

## Capítulo II – Técnicas de Medição de Tensões Residual

### II.1 – Introdução

O estado de tensões em um material sem que nele sejam aplicadas forças externas (incluindo peso próprio) ou outras fontes de tensões tal como gradientes térmicos, é chamado de estado de tensões residuais ou de tensões internas [1]. Uma das características mais importantes do estado de tensões residuais é que este é um estado auto-equilibrante, ou seja, as resultantes de todas as forças e momentos que estes produzem são zero. Entretanto estas tensões não podem de modo algum ser desprezadas, pois elas se somam às tensões aplicadas externamente. Dependendo do sinal e da distribuição das tensões residuais e das tensões aplicadas, pode ocorrer um aumento ou diminuição da vida do componente devido a presença das primeiras.

É possível agrupar as tensões residuais em três tipos principais de acordo com a porção de material na qual elas podem ser observadas [8]:

- Tipo I – Tensões Residuais Macroscópicas que agem sobre no mínimo vários grãos de material;
- Tipo II - Tensões Residuais Microestruturais que cobrem a distância de um grão ou parte de um grão. Este tipo pode ocorrer, por exemplo, entre diferentes fases que têm diferentes propriedades físicas ou entre partículas precipitadas, tais como inclusões e a matriz;
- Tipo III - Tensões Micro-localizadas as quais ocorrem entre várias distâncias atômicas dentro de um grão e são equilibradas sobre uma pequena parte do grão.

Tensões residuais surgem a partir da deformação não uniforme de um corpo. Os principais mecanismos pelos quais isto pode ocorrer são mudanças não homogêneas no volume e/ou na forma do componente. Pode-se, por exemplo, considerar uma chapa de metal que esteja sendo laminada de modo que o escoamento ocorra somente perto da superfície da chapa. A parte superior da

chapa está sendo trabalhada à frio enquanto o centro permanece sem modificação. Como a chapa deve permanecer como um todo, o centro e a parte externa devem apresentar uma deformação de acomodação. A parte central tende a restringir a parte superficial de se alongar, enquanto a parte superficial procura estender a parte central da chapa.

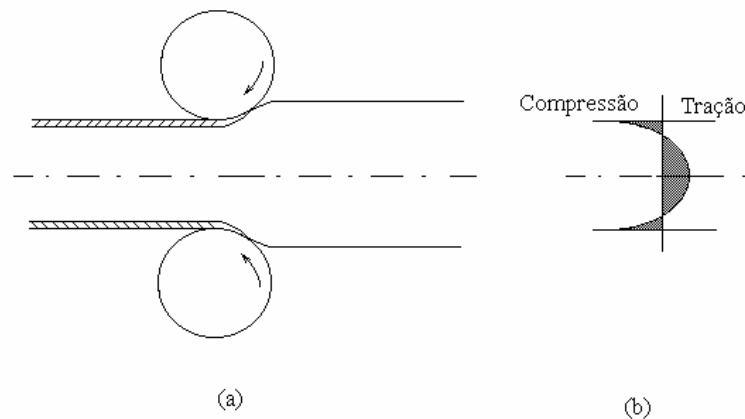


Figura 2.1 – (a) Componente submetido a trabalho a frio, (b) distribuição das tensões residuais

Como resultado, a parte superficial fica submetida a compressão, enquanto a parte central fica submetida a tração. Com este exemplo, é possível mostrar o efeito combinado dos três tipos de tensão residual. As tensões residuais mostradas na figura 2.1(b) são tensões residuais macroscópicas. A região superficial sofreu deformação plástica, aparentemente uniforme, enquanto a região central permanece elástica. Se for levada em consideração a anisotropia do material, percebe-se que certamente houve escoamento não homogêneo de um grão em relação ao outro, o que gera tensões residuais entre estes grãos. Estas são tensões residuais microestruturais. Finalmente, há empilhamento de discordâncias nos contornos de grãos plastificados. As microtensões surgidas nestes locais (entre regiões de reticulado mais distorcido e menos distorcido) são micro-localizadas.

## II.2 – Efeito das tensões residuais sobre a vida dos componentes mecânicos [9]

Como citado anteriormente, as tensões residuais se somam às tensões de serviço de um componente mecânico, podendo sua presença ser benéfica ou deletéria. Pode se considerar que uma sobrecarga que produza escoamento gera tensões residuais que são favoráveis às futuras cargas agindo na mesma direção da sobrecarga e desfavoráveis às cargas futuras agindo em direções opostas. Isto pode ser explicado pelo exemplo da figura 2.1. O componente que foi trabalhado a frio, sofreu tração na sua superfície. O estado de tensões residuais resultante é compressivo. Assim, se a carga de serviço for trativa, esta será diminuída na superfície pela presença das tensões residuais compressivas. Contrariamente, se o carregamento de serviço for compressivo este será aumentado pelas tensões compressivas presentes. Na figura 2.2 está apresentado um componente, no qual estavam agindo tensões residuais, compressivas na superfície e trativas no núcleo. As tensões de trabalho do componente são trativas. O estado final, é ainda trativo, mas o valor da tensão foi sensivelmente diminuído. Este é um exemplo em que a presença de tensões residuais é benéfica.

