

2

Tensões Residuais

De uma forma simples e geral, entende-se por residuais as tensões existentes em um corpo sem que sobre ele estejam agindo quaisquer forças externas. As tensões residuais são elásticas e se superpõem às cargas de serviço, podendo ser benéficas ou deletérias às estruturas e equipamentos, dependendo de sua magnitude, sinal e distribuição [1]. As tensões residuais são autoequilibrantes. Qualquer perturbação como remoção de material, aplicação de carregamentos térmicos ou mecânicos, altera o seu estado e causa sua redistribuição de modo que as tensões se equilibrem novamente. As tensões residuais são elásticas e se superpõem àquelas causadas pelas cargas de serviço [1]. Vários casos apontam as tensões residuais como principal causa de falha de equipamentos, tendo como agravante o fato de na maioria das vezes permanecerem incógnitas, desde a fabricação até a falha. A figura 2.1 ilustra um caso onde as tensões residuais se superpõem às tensões de uma barra sob flexão. É um caso benéfico de existência de tensões residuais, pois elas contribuem para a redução da tensão média trativa na superfície da barra, aumentando sua vida em fadiga e dificultando a propagação da trinca. Do ponto de vista estático, o fato de ter havido um aumento na tensão máxima de compressão não é tão relevante, pois sua atuação ocorre numa área muito limitada.

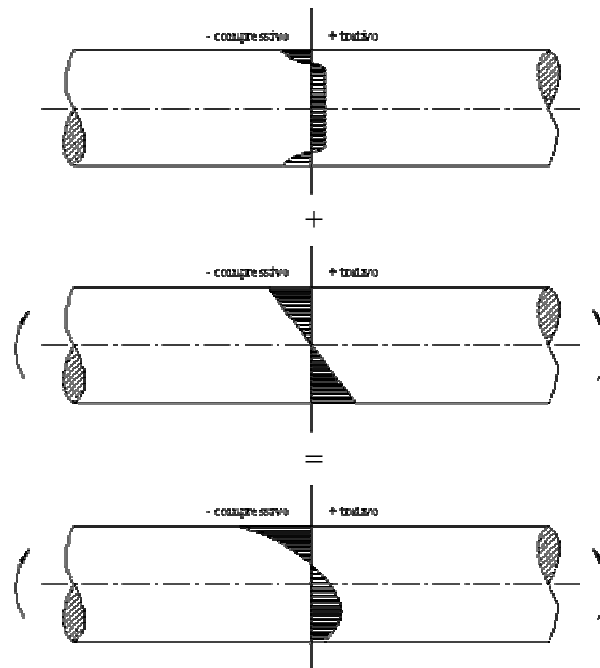


Figura 2.1. Superposição de um carregamento de flexão a um estado de tensões residuais.

2.1. Tipos de Tensões Residuais

A classificação mais comum das tensões residuais é quanto à área de abrangência, sendo elas tensões residuais macroscópicas, microscópicas e submicroscópicas.

2.1.1. Tensões Residuais Macroscópicas

Também chamadas por alguns autores de tensões residuais do Tipo I, são tensões que se estendem sobre grandes porções volumétricas quando comparadas com o tamanho de grão do material. As deformações originadas são praticamente uniformes para muitos grãos [2]. Exemplos típicos apresentam-se em materiais deformados plasticamente de maneira não uniforme, como barras sujeitas a dobramento além do limite elástico, processos de laminação, gradientes térmicos, têmpera em aço, estando alguns desses mecanismos presentes nas etapas dos processos de fabricação de tubos apresentados no capítulo 1.

Um padrão típico de tensões residuais longitudinais macroscópicas encontrado em chapas finas soldadas está apresentado na figura 2.2. Tem-se o

valor máximo de tensão trativa no cordão de solda e ocorre uma redução deste valor na medida em que se afasta do cordão até que a tensão se torne compressiva, para manter o equilíbrio dos carregamentos internos, considerando-se que as tensões são constantes ao longo da espessura [1]. Comportamento similar foi verificado nas medições que serão mostradas no capítulo 5.

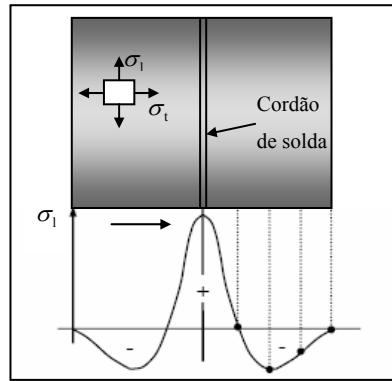


Figura 2.2. Esquema do comportamento das tensões residuais nas vizinhanças de uma união por soldagem de chapas finas.

