

Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Mecânica

VLADIMIR SOLER RIBEIRO

SOLDAS DISSIMILARES EM REATORES NUCLEARES

Revisão dos principais aspectos relacionados à Soldagem Dissimilar de
Aço Carbono e Aço Inoxidável Austenítico com adição de Ligas de
Níquel

BELO HORIZONTE

ABRIL - 2015

VLADIMIR SOLER RIBEIRO

SOLDAS DISSIMILARES EM REATORES NUCLEARES

Revisão dos Principais Aspectos relacionados à Soldagem Dissimilar de Aço Carbono e Aço Inoxidável com Adição de Ligas de Níquel

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Soldagem

Área de Concentração: Engenharia de Soldagem

Orientador: Prof. Dr. Paulo José Modenesi

BELO HORIZONTE

ABRIL - 2015

R484s Ribeiro, Vladimir Soler.
Soldas dissimilares em reatores nucleares [manuscrito]: revisão dos principais aspectos relacionados à soldagem dissimilar de aço carbono e aço inoxidável com adição de ligas de níquel / Vladimir Soler Ribeiro. – 2015.
63 f., enc.: il.

Orientador: Paulo José Modenesi.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Especialista em Engenharia de Soldagem.

Inclui bibliografia.

1. Soldagem. 2. Reatores nucleares. 3. Tensões residuais.
I. Modenesi, Paulo José. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.791



Universidade Federal de Minas Gerais
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Curso de Especialização em Soldagem

Ata 4ª/2015 da Defesa de Monografia de Especialização

No dia 27 de abril de 2015, às 14:00h, a Comissão Examinadora se reuniu para avaliar o trabalho:

Título: "SOLDAS DISSIMILARES EM REATORES NUCLEARES - Revisão dos principais aspectos relacionados à Soldagem Dissimilar de Aço Carbono e Aço Inoxidável Austenítico com adição de Ligas de Níquel"


Aluno: Vladimir Soler Ribeiro – Matrícula: 2013678694

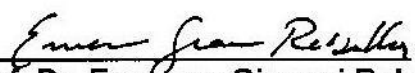
Local: Sala 3808 do Depto. Engª Metalúrgica – Prédio da EEUFMG Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus da UFMG, Pampulha – Belo Horizonte.

Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo(a) candidato(a), é de parecer FAVORÁVEL à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de 9,5 e SEM (com ou sem) sugestões de modificação. Sugere-se o prazo de 30 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada pelo Prof. PAULO J. MODENESI e homologada pelo orientador.

Assinaturas:


Prof. Dr. Paulo José Modenesi
DEMEC/EEUFMG – Orientador


Prof. Dr. Emerson Giovani Rabello
CNEN/CDTN – Avaliador


Prof. Dr. Wagner Reis da Costa Campos
CNEN/CDTN – Avaliador


Aluno: Vladimir Soler Ribeiro

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me permitido realizar este curso.

Aos meus pais José Lúcio e Mariza que nunca mediram esforços para contribuir nos meus objetivos.

Aos meus irmãos Guilherme e Sheila pelo incentivo e carinho.

A Mariana pelo amor, carinho e paciência ao longo do curso.

Aos amigos alunos pela troca de experiências e pelos diversos momentos de descontração.

Ao professor Paulo Modenesi pela disposição em sempre contribuir com meu desenvolvimento acadêmico.

Ao professo Alexandre Bracarense pela iniciativa em desenvolver este curso que foi um sucesso.

Aos demais professores pela transferência de conhecimento e experiência imensuráveis.

A Priscila da Fundação Cristiano Otoni por todo apoio durante as aulas.

Ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN pela oportunidade em desenvolver o tema deste trabalho em um mestrado.

Aos professores do CDTN Emerson Giovanni e Wagner Campos pela valorosa contribuição no desenvolvimento no tema deste trabalho.

Ao ISQ Brasil – Instituto de Soldadura e Qualidade por financiar boa parte do curso.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre a Corrosão Sob Tensão, que é um dos principais mecanismos de dano que acometem reatores nucleares do tipo PWR (*Pressure Water Reactor*) e BWR (*Boiler Water Reactor*). Ele trata de assuntos relacionados à uma das origens do problema, que são as tensões residuais tratativas ocasionadas pelo ciclo térmico de soldagem. Abordou-se também técnicas de medição dessas tensões residuais, com ênfase na técnica do furo central. É mostrado que, uma vez constatado o problema, existem meios de mitigação do dano, que possibilitam o prolongamento da vida útil do componente.

Palavras Chaves: Reatores Nucleares, Solda Dissimilar, Corrosão sob Tensão, Tensões Residuais, Técnica do Furo Central.

ABSTRACT

This work presents a review of the literature about Stress Corrosion Cracking, which is one of the main damage mechanisms that affect PWR and BWR type nuclear reactor. It deals with issues related to one of the sources of the problem, which are the trative residual stress caused by the thermal cycle of welding. It also addressed measurement techniques of residual stresses, with emphasis on technique the center hole drilling. It is shown that, once found the problem, there are means to mitigate the damage, which allow prolonging the life of the component.

Key Words: Nuclear Reactors, Dissimilar Welding, Stress Corrosion Crack, Residual Stress, Center Hole Drilling.

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Reatores do tipo PWR – <i>Pressure Water Reactor</i>	14
Figura 2: Reatores do tipo BWR – <i>Boiler Water Reactor</i>	15
Figura 3: Interação mecânica, térmica e metalúrgica das tensões residuais	19
Figura 4: Relação entre tensões residuais e variações de temperatura durante soldagem.....	20
Figura 5: Localizações típicas de <i>DMWs</i> (usinas projetadas pela <i>Westinghouse</i>).....	23
Figura 6: Etapas básicas empregadas na soldagem de aço inoxidável austenítico com aço ao carbono ou baixa liga	24
Figura 7: Solda dissimilar com uso de <i>safe end</i>	25
Figura 8: Variações das <i>DMWs</i> nos bocais dos vasos de pressão nucleares.....	26
Figura 9: Curva de tensão deformação típica de um aço dúctil indicando o domínio das tensões elásticas da CST	27
Figura 10: (a) Trincamento intergranular por CST em um tubo de trocado de calor de liga Inconel – 500x. (b) Desenho esquemático da fratura intergranular	28
Figura 11: (a) Trincamento transgranular por CST em uma tubulação de aço inoxidável AISI 304 – 300x. (b) Desenho esquemático da fratura transgranular	28
Figura 12: Pré-requisitos de condições simultâneas para a ocorrência de CST	29
Figura 13: Evolução do fator de intensidade de tensões (K) nos estágios da CST ...	32
Figura 14: Ilustração do mecanismo de CST anódico.....	33
Figura 15: Mecanismo catódico da CST onde o meio fornece hidrogênio atômico para o local onde ocorre a fratura.....	33
Figura 16: Esquema de processos que ocorrem na ponta da trinca na CST.....	34
Figura 17: Velocidade da trinca em função da temperatura do meio. Δ :Aço AISI 304 Sensitizado, o: Aço AISI 304, \square :Aço AISI 304L. Solução NaCl 22% e Tensão Média Trativa de 22 Mpa.....	35
Figura 18: Tensão atuante normalizada pela tensão limite de escoamento e tempo de falha típicos	36
Figura 19: Mudança na distribuição das tensões residuais devido ao processo <i>IHS</i>	39
Figura 20: Aplicação da técnica <i>Weld Overlay</i> em juntas soldadas tubulares	40
Figura 21: Representação por anéis deformados do efeito do alívio de tensões.	47
Figura 22: Variação da tensão radial a partir da borda do furo.....	49
Figura 23: Placa com um furo sujeita a um estado plano de tensões.	50
Figura 24: Relação entre deformação aliviada e distancia ao furo em um estado uniaxial de tensões.....	52
Figura 25: Esquema de posicionamento dos <i>strain gages</i> na roseta	53
Figura 26: Configuração de um furo cego em um corpo de prova.	55
Figura 27: Campo de tensões residuais (a) uniforme e (b) não uniforme.....	56
Figura 28: Princípio da técnica do furo incremental.....	57

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI: American Iron and Steel Institute
ASM: American Society of Materials
ASME: American Society of Mechanical Engineers
ASTM: American Society for Testing and Materials
BWR: Boiling Water Reactor
CDTN: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CFR: Code of Federal Regulations
CNEN: Comissão Nacional de Energia Nuclear
CST: Corrosão Sob Tensão
DMW: Dissimilar Metal Weld
EDS: Energy Dispersive Spectrometry
GMAW: Gas Metal Arc Welding (Eletrodo Revestido – ER)
GTAW: Gas Tungsten Arc Welding (TIG)
IHSI: Induction Heating Stress Improvement
LPB: Low Plasticity Burnishing
MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura
MSIP: Mechanical Stress Improvement Process
MO: Microscopia Ótica
NRC: Nuclear Regulatory Commission
PWR: Pressurized Water Reactor
PWSCC: Primary Water Stress Corrosion Cracking
RPV: Reactor Pressure Vessel
SMAW: Shielded Metal Arc Welding (Eletrodo Revestido)
SMW: Similar Metal Weld
TT: Tratamento Térmico
TTAT: Tratamento Térmico de Alívio de Tensão
TTPS: Tratamento Térmico Pós Soldagem
USA: Estados Unidos da América
VPR: Vaso de Pressão do Reator
WOL: Weld Overlay
ZTA: Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

σ^I : *Tensões Residuais de Primeira Ordem*

σ^{II} : *Tensões Residuais de Segunda Ordem*

σ^{III} : *Tensões Residuais de Terceira Ordem*

σ_x : *Tensões Residuais Axiais*

σ_y : *Tensões Residuais Circunferenciais*

E : *Módulo de Young*

μ : *Coefficiente de Poisson*

$\tau_{r\theta}$: *Tensão Cisalhante*

D : *Diâmetro da Roseta*

D_0 : *Diâmetro do Furo*

l_0 : *Comprimento Característico*

$l_{0,I}$: *Comprimento Característico das Tensões Residuais de Primeira Ordem*

$l_{0,II}$: *Comprimento Característico das Tensões Residuais de Segunda Ordem*

$l_{0,III}$: *Comprimento Característico das Tensões Residuais de Terceira Ordem*

K : *Fator de Intensidade de Tensões*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Objetivos.....	13
1.1.1	Objetivo Geral.....	13
1.1.2	Objetivos Específicos.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Reatores Nucleares	14
2.2	Tensões Residuais	16
2.2.1	Definição, Características e Classificação	16
2.2.2	Origens	18
2.2.3	Efeitos.....	21
2.3	Soldas Dissimilares.....	22
2.3.1	Soldas Dissimilares em Reatores do tipo PWR	22
2.3.2	Características Gerais	24
2.4	Corrosão sob Tensão	27
2.4.1	Características Gerais	27
2.4.2	Corrosão sob Tensão em Reatores do Tipo PWR.....	38
2.4.3	Técnicas de Mitigação da Corrosão sob Tensão.....	38
2.5	Análise de Tensões	42
2.5.1	Características Gerais	42
2.5.2	Método do Furo Central	47
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
4	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

No planejamento de uma matriz energética, centrais nucleares são consideradas como fontes não sazonais de energia, a exemplo de centrais termoelétricas, que queimam combustíveis fósseis. Ao contrário, as fontes sazonais dependem de condições ambientais e climáticas para a geração de energia elétrica. A integridade estrutural de uma usina nuclear não apenas contribui para disponibilidade de energia como também para a segurança dos trabalhadores e de toda a comunidade. Deve haver uma gestão do envelhecimento de sistemas, estruturas e componentes de uma central nuclear para garantir que as margens de segurança requeridas no projeto sejam mantidas ao longo da vida útil da central. Atividades apropriadas de inspeção e monitoramento permitem detectar e caracterizar danos existentes. Uma vez caracterizada a degradação de um componente, sua integridade estrutural e/ou funcional pode ser avaliada e decisões podem ser tomadas no sentido de reparar ou substituir o componente de forma a manter a instalação em condições de operação segura. Ao mesmo tempo, ações podem ser tomadas para interromper os mecanismos de envelhecimento do componente. O gerenciamento de envelhecimento de centrais nucleares é, portanto, uma atividade fundamental tanto sob o aspecto de segurança como sob o aspecto econômico, quando se procura estender a vida útil de seus componentes (SILVA, 2010).

Durante a realização deste trabalho serão avaliados aspectos relacionados ao dano denominado Corrosão Sob Tensão (CST) que ocorre com frequência em soldagem dissimilar de aço carbono e aço inoxidável austenítico com adição de ligas de níquel do tipo 82 e 182. Esse dano ocorre preferencialmente em soldagem dissimilar por conta do aumento da tensão média provocado intrinsecamente pelo processo de fabricação (soldagem). As tensões residuais devidas ao ciclo térmico imposto durante a soldagem irão se sobrepor às tensões devido à pressurização do componente. Serão discutidas algumas técnicas de redução de tensões residuais tratativas ou mesmo indução de tensões residuais compressivas na superfície interna da solda. Além disso, serão abordadas técnicas de medição de tensões residuais, com ênfase na técnica do furo central.

Através deste trabalho pretende-se obter um melhor entendimento acerca do dano Corrosão Sob Tensão que acomete centrais nucleares do tipo PWR (*Pressure Water Reactor*) e BWR (*Boiler Water Reactor*) em componentes com soldagem dissimilar, onde as tensões residuais têm papel fundamental na ocorrência do fenômeno.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar questões ligadas a integridade de soldas dissimilares de centrais nucleares.

Apresentar o estado da arte sobre questões ligadas à ocorrência de CST favorecida por componentes que possuem tensões residuais decorrentes de seu processo de fabricação.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- 1) Estudar a origem e formas de medição de tensões residuais em soldagem;
- 2) Revisar os principais conceitos envolvidos no fenômeno de CST;
- 3) Levantar as características de soldas dissimilares em reatores nucleares.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Reatores Nucleares

Usinas nucleares são centrais de geração de energia elétrica a partir da energia térmica disponibilizada em uma reação exotérmica de fissão nuclear. Elas podem ser classificadas quanto ao tipo de refrigeração utilizada:

- Gás;
- Água leve;
- Água pesada;
- Sódio;
- Chumbo.

