



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA METALÚRGICA

“AVALIAÇÃO DO USO DA TÉCNICA *DE TEMPER BEAD WELDING*
(SOLDAGEM COM PASSE DE REVENIMENTO) EM AÇOS
ESTRUTURAIS – ESTADO DA ARTE”

Thamires Fernandes Pinto

Ouro Preto, junho de 2022.

Thamires Fernandes Pinto

“Avaliação do uso da técnica de *temper bead welding* (soldagem com passe de revenimento) em aços estruturais – Estado da Arte”

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Rangel Porcaro

Ouro Preto, outubro de 2022.



FOLHA DE APROVAÇÃO

Thamires Fernandes Pinto

Avaliação do uso da técnica de *temper bead welding* (soldagem com passe de revenimento) em aços estruturais – estado da arte

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalurgista

Aprovada em 14 de outubro de 2022

Membros da banca

[Dr.] - Rodrigo Rangel Porcaro - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
[Dr.] - Luiz Cláudio Cândido - Universidade Federal de Ouro Preto
[Ms.] - Tainan Ferreira Muniz - Instituto Federal de Educação de Minas Gerais

[Rodrigo Rangel Porcaro], orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 31/10/2022



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Rangel Porcaro, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/10/2022, às 10:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0419590** e o código CRC **A59F5570**.

RESUMO

A soldagem é um dos mais importantes processos de obtenção de componentes metálicos e é utilizada também no reparo de componentes em uso. Porém, a energia aplicada em alguns processos de soldagem provoca alterações na microestrutura dos materiais e conseqüentemente nas suas propriedades mecânicas. As tensões residuais geradas podem levar os componentes a falhas, portanto, é necessário aplicar técnicas para reduzir as tensões e conseqüentemente minimizar danos, principalmente em aços aplicados em componentes que exigem elevado grau de confiabilidade, como caldeiras e vasos de pressão. Diante disso, este trabalho consiste em uma revisão bibliográfica exploratória sobre a técnica *temper bead welding* (soldagem com passes de revenimento), analisando-se os efeitos na microestrutura e nas propriedades mecânicas de aços estruturais submetidos à soldagem a partir de trabalhos publicados na literatura.

Palavras chave: Soldagem; *temper bead*; revenimento; aços estruturais.

ABSTRACT

Welding is one of the most important processes for obtaining metallic components and is also used in the repair of components in use. However, the energy applied in welding processes causes changes in the microstructure of materials and consequently in their mechanical properties. The residual stresses generated can lead components to failure, so it is necessary to apply techniques to reduce stresses and consequently minimize damage, especially in steels applied to components that require a high degree of reliability, such as boilers and pressure vessels. Therefore, this work consists of an exploratory literature review on the temper bead welding technique (soldering with tempering passes), analyzing the effects on the microstructure and mechanical properties of structural steels subjected to welding based on published works.

Keywords: Welding; temper bead; tempering; structural steels.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 4.1 - Diagrama Tensão/Deformação ilustrando a região que representa a zona plástica, a zona elástica, a resiliência e a tenacidade (GOMES, 2010)..... | 19 |
| Figura 4.2 - Corrosão uniforme em vaso de pressão (SANTOS, 2021)..... | 22 |
| Figura 4.3 - Diagrama de Graville e as Zonas I, II e II que representam a soldabilidade em função da temperabilidade do material (GRAVILLE, 1976 APUD MATOS, 2017)..... | 24 |
| Figura 4.4 - Esquema de soldagem Temper Bead Welding utilizando a Técnica meia camada: 1. Preparação da junta; 2. Deposição da primeira camada de solda; 3. Preparação da primeira camada (esmerilhamento); 4. Soldagem de preenchimento na região reparada (LANT ET AL., 2001)..... | 32 |
| Figura 4.5 - Micrografia de seções transversais de uma sequência de soldagem: 1. Primeiro cordão de solda depositado ao longo da linha central de uma placa de aço, 2. O segundo cordão de solda depositado do lado direito do primeiro cordão com uma sobreposição de 50%, 3. O terceiro cordão foi depositado no lado oposto ao segundo cordão, também com uma sobreposição de 50% do primeiro, formando a primeira camada de solda. O quarto cordão foi depositado no topo do primeiro, iniciando a segunda camada de solda. (ALORAIER ET AL., 2010)..... | 34 |
| Figura 4.6 - Bloco soldado, modo de Têmpera, solda de seis camadas: a) Layout do bloco de teste para soldagem no modo de Têmpera, onde é indicado a realização de seis camadas de solda; b) Macroestrutura da solda de seis camadas realizada (BRZIAK ET AL., 2011)..... | 38 |
| Figura 4.7 - Microestrutura da ZTA GG de soldas realizadas: a) Região entre o 3º e o 4º cordão de uma soldagem de camada única; b) Ampliação de imagem de região de grãos grosseiros da Figura a); c) Região entre o 2º e o 3º cordão da primeira camada de uma soldagem de três camadas; d) Modo de Têmpera. (BRZIAK ET AL., 2011)..... | 39 |
| Figura 4.8 - Bloco de teste para soldagem multicamada no Modo Revenimento: 10 cordões de solda formando a 1ª camada; 8 cordões formando a 2ª camada; 6 cordões formando a 3ª camada de solda (BRZIAK ET AL., 2011)..... | 40 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.9 - Microestrutura da ZTA GG de soldas realizadas: a) Região entre o 5° e o 6° cordão de uma soldagem de camada única; b) Ampliação de imagem de região de grãos grosseiros da Figura a); imagem apresenta falha de resolução; c) Região entre o 5° e o 6° cordão da primeira camada de uma soldagem de duas camadas; d) Modo de Revenimento (BRZIAK <i>ET AL.</i> , 2011)..... | 41 |
| Figura 4.10 - Microestrutura da seção transversal, lixada e polida, com as setas 1,2 e 3 indicando a direção dos perfis de dureza de um cordão de solda em um aço do tipo AS3678-250 (ALORAIER <i>ET AL.</i> , 2010)..... | 42 |
| Figura 4.11 - Medições experimentais de dureza após a deposição sucessiva de cada cordão: a) Medição de dureza ao longo das três linhas verticais indicadas na Figura 4.9 na amostra 1, retirada após a deposição do 1° cordão de solda; b) Medição de dureza ao longo das três linhas verticais indicadas na Figura 4.9 na amostra 2, retirada após a deposição do 2° cordão de solda; c) Medição de dureza ao longo das três linhas verticais indicadas na Figura 4.9 na amostra 3, retirada após a deposição do 3° cordão de solda; d) Medição de dureza ao longo das três linhas verticais indicadas na Figura 4.9 da amostra 4, retirada após a deposição do 4° cordão de solda (ALORAIER. <i>ET AL.</i> , 2010)..... | 43 |
| Fig. 4.12 - Gráficos de dureza após a deposição sucessiva dos cordões de solda ao longo da: linha 1, (b) linha 2, e (c) linha 3 indicadas na Figura 4.9 (ALORAIER <i>ET AL.</i> , 2010)..... | 45 |
| Figura 4.13 – Microestrutura típica da ZTA GG para um único ciclo térmico de soldagem de aço manganês - molibdênio – níquel - tipo SQV2A simulado em equipamento Gleeble 1500 (MIZUNO <i>ET AL.</i> , 2004)..... | 46 |
| Figura 4.14 - Microestrutura típica da ZTA GG para um ciclo térmico duplo de soldagem de aço manganês - molibdênio – níquel - tipo SQV2A simulado em equipamento Gleeble 1500 (MIZUNO <i>ET AL.</i> , 2004)..... | 47 |
| Figura 4.15 - Microestrutura típica da ZTA GG para um ciclo térmico triplo de soldagem de aço manganês - molibdênio – níquel - tipo SQV2A simulado em equipamento Gleeble 1500 (MIZUNO <i>ET AL.</i> , 2004)..... | 48 |

Fig. 4.16 - Microestrutura típica da ZTA GG para um ciclo térmico quádruplo de soldagem de aço manganês - molibdênio – níquel - tipo SQV2A simulado em equipamento *Gleeble* 1500 (MIZUNO *ET AL.*, 2004).....49

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 4.1 - Classificação dos aços estruturais de acordo com o limite de escoamento mínimo (MPa) (CBCA, 2021)..... | 20 |
| Tabela 4.2 - Temperaturas de pré-aquecimento conforme o valor de carbono equivalente (CALLEGARI E DADALTO, 2011)..... | 29 |
| Tabela 4.3 - Parâmetros usados para soldagem multicamadas de aço do tipo SQV2A pelo modo Consistente com os parâmetros Revenimento a partir da 2ª camada e Têmpera a partir da 2ª camada (BRZIAK <i>ET AL.</i> , 2011)..... | 37 |
| Tabela 4.4 - Parâmetros fixos de soldagem usados no trabalho experimental para investigar os efeitos da técnica TBW na soldagem de um aço do tipo AS3678-250 com uma e com duas camadas (ALORAIER <i>ET AL.</i> , 2010)..... | 42 |

LISTA DE SÍMBOLOS

AT(kJ/cm) - Aporte térmico

$\Delta t_{8/5}$ - Tempo de resfriamento entre 800°C e 500°C

$\Delta T_{8/5}^{\circ}$ - Velocidade de resfriamento entre 800°C e 500°C

Ac1 – Temperatura final de transformação austenítica

Ac3 – Temperatura inicial de transformação austenítica

MA – Constituinte que contém martensita e austenita

LISTA DE SIGLAS

ARBL - Alta Resistência Mecânica e Baixa Liga

ASME - *American Society of Mechanical Engineers*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

Atm – Atmosfera

CBCA - Centro Brasileiro da Construção em Aço

Ceq - Carbono Equivalente

Cr-Mo – Cromo-molibdênio

ESAB – *Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget*

FCAW - *Flux-Cored Arc Welding* (Soldagem a Arco Elétrico com Arames Tubulares)

