

**Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Mecânica**

**RONALDO COSTA GONÇAVES
JOÃO PAULO COSTA MACHADO**

ALÍVIO DE TENSÕES APÓS SOLDAGEM

**BELO HORIZONTE
SETEMBRO - 2015**

RONALDO COSTA GONÇALVES
JOÃO PAULO COSTA MACHADO

ALÍVIO DE TENSÕES APÓS SOLDAGEM

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 da Soldagem

Área de Concentração: Engenharia de Soldagem

Orientador: Prof. Dr. Paulo José Modenesi

BELO HORIZONTE
SETEMBRO - 2015

G635a

Gonçalves, Ronaldo Costa.

Alívio de tensões após soldagem [manuscrito] / Ronaldo Costa
Gonçalves, João Paulo Costa Machado. - 2015.
73 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 a obtenção do título de Especialista em Soldagem.

Bibliografia: f. 70-73.

1. Soldagem. 2. Vibração. 3. Tensões residuais. I. Machado, João
Paulo Costa. II. Modenesi, Paulo José. III. Universidade Federal de Minas
Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.791.7



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

Ata 6ª/2015 da Defesa de Monografia de Especialização

No dia **11 de setembro de 2015**, às 14:00h, a Comissão Examinadora se reuniu para avaliar o trabalho:

Título: "Alívio de Tensões Após Soldagem"

Aluno: Ronaldo Costa Gonçalves – Matrícula: 2013678589

Local: Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação – LRSS, Depto. Eng^a Mecânica – Prédio da EEUFMG Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus da UFMG, Pampulha – Belo Horizonte.

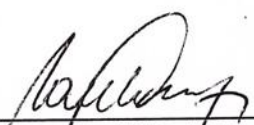
Parecer:

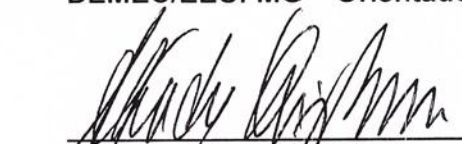
A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo(a) candidato(a) durante 25 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 50 minutos, é de parecer favorável à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de 70,0 e COM (com ou sem) sugestões de modificação.

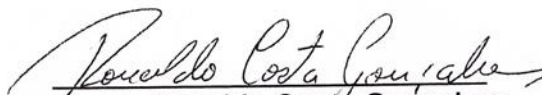
Sugere-se o prazo de 30 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada pelo Prof. Paulo Modenesi e homologada pelo orientador.

Assinaturas:


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


Prof. Dr. Paulo Villani Marques
DEMEC/UFMG – Avaliador


Prof. Dr. Alexandre Q. Bracarense
DEMEC/UFMG – Avaliador


Aluno: Ronaldo Costa Gonçalves



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

Ata 5ª/2015 da Defesa de Monografia de Especialização

No dia **11 de setembro de 2015**, às 14:00h, a Comissão Examinadora se reuniu para avaliar o trabalho:

Título: "Alívio de Tensões Após Soldagem"

Aluno: João Paulo Costa Machado – Matrícula: 2013687014

Local: Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação – LRSS, Depto. Eng^a Mecânica – Prédio da EEUFMG Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus da UFMG, Pampulha – Belo Horizonte.

Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo(a) candidato(a) durante 25 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 50 minutos, é de parecer favorável à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de 70 e com (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 Modenesi e homologada pelo orientador.

Assinaturas:

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

Prof. Dr. Alexandre Q. Bracarense
DEMEC/UFMG – Avaliador

Prof. Dr. Paulo Villani Marques
DEMEC/UFMG – Avaliador

Aluno: João Paulo Costa Machado

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus primeiramente, por ter proporcionado a oportunidade de participarmos e chegarmos na etapa final desse curso.

Aos familiares, aos professores, instrutores, aos alunos da primeira turma do Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem oferecido pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em parceria com a Associação Brasileira de Soldagem (ABS) e o International Institute of Welding (IIW).

Aos ministrantes do curso, em especialmente aos doutores, Alexandre Queiroz Bracarense, Paulo José Modenesi, Paulo Villani Marques, e Cícero Murta Diniz Starling.

Ao nosso orientador Dr. Paulo José Modenesi, pela disposição e dedicação nas orientações e informações necessárias para conseguirmos a concretização do trabalho realizado nessa monografia.

Fazemos um agradecimento especial a Srta. Priscilla Rayanne P. R. Pacheco por toda dedicação, atenção e carinho a todos alunos da turma.

“ Um pouco de ciência nos afasta de Deus. Muita, nos aproxima ”

LOUIS PASTEUR

***“ Quando uma criatura humana desperta para um grande sonho e sobre ele
lança toda a força de sua alma...***

Todo o universo conspira a seu favor! ”

GOETHE

RESUMO

A soldagem é um dos principais processos de união de materiais metálicos. Contudo, ela envolve aspectos e alterações físicas diferentes que afetam o desempenho das peças unidas. Com o desenvolvimento dos materiais, as técnicas e processos de soldagem também foram se desenvolvendo, com objetivo de melhoria na produtividade e principalmente na qualidade do produto final. Apesar do desenvolvimento em busca do melhor desempenho ainda existem problemas relacionados à execução da solda. Durante e após a soldagem a arco elétrico de uma estrutura ou peça podem ocorrer tensões residuais e distorções, principalmente devido ao calor fornecido à peça de forma concentrada, causando variações localizadas de temperaturas em conjunto com as restrições à expansão e contração térmicas. Existem processos térmicos e mecânicos para alívio de tensões como, por exemplo, o Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT) e o processo de vibrações mecânicas. Distorções também podem ser previstas, controladas e corrigidas. Por exemplo, durante a fase de elaboração do projeto pode-se tomar atitudes de redução de calor fornecido à peça, selecionando chanfros simétricos e processos de soldagem. Normas e códigos internacionais foram criados para melhor direcionar a indústria metal mecânica de transformação na concepção de projetos e tratamentos térmicos em equipamentos e estruturas soldadas. O estudo a seguir tem o objetivo de promover o melhor entendimento sobre as causas das tensões residuais e distorções após a soldagem e os diferentes tratamentos térmicos e mecânicos para alívio de tensões aplicados em uma estrutura soldada.

Palavras-chave: Soldagem. Tensões residuais. Distorções. Tratamento térmico. Alívio de tensões. Vibrações mecânicas.

ABSTRACT

The welding is one of the major joining processes of metallic materials. However, it causes macro and microstructural changes that affect the performance of the welded parts. Welding processes and techniques have been developed together with the development of the materials aiming to improving productivity and the quality of the final product. Despite this development there are still problems related to welding implementation. Residual stresses and distortion are formed during and after arc welding of a structure or component due to the concentrated heating of the joint. This causes localized temperature variations with the associated expansion and contraction of the metal in the weld region. These changes are restricted by the colder metal of the parts resulting in plastic deformation, residual stresses and distortion. Thermal and mechanical stress relief can be performed after welding, for instance by heat treatment (PWHT) and mechanical vibrations. Distortion can also be expected, controlled and corrected. For example, during the design phase, lower welding heat input may be specified, symmetrical grooves and more efficient welding processes may be selected. International codes and standards were created to direct the mechanical metal processing industry to sounder procedures from the design to the application of thermal treatment in welded equipment and structures. The present study aims to promote better understanding of the causes of residual stresses and distortion after welding and the different heat and mechanical treatments for residual stress relief of a welded structure.

Keywords: welding. Residual stresses. Distortions. Heat treatment. Relief of tension. Mechanical vibration.

LISTA DE FIGURAS

FIG. 1 – Processos de soldagem e afins segundo a AWS.....	21
FIG. 2 – Cordão de solda executada pelo processo GMAW.....	21
FIG. 3 – Solda sendo executada pelo processo FCAW.....	22
FIG. 4 – Fluxo geral de calor na soldagem por fusão.....	22
FIG. 5 – Seção transversal de uma solda obtida com soldagem a arco elétrico.....	23
FIG. 6 – Representação esquemática de uma peça de um metal puro indicando os diferentes níveis estruturais.....	24
FIG. 7 – Tratamentos térmicos mais usuais após a soldagem.....	29
FIG. 8 – Gráfico representativo do Tratamento de Alívio de Tensões.....	32
FIG. 9a – Distorção térmica numa estrutura devido aquecimento por radiação solar.....	33
FIG. 9b – Tensões residuais devido à soldagem.....	33
FIG. 10 – Conjunto de barras presas nas extremidades.....	34
FIG. 11 – Barra central sendo aquecida.....	34
FIG. 12 – Variação das tensões durante o aquecimento	35
FIG. 13 – Variação das tensões: aquecimento e resfriamento.....	36
FIG. 14a – Tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras	37
FIG. 14b – Tensões residuais longitudinais formadas ao longo da direção transversal de uma solda de topo por fusão.....	37
FIG. 15 – As alterações de temperatura e tensões durante a soldagem.....	38
FIG. 16 – Tensões residuais podem ser classificadas de acordo com escalas de comprimento característico.....	40
FIG. 17 - Distorções em soldagem.....	43
FIG. 18 - Redução da distorção angular, reduzindo o volume de metal de solda e usando um passe de solda penetração total.....	44
FIG. 19 - A redução da distorção angular usando chanfro em duplo “V” e soldagem alternada de cada lado da junta.....	45
FIG. 20 - A redução da distorção, colocando soldas no eixo neutro.....	45
FIG. 21 - Métodos para controlar a distorção de solda.....	46
FIG. 22 - Aquecimento localizado.....	47

FIG. 23 - Forno para aquecimento uniforme juntamente com esforços mecânicos.....	47
FIG. 24 - Utilização da técnica de ressoldagem como correção de distorções.....	48
FIG. 25 - Calandra. Equipamento para regularizar superfície de chapas.....	48
FIG. 26 - Prensagem. Método utilizado para conformação mecânica e empenamentos.....	48
FIG. 27 - Martelamento. Método para correção de distorções.....	49
FIG. 28 - Caso prático para estimativa de contração transversal.....	50
FIG. 29 - Fadiga por carregamento cíclico (superior) e formação de intrusões e extrusões (parte inferior)	52
FIG. 30 - Fadiga de superfície mostrando extrusões e intrusões.....	52
FIG. 31 - Superfície de fratura de fadiga mostrando marcas de praia e origem da fratura.....	53
FIG. 32 - Gráfico da curva S-N.....	54
FIG. 33 - Gráfico TT para o Tratamento Térmico de Alívio de Tensões.....	57
FIG. 34 - Formulário de Procedimento de Tratamento Térmico.....	61
FIG. 35 - Forno para tratamento térmico.....	62
FIG. 36 - Pórtico de uma máquina (comprimento 18m) configuração para o tratamento VR.....	65
FIG. 37 - Equipamento fórmula 62.....	66
FIG. 38 - Importância de tensões residuais e distorção na concepção e fabricação de estruturas soldadas.....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Exemplos de propriedades de alguns metais.....	23
Quadro 2 – Representação de algumas técnicas indicando profundidades de medição.....	41
Quadro 3 – Técnicas para a determinação experimental de tensões residuais.....	42
Quadro 4 - Lista de materiais com classificação conforme a ASME.....	58
Quadro 5 - Parte da Tabela UCS-56-1 da ASME.....	59
Quadro 6 - Quadro com temperaturas de aquecimento, resfriamento e de patamar.....	59

LISTA DE SIGLAS

TTAT – *Tratamento Térmico de Alívio de Tensões*

AWS - *American Welding Society*

GMAW - *Gas Metal Arc Welding*

FCAW - *Flux Cored Arc Welding*

PAW – *Plasma Arc Welding*

ZF – *Zona Fundida*

MB – *Metal de Base*

ZTA – *Zona Termicamente Afetada*

PF – *Poça de Fusão*

ZAC – *Zona Afetada pelo Calor*

LR – *Limite de Ruptura*

ASME – *American Society of Mechanical Engineers*

BS – *British Standard*

IIW – *International Institute of Welding*

PWHT – *Postweld Heat Treatment*

VR – *Vibração Ressonante*

GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding*

SMAW - *Shielded Metal Arc Welding*

LISTA DE SÍMBOLOS

°C - Graus Celsius

°F – Fahrenheit

% - Percentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Objetivos	19
1.1.1	Objetivo Geral.....	19
1.1.2	Objetivos Específicos.....	19
1.2	Justificativa.....	19
2	DESENVOLVIMENTO.....	20
2.1	Soldagem.....	20
2.2	Soldagem por fusão.....	21
2.3	Soldagem a arco elétrico.....	22
2.4	Propriedades de materiais metálicos e influência de suas ligas.....	23
2.5	Tratamentos térmicos.....	28
2.5.1	Recozimento.....	29
2.5.2	Revenimento.....	29
2.5.3	Solubilização.....	30
2.5.4	Têmpera.....	30
2.5.5	Normalização	30
2.5.6	Pré-aquecimento.....	30
2.5.7	Pós-aquecimento.....	31
2.5.8	Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT).....	31
2.6	Tensões residuais.....	32
2.6.1	Desenvolvimento das tensões residuais em soldagem.....	33
2.6.2	Classificação das tensões residuais.....	39
2.6.3	Medição de tensões residuais em soldagem.....	40
2.7	Distorções em soldagem.....	42
2.7.1	Desenvolvimento das distorções.....	42
2.7.2	Como reduzir e minimizar distorções em soldagem.....	43
2.8	Fadiga.....	51
2.8.1	Mecanismos de falhas por fadiga.....	51
2.8.2	Curvas S-N.....	53
2.8.3	Fatores que influenciam a resistência à fadiga.....	54
2.8.4	A resistência à fadiga pode ser melhorada.....	55

2.9	Corrosão sob tensão.....	56
2.10	Alívio de tensões após a soldagem.....	56
2.10.1	Processos térmicos para alívio de tensões.....	56
2.10.1.1	Alívio de tensões a baixas temperaturas.....	62
2.10.1.2	Recozimento a alta temperatura.....	62
2.10.2	Processos mecânicos para alívio de tensões.....	63
2.10.2.1	Martelamento (Hammer Peening).....	63
2.10.2.2	Encruamento.....	63
2.10.2.3	Dressagem ou adoçamento.....	63
2.10.2.4	Alívio de tensões por vibração.....	64
2.11	A importância das tensões residuais e distorções para elaboração de projetos e na fabricação de estruturas soldadas.....	66
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
4	REFERÊNCIAS.....	70

1. INTRODUÇÃO

Embora não pareça, a soldagem é utilizada desde os tempos mais remotos. Alguns exemplos de peças fabricadas por brasagem com mais de 4.000 anos e soldagem por forjamento com mais de 3.000 anos já foram encontrados.

Desde o seu surgimento vem sendo aperfeiçoados novos processos, materiais e equipamentos. Nos dias atuais, a soldagem é o mais importante processo industrial de união de peças metálicas.

Durante e após a soldagem, as estruturas estão sujeitas às tensões residuais e distorções.

Tensões e distorções podem ter várias causas e podem variar de acordo com as características, propriedades dos materiais, dimensões da peça, processo de soldagem aplicado, aquecimento e resfriamento, entre outros. Contudo, elas envolvem aspectos e alterações físicas diferentes que afetam o desempenho das peças unidas. Tensões residuais influenciam substancialmente nas características de resistência mecânica e no funcionamento dos elementos de uma estrutura. Estas e outras tensões desenvolvidas durante a soldagem poderão acarretar vários problemas como a formação de trincas à quente, trincas à frio, falha por fadiga, e corrosão sob tensão.