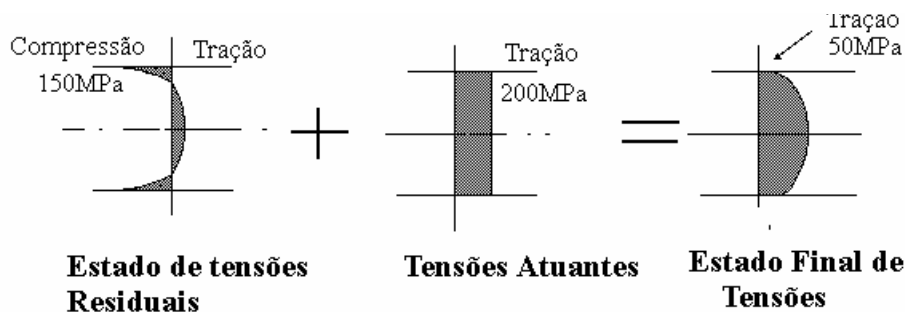


Figura 2-2 – Superposição de um estado de tensões residuais e de um estado de tensões atuantes

## II.3 – Mecanismos de geração de tensões residuais [8].

O jateamento de granalhas é o mais versátil dos tratamentos mecânicos a frio<sup>1</sup>, sendo aplicável a quase todos os metais e a componentes de quase todas as geometrias. O processo consiste em jatear a superfície a ser tratada com pequenas esferas de aço em alta velocidade. Isto é similar ao efeito do martelamento e tende a reduzir a espessura do componente e, por conseguinte, a aumentar a área de

<sup>1</sup> Dentre aqueles que têm como objetivo introduzir tensões residuais.

exposição. No entanto, uma vez que o núcleo do componente não está sendo solicitado, este não tem a tendência de se deformar. Como o material tem que se comportar como um todo, surgem tensões, similarmente ao demonstrado na figura 2.1. A superfície tenta se expandir e é impedida pelo núcleo, ficando assim sob compressão, ao passo que o núcleo fica sob tração.

Vários fatores têm efeito no perfil e no valor da tensão compressiva obtida. Dentre os mais importantes estão velocidade das esferas, duração do jateamento e tamanho das partículas. A grande vantagem deste tratamento em relação à têmpera e a outros tratamentos é que o valor de tensão compressiva superficial é bastante alto decaindo rapidamente em direção ao núcleo. Pode-se ainda citar como mecanismos de geração de tensões residuais os chamados tratamentos termo-mecânicos, dentre os quais pode-se tomar como exemplo:

- endurecimento por indução – de uma forma simplificada, consiste em aquecer indutivamente uma fina camada superficial de um componente de aço até a temperatura de transformação e então resfriar esta região rapidamente, através de um jato de água, afim de promover a transformação martensítica. Devido a expansão da martensita é gerado um modelo de tensões residuais semelhante ao da figura 2.1.
- nitretação, carbonetação – que consistem em difundir átomos de nitrogênio ou carbono na superfície do componente. O aumento da temperatura superficial gera a difusão destes átomos. Ocorre uma extensa formação de nitretos e carbetos, provocando mudança de volume e conseqüente geração de tensões superficiais.

#### **II.4 – Técnicas de medição de tensões residuais [1].**

A medição de tensões residuais é particularmente difícil pois, conforme explicado anteriormente, as tensões residuais estão presentes em componente isentos de qualquer carregamento externo. Como as técnicas tradicionais de medição experimental de tensões em geral se baseiam na mudança de determinadas propriedades antes e depois da aplicação de um carregamento, elas não percebem as tensões residuais. Por exemplo, a extensometria convencional, técnica de Moiré e a fotoelasticidade de reflexão: um transdutor de deformação é

colado na superfície de um componente que é então carregado, de modo que as deformações causadas pelo carregamento são medidas pelo transdutor. No caso das tensões residuais, é impossível<sup>2</sup> instalar qualquer transdutor antes da geração destas tensões. Assim, nenhuma mudança na deformação será medida pelo transdutor. Já a fotoelasticidade de transmissão, pode ser aplicada tanto para medir tensões residuais como tensões externas. Os componentes isentos de tensões, apresentam-se transparentes antes da aplicação de carregamentos. Depois de carregados, estes apresentam um padrão de franjas o qual é analisado para que se obtenham as tensões. Por outro lado, no caso de bulbos e estemes de lâmpadas, os quais têm tensões residuais, os componentes apresentam franjas mesmo que não seja aplicada nenhuma carga.

De uma forma geral, pode-se seguir dois caminhos para obter o valor das tensões residuais:

- instalar um transdutor e eliminar as tensões residuais: desta forma as mudanças nas propriedades devidas a ausência das tensões residuais serão medidas pelo transdutor,
- medir propriedades do componente tensionado e comparar com as do componente isento de tensões.

O primeiro caminho engloba as técnicas chamadas destrutivas (ou semi-destrutivas dependendo da extensão danificada do componente). O segundo grupo engloba as técnicas não-destrutivas.

Atualmente a mais conceituada referência sobre técnicas de medições de tensões residuais é o *Handbook of Measurements of Residual Stresses* [1], editado por Jian Lu, um pesquisador francês em 1988, a pedido do comitê de Tensões Residuais da SEM (Society for Experimental Mechanics). Pesquisadores de vários países contribuíram na elaboração deste livro, com trabalhos a respeito das principais técnicas: furo-cego, remoção de camadas, seccionamento, difração de raios-X, difração de nêutrons, técnicas de ultra-som e técnicas magnéticas. O livro fornece a base teórica de cada uma das técnicas e descreve os seus procedimentos experimentais, bem como vantagens e restrições. A revisão

---

<sup>2</sup> Na maioria dos casos práticos.

apresentada neste capítulo teve como referência principal este livro, além de alguns livros específicos a respeito de cada técnica [1,8-10].