Os reatores refrigerados a água leve representam mais de 80% dos reatores utilizados atualmente e podem ser do tipo PWR (*Pressure Water Reactor*), Figura 1, ou BWR (*Boiler Water Reactor*), Figura 2.

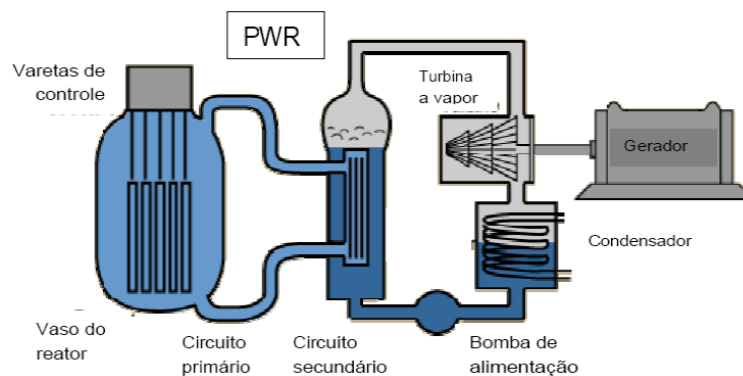


Figura 1: Reatores do tipo PWR – *Pressure Water Reactor*.

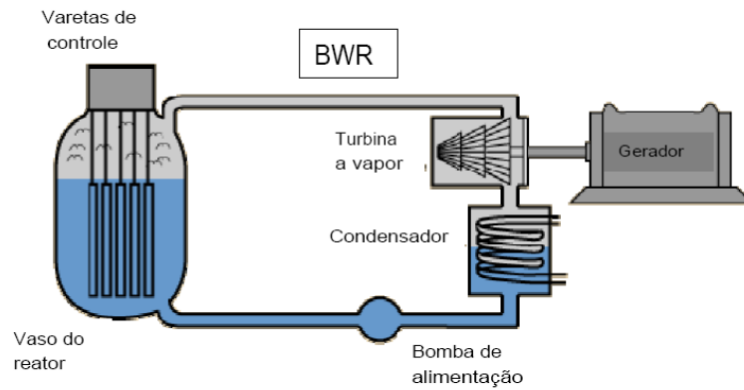


Figura 2: Reatores do tipo BWR – *Boiler Water Reactor*.

Os reatores das usinas Angra 1, Angra 2 e Angra 3 (ainda em construção) são do tipo PWR. O funcionamento dessas usinas baseia-se no resfriamento do núcleo do reator através de um circuito fechado de água sob alta pressão, denominado circuito primário. Em um trocador de calor, o circuito secundário é aquecido pelo circuito primário até gerar vapor que será utilizado em uma turbina para gerar energia elétrica. (SILVA, 2010; LIMA, 2011).

2.2 Tensões Residuais

2.2.1 Definição, Características e Classificação

Tensões residuais são as tensões ainda existentes em um material após cessado qualquer esforço externo. Elas podem influenciar nas características físicas e mecânicas, sendo que no regime elástico as tensões residuais se sobrepõem às tensões de carregamento e no regime plástico há pouca influência do estado de tensões residuais pela tendência de sofrerem alívio, porém são bem mais complexas (KRAUS, 1988; TROFIMOV, 1988; COSTA, 2007).

MODENESI (2001) define que tensões residuais são aquelas que permanecem no componente quando qualquer esforço externo é removido. Essas tensões aparecem frequentemente em peças submetidas a diferentes processamentos térmicos ou mecânicos (fundição, soldagem, laminação, forjamento, usinagem, dobramento, têmpera, etc.).

As tensões residuais são de tração (positivas) ou compressão (negativas). Além disso, o valor máximo que essas tensões podem atingir é a tensão limite de escoamento do material. Outra característica se refere ao seu estado auto equilibrante, ou seja, as resultantes de todas as forças e momentos internos produzidos são nulas. Dependendo do sinal e da distribuição das tensões residuais e das tensões aplicadas, pode ocorrer um aumento ou diminuição da vida do componente (SOARES, 2003; DONATO, 2008).

As tensões residuais podem ser classificadas segundo a forma como foram causadas (origem térmica, mecânica, etc.), de acordo com a escala na qual elas estão auto equilibradas ou de acordo com o método pelo qual elas são medidas (BHADESHIA & WITHERS, 2001).

De acordo com o critério da extensão da sua homogeneidade no domínio do material, ou seja, em função da distância sobre a qual se equilibram (comprimento característico, l_0), são divididas em três tipos (GUIMARÃES, 2012):

- (1) **Tensões Residuais de Primeira Ordem (σ^I)**: Possuem natureza macroscópica e longo alcance, se equilibram num grande domínio do material ($\ell_{0,I} \approx$ escala da estrutura, tipicamente em mm). Estas tensões podem ser avaliadas usando modelos de meios contínuos ou análise numérica (elementos finitos) que desprezam a natureza cristalina ou multifásica do material. Uma mudança no equilíbrio de forças e momentos internos relacionados a essas tensões resultará em variações dimensionais macroscópicas.

- (2) **Tensões Residuais de Segunda Ordem (σ^{II})**: Possuem natureza microscópica e estão equilibradas em domínios de material reduzidos ($\ell_{0,II} \approx 3 - 10 \times$ dimensões do grão, tipicamente 1 a 100 μm). Geralmente se originam da anisotropia dos grãos ou ainda devido às diversas fases constituintes do material, que apresentam diferentes propriedades mecânicas e térmicas. Uma mudança no equilíbrio de forças e momentos internos relacionados a essas tensões resultará em variações dimensionais macroscópicas.

- (3) **Tensões Residuais de Terceira Ordem (σ^{III})**: Possuem natureza submicroscópica e estão equilibradas de maneira intergranular, em algumas distâncias interatômicas ($\ell_{0,III} <$ tamanho do grão). Geralmente se originam pelos defeitos pontuais da rede cristalina, deslocamentos, precipitados, etc. Uma mudança no equilíbrio de forças e momentos internos relacionados a essas tensões não resultará em variações dimensionais macroscópicas.

2.2.2 Origens

As tensões residuais têm origem em deformações elasto-plásticas heterogêneas no material. As deformações elásticas podem ter como causa transformações de fases (variações volumétricas) ou campos de contração/expansão devido a gradientes térmicos. As deformações plásticas podem ter como causa gradientes térmicos de processos como soldagem ou tratamentos térmicos, além de processos de fabricação termomecânicos como usinagem, laminação, forjamento, etc. (CARLECH, 2010)

MODENESI (2011) cita que uma das principais causas de seu aparecimento em estruturas soldadas é a ocorrência de deformações plásticas não uniformes, o que pode ser causado por efeitos mecânicos ou térmicos.

GUIMARÃES (2012) apresenta de forma resumida, as principais origens das tensões residuais:

- (1) **Origem Mecânica:** Ocorrem devido às deformações plásticas não uniformes geradas pelos processos de fabricação, durante o processamento ou tratamento do material ou podem ser introduzidas propositalmente para se criar um determinado perfil de tensão em um material. Os processos de usinagem, furação, polimento, são exemplos de operações que introduzem tensões residuais indesejáveis. Por outro lado, os chamados tratamentos superficiais, tais como: jateamento, têmpera superficial, cementação, etc., podem ser usados com intuito de introduzir tensões residuais compressivas que podem aumentar a vida útil destes componentes.

- (2) **Origem Térmica:** Em escala macroscópica, pode-se afirmar que surgem como resultado de operações de aquecimento/resfriamento não uniformes. Em escala microscópica, aparecem em um material por causa da diferença entre os coeficientes térmicos de expansão das diferentes fases constituintes do material.

(3) **Origem Metalúrgica:** Ocorrem devido às reações de transformação de fase que surgem durante processos que apresentam variações térmicas (soldagem, têmpera, laminação controlada, etc). Estes processos são acompanhados pela liberação de calor latente, uma mudança de volume e um efeito de pseudo-plasticidade que têm influência sobre as tensões residuais do material.

Na prática, o que se observa é uma interação entre as três origens mencionadas acima, conforme demonstrado na Figura 3 (CALLE, 2004).

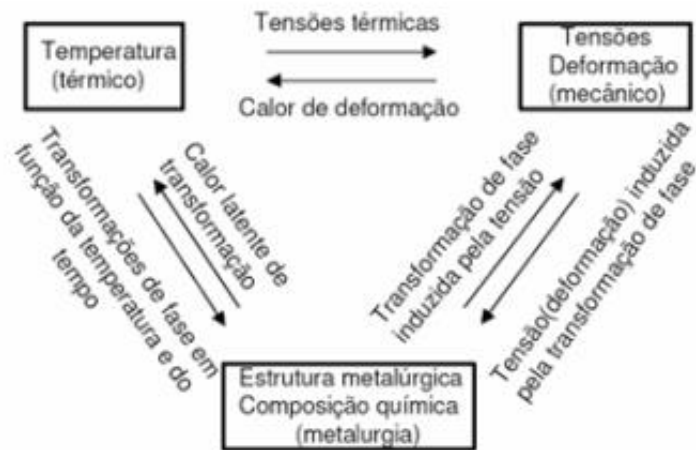


Figura 3: Interação mecânica, térmica e metalúrgica das tensões residuais (CALLE, 2004).

No processo de soldagem as tensões residuais são consequência da variação de temperatura no material. Em modos práticos, se um objeto for aquecido e resfriado de modo não uniforme e existirem restrições às suas variações dimensionais (dilatação e contração), estas resultam em efeitos mecânicos como deformação plástica localizada, isto é, após o ciclo térmico, o objeto deverá apresentar tensões residuais e distorções. Ao contrário, se a variação de temperatura for uniforme ao longo da peça ou se esta puder se expandir ou contrair livremente durante o ciclo térmico, tensões residuais e/ou distorções podem não se desenvolver (AGGEN et al, 1998).

Para o caso mais comum de processo de soldagem, via arco elétrico e utilizando-se metal de adição, ocorre o aquecimento localizado pelo arco elétrico, que faz o metal

de adição e a região adjacente ao metal base fundirem. Com a solidificação é formada então a zona fundida. Devido à continuidade no material, a região adjacente à zona fundida atinge uma temperatura bem próxima à de fusão do material, chamada de zona termicamente afetada (ZTA). Sabe-se que quando um material metálico é aquecido, sofre dilatação, assim como sofre contração quando é resfriado. Porém, durante a soldagem, o metal aquecido é impedido de se expandir pelas regiões mais frias do material, resultando em tensões transientes compressivas nas regiões próximas à zona de fusão, e tensões transientes trativas nas regiões que impediram sua dilatação (regiões mais distantes da zona de fusão e mais frias). Caso as tensões residuais superem o limite de escoamento do material, este sofre deformação plástica. A partir daí, a mesma porção que foi aquecida e se encontra comprimida começa a resfriar, e então a tendência é de que o material se contraia. Inicialmente a região se alivia da compressão e, como não consegue reduzir seu tamanho, pois o restante do material não permite, ela acaba sendo tracionada. Ao final, as tensões trativas e compressivas inferiores ao limite de escoamento permanecem no material, sendo então chamadas de tensões residuais. (ZEEMANN, 2003; SATLER, 2014).

Na figura 4, observa-se um esquema detalhado do desenvolvimento de tensões devido ao aquecimento não uniforme de uma junta soldada.

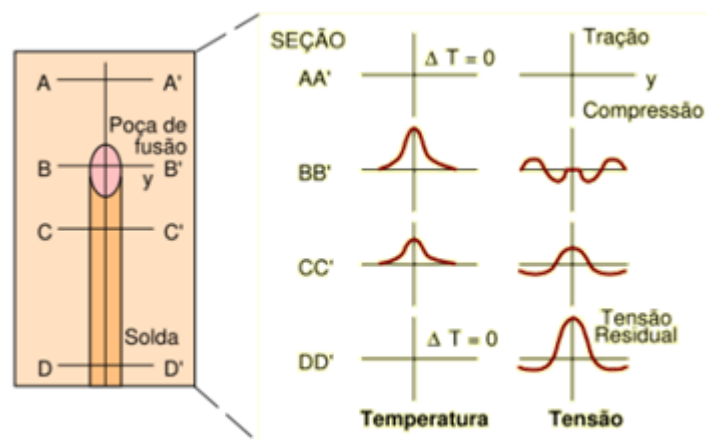


Figura 4: Relação entre tensões residuais e variações de temperatura durante soldagem (MODENESI, 2001).

Segundo MODENESI (2001), tensões residuais de soldagem também podem ser originadas por transformações de fase localizadas durante o ciclo térmico que implique em variação volumétrica. A transformação de fase localizada e não homogênea no material pode ocorrer devido às diferentes temperaturas que as regiões do mesmo apresentam durante a soldagem, velocidades de resfriamento diferentes ou variações de composição química.

2.2.3 Efeitos

As tensões residuais podem contribuir para a falha prematura por fadiga, corrosão sob tensão, fratura, ou levar à deformações intoleráveis. As tensões residuais se somam às tensões de serviço de um componente mecânico, podendo sua presença ser prejudicial ou benéfica, dependendo do sinal e da distribuição das mesmas. Tensões residuais trativas na superfície de um componente sujeito a fadiga poderá resultar em uma redução no número de ciclos até a ocorrência de falha, já que têm como consequência um aumento da tensão média. Em materiais sujeitos a corrosão sob tensão, tensões residuais compressivas na superfície podem impedir o desenvolvimento das trincas características, levando ao aumento da vida útil. Por outro lado, tensões residuais trativas na superfície podem levar a estrutura a uma falha precoce. (LAW et al, 2006; GUIMARÃES, 2012).