As tensões residuais podem ocorrer não só devido à soldagem, mas também em outros processos industriais, como por exemplo: laminação de chapas, forjamento, fundição, corte, dobra, usinagem e moagem. Aqui serão discutidas as principais fontes de tensões residuais consideráveis em soldagem, como são geradas, quais suas implicações, como reduzir, como medir e quando devem ser aplicados os métodos de tratamento térmico de alívio de tensões.

Medidas para minimizar o surgimento de tensões residuais e distorções podem ser tomadas antes da execução da soldagem. Por exemplo, na fase de elaboração do projeto, fazer alterações possíveis como: o tamanho do cordão, ângulo do chanfro,

reduzir o calor imposto à peça, sequência de soldagem, selecionar metal de adição com menor resistência mecânica, especificar o uso dispositivos de fixação, entre outros.

Após a soldagem podem ser utilizados processos térmicos e mecânicos para aliviar tensões. Entre os processos térmicos e mecânicos pode-se citar, o Tratamento Térmico de Alívio de tensões (TTAT) e o processo de alívio de tensões por vibrações mecânicas.

Existem tratamentos térmicos que reduzem tensões residuais, mas que alteram as propriedades metalúrgicas do material, por exemplo, no tratamento térmico de recozimento de uma estrutura de aço, que é feito acima da temperatura crítica. Por outro lado, o tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) reduz tensões residuais sem que o material sofra transformação de fase. Neste estudo serão analisados métodos de tratamentos térmicos e controle de tensões residuais e distorções em componentes soldados.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral:

Fazer um estudo sobre tensões residuais, distorções, métodos de tratamento térmico de alívio de tensões, considerando a fabricação de peças metálicas que tenham sofrido algum processo de soldagem a arco elétrico, identificar benefícios da realização do controle e alívio de tensões após a soldagem através de processos térmicos de alívio tensões (TTAT) e tratamentos mecânicos.

1.1.2. Objetivos específicos:

Estudo das origens de tensões residuais e distorções. Descrever os processos térmicos e mecânicos para alívio de tensões após a soldagem, suas características e aplicabilidade.

1.2. Justificativa:

Através do conhecimento mais aprofundado sobre possíveis causas das tensões residuais, distorções e nos processos de tratamentos térmicos e mecânicos de controle e alívio de tensões, ser capaz de identificar medidas preventivas e parâmetros operacionais de soldagem aconselháveis para aplicação em uma determinada estrutura soldada.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Soldagem

Existem várias tentativas de definição de soldagem. Entre algumas definições podem ser destacadas:

“Processo de união de metais por fusão.”

“Operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando na junta a continuidade das propriedades físicas e químicas.”

“Processo de união de materiais usado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição” (definição adotada pela Associação Americana de Soldagem – American Welding Society – AWS).

“Processos de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos.”

Na soldagem de metais, as peças podem ser unidas com ou sem adição de materiais. Este processo de união envolve ligações químicas fortes, principalmente ligações metálicas. No entanto, para ocorrer a união de duas peças metálicas é necessária uma situação em que possa permitir a ligação entre os átomos. As superfícies dos metais mesmo bem polidas apresentam obstáculos que impedem a união só pelo contato. Para superar estes obstáculos, os dois métodos mais utilizados são:

- Processo de soldagem por pressão ou deformação, que consiste em deformar a superfície de contato permitindo a aproximação dos átomos.
- Processo de soldagem por fusão, que consiste na aplicação de calor na região da junta permitindo a fusão localizada do material de base e do metal de adição.

Existem vários processos de soldagem a arco elétrico. A figura abaixo (FIG.1) mostra uma classificação de vários processos de soldagem.

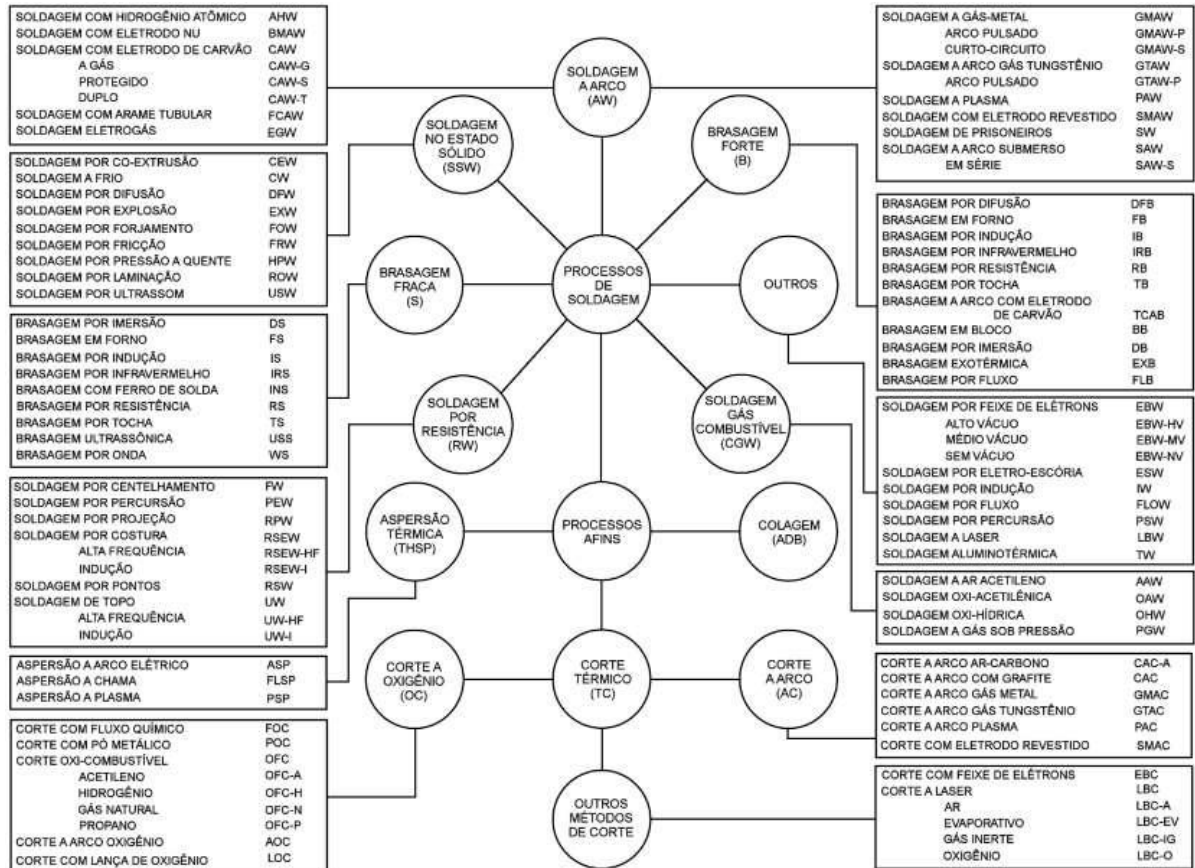


FIG.1 – Processos de soldagem e afins segundo a AWS – American Welding Society

2.2. Soldagem por fusão

A soldagem por fusão é realizada com aplicação da energia de soldagem precisamente no local da peça a ser soldada e após a solidificação do metal fundido as peças estarão unidas (FIG.2 e 3).



FIG.2 – Cordão de solda pelo processo de soldagem GMAW



FIG.3 – Solda sendo executada pelo processo FCAW

2.3. Soldagem a arco elétrico

A fonte de calor mais utilizada na união por fusão de peças metálicas é o arco elétrico de soldagem. O arco elétrico é uma descarga elétrica que é mantida em um gás ionizado em alta temperatura (plasma). Nestas condições ele é capaz de conduzir corrente elétrica entre o eletrodo e a peça a ser soldada (FIG.4), gerando energia térmica suficiente para produzir fusão localizada no local de junção (FIG.5).

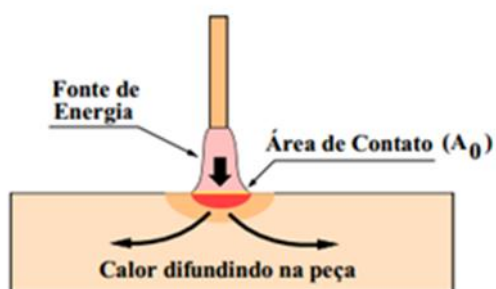


FIG.4 - Fluxo geral de calor na soldagem por fusão (P.J. Modenesi, Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais, 2007, p.4)

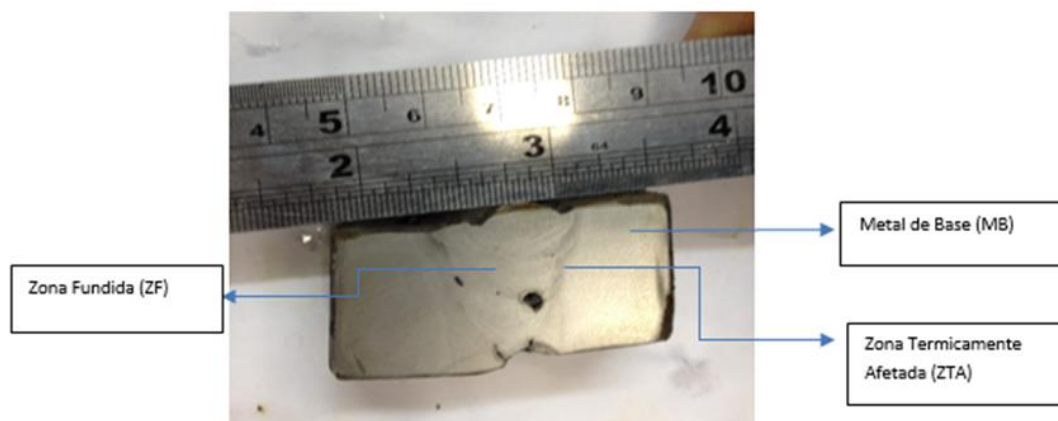


FIG.5 – Seção transversal de uma solda obtida com soldagem a arco elétrico.

2.4. Propriedades de materiais metálicos e influência de suas ligas

Cada metal possui propriedades e características diferentes. Estas propriedades influenciam no comportamento do material durante e após a soldagem (QUADRO 1). Entre estas propriedades, pode se destacar: limite de escoamento, limite de ruptura, módulo de elasticidade, coeficiente de expansão térmica, calor específico, condutividade térmica, ponto de fusão e densidade.

QUADRO 1

Exemplos de propriedades de alguns metais

Material	Propriedades							
	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coef. de Expansão Térmica (1/°C)	Calor Específico J/(g °C)	Condutividade Térmica J/(s cm °C)	Ponto de Fusão (°C)	Densidade (g/cm ³)
Alumínio	35	90	69	$2,4 \times 10^{-5}$	0,897	2,37	660	2,7
Cobre	69	200	110	$1,7 \times 10^{-5}$	0,385	4,01	1084	8,96
Ouro			79	$1,4 \times 10^{-5}$	0,129	3,18	1064	19,3
Ferro	130	262	210	$1,2 \times 10^{-5}$	0,449	0,804	1538	7,87
Platina				$0,9 \times 10^{-5}$	0,133	0,716	1768	21,45
Zinco			98	$6,4 \times 10^{-5}$	0,388	1,16	420	7,13
Prata			72	$1,9 \times 10^{-5}$	0,235	4,29	962	10,5
Titânio	450	520	107	$0,86 \times 10^{-5}$	0,523	0,219	1668	4,54
Aço Carbono	170-290	290-400	195-205	$1,1 \times 10^{-5}$	0,63	0,47	1515	7,8
Aço Inoxidável	240-350	510-580	200	$1,7 \times 10^{-5}$	0,59	0,25	1427	7,9

Fonte: (Apostila MFAB-03 – UFMG, 2014)

Os metais possuem estrutura cristalina que é descrita por um conjunto de átomos que formam uma célula unitária (FIG.6). Uma região do material descrita por uma célula unitária com uma dada orientação espacial define um grão. Entre os grãos forma-se uma região de desordem atômica (contorno de grão).

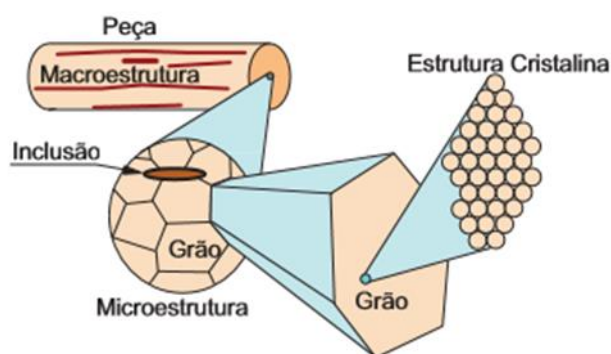


FIG.6 – Representação esquemática de uma peça de um metal puro indicando os diferentes níveis estruturais. (P.J. Modenesi, Introdução à Metalurgia da Soldagem, 2006, p.25)

Através da análise metalográfica, pode-se identificar os grãos, seu formato e tamanho e a presença de outros elementos que caracterizam a microestrutura do material. Durante a soldagem podem ocorrer mudanças na microestrutura dos metais, principalmente na região soldada e na ZTA (Zona Termicamente Afetada).

Existem outros fatores que são determinantes no comportamento de uma estrutura soldada como os parâmetros operacionais usados, temperaturas iniciais e entre passes, taxa de aquecimento e resfriamento, geometria da solda, sequência de soldagem e carregamento.

Metais tais como o cobre, alumínio ou ferro não são em geral, usados na forma pura, mas, sim, ligados, isto é, com a adição de outros metais e de não metais.

Na realidade os metais que são soldados raramente estão no estado puro. As propriedades mais importantes que podem ser melhoradas pela adição de pequenas quantidades de elementos de liga são a dureza, a resistência mecânica, a ductilidade e a resistência à corrosão. Os elementos de liga mais comuns e seus

efeitos nas propriedades dos aços (ligas de Fe com menos de 2% de carbono e outros elementos) são os seguintes:

Carbono (C)

O carbono é o elemento mais eficaz, mais empregado e de menor custo disponível para aumentar a dureza e a resistência dos aços. Uma liga contendo até 2,0% de carbono em combinação com o ferro é denominada aço, enquanto que a combinação com teor de carbono acima de 2,0% é conhecida como ferro fundido. Embora o carbono seja um elemento de liga importante, teores altos desse elemento reduzem a ductilidade e tenacidade; por isso, é necessário um cuidado especial quando se soldam aços de alto teor de carbono e ferro fundido.

Enxofre (S)

O enxofre é normalmente um elemento indesejável no aço porque causa fragilidade. Pode ser deliberadamente adicionado para melhorar a usinabilidade do aço. O enxofre causa a quebra dos cavacos antes que eles se enrolem em longas fitas e obstruam a máquina. Normalmente todo esforço é feito para reduzir o teor de enxofre para o menor nível possível porque ele pode criar dificuldades durante a soldagem.

Manganês (Mn)

O manganês em teores até 1,0% está normalmente presente em todos os aços de baixa liga como agente desoxidante ou dessulfurante. Isso significa que ele prontamente se combina com o oxigênio e o enxofre para neutralizar o efeito indesejável que esses elementos em geral, causam. O manganês também aumenta a resistência à tração e a temperabilidade dos aços.

Cromo (Cr)

O cromo, combinado com o carbono, é um poderoso elemento de liga que aumenta a dureza dos aços. Adicionalmente as suas propriedades de endurecimento, o

cromo aumenta a resistência à corrosão e a resistência do aço a altas temperaturas. É o principal elemento de liga dos aços inoxidáveis.