## II. 4.1 – Técnicas destrutivas

O procedimento geral utilizado nestas técnicas é bastante similar e está descrito abaixo:

- Criação de um novo estado de tensões pelo alívio localizado das tensões residuais. Isto é normalmente feito pela retirada de material tensionado, através de usinagem ou retirada de camadas deste;
- Medição da deformação ou dos deslocamentos causados pelo alívio das tensões residuais,
- A partir destes dados, as tensões são retrocalculadas, relacionando tensão e deformação através da teoria da elasticidade.

As principais técnicas destrutivas estão descritas a seguir.

### II.4.1.1 - Técnica do Furo-cego / Técnica do anel-usinado [1-3]

Nesta técnica um pequeno furo (ou um anel) é usinado na região a ser estudada. A superfície livre de um furo é necessariamente livre de tensões normais radiais e de tensões de cisalhamento. Um extensômetro colado próximo na região na qual o furo será usinado, mede a deformação causada pelo alívio de tensões gerado por esta usinagem. Estas deformações são então relacionadas às tensões residuais através de equações obtidas usando-se a teoria da elasticidade. Dentre as técnicas destrutivas a mais conhecida e empregada pela indústria em geral é provavelmente a técnica do furo-cego. Por esta razão, esta técnica foi escolhida como objeto de estudo deste trabalho e será extensamente discutida no próximo capítulo.

### II.4.1.2 - Remoção de camadas [1]

Esta técnica é basicamente aplicada para componentes planos. Consiste em usinar quimicamente de forma gradual as camadas superficiais do componente. Quando as camadas de um material no qual há tensões residuais são removidas o equilíbrio estático das forças e momentos internos é perturbado instantaneamente. Para restabelecer este equilíbrio ocorre a mudança de forma do componente. A técnica está esquematicamente mostrada na figura 2.3.

A deflexão apresentada pelo componente pode ser relacionada às tensões residuais pré-existentes na camada usinada, da seguinte forma [1]:

$$\sigma(e) = -\frac{4}{3} \cdot E \cdot \frac{e^2}{L^2} \cdot \frac{df}{de} \quad (2.1)$$

onde:

$E$  – é o módulo de elasticidade de material;

$de$  – é a espessura da camada sendo usinada;

$e'$  – é a espessura do componente *antes* da remoção de uma camada cuja espessura é  $de$ ;

$e$  – é a espessura do componente *depois* da remoção de uma camada cuja espessura é  $de$ ;

$L_0$  – é o comprimento sob o qual a deflexão está sendo medida;

$f$  – é a deflexão e,

$df$  – é a variação da deflexão produzida pela usinagem de uma camada de espessura  $de$ .

As hipóteses básicas, relacionadas a este método são:

- o material é homogêneo e isotrópico;
- as tensões na espessura do material são desprezíveis;

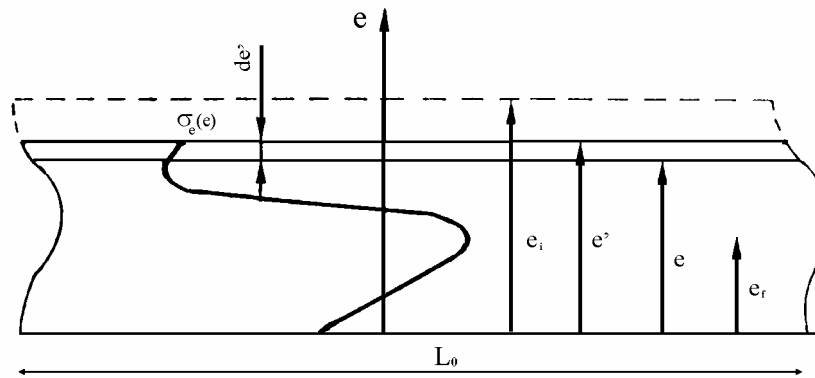


Figura 2.3 – Representação esquemática dos parâmetros envolvidos na técnica da remoção de camadas.

Para entender melhor a técnica, pode-se raciocinar da seguinte forma: a remoção de uma camada causa o desequilíbrio das forças e momentos<sup>3</sup> aos quais o componente estava submetido. Uma vez que o equilíbrio do componente é mantido, este se deforma de modo a gerar um par força–momento equilibrante. A partir da equação (2.1) e do valor da deflexão obtém-se o valor da tensão presente em cada camada usinada *durante* a usinagem. Para chegar ao valor da tensão existente em cada camada *antes* da usinagem, basta acrescentar àquela equação a variação da tensão no material remanescente, gerada pela remoção de cada camada. Procedendo desta forma, chega-se à [1]:

$$\sigma(e_f) = \frac{4 E}{3 l^2} \left\{ -e_f^2 \frac{df}{de_f} + 6e_f [f(e_i) - f(e_f)] + 2 \int_{e_i}^{e_f} e' df \right\} \quad (2.2)$$

onde:

$e_i$  – é a espessura inicial;

$e_f$  – é a espessura final,

$f(e_i)$  e  $f(e_f)$  – são a deflexão inicial e final, respectivamente,

Uma outra forma de avaliar estas tensões é colando um extensômetro na parte posterior do componente e então medir as deformações  $\epsilon_x$  e  $\epsilon_y$  causadas

<sup>3</sup> O componente está submetido a um dado estado de tensões residuais, as quais geram forças que por sua vez geram momentos.



pela usinagem ao longo dos eixos x e y do componente. Similarmente, a partir destas deformações calculam-se as tensões residuais.