2.1.2. Tensões Residuais Microscópicas

As tensões residuais microscópicas ou do Tipo II são as que mantêm uma distribuição uniforme ao longo de um grão ou de boa parte dele. Podem ocorrer em interfaces entre fases e partículas precipitadas e a matriz. Desenvolvem-se durante a deformação elastoplástica de um material policristalino com grãos aleatoriamente orientados e cuja resistência ao escoamento e ao encruamento dependem da orientação cristalográfica [3].

2.1.3. Tensões Residuais Submicroscópicas

Conhecidas também como tensões residuais Tipo III ou micro tensões localizadas, as tensões residuais submicroscópicas abrangem distâncias interatômicas, dentro de uma pequena porção de um grão. Ocorrem nos materiais metálicos sujeitos a processos que produzam descontinuidades na rede cristalina como vazios, impurezas, falhas de empilhamento, entre outros [3].

2.2. Alguns Processos e Mecanismos Geradores de Tensões Residuais

Sob o ponto de vista do comportamento mecânico dos materiais pode-se dizer que “as tensões residuais aparecem como uma resposta elástica do material a uma distribuição não homogênea de deformações não elásticas, tais como deformações plásticas, precipitações, transformação de fase, deformação devido à expansão térmica, entre outros” [5].

Alguns dos principais processos de fabricação geradores de tensões residuais estão apresentados a seguir.

2.2.1. Soldagem

A contração no resfriamento de regiões diferentemente aquecidas e plastificadas durante a operação de soldagem normalmente representa a principal fonte de tensões residuais no processo de soldagem. O processo é realizado em temperaturas nas quais o módulo de elasticidade e a resistência ao escoamento do metal tornam-se muito pequenos, facilitando o escoamento do metal que tende a se expandir com as altas temperaturas. Quando ocorre o resfriamento, o material recupera a sua rigidez sob temperaturas ainda altas e sob condições heterogêneas de temperatura, impedindo que a contração ocorra igual e livremente em todas as regiões. As tensões geradas podem ser da ordem do limite de escoamento do metal. No caso de um passe de solda, o material que resfria anteriormente também impede o novo material depositado de se contrair, produzindo neste, tensões residuais trativas.

Para o caso da geração de tensões devido à transformação de fases na soldagem, as tensões surgem porque a transformação de fases da austenita para ferrita, bainita, perlita ou martensita, ocorre com aumento de volume [5]. Desta forma, o material da zona fundida e da zona termicamente afetada que sofre transformação de fase tende a se expandir e será impedido pela parte do metal fria e não transformada.

A magnitude das tensões residuais no cordão de solda está intimamente relacionada com o grau de restrição que a estrutura mecânica oferece. Esta restrição geralmente é total na direção longitudinal dos cordões de solda.

2.2.2. Tratamentos Térmicos e Termoquímicos de Endurecimento Superficial

Dentre os tratamentos térmicos de endurecimento superficial destacam-se o processo de têmpera e os processos termoquímicos de carbonetação e nitretação.

Têmpera superficial

Este tratamento consiste no aquecimento superficial do aço até a região austenítica, seguido de um resfriamento brusco para produzir martensita. Isto aumenta a dureza na superfície do material, sem alterar de forma significativa a microestrutura do seu núcleo. A transformação de fase, efeitos térmicos e restrições mecânicas da região não-modificada (núcleo) sobre a modificada (superfície) resultam em um estado de tensões compressivas na superfície da peça. A figura 2.3 mostra a etapa de aquecimento do tratamento de têmpera superficial por chama e por indução. Após o aquecimento, as peças devem ser resfriadas rapidamente, em óleo, por exemplo, por meio de imersão ou spray [32].



(a)



(b)

Figura 2.3. Aquecimentos por: (a) Chama oxiacetilênica e (b) Indução eletromagnética

Carbonetação e Nitretação

O processo de carbonetação é realizado em aços de baixo carbono, geralmente até 0,25%C [35]. O aço é aquecido até temperaturas austeníticas em ambiente rico em carbono. Após a difusão dos átomos de carbono na superfície da peça promove-se um resfriamento acelerado (este tempo de resfriamento depende do aço utilizado) da peça, para gerar estrutura martensítica na superfície. Em

peças de dimensões razoáveis, o seu núcleo tem uma taxa de resfriamento inferior à da superfície, ficando com uma microestrutura composta, predominantemente, por ferrita e perlita. Como o volume da martensita é maior que o da ferrita, originam-se tensões **compressivas** na superfície da peça. Porém, se a peça a ser carbonetada tiver dimensões reduzidas e um aço passível de têmpera, as taxas de resfriamento da superfície e do núcleo serão muito próximas, o que pode acarretar na geração de estrutura martensítica também no núcleo, o que daria margem à possibilidade do surgimento de tensões **trativas** na superfície [24].