2.3 Soldas Dissimilares

2.3.1 Soldas Dissimilares em Reatores do tipo PWR e BWR

As soldas realizadas entre dois materiais diferentes são chamadas de soldas dissimilares (DMW – *Dissimilar Metal Welding*). Soldas dissimilares têm sido praticadas em diversos ramos da indústria, uma vez que oferecem combinações de propriedades onde se obtêm benefícios em termos de redução de custos de material além de flexibilidade no projeto. No entanto, a soldagem de metais diferentes é um desafio e uma tarefa complicada, devido às diferenças existentes na composição química e do coeficiente de expansão térmica que conduz a vários problemas de ordem mecânica e metalúrgica (ARIVAZHAGAN et al, 2014).

Em certos componentes de centrais nucleares, tais soldas são necessárias para a união de tubos de aço inoxidável ou de ligas de níquel com componentes de aço carbono ferrítico e linhas auxiliares de tubulações de aço inoxidável ou ligas de níquel com tubos de aço carbono ferrítico. Tais soldas são usadas em sistemas de segurança de todas as usinas tipo PWR e BWR.

As aplicações de DMWs estão presentes praticamente todas os reatores convencionais. Existem quatro países responsáveis pelo projeto de DMWs: Estados Unidos (Westinghouse), França (Framatome), Alemanha (Siemens) e Rússia.

A localização e os detalhes das soldas dissimilares realizadas com as ligas de níquel 82 e 182 nas usinas nucleares projetadas por fabricantes distintos, podem apresentar características diferenciadas. No caso da Westinghouse, para uma configuração típica de três “loops”, a localização destas soldas é apresentada pela figura 5.

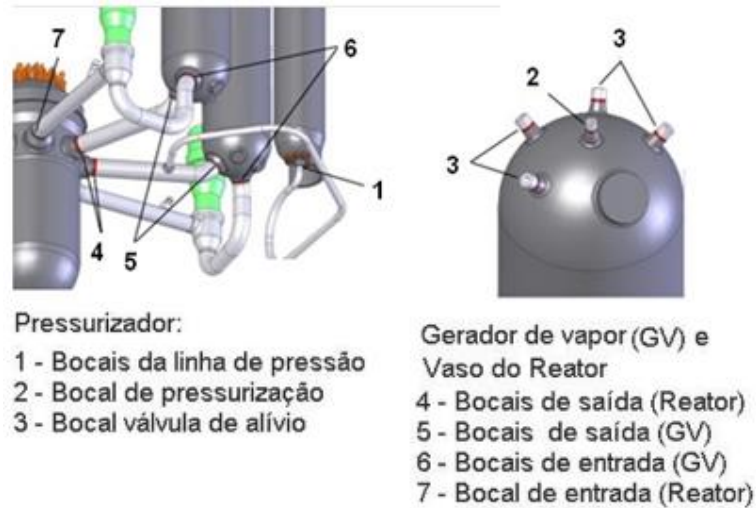


Figura 5: Localizações típicas de *DMWs* (usinas projetadas pela *Westinghouse*) (KING, 2005).

De um modo geral, as plantas nucleares possuem a tubulação do refrigerante primário em aço inoxidável. Assim, existem soldas dissimilares de grande diâmetro entre a tubulação de aço inoxidável e o aço baixa liga do vaso de pressão do reator. A maioria das soldas dissimilares nas entradas e saídas do vaso de pressão (pernas frias e quentes) são soldas com as ligas 82 e 182 com chanfro simples V. Por outro lado, os bocais do pressurizador que ligam este componente às diversas linhas da central nuclear, tais como as linhas de surto, spray e segurança/alívio, também são confeccionadas com as ligas 82 e 182, conforme ilustrado na Figura 5.

2.3.2 Características Gerais

Os requisitos de projeto de DMWs são praticamente os mesmos adotados para soldas convencionais, como a qualificação de soldadores, procedimentos de soldagem, qualificação do procedimento, inspeção e tratamento térmico antes e depois da soldagem. O desenho, a fabricação e as inspeções de componentes nucleares são geralmente sujeitos a códigos e padrões dos países onde as plantas e os componentes são fabricados. Por exemplo, nos Estados Unidos, o *Code of Federal Regulations*, (CFR, Título 10, parte 50) “*Domestic Licensing of Production and Utilisation Facilities*” estabelece um conjunto de padrões de aceitação, a partir do Código ASME (*American Society of Mechanical Engineers*). Este Código é dividido em seções específicas, tais como a Seção III que contém normas de projeto, construção e inspeção de componentes de centrais nucleares.

Normalmente, em soldas dissimilares é usual utilizar um dos três procedimentos listados abaixo:

- (1). Soldagem direta dos dois materiais.
- (2). Soldagem dos dois materiais após o amanteigamento de um deles,

Figura 6.

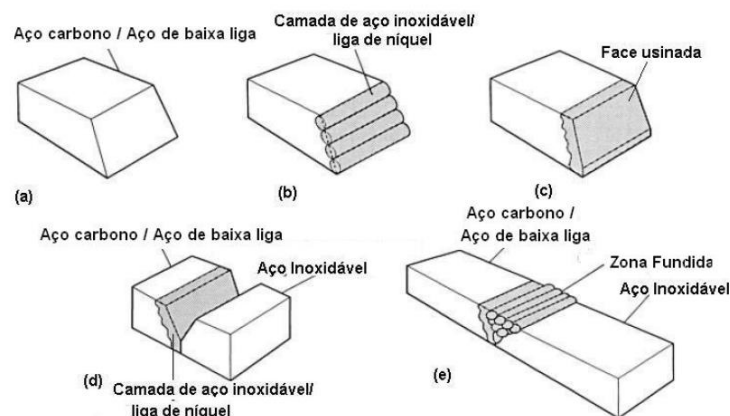


Figura 6: Etapas básicas empregadas na soldagem de aço inoxidável austenítico com aço ao carbono ou baixa liga (LIMA, 2011)

(3).Uso de uma peça de transição (*Safe-End*) entre os dois diferentes materiais base, Figura 7.

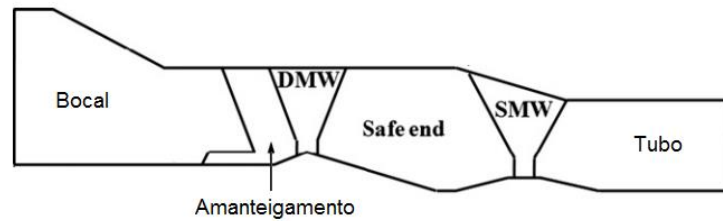


Figura 7: Solda dissimilar com uso de *safe end* (KIM et al 2011).

A soldagem direta é, geralmente, utilizada para as soldas de topo das penetrações da tampa do vaso de reator. Uma camada de material de solda (amanteigamento) ou o uso de *Safe-End* têm sido utilizados nos projetos de usinas tipo PWR para unir as tubulações de aço inoxidável aos bocais de aço baixa liga. A utilização do *Safe-End* evita a realização da solda dissimilar em campo (durante a montagem dos componentes nas usinas). Desta forma, a peça de transição é soldada aos bocais de aço baixa liga na indústria, isto é, fora da usina, sob condições rigorosamente controladas. A solda posterior à tubulação é então uma solda convencional entre materiais semelhantes e pode ser executada durante a montagem da usina.

As combinações típicas de materiais e procedimentos de soldagem utilizados em soldas dissimilares com amanteigamento em reatores PWR são:

- (1). Amanteigamento e enchimento da solda com aço inoxidável austenítico.
- (2). Primeira camada de amanteigamento em aço inoxidável austenítico com maior teor de Ni-Cr, seguido do preenchimento da solda com aço inoxidável austenítico.
- (3). Amanteigamento e enchimento da solda com ligas à base de Ni.

O *Cladding*, ilustrado na figura 8, é também uma solda dissimilar presente em reatores nucleares. Esta etapa, realizada durante a fabricação, consiste em aplicar múltiplas camadas de aço inoxidável na superfície interna do vaso de pressão do reator. A alta resistência à corrosão protege o aço carbono baixa liga do vaso do reator, que possui baixa resistência à corrosão, porém com boa resistência mecânica.

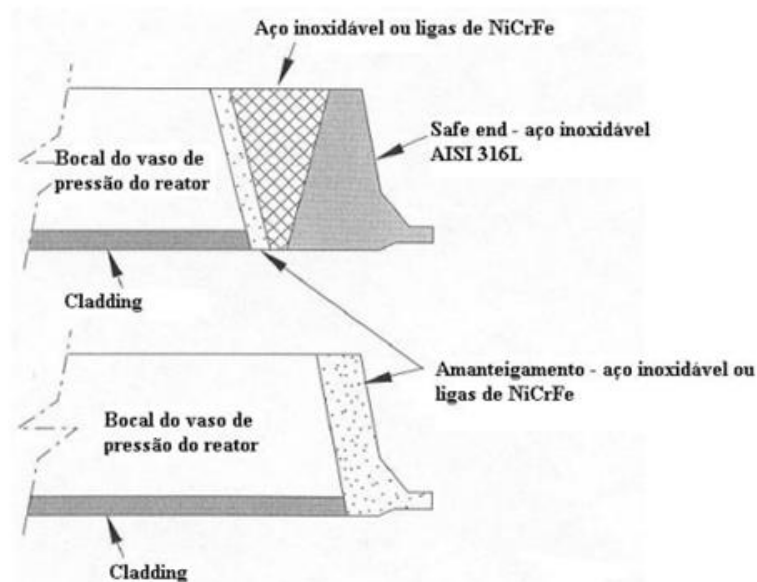


Figura 8: Variações das DMWs nos bocais dos vasos de pressão nucleares. (MITEVA&TAYLOR, 2006)

2.4 Corrosão sob Tensão

2.4.1 Características Gerais

A Corrosão Sob Tensão (CST) é um mecanismo de dano que ocorre através do efeito simultâneo de tensões trativas externas aplicadas ou residuais e do meio corrosivo específico capaz de promover a deterioração química ou eletroquímica do material susceptível. A sinergia que acontece entre estes dois fatores permite que ocorra a fratura do componente, o que não ocorreria se estivessem agindo de modo isolado (SATLER, 2014; ASM Handbook, 2003).

É possível definir ainda a CST como um processo que envolve em conjunto corrosão e deformação do metal sujeito a tensões aplicadas ou residuais no domínio elástico, Figura 9 (COSTA, 2010).



Figura 9: Curva de tensão deformação típica de um aço dúctil indicando o domínio das tensões elásticas da CST (COSTA, 2010).

A CST pode iniciar e propagar com pouca ou nenhuma evidência externa até a falha do material. As trincas frequentemente se iniciam a partir de descontinuidades, defeitos ou imperfeições superficiais ou ainda de um processo corrosivo. As trincas podem ser de natureza inter (Figura 10) ou intragranular (Figura 11), sendo possível que se observe ambas numa mesma superfície de fratura. As dimensões da trinca e as deformações associadas geralmente são invisíveis e detectáveis apenas por alguns ensaios não destrutivos.

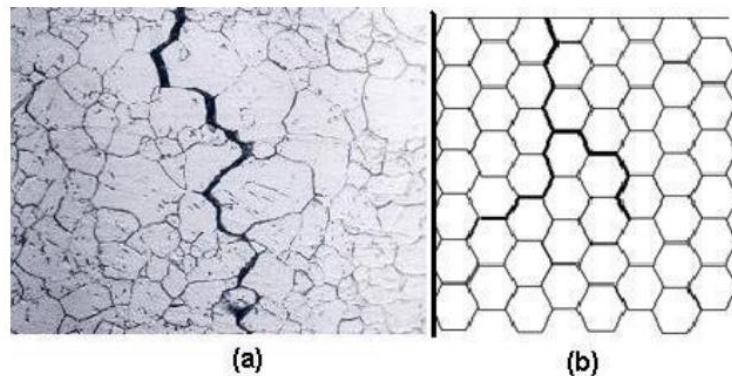


Figura 10: (a) Trincamento intergranular por CST em um tubo de trocador de calor de liga Inconel – 500x. (b) Desenho esquemático da fratura intergranular (ASM Handbook, 2003)

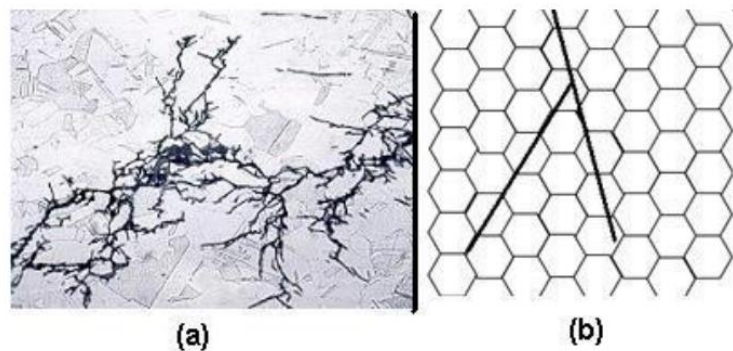


Figura 11: (a) Trincamento transgranular por CST em uma tubulação de aço inoxidável AISI 304 – 300x. (b) Desenho esquemático da fratura transgranular (ASM Handbook, 2003)

A ocorrência da CST é frequentemente associada a ligas metálicas, porém pode ocorrer em metais puros. Além disso, materiais cerâmicos e polímeros também podem apresentar trincas associadas a danos causados pelo ambiente em conjunto com tensões trativas. No caso de ligas metálicas, geralmente a CST acomete materiais que apresentam boa resistência à corrosão uniforme, tais como aços inoxidáveis austeníticos, ligas de alumínio, ligas de titânio, ligas de níquel, dentre outros. (ASM Handbook 2003)

A susceptibilidade à CST não é uma propriedade de um material como as propriedades mecânicas (limite de resistência, módulo de elasticidade, etc), mas é um indicativo importante na seleção de materiais metálicos (LIMA, 2011; ASM Handbook 2003). Isso se deve ao fato de que três requisitos são necessários para a ocorrência do mecanismo: tensões trativas (carregamentos externos ou tensões residuais), um material susceptível e fatores ambientais. A figura 12 representa esquematicamente estes requisitos.