Gr - Grau

GMAW - *Gas Metal Arc Welding* (Soldagem ao Arco Elétrico com Atmosfera de Proteção Gasosa)

HV – Dureza Vickers

IC - Intercrítico

IIW - *International Institute of Welding*

J - Joule

JIS - Japanese Industrial Standards

mm - milímetros

MPa – Megapascal

RPV - *Reactor Pressure Vessel*

SAW - *Submerged Arc Welding* (Soldagem a Arco Submerso)

SMAW - *Shielded Metal Arc Welding* (Soldagem Manual a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido)

To - Temperatura Inicial

Tp1 – Temperatura de pico 1

Tp2 - Temperatura de pico 2

Tp3 - Temperatura de pico 3

Tp4 - Temperatura de pico 4

TA - Taxa de Aquecimento

TBW – *Temper Bead Welding*

Tc - Temperatura crítica

Tf – Temperatura de fusão

TIG - TungstenInertGas (Soldagem por Gás Inerte de Tungstênio)

Tp- Temperatura de pico

TR - Taxa de Resfriamento

TTAT - Tratamento Térmico de Alívio de Tensões

TTPS - Tratamento Térmico Pós-Soldagem

ZF - Zona Fundida

ZTA - Zona Termicamente Afetada

ZTA GG - Zona Termicamente Afetada de Grãos Grosseiros

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 2 OBJETIVOS..... | 16 |
| 2.1 Objetivo Geral..... | 16 |
| 2.2 Objetivos Específicos..... | 16 |
| 3 DESENVOLVIMENTO..... | 17 |
| 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 18 |
| 4.1 Aços Estruturais..... | 18 |
| 4.2 Soldabilidade e Soldagem dos Aços Estruturais..... | 22 |
| 4.3 Ciclos Térmicos de Soldagem..... | 25 |
| 4.4 Tensões Residuais em Soldas..... | 26 |
| 4.5 Tratamentos Térmicos..... | 29 |
| 4.6 <i>Temper Bead Welding</i> (Soldagem com passes de revenimento)..... | 30 |
| 4.6.1 Técnica da Meia Camada..... | 32 |
| 4.6.2 Técnica da Deposição Controlada ou Técnica da Dupla Camada..... | 33 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 51 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 52 |

1 INTRODUÇÃO

As ligas ferrosas, em especial os aços, têm fundamental importância na construção mecânica por serem materiais versáteis em relação às propriedades como resistência mecânica e ductilidade, entre outras. A seleção do aço adequado a um determinado projeto deve ser criteriosa e o projetista deve considerar os aspectos de engenharia e de custo de produção. A microestrutura do material deve estar adequada às propriedades de desempenho necessárias ao componente em uso. Tais propriedades estão diretamente relacionadas à composição química e ao processo de produção do aço, o que influencia no ciclo de vida útil desse componente (ZARUR, 2022; MARTINS, 2002).

Um componente pode ser produzido por variados processos de fabricação, tais como usinagem, fundição e metalurgia do pó; mas, de acordo com Modenesi (2012), a soldagem é o mais significativo procedimento de união e obtenção de peças metálicas. A soldagem também é aplicada em processos de corte, na restauração de materiais danificados e no revestimento especial de superfícies. Existem diversos tipos de processos de soldagem com aplicações nos mais variados segmentos industriais, que demandam baixa ou elevada tecnologia.

A energia aplicada na soldagem, independentemente do método utilizado, provoca consideráveis alterações no metal base e no metal de solda, gerando a zona termicamente afetada. O fluxo térmico ao qual o material é submetido exerce influência na macroestrutura de solidificação, na microestrutura e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas e características metalúrgicas desse material (MACHADO, 2020).

Assim, as soldas podem apresentar descontinuidades que estão associadas a problemas na zona fundida (ZF) ou na zona termicamente afetada (ZTA), durante ou posterior ao processo de soldagem. As descontinuidades podem ser porosidade, trincas de solidificação, trincas induzidas pelo hidrogênio e diminuição da resistência mecânica, entre outros; o que pode acarretar em falhas na solda ou em regiões vizinhas em processos subsequentes à soldagem ou no material em serviço (MODENESI, 2011).

Um dos principais problemas relacionados à produção de componentes metálicos, valendo-se de processos de soldagem, são as tensões residuais causadas pelas tensões

térmicas. Uma forma de reduzir ou aliviar as tensões residuais, no processo de soldagem, é realizar o pré ou pós-aquecimento do material a ser soldado, pois induz uma redução na velocidade de resfriamento e, conseqüentemente, uma melhor distribuição das tensões. Outra maneira de obter tal resultado é elevar o aporte de calor na soldagem, porém, podem ocorrer alterações metalúrgicas não requeridas (ZEEMANN, 2013).

Após a soldagem, pode-se utilizar um tratamento térmico pós-soldagem (TTPS) ou o alívio mecânico, chamado martelamento. Segundo Modenesi *et al.* (2012), o alívio mecânico consiste em martelar o material depositado durante a soldagem e a sua vizinhança, o que anula as forças de contração, porém a técnica é limitada e não é adequada para materiais de baixa ductilidade. O tratamento térmico para alívio de tensões (TTAT) consiste em submeter o material a um aquecimento uniforme, até a temperatura que seja inferior à temperatura de austenitização e, posteriormente, realizar um resfriamento lento, até a temperatura ambiente, e que resulta na atenuação das tensões internas do material (MODENESI *ET AL.*, 2012). Porém, deve-se considerar que fatores como tempo, custo e efeito de distorções podem inviabilizar a realização de TTAT (ALORAIER *ET AL.*, 2010). Em casos que a estrutura é volumosa ou de grande porte, esse processo também pode ser dificultado. Portanto, faz-se necessário o estudo de alternativas para a aplicação de processo de soldagem sem a realização de TTPS.

Para casos em que não é possível realizar o TTAT, uma alternativa é utilizar a técnica *temper bead welding* (TBW) ou soldagem com passe de revenimento. A técnica consiste em determinar um ciclo térmico adequado e realizar uma soldagem multipasse, em que o calor gerado pelo passe seguinte provoca o efeito de revenimento na camada depositada anteriormente (YU *ET AL.*, 2011).

A técnica TBW é também uma forma de reparar estruturas em aços, em atividades de manutenção, sem a aplicação de um tratamento térmico adicional posterior, como em equipamentos que trabalham sob pressão e que demandam tratamento térmico pós-soldagem. Pode ser aplicada para controlar a microestrutura, a dureza final e outras propriedades do material em regiões adjacentes à solda (GASPAR *ET AL.*, 2012).

Portanto, a técnica TBW se mostra relevante para aplicações nas indústrias química, petroquímica, de óleo e gás, entre outras. Considerando a relevância da técnica na

economia de tempo e custos, entre outras, esse trabalho procurou revisar a literatura e identificar se a aplicação da técnica para os aços estruturais é satisfatória no atendimento das especificações.

2 OBJETIVOS

A seguir são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

2.1 Objetivo Geral

Realizar uma revisão bibliográfica sobre a técnica *temper bead welding* (soldagem com passe de revenimento).

2.2 Objetivos Específicos

Verificar os efeitos da técnica *temper bead welding* na microestrutura e nas propriedades mecânicas de aços estruturais submetidos à soldagem.

Avaliar os efeitos da técnica *temper bead welding* nas tensões residuais de aços estruturais submetidos à soldagem.

3 DESENVOLVIMENTO

A monografia foi desenvolvida por meio de uma revisão bibliográfica, estudo exploratório, sobre a técnica de *temper bead welding* (soldagem com passe de revenimento).

Realizou-se um levantamento das publicações sobre o assunto na literatura e selecionou-se o material relacionado, conforme segue:

1. Foram utilizados 5 livros em português, publicados no período de 2007 a 2020.
2. Foram utilizados 14 artigos científicos, sendo 11 artigos em inglês e 03 artigos em português, acessados pelas plataformas *Google Scholar*, publicados no período de 2001 a 2021. As palavras chaves utilizadas foram: *temper bead welding*, aços estruturais, *pressure vessel*.
3. Foi utilizada 01 monografia disponível na biblioteca virtual da Universidade Federal do Espírito Santo e publicada em 2011.
4. Foram utilizadas 05 dissertações, publicadas no período de 2002 a 2017, disponíveis nas bibliotecas virtuais das seguintes instituições: Universidade Federal do Ceará, Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal do Amazonas e Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
5. Foi utilizada 01 tese disponível na biblioteca virtual da Universidade Federal do Ceará e publicada em 2013.
6. Foram utilizadas também notas de aulas da disciplina de Tecnologia e Metalurgia da Soldagem ofertada no curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto.

Após a leitura exploratória do material selecionado, foram realizadas as anotações das informações ou análises relevantes e o registro das fontes.

Posteriormente, foi feita a análise e discussão das informações, baseando-se nas considerações da literatura.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão definidos alguns conceitos gerais relacionados aos aços estruturais, destinados à fabricação de caldeiras e vasos de pressão; à soldagem desse tipo de aços; e como a energia desse processo afeta o metal. Posteriormente, será descrito o processo de reparo por soldagem, técnicas de soldagem com passes de revenimento e os resultados de alguns trabalhos publicados.

4.1 Aços Estruturais

O aço pode ser produzido com propriedades mecânicas diversificadas para ser aplicado em usos específicos, e o principal fator que interfere na determinação dessas propriedades é a composição química, pois são materiais sensíveis ao teor de carbono. (CALLISTER, 2016). Diferentes teores de carbono conferem diferentes propriedades aos aços, quanto maior o teor de carbono, maior será a resistência mecânica e menor será a ductilidade e a soldabilidade do aço (CÂNDIDO, 2015). Os aços carbono comuns são ligas de ferro e carbono com concentrações residuais de impurezas, e os aços-liga possuem concentrações específicas de outros elementos de liga (CALLISTER, 2016).