O **processo de nitretação**, que consiste da formação de nitretos na superfície tratada, proporciona uma camada superficial de alta dureza e resistência ao desgaste. A nitretação é realizada em temperaturas entre 500 e 550°C (no máximo 650°) e não necessita de qualquer tratamento posterior, o que reduz muito a possibilidade de empenamentos ou trincamentos na peça, o que é uma preocupação na carbonetação [36]. O tratamento de nitretação está relacionado basicamente à mudança de volume. O volume dos nitretos formados na superfície é superior ao volume da ferrita, que predomina no restante da peça. Isto faz com que este processo gere tensões residuais **compressivas** na superfície.

2.2.3. Fundição

O resfriamento após um processo de fundição para solidificação é bastante complexo pelas particularidades de cada caso. A restrição que o molde oferece ao fundido pode influenciar de maneira decisiva o estado de tensões residuais resultante e trazer sérias consequências, como fissuras a quente (figura 2.4), por exemplo. Nessa figura, uma barra em forma de “I” resfria e solidifica-se sofrendo restrição do molde ao tentar contrair-se, gerando fissuras na junção do corpo longitudinal com as extremidades [24].

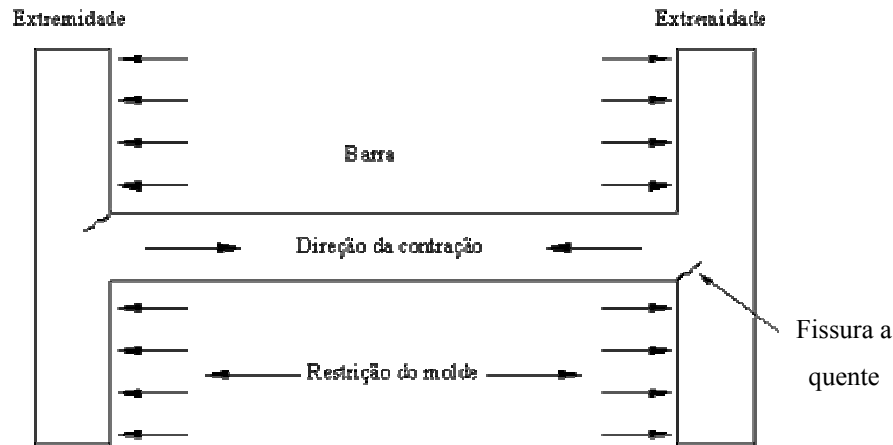


Figura 2.4. Surgimento de fissuras a quente na fundição de uma barra metálica.

2.2.4. Conformação Mecânica

Processos de conformação mecânica como laminação, dobramentos, extrusão, têm como principal mecanismo de geração de tensões residuais a heterogeneidade das deformações plásticas entre as várias regiões dos componentes, por exemplo, suas regiões centrais e superficiais. A figura 2.5 mostra o estado de tensões residuais de uma barra laminada a frio.

Quando as cargas do processo são aliviadas, no esforço de manter a seção transversal da barra plana, as fibras centrais do material, que escoaram menos, tendem a voltar pro seu comprimento inicial e forçam as fibras externas a se encurtarem mais do que elas desejariam, pois como escoaram mais elas se acomodariam a um comprimento maior que o inicial. Assim, são geradas tensões compressivas na superfície e tensões trativas na região central da peça como reação das fibras externas ao esforço das fibras centrais em retornarem ao comprimento inicial. Exemplos bem explicativos de tensões residuais resultantes de processos de flexão, seguido de plastificação, podem ser encontrados em [25] e [26].

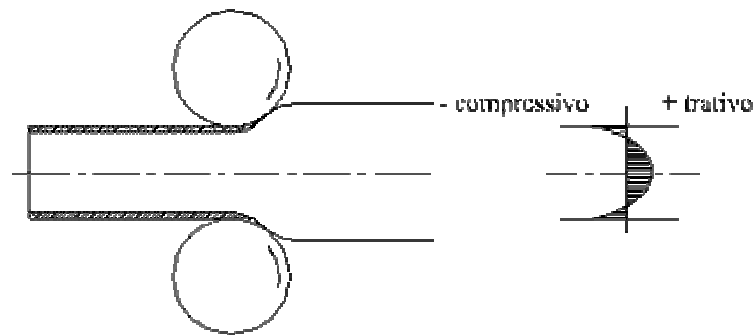


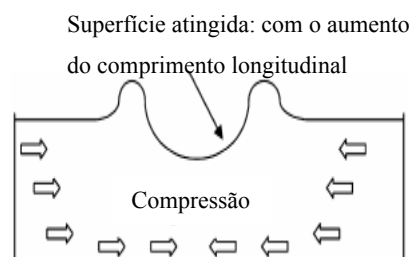
Figura 2.5. Barra cilíndrica trabalhada a frio.