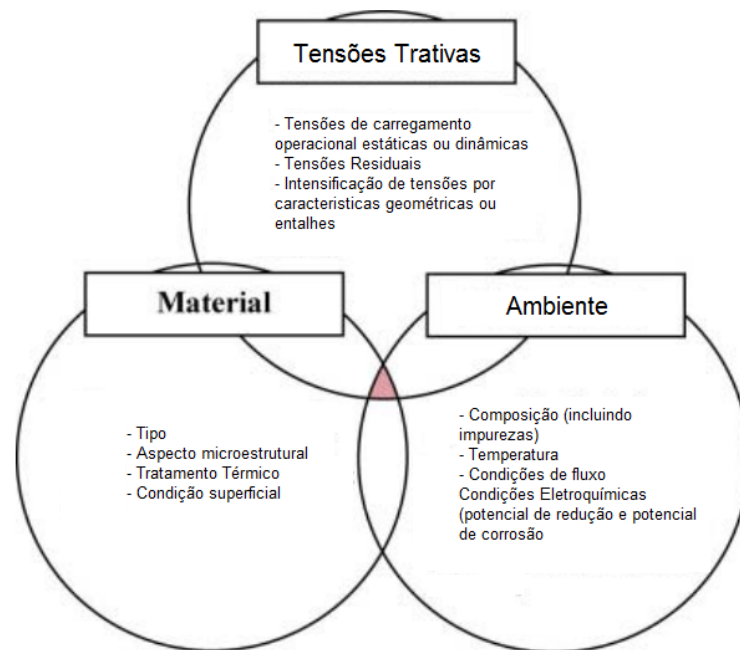


Figura 12: Pré-requisitos de condições simultâneas para a ocorrência de CST (ALEXANDREANU et al., 2007).

A CST é observada com mais frequência em ambientes aquosos no qual uma espécie química específica é a responsável pela degradação química de um material específico. Ocorre que uma determinada espécie química pode ser prejudicial a uma liga e insignificante para outra. A tabela 1 apresenta os principais meios que causam CST em metais e ligas metálicas (ASM Handbook, 2003; ANTUNES, 2010).

Tabela 1: Principais meios que causam CST em metais e ligas metálicas (ANTUNES, 2010).

MATERIAL	MEIO
Ligas de Al	Soluções NaCl – H ₂ O ₂ / Soluções NaCl / Água do Mar / Ar / Água
Ligas de Cu	Solução de Amônia / Vapor de Amônia / Ar / Vapor D'água
Ligas de Au	Solução FeCl ₃ / Solução Salina – Acido Acético
Inconel	Solução Soda Cáustica
Chumbo	Solução Acetato de Chumbo
Níquel	Soda Cáustica Fundida
Magnésio	Solução KHF ₂
Ligas Mg – Al	Água destilada / Solução HNO ₃ , NaOH. HF
Ligas Mg-Al-Zn-Mn	Atmosfera Marinha / Ar úmido + SO ₂ + CO ₂ / Solução NaCl + H ₂ O ₂
Aços comuns	Solução NaOH / Solução NaOH-Na ₂ SiO ₂ / Solução Nitrato Na e Ca / Solução HCN / Solução Ácida H ₂ S / Água do Mar / Ligas Na-Pb
Aços Inox	Solução NaOH- H ₂ S / Água Cloretada de Vapores Condensados Água do Mar / H ₂ S / Soluções Ácidas de MgCl ₂ e BaCl ₂
Ligas de Ti	NaCl Fundido / N ₂ O ₄ Líquido / Metano e outros líquidos orgânicos Vapores de HNO ₃ / Cl ₂ úmido
Zircônio	Solução FeCl ₃

Ligas de níquel utilizadas em soldas dissimilares de reatores nucleares, como as ligas 82 e 182, apresentam boa resistência à corrosão generalizada, porém são susceptíveis a CST após vários anos de operação. Essas trincas foram relatadas em circuitos primários de usinas do tipo PWR e são também designadas como PWSCC – *Primary Water Stress Corrosion Crack*. (LIMA, 2011).

Em geral a CST é observada em conjuntos materiais/meios que promovam a formação de filmes na superfície do metal, tais como camadas passivas, películas de manchamento (*tarnish films*) ou camadas com perda de liga (*dealloyed layers*). Em muitos casos esses filmes reduzem a taxa de corrosão generalizada para aquele meio específico que causa CST (ASM Handbook 2003).

A fratura por CST envolve três etapas (ANTUNES, 2010):

- Nucleação da trinca: neste estágio a ação do meio é mais importante que a tensão atuante. Devido ao ambiente corrosivo, vão se formar na superfície do material micro trincas e pequenos pites que servirão de concentradores de tensão; a nucleação pode ocorrer através de discontinuidades superficiais, pites, sítios de corrosão intergranular, dissolução por movimento de deslocamentos, etc;
- Propagação estável da trinca: neste estágio ocorre uma alternância entre os efeitos de tensão trativa e meio corrosivo; a corrosão no vértice da trinca pode aumentar o fator de concentração de tensões, facilitando a propagação;
- Falha final: ocorre quando a trinca atinge um tamanho no qual a seção restante é insuficiente para resistir ao esforço empregado.

A CST é um processo lento. A trinca se inicia e propaga em pequenas taxas (tipicamente 10^{-6} m/s) até que a tensão no material remanescente supere a tensão limite de resistência do mesmo. Sob o aspecto da mecânica da fratura, ocorre um aumento no fator de intensidade de tensões (K) na ponta da trinca, superior ao valor de início da propagação por CST (K_{SCC}), porém este não excede o valor crítico definido K_{IC} , Figura 13 (ASM Handbook, 2003).

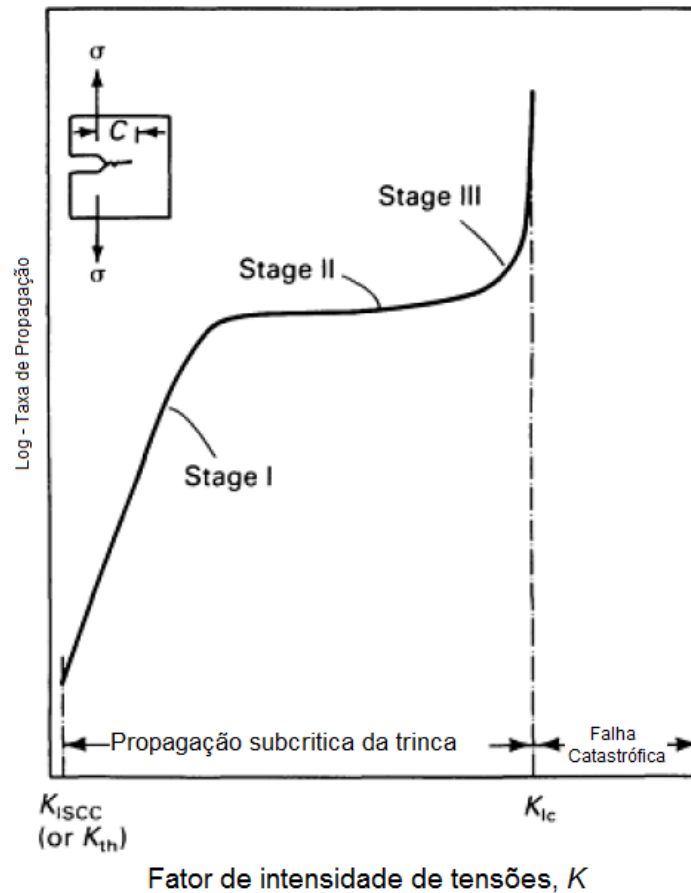


Figura 13: Evolução do fator de intensidade de tensões (K) nos estágios da CST (ASM Handbook, 2003).

Na medida em que a intensidade de tensões cresce, a abertura e a deformação plástica associadas à propagação da trinca também crescem. Quando o tamanho da trinca se aproxima do tamanho que antecede a fratura, maiores níveis de deformação plástica poderão ser observados.

Os mecanismos químicos que explicam a CST estão divididos em dois grupos (ASM Handbook, 2003; COSTA, 2010; DONATO, 2008; CAMPOS, 2003):

- Mecanismo anódico: envolve a dissolução ativa e remoção de material na ponta em uma taxa maior que na parede da trinca, Figura 14;

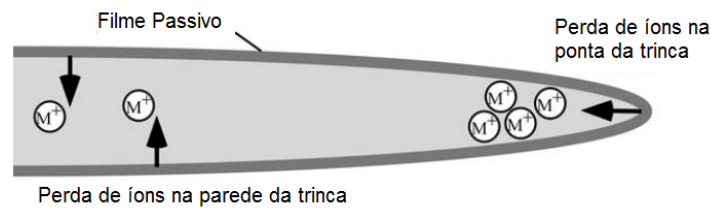


Figura 14: Ilustração do mecanismo de CST anódico (ANDERSON, 2005).

- Mecanismo catódico: envolve evolução, absorção, difusão e fragilização por hidrogênio, Figura 15.

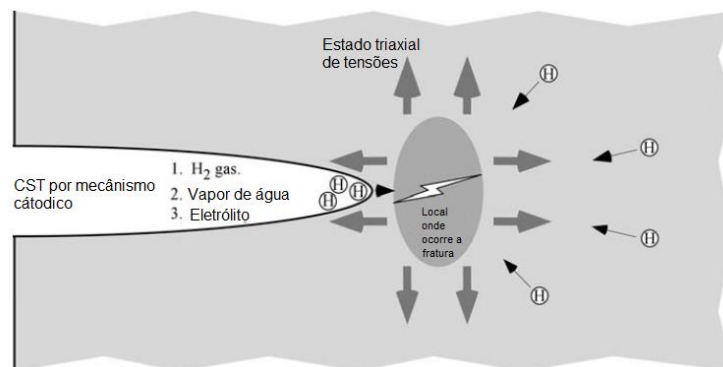


Figura 15: Mecanismo catódico da CST onde o meio fornece hidrogênio atômico para o local onde ocorre a fratura. (ANDERSON, 2005).

Durante o processo, os dois mecanismos podem ocorrer ao mesmo tempo.

Já a quebra da ligação interatômica no vértice da trinca se dá por um dos seguintes mecanismos (ASM Handbook, 2003):

- Solvatação química e dissolução;
- Fratura mecânica dúctil ou frágil.

Por sua vez, a fratura (dúctil ou frágil) é estimulada por uma destas interações entre material e ambiente:

- Adsorção de alguma espécie química;
- Reação de superfície;
- Reação no metal à frente do vértice da trinca;
- Filmes superficiais.

Estes mecanismos requerem que alguns processos ocorram em uma ordem específica de forma a tornar possível a propagação da descontinuidade. Esses processos de natureza química que controlam a taxa de propagação da trinca no estágio 2 (Propagação Estável) estão indicados na figura 16 (ASM Handbook, 2003).

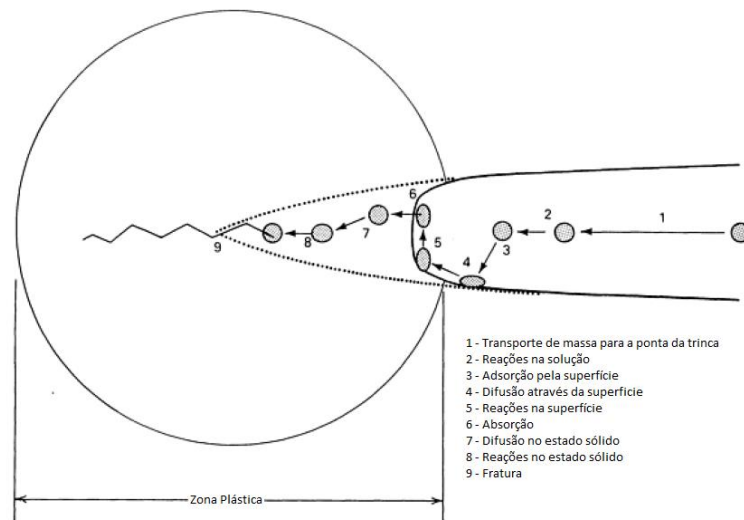


Figura 16: Esquema de processos que ocorrem na ponta da trinca na CST (ASM Handbook, 2003).

Atualmente, são assumidos os seguintes mecanismos como sendo responsáveis pela propagação da descontinuidade por CST:

- Ruptura de filme por dissolução;
- Túnel corrosivo;
- Aumento da plasticidade por adsorção;
- Ruptura da película de manchamento (*tarnish film*);
- Clivagem induzida por filme;
- Fragilização induzida por adsorção;
- Fragilização por hidrogênio.

Os principais parâmetros que influenciam a CST estão listados e discutidos abaixo:

Temperatura: Em geral, um aumento na temperatura ocasiona um aumento na velocidade da fratura por CST (FERNANDES, 2010). Em reatores nucleares, locais que operam em elevadas temperaturas, como a perna quente do reator e o pressurizador, exibem trincas em um menor tempo em comparação a outras regiões que apresentam menores valores de temperatura de operação. Em ligas de níquel como as ligas 82 e 182 o processo é tido como termicamente ativado e pode ser representado pela equação de Arrhenius (LIMA, 2011).

O gráfico da figura 17 mostra como varia a taxa de propagação de uma trinca em função da temperatura do meio.