Níquel (Ni)

A principal propriedade do aço que é melhorada pela presença do níquel é sua ductilidade ou sua tenacidade ao entalhe. A esse respeito é o mais eficaz dos elementos de liga para melhorar a resistência ao impacto do aço a baixas temperaturas. Consumíveis com alto teor de níquel são empregados para soldar os diversos tipos de ferro fundido. São também utilizados combinados com o cromo para dar origem ao grupo denominado como aços inoxidáveis austeníticos.

Molibdênio (Mo)

O molibdênio aumenta fortemente a profundidade de têmpera característica do aço. É muito usado em combinação com o cromo para aumentar a resistência do aço a altas temperaturas. Esse grupo de aços é referido como aços ao cromo-molibdênio.

Silício (Si)

A função mais comum do silício nos aços é como agente desoxidante. Normalmente aumenta a resistência dos aços, mas quantidades excessivas podem reduzir a ductilidade. Em consumíveis de soldagem é algumas vezes adicionado para aumentar a fluidez do metal de solda.

Fósforo (P)

O fósforo é considerado um elemento residual nocivo nos aços porque reduz fortemente sua ductilidade e tenacidade. Normalmente todo esforço é feito para reduzir o teor de fósforo para os menores níveis possíveis. Entretanto, em alguns aços o fósforo é adicionado em quantidades muito pequenas para aumentar sua resistência.

Alumínio (Al)

O alumínio é basicamente empregado como um agente desoxidante dos aços. Ele pode também ser adicionado em quantidades muito pequenas para controlar o tamanho dos grãos.

Cobre (Cu)

O cobre contribui fortemente para aumentar a resistência à corrosão dos aços carbono pelo retardamento da formação de carepa à temperatura ambiente, porém altos teores de cobre podem causar problemas durante a soldagem.

Nióbio (Nb)

O nióbio é empregado em aços inoxidáveis austeníticos como estabilizador de carbonetos. Já que o carbono nos aços inoxidáveis diminui a resistência à corrosão, um dos modos de torná-lo ineficaz é a adição de nióbio, que possui maior afinidade pelo carbono que o cromo, deixando este livre para a proteção contra a corrosão.

Tungstênio (W)

O tungstênio é usado nos aços para dar resistência a altas temperaturas. Ele também forma carbonetos que são extremamente duros e, portanto, possuem excepcional resistência à abrasão.

Vanádio (V)

O vanádio mantém o tamanho de grão pequeno do aço, após tratamento térmico. Ele também ajuda a aumentar a profundidade de têmpera e resiste ao amolecimento dos aços durante os tratamentos térmicos de revenimento.

Nitrogênio (N)

Usualmente é feito todo esforço para eliminar o hidrogênio, o oxigênio e o nitrogênio dos aços porque sua presença causa fragilidade. O nitrogênio tem a capacidade de formar estruturas austeníticas; por isso, é ocasionalmente adicionado aos aços inoxidáveis austeníticos para reduzir a quantidade de níquel necessária e, portanto, os custos de produção desses aços.

2.5. Tratamentos térmicos

Na indústria metal mecânica, a soldagem é um dos principais processos de fabricação. Devido à variedade de processos de soldagem e de materiais, o tratamento térmico é indispensável, porque permite em algumas situações, adequar à microestrutura e propriedades pretendidas e remover ou reduzir tensões residuais que podem afetar negativamente o desempenho da estrutura do componente soldado.

Tratamentos térmicos são operações que envolvem a aplicação de um ciclo térmico controlado ao material. Seus principais objetivos são otimizar a microestrutura de um componente e remover tensões internas decorrentes de resfriamento não uniforme e transformações de fase. Tratamentos térmicos podem aumentar ou diminuir dureza, resistência mecânica, ductilidade, melhorar as condições metalúrgicas da ZTA, resistência ao desgaste, resistência à corrosão, propriedades elétricas e magnéticas do material. As principais variáveis dos tratamentos térmicos são: taxas de aquecimento e resfriamento e patamar (duração e temperatura).

Os principais tratamentos associados às operações de soldagem são recozimento, normalização, têmpera, revenimento, solubilização e alívio de tensões (FIG.7). No gráfico da Figura 7 as linhas A1 e A3 representam respectivamente as temperaturas de transformação de microestruturas do aço e as curvas representam aquecimento, encharque e resfriamento.

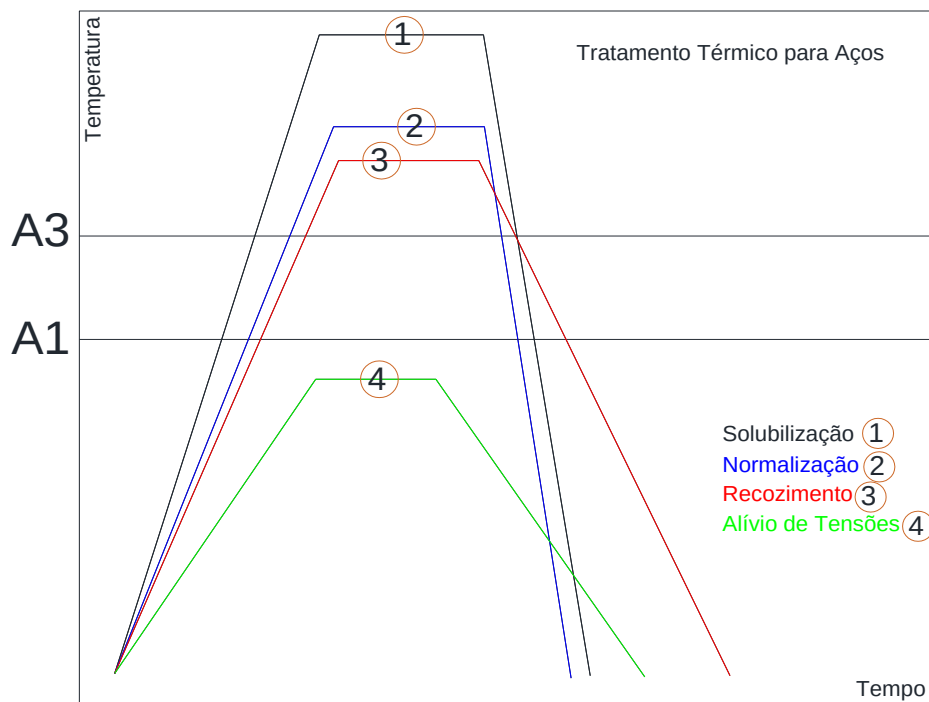


FIG.7 – Tratamentos térmicos mais usuais após a soldagem

2.5.1. Recozimento

Consiste no aquecimento da peça acima de sua temperatura crítica de transformação, para que haja recristalização ou transformação em uma nova fase. Para aços, a permanência na temperatura de patamar durante um determinado tempo seria para homogeneizar a austenita, seguido de resfriamento lento, geralmente no próprio forno. Os principais objetivos para esse tratamento são reduzir dureza, melhorar usinabilidade, remover encruamento, aliviar tensões internas, homogeneizar a microestrutura da peça.

2.5.2. Revenimento

É um tratamento térmico para aços, aplicado às peças que tenham sido produzidas microestruturas martensíticas. Seu aquecimento varia entre 450 a 750°C, com períodos de tempo entre 30 min e 4 horas, com objetivo de decompor a martensita, aliviar tensões internas e aumentar tenacidade (diminuir fragilidade).

2.5.3. Solubilização

É um tratamento térmico que faz uma solução no estado sólido de elementos que anteriormente estavam precipitados, seguido de resfriamento rápido o suficiente para reter na matriz os elementos na solução antes precipitados.

2.5.4. Têmpera

Consiste no aquecimento da peça até uma determinada temperatura, para austenitização do aço seguido de resfriamento rápido para permitir a formação de martensita. Tem como objetivo, endurecer, aumentar resistência mecânica, resistência ao desgaste e resistência ao escoamento. Com o aumento da fragilidade da peça, após a têmpera é necessário o beneficiamento, ou seja, têmpera seguida de revenimento.

2.5.5. Normalização

É um tratamento térmico para aços, que consiste em aquecimento a uma temperatura acima da austenitização e resfriamento ao ar, com objetivo de aumentar resistência mecânica, refinando grãos.

2.5.6. Pré-aquecimento.

Muitos não o consideram como um tratamento térmico, o aquecimento pode muitas vezes ser feito em uma faixa que varia em 6 a 12 vezes a espessura do material. Tal aquecimento pode ser obtido por vários métodos como, por exemplo, fornos fechados (elétricos ou combustão), aquecedores por resistência, aquecimento indutivo, gases quentes, queimadores a gás, aquecimento por martelamento e vibração.

O objetivo do pré-aquecimento é diminuir a velocidade de resfriamento de uma junta soldada, diminuir tensões residuais e para metais com alta condutibilidade térmica, facilita as operações de soldagem. Nos aços, favorece a difusão do hidrogênio, diminui a ocorrência de altos níveis de dureza na ZTA (Zona termicamente afetada pelo calor). Os parâmetros para especificação de um pré-aquecimento são: espessura da peça, composição química do material e condições metalúrgicas, nível de restrição em que a junta está sendo submetida e aporte térmico do processo de soldagem que for aplicado.

2.5.7. Pós-aquecimento.

Sua principal utilização é na eliminação do hidrogênio induzido por processos de soldagem, aplicados em aço carbono de alta e baixa liga.

Consiste em aquecer a junta em temperaturas na ordem de 250 a 400°C por 1 a 4 horas, imediatamente após a soldagem, aproveitando o pré-aquecimento. As temperaturas e tempos são proporcionais ao teor de ligas e espessura do material. Na maioria dos casos, este aquecimento não alivia tensões, porém, em materiais que sofreram têmpera, o pós-aquecimento pode reduzir a dureza, caso as temperaturas e os patamares de revenimento do material fiquem próximos aos do pós-aquecimento.

2.5.8. Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT)

O tratamento térmico de alívio de tensões (FIG.8) consiste em promover o aquecimento da peça após a soldagem, abaixo da temperatura crítica de transformação, permanecendo por um período de tempo proporcional à espessura da peça, seguido de resfriamento lento reduzindo tensões residuais.



FIG.8 - Gráfico representativo do Tratamento de Alívio de Tensões

2.6. Tensões residuais

Em seu livro, MASUBUCHI (1980) afirma que tensões residuais existem no interior do material quando não há mais carregamento externo solicitado. Do ponto de vista matemático, tensões residuais são causadas por alguma singularidade em um corpo contínuo, o que pode ser chamado de deslocamentos. Um deslocamento pode ser em escala macroscópica, ou pode ser numa escala microscópica.

A principal causa para o aparecimento de tensões residuais em uma junta soldada é a sua deformação plástica não uniforme resultante do aquecimento e resfriamento localizado durante a soldagem, a Figura 9 mostra um exemplo básico de tensão e distorção, causado por duas diferentes fontes de calor.

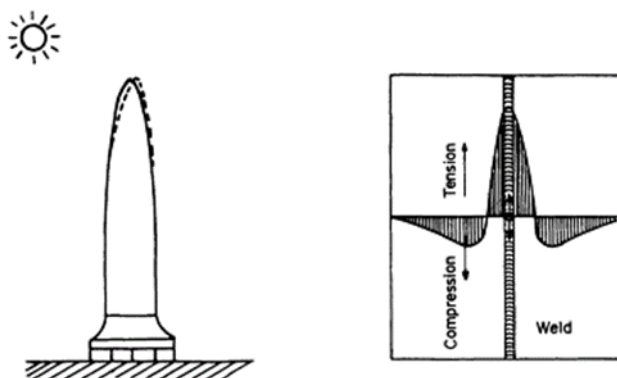


FIG.9 – a) Distorção térmica numa estrutura devido aquecimento por radiação solar. b) Tensões residuais devido à soldagem (K. Masubuchi, *Analysis of Welded Structures*, 1980, p.93)

2.6.1. Desenvolvimento das tensões residuais em soldagem

Quando uma peça é aquecida e resfriada de modo uniforme e não existem restrições para variações dimensionais, a peça não sofre efeitos mecânicos importantes ao final do ciclo de aquecimento e resfriamento.

Porém quando a variação de temperatura não for uniforme ao longo da peça ou se esta não puder se expandir ou contrair livremente durante o ciclo térmico, tensões residuais ou distorções podem se desenvolver.

Tensões e deformações podem prejudicar o desempenho e dimensões da peça soldada, podendo criar diversos problemas, tais como trincas, corrosão sob tensão, falhas por fadiga e fratura frágil. O alívio de tensões pode ser assegurado por tratamentos térmicos e mecânicos.

Segundo MASUBUCHI (1980), tensões residuais de tração altas em regiões próximas a solda podem promover a fratura frágil, fadiga ou corrosão sob tensão. Tensões residuais de compressão e distorção inicial podem reduzir a força flambagem. O que complica a questão é que o efeito externo das tensões residuais não só é governado por tensões residuais, mas também pela fragilidade do material.

Quando o material é frágil, tensões residuais podem reduzir significativamente a resistência do conjunto soldado. Quando o material fundido é dúctil, por outro lado, os efeitos das tensões residuais são praticamente nulos.

Um exemplo para explicar o desenvolvimento das tensões residuais, que pode ser demonstrado em soldagem, é caso das três barras presas em duas chapas nas extremidades (FIG.10). Deve-se considerar que nenhuma das peças esteja inicialmente sujeita a esforços mecânicos, ou seja, o nível de tensões internas seja nulo.

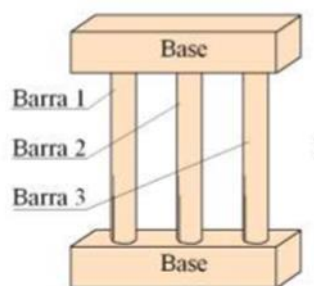


FIG.10 – Conjunto de barras presas nas extremidades

Em seguida, a barra central será aquecida por um maçarico de maneira uniforme (FIG.11). Pode-se considerar que a barra central está representando um cordão de solda depositado em uma chapa ou unindo duas peças.

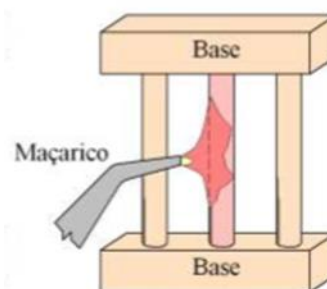


FIG.11 – Barra central sendo aquecida

O gráfico da Figura 12 representa as variações das tensões durante o aquecimento. Inicialmente o nível de tensões internas é nulo (ponto A). À medida que a barra central é aquecida ela tende a se expandir, porém é restringida pelas barras das

extremidades e das barras laterais. Desta maneira a barra central está tendo um esforço de compressão, este esforço irá aumentar no decorrer do aquecimento. Na barra central também ocorrerá deformação elástica por compressão até atingir o limite de escoamento (ponto B). Continuando o aquecimento o limite escoamento tende a diminuir e o valor da tensão também tende a cair à medida que a temperatura vai aumentando, a barra central tende a se deformar plasticamente, a sofrer uma diminuição em seu comprimento e aumentar sua seção transversal, ou seja, deformação permanente por compressão até atingir a temperatura final de aquecimento (ponto C).