Os aços que possuem menos de 0,25% de carbono são classificados como aços de baixo teor de carbono e suas microestruturas são compostas por ferrita e perlita, constituinte formado por uma combinação das fases ferrita e cementita. Esses aços apresentam alta ductilidade, alta soldabilidade e usinabilidade, e não são temperáveis, contudo, a resistência mecânica desses materiais pode ser aumentada por trabalho a frio. São materiais adequados para o trabalho mecânico e aplicados na fabricação de automóveis e formas estruturais. Dentro dessa classe estão os aços de alta resistência mecânica e baixa liga (ARBL), que possuem elementos como titânio, nióbio, vanádio, cromo, cobre, níquel e molibdênio que, em concentrações adequadas, conferem ao aço maior resistência mecânica, maior resistência à corrosão e etc. (CALLISTER, 2016). A resistência mecânica da maioria desses aços pode ser aumentada também pela realização de tratamentos térmicos; pelo encruamento, que é o processo pelo qual o material experimenta uma deformação plástica que induz o aumento da resistência mecânica; e pelo processo de

precipitação de uma segunda fase, derivada de uma solução sólida supersaturada; entre outros mecanismos de endurecimento dos aços (CÂNDIDO & GODEFROID, 2012)

Os aços que possuem de 0,25% a 0,6% de carbono são classificados como aços de médio teor de carbono. Esses materiais, quando temperados e revenidos, apresentam características atrativas de resistência mecânica. São empregados na confecção de componentes mecânicos, como engrenagens e eixos, e componentes estruturais que devem combinar alta resistência mecânica, alta resistência à abrasão e alta tenacidade, sendo essa definida como um somatório de elevada resistência mecânica e elevada ductilidade. (CALLISTER, 2016). Considera-se que a ductilidade é a medida da quantidade de deformação plástica que um determinado material suporta. A tenacidade, graficamente, é definida como a área abaixo da curva tensão-deformação (GOMES, 2010), como ilustra o gráfico da Figura 4.1.

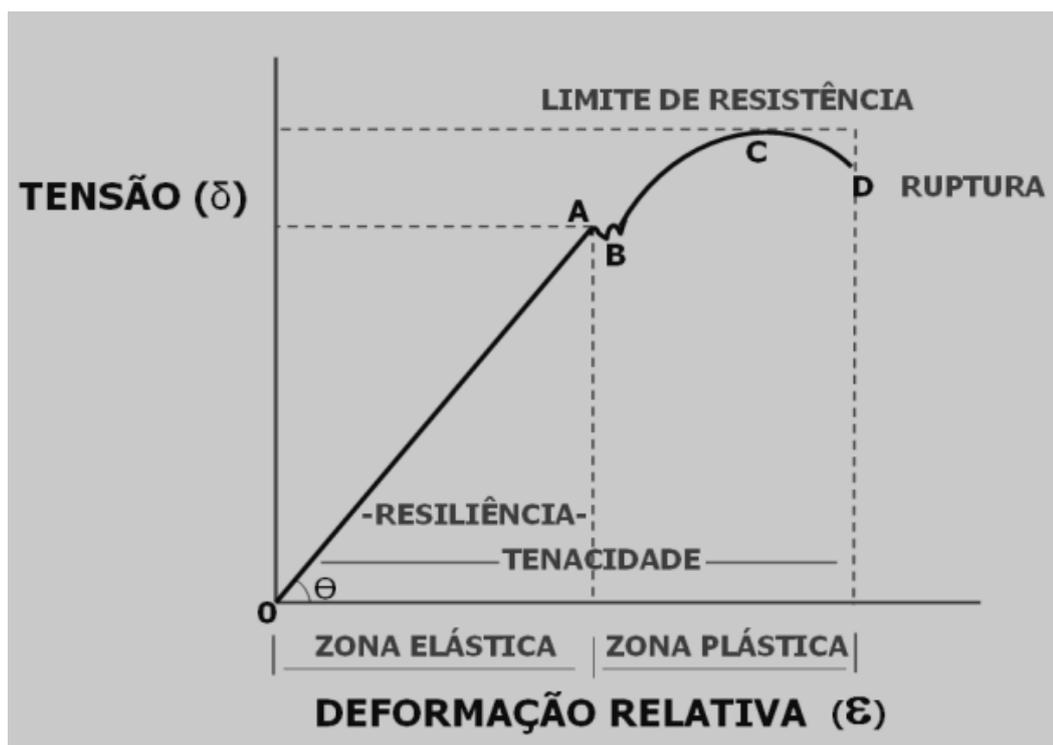


Figura 4.1: Diagrama Tensão/Deformação ilustrando a região que representa a zona plástica, a zona elástica, a resiliência e a tenacidade (GOMES, 2010).

A zona elástica se estende da origem (ponto 0) até o ponto A. Nesta região, a quantidade de energia absorvida pelo material, chamada resiliência, é numericamente igual a área da

região sob essa curva. O ponto B da curva ilustra a região em que ocorre a deformação permanente do material, região de escoamento, onde se inicia a zona plástica. O ponto C da curva representa a tensão e a deformação máximas suportadas pelo material, e o ponto D representa o ponto em que ocorre a ruptura do material. A tenacidade é dada pela energia absorvida pelo material desde a origem até a ruptura e é numericamente igual à área sob a extensão da curva (GOMES, 2010).

Os aços classificados como de alto teor de carbono possuem mais que 0,6% desse elemento e, tem como característica elevada dureza e elevada resistência mecânica após submissão à têmpera. Esses materiais são utilizados na obtenção de componentes com alta resistência ao desgaste, como facas, trilhos ferroviários. (CALLISTER, 2016). Os aços que apresentam média e alta resistência mecânica são chamados aços estruturais e podem ser classificados em três grupos principais, conforme a tensão de escoamento mínima especificada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Classificação dos aços estruturais de acordo com o limite de escoamento mínimo

| Tipo | Limite de escoamento mínimo, MPa |
|---|----------------------------------|
| Aço carbono de média resistência mecânica | 195 a 259 |
| Aço de alta resistência mecânica e baixa liga | 290 a 345 |
| Aço ligado tratado termicamente | 630 a 700 |

Fonte: CBCA, 2021.

Os aços carbono são os materiais de uso geral na confecção da maioria dos vasos de pressão, pois, além das propriedades mencionadas, apresentam melhor relação custo/resistência mecânica e podem ser facilmente obtidos (TELLES, 2007). Os aços do tipo alta resistência mecânica e baixa liga, por exemplo, em atmosferas normais, são mais resistentes à corrosão quando em comparação com os de baixo carbono, portanto, são utilizados em aplicações em que a resistência estrutural é crítica (CALLISTER, 2016).

Vasos de pressão podem ser definidos como recipientes capazes de comportar um fluido pressurizado, no estado líquido ou gasoso. Esses recipientes precisam de elevado grau de confiabilidade, pois são geralmente submetidos a grandes pressões internas, superiores à pressão atmosférica (ROCHA ET AL., 2013).

De acordo com o site a empresa Dox Brasil (2021): “Os Aços Estruturais voltados para aplicação em Vasos de Pressão e Caldeiras são classificados conforme sua faixa de resistência mecânica, as condições de temperatura e de pressão de trabalho.” O grau da chapa de aço varia conforme a pressão/limite de escoamento que será imposta ao material em uma temperatura de operação específica. Esses aços são versáteis no que tange ao desempenho em temperaturas de uso que variam de -60°C a 500°C . Segundo Telles (2007), em temperaturas de serviço que ultrapassam os 400°C , a resistência do aço carbono começa a reduzir significativamente e pode-se observar o fenômeno de fluência, uma deformação plástica experimentada pelo material submetido por longos períodos a tensões constantes, que pode ser ativada por temperaturas elevadas. ,

A chapa de aço carbono mais comumente utilizada na fabricação de vasos de pressão é a do tipo ASTM A516, e o mercado dispõe nos graus 55, 60, 65 e 70, com diferentes faixas de resistência mecânica, que variam com o teor de carbono (MATOS, 2017). As chapas A516 Gr 60 são empregadas em caldeiras e vasos de média pressão. As chapas A516 Gr 70 são utilizadas para caldeiras e vasos de média e alta pressão em que a economia de peso é irrelevante, como tanques inertes (DOX BRASIL, 2021).

Diante do exposto, os aços do tipo ASTM A516 Grau 70 são classificados como aços de alta resistência mecânica e baixa liga, ou seja, possuem teor de carbono inferior a 0,3% e baixos teores de elementos de liga ($< 0,10\%$ em massa). São aplicados, por exemplo, na indústria petroquímica e submetidos a condições severas de operação. O meio quimicamente agressivo ao qual o material é exposto, sob pressões elevadas, que variam de 0,1MPa a 20,69MPa (cerca de 1atm a 204atm), além de altas temperaturas, provocam desgastes nos componentes (MATOS, 2017). Um exemplo de corrosão uniforme ou generalizada é apresentado na Figura 4.2.



Figura 4.2 - Corrosão uniforme em vaso de pressão (SANTOS, 2021)

Quando um componente estrutural fabricado em aço apresenta uma falha, há duas alternativas, ou realizar a substituição ou reparar o componente. Caso a alternativa de reparar seja demandada, a soldagem é usualmente o método escolhido na indústria para a manutenção dos vasos de pressão (CRUZ, 2006).