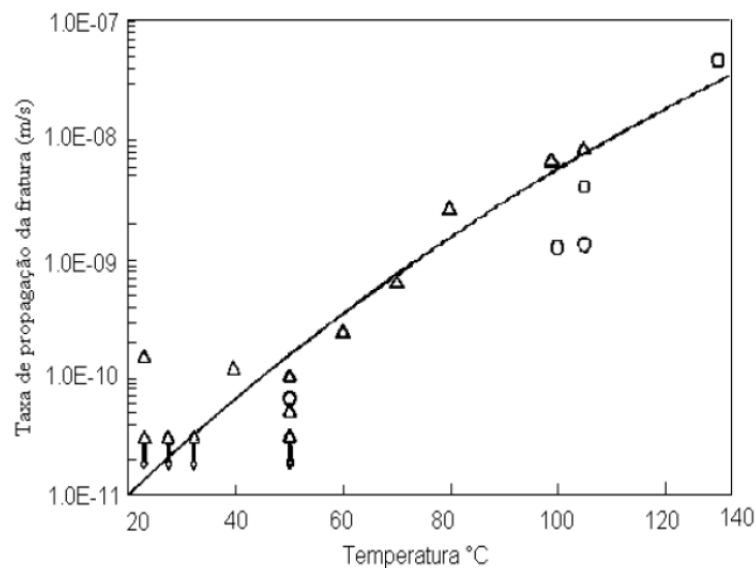


Figura 17: Velocidade da trinca em função da temperatura do meio. Δ:Aço AISI 304 Sensitivado, o: Aço AISI 304, □:Aço AISI 304L. Solução NaCl 22% e Tensão Média Trativa de 22 Mpa. (ANTUNES 2010).

Tensões Atuantes: As tensões trativas são as que ocasionam a CST. Devem ser levadas em consideração não apenas as tensões de carregamento, mas também as tensões residuais existentes no material. Nos locais onde a tensão residual for trativa, essa será somada ao carregamento externo e então ocorrerá uma diminuição na vida útil do componente. Tensões médias acima de metade da tensão limite de escoamento já são capazes de causar a CST. A figura 18 apresenta um diagrama esquemático do tempo de falha versus tensão aplicada (ASM Handbook, 2003).

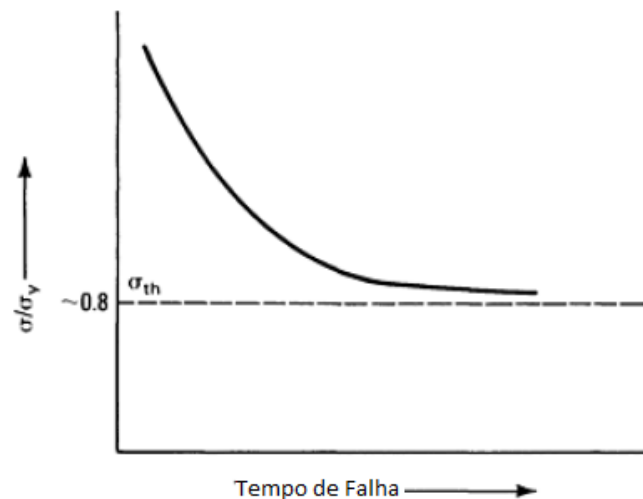


Figura 18: Tensão atuante normalizada pela tensão limite de escoamento e tempo de falha típicos (ASM Handbook, 2003).

Além disso o estado de tensões, seja o estado plano de tensões ou plano de deformações também afeta o desenvolvimento da trinca por corrosão sob tensão e a direção do máximo carregamento normal à direção média de propagação da trinca maximiza seu avanço (ASM Handbook, 2003).

Condições metalúrgicas, como a presença de partículas de segunda fase e precipitados, e o tamanho e orientação dos grãos além da composição química têm papel muito importante na susceptibilidade à CST (ASM Handbook, 2003; ANTUNES, 2010).

Em aços inoxidáveis austeníticos, quando ocorre a sensitização, a região fica sujeita à corrosão sob tensão intergranular. Ligas de níquel também são susceptíveis à sensitização, mas a correspondência direta deste fenômeno com a CST ainda não foi estabelecida por se tratar de um processo mais complexo (ASM Handbook, 2003).

Nas ligas de níquel de soldas dissimilares de reatores nucleares, a microestrutura consiste de grãos colunares dendríticos separados por contornos de grão de acordo com a similaridade na orientação e a direção de resfriamento. Estes contornos, por serem um defeito superficial, servem como locais de nucleação e propagação das trincas intergranulares por CST (LIMA, 2011).

2.4.2 Corrosão sob Tensão em Reatores do Tipo PWR

Em usinas nucleares do tipo PWR, as ligas de níquel do tipo 600, 82 e 182 apesar de apresentarem elevada resistência à corrosão generalizada, são susceptíveis à CST. A predisposição dessas ligas é conhecida desde os anos 1960, porém, a partir da década de 80 foram observadas as primeiras trincas por CST em reatores. Entre 1994 e 2006 foram reportadas mais de 300 soldas em mais de 30 reatores com trincas por CST. Os principais tipos de soldas que têm sido afetadas são (ALEXANDREANU et al., 2007; ANDRESEN&HICKILNG, 2007; LIMA, 2011):

- Soldas das guias de penetração dos mecanismos de acionamento das barras de controle na tampa do vaso de pressão do reator (VPR);
- Soldas das penetrações para instrumentação no fundo do VPR;
- Soldas das peças intermediárias de conexão dos bocais do VPR à tubulação;
- Soldas existentes nos bocais do pressurizador e dos geradores de vapor.

2.4.3 Técnicas de Mitigação da Corrosão sob Tensão

A mitigação da CST consiste em reduzir a frequência ou retardar a iniciação ou taxa de crescimento de trincas geradas por este mecanismo. Ainda que, com ações de mitigação a CST seja termodinamicamente possível de ocorrer, a cinética do processo pode ser tão lenta que o fenômeno se estabilize (metaestável) ou não aconteça.

Em reatores nucleares do tipo PWR, a interrupção da corrosão sob tensão em ligas de níquel é de grande importância, devido ao amplo uso destes materiais no circuito primário (SCOTT&MEUNIER, 2007; LIMA, 2011).

A mitigação da CST pode ocorrer pela modificação de um dos pré-requisitos já citados anteriormente (Figura 12):

Material: Atualmente, na fabricação de centrais nucleares, as ligas de níquel 600, 182 e 82 estão sendo substituídas por ligas com maior teor de cromo (acima de 30%): 690, 152 e 52. Em reatores antigos, a substituição não é viável de ser executada pela dificuldade operacional em conjunto com a segurança dos trabalhadores (altos níveis de radiação) (KING, 2005; LIMA, 2011).

Condições operacionais: Consiste em alterar a água do circuito primário com o objetivo de reduzir a susceptibilidade ou mesmo promover a redução na taxa de propagação de uma trinca por CST. Como exemplo de alterações possíveis tem-se: Adição de zinco, redução na temperatura de operação e controle do hidrogênio dissolvido. (ANDRESSEN&HICKLING, 2007; LIMA, 2011)

Tensões atuantes: Basicamente procura-se alterar o nível de tensões residuais através de processos de princípios mecânicos, térmicos ou termomecânicos. O objetivo é reduzir as tensões trativas ou mesmo induzir tensões compressivas na superfície susceptível à CST. As 5 técnicas apresentadas abaixo podem ser utilizadas para alterar o estado de tensões (FINDLAN, 2007).

- (1) **Tratamento térmico:** o componente ou a região que possui tensões residuais é aquecido em temperaturas específicas de modo a causar uma redução geral no nível de tensões residuais (trativas e compressivas) ou ainda, dependendo das condições de aquecimento, como heterogeneidade, gradiente imposto e nível de restrição da estrutura, pode-se obter tensões residuais compressivas.

O aquecimento pode ser realizado através de indução eletromagnética e o processo é conhecido por *IHSI - Induction Heat Stress Improvement* (Figura 19).

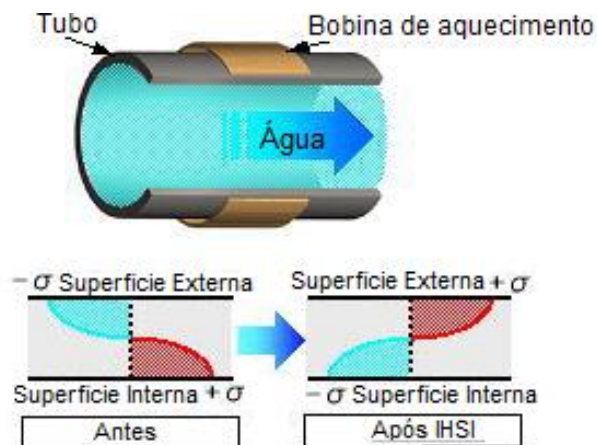


Figura 19: Mudança na distribuição das tensões residuais devido ao processo *IHSI* (HITACHI, 2014).

(2) **Weld overlay (WOL):** em tubulações, consiste na deposição de várias camadas de solda de material resistente a corrosão sobre a superfície externa. Devido às tensões térmicas geradas e ao nível de restrição da estrutura, tensões compressivas seriam induzidas.

A técnica *Weld Overlay* consiste basicamente na aplicação de sobrecamadas de solda ou soldas de recobrimento. É uma técnica de reparo ou fabricação que aplica um revestimento metálico no componente por meio de um processo de soldagem. A intenção é reverter as tensões de tração geradas pelo processo de soldagem de materiais dissimilares, diminuindo o avanço de trincas por meio da geração de tensões de compressão. No caso de centrais nucleares, são utilizados como reparo com metais de solda de elevada resistência à PWSCC (KING, 2005, SATLER 2014).

Em centrais nucleares, este processo foi desenvolvido em 1982 como um reparo provisório em uma junta soldada, danificada por Corrosão Sob Tensão em tubulações de aço inoxidável de reatores tipo BWR (*Boiling Water Reactor*). O primeiro reparo por WOL realizado em usinas tipo PWR aconteceu na Usina de Palisades, em 1993. Na figura 20 é ilustrada a técnica WOL nas juntas soldadas que apresentaram trincas por CST.

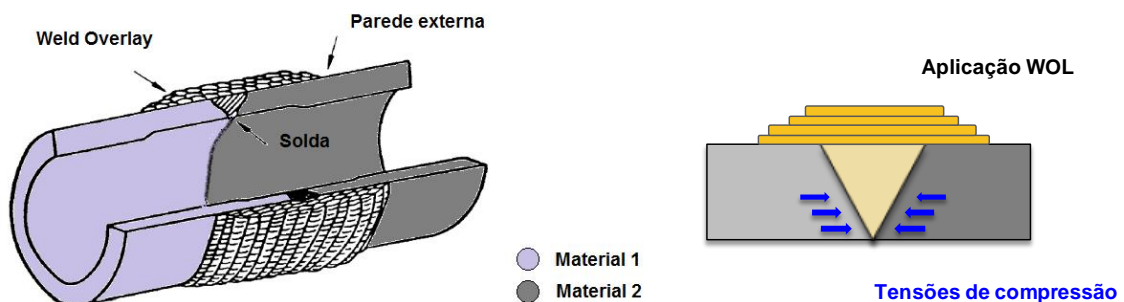


Figura 20: Aplicação da técnica *Weld Overlay* em juntas soldadas tubulares (EPRI - NP-7103-D, 1991).

A técnica WOL é especificada para induzir uma tensão residual compressiva na parte interior da solda (raiz da solda) de modo que a soma das tensões residuais e as de operação, após o WOL, seja menor que o limite de tensão para o trincamento por PWSCC. Atualmente, o processo de WOL, em centrais nucleares, é utilizado para a mitigação e reparo de bocais soldados com as

ligas de níquel 82 e 182, evitando o trincamento por Corrosão Sob Tensão. Como metais de adição são empregadas as ligas de níquel 52 e 152 (SATLER, 2014).

- (3) **MSIP (Mechanical Stress Improvement Process):** Nesta técnica, é usada uma espécie de abraçadeira que envolve e deforma as conexões soldadas, provocando tensões de compressão na parte interna do tubo.
- (4) **Shot Peening:** são métodos de jateamento, que podem ser a laser, a plasma, com jatos de água ou com esferas cerâmicas/metálicas sobre a superfície do componente, provocando tensões compressivas na camada interna superficial.
- (5) **LPB (Low Plasticity Burnishing):** é uma técnica que utiliza uma ferramenta hidrostática constituída por uma esfera que gira e pressiona a superfície, causando deformações plásticas e gerando tensões compressivas na superfície.

2.5 Análise de Tensões

2.5.1 Características Gerais

A necessidade do monitoramento e garantia da integridade de componentes mecânicos ao longo de sua vida, tornou imprescindível o desenvolvimento de técnicas, dispositivos e instrumentos de medição experimental de tensões residuais, baseados em diferentes princípios (SOUSA, 2012).

A determinação da distribuição e nível das tensões residuais em componentes mecânicos é indispensável na avaliação da integridade estrutural, por conta da influência que as tensões residuais exercem no comportamento destes componentes (SOARES, 1998).

No início, as técnicas eram destrutivas e frequentemente a execução do ensaio introduzia um alto nível de tensões residuais fazendo com que os resultados não fossem satisfatórios. Na medida em que os estudos sobre essas técnicas foram se desenvolvendo, metodologias diversas foram criadas e ao mesmo tempo foram melhoradas as incertezas e a precisão dos métodos já existentes. Ainda hoje pode-se dizer que não existe uma única técnica que seja capaz de abranger toda a gama de aplicações onde seja necessário realizar a medição qualitativa e outras vezes quantitativa das tensões residuais (SALAZAR, 2008).

As técnicas para medição das tensões residuais são classificadas como destrutivas, semi-destrutivas e não destrutivas.

As técnicas destrutivas e semi-destrutivas se valem da alteração no estado de equilíbrio das tensões, provocando o alívio destas no ponto ou região avaliada. O princípio do método está em medir as deformações causadas pelo alívio, em muitas vezes com o uso de strain gages e posteriormente o tratamento matemático das medições realizadas por estes instrumentos (SOUSA, 2012).