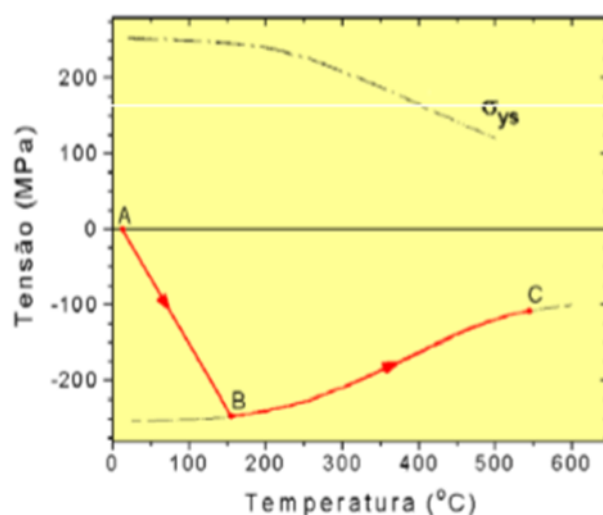


FIG.12 – Variação das tensões durante o aquecimento

Com a interrupção do aquecimento inicia-se o resfriamento (FIG.13) e a barra central a se contrair. Continuando resfriamento o esforço de compressão tende a diminuir até se anular (ponto D). Abaixando ainda mais a temperatura após o ponto D a barra quer continuar a diminuir o comprimento, porém como a barra sofreu deformação plástica durante o aquecimento a contração é restringida pelas barras transversais e laterais. A barra central passa a ter esforço de tração e deformação elástica crescente até atingir o limite de escoamento em tração (ponto E). A partir deste ponto a barra sofre deformação plástica em tração até que atinja a temperatura ambiente (ponto F).

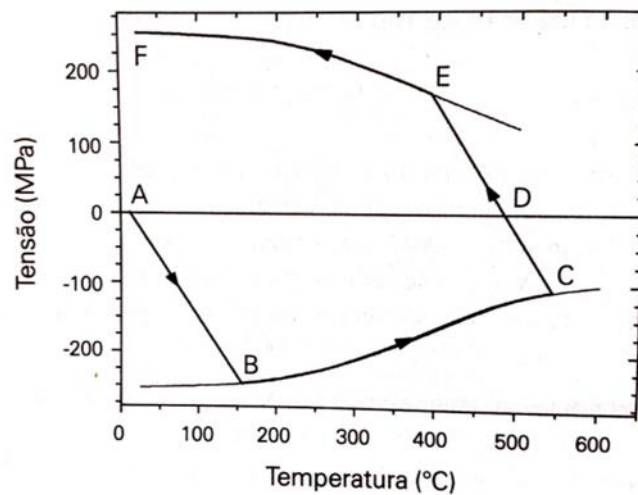


FIG.13 – Variação das tensões: aquecimento e resfriamento

A Figura 14 mostra a distribuição das tensões longitudinais de uma junta soldada ao longo da direção transversal à solda e comparada com o conjunto das três barras. As tensões residuais na região da solda são de tração e nas regiões mais afastadas da solda de compressão.

Quando uma peça soldada possui restrições a dilatações, contrações e deformações, por exemplo, estar presa por dispositivos próprios para fixação ou ligada a outros componentes, pode-se dizer que a peça está vinculada. Quanto maior a vinculação, maiores serão os esforços desenvolvidos durante o processo, em decorrência, as tensões residuais induzem maiores consequências para a peça e a estrutura. Componentes de materiais de maior resistência mecânica tendem a apresentar maiores tensões residuais uma vez que as tensões residuais atingem valores próximos ao limite de escoamento.

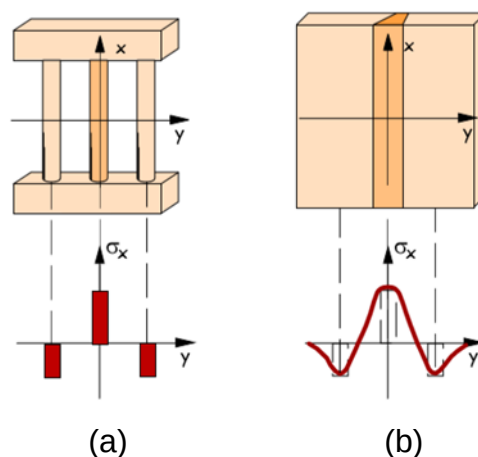


FIG.14 – (a) Tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras (b) tensões residuais longitudinais formadas ao longo da direção transversal (y) de uma solda de topo por fusão

A Figura 15 é uma representação esquemática da variação da temperatura (ΔT) e tensão na direção (σ_x) durante a soldagem. Analisando a distribuição de temperatura ao longo do eixo de soldagem, pode-se verificar que: a área hachurada M-M é a região onde ocorre a deformação plástica. A seção A-A à frente da fonte de calor ainda não é afetada significativamente pela entrada de calor, a mudança de temperatura ΔT é essencialmente zero. Ao longo da seção B-B que intersecta a fonte de calor, a distribuição da temperatura é bastante acentuada. Ao longo da seção C-C, por trás da fonte de calor, a distribuição de temperatura torna-se menos íngreme e é eventualmente uniforme ao longo da seção D-D um pouco mais afastada da fonte de calor.

Analisando a tensão σ_x induzida termicamente ao longo da direção longitudinal pode-se verificar que na seção A-A σ_x não é afetada pela entrada de calor, nesta seção é zero. Na seção B-B σ_x é próximo de zero na região por baixo da fonte de calor, uma vez que a poça de fusão não tem qualquer força para suportar carga. Nas regiões um pouco mais afastadas da fonte de calor, são tensões de compressão (σ_x é negativo) porque a expansão dessas áreas é contida pelo metal de base circundante e temperaturas mais baixas, devido ao baixo rendimento de resistência e alta temperatura de metal nestas áreas, σ_x atinge o limite de escoamento do metal base. Nas áreas mais distantes da solda σ_x é de tração, e σ_x é equilibrado com

tensões de compressão nas zonas próximas da solda. Ao longo da secção C-C o metal de solda e o metal de base adjacente esfriaram e, portanto, têm uma tendência a contrair-se, produzindo, assim, tensões de tração (σ_x é positivo). Nas áreas próximas σ_x é de compressão.

Finalmente, ao longo do corte D-D o metal de solda e o metal de base adjacente esfriaram e contraiu mais, produzindo, assim, tensões de tração superior em regiões próximas a solda e compressão em regiões mais distantes da solda.

Antes da seção D-D bem atrás a fonte de calor, a distribuição da tensão não muda significativamente para além dela, e esta distribuição de tensões é, portanto, a distribuição da tensão residual.

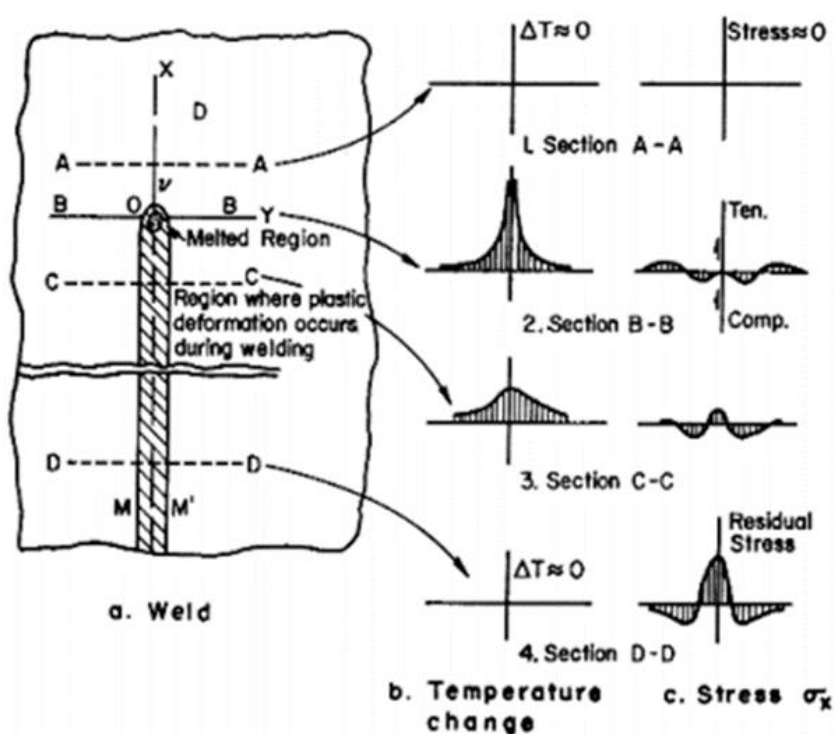


FIG.15 - As alterações de temperatura e tensões durante a soldagem. (Welding Handbook, Vol. 2. American Welding Society).

2.6.2. Classificação das tensões residuais

Segundo WITHERS & BHADSHIA, RESIDUAL STRESS (2000b), tanto anteriormente como atualmente, o estudo das tensões residuais tem sido de grande interesse da engenharia. Os projetos se tornam cada vez mais, menos conservadores. Uma falha estrutural pode ser causada pelo efeito combinado de tensões residuais. Tensões afetam as propriedades mecânicas. Além disso, no caso materiais puros e ligas metálicas, tensões residuais podem surgir a partir de diferenças de expansividade térmica.

A classificação mais comum das tensões residuais pode ser feita de acordo com seu comprimento característico (l_0), que é o comprimento ao longo do qual as tensões equilibram (FIG.16).

Tensões Tipo I equilibram-se sobre as dimensões macroscópicas ($l_0, I \approx$ escala da estrutura). Tais tensões podem ser estimadas utilizando modelos contínuos que ignoram a estrutura de grãos ou a natureza multifásica do material, sendo muitas vezes calculada utilizando o método de elementos finitos.

Tensões Tipo II equilibram-se sobre dimensões de um número de grãos ($l_0, II \approx 3-10 \times$ tamanho de grão). Um exemplo destas é a tensão térmica na interfase em um compósito com matriz de metal.

Tensões do Tipo III, por outro lado, existem mais em dimensões atômicas e equilibram-se dentro de um grão ($l_0, III <$ tamanho de grão). Incluem, por exemplo, aquelas causadas por defeitos pontuais. (WITHERS & BHADSHIA, RESIDUAL STRESS, PARTE 2, 2000b).

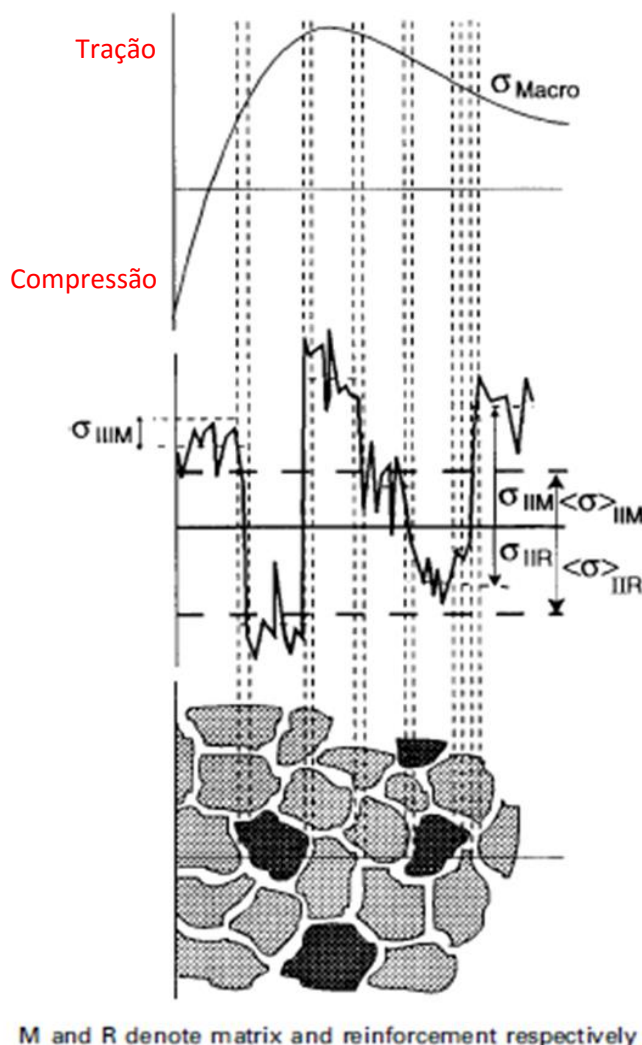


FIG.16 - Tensões residuais podem ser classificadas de acordo com escalas de comprimento característico l_0 , I; l_0 , II; e l_0 III, sobre as quais eles se auto equilibram (P. J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia, Residual Stress, Parte 2, 2000).

2.6.3. Medição de tensões residuais em soldagem

Muitas técnicas têm sido utilizadas para a determinação das tensões residuais em soldas. Os métodos de medição podem ser divididos em grupos: “não destrutivos”, “semi-destrutivos” e “destrutivos” (QUADRO 2).

As técnicas não destrutivas não necessitam de remoção de parte do material (corpo de prova) do componente em fabricação. As técnicas semi-destrutivas são aquelas em que é removida uma pequena quantidade de material, porém a integridade e

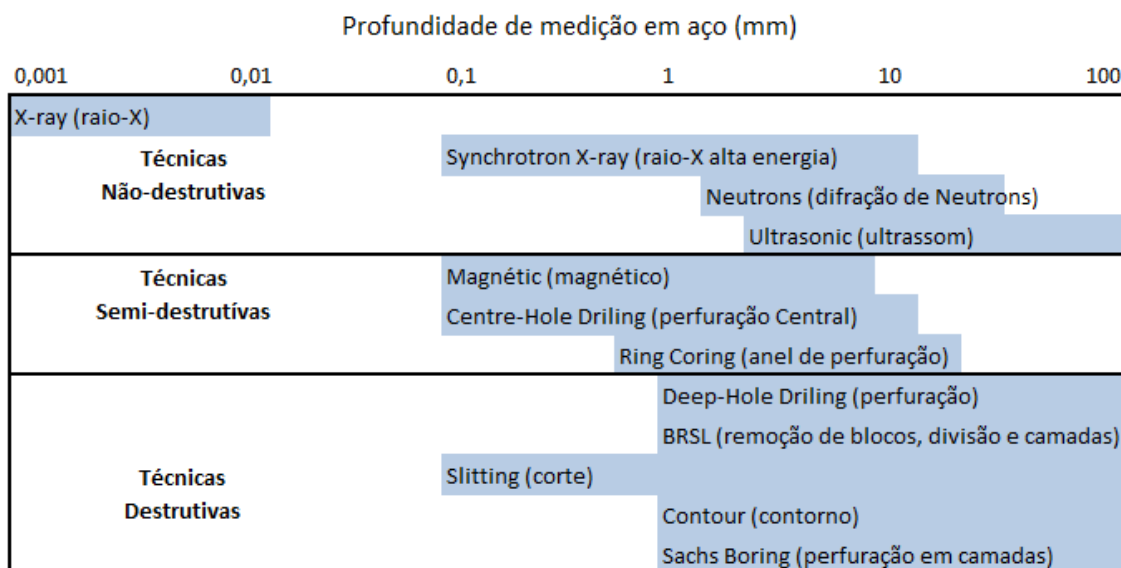
operação do equipamento não são comprometidas. As técnicas destrutivas são necessárias a retirada de material para análise das tensões e esta amostra representará o componente.