4.2 Soldabilidade e Soldagem dos Aços Estruturais

O aumento do teor de carbono em aços provoca o aumento da dureza, o que dificulta o alongamento do material e, conseqüentemente, prejudica a ductilidade. O aumento da dureza implica em maior limite de resistência mecânica e de escoamento, porém, afeta negativamente a soldabilidade do aço, pois contribui para a geração de poros e superfícies ásperas na região da solda. Para aços em que o carbono é superior a 0,3% em massa, há maior susceptibilidade de ocorrência de trincas a frio induzidas pelo hidrogênio em uma junta soldada (TELLES, 2007). Santos *et al.* afirmam que as tensões residuais em uma junta soldada tendem a ser trativas, e esse tipo de tensões residuais aumentam o fluxo de hidrogênio para o interior da rede cristalina, favorecendo a formação de trincas induzidas pelo hidrogênio.

O indicador comumente utilizado para considerar a temperabilidade de aços é o Carbono Equivalente (Ceq). A Equação 4.1, proposta pelo IIW (*International Institute of Welding*), é a mais utilizada no ramo da soldagem. Além do teor de carbono, esse parâmetro considera o teor de outros elementos que interferem consideravelmente na

temperabilidade dos aços, que é diretamente proporcional ao C_{eq} , ou seja, quanto maior o C_{eq} mais temperáveis serão os aços (CÂNDIDO, 2015; ESAB, 2021).

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr\%Mo\%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (\text{Equação 4.1})$$

Onde: C_{eq} = Carbono equivalente; %Mn = teor de manganês; %Cr = teor de cromo; %Mo = teor de molibdênio; %V = teor de vanádio; %Ni = teor de níquel; %Cu = teor de cobre.

Quanto mais temperável é um aço, maior é a probabilidade de o material apresentar a formação de martensita, na ZTA e na ZF. A presença desse tipo de microestrutura com comportamento frágil proporciona aos aços dureza elevada e, portanto, baixa ductilidade. Conseqüentemente, os aços tendem a apresentar trincas induzidas por hidrogênio (CÂNDIDO, 2015; ESAB, 2021). Como o teor de carbono nos aços ARBL é baixo, a temperabilidade é influenciada pelos demais elementos de liga presentes.

As zonas estabelecidas no Diagrama de *Graville*, Figura 4.3, orientam a soldabilidade de aços em função da temperabilidade. A zona I indica uma alta soldabilidade e as zonas II e III indicam, respectivamente, média e baixa soldabilidade.

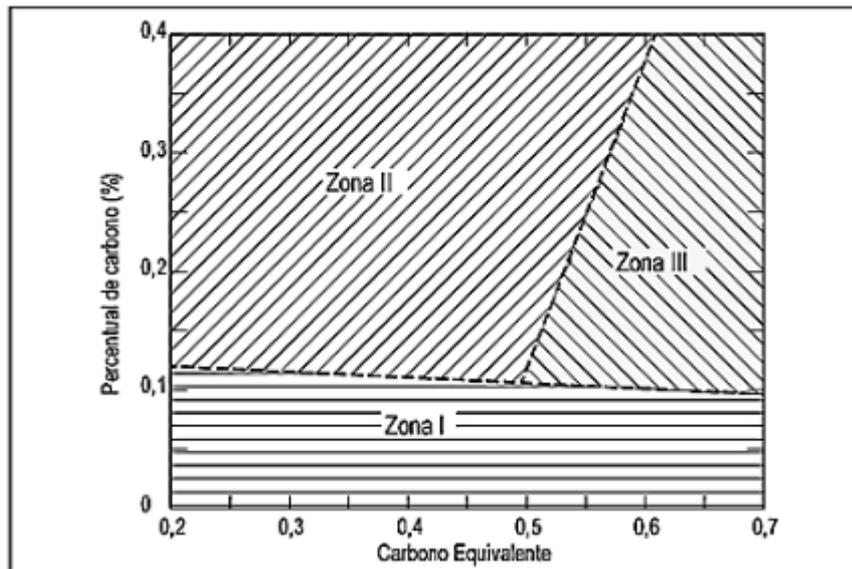


Figura 4.3 - Diagrama de *Graville* e as Zonas I, II e III que representam a soldabilidade em função da temperabilidade do material (GRAVILLE, 1976 APUD MATOS, 2017).

Um aço do tipo ASTM A516 grau 70 que possui C_{eq} 0,42 e teor de carbono acima de 0,15% em massa, de acordo com o Diagrama de *Graville*, é um aço de média soldabilidade. Essa condição indica a necessidade de propiciar a remoção de hidrogênio difusível, controlar e diminuir o tempo de resfriamento entre as temperaturas de 800°C e 500°C, $\Delta t_{8/5}$. O resfriamento acelerado pode gerar estruturas com grãos duros, suscetíveis à fragilização por hidrogênio, como por exemplo, a martensita. Em contrapartida, a diminuição do $\Delta t_{8/5}$ propicia menos oportunidade para a difusão do hidrogênio pela solda e pela ZTA e, conseqüentemente, minimiza a possibilidade de ocorrência de trincas após a soldagem (MATOS, 2017).

No processo de soldagem de aços de alta resistência mecânica podem ocorrer trincas induzidas pelo hidrogênio ou trincas a frio, que se caracterizam como um dos principais problemas da soldagem destes aços. Tais trincas podem ocorrer no metal de solda ou na zona termicamente afetada. Podem ser causadas pela influência dos níveis de tensão, pela susceptibilidade da microestrutura, pelo teor de hidrogênio e pela temperatura (PORCARO, 2021), fatores que estão relacionados com a taxa de resfriamento; logo, o controle do ciclo térmico é fundamental na formação de uma junta soldada livre de trincas.

O tipo de processo, a velocidade de resfriamento, o aporte térmico e o tempo de resfriamento, bem como as características geométricas, a realização ou não de pré ou pós-

aquecimento, influenciam na microestrutura do material submetido à soldagem e conseqüentemente nas suas propriedades. Esse fato tem relação direta com o comportamento do material ou peça quando em uso. O aumento do aporte térmico pode ocasionar a geração de precipitados ou fases intermetálicas não desejadas e a variação nos valores de microdureza, além de favorecer a difusão do hidrogênio. Uma taxa de resfriamento menor pode ocasionar um crescimento do tamanho de grão na zona termicamente afetada, o que aumenta a temperabilidade, caracterizando uma fragilização do material. Aportes térmicos menores podem resultar em juntas soldadas mais eficientes, com propriedades mecânicas e metalúrgicas mais satisfatórias. Portanto, é preciso fazer um balanço entre aporte térmico e sua influência sobre a taxa de resfriamento e o possível crescimento de grão na ZTA (PORCARO, 2021).

4.3 Ciclos Térmicos de Soldagem

De acordo com Porcaro (2021), os ciclos térmicos de soldagem são definidos como as curvas que relacionam a variação da temperatura em pontos da região de solda, durante o processo de soldagem, em função do tempo. Variações intensas de temperatura são características da maioria dos processos ao arco elétrico e é um dos principais fatores da soldagem.

O tipo de processo, a realização ou não de pré ou pós-aquecimento, o aporte térmico, e o número de passes, entre outros fatores, determinam a forma das curvas de ciclo térmico, que pode favorecer ou não a ocorrência de discontinuidades e defeitos de soldagem. A verificação do ciclo térmico de soldagem promove o prognóstico da ocorrência de transformações metalúrgicas.

Os principais elementos dos ciclos térmicos são:

Temperatura inicial (T_0) – é a temperatura de início da soldagem

Temperatura máxima ou Temperatura de pico (T_p) – é a maior temperatura experimentada por um determinado ponto. Caso essa temperatura seja superior à de fusão dos materiais, o ponto é parte da zona fundida. Quanto maior a temperatura máxima e o

tempo de permanência nesta temperatura, maior é a vaporização metálica, que pode implicar em perda de elementos de liga. No caso da ZTA, o principal efeito de um maior tempo de permanência é o crescimento de grão.

Temperatura crítica (T_c) – é a temperatura a partir da qual o material pode passar por transformações metalúrgicas no estado sólido, que podem provocar alterações das propriedades do material.

As temperaturas máximas atingida a cada ponto e a velocidade de resfriamento dependem das propriedades físicas do material e dos parâmetros de soldagem. As curvas de repartição térmica estabelecem a variação da temperatura de pico na região soldada em função da distância do centro do cordão, e a análise dessas curvas possibilita estimar a extensão das zonas termicamente afetadas e que possivelmente possam ter passado por transformações metalúrgicas.

Em aços com grande espessura, as tensões geradas pelos ciclos térmicos de soldagem não são suficientes para provocar deformações macroscópicas (distorções), uma vez que esses materiais são rígidos, porém induzem tensões residuais. Deve-se considerar também que nesses materiais a dissipação de calor favorece o resfriamento rápido e por consequência a formação de microestruturas com comportamento frágil (SILVA *ET AL.*, 2018; ESAB, 2021).

A soldagem dos aços estruturais deve atender, cautelosamente, técnicas operatórias que impliquem em uma velocidade de resfriamento apropriada. Portanto, o movimento de tecimento dos cordões deve ser evitado e, quando necessário, em casos de soldagem vertical ascendente, ele deve ser o menor possível evitando-se que a temperatura entre passes ultrapasse a especificada (MODENESI, 2011).

4.4 Tensões Residuais em Soldas

Um dos maiores problemas no monitoramento da integridade de componentes mecânicos é a possibilidade de ocorrência de uma fratura frágil não prevista em condições regulares de operação. A falha em uma estrutura, principalmente se houver um

concentrador de tensão, depende, basicamente, da capacidade do componente em absorver deformações plásticas localizadas (ROCHA *ET AL.*, 2013).

As tensões residuais podem ser definidas como aquelas presentes em um material sem a atuação de qualquer força exterior. Podem ser provocadas pela retirada de parte do material ou pela submissão deste a carregamentos térmicos ou mecânicos (RODRIGUES, 2007).