As técnicas não destrutivas avaliam, dentre outros fatores, (1) as variações de parâmetros da rede cristalográfica do componente ou região avaliados, (2) variação de parâmetros acústicos e (3) magnéticos (SOUSA, 2012).

A tabela 2 apresenta de forma resumida os métodos mais comuns de medição de tensões residuais.

Tabela 2: Métodos mais comuns de medição de tensões residuais (MELO, 2014).

CLASSIFICAÇÃO	PRINCIPAIS MÉTODOS	COMENTÁRIOS
Semi-destrutivos	Método do furo cego	Execução de um furo de 0,8 a 3,2 mm de diâmetro. Método normalizado pela ASTM-E-837
Destrutivos	Método da remoção de camadas (Método da deflexão)	Camadas retiradas por ataque químico. Pode estar aliada ao Método difração de raio x.
	Método do seccionamento	Cortes parciais longitudinais ou transversais ao eixo de peças assimétricas, ex.: cilindros
Não-destrutivos	Método da difração de raio x	Variação das distâncias entre os planos atômicos. Técnica normalizada pela SAE-J784a
	Método da difração de nêutrons	Semelhante ao método de difração de raio X, no entanto, com inspeção em todo o volume
	Método ultrassônico	Variação da velocidade de ondas ultrassônicas no interior do material.
	Método magnético	Relação entre propriedades magnéticas, permeabilidade, indução e efeito Barkhausen.

Os métodos apresentados na tabela 2 são agora comparados nas tabelas 3 e 4 quanto às características e particularidades.

Tabela 3: Principais aplicações de algumas técnicas de medição de tensões residuais (MELO, 2014).

Descrição	Furo cego	Deflexão	Seccionamento	Difração de Raio X	Difração de Nêutrons	Ultra-som	Magnético
Problemas para o caso de estrutura e grãos grandes	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim	Sim
Sensibilidade à deformação ao encruamento	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Média	Alta	Alta
Análise em material de múltipla fase	Tensão média em todas as fases	Tensão média em todas as fases	Tensão média em todas as fases	Tensão em cada fase se a menor fase exceder uma certa fração de volume	Tensão em cada fase se a menor fase exceder uma certa fração de volume	Tensão média em todas as fases	Tensão média em todas as fases ferromagnéticas
Medidas de materiais amorfos	Possível	Possível	Possível	Impossível	Impossível	Possível	Possível em fases ferromagnético
Medidas em partes com baixo raio de curvatura	Possível, $r > 5$ mm	Possível com método de "Sachs"	Difícil	Possível, $r > 5$ mm	Possível, medidas abaixo da superfície	Difícil, necessidade de sensor especial	Possível, $r > 5$ mm
Medidas em camadas (espessuras da camada)	Maior que $50 \mu\text{m}$	2 a $3 \mu\text{m}$	Maior que 2 mm	Todas as espessuras	Maior que 2 mm	0,1 a 3 mm	0,01 a 1 mm

Tabela 4: Principais características de algumas técnicas de medição de tensões residuais (MELO, 2014).

Descrição	Furo cego	Deflexão	Seccionamento	Difração de Raio X	Difração de Nêutrons	Ultra-som	Magnético
Hipoteses básicas	Tensão biaxial e uniforme na superfície do furo	Tensão biaxial e uniforme de um retângulo de dimensões grandes em relação a espessura	Campo de tensão 3-D	Padrão: material policristalino de grãos finos, isotrópico e homogêneo	Material policristalino, isotrópico e homogêneo	Material isotrópico e homogêneo, tensão homogênea no caminho acústico entre o transmissor e o receptor	Material ferromagnético
Tipos de tensões residuais analisadas	Macroscópica	Macroscópica	Macroscópica	Macroscópica Microscópica	Macroscópica Microscópica	Macroscópica Microscópica sub-microscópica	Macroscópica Microscópica sub-microscópica
Parâmetros medidos	Deformação ou deslocamento superficial	Deformação ou deflexão	Deformação ou deslocamento superficial	Mudança no espaçamento interplanar do material policristalino	Mudança no espaçamento interplanar do material policristalino	Variação da velocidade da onda ultrasônica	Amplitude de ruído Barkhausen ou permeabilidade magnética
Área de análise mínima (uso padrão)	0,5 mm ²	1000 mm ² 100 mm ²	100 mm ²	0,5 mm ²	4 mm ²	0,1 mm ² (método da alta frequência) 30 mm ² (método convencional)	1 mm ² (método de Barkhausen) 100 mm ² (método de permeabilidade magnética)
Profundidade mínima de análise	20 μm	20 μm	1 a 2 mm	Dezenas de micrometros	1 mm	15 μm a 300 μm	100 μm
Custo do equipamento [US\$]	10.000 a 50.000	1.000	15.000	100.000 a 200.000	Alguns milhões	40.000 a 200.000	10.000 a 60.000
Incerteza típica	± 20 MPa	± 30 MPa	± 10 MPa	± 20 MPa	± 30 MPa	± 10 a 20 MPa	± 10 a 20 MPa
Profundidade de inspeção	0,02 a 15 mm	0,1 a 3 mm	Todas profundidades dentro de 1 mm	1 a 50 μm	2 a 50 mm	0,15 a 3 mm	0,1 a 1 mm

Os seguintes parâmetros devem ser verificados na escolha do método a ser empregado na medição das tensões residuais (SOUSA, 2012):

- Natureza do material (estrutura cristalina, textura, composição química, fases presentes, tamanho de grãos, etc);
- Tipo de tensões residuais (macro, micro ou sub microscópica);
- Gradiente de tensões residuais;
- Geometria do componente e da região a ser analisada;
- Local onde é realizada (campo ou laboratório);
- Disponibilidade do componente (técnica destrutiva, não destrutiva ou semi-destrutiva);
- Tempo para medição;
- Incerteza e repetibilidade do método;
- Custo.

Nos últimos anos têm sido desenvolvidas alternativas aos métodos experimentais de determinação de tensões residuais. Essas alternativas utilizam métodos analíticos e métodos numéricos sendo que o método de elementos finitos tem sido o mais utilizado pela comunidade científica. A análise é realizada em duas etapas distintas: inicialmente uma análise térmica e, em seguida, uma análise estrutural. Isto porque é considerado que mudanças no estado mecânico não causam mudanças no estado térmico, ou seja, uma variação na tensão e deformação não causa uma variação na temperatura (são desprezados os efeitos mecânicos dissipativos). No entanto, uma mudança no estado térmico causa uma mudança no estado de tensões e deformações. Assim, é primeiramente realizado o cálculo da história térmica da soldagem e, em seguida, este campo de temperatura transiente é aplicado ao modelo estrutural para obtenção das tensões residuais (Bezerra, 2006).

2.5.2 Método do Furo Central

O Método do Furo Central atualmente é considerado um dos melhores métodos de medição experimental de tensões residuais, por ser de fácil aplicação em muitos casos, ter uma boa relação custo/exatidão, poder ser executado em campo, permitir que o componente tenha sua utilização normal após o ensaio na maioria das vezes e por ter seus procedimentos de medição e tratamento de dados normatizados. (SANTOS, 1995; SALAZAR, 2008; MIRIM, 2011).

O método baseia-se na avaliação da deformação, que é a resposta do material quando ocorrem perturbações geométricas produzidas por alterações nos campos de tensões elásticas através da ação mecânica de remoção localizada de material. A partir das deformações obtidas é possível obter o estado de tensões residuais que lhe deram origem. A figura 21 apresenta esquematicamente a deformação do furo após o relaxamento das tensões de tração unidirecionais. Observa-se que a deformação é maior nos anéis próximos à borda do furo. (SALAZAR 2008; LAVOR, 2011).

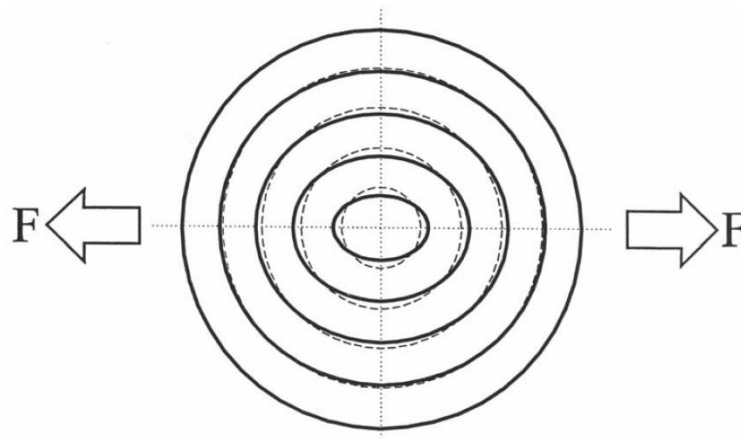


Figura 21: Representação por anéis deformados do efeito do alívio de tensões. (LAVOR, 2011).

Contextualização Histórica

A técnica do furo central (*hole drilling method*) foi explorada inicialmente por J. Mathar em 1934 por meio de soluções de Kirsch e o princípio da superposição para

obter o nível de tensões de uma região a partir de um alívio mecânico provocado pela remoção de material (furo central) em placas tensionadas. Mathar naquela época utilizou extensômetros mecânicos para medir o deslocamento obtido. Em 1950, Soete e Vancrombrugge aumentaram a precisão do método ao utilizarem extensômetros elétricos. (SALAZAR 2008).

Atualmente, a aplicação da técnica deve-se aos estudos de Rendler e Vigness (1966) que desenvolveram a técnica do furo central e produziram um procedimento sistemático e facilmente reproduzível, definindo a geometria das rosetas dos extensômetros, que foram posteriormente normalizadas pela norma americana ASTM E837. Diversas outras contribuições foram feitas para este método de medição (SALAZAR, 2008):

- 1956: Kelsey publicou um trabalho sobre a determinação de tensões residuais não uniformes com a profundidade obtida através da técnica do furo incremental;
- 1973: Beaney e Procter realizaram o furo através de usinagem com jatos abrasivos, que não introduziam tensões na medição;
- 1976: Nawwar et al propuseram alterações com o objetivo de determinar tensões residuais em placas finas;
- 1981: Schajer utilizou análises numéricas como forma alternativa à calibração experimental;
- 1982: Flaman introduziu um método de corte com velocidades elevadas através de fresas com alta velocidade de rotação. Esta metodologia buscava influenciar o mínimo possível nas medições das deformações;
- 1994: Zhu e Smith desenvolveram uma análise teórica que permitiu a aplicação da técnica em superfícies curvas;
- 1994: Schajer e Yang desenvolveram uma forma de aplicar o método em materiais de anisotropia elástica como compósitos reforçados com fibras;
- 1995: Tootonian e Schajer propuseram que o furo fosse efetuado com aumento progressivo do diâmetro para aumentar a sensibilidade na medição das deformações;
- 1997: Tootonian e Schajer apresentaram uma roseta com 6 extensômetros que tornaria possível a medição das deformações radiais e tangenciais.

Princípio da Técnica do Furo Central

A medição das tensões residuais em um ponto baseia-se no princípio de que as tensões normais e cisalhantes em qualquer superfície livre ou plano são zero (Figura 22). A abertura de um furo, mesmo que de pequenas dimensões, em uma região na qual exista um campo de tensões, provoca um alívio de deformações em sua vizinhança. Conhecendo-se este alívio e a partir das equações de elasticidade que relacionam tensões e deformações, é possível determinar as tensões residuais existentes antes do furo. A teoria da elasticidade aplicada ao caso mais simples, que é o de uma placa fina sujeita a um estado plano de tensões, permite que na ausência de deformações plásticas nas imediações do furo se obtenha uma solução analítica (SANTOS, 1995; BEANEY&PROCTER, 1973).

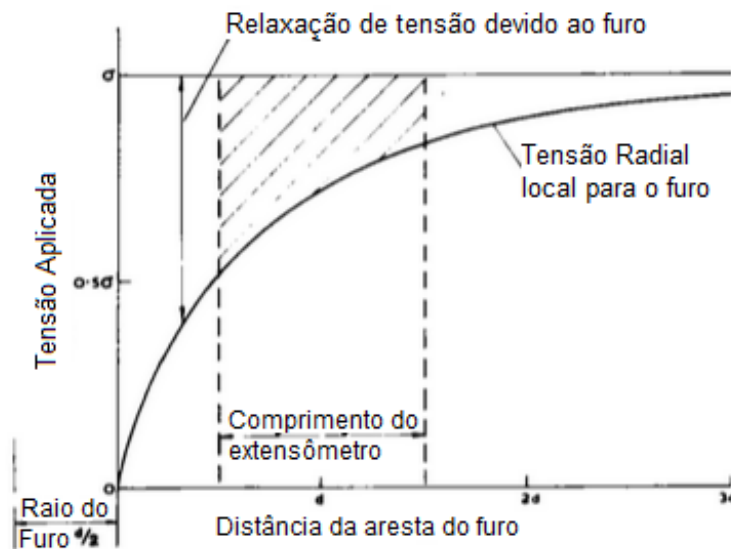


Figura 22: Variação da tensão radial a partir da borda do furo (BEANEY&PROCTER, 1973).

A placa da figura 23 está submetida a um campo uniforme de tensões σ_x .

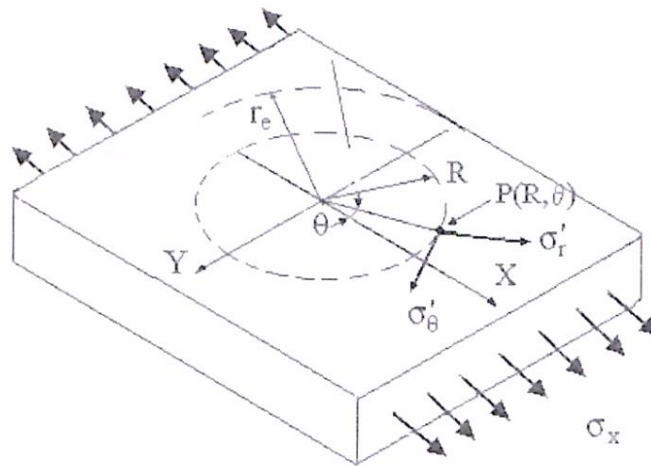


Figura 23: Placa com um furo sujeita a um estado plano de tensões.
(SALAZAR, 2008).