2.2.5. Processo de Jateamento de Granalhas - *Shot Peening*

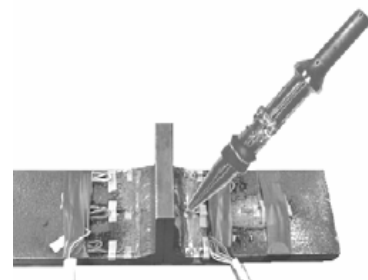
É um processo que mereceu um tópico próprio por sua grande aplicabilidade na indústria e por suas particularidades. O processo de *shot peening* consiste do jateamento de várias pequenas esferas contra a superfície da peça a ser tratada, como apresentado na figura 2.6(a). Com o impacto, a região atingida deforma-se plasticamente por achatamento, alongando-se no plano da superfície. A superfície é então comprimida pelas regiões abaixo da superfície, que não sofreram influência do impacto, como mostrado na figura 2.6(b). O processo de *shot peening* normalmente é realizado em um equipamento fechado, por causa do espalhamento das esferas utilizadas, que atingem e retornam da superfície tratada. Para aplicações em campo, existe uma técnica com princípio e efeito similares ao *shot peening*, que é conhecida por martelamento de agulhas (*hammer peening*) e está ilustrada na figura 2.6 (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.6: (a) Um equipamento de *shot peening*, (b) Representação do efeito do impacto das esferas no *shot peening*, que é semelhante ao do martelamento [33] e (c) *Hammer peening* com martelo pneumático em uma junta soldada [34].

A **tabela 2.1** mostra alguns dos principais mecanismos geradores de tensões residuais associados aos processos que os originam.

Tabela 2.1. Mecanismos de geração de tensões residuais em diferentes processos de fabricação e beneficiamento [6].

Mecanismos causadores	Deformação mecânica diferencial	Transformação de fase do material	Contração ou expansão térmica diferencial	Microestrutura diferencial	Desigualdades estruturais
Processos associados					
Conformação	Laminação, estampagem, forjamento, extrusão, estiramento				
Conformação superficial	<i>Shot peening</i> , martelamento				
Usinagem	Torneamento, plainamento, fresamento, retificação, furação, eletroerosão				
Soldagem		Todos os processos	Todos os processos		
Tratamentos térmicos		Têmpera, normalização	Têmpera, normalização		
Fundição			Diferentes seções transversais, grandes dimensões		
Tratamentos térmicos superficiais			Cementação, nitretação	Cementação, nitretação	
Montagem e ajustes					Estruturas de grandes dimensões, desalinhamentos de uniões

2.3. Principais Técnicas de Medição de Tensões Residuais

A medição de tensões residuais não pode ser feita pelos procedimentos tradicionais de análise experimental de tensões, dado que, os métodos de medição de deformação (como extensometria, fotoelasticidade, entre outros), são alheios

ao histórico de fabricação e montagem dos equipamentos, medindo apenas as mudanças de deformação após a instalação dos sensores.

Neste tópico serão apresentadas algumas das técnicas mais comumente utilizadas na medição de tensões residuais. As técnicas de medição de tensões residuais dividem-se em destrutivas, semidestrutivas e não destrutivas, de acordo com o nível de dano introduzido no equipamento medido quando de sua aplicação. As técnicas mais usadas utilizam os métodos tradicionais de análise experimental de tensões, aliados à remoção de material da peça avaliada para informar de tensões e deformações existentes antes da instalação do sensor. São **destrutivas** as técnicas que, para colherem informações de deformação suficientes para a análise das tensões residuais existentes, comprometem ou impossibilitam o uso do espécime medido. São **semidestrutivas** aquelas que introduzem algum dano no equipamento, porém não comprometem sua integridade ou sua operação. As técnicas **não-destrutivas** não precisam da remoção material e não provocam qualquer tipo de dano no equipamento para a medição de tensões residuais.

2.3.1. Técnica do furo cego ou hole drilling

É a técnica mais utilizada e também considerada uma das melhores para medição de tensões residuais [6]. O método consiste na usinagem de um pequeno furo não passante (cego) na superfície a ser avaliada (na maior parte das vezes é considerada semidestrutiva) para medição do alívio de tensões gerado pela usinagem desse furo. Essa foi a principal técnica utilizada nas medições realizadas neste trabalho e será amplamente explorada no *capítulo 3*.