### II.4.1.3 – Seccionamento [1]

Esta técnica é bastante similar à técnica da remoção de camadas. Mais uma vez, a criação de superfícies livres permite deformação do componente. A técnica está esquematizada na figura abaixo.

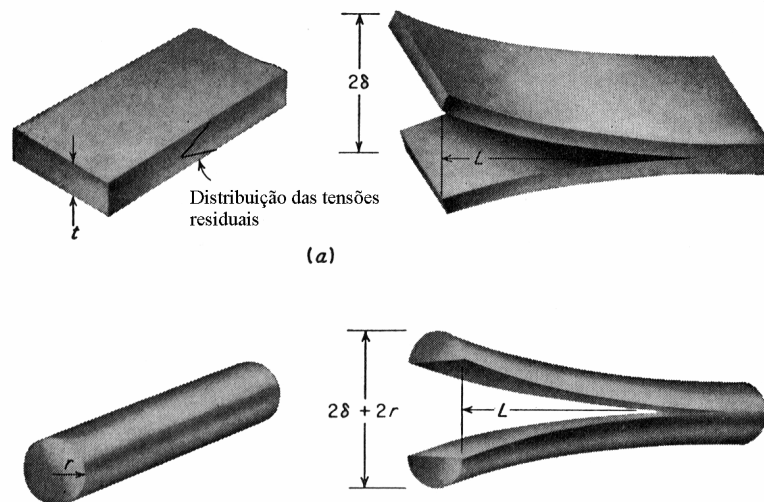


Figura 2.4 – Representação esquemática da técnica do seccionamento.

As tensões residuais são obtidas pela medição da abertura da chapa. Para o caso (a) da figura (2.4), a tensão longitudinal pode ser relacionada a abertura,  $\delta$ , pela seguinte expressão [1]:

$$\sigma_1 = \frac{Et\delta}{2L^2(1-\nu^2)} \quad (2.3)$$

onde:

$E$  e  $\nu$  são, respectivamente, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson e

$t$  – é a espessura do componente

Novamente, pode-se medir através de extensômetros tanto a deflexão das borda quanto a deformação.

## II.5.2 – Técnicas não-destrutivas

As técnicas não-destrutivas se baseiam nas relações existentes entre certas propriedades físicas ou cristalográficas e as tensões residuais, ou melhor, a perturbação causada pela presença de tensões residuais nestas propriedades. As principais técnicas não-destrutivas estão descritas a seguir.

### II.4.2.1 – Difração de raios-x [1, 9]

Num material policristalino, com granulometria fina e isento de tensões, o espaço entre planos cristalinos não varia com a orientação destes planos, figura 2.5. A presença de um estado de tensões faz com que estas distâncias variem, devido à deformação elástica. Se a tensão aplicada for trativa, as distâncias entre planos perpendiculares a estas aumentarão, enquanto para os planos paralelos ao campo de tensões, essas distâncias vão diminuir, como pode ser observado na figura 2.6. Se esta variação nas distâncias interplanares puder ser medida, então se tem uma indicação da deformação e conseqüentemente do campo de tensões residuais atuantes. A técnica de difração de raios-X é aplicada com o objetivo de medir as distâncias interplanares e a partir daí calcular as tensões residuais presentes

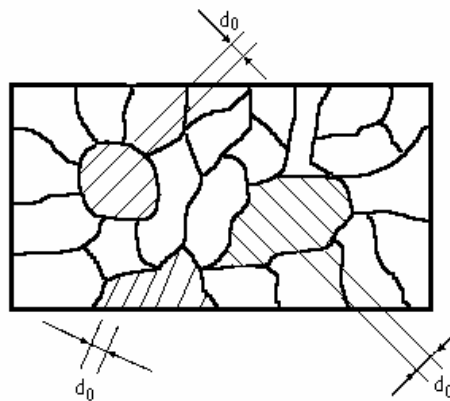


Figura 2.5 – Distâncias interplanares de grãos com diferentes orientações de um corpo isento de tensões.

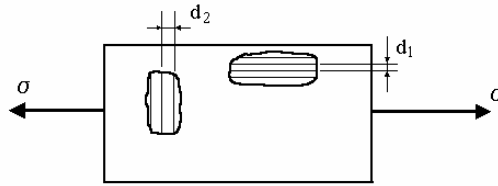


Figura 2.6 – Distâncias interplanares de grãos com diferentes orientações, de um corpo sob um campo de tensões. As distâncias mudam de acordo com a posição relativa entre o campo e o grão.

Quando um material cristalino é irradiado por um feixe de raios-X monocromático com comprimento de onda  $\lambda$ , ocorre o espalhamento deste feixe pelos átomos que compõem o material. *Um feixe difratado pode ser definido como um feixe composto de um grande número de raios espalhados reforçando-se mutuamente* [9]. Devido à distribuição regular dos átomos no material, as ondas espalhadas tendem a interferir entre si de modo similar à difração de luz visível. As intensidades destas ondas se somam segundo uma interferência construtiva, se a seguinte condição, conhecida como lei de Bragg, for alcançada [1]:

$$2d\sin\varphi = n\lambda \quad (2.4)$$

onde

$d$  – distância interplanar;

$\varphi$  - ângulo entre feixe incidente e o plano difrator;

$\lambda$  - comprimento de onda,

$n$  – um inteiro.

A figura 2.7 mostra os parâmetros envolvidos na lei de Bragg, enquanto na figura 2.8 estão mostrados os cones de difração.