O estado de tensões em qualquer ponto P definido através de coordenadas polares (R, θ) antes da usinagem do furo é:

$$\sigma'_r = \frac{\sigma_x}{2}(1 + \cos 2\theta) \quad (\text{Eq.1})$$

$$\sigma'_\theta = \frac{\sigma_x}{2}(1 - \cos 2\theta) \quad (\text{Eq.2})$$

$$\tau'_{r\theta} = -\frac{\sigma_x}{2} \sin 2\theta \quad (\text{Eq.3})$$

A usinagem de um furo passante de raio r altera o estado de tensões, pois σ'_r e $\tau'_{r\theta}$ devem ser nulas na superfície do furo (SANTOS, 1995).

Kirsch (1898) propôs uma solução na qual considera que o material é isotrópico e linearmente elástico. O novo estado de tensões em um ponto P (R, θ) em relação a um furo de raio r é:

$$\sigma''_r = \frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3r^4}{R^4} - \frac{4r^2}{R^2} \right) \cos 2\theta \quad (\text{Eq.4})$$

$$\sigma''_\theta = \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{r^2}{R^2} \right) - \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3r^4}{R^4} \right) \cos 2\theta \quad (\text{Eq.5})$$

$$\tau''_{r\theta} = -\frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{3r^4}{R^4} + \frac{2r^2}{R^2} \right) \sin 2\theta \quad (\text{Eq.6})$$

Subtraindo as tensões iniciais (σ'_r , σ'_θ e $\tau'_{r\theta}$) pelas finais (σ''_r , σ''_θ e $\tau''_{r\theta}$) tem-se a variação da tensão no ponto ou a relaxação da tensão devido ao furo realizado:

$$\Delta\sigma_r = \sigma''_r - \sigma'_r \quad (\text{Eq.7})$$

$$\Delta\sigma_\theta = \sigma''_\theta - \sigma'_\theta \quad (\text{Eq.8})$$

$$\Delta\tau_{r\theta} = \tau''_{r\theta} - \tau'_{r\theta} \quad (\text{Eq.9})$$

Substituindo as equações 1, 2 e 3 e 4, 5 e 6 nas equações 7, 8 e 9, obtém-se as equações gerais para as tensões aliviadas.

Com as considerações de Kirsch sobre a linearidade elástica do material e sua propriedade isotrópica e aplicando a Lei de Hooke, obtém-se as expressões para a deformação radial (ε_r) e tangencial (ε_θ), onde μ é o coeficiente de Poisson:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_\theta) \quad (\text{Eq.10})$$

$$\varepsilon_r = -\frac{\sigma_x(1+\mu)}{2E} \left[\frac{r^2}{R^2} - \frac{3r^4}{R^4} \cos 2\theta + \frac{4r^2}{R^2(1+\mu)} \cos 2\theta \right] \quad (\text{Eq.11})$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \mu\sigma_r) \quad (\text{Eq.12})$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\sigma_x(1+\mu)}{2E} \left[-\frac{r^2}{R^2} + \frac{3r^4}{R^4} \cos 2\theta - \frac{4\mu r^2}{R^2(1+\mu)} \cos 2\theta \right] \quad (\text{Eq.13})$$

Ajustando as equações 11 e 13 obtém-se:

$$\varepsilon_r = \sigma_x(A + B \cos 2\theta) \quad (\text{Eq.14})$$

$$\varepsilon_\theta = \sigma_x(-A + C \cos 2\theta) \quad (\text{Eq.15})$$

Nas equações 14 e 15 as constantes A, B e C são denominadas coeficientes de alívio ou constantes de calibração que dependem das propriedades elásticas do material e da razão entre a distância radial do ponto de medida (R) e o raio do furo (r). Comparando as equações 10, 11 e 14 além de 12, 13 e 15, tem-se:

$$A = -\frac{1+\mu}{2E} \left(\frac{r^2}{R^2} \right) \quad (\text{Eq.16})$$

$$B = -\frac{1+\mu}{2E} \left[\left(\frac{4}{1+\mu} \right) \frac{r^2}{R^2} - \frac{3r^4}{R^4} \right] \quad (\text{Eq.17})$$

$$C = -\frac{1+\mu}{2E} \left[-\left(\frac{4\mu}{1+\mu} \right) \frac{r^2}{R^2} + \frac{3r^4}{R^4} \right] \quad (\text{Eq.18})$$

As constantes A, B e C mostradas acima possuem sinal negativo, pois as deformações relaxadas têm sinal inverso às tensões residuais iniciais.

A relação entre deformação aliviada e a distância ao centro do furo em um estado uniaxial de tensões é mostrada através da figura 24:

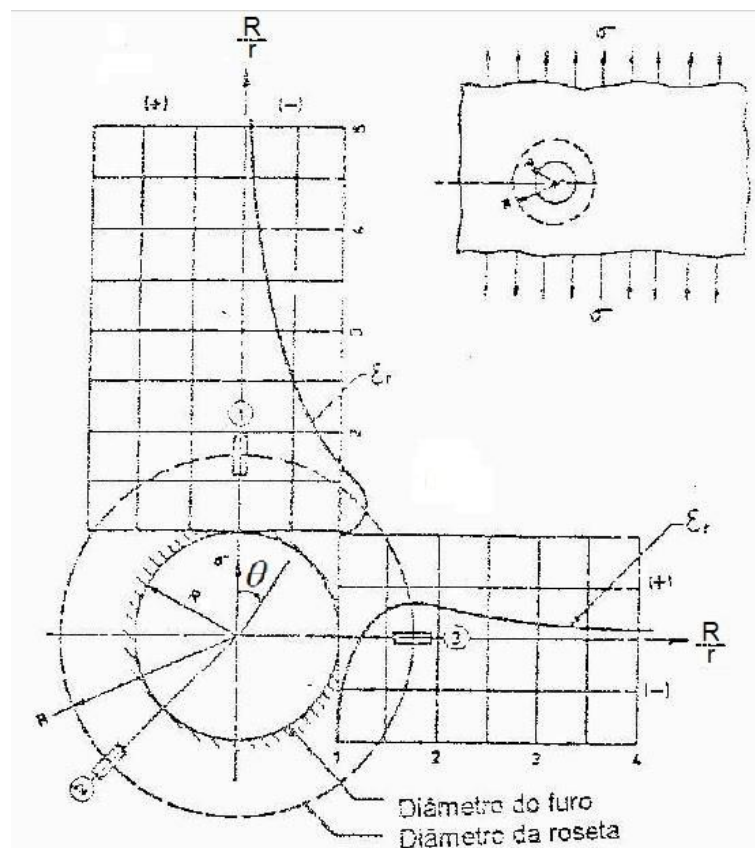


Figura 24: Relação entre deformação aliviada e distancia ao furo em um estado uniaxial de tensões. (SANTOS, 1995).

No caso de um estado de tensões planas (biaxial) a solução é obtida a partir do princípio da superposição, que novamente é aplicável a materiais de comportamento elástico linear. Dessa forma, considerando que as tensões agem simultaneamente, tem-se:

$$\varepsilon_r = \sigma_x(A + B\cos 2\theta) + \sigma_y(A - B\cos 2\theta) \quad (\text{Eq.19})$$

Ou

$$\varepsilon_r = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta \quad (\text{Eq.20})$$

Como é possível verificar na equação 20, existem três incógnitas e, portanto são necessárias três medições independentes para calcular as tensões principais (σ_x e σ_y) e a direção (θ) (BADESHIA&WITHERS, 2001).

O procedimento mais utilizado consiste em montar 3 *strain gages* em forma de roseta separados entre si por um ângulo de 45°.

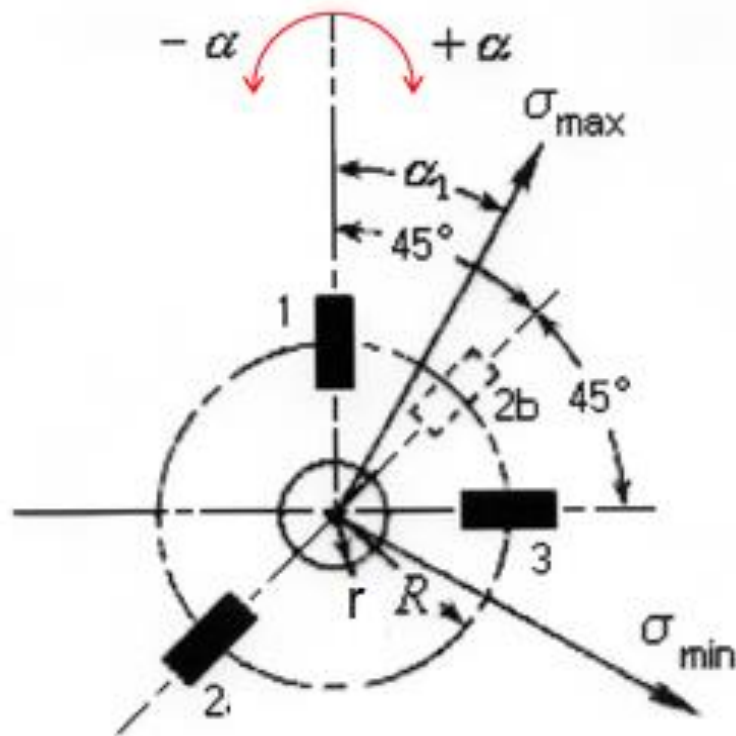


Figura 25: Esquema de posicionamento dos *strain gages* na roseta (SANTOS, 1995).

Na Figura 25, α é o ângulo agudo do eixo principal em relação ao *strain gage* 1, $\alpha_2 = \alpha + 45^\circ$ e $\alpha_3 = \alpha + 90^\circ$, com ângulos positivos no sentido horário.

A equação 20 pode agora ser reescrita com $\Theta = \alpha$ para cada um dos *strain gages* da roseta.

$$\varepsilon_1 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\alpha \quad (\text{Eq.21})$$

$$\varepsilon_2 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2(\alpha + 45^\circ) \quad (\text{Eq.22})$$

$$\varepsilon_3 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2(\alpha + 90^\circ) \quad (\text{Eq.23})$$

Resolvendo de maneira geral para σ_{\max} , σ_{\min} e α tem-se:

$$\sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (\text{Eq.24})$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (\text{Eq.25})$$

$$\text{tg } 2\alpha = \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \quad (\text{Eq.26})$$

Quando o numerador e o denominador da equação 26 são nulos tem-se um estado biaxial de tensões iguais (hidrostático) em que α deixa de ser significativo (SALAZAR, 2008).

Furo Cego

As equações apresentadas até agora foram deduzidas para furos passantes em placas finas. Como na prática observa-se que a necessidade de medição de tensões residuais ocorre em componentes das mais variadas geometrias necessitou-se desenvolver um método de aplicações mais gerais, que utiliza furos cegos, conforme mostrado na figura 26.

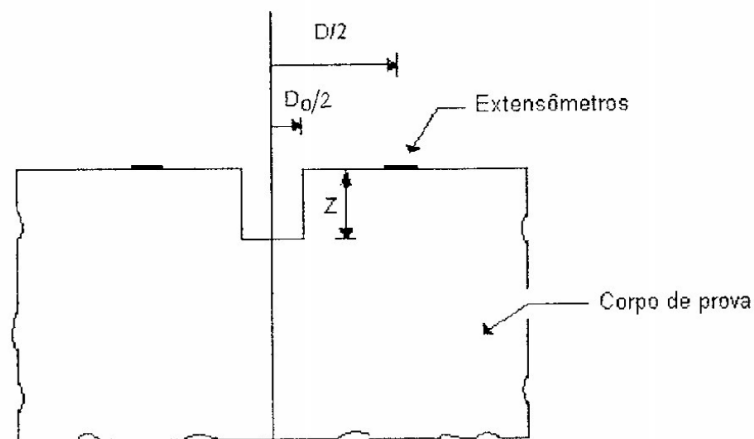


Figura 26: Configuração de um furo cego em um corpo de prova. (SANTOS, 1995).

A introdução de um furo cego em um campo plano de tensões produz um estado complexo de tensões. Por isso não existe uma solução analítica no campo da teoria da elasticidade. Rendler&Vigness (1966) demonstraram que a relaxação da deformação tanto em um furo passante quanto em um furo cego varia de forma senoidal em torno do círculo concêntrico com o furo. Isso significa que, embora as constantes A e B na equação 20 sejam diferentes para o caso de furo cego, esta equação continua válida. Neste caso, os valores das constantes A e B podem ser obtidos via calibração experimental utilizando-se campos de tensão definidos ou ainda análise numérica por elementos finitos.

Quanto à profundidade do furo, ela deve obedecer a relação $Z \geq D_0 \times 0,4$ de forma a maximizar o sinal.

Campo Uniforme e Campo não Uniforme

A metodologia descrita até aqui considera que as tensões que serão medidas possuem um comportamento uniforme ao longo do furo, seja cego ou passante. Contudo em muitas aplicações de engenharia é necessário considerar que o campo de tensões residuais é não uniforme, principalmente em regiões próximas a superfície (Figura 27).