2.3.2. Técnicas de seccionamento

São consideradas técnicas destrutivas. Assim como a técnica do furo cego, as técnicas de seccionamento têm como princípio a criação de superfícies livres, para promover a redistribuição das tensões residuais existentes na região seccionada da peça e então possibilitar sua determinação [7].

Algumas técnicas de seccionamento foram desenvolvidas exclusivamente para avaliar peças cilíndricas e anelares. Através de cortes radiais em anéis (que podem ser partes de tubos), pode-se determinar visualmente se ali estão contidas

tensões residuais circunferenciais compressivas ou trativas, respectivamente, dependendo do fechamento ou abertura do anel (figura 2.7).

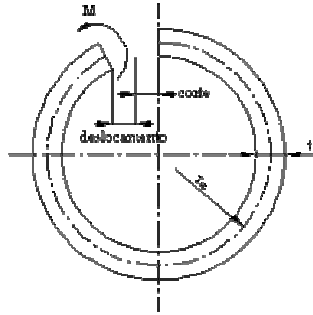


Figura 2.7. Representação da técnica de seccionamento para determinação de tensão circunferencial

O uso de *strain gages* para medir as deformações geradas pelos cortes permite fazer uma análise quantitativa das tensões residuais atuantes no espécime. Aleong e Munro de 1991 [15], a partir de informações de deformação fornecidas por extensômetros de resistência elétrica após a realização de um corte em um anel de acrílico, formularam as equações (2.1) e (2.2) para determinar as tensões residuais circunferenciais e radiais do anel.

$$\sigma_{\theta} = \frac{E_{\theta} \varepsilon_{\theta_i}}{(1 - KC_2 + KC_3)} \left[1 - \frac{1 - c^{(K+1)}}{1 - c^{(2K)}} K \left(\frac{r}{b} \right)^{(K-1)} + \frac{1 - c^{(K-1)}}{1 - c^{(2K)}} K c^{(K+1)} \left(\frac{r}{b} \right)^{(K+1)} \right] \quad (2.1)$$

$$\sigma_r = \frac{E_{\theta} \varepsilon_{\theta_i}}{(1 - KC_2 + KC_3)} \left[1 - \frac{1 - c^{(K+1)}}{1 - c^{(2K)}} K \left(\frac{r}{b} \right)^{(K-1)} + \frac{1 - c^{(K-1)}}{1 - c^{(2K)}} \left(\frac{r}{b} \right)^{(K+1)} c^{(K+1)} \right] \quad (2.2)$$

Sendo:

$$C_2 = \frac{1 - c^{(K-1)}}{1 - c^{(2K)}} c^{(K-1)} \quad C_3 = \frac{1 - c^{(K-1)}}{1 - c^{(2K)}}$$

onde:

- a = raio interno do anel
- b = raio externo do anel
- c = razão entre os raios (a/b)

r	=	posição radial
σ_θ, σ_r	=	tensão residual nas direções circunferencial e radial
$\varepsilon_\theta, \varepsilon_r$	=	deformações residuais circunferencial e radial medidas nos extensômetro
ε_{θ_i}	=	deformação circunferencial medida na superfície interna do anel
E_θ, E_r	=	módulos de elasticidade nas direções radial e circunferencial
K	=	raiz da razão dos módulos de elasticidade ($\sqrt{E_\theta/E_r}$)

2.3.3. Técnica da Remoção de Camadas ou da Deflexão

O método de remoção de camadas também é considerado destrutivo. Em sua variação mais conhecida [7], o método consiste nas medições das deflexões de um espécime, após sucessivas remoções de camadas do material avaliado. A técnica é baseada no princípio de que a deflexão varia após a retirada de uma camada de material tencionado (que é feita normalmente por usinagem química). Isto ocorre porque o espécime busca uma nova posição de equilíbrio estático para os esforços internos gerados pelas tensões atuantes no espécime. Uma ilustração deste princípio é apresentada na figura 2.8 [6].