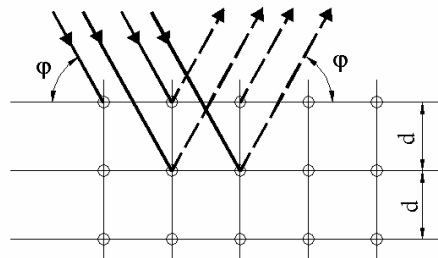


Figura 2.7 – Representação esquemática dos parâmetros envolvidos na lei de Bragg.

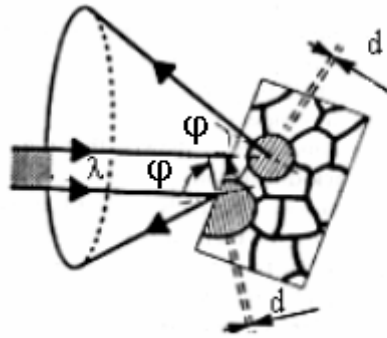


Figura 2.8 – Porção de material na qual incide o feixe de raios-X, destacando-se o cone de difração.

### Medição dos raios-X difratados

A primeira metodologia utilizada para a determinação de tensões usando esta técnica consistia em capturar os raios difratados em um filme sensível à raios-X. Conforme pode ser observado na figura 2.8 estes raios formam cones e o diâmetro dos cones era medido e indicava então o ângulo  $\varphi$ . Esta técnica foi parcialmente abandonada por sua lentidão. Atualmente utilizam-se difratômetros equipados com contadores de raios-X. Na figura 2.9 um difratômetro está apresentado esquematicamente.

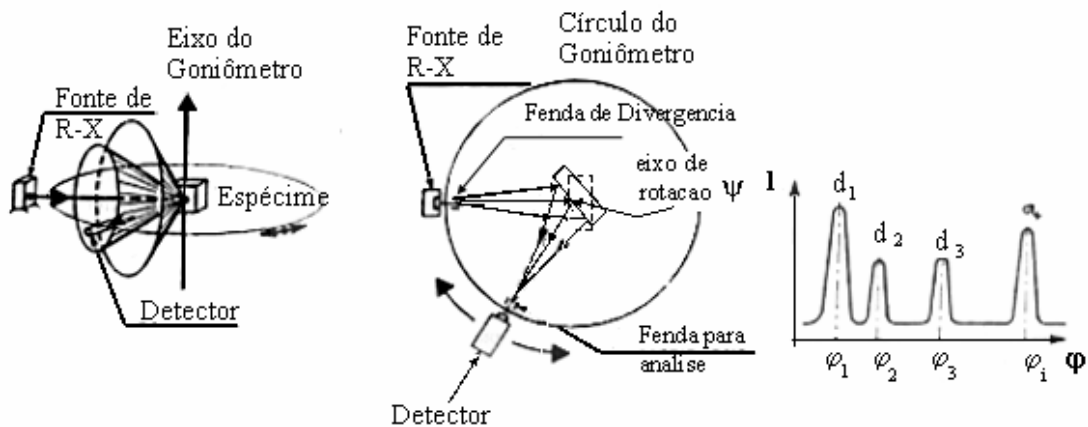


Figura 2.9 – Difratômetro: estão mostrados o difratômetro, a medição e um diagrama de resultados.

Uma fonte monocromática de raios-X é montada no círculo do goniômetro. O feixe é difratado em cones pelo espécime. Quando o contador de raios-X move-se ao longo do círculo, intercepta estes cones gerando um salto no

valor de intensidade. Estes saltos são chamados de picos de difração. Para determinar as tensões é suficiente estudar o salto de um destes picos, localizados em ângulos  $\varphi$ . O espécime montado no goniômetro pode ser inclinado num ângulo  $\psi$  para medir as deformações em diferentes direções.

### Obtenção das tensões residuais a partir das deformações

A deformação pode ser expressa como a variação na distância interplanar:

$$\varepsilon = \frac{d_n - d}{d} \quad (2.5)$$

onde

$d_n$  – é a distância interplanar depois de aplicada a carga.

Aplicando a lei de Bragg tem-se:

$$\varepsilon = \frac{\sin\varphi}{\sin\varphi_n} - 1 \quad (2.6)$$

esta deformação é conhecida como deformação convencional. Pode-se escrevê-la de forma diferente, obtendo-se assim uma relação linear na posição difratada, conhecida como deformação linearizada:

$$\varepsilon = -\cot\varphi \cdot \Delta\varphi_n \quad (2.7)$$

Seja uma porção de material submetido a um dado estado de tensões, conforme mostrado na figura 2.10. Para maior generalidade será estudado o caso biaxial de tensões<sup>4</sup>. Sabe-se que embora  $\sigma_3$  seja zero existe uma deformação  $\varepsilon_3$  diferente de zero. Esta deformação é dada por:

$$\varepsilon_3 = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2.8)$$

<sup>4</sup> No caso da difração de raios-X as tensões são medidas na superfície do espécime de forma que o estado de tensões é no máximo biaxial, uma vez que uma das componentes de tensão é necessariamente zero

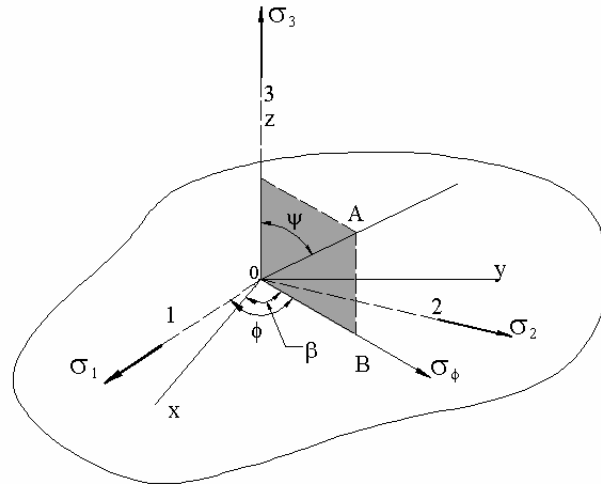


Figura 2.10 – Porção de material submetida a um dado estado de tensões.