Em processos de soldagem, as variações de temperatura geram um estado de tensão residual nos componentes soldados que, a depender da magnitude e da distribuição, podem favorecer ou prejudicar a estrutura. As tensões residuais geralmente são danosas, podem provocar a deformação da superfície do material e contribuir para falhas estruturais (MANSUR *ET AL.*, 2011).

A presença de tensões residuais estáticas de compressão na superfície de um material leva ao aumento da resistência em fadiga, considerando que o aparecimento de trincas é retardado. Em contrapartida, as tensões residuais de tração implicam na redução da resistência à fadiga (MANSUR *ET AL.*, 2011).

A dilatação e a contração térmica relacionadas à variação de temperatura experimentada por um material soldado, devido ao aquecimento e resfriamento heterogêneo, provocam o surgimento de tensões residuais (ZEEMANN, 2013). Tais tensões podem ser consideradas como uma resposta elástica do material a uma distribuição dissimilar de deformações plásticas e transformações de fases ocorridas, entre outras deformações não elásticas (RODRIGUES, 2007).

As tensões residuais podem ser produzidas também pela ocorrência de um resfriamento intenso na superfície do material, que em contato direto com o ar, resfria mais rapidamente que o interior. Esse tipo de ocorrência é frequente na soldagem de chapas ou tubulações de grande espessura, em razão do gradiente de temperatura entre a superfície e o centro da peça (OLIVEIRA, 2009).

Outra fonte de tensões residuais durante a soldagem são as transformações de fases no estado sólido experimentadas pelo material. As transformações de fases podem decorrer do movimento de átomos termicamente ativados, modo difusional, ou do deslizamento

promovido pelas tensões cisalhantes, modo não-difusional. As tensões cisalhantes derivam do resfriamento acelerado que não permite a ocorrência de difusão atômica para a decomposição da austenita. O modo difusional tem como principais produtos a ferrita e a perlita, e o modo não-difusional forma os constituintes bainita e martensita (OLIVEIRA, 2009).

Tensões residuais cooperam para falhas por fadiga e corrosão, o que diminui significativamente a vida útil das estruturas soldadas, e podem alterar a resposta mecânica dos componentes, constituindo uma das principais causas de falhas (OLIVEIRA, 2009). A existência de tensões residuais induz uma diferença de potencial, assim, em meios líquidos, pode gerar uma corrosão localizada. Além disso, uma região tensionada apresenta maior número de discordâncias, o que faz com que o material fique mais reativo (PAREDES, 2018).

Os métodos empregados na minimização de tensões residuais induzidas pelo processo de soldagem podem ser classificados em métodos para amenizar o surgimento dessas tensões e métodos de alívio de tensões existentes. As tensões residuais podem ser amenizadas adotando-se medidas relacionadas ao planejamento da operação, como escolha do processo, o consumível a ser utilizado e a realização de pré-aquecimento (BEREZHNYTS'KA, 2001). É necessário um controle da quantidade de energia aplicada no material, uma vez que é determinante nas características da solda e das zonas afetadas pela Temperatura de pico (T_p), Temperatura crítica (T_c) e Temperatura de fusão (T_f) (MODENESI, 2012), portanto, a fonte de calor e sua eficiência são fatores importantes.

A temperatura de pré-aquecimento bem como a temperatura de interpasse interfere significativamente no ciclo térmico de soldagem, modificam as microestruturas e alteram as propriedades mecânicas e metalúrgicas do metal de solda e da ZTA. A temperatura de pré-aquecimento deve ser adequada ao tipo de aço, quanto maior o teor de elementos de liga do metal base, de maneira mais significativa o carbono, maior é a temperatura de pré-aquecimento necessária. Essa temperatura é função também das dimensões do material (MATOS, 2017).

Uma temperatura de pré-aquecimento adequada reduz a velocidade de resfriamento na junta, o que favorece a eliminação do hidrogênio e uma estrutura mais dúctil e menos

suscetível a trincas, reduz as tensões relacionadas às contrações tanto no metal de solda quanto no metal base e adjacências (MATOS, 2017). A Tabela 4.2 apresenta a sugestão de valores de temperaturas de pré-aquecimento conforme o carbono equivalente.

Tabela 4.2 - Temperaturas de pré-aquecimento conforme o valor de carbono equivalente

| Faixa | Carbono equivalente | Temperatura recomendada |
|-------|---------------------|-------------------------|
| 1 | <0,30 | Opcional |
| 2 | 0,31 – 0,45 | 100°C - 200°C |
| 3 | 0,45 – 0,60 | 200°C - 250°C |
| 4 | >0,60 | 250°C - 300°C |

Fonte: CALLEGARI E DADALTO, 2011

Portanto, para um aço do tipo ASTM A516 Grau 70 com C_{eq} 0,42, em que o custo seja justificado, recomenda-se um pré-aquecimento em temperaturas dentro da Faixa 2. Os métodos para alívio de tensões são empregados após a realização da solda, como tratamentos térmicos e tratamentos mecânicos, em que há aplicação de força (BEREZHNYTS'KA, 2001).

Uma maneira de atenuar as tensões em componentes soldados é realizar um Tratamento Térmico para Alívio de Tensões (TTAT). Trata-se de um Tratamento Térmico Pós-Soldagem que promove também a diminuição da dureza na ZTA e na ZF, a diminuição de deformação, o aumento da ductilidade e da resistência à corrosão sob tensão (MATOS, 2017; ESAB, 2021).

4.5 Tratamentos Térmicos para Alívio de Tensões

A fabricação de vasos de pressão demanda a utilização de aços com propriedades mecânicas que atendam critérios e requisitos normatizados, contudo, tais propriedades são modificadas como consequência dos ciclos térmicos a que o material é submetido no processo de soldagem. O material experimenta uma elevação da dureza na ZTA, o que exige TTAT para eliminar tensões residuais (YU ET AL., 2011).

As normas que controlam o reparo de componentes utilizando o processo de soldagem, propõem o TTPS para reduzir a dureza, as tensões residuais e obter uma tenacidade satisfatória na região termicamente afetada. Os danos em regiões soldadas de vasos de pressão e estruturas dos equipamentos de caldeiraria são decorrentes das próprias circunstâncias de operação e o reparo por soldagem tende a promover alterações que comprometem a região reparada (CRUZ, 2006).

Para se definir um TTAT deve-se considerar a Taxa de Aquecimento (TA), o Tempo e a Temperatura de Patamar, e a Taxa de Resfriamento (TR). Esses parâmetros são definidos com o auxílio de normas internacionais, como a ASME seção VIII divisão 1, conforme a dimensão e a composição química do material. Aços carbono são normalmente aquecidos na faixa de 600°C a 675°C, durante uma hora para cada polegada de espessura (aproximadamente 25mm) (ESAB, 2021).

Os TTPS podem ser uma boa alternativa para a solução de problemas resultantes do reparo por soldagem, porém, podem ser custosos quando se analisa o comprometimento da produção e o tempo demandado, além de pessoal e equipamentos. A realização de TTPS pode ser dificultada pela complexidade técnica das instalações necessárias, considerando o custo e o controle de temperaturas em trabalhos de campo (CRUZ, 2006). Os TTPS também podem estar relacionados à difusão de carbono dos aços de alta resistência mecânica e consecutivamente pela precipitação de carbonetos em regiões austeníticas, que provocam a fragilização dessas áreas (OLIVEIRA, 2013).

Portanto, faz-se necessário a adoção de técnicas de soldagem que não exijam TTPS e que produzam juntas soldadas com as propriedades mecânicas demandadas pelos componentes (CRUZ, 2006). A técnica *Temper Bead Welding (TBW)* ou soldagem com passes de revenimento é um processo dentro dessa condição.

4.6 *Temper Bead Welding* (Soldagem com passes de revenimento)

Existem algumas técnicas de TBW, como por exemplo, a técnica da meia camada, em que se realiza a retificação da primeira camada antes que a seguinte seja depositada. Pela técnica de retrocesso, os cordões são depositados na direção oposta de soldagem

(ALORAIER *ET AL.*, 2010). Já a técnica da dupla camada, segundo Oliveira (2013), promove uma sobreposição adequada de ciclos térmicos, para proporcionar o refino de grãos da zona termicamente afetada de granulação grosseira (ZTA GG) e o revenimento do material, para corrigir a tenacidade e a dureza.

De acordo com Dobrotã (2020), a geometria das juntas soldadas, utilizando-se a técnica de TBW, também pode influenciar no resultado. A aplicação do TBW induz uma redução na dureza da ZTA e um tratamento térmico localizado, tanto nas camadas de solda anteriores como na ZTA, o que influencia nas propriedades mecânicas dessas regiões.

Aloraier *et al.* (2010) afirmam que a aplicação da técnica TBW produziu resultados relevantes relacionados à microestrutura de um aço do tipo AS3678-250, ao tamanho da ZTA e à dureza. A técnica foi aplicada em placas do aço, que é do tipo estrutural de baixo carbono, medindo 200x100x12mm usando FCAW. Tomków *et al.* (2019) afirmam que os estudos do processo TBW mostraram a eficácia do método na diminuição da suscetibilidade de trincas a frio na soldagem de chapas de aço do tipo S460ML, com espessura de 14mm, um aço estrutural de grãos finos.

O método foi proposto para a realização de reparos em região de roscas em flanges de vaso de pressão (RPV) de Unidade CPR1000, tipo comum na China, para evitar trincas a frio. Foram avaliadas as propriedades de fadiga e tensões residuais de soldagem após a aplicação de três camadas, com resultados satisfatórios, pois os componentes reparados pela técnica atenderam à especificação do projeto (HUANG *ET AL.*, 2021).