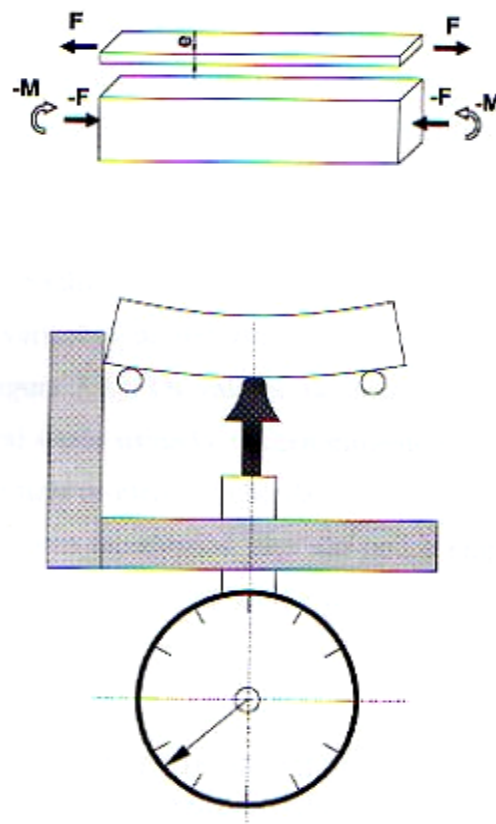


Figura 2.8. Representação do princípio do método de remoção de camadas [6].

A variação da deflexão, após a retirada de uma camada de material, a partir de uma espessura e' , pode ser relacionada com a tensão σ_e , que atuava naquela camada, pela equação:

$$\sigma_e = \frac{E}{1-\nu} \left[-\frac{4}{3} \frac{e^2}{l^2} \frac{df}{de} + 8 \frac{e}{l^2} (f_{e_i} - f_e) + \frac{8}{3l^2} \int_{e_i}^e e' df \right] \quad (2.3)$$

onde:

- E = módulo de elasticidade do material
- ν = coeficiente de Poisson
- e' = espessura do espécime antes da remoção de uma determinada camada de espessura “de”
- e_i = espessura do espécime antes da remoção de qualquer camada
- e = espessura final do espécime
- l = comprimento no qual a deflexão está sendo medida
- f = deflexão
- df = variação da deflexão pela retirada de uma camada de espessura de
- f_{e_i}, f_e = deflexões inicial e final, respectivamente

2.3.4. Técnica da Difração de Raios-X [7]

Esta técnica tem como princípio a medição do espaçamento entre planos da rede cristalina dos materiais, através do uso de feixes estreitos de raios-x. Esta grandeza é medida através da posição angular da linha de difração. Num material policristalino, com granulometria fina e isento de tensões, o espaço entre os planos cristalinos não varia com a orientação destes planos, figura 2.9. Portanto, se o ângulo de difração para um espécime livre de tensões for conhecido, pode-se calcular a deformação da rede cristalina da peça em análise.

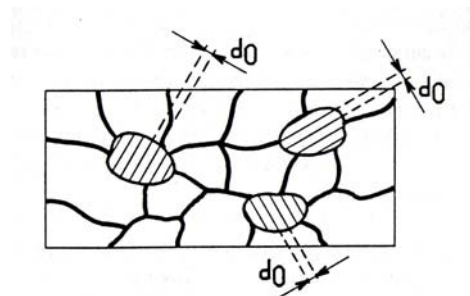


Figura 2.9. Distâncias entre planos num material isento de tensões [7].

O método de difração de raios-x é baseado na Lei de Bragg expressa pela equação:

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

Onde:

- n = número inteiro conhecido por ordem de difração
- λ = comprimento de onda do feixe incidente de raio-x
- d = distância entre planos
- θ = ângulo de difração do plano

Sendo λ constante, uma variação da distância entre planos provocada pela aplicação de uma tensão, provocará uma mudança no ângulo de difração, como mostrado na figura 2.10. A deformação cristalográfica provocada pela tensão existente pode ser expressa por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = -\cot g(\theta) \cdot \Delta\theta = -\cot g(\theta) \cdot \frac{\Delta(2\theta)}{2} \quad (2.5)$$

onde:

- ε = deformação na direção perpendicular ao sistema de planos atômicos difratores
- d_0 = distância interplanar da rede cristalina sem tensões
- $\Delta\theta$ = variação do ângulo de difração devido à tensão aplicada em relação à difração na rede cristalina não tensionada

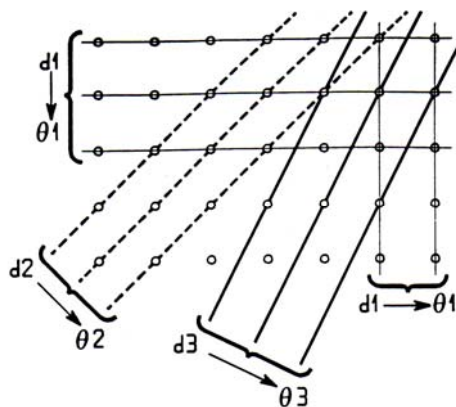


Figura 2.10. Variação das distâncias interplanares no material tensionado [7].