Substituindo o valor de  $\varepsilon_3$  dado pela equação (2.5) tem-se:

$$\varepsilon = \frac{d_n - d}{d} = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2.9)$$

No caso uniaxial, a equação (2.9) reduz-se a:

$$\sigma_1 = -\frac{E}{\nu} \left( \frac{d_n - d}{d} \right) \quad (2.10)$$

Normalmente se está interessado em medir as tensões  $\sigma_\phi$ , agindo numa dada direção, por exemplo, a direção OB na figura 2.10, onde OB faz um ângulo de  $\phi$  com a direção 1 e  $\beta$  com o eixo x. No caso da técnica fotográfica, isto é conseguido fazendo-se duas fotografias, uma com o feixe incidente normal à superfície do espécime e outra estando o feixe incidindo ao longo da linha OA, inclinada de um ângulo  $\psi$  em relação a normal da superfície. OA situa-se num plano vertical contendo a direção OB, no qual se deseja determinar a tensão e  $\psi$  é normalmente  $45^\circ$ . A partir da primeira fotografia é possível obter  $\varepsilon_3$  e da segunda obtém-se  $\varepsilon_\psi$ . Pode-se demonstrar, através da teoria da elasticidade, que a diferença entre estas duas deformações pode se relacionar à tensão da seguinte forma:

$$\varepsilon_{\psi} - \varepsilon_3 = \frac{\sigma_{\phi}}{E}(1 + \nu)\sin^2\psi \quad (2.11)$$

mas

$$\varepsilon_{\psi} = \frac{d_i - d}{d} \quad (2.12)$$

sendo  $d_i$  é distância entre os planos refletos inclinados, aproximadamente normal a OA quando submetidos a tensões e  $d$  é esta distância no estado livre de tensões. Combinado as equações (2.5), (2.11) e (2.12), tem-se:

$$\frac{d_i - d}{d} - \frac{d_n - d}{d} = \frac{d_i - d_n}{d} = \frac{\sigma_{\phi}}{E}(1 + \nu)\sin^2\psi \quad (2.13)$$

O termo  $d$  no denominador pode ser substituído por  $d_n$  sem erro apreciável.

Assim:

$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{(1 + \nu)\sin^2\psi} \left( \frac{d_i - d_n}{d_n} \right) \quad (2.14)$$

Duas observações devem ser feitas com relação a equação (2.14):

- o ângulo  $\phi$  não aparece nesta equação, o que é ótimo, uma vez que raramente se sabe *a priori* a direção das tensões principais;
- não é necessário saber a distância interplanar no componente isento de tensões; assim o experimento pode ser totalmente não destrutivo, pois não é necessário cortar um pedaço do componente afim de obter uma porção livre de tensões.

No caso de medições feitas com difratômetro a abordagem é ligeiramente diferente e mais rápida. Uma vez que a posição angular,  $2\phi$ , do raio difratado é obtida diretamente com o difratômetro, é mais simples escrever a tensão em função de  $2\phi$ , no lugar de escrevê-la em função da distância entre planos. Diferenciando a lei de Bragg tem-se:

$$\frac{\Delta d}{d} = -\frac{\cot \phi \Delta 2\phi}{2} \quad (2.15)$$

Combinando as equações (2.14) e (2.15), vem:

$$\sigma_{\phi} = K(2\phi_n - 2\phi_i) \quad (2.16)$$

onde K é um fator característico do material e das condições do ensaio:

$$K = \frac{E \cot \phi}{2(1 + \nu) \sin^2 \psi} \quad (2.17)$$

### Limitações da técnica de difração de Raios-X [1]

A primeira grande restrição diz respeito à profundidade que se consegue atingir nas medições. O feixe de raios-X só consegue penetrar a distância de alguns planos atômicos (1 a 50 $\mu$ m). Uma outra restrição ao emprego desta técnica é relativa à necessidade de homogeneidade e isotropia do material<sup>5</sup>. As equações acima apresentadas aplicam-se à materiais policristalinos desde que estes sejam homogêneos e macroscopicamente isotrópicos. Em materiais não homogêneos ou anisotrópicos, há que se fazer ajustes no arranjo experimental e também nas equações propriamente ditas. Grande parte dos problemas referentes à homogeneidade e isotropia se enquadram em:

- Materiais com granulometria grosseira;
- Gradientes na composição química no material;
- Materiais multifásicos;
- Materiais nos quais foram depositados filmes finos,
- Materiais que têm rede cristalina não simétrica.

Outras restrições relevantes são:

- componentes com gradientes de tensão ao longo da profundidade<sup>6</sup>
- componentes não planos.

