\bar{a}$ e $\bar{b}$, que foram determinados para o regime elástico, relacionando linearmente as deformações medidas com as tensões existentes.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510813/CA