A relação tensão-deformação para a técnica de difração de raios-x é dada por:

$$\varepsilon_{\phi,\psi} = \left(\frac{1+\nu}{E} \right) \sigma_{\phi} \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2.6)$$

então,

$$\sigma_{\phi} = \left(\frac{E}{1+\nu} \right) \frac{1}{\sin^2 \psi} \left(\frac{d_i - d_n}{d_n} \right) \quad (2.7)$$

Onde:

- $\varepsilon_{\phi,\psi}$ = deformação num ângulo ϕ e ψ
- ϕ = Ângulo do difratômetro ao redor da superfície segundo um eixo de coordenadas do espécime
- ψ = ângulo entre a normal à superfície e o plano formado pelos feixes incidente e refratado
- ν = Coeficiente de Poisson do espécime
- E = Módulo de elasticidade do espécime
- d_i = Distância entre os planos difratores inclinados
- d_n = Distância interplanar com o espécime sob tensão
- σ_{ϕ} = Tensão na direção de ϕ
- $\sigma_{1,2}$ = Tensões principais no plano

O método de difração de raios-x é utilizado na determinação de campos de tensões em camadas com espessuras em torno de 5 μm . Quando aplicado em conjunto com uma técnica de decapagem química possibilita que profundidades de 0,1mm ou mais podem ser analisadas. A área da superfície analisada depende do diâmetro do feixe de raios-x, que em alguns instrumentos varia entre 1 e 8mm.

As limitações do método de difração de raios-x estão intimamente atreladas a parâmetros metalúrgicos como as impurezas e vazios que são muitas vezes impossíveis de serem detectados para que correções possam ser feitas, e o tamanho de grão. É importante para a confiabilidade dos resultados que o material medido tenha uma granulometria refinada, comportamento linear elástico, seja homogêneo e isotrópico, e não possua gradientes de tensão na região analisada.

Outros fatores limitantes para o emprego do método são: alto custo de seus equipamentos e a periculosidade devida à radiação atrelada ao processo.

2.3.5. Técnica da Difração de Nêutrons [7]

O método de medição de tensões por difração de raios nêutrons segue o mesmo princípio do método de difração de raios-X. O método se baseia na variação das distâncias entre planos medidas com as tensões atuantes no espécime. A capacidade de penetração dos raios nêutrons é maior do que a dos raios-X, o que permite a análise de porções maiores.

Entre as principais desvantagens do método estão:

- A impossibilidade de aplicação direta do método para medição próxima da superfície, sem o risco de erros consideráveis nos resultados, devido à necessidade de um volume amostral totalmente contido no interior do espécime;
- Insuficiente precisão na determinação da variação do campo de tensão com a profundidade, o que é uma dificuldade de outras técnicas, inclusive a do furo cego;
- A principal dificuldade desta técnica está no custo do equipamento utilizado e na disponibilidade de fontes de nêutrons.

Medições de tensões residuais em tubos aplicando esta técnica podem ser encontradas em [39].

2.3.6. Técnica de Ultra-som

As técnicas de medição de tensões com ultra-som baseiam-se no fato de que a velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas varia aproximadamente de formar linear com o nível de tensões do espécime avaliado. As duas variações mais conhecidas desta técnica são: a medição direta da variação da velocidade de propagação da onda, usando a equação 2.8, e a medição explorando o efeito da birrefringência.

$$V = V_0 + K\sigma \quad (2.8)$$

Onde:

- V = velocidade de propagação no espécime tencionado
 V_0 = velocidade de propagação no espécime isento de tensões

K = parâmetro dependente do material conhecido por constante acustoelástica
 σ = tensão atuante

A medição de tensões que faz uso dos efeitos de birrefringência acústica é também conhecida por **acustoelasticidade**. Esta técnica relaciona a diferença relativa entre as velocidades de duas ondas ultra-sônicas com direções de polarização ortogonais e que se propagam em um mesmo volume de material com a diferença entre as tensões atuantes nas direções das ondas. A equações 2.9(a) representa o caso em que as direções dos eixos principais coincidem com as direções onde a tensão cisalhante é nula.

$$B - B_0 = m(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.9) \text{ a-b}$$

$$B = \frac{V_l - V_t}{\frac{V_l + V_t}{2}} = \frac{t_l - t_t}{\frac{t_l + t_t}{2}}$$

onde:

B = birrefringência induzida pelo fator microestrutural (textura) e pelo estado de tensão do material
 B_0 = birrefringência inicial, induzida apenas pela textura
 m = constante acustoelástica do material
 σ_1, σ_2 = tensões principais
 V_l, V_t = velocidades da onda cisalhante nas direções longitudinal e transversal do espécime

Medições de birrefringência acústica em tubos recém-fabricados podem ser encontradas em [23].