O Código ASME para caldeira e vaso de pressão (ASME BPVC) seção IX (QW-290) apresenta equações para a qualificação do processo TBW, que é avaliado por ensaio de dureza ou ensaio de impacto. Stewarte e Alexandrov (2021) desenvolveram um estudo no sentido de produzir uma metodologia de quantificação da resposta ao revenimento em aços soldados pela técnica de multipasse, que experimentam transformação martensítica e bainítica na ZTA durante a soldagem, abordando o aspecto microestrutural, que se reflete na redução da dureza. Os resultados mostraram que o maior número de ciclos de revenimento levaram à medição de menor dureza.

4.6.1 Técnica da meia camada

A técnica da meia camada foi desenvolvida para aplicação na indústria nuclear, mas se tornou popular em reparos de tubulações de alta temperatura, cabeçotes e carcaças de turbinas em usinas de energia convencionais. Na aplicação dessa técnica, a área a ser reparada deve ser limpa e o pré-aquecimento deve ser realizado em temperatura compatível com o material e sua espessura (GOSWAMI, 2017).

Após realizar a primeira camada de soldagem, metade dessa camada é removida por retificação e uma segunda camada é depositada, provocando transformações na primeira camada e na ZTA de granulação grossiera. A retificação deve ser realizada após a deposição de cada camada. A retificação deve ser precisa, de maneira que não haja remoção excessiva de material e os efeitos do revenimento não sejam satisfatórios (GOSWAMI, 2017). A Figura 4.4 apresenta uma sequência esquemática do procedimento de soldagem utilizando a técnica da meia camada.

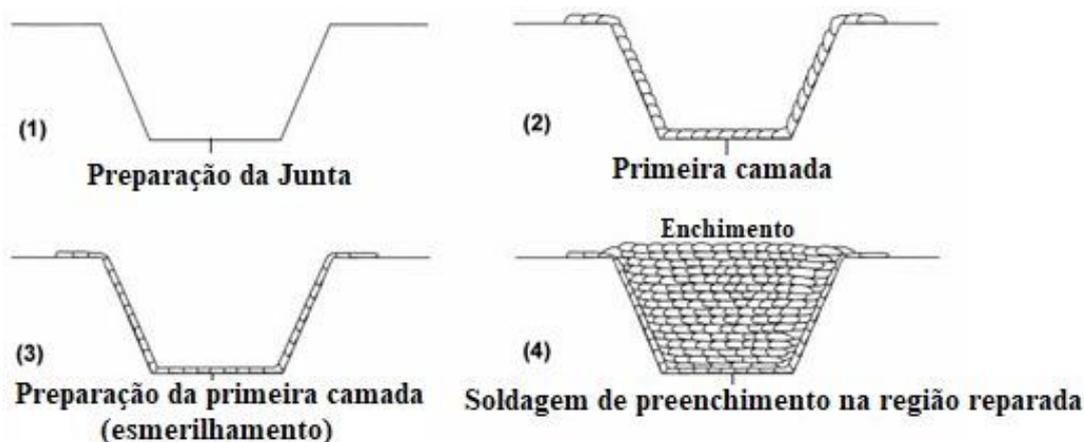


Figura 4.4 - Esquema de soldagem *Temper Bead Welding* utilizando a Técnica da meia camada: 1. Preparação da junta; 2. Deposição da primeira camada de solda; 3. Preparação da primeira camada (esmerilhamento); 4. Soldagem de preenchimento na região reparada (LANT ET AL., 2001)

Utilizando-se o processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW), a técnica é aplicada com o uso de três eletrodos de diâmetro crescente e a primeira camada é depositada com o eletrodo de menor diâmetro, produzindo uma ZTA menor. Para a terceira camada e posteriores, utiliza-se o eletrodo de maior diâmetro. Essa

sequência proporciona um aumento gradual de entrada de calor para o revenimento entre as camadas (GOSWAMI, 2017).

Considerando que a técnica exige supervisão criteriosa, pois há uma dificuldade de controlar a altura de remoção ou retificação da primeira camada, que é realizada manualmente e eleva o custo do procedimento, a sua aplicação é reduzida (CRUZ, 2006). Assim, a técnica da dupla camada é a mais aplicada no reparo de componentes.

4.6.2 Técnica da deposição controlada ou Técnica da dupla camada

A técnica de deposição controlada foi desenvolvida para o reparo de aços C-Mn em usinas convencionais de combustível fóssil, devido à susceptibilidade desses à fragilização por fluência e por trincas induzidas pelo reaquecimento durante o reparo (GOSWAMI, 2017). De acordo com Cruz (2006): “A técnica da dupla camada consiste em promover uma adequada sobreposição dos ciclos térmicos, de tal forma que a segunda camada promova o refino e o revenimento da ZTA GG da primeira.”

Utilizando-se o processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW), aplicam-se relações para um controle de entrada de calor entre as camadas, que produz o refino e o revenimento de grãos na ZTA. As relações de entrada de calor entre as camadas devem ser verificadas experimentalmente, conforme o material a ser soldado, e o aumento na entrada de calor na camada seguinte deve variar entre 30% e 70%, o que pode ser conseguido com o aumento do diâmetro do eletrodo. O calor introduzido na deposição da camada seguinte provoca transformações na região de granulação grosseira e o revenimento na região intercrítica. Idealmente, a sobreposição deve ser de 50% (GOSWAMI, 2017).

A Figura 4.5 apresenta a micrografia de uma sequência de soldagem na qual o primeiro cordão foi depositado ao longo da linha central de uma placa e o segundo foi depositado em um lado do primeiro cordão com uma sobreposição de 50%. O terceiro cordão foi depositado no lado oposto ao segundo cordão, também com uma sobreposição de 50% do primeiro, formando a primeira camada de solda. O quarto cordão foi depositado

no topo do primeiro, iniciando a segunda camada de solda e produzindo o efeito de revenimento.

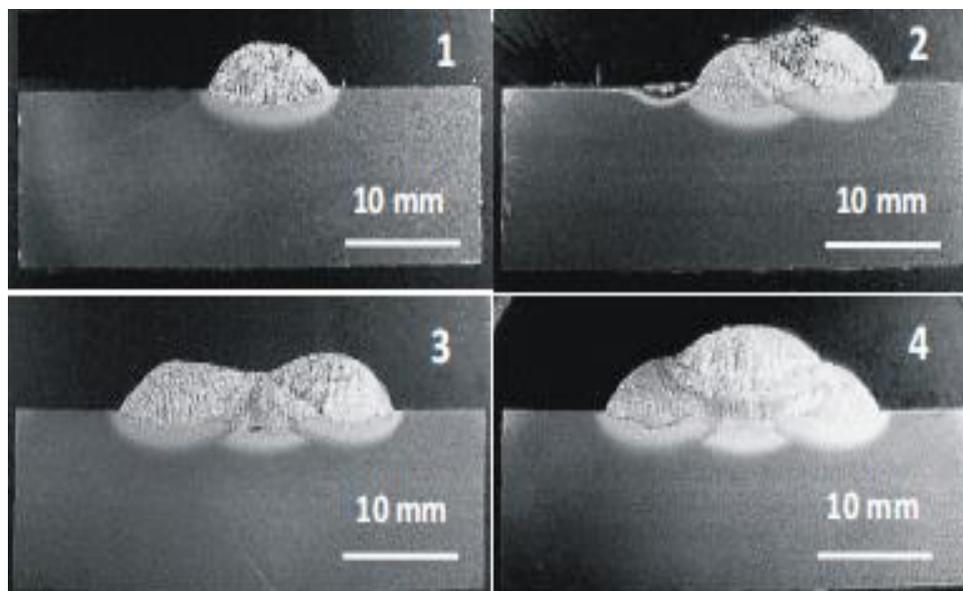


Figura 4.5 - Micrografia de seções transversais de uma sequência de soldagem: 1. Primeiro cordão de solda depositado ao longo da linha central de uma placa de aço, 2. O segundo cordão de solda depositado do lado direito do primeiro cordão com uma sobreposição de 50%, 3. O terceiro cordão foi depositado no lado oposto ao segundo cordão, também com uma sobreposição de 50% do primeiro, formando a primeira camada de solda. O quarto cordão foi depositado no topo do primeiro, iniciando a segunda camada de solda. (ALORAIER *ET AL.*, 2010)

Portanto, para que o resultado da aplicação desta técnica seja satisfatório, é preciso a adequação da energia de soldagem do primeiro e do segundo passe, além do controle da temperatura inicial e de interpasses. O método tem como vantagem possibilitar a redução de custos, uma vez que não é necessária a retificação do primeiro passe (CRUZ, 2006).

Oliveira (2009), em sua dissertação de mestrado, aplicou a técnica da dupla camada na soldagem de amostras de um aço do tipo ASTM A516 Gr70 e verificou a promoção do refinamento de grãos e do revenimento da ZTA GG, além do acréscimo de tensões residuais compressivas nas superfícies analisadas. As juntas apresentaram valores de dureza e microdureza similares.

Lant *et al.* (2001), após analisarem as principais literaturas da época sobre a aplicação da soldagem com passes de revenimento em reparos nas indústrias de energia,

petroquímica e refinarias, concluíram que a técnica proporcionou economia de tempo no reparo de componentes envelhecidos, evitando procedimentos de TTPS. Contudo, a técnica demanda a habilidade do operador, logo, procedimentos automatizados possibilitam maior controle de sobreposição do cordão e, conseqüentemente, maior qualidade.