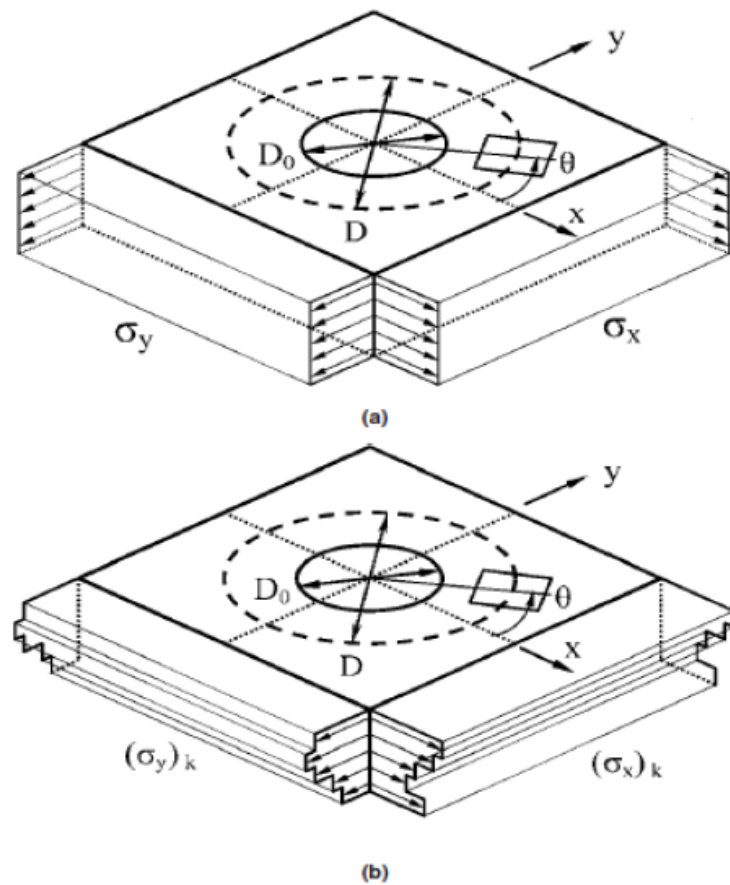


Figura 27: Campo de tensões residuais (a) uniforme e (b) não uniforme (ASTM E837 – 13a).

A medição de tensões não uniformes em profundidade requer que o furo seja feito de forma incremental até uma profundidade específica, determinada em função do diâmetro do furo (Figura 28). Portanto, para avaliar as tensões do tipo não uniformes, é necessário que o furo seja feito por etapas e a cada uma delas seja verificado como o campo de deformações superficiais (planas) responde a essa relaxação.

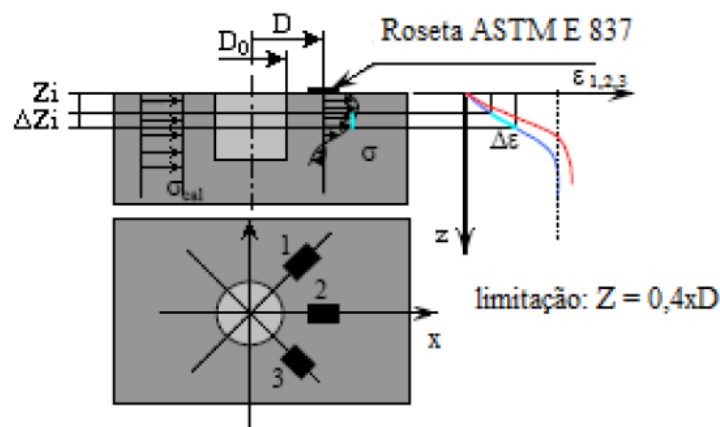


Figura 28: Princípio da técnica do furo incremental (ASTM E837 – 13a).

A norma ASTM E837 – 13a especifica um procedimento para verificar se o campo de tensões é ou não uniforme e, dessa maneira, como serão conduzidos os cálculos posteriores a depender da classificação do campo de tensões ao longo do furo.

Para as tensões não uniformes, existem essencialmente quatro métodos de cálculo:

- Método Integral;
- Método de Série de potências;
- Método da Deformação Incremental;
- Método da Tensão Média.

Cada um dos métodos acima é aplicado para casos específicos e possuem seus respectivos desvios e limitações característicos.

O método mais utilizado atualmente é o Método Integral que, inclusive, é o utilizado na norma ASTM E837 – 13a. Nele, assume-se que a deformação relaxada na superfície do material da peça furada é o resultado do acúmulo de tensões residuais originalmente existentes na zona de cada incremento sucessivo, ao longo da profundidade do furo. Este é um híbrido, que leva em consideração coeficientes de sensibilidade ao relaxamento do material baseados em análises via elementos finitos e o cálculo do estado de tensões com o uso de rosetas extensométricas.

Através deste método não é possível obter medidas de tensões residuais em profundidades menores que 0,1 mm da superfície da peça. Caso seja necessário obter os valores de tensão residuais nessa região limite, é necessário utilizar outra técnica, como por exemplo difração de raio-x (BADESHIA&WITHERS, 2001; SALAZAR, 2008).

Outra limitação quanto ao uso da técnica do furo incremental é a ocorrência do efeito de plastificação, que ocorre quando as tensões residuais induzem a deformações plásticas localizadas devido ao fator de concentração de tensões em torno do furo (SALAZAR, 2008).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir deste estudo foi possível um melhor entendimento a respeito de um dos principais mecanismos de dano que ocorrem em centrais nucleares e diversas outras indústrias como óleo e gás e alimentícia. A corrosão sob tensão em soldas dissimilares de aço ao carbono e aço inoxidável austenítico é facilitada pela presença de tensões residuais trativas na superfície. A CST é observada com maior frequência nos metais de adição de ligas de níquel. A possibilidade de redução nas tensões residuais trativas ou mesmo a introdução de tensões residuais compressivas na superfície susceptível é uma das formas de mitigação e controle do dano.

A técnica do Furo Central pode ser utilizada para avaliar a eficácia de medidas de redução das tensões residuais como tratamentos térmicos e soldas do tipo *weld overlay*.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGEN, G.; AKSTENS, F.W.; ALLEN, C.M.; AVERY, H.S.; BABU, P.; BAYER, A.M.; BELLO, F.; BHAT, S.P. AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL. ASM Handbook: Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering. USA: ASM International. 1998.

ALEXANDREANU, B., CHEN, Y., CHOPRA, K.O., CHUNG, M.H., GRUBER, E.E., SOPPET, K.W., SHACK, J. W. *Environmentally Assisted Cracking in Light Water Reactors*. Argonne National Laboratory – NUREG/CR-4667. US. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research, March, 2007.

ANDERSON, T.L. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. 3ª ed. Boca Raton: CRC Press, v.1, 2005.

ANDRESEN, P.L.; HICKILNG, J. *Materials Reliability Program: Effects of B/Li/pH on CST Growth Rates in Ni-Base Alloys*. (MRP 217), EPRI, Palo Alto, CA: 1015008, 2007.

ANTUNES, P.C. *Influência do Metal de Adição na Susceptibilidade à Corrosão Sob Tensão de Juntas Soldadas do Aço Inoxidável Ferrítico AISI 444 em Meios contendo Cloreto de Magnésio*. Dissertação (Mestrado em Ciências em Materiais para Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, 2010.

ARIVAZHAGAN, N.; PRABAHARAN, K.; RAMKUMAR, K.D. *Characterization of microstructure and mechanical properties of Super Ni 718 alloy and AISI 316L dissimilar weldments*. Cambridge Journals, p. 3011-3023, 2014.

ASM American Society for Metals - Metals Handbook. In: Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, 2003, v.13A.

ASTM-E-837 *Standard Test Method for Determining Residual Stress by the Hole-Drilling Strain-gage Method*, 2013

BEANEY, E.M.; PROCTER, E. *A critical evaluation of the center hole technique for the measurement of residual stress*. Strain 7-14,52, 1974.

BEZERRA, A.C. *Simulação Numérica da Soldagem com Aplicação à Caracterização do Comportamento Dinâmico de Estruturas Soldadas*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

BHADESHIA, H.K.D.H; WITHERS, P.J. *Residual Stress Part 1 – Measurement Techniques*. Material and Science Technology v. 17, p. 355-365, 2001.

BHADESHIA, H.K.D.H; WITHERS, P.J. *Residual Stress Part 2 – Nature and Origins*. Material and Science Technology v. 17, p. 366-375, 2001.

CALLE, G.M.A. *Análise Numérico-Computacional das Tensões Residuais Induzidas pelo Jateamento com Granalha*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

CAMPOS, C.V.F.; *SUSCETIBILIDADE À CORROSÃO SOB TENSÃO DOS AÇOS AISI 321 E 347 EM MEIO DE H₂SO₄ + CuSO₄*. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Ceará, 2003.

CARLESH, L.P. *Medição de Tensões Residuais em Junta Soldada com Materiais Dissimilares por meio do Ruído Magnético 'Barkhausen'*. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 2010.

COSTA, A.D.S.B. *Análise de Tensões Residuais em Tubulações Soldadas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Ceará, 2007.

COSTA, S.A.R. *Estudo Sobre a Corrosão dos Aços DIN 1.4404 e DIN 1.4410 em Soluções Cloretos*. Dissertação (Mestrado em Química Tecnológica) – Universidade de Lisboa, 2010.

DONATO, G.H.B. *Efeitos de Heterogeneidades Mecânicas sobre Forças Motrizes de Trinca em Juntas Soldadas: Determinação Experimental de Tenacidade e Extensão de Metodologias de Avaliação de Criticidade de Defeitos*. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

EPRI NP-7103-D. *Justification for Extended Weld Overlay Design Life*. EPRI - Electric Power Research Institute, Topical Report, San Jose, California, USA, Jan. 1991.

FINDLAN, S. *Materials Reliability Program: Suitability of Emerging Technologies for Mitigation of PWSCC (MRP-118)*. EPRI, Palo Alto, CA, 2007.

FERNANDES, J.C. *Desenvolvimento de um Dispositivo Tipo Carga Constante para Avaliação da Susceptibilidade à Corrosão Sob Tensão de Aço Inoxidável Austenítico*. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, 2010.

GUIMARÃES, R.M.D. *A Técnica do Furo Incremental na Determinação de Tensões Residuais em Ligas de Alumínio – Efeito da Furação a Alta Velocidade*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física) – Universidade de Coimbra, 2012.

HITACHI. *Advanced IHSI Technology*. Disponível em <http://www.hitachi.com/rd/portal/story/power_material_systems/>. Acesso em 11/02/2014.

KIM, J.S.; KIM, Y.J.; LEE, K.S.; OHA, C.Y.; PARK, C.Y.; SONG, T.K. *The Safe-End Length Effect On Welding Residual Stresses In Dissimilar Metal Welds Of Surge Nozzles*. Elsevier – Engineering Fracture Mechanics. Vol 78, p. 1957-1975, 2011.

KING, C. *Materials Reliability Program: Primary System Piping Butt Weld Inspection and Evaluation Guidelines*. (MRP-139). EPRI, Palo Alto, CA: 1010087, 2005.

LAVOR, P.R.U. *Influência das Tensões Internas Resultantes da Aplicação do 'Shot Peening' na Liga Ti 6Al 4V*. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2011.

LAW, M.; LUZIN, V.; GNAEUPEL-HEROLD, T.; PRASK, H. *Residual stress measurements in coil, linepipe and girth welded pipe*. Elsevier – Material Science and Engineering. Vol A437, p. 60-63, 2006.

LIMA, L.I.L. *Influência da Concentração de Hidrogênio na Suscetibilidade à Corrosão Sob Tensão de Junta Soldada com Metais Dissimilares em Ambiente do Circuito Primário de Reator Nuclear*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

MELO, A.P.B. *Avaliação de Tensões Residuais na Operação de Cunhagem em um Componente Automotivo Estampado*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João Del Rei, 2014.

MIRIM, D.C. *Investigação da Tensão Residual na Soldagem Laser entre o Aço Carbono AISI 1010 e o Aço Inoxidável AISI 304*. Dissertação (Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2011.

MITEVA, R.; TAYLOR, N.G. *General Review of Dissimilar Metal Welds in Piping Systems of Pressurized Water Reactors, Including WWER Designs*. European Commission DG-JRC/IE, Petten, Netherlands, EUR 22469 EN, 2006.

MODENESI, Paulo J. *Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico*. Notas de aula, 2001. Universidade Federal de Minas Gerais, Dezembro, 2001. Disponível em: <<http://www.iem.unifei.edu.br/professores/edmilson/tensaoresidual.pdf>>. Acesso em 05 Fev. 2013.

RENDLER N.J.; VIGNESS, I. *Hole-Drilling Strain-Gage Method of Measuring Residual Stress*. Experimental Mechanics. Vol 1 Number 12 p. 577-586, 1966.

SALAZAR, C.E.V. *Avaliação através da inspeção magnética da condição superficial de anéis de rolamento de aço DIN 100Cr6 após torneamento duro a seco*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

SANTOS, F.A. *Determinação Experimental de Tensões Residuais em Perfis de Aço Soldados*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1995.

SATLER, L.F.F; *Estudo Numérico para Avaliação da Técnica Weld Overlay em um Bocal contendo Soldas Dissimilares da Indústria Nuclear*. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 2014.

SCOTT, P.; MEUNIER, M-C. *Materials Reliability Program: Review of Stress Corrosion Cracking of Alloys 182 and 82 in PWR Primary Water Service (MRP-220)*. EPRI, Palo Alto, CA: 1015427, 2007.

SOARES, A.C.C. *Avaliação dos Efeitos da Plasticidade na Medição de Tensões Residuais pela Técnica do Furo Cego*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2003.

SOARES, M.C.B.V. *Influência das Tensões Residuais no Comportamento em Fadiga e Fratura de Ligas Metálicas*. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 1998.

SOUSA, D.A. *Determinação de Tensões Residuais em Materiais Metálicos por meio de Ensaio de Dureza*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João Del Rey, 2012.

ZEEMANN, A. *Tensões Residuais de Soldagem*. 2003. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/metal/tenses-residuais-na-soldagem.pdf>>. Acesso em 11 Fev. 2015.