Existem várias técnicas para quantificar as tensões residuais, porém cada técnica possui características diferentes, como profundidade de verificação, resolução, exatidão, quais tipos de tensões são capazes de identificar, equipamento, custo, local de aplicação, entre outros. Por esses motivos torna-se necessário levar em consideração a aplicação da medição e resultado desejado. Em muitos casos a utilização de mais de uma técnica proporciona melhores resultados.

Atualmente o desenvolvimento de tensões residuais pode ser simulado, por exemplo, através de análises de elementos finitos.

QUADRO 2

Representação de algumas técnicas indicando profundidades de medição



Fonte: (Disponível em: <http://www.vqter.co.uk/residual-stress-measurement/overview>). Acesso em 24/03/2015: empresa do ramo de análises e medições de tensões residuais.

O quadro 3 mostra as principais técnicas para determinação experimental de tensões residuais segundo (MODENESI, 2012) no texto Introdução à Metalurgia da Soldagem.

QUADRO 3
Técnicas para a determinação experimental de tensões residuais

Grupo	Técnica
• Técnicas de relaxação de tensão	• Técnicas com “strain gages” elétricos • Técnicas com “strain gages” mecânicos • Técnicas com revestimentos frágeis • Técnicas com revestimentos fotoelásticos
• Técnicas de difração de Raios X	• Difração em filme • Difração com difratômetro
• Técnicas baseadas em propriedades sensíveis à tensão	• Técnicas com ultrassom • Técnicas com medidas de dureza • Técnicas magnéticas
• Técnicas de fissuração	• Fissuração pelo hidrogênio • Fissuração por corrosão sob tensão

Fonte: (P.J. Modenesi; P.V.Marques; D.B.Santos, Introdução à Metalurgia da Soldagem, 2012, p.4.10).

2.7. Distorções em soldagem

2.7.1. Desenvolvimento das distorções

A soldagem envolve extremo aquecimento localizado para abrir a poça de fusão (PF). Assim, tensões não uniformes são induzidas no componente devido à expansão térmica no aquecimento e contração do material no resfriamento.

Por causa do encolhimento, solidificação e contração térmica do metal de solda durante a soldagem, a peça de trabalho tem uma tendência para distorcer. A Figura 17 ilustra vários tipos de distorções após a soldagem. A peça soldada pode encolher

na direção transversal e também pode encolher na direção longitudinal ao longo da solda. Distorção angular para cima geralmente ocorre quando a solda é feita a partir do topo da peça de trabalho por si só. A solda tende a ser mais larga no topo do que no fundo, fazendo com que o encolhimento e contração térmica na parte superior da solda seja maior do que na inferior. Consequentemente, a distorção angular resultante é para cima. Distorções acontecem em seis formas principais: contração longitudinal, contração transversal, distorção angular, abaulamento, curvamento, flambagem e torção.

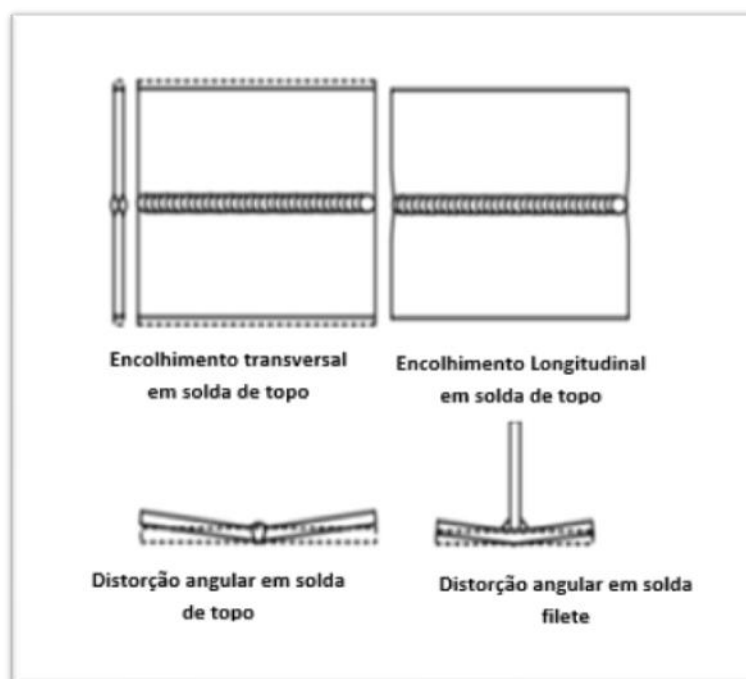


FIG.17 – Distorções em soldagem (Welding Handbook 2)

2.7.2. Como reduzir e minimizar distorções em soldagem

Várias técnicas podem ser usadas para reduzir e minimizar as distorções em soldagem. Reduzir o volume do metal de solda com objetivo de diminuir a quantidade de distorção angular e encolhimento lateral (FIG.18). O uso do processo de soldagem por feixe de elétrons e soldagem a laser, ambos utilizando o método keyhole, podem minimizar a distorção angular. Balanceamento de soldagem, usando uma junta com chanfro em duplo “V”, duplo “U”, em “K”, pode ajudar a reduzir a

distorção angular. A Figura 19 mostra que a soldagem alternada em chanfros em duplo “V” na articulação é preferida. Colocando soldas no eixo neutro também ajuda a reduzir distorção. A Figura 20 mostra que a força de contração de uma solda pode ser equilibrada pela colocação de outra solda no lado oposto. A Figura 21 mostra outras três técnicas para reduzir a distorção em solda: o pré-ajuste é conseguido por meio da estimativa da quantidade de distorção que possa ocorrer durante a soldagem e depois montar a peça de trabalho com membros pré-definidos para compensação da distorção; pré-aquecimento e pós-aquecimento também podem reduzir a distorção angular.

Durante a fabricação o uso de posições corretas, utilização de dispositivos de fixação, ponteamto antes da execução da solda, gabaritos, uso de posicionadores, sequência na deposição de cordões de solda, deposição por partes, execução da soldagem por mais de um soldador com início no mesmo ponto e soldando em direções opostas também são técnicas para minimizar distorções.

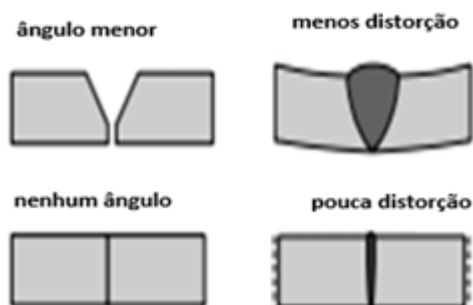


FIG.18 - Redução da distorção angular, reduzindo o volume de metal de solda e usando um passe de solda com penetração total. (KOU, Sindo, Welding Metallurgy, 2002, p.129)

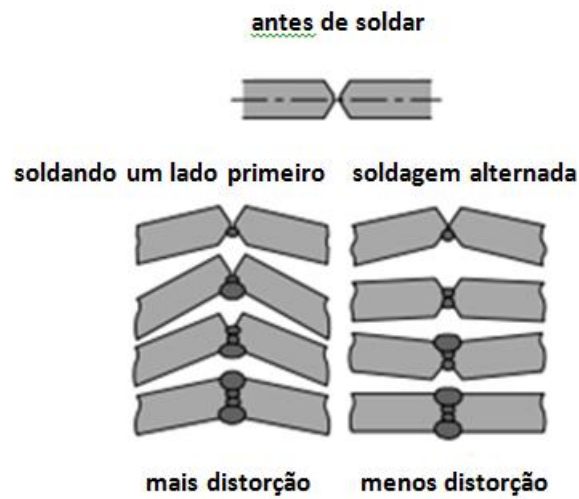


FIG.19 - A redução da distorção angular usando chanfro em duplo “V” e soldagem alternada. (KOU, Sindo, Welding Metallurgy, 2002 p.129)

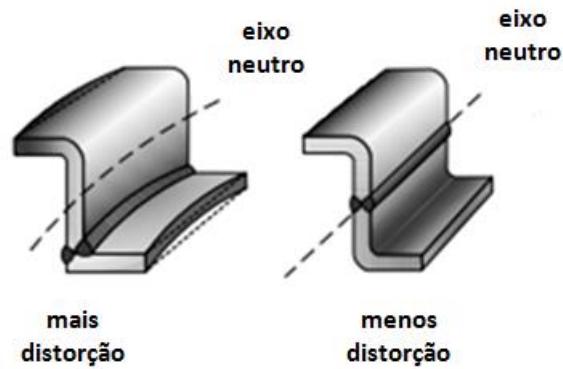


FIG.20 - A redução da distorção, colocando a junta de solda no eixo neutro. (KOU, Sindo, Welding Metallurgy, 2002, p.129)

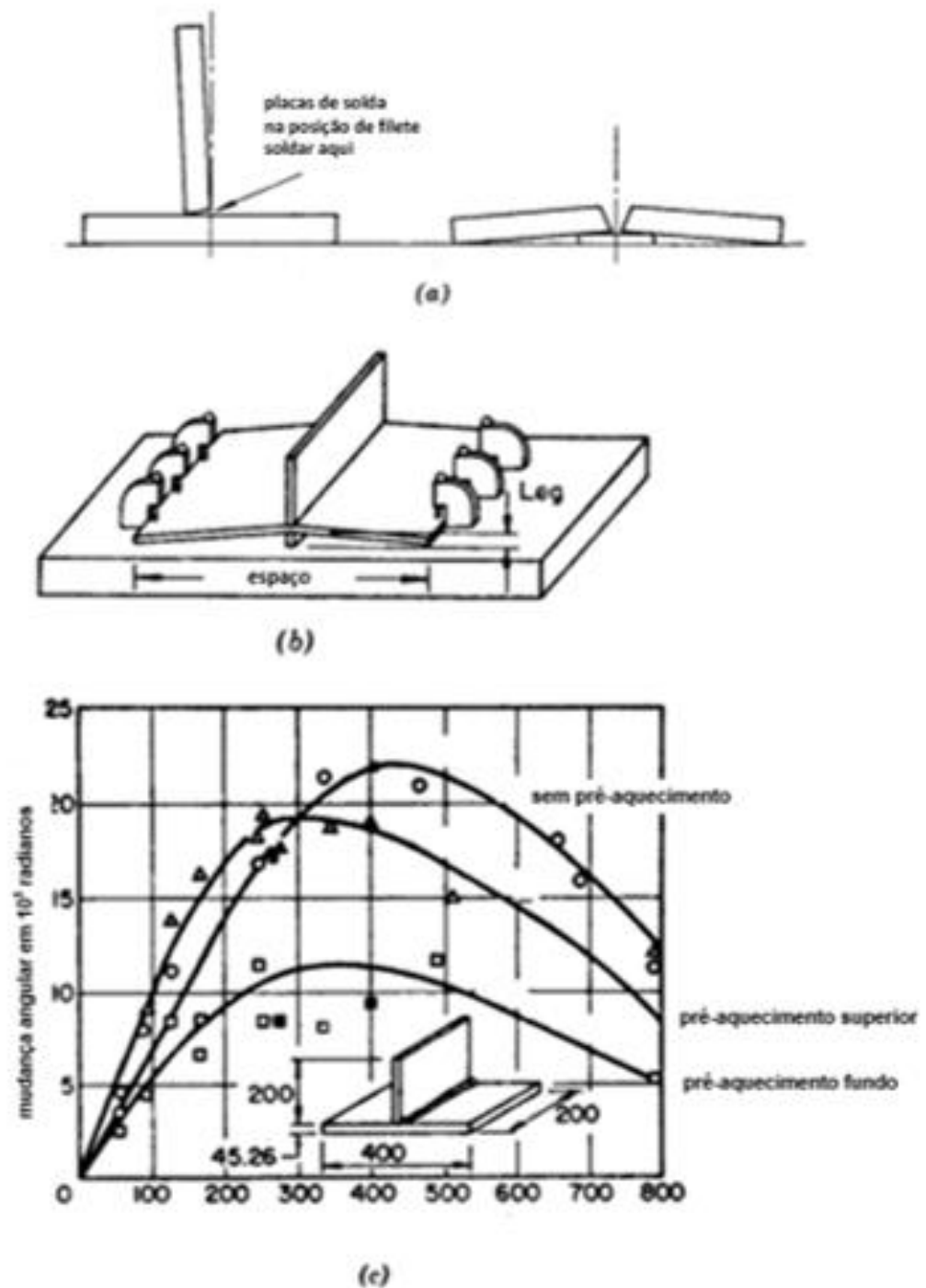


FIG.21 - Métodos para controlar a distorção de solda: (a) pré-ajuste; (b) fixação da peça; (c) o pré-aquecimento. (Handbook Welding – 2)

Após a soldagem, formas de correção de distorções são largamente utilizadas, entre elas pode-se destacar a correção a quente (aquecimento localizado, aquecimento

uniforme juntamente com esforços mecânicos e ressoldagem) e a frio (calandragem, prensagem e martelamento).

As Figuras 22, 23 e 24 mostram métodos e equipamentos usados na remoção a quente de distorções.

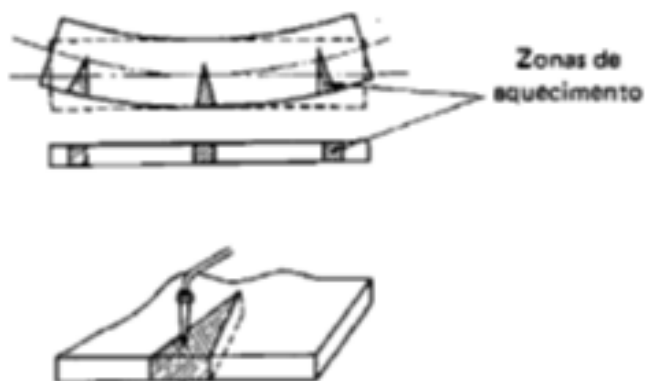


FIG.22 – Aquecimento localizado (T.Okumura; C.Taniguchi, Engenharia de soldagem e aplicações, 1982, p.178)



FIG.23 – Forno para aquecimento uniforme juntamente com esforços mecânicos.
(Disponível em:

<https://www.google.com.br/search?q=aquecimento+uniforme+de+chapas++em+forno.>

Acesso em 08/04/2015)

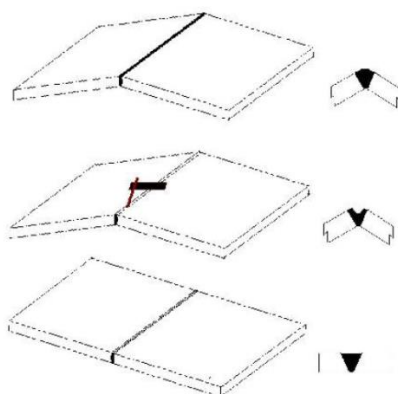


FIG.24 – Utilização da técnica de ressoldagem como correção de distorções

As Figuras 25, 26 e 27 mostram métodos e equipamentos usados na remoção a frio de distorções.