O aço manganês - molibdênio - níquel (Designação do material SQV2A, Padrão JIS/Japão) foi desenvolvido, com composição química adequada e tratamento térmico controlado, para a produção de vasos de pressão na indústria de energia no Japão. Sua microestrutura consiste em grão fino de martensita e bainita inferior, que conferem ao material uma combinação interessante de propriedades de resistência mecânica e ductilidade em baixas temperaturas. Quando submetido a reparos por processos de soldagem, os ciclos térmicos aos quais o material é exposto induzem o aparecimento de regiões com propriedades mecânicas inadequadas. A diminuição da resistência mecânica, geralmente, é atribuída à formação de austenita, seguida pela transformação parcial em martensita, quando a ZTA de granulação grosseira experimenta um ciclo térmico entre as temperaturas inicial (A_{c3}) e final (A_{c1}) da transformação austenítica, ou seja, experimenta um aquecimento intercrítico. O comportamento mecânico dessa região pode ser melhorado aos níveis solicitados, dureza HV menor que 350 e energia de impacto maior que 200J (aproximadamente 70% da absorvida pelo metal base), com a realização de um tratamento térmico pós-soldagem a 620°C , por um período de 60min a 120min. Porém, a realização desse tratamento térmico pós-soldagem na recuperação dessas regiões pode ser limitado por condições críticas de custo ou de acesso, o que justifica a aplicação do processo TBW (BRZIAK *ET AL.*, 2011).

O Código ASME (Seção XI, Caso N-432-1, para caldeira e vaso de pressão) introduziu o reparo desse material aplicando-se a técnica de TBW pelo processo de soldagem GTAW automática com a aplicação de três camadas, o que consiste em uma inovação, pois a técnica exigia seis camadas. BRZIAK *et al.* (2011) investigaram os efeitos dos ciclos térmicos na tenacidade de um aço do tipo SQV2A. Foram realizadas simulações em máquina *Gleeble*, que indicaram um comportamento mecânico satisfatório na ZTA GG:

1. Operando no modo de revenimento, o efeito foi obtido por vários ciclos térmicos menores que A_{c1} , melhorando a energia absorvida sob impacto e reduzindo a dureza;

2. Operando no modo Têmpera, os ciclos térmicos com valores aproximados de Ac3 (~1000°C) induziram o refinamento na ZTA de granulação grosseira e, conseqüentemente, o aumento da energia de impacto; o ciclo térmico seguinte foi responsável pela têmpera da microestrutura de grão fino e a energia absorvida sob impacto pela ZTA foi aumentada para além de 200J, porém, a dureza atingiu valores superiores a 350HV. A segunda camada promoveu a têmpera e a terceira camada o revenimento no metal. O ciclo térmico de refino, no qual foi promovida uma austenitização de baixa temperatura, aproximadamente 900°C, fez com que a ZTA de granulação grosseira fosse refinada. Essa região teve maior absorção de energia de impacto, cerca de 250J, quando foram aplicados ciclos térmicos menores que Ac1 e uma soldagem de baixo aporte térmico e $\Delta t_{8/5}$ de 3,5s.

A seguir são apresentados os principais resultados obtidos no trabalho desenvolvido por Brziak *et al.* (2011). Diversos pré-requisitos geométricos simples foram atendidos para a realização da solda e os experimentos foram realizados com os mesmos parâmetros ao longo de toda a soldagem, o que é conhecido como soldagem CONSISTENTE. A Tabela 4. 3 resume as condições de soldagem para ambos os modos.

Tabela 4.3 - Parâmetros usados para soldagem multicamadas de aço do tipo SQV2A pelo modo Consistente com os parâmetros Revenimento a partir da 2ª camada e Têmpera a partir da 2ª camada

| Parâmetro | Modo de soldagem (CONSISTENTE) | |
|--|--|-------------------------------|
| | Revenimento a partir da 2ª camada | Têmpera a partir da 2ª camada |
| MB | Aço do tipo SQV2A, placa 200 x 300 x 36 mm | |
| Metal de adição | TGS-56, ϕ 1,2 mm, baixa liga da empresa Kobelco | |
| Gás de Proteção [l / min]: | Argônio, 18 | |
| Temperatura de pré-aquecimento [C]: | 150 | |
| Temperatura entre passagens [C]: | 150-160 | |
| Entrada de calor [kJ / cm]: | 8,6 | 9,3 |
| Corrente de soldagem [A]: | 115 | 150 |
| Velocidade de soldagem [cm / min]: | 8 | 10 |
| Tensão de soldagem [V]: | 10 | |
| Velocidade de alimentação do arame [cm / min]: | 52,4 | 42 |
| Relação de potência [kW×cm]: | 15 | 32,8 |
| Número de camadas: | 3 | 6 |

Fonte: BRZIAK *ET AL.*, 2011

A Figura 4.6a apresenta o *layout* do bloco de teste para soldagem no modo de Têmpera, onde é indicado a realização de seis camadas de solda. A Figura 4.6b apresenta a macroestrutura da solda realizada pelo modo de Têmpera. Observa-se, pela Figura 4.6b, que a solda não apresentou trincas, poros ou ausência de fusão.

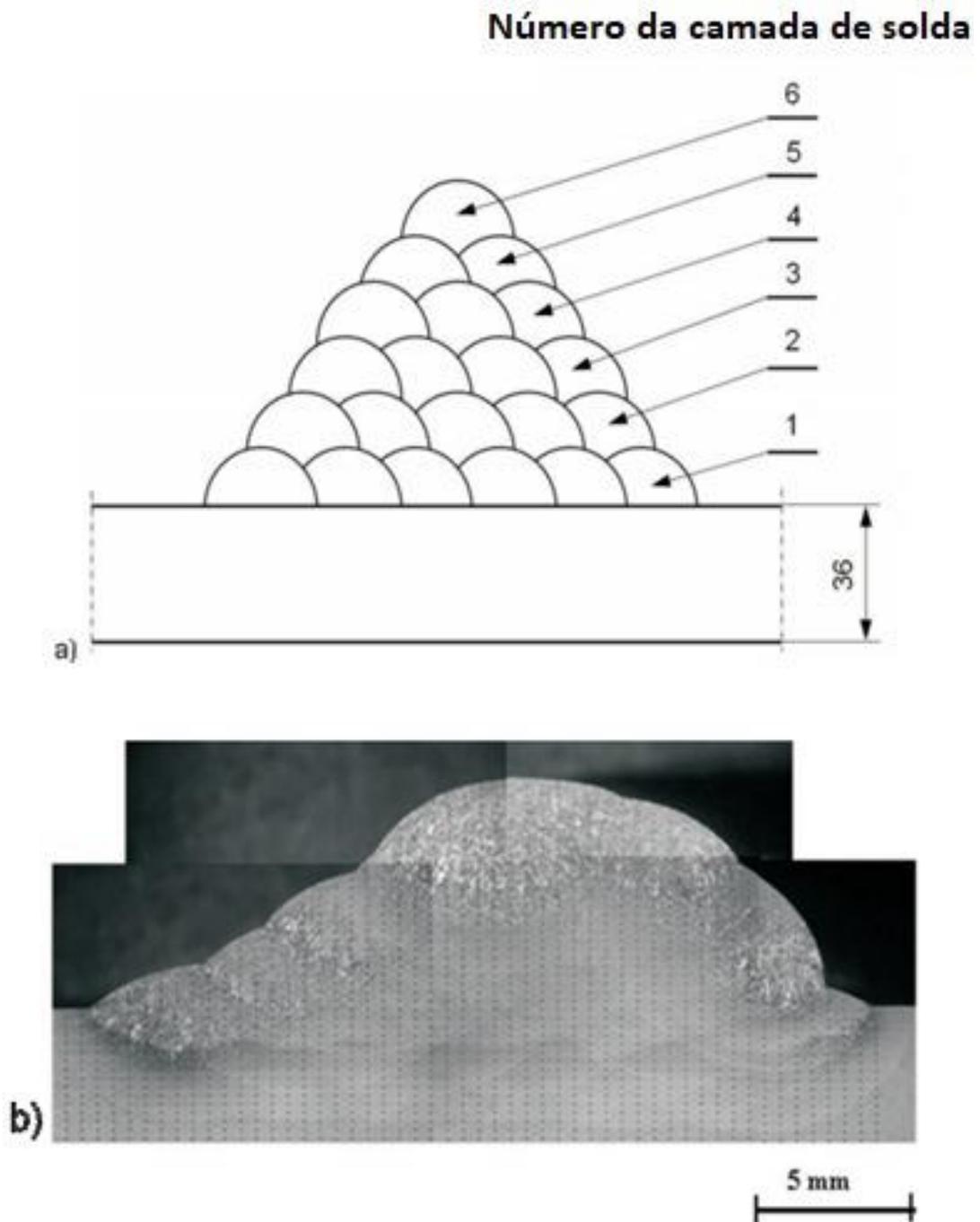


Figura 4.6 - Bloco soldado, modo de Têmpera, solda de seis camadas: a) Layout do bloco de teste para soldagem no modo de Têmpera, onde é indicado a realização de seis camadas de solda; b) Macroestrutura da solda de seis camadas realizada (BRZIAK *ET AL.*, 2011)

A temperatura de pico de cada camada de solda foi estimada a partir dos experimentos realizados com o mesmo *layout* do bloco de teste e as mesmas condições de soldagem. A temperatura de pico da 2ª camada foi estimada em 960°C e a temperatura de pico da 3ª camada em 705°C. Sendo Ac1 e Ac3, 672°C e 834°C, respectivamente. Portanto, entende-se que a têmpera da 2ª camada ocorreu e o revenimento da 3ª camada não

(BRZIAK *ET AL.*, 2011). Foram avaliadas as microestruturas da zona intercrítica de granulação grosseira do metal base em soldas de uma e três camadas.

A Figura 4.7 ilustra a microestrutura da zona crítica de granulação grosseira, martensita e bainita superior, com solda simples e de três camadas. As Figuras 4.7a e 4.7b apresentam a microestrutura entre o 3º e o 4º cordão de uma soldagem de camada única. Notam-se grãos grosseiros no centro da Figura 4.7a, ampliada na Figura 4.7b. A dureza de 282HV indicou o efeito de revenimento induzido por outros cordões de solda.