#### II.4.2.2 – Difração de nêutrons [1, 10]

O fundamento básico da difração de nêutrons é o mesmo da difração de raios-X: medir a variação da distância interplanar causada pela presença de tensões (residuais ou não). Assim como apresentado na seção II.5.2.1, para

<sup>5</sup> Esta é uma restrição de outras técnicas não-destrutivas como difração de nêutron e a técnica de Barkhausen.

<sup>6</sup> A técnica do furo-cego também apresenta esta restrição.



relacionar distâncias atômicas e deformação usa-se a lei de Bragg. No caso da difração de nêutrons, um pico de difração é completamente especificado por três quantidades:

- o ângulo de espalhamento,  $2\varphi$ , medido entre o feixe incidente e o feixe espalhado no ensaio de comprimento de onda constante ou o tempo-de-percurso<sup>7</sup> de nêutrons no ensaio de tempo-de-percurso;
- a largura do pico, em unidades angulares ou em unidades de tempo, e
- a intensidade integral do pico.

Há dois tipos básicos de ensaio:

Ensaio com espectrômetro de cristal – nesta técnica um feixe de nêutrons térmicos<sup>8</sup> de todos os comprimentos de onda passa por um cristal monocromador e um único comprimento de onda, tipicamente na faixa de 1-3 Å é selecionado. A intensidade do feixe espalhado pela amostra é medida como função do ângulo de espalhamento.

Ensaio com difratômetro de tempo-de-percurso em fontes pulsantes – neste tipo de ensaio o ângulo de difração é fixado e um feixe contendo uma faixa larga de comprimentos de onda é direcionado para o componente. A relação entre o comprimento de onda do feixe de nêutrons,  $\lambda$ , o tempo de percurso, T, desde a fonte até o detector e a lei de Bragg é:

$$\lambda = \frac{hT}{mL} = 2d \sin \varphi \quad (2.18)$$

onde:

h – é a constante de Planck;

m – é a massa do nêutron e

L – é a distância da fonte até a o detector.

Uma diferença entre a difração de nêutrons e a difração de raios-X é que na primeira os nêutrons penetram mais profundamente a amostra. Isto é uma vantagem, uma vez que uma maior porção do material pode ser analisada. Entretanto é importante esclarecer que a informação a respeito da deformação

<sup>7</sup> Do inglês “time-of-flight”

<sup>8</sup> Assim chamados por que têm energia muito baixa.

obtida por nêutrons, não substitui e sim complementa, a técnica de raios-X. A desvantagem da técnica é que o equipamento utilizado é caro e sofisticado o que limita sua aplicação ao campo e impõe a necessidade de mão de obra especializada.

#### II.4.2.3 – Ultra-som [1]

Estas técnicas são baseadas na variação da velocidade propagação de ondas num meio devido a presença de tensões neste meio. Esta variação pode ser conceitualmente descrita por:

$$V = V_0 + K\sigma \quad (2.19)$$

$V_0$  – é a velocidade de propagação da onda no meio isento de tensões;

$\sigma$  – é tensão atuante;

$K$  – é um parâmetro que depende do material, conhecido como constante elasto-

acústica, a qual tem por unidades,  $\frac{m^3}{N.s}$ .

O procedimento experimental geral da técnica consiste em um transdutor que emite ondas, as quais atravessam uma região do material (não necessariamente toda a espessura) e são detectadas por outro transdutor. Este tipo de arranjo é chamado de “pitch-catch”. Contrariamente, se o mesmo transdutor emite e recebe as ondas, recebe o nome de pulso-eco.

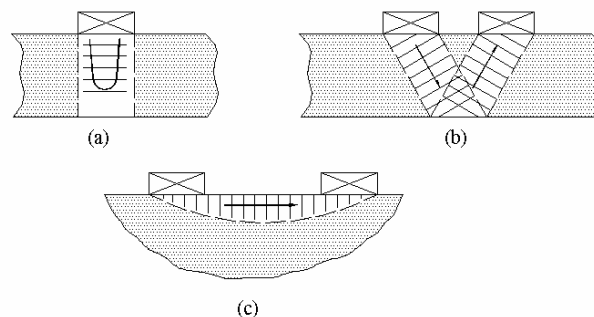


Figura 2.11 – Técnica (a) pulso-eco e (b) e (c) pitch-catch.

#### II.4.2.4 – Técnicas Magnéticas

Estas técnicas se baseiam na relação que existe, nos materiais ferromagnéticos, entre a magnetização e a deformação elástica. Experimentos demonstram que um pedaço de arame de aço, uma vez magnetizado, sofrerá alongação na direção de magnetização, ao passo que uma vez tracionado se magnetizará na direção da tração. Duas técnicas têm sido bastante exploradas na literatura além de serem aplicáveis na indústria: a técnica do ruído de Barkhausen e a técnica da magneto-estricção. A primeira se baseia na mudança na microestrutura magnética causada pela presença de tensões, enquanto a segunda se baseia em medições da permeabilidade e da indução magnética do material. Neste trabalho será abordada apenas a técnica de Barkhausen.

##### Técnica do Ruído de Barkhausen [1]

Os materiais ferromagnéticos consistem em regiões microscópicas magneticamente ordenadas, chamadas de domínios. Cada domínio é magnetizado segundo direções cristalográficas preferenciais à magnetização<sup>9</sup>. Um domínio não coincide com um grão, de fato, dentro de um grão há vários domínios, o quais são separados por paredes e, dentro destas paredes a direção de magnetização geralmente muda de  $90^\circ$  ou  $180^\circ$ .