FIG.25 – Calandra. Equipamento para regularizar superfície de chapas. (Disponível em: <https://www.google.com.br/search?q=calandra+chapas+cnc>. Acesso em 08/04/2015)

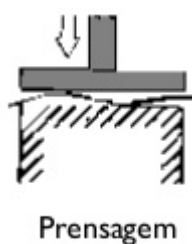


FIG.26 – Prensagem. Método utilizado para conformação mecânica e desempenamento. (Disponível em: <https://www.google.com.br>. Acesso em 08/04/2015)

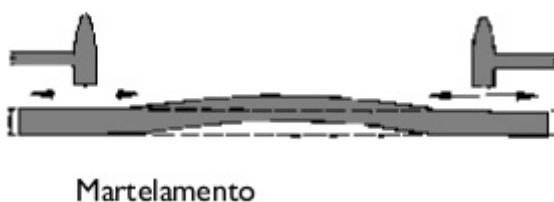


FIG.27 – Martelamento. Método para correção de distorções. (Disponível em: <https://www.google.com.br>. Acesso em 08/04/2015)

Além das formas de minimizar distorções descritas anteriormente, técnicas de simulação numérica de processos de soldagem podem ser usadas para a previsão de distorção em situações específicas. Esta é uma técnica inovadora para o desenvolvimento de componentes soldados. Através da simulação é possível prever o efeito das distorções, manter tolerâncias geométricas, estimar tensões residuais, testar parâmetros ótimos de soldagem e testar dispositivos de auxílio à fabricação, como gabaritos.

De uma forma mais simples, pode-se prever a contração transversal (C_T) em soldas de topo em aço carbono de baixa liga através de uma equação empírica:

$$CT = 0,2 \times \frac{AW}{t} + 0,05 f$$

Sendo;

AW = área da seção transversal da solda,

t = espessura das chapas,

f = abertura da raiz do chanfro,

CT = contração transversal

Observa-se que este é um método geral e aproximado e que o valor da contração transversal (CT) depende de outros fatores como grau de restrição da junta, número de passes e processo de soldagem. Por exemplo, a execução da solda com maior quantidade de passes com eletrodo de menor diâmetro e maior velocidade de soldagem causa contrações transversais e distorções angulares maiores.

A Figura 28 representa um exemplo prático para verificação da contração transversal. Uma barra foi soldada em uma das extremidades e após a soldagem a mesma foi serrada. Após o serramento foi medido o espaçamento do corte. Foi verificado que houve uma contração de 0,12mm. Simulando a contração transversal com uso da fórmula o valor calculado foi de 0,10mm.

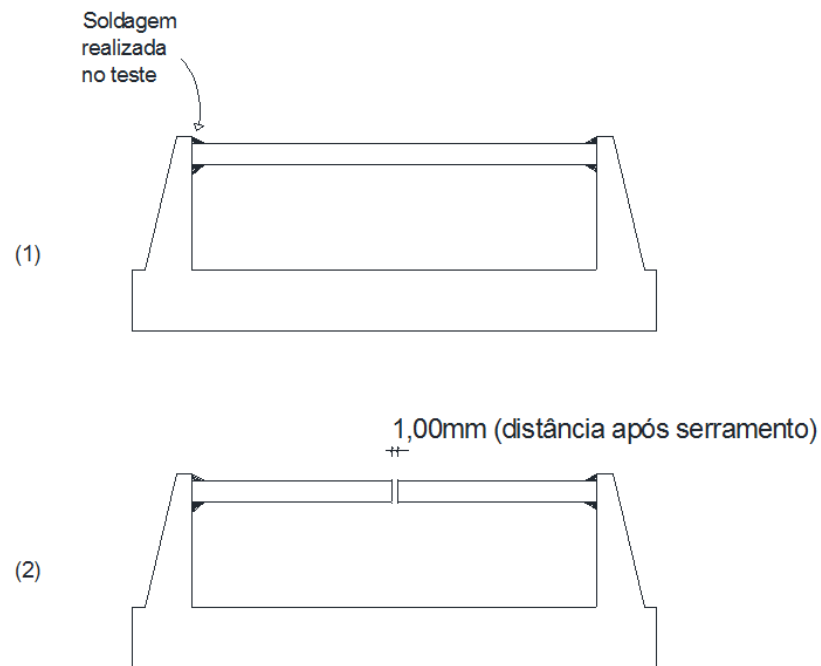


FIG.28 – Caso prático para estimativa de contração transversal

Espessura da serra = 0,95mm

Variação = (1,00-0,95) = 0,05mm

CT medida = 0,12mm

Utilização da fórmula:

$t = \frac{1}{2}$ "

$f = 0$

$\theta = 45^\circ$

$$CT = 0,2 \times \frac{6,33}{12,7} + 0,05 \times 0$$

CT = 0,10mm

2.8. Fadiga

2.8.1. Mecanismos de falhas por fadiga

É uma forma de falha que ocorre em estruturas sujeitas a flutuações dinâmicas de tensão. O termo fadiga é empregado pelo fato de que a falha ocorre após um período de ciclos de tensão ou deformação ao longo do tempo.

Falhas por fadiga são responsáveis por aproximadamente 90% das falhas em estruturas metálicas e componentes e é de natureza frágil mesmo em materiais dúcteis.

A falha pode ocorrer em soldas submetidas a cargas repetidas. A fadiga tem três fases características: iniciação de trincas, propagação de trincas e fratura final.

A Figura 29 mostra o mecanismo usual de iniciação de trincas de fadiga através de uma série de intrusões e extrusões na superfície livre, devido à alternância ao longo de planos de deslizamentos. Eventualmente, essas intrusões e extrusões tornam-se grave o suficiente e trincas iniciais se formam (FIG.30). A direção da propagação da trinca é ao longo do plano de deslizamento, no início e em seguida torna-se macroscopicamente normal à tensão de tração máxima. Descontinuidades no material, por exemplo: inclusões e porosidades podem servir como concentrador de tensões e conseqüentemente como fonte para iniciar este tipo de falha.

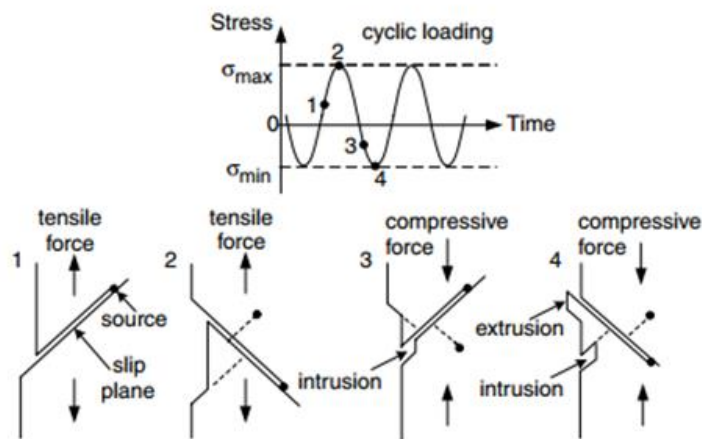


FIG.29 - Fadiga por carregamento cíclico (superior) e formação de intrusões e extrusões (parte inferior). (KOU, Sindo, Welding Metallurgy, 2002, p.131)

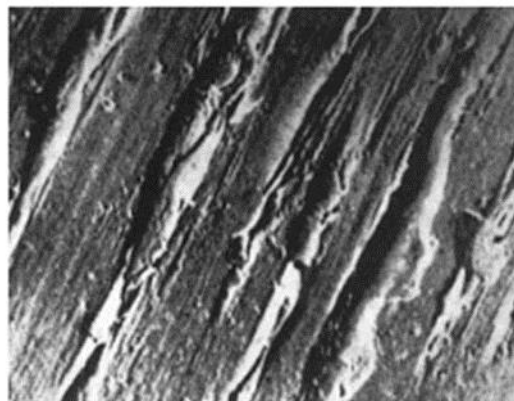


FIG.30 - Fadiga de superfície mostrando extrusões e intrusões. (KOU, Sindo, Welding Metallurgy, 2002, p.131)

O aparecimento de falhas por fadiga é muitas vezes descrito como frágil por causa da pouca deformação plástica bruta e as superfícies de fratura relativamente lisas. Falhas por fadiga são geralmente fáceis de distinguir de outras falhas frágeis, porque elas são progressivas e deixam marcas características. Macroscopicamente, elas aparecem como marcas de praia que representam mudanças no ciclo de carga de fadiga. A Figura 31 mostra uma superfície de fratura por fadiga, em que a seta indica a origem da fratura. (Sindo Kou, Welding Metallurgy, 2ª Edição, 2002).



FIG.31 - Superfície de fratura de fadiga mostrando marcas de praia e origem da fratura. (KOU, Sindo, Welding Metallurgy, 2002, p.132).

2.8.2. Curvas S-N

Os resultados do ensaio de fadiga geralmente são apresentados numa curva tensão/número de ciclos para falha, ou simplesmente curva S-N. O S vem da palavra inglesa *stress* (tensão) e N representa o número de ciclos. Supondo que, para uma certa solicitação de flexão S_1 o corpo de prova se rompa em um certo número de ciclos N_1 , e para uma solicitação S_2 se rompa em N_2 ciclos, e assim por diante, pode-se construir o diagrama S-N, com a tensão no eixo das ordenadas e o número de ciclos no eixo das abscissas (FIG.32). Observando a curva obtida, nota-se que, à medida que se diminui a tensão aplicada, o corpo de prova resiste a um maior número de ciclos. Nota-se, também, que, em aços, diminuindo a tensão a partir de certo nível em que a curva se torna horizontal o número de ciclos para o rompimento do corpo de prova torna-se praticamente infinito. Esta tensão máxima, que praticamente não provoca mais a fratura por fadiga, chama-se limite de fadiga ou resistência à fadiga do aço considerado.

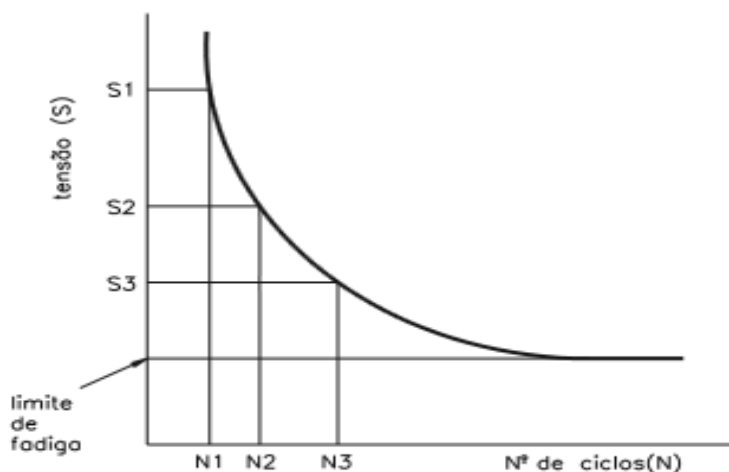


FIG.32 – Gráfico da curva S-N

Mas, para a maioria dos materiais, especialmente os metais não ferrosos como o alumínio, a curva obtida no diagrama S-N é sempre decrescente. Portanto, é necessário definir um número de ciclos para obter a correspondente tensão, que será chamada de resistência à fadiga. Para o alumínio, cobre, magnésio e suas ligas, deve-se levar o ensaio até 50 milhões de ciclos e em alguns casos em até 500 milhões de ciclos para neste número definir a resistência à fadiga.

2.8.3. Fatores que influenciam a resistência à fadiga

Uma superfície mal acabada contém irregularidades como se fosse um entalhe que aumentam a concentração de tensões resultando em tensões residuais que tendem a diminuir a resistência à fadiga. Defeitos superficiais causados por polimento (queima superficial de carbono nos aços, recozimento superficial e trincas) também tendem a diminuir a resistência à fadiga.

Tratamentos superficiais como cromagem e niquelação, também podem diminuir a resistência à fadiga por introduzirem tensões residuais de tração na superfície, além de conferirem porosidade ao metal. Por outro lado, tratamentos superficiais endurecedores podem aumentar a resistência à fadiga. O limite de fadiga depende da microestrutura, das condições de conformação mecânica, do tratamento térmico, etc. Um tratamento térmico adequado aumenta não somente a resistência estática

como também o limite de fadiga, assim como o encruamento dos aços dúcteis também aumenta o limite de fadiga. O meio ambiente também influencia consideravelmente o limite de fadiga, pois a ação corrosiva de um meio químico acelera a velocidade de propagação da trinca. A forma e formato da peça é um fator crítico, porque a resistência à fadiga é grandemente afetada por descontinuidades nas peças, como cantos vivos, encontros de paredes e mudança brusca de seções. Para muitos aços, o limite de fadiga se situa entre 35 e 65% do LR (Limite de Ruptura). Metais não ferrosos não apresentam limite de fadiga. Neste caso, especifica-se a resistência a fadiga definindo-se o número de ciclos em que poderá ocorrer a falha por fadiga em um dado nível de tensões.

2.8.4. A resistência à fadiga pode ser melhorada

Concentração de tensões, sempre que possível, deve ser evitada. Por exemplo, um rasgo de chaveta num eixo é um elemento que concentra tensão e conseqüentemente diminui a resistência à fadiga. É aconselhável prever nos projetos tensões contrárias favoráveis (opostas às tensões principais aplicadas), por meio de processos mecânicos, térmicos ou similares.

Defeitos metalúrgicos como inclusões e poros devem ser evitados. É preciso selecionar os materiais metálicos de acordo com o ciclo de tensões: para aplicações com baixas tensões cíclicas, onde a deformação pode ser facilmente controlada, deve-se dar preferência a ligas de alta ductilidade; para aplicações com elevadas tensões cíclicas, envolvendo deformações cíclicas predominantemente elásticas, deve-se preferir ligas de maior resistência mecânica. Microestruturas estáveis que não sofrem alterações espontâneas ao longo do tempo apresentam maior resistência à fadiga. O aconselhável é se preocupar com a fadiga antes de lançar um produto no mercado, pois ensaios de fadiga fornecem informações para produzir produtos com qualidade e maior segurança para o consumidor.

2.9. Corrosão sob tensão

Na presença de um ambiente agressivo, trincas de corrosão podem se desenvolver de forma acelerada devido à presença de tensões de tração. No caso de aços estruturais ao carbono ou de baixa liga, por exemplo, este fenômeno é desencadeado pelo contato com hidróxidos ou com sulfeto de hidrogênio. Em estruturas soldadas, as tensões residuais são muitas vezes suficientes para o desenvolvimento de corrosão sob tensão, dependendo do material e do ambiente (MARQUES et al., 2013).

2.10. Alívio de tensões após a soldagem

2.10.1. Processos térmicos para alívio de tensões

As tensões residuais podem ser aliviadas adotando processos térmicos e mecânicos, sendo que cada procedimento possui características e limitações diferentes. Entre os procedimentos mecânicos pode-se destacar o martelamento, encruamento e vibração. Entre os processos térmicos pode-se destacar o recozimento para alívio de tensões, recozimento a alta temperatura e alívio de tensões a baixas temperaturas.

A escolha do procedimento depende de vários fatores, como dimensões do equipamento e peça, característica do material, espessura, exigências previstas em normas, custo, transporte, entre outros. Um dos objetivos principais do controle e alívio de tensões é de reduzir tensões residuais através do aumento da ductilidade diminuindo a dureza, melhorando as condições metalúrgicas da zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF) e promovendo estabilidade dimensional.

O tratamento térmico de alívio de tensões pode ser determinado de acordo com normas. Uma das normas mais utilizadas é o Código ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) seção VIII divisão 1. Outras normas, como da AWS (*American Welding Society*) e BS (*British Standard*) também são utilizadas.

A operação de tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) consiste no aquecimento abaixo da temperatura crítica de transformação, permanência do material na temperatura de tratamento (patamar) por um dado tempo seguido de resfriamento lento. O gráfico da Figura 33 abaixo mostra o ciclo do TTAT.