As Figuras 4.7c e 4.7d apresentam a zona de granulação grosseira entre o 2º e o 3º cordão da 1ª camada de uma solda de três camadas. Nota-se o refinamento de grão na Figura 4.6c. A microestrutura observada no canto inferior direito da Figura 4.7d sugere a influência do ciclo térmico da segunda camada e a microestrutura observada na parte superior da Figura 4.7d evidencia a influência do ciclo térmico intercrítico, considerando a temperatura de pico da 3ª camada. O efeito de revenimento dos cordões subsequentes foi comprovado pela dureza, 271HV (BRZIAK *ET AL.*, 2011).

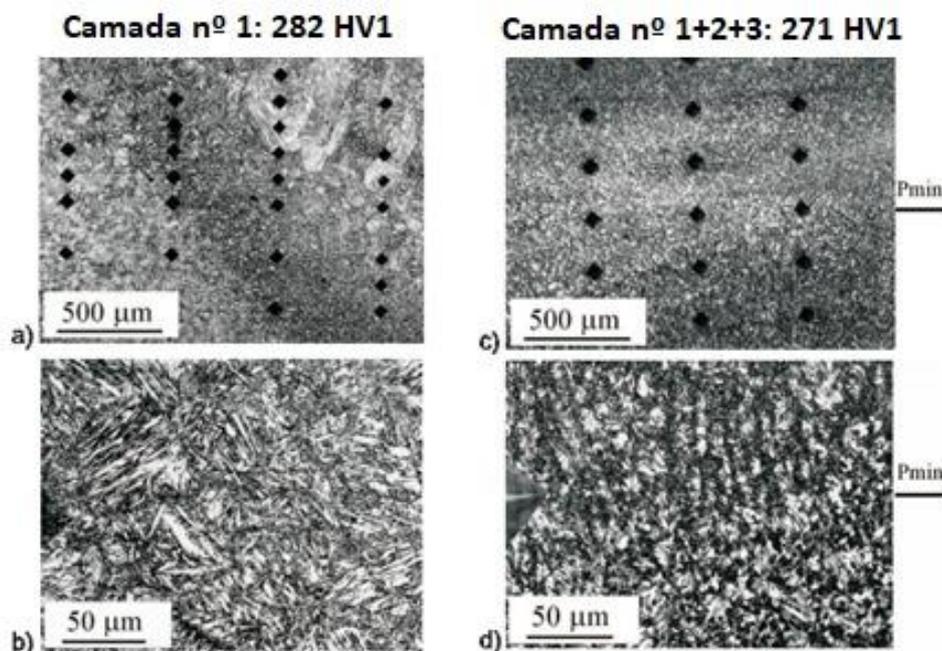


Figura 4.7 - Microestrutura da ZTA GG de soldas realizadas: a) Região entre o 3º e o 4º cordão de uma soldagem de camada única; b) Ampliação de imagem de região de grãos grosseiros da Figura a); c) Região entre o 2º e o 3º cordão da primeira camada de uma soldagem de três camadas; d) Modo de Têmpera.

(BRZIAK *ET AL.*, 2011)

O *layout* do bloco de teste para soldagem no Modo Revenimento é apresentado na Figura 4.8 Um conjunto de seis termopares foi distribuído na superfície do bloco, com diferentes distâncias, para avaliar o ciclo térmico. Amostras das três camadas foram retiradas para análise da microestrutura e medição de dureza.

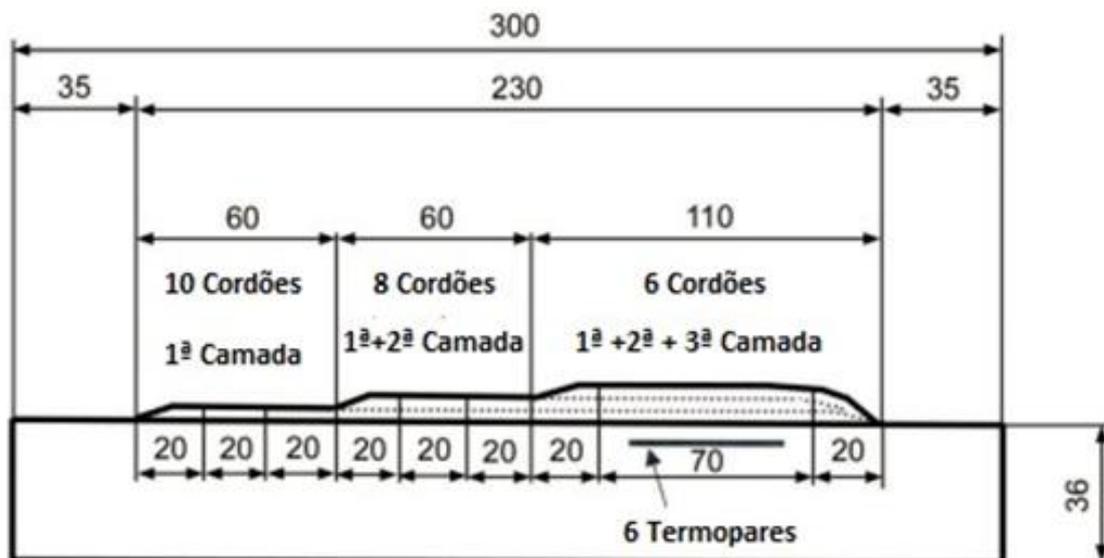


Figura 4.8 - Bloco de teste para soldagem multicamada no Modo Revenimento: 10 cordões de solda formando a 1ª camada; 8 cordões formando a 2ª camada; 6 cordões formando a 3ª camada de solda (BRZIAK *ET AL.*, 2011)

A Figura 4.9 apresenta a microestrutura entre o 5º e o 6º cordão na soldagem da primeira camada (4.9a e 4.9b) e após a fabricação da segunda camada (4.9c e 4.9d). A zona intercrítica (IC) de grãos grosseiros pode ser observada no centro das Figuras 4.9a e 4.9c, o que indica que não houve a reaustenitização das áreas durante a confecção da segunda camada. A região intercrítica está compreendida entre A_{c1} e A_{c3} , onde ocorre uma transformação parcial da microestrutura em austenita. Como é uma região enriquecida em carbono, a temperabilidade dessa zona é maior. A Figura 4.9b (4.9a ampliada) revela uma microestrutura típica para a ZTA de granulação grosseira submetida ao ciclo IC na soldagem de primeira camada: grão de austenita grosseiro, martensita predominante e o constituinte MA. O constituinte MA é derivado da transformação incompleta da fase austenita em bainita e pode ser observado em torno do antigo grão de austenita inteiro. O constituinte MA pode ser observado também dentro do grão. A dureza de 252HV indicou a ocorrência de revenimento. A coloração vermelha e verde na imagem 4.8b é decorrente de uma falha de resolução.

A Figura 4.9d indica que a 2ª camada provocou um revenimento adicional. A microestrutura possui uma coloração mais escura e os grãos possuem aspecto mais cinzento, o que pode ser uma manifestação de precipitação de carbonetos. O valor da dureza medida, 254HV1, foi aproximado do valor do medido na soldagem de uma camada, 252HV1, talvez devido ao efeito mútuo de endurecimento por precipitação de carbonetos.

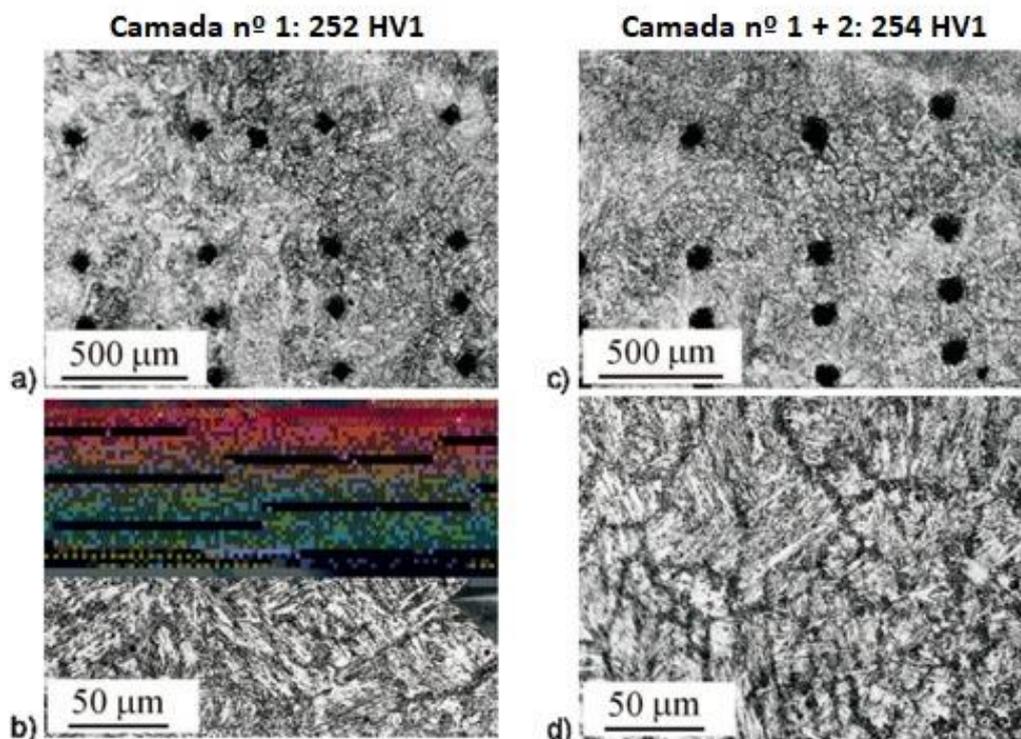


Figura 4.9 - Microestrutura da ZTA GG de soldas realizadas: a) Região entre o 5º e o 6º cordão de uma soldagem de camada única; b) Ampliação de imagem de região de