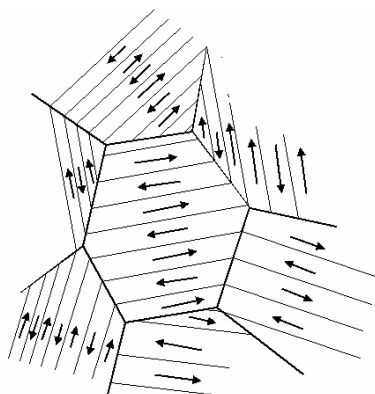


Figura 2.12 – Estrutura de domínios num material policristalino.

Quando um campo magnético ou tensão mecânica são aplicados a um componente ferromagnético ocorrem mudanças na estrutura dos domínios pela

modificação abrupta das paredes destes ou pela rotação dos vetores de magnetização. Estas modificações causam mudanças na magnetização média do componente assim como em suas dimensões. Se uma bobina condutora for posicionada próxima a amostra enquanto a parede de um domínio se move, a mudança resultante na magnetização induzirá um pulso elétrico na bobina. Quando os pulsos produzidos pela movimentação de todos os domínios são adicionados, é gerado um sinal chamado de “ruído de Barkhausen”. A extensão da movimentação das paredes de domínios, e em última análise, a intensidade do ruído de Barkhausen, depende das tensões presentes e da microestrutura do material.

A aplicação da técnica se baseia em curvas de calibração as quais são obtidas aplicando tensões conhecidas em espécimes que não necessariamente precisam estar livres de tensões. É preciso que se tome cuidado, entretanto, para não exceder o limite elástico do material<sup>10</sup>, o que tornaria complicada a separação das tensões aplicadas das pré-existentes. Existem dois tipos de curvas de calibração uma delas destinada a estados uniaxiais e a outra a estados biaxiais [1].

## II. 5 – Comparação entre técnicas [1]

Pela breve revisão bibliográfica aqui apresentada, é possível perceber que não existe uma técnica universal que se aplique a qualquer situação. Cada técnica tem suas vantagens e restrições e cabe ao analista de tensões escolher dentre as técnicas disponíveis aquela que corresponda às suas necessidades. Para proceder a escolha da técnica mais apropriada para uma determinada aplicação, deve-se levar em conta vários fatores como por exemplo:

- Exatidão;
- Complexidade;
- Aplicabilidade ao campo;
- Custo;
- Necessidade de mão de obra muito especializada;
- Repetitividade;

---

<sup>9</sup> Assim como “grãos” têm direções preferenciais de deformação.

- Tipo de intervenção: destrutiva ou não-destrutiva;
- Propriedades do material; isotropia, composição química e homogeneidade.
- Existência de gradiente de tensão;
- Tipo de tensão que se quer avaliar (se Tipo I, II ou III);
- Geometria do componente;
- Tempo despendido não análise.
- Outros.

Com o objetivo de facilitar a escolha, a seguinte tabela foi retirada da referência 1. Nela estão apresentadas as principais características das técnicas aqui apresentadas. Evidentemente a tabela não está completa, porém serve como base na escolha de uma técnica para medir tensões residuais num determinado componente.

---

<sup>10</sup> Outras técnicas têm restrição semelhante.

Tabela 2.1 – Comparação entre as principais técnicas de medição de tensões residuais [1]

Técnica	Furo-Cego	Deflexão	Seccionamento	Difração de Raio X	Difração de Nêutrons	Ultra-som
Hipóteses Básicas	Tensões biaxiais uniformes na superfície do furo		Campo tridimensional de tensões	Material isotrópico, homogêneo policristalino e de granulometria fina	Material homogêneo e policristalino	Material isotrópico, homogêneo policristalino e de granulometria fina
Tipo de tensão residual captada	1° tipo	1° tipo	1° tipo	1° tipo, 2° tipo ou 3° tipo	1° tipo e 2° tipo	1° tipo + 2° tipo + 3° tipo
Parâmetro Medido	Deformação superficial Ou deslocamento	Deformação ou deflexão	Deformação superficial ou deslocamento	Mudança na distância interplanar nos materiais policristalinos	Mudança na distância interplanar nos materiais policristalinos	Varição na velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas
Porção mínima de material analisado	0.5 mm <sup>2</sup>	1000 mm <sup>2</sup> se for medida deflexão e 100 mm <sup>2</sup> se for medida deformação	100 mm <sup>2</sup>	0.5 mm <sup>2</sup>	4 mm <sup>2</sup>	De 0.1 mm <sup>2</sup> para a técnica das frequências altas e 30 mm <sup>2</sup> para a técnica convencional
Profundidade Mínima	20 µm	20 µm	1 a 2 µm	Vários microns até varias dezenas de microns	1mm	15µm até 300µm
Custo do equipamento (US\$)	10 mil à 50 mil	1000	15000	100 mil a 200 mil	Algumas centenas de milhões	40 mil a 200 mil
Portabilidade	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim
Incerteza em situações normais	±20 MPa	±30MPa	±10MPa	±20MPa	±30MPa	10 a 20MPa
Tempo médio para obter a primeira medição e estabelecer um perfil de tensões	40 minutos, duas horas	30 minutos, oito horas	40 minutos, entre 5 e 20 horas	20 minutos 8 horas	2 horas uma semana	Vários minutos 20 minutos
Profundidade da inspeção	0.02 a 15 mm	0.1 a 3 mm	Todas acima de 1 mm	1 a 50 µm	2 mm até 50 mm	0.015 a 3 mm para ondas superficiais e espessura do componente para ondas volumétricas