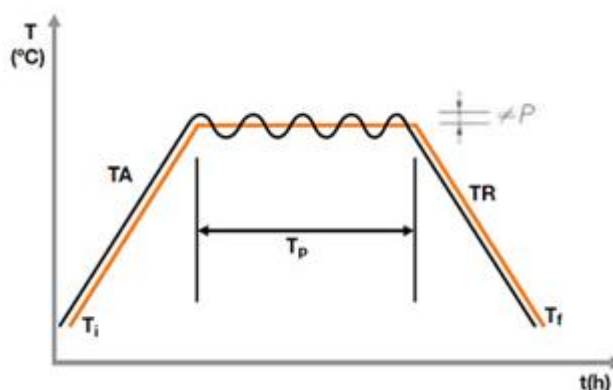


FIG.33 – Gráfico TT para o Tratamento Térmico de Alívio de Tensões

Onde:

TA - taxa de aquecimento

TR - taxa de resfriamento

Ti - temperatura inicial

Tf - temperatura final

Tp - tempo de patamar]

Δ P – Variação de temperatura no patamar

Os dados mostrados no quadro 4 são parâmetros fundamentais para execução do alívio de tensões. Esses parâmetros são definidos com o auxílio de normas internacionais e de acordo com dimensões e composição química do material. Os aços, conforme a norma ASME, são classificados com números *P-Numbers* e subdivididos em *Group-Numbers*. Com auxílio do *P-Number*, tabelas são consultadas para o cálculo de taxa de aquecimento, tempo de permanência e tempo de resfriamento. De acordo com espessura do material é determinado o tempo de patamar. Por exemplo, para aços carbono de baixa liga, *P-Nº.1 Gr. N^{os}.1,2,3*, as condições para o tratamento térmico são mostradas no quadro 5. A redução do valor da temperatura de patamar é permitida quando a temperatura máxima do forno for menor do que a temperatura especificada para o TTAT. Neste caso deverá ocorrer o aumento de tempo de permanência (Tp) conforme previsto na norma (esta

diminuição da temperatura é aplicável em materiais somente do *P.Nº.1 Gr. 1 e 2*). Quando peças de dois *P-Numbers* diferentes são unidas por soldagem são sujeitas a um tratamento térmico pós-soldagem, as condições serão especificadas de acordo com o material que exige a maior temperatura do tratamento térmico (TTAT) segundo a ASME seção XIII – divisão 1.

QUADRO 4

Lista de materiais com classificação conforme a ASME

– Grupos listados no item QW - 420 do ASME - Seção IX Div.1

Aços e suas ligas	<i>P-Nº 1</i>	Aços Carbono: C < 0,35%
	<i>P-Nº 3</i>	Aços de baixa liga: Cr < 0,5%
		Total de elementos por liga < 2,0%
		Este grupo inclui os aços C-Mo; Mn-Mo e Cr-Mo.
	<i>P-Nº 4</i>	Aços de baixa liga: 0,5% < Cr < 2,0%
		Total de elementos por liga < 2,75%
		Este grupo inclui os aços Cr-Mo e aços de outras ligas
	<i>P-Nº 5</i>	Aços de baixa liga: 2,25% < Cr < 10,0%
		Este grupo inclui os seguintes aços:
		Baixo Cr (2-3%), Médio Cr (4-6%), Alto Cr (7-9%)
	<i>P-Nº 6</i>	Aços de alta liga (martensíticos): 12-15% Cr
	<i>P-Nº 7</i>	Aços de alta liga (ferríticos): 12-17% Cr
	<i>P-Nº 8</i>	Aços de alta liga (austeníticos): aços inoxidáveis da série 300
	<i>P-Nº 9A</i>	Aços ao níquel: 2-3% Ni
	<i>P-Nº 9B</i>	Aços ao níquel: 3-4% Ni
Alumínio e suas ligas	<i>P-Nº 10A a 10I</i>	Outras ligas
	<i>P-Nº 11A</i>	Aços ao níquel: 4-9%
Cobre e suas ligas	<i>P-Nº 11B</i>	Outras ligas
Níquel e suas ligas	<i>P-Nºs 21, 22, 23 e 25</i>	
Titânio (não ligado)	<i>P-Nºs 31, 32, 33, 34, 35</i>	
Zircônio (não ligado)	<i>P-Nºs 41, 42, 43, 44, 45, 46</i>	
	<i>P-Nºs 51 e 52</i>	
	<i>P-Nºs 61</i>	

Fonte: ASME seção IX, 1992

O quadro 6 mostra as taxas de aquecimento, resfriamento e temperatura de patamar conforme a espessura nominal (E_n), que é a espessura da junta soldada. Pode-se observar que com o aumento da espessura, as temperaturas de aquecimento e resfriamento diminuem, portando, o tempo de aquecimento, resfriamento e tempo de

permanência serão maiores com o aumento da espessura. A temperatura de patamar varia de acordo com a classificação do material (*P-Number*).

QUADRO 5

Parte da Tabela UCS-56-1 da ASME

Tabela UCS-56-1 Tratamento Térmico Pós Soldagem - Requisitos para aços carbono e baixa liga P-No. 1				
Material	Temperatura, °F (°C) mínimo	Até 2 pol. (50 mm)	Mais de 2 pol. A 5 pol. (50 mm a 125 milímetros)	Mais de 5 pol. (125 mm)
P No. 1 Gr. Nos. 1, 2, 3	1,100 (595)	1 hr p/ (25 mm), com mínimo de 15 min	2 horas p/ 50mm + 15 min adicionais a cada 25mm	2 horas para 50mm + 15 min adicionais a cada 25mm

Fonte: ASME seção XIII, divisão 1, 2013

QUADRO 6

Taxas de aquecimento e resfriamento e temperatura de patamar em função da espessura nominal, *P-Number's* e *Group-Number's*

ESPESSURA NOMINAL (mm)	AQUECIMENTO máx. °C/hora acima de 427°C	RESFRIAMENTO máx. °C/hora acima de 427°C	P-Number	Group-Number	T (°C) PATAMAR mínimo *	TEMPO DE PERMANÊNCIA		
						Até 50 mm	50 a 125 mm	≥ 125 mm
≥ 25	220	275	1	1, 2, 3	595	1 hora/25mm	2 horas p/ 25mm + 15 min p/ 25mm adicionais	2 horas p/ 25mm + 15 min p/ 25mm adicionais
25 - 31	170	220	3	1, 2, 3	595			
31 - 38	145	185	4	1, 2	650			
38 - 44	120	155	5	1	675			
44 - 50	110	135	9A	1	595			
50 - 63	85	110	9B	1	595			
63 - 75	70	90	10A	1	595			
75 - 88	60	75	10B	1	595			
88 -100	55	65	10C	1	540			
≥ 100	55	55	10F	1	540			

* Para temperatura máxima acrescentar 50°C à temperatura mínima

Fonte: <http://www.infolsolda.com.br/biblioteca-digital/26-livros-senai.html>. Acesso em 23/03/2015.

Peças com elevada espessura, peças submetidas a carregamentos cíclicos, aços com elevado teor de elementos de liga podem falhar devido à presença de tensões residuais. Neste último caso um parâmetro para avaliar se é necessário o tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) é o cálculo do Carbono Equivalente (Ceq). Este

parâmetro não leva em consideração somente o teor de carbono, mas de outros elementos que influenciam na temperabilidade dos aços. O carbono equivalente pode ser calculado pela fórmula abaixo:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (I IW)$$

São exemplos de aços com elevado teor de elementos de liga, os aços temperados e revenidos, os aços resistentes à fluência ligados ao cromo e ao molibdênio e os aços com alto teor de carbono. Quanto maior for o teor de carbono equivalente (C_{eq}), maior é a temperabilidade do material. Aços com maior temperabilidade têm maiores chances de formação de microestrutura frágil, como martensita na zona fundida (ZF) e na zona termicamente afetada (ZTA). Aços com esse tipo de microestrutura têm alta dureza e baixa ductilidade e também maior tendência à fissuração por hidrogênio. O alívio de tensões neste caso atua também revenindo a microestrutura martensítica.

O formulário da Figura 34 representa um exemplo de procedimento de tratamento térmico de alívio de tensões.

Alguns estudos foram realizados para verificação dos mecanismos de alívio de tensões durante o tratamento térmico. Nestes estudos, foi demonstrado que o alívio de tensões pode ser conseguido durante a fase de aquecimento, antes do tempo de permanência (T_p). Estes resultados sugerem que o tempo de espera pode ser reduzido. Assim, um benefício econômico significativo pode ser realizado através da redução do tempo de espera atualmente exigido, se o alívio da tensão residual é o objetivo primário (DONG et al., 2014).

PROCEDIMENTO DE TRATAMENTO TÉRMICO			TT n° 001
			Folha:
PEÇA/ SUB. CONJUNTO	CONJUNTO	CLIENTE	QUANT. PEÇA
XXX	XXX	XXX	1
DADOS DO EQUIPAMENTO			
1 - IDENTIFICAÇÃO	2 - DIMENSÕES	3 - ESPESSURAS	
XXX	3 polegadas	2 polegada	
4 - DADOS DOS CÁLCULOS			
4.1 - TEMPERATURA INICIAL DE CONTROLE			°C MÁX
427°C			
4.2 - TAXA DE AQUECIMENTO			°C/ HORA MÁX
222°C			
4.3 - TAXA DE RESFRIAMENTO			°C/ HORA MÁX
278°C			
4.4 - TEMPERATURA DE PATAMAR			°C
595°C			
4.5 - TEMPO DE PATAMAR			NORAS MIN
75 min			
4.6 - TEMPERATURA FINAL DE CONTROLE			°C MÍN
427°C			
4.7 - DIFERENÇA DE TERMOPARES NO AQUECIMENTO:			°C MÁX
XX°C			
4.8 - DIFERENÇA ENTRE TERMOPARES PATAMAR:			°C MÍN
XX°C			
4.9 - NÚMERO DE TERMOPARES:			MÍN
14			
5 - CROQUI DO EQUIPAMENTO E LOCALIZAÇÃO DOS TERMOPARES			
6 - CICLO TÉRMICO			
EMITIDO POR:		APROVADO POR:	REVISÃO
XXX		XXX	XXX

FIG.34 – Formulário de Procedimento de Tratamento Térmico. (Disponível em: <https://www.google.com.br/search?q=procedimento+de+tratamento+termico&biw>. Acesso em 21/04/2015)

2.10.1.1. Alívio de tensões a baixas temperaturas

É um processo simples em que é feito aquecimento no local da solda, as temperaturas variam de 150 a 200°C em uma largura total de 60 a 130 mm à solda. Pode ser utilizado para execução em grandes estruturas, porém o alívio das tensões residuais é parcial. (OKUMURA & TANIGUCHI, 1982)

2.10.1.2. Recozimento a alta temperatura

Neste processo o aquecimento para aços ferríticos varia entre 900 e 950°C, seguido de resfriamento lento, podendo ser aplicado localmente ou em toda estrutura e com capacidade de eliminar completamente as tensões residuais. Tem custo ainda mais elevado e também não é aplicável para grandes estruturas e execução no campo. (OKUMURA & TANIGUCHI, 1982)

Quando o tratamento é aplicado em toda estrutura é conhecido como recozimento pleno ou total, por meio do recozimento pleno do aço é possível diminuir sua dureza, aumentar a ductibilidade, melhorar a usinabilidade e ajustar o tamanho do grão. Também são eliminadas as irregularidades resultantes de tratamentos térmico ou mecânico, sofridos anteriormente. O tratamento consiste em aquecer a peça num forno (FIG.35) numa temperatura acima da zona crítica. Após certo tempo, o forno é desligado e a peça é resfriada no seu interior.

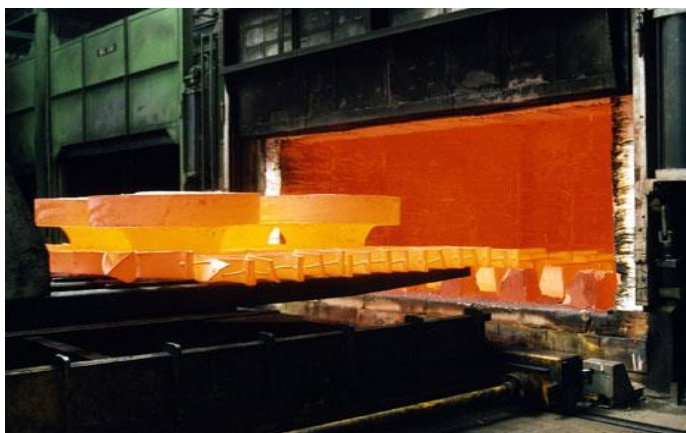


FIG.35 - Forno para tratamento térmico. (Disponível em: www.google.com.br/search?q=tratamento+termico+de+alta+temperatura&biw Acesso em: 18 de abril de 2015)

2.10.2. Processos mecânicos para alívio de tensões

2.10.2.1. Martelamento (*Hammer Peening*)

O uso do martelamento é um método simples que consiste em martelar o material depositado durante e após soldagem. Contudo, este método, não é recomendado para materiais de baixa ductilidade. (OKUMURA & TANIGUCHI, 1982)

O martelamento é útil para controlar distorção, para aliviar tensões residuais ou para melhorar a qualidade da solda. Martelamento não deve ser utilizado na camada inicial e nem na camada final (face), a menos que a solda seja subsequentemente tratada termicamente. Em nenhum caso, no entanto, o martelamento é para ser executado no lugar do tratamento térmico pós-soldagem exigido por regras. (ASME VIII – RULES FOR CONSTRUCTION OF PRESSURE VESSELS, Division 1, 2013)

2.10.2.2. Encruamento

Deformação ocasionada pela aplicação de cargas de tração. É um método bastante eficiente no tratamento de tanques esféricos e tubulações. Este método não é recomendado para estruturas complicadas pela dificuldade de aplicação de tensões uniformes. (OKUMURA & TANIGUCHI, 1982)

2.10.2.3. Dressagem ou adoçamento

A dressagem ou adoçamento também é um método utilizado com objetivo de alívio de tensões. Consiste na utilização de uma ponteira rotativa para esmerilar a margem da solda. A profundidade de penetração varia entre 0,5 e 1,0 mm.

2.10.2.4. Alívio de tensões por vibração

Neste método são aplicadas vibrações mecânicas na peça causando uma ressonância de baixa frequência, o que ocasiona deformação plástica da estrutura e alivia tensões. É também, um método de uma operação simples, mas é inadequado para chapas muito espessas e grandes estruturas pelo fato de o alívio de tensões não ser uniforme. (OKUMURA & TANIGUCHI, 1982).

O tratamento de alívio de tensões por vibrações mecânicas surgiu como uma alternativa por apresentar um menor custo de energia e horas de trabalho. Este método, ainda em desenvolvimento vem sendo utilizado por pesquisadores em todo mundo em estudos de alívio de tensões.

Embora, como já mencionado, existam métodos de alívio térmico de tensões, estes também têm limitações, incluindo inviabilidade econômica e técnica em certas configurações. Há situações em que o alívio de tensões por vibração pode ser a melhor opção em relação a outras técnicas de alívio térmico de tensões.

O processo pode ser utilizado em uma gama de materiais ferrosos e não ferrosos. Os materiais podem ser tratados em uma variedade de condições, tais como: fundidos, forjados, estampados, soldados, esmerilhados, polidos ou usinados. Não é recomendado para peças trabalhadas a frio severamente. É recomendado para peças largas e compridas como, por exemplo, vigas, pórticos e partes de equipamentos pesados como escavadeiras e pode necessitar de ser aplicado em diversos pontos e demandar um tempo maior na operação.