2.3.7. Técnica de Barkhausen [7]

É aplicável apenas a materiais ferromagnéticos. Tais materiais são constituídos de regiões microscópicas magneticamente ordenadas conhecidas por domínios, sendo que cada domínio é magnetizado segundo direções cristalográficas preferenciais à magnetização, como ilustrado na figura 2.11.

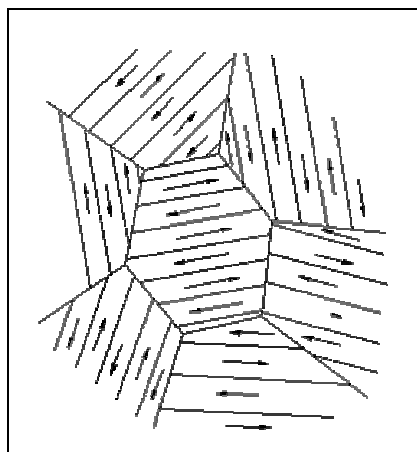


Figura 2.11. Arranjo das direções preferenciais de magnetização de domínios num material policristalino [7]

A aplicação de um campo magnético ou de tensões mecânicas provoca um rearranjo na orientação magnética dos domínios. Este rearranjo acontece de forma que, à medida que o material assume uma magnetização, as regiões se unem formando áreas maiores de mesma orientação magnética. Este crescimento da área igualmente orientada magneticamente ocorre de forma incremental e rápida, gerando o que é conhecido por “Ruído de Barkhausen”. A técnica tem como princípio a medição da amplitude desses ruídos.

A medição de tensões residuais com este método é baseada em curvas de calibração obtidas através da aplicação de tensões conhecidas em espécimes, que não precisam necessariamente estar livres de tensões, contanto, que o seu limite elástico do material não seja excedido, o que impossibilitaria a separação entre as tensões aplicadas e as pré-existentes. Existem dois tipos de curvas de calibração para o método, sendo uma para estados uniaxiais e outra para estados biaxiais.

A principal aplicação do método de Barkhausen, porém, é para indicação qualitativa, pois em uma análise quantitativa, se as características do material medido não forem muito bem conhecidas, os resultados podem ser muito ruins quando comparados com os métodos de raios-x e do furo cego.

2.3.8. Tabela Comparativa das Técnicas

LU [7] elencou alguns dos principais aspectos a serem considerados na seleção de uma técnica de medição de tensões residuais. Esta análise comparativa encontra-se resumida na tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Comparação entre as principais técnicas de medição de tensões residuais [7]

Técnica	Furo-cego	Deflexão	Seccionamento	Raio X	Difração de Nêutrons	Ultra-som	Magnética
Tipo de tensão residual analisado	Tipo I	Tipo I	Tipo I	Tipo I e Tipo II ou Tipo III	Tipo I e Tipo II	Tipo I + Tipo II + Tipo III	Tipo I + Tipo II + Tipo III
Informação obtida na medição	Deformação superficial ou deslocamento	Deformação ou deflexão	Deformação superficial ou deslocamento	Variação das distâncias interplanares	Variação das distâncias interplanares	Variação na velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas	Amplitude do ruído de Barkhausen ou Permeabilidade magnética
Porção mínima de material analisado	0,5 mm ²	1000 mm ² se for medida a deflexão e 100mm ² se for a deformação	100 mm ²	0,5 mm ²	4 mm ²	De 0,1 mm ² para a técnica das frequências altas e 30 mm ² para a técnica convencional	1 mm ² para o método do ruído de Barkhausen e 100 mm ² para o método de permeabilidade magnética
Profundidade mínima	20 µm	20 µm	1 a 2 µm	Até dezenas de microns	1 mm	15 µm até 300 µm	100 µm
Custo do equipamento (US\$)	10000 a 50.000	1000	15000	10000 a 200000	Algumas centenas de milhões	40000 a 200000	40000 a 200000
Portabilidade	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Tempo médio para obter a primeira medição e estabelecer um perfil de tensões, respectivamente	40 min. e 2 horas	30 min. e 8 horas	40 min. e entre 5 e 20 horas	20 min. e 8 horas	2 horas e uma semana	Alguns minutos e 20 minutos	Instantaneamente e 10 min.
Incerteza em situações normais	± 20MPa	± 30MPa	± 10MPa	± 20MPa	± 30MPa	10 a 20 Mpa	10 a 20 MPa
Profundidade de inspeção	0,02 a 15 mm	0,1 a 3 mm	Todas acima de 1 mm	1 a 50 µm	2 a 50 mm	0,015 a 3 mm	0,1 a 1 mm