O alívio de tensões por vibrações mecânicas pode ser dividido em três tipos: Ressonante (*R-VSR*), Sub-ressonante, (*SR-VSR*) e Sub-harmônico (*SH-VSR*). Cada tipo possui equipamentos e características diferentes, principalmente relacionados à energia da vibração utilizada, frequência e amplitude de ressonância. Cada material possui uma frequência natural, que pode influenciar na escolha do tipo de processo.

Em geral, as vibrações mecânicas são aplicadas na estrutura por meio de um motor elétrico de corrente contínua (CC) (FIG.36). Este motor é fixado à estrutura e a

frequência é aumentada até que seja atingida a ressonância. O processo é monitorado observando a redução da frequência de ressonância da estrutura e é considerado completo quando a frequência de ressonância fica estável.

A vibração mecânica produz uma carga que sobrepõe ao padrão de tensão existente que resulta na redução da tensão residual, tendo como resultado um produto dimensionalmente mais estável e reduzindo as distorções que frequentemente ocorrem nas peças fabricadas.

O processo de alívio de tensões por vibrações mecânicas pode ser executado também durante a soldagem, podendo resultar em redução das tensões residuais durante a solidificação do cordão de solda. Este modo de aplicação exhibe outras qualidades como melhor acomodação, acabamento do metal fundido, redução de trincas, melhores características na ZTA e ZF com estrutura de grãos mais uniformes, melhor ductilidade e resistência à fadiga em comparação com soldas obtidas sem o uso de vibrações mecânicas.

Nas situações onde a vibração é usada durante o processo de soldagem, esta condição é mais compatível com os processos; SMAW, GMAW, FCAW, GTAW e PAW. As Figuras 36 e 37 mostram equipamentos típicos para alívio de tensão por vibração ressonante.

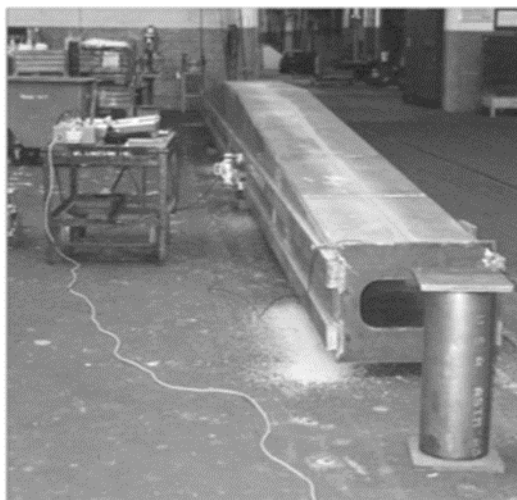


FIG.36 - Pórtico de uma máquina (comprimento 18m). A unidade vibradora está fixada à viga adjacente ao suporte do instrumento. Um acelerômetro é fixado à extremidade superior da viga. (*Grupo VSR de Airmatic Inc*).



FIG.37 – Equipamento fórmula 62. (Catálogo Energyarc)

2.11. A importância das tensões residuais e distorções para elaboração de projeto e na fabricação de estruturas soldadas

Segundo MASUBUCHI (1980), durante a fase de concepção do projeto poderão ser verificados possíveis efeitos adversos sobre o desempenho em serviço da estrutura que se está projetando ou fabricando e se for necessário fazer alterações no projeto e parâmetros de fabricação, como a espessura da peça, projeto conjunto, condições de soldagem, sequência de soldagem, etc., de modo que os efeitos adversos de tensões residuais e distorções podem ser reduzidos às condições de aceitabilidade. É muito melhor atingir esse objetivo durante a fase inicial de projeto e fabricação, em vez de enfrentar o problema em fases posteriores da fabricação.

O Prof. Koichi Masubuchi coloca em seu livro, que, para realizar esta tarefa, o engenheiro precisa de pelo menos dois tipos de análises:

1. Uma análise das tensões térmicas transientes, tensões residuais e distorção (Análise 1 entre as etapas 0 e 1 na FIG.38).
2. Uma análise dos efeitos das tensões térmicas, tensões residuais e distorções no comportamento em serviço de estruturas soldadas (Análise 2 entre as etapas 1 e 2).

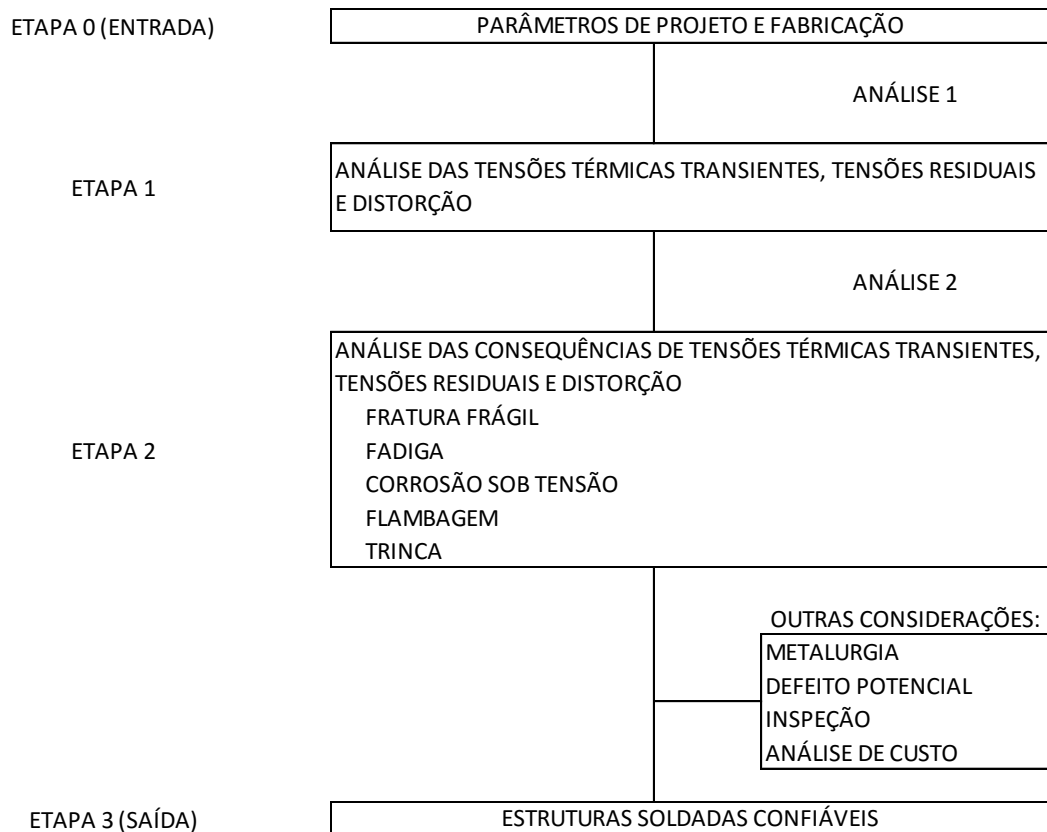


FIG.38 - Importância de tensões residuais e distorção na concepção e fabricação de estruturas soldadas

O engenheiro também deve considerar muitos outros fatores além de tensões residuais e distorção e as suas consequências. Estes temas incluem metalurgia, potencial de formação de defeito na solda, inspeção, custo de fabricação, etc. As condições de soldagem que daria o valor mínimo de distorção podem não ser utilizáveis por motivos de características metalúrgicas inadequadas ou custo de fabricação excessivamente alto. Portanto, o que o engenheiro realmente precisa é de um sistema integrado, que pode analisar todos os temas relevantes necessários. (MASUBUCHI, 1980)

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de revisão proporcionou o aprofundamento do entendimento das causas de tensões residuais e distorções causadas durante a fabricação de peças e equipamentos soldados e formas de controle e prevenção.

Um dos objetivos principais do tratamento térmico após a soldagem é aliviar tensões residuais e promover a estabilidade dimensional. Além disto, este tratamento pode contribuir para aumentar a ductilidade e diminuir a dureza e, em geral, melhorar as condições metalúrgicas da zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF).

Quando possível deve-se fazer alterações necessárias no projeto e parâmetros de fabricação, de modo que efeitos adversos relacionados a propriedades do material e ao processo de soldagem aplicado não comprometam as condições de aceitabilidade no produto final. Tensões residuais e distorções podem ser controladas por medidas tomadas antes, durante e após soldagem. Idealmente, o controle de tensões residuais deve ser pensado na fase inicial de projeto e na elaboração de procedimentos de soldagem para garantir um bom resultado. Antever esse problema na fase inicial de projeto é muito importante, pois, na fase final, poderá ser complicado e resultar em aumento de custos, retrabalhos, etc.

As técnicas utilizadas para determinar tensões residuais são divididas em não destrutivas, semi-destrutivas e destrutivas. Cada técnica apresenta características diferentes em relação à sua capacidade de verificação, resolução e exatidão. Em alguns casos faz-se necessário o uso de mais de uma técnica de medição de tensão residual para proporcionar melhor conclusão.

Foi feita uma breve apresentação sobre o tratamento por vibrações mecânicas. A vibração é aplicada por um motor fixado na estrutura até atingir uma ressonância de baixa frequência que deforma plasticamente a estrutura aliviando a tensão. É um processo com custo baixo usado em materiais ferrosos e não ferrosos, mas é inadequado para peças muito espessas e grandes estruturas pelo fato de o tratamento não ser uniforme. É recomendado para peças largas como vigas,

pórticos, partes de equipamentos pesados como escavadeiras, etc. Pode ser usado durante a execução da soldagem a arco, por exemplo, nos processos SMAW, GMAW, FCAW, GTAW e PAW.

Os engenheiros, especialistas e profissionais em soldagem devem considerar todos os aspectos importantes relacionados aos processos de soldagem, procedimentos, materiais, consumíveis, operações, tratamentos térmicos e mecânicos a fim de obter resultados satisfatórios no que diz respeito ao produto, garantindo maior segurança, confiabilidade e garantia da qualidade.

4. REFERÊNCIAS

ASM, American Welding Society, ASM handbook, Welding Brazing and Soldering, Volume 2, United States of America, 1990.

ASM, American Welding Society, ASM handbook, Welding Brazing and Soldering, Volume 6, United States of America, 1993.

ASME, The American Society of Mechanical Engineers, VIII Regras para Construção de Vasos de Pressão, Divisão 1, Estados Unidos da América, 822 p.

ASME, The American Society of Mechanical Engineers, IX Welding and Brazing Qualification, Estados Unidos da América.

BAQCAR, S.; JAIN, Y.; KHANNA, P., International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 4, Issue 11, November 2014, Department of Manufacturing Processes and Automation Engineering, NSIT, New Delhi, India.

BERGAMO, R.T. Avaliação da eficácia do martelamento para alívio de tensões em soldas de aços. 2006. 107 f. Dissertação de mestrado – Curso de mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/.../226784.pdf>

Acesso em: 14 de abril de 2015.

BHADESHIA, H.D.K; WITHERS, J.P. Residual stress, Part 1 – Measurement techniques. 2000. 11 p.

BHADESHIA, H.D.K; WITHERS, J.P. Residual stress, Part 2 – Nature and origins. 2000. 10 p.

BRAGA, E.M. Palestra: A Vibração como Elemento de Alívio de Tensões Residuais em Cordões de Solda. Grupo de Caracterização de Materiais – GCAM, ITEC – UFPA, Belém, PA. Disponível em:
http://www.ufpa.br/gva/Arquivos%20PDF/I_WORKSHOP_TUCURUI/Workshop
Acesso em 14 de abril de 2015.

DONG, P.; SONG, S; ZHANG, J. Analysis of residual stress relief mechanisms in post-weld heat treatment, International journal of Pressure Vessels and Piping 122 (2014) 6-14, University of Michigan, USA.

ENERGYARC. Fórmula 62: Alívio de tensão por vibração. Disponível em:
<http://catalogo.energyarc.com.br/item/alivio-de-tensao-na-soldagem/formula-62-alivio-de-tensao-por-vibracao/alivio-de-tensao-formula-62#http://www.gullco.com/>.
Acesso em: 18 de fevereiro de 2015.

Ensaio de Fadiga. Texto Aula 15. Disponível em:
www.essel.com.br/cursos/material/01/EnsaioMateriais/ensa15.pdf
Acesso em 14 de março de 2015.

ESAB. Apostila Metalurgia da Soldagem. Contagem, 2004.

GIMENES JR, Luiz, Curso de Tratamento Térmico de Alívio de Tensões em Juntas Soldadas, São Paulo, ABS/FATEC, 2000.

INFOSOLDA. Aplicações dos Tratamentos Térmicos – Cálculos. Disponível em:
<http://www.infolsolda.com.br/biblioteca-digital/26-livros-senai.html>
Acesso: 23 de março de 2015.

KOU, Sindo., Welding Metallurgy, Second Edition, 2002.

MARQUES, P.V, Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem, Universidade Federal de Minas Gerais, Apostila MFAB-03: Tensões residuais e distorções em soldagem, 2013, 31 p.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. Belo Horizonte: UFMG, 2013.

MARTINS, P.A.C; MORILLA, C.J; MARQUES, V.P. Alívio de tensões por vibrações sub-ressonantes, Texto. UNISANTA - Science and Technology, p. 69 - 75, Vol. 1, No 2, 2012. Santos-SP, Brasil.

MASUBUCHI, Koichi., Analysis of Welded Structures, Massachusetts, USA, 1980.

MIRANDA, Leonardo Horta. Efeito da refrigeração forçada da poça de fusão nas distorções angulares em cordões de solda sobre chapa de aço carbono. 2006. 101 f. Dissertação de mestrado – Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

MODENESI, P.J., Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem, Universidade Federal de Minas Gerais, Apostila MPROC-01: Processos e equipamentos de soldagem, 2013, 47 p.

MODENESI, P.J. Efeitos Mecânicos dos Ciclos Térmicos, Texto. Belo Horizonte: UFMG – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2001.

MODENESI, P.J. Introdução à Física do Arco Elétrico. Soldagem I, Texto. Belo Horizonte: UFMG – Departamento de Engenharia Metalúrgica 2012.

MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V.; SANTOS, B.D. Introdução à Metalurgia da Soldagem, Texto. Belo Horizonte: UFMG – Departamento de Engenharia Metalúrgica, 2006.

MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V. Soldagem I: Introdução aos Processos de Soldagem, Apostila. Belo Horizonte: UFMG – Departamento de Engenharia Metalúrgica, 2006.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C., Engenharia de Soldagem e Aplicações, Rio de Janeiro: LTC, 1982.

SILVA, C.A; MAYER, C.A.S; CAVALCANTE, J.R. Tratamento Térmico de Alívio de Tensões, Módulo II – 1, Núcleo Tecnológico de Soldagem e Qualidade – São Paulo/SP, 2002.

TERASAKI, Toshio. Source of weld residual stress and deformation. Kyushu Institute of Technology, Fukuoka, Japan, april 2008. 8 p.

VEQTER. Medições de tenções residuais. Disponível em:
<http://www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement/overview>
Acesso em: 24 de março de 2015.

WALKER, C. A theoretical review of the operation of vibratory stress relief with particular reference to the stabilization of large-scale fabrications. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 225 (3). June 2011. p. 195-204, University of Glasgow, Reino Unido.

ZEEMANN, Annelise. Tensões Residuais de Soldagem. Disponível em:
<<http://www.infosolda.com.br/artigos/metsol03.pdf>>.
Acesso em: 01 de março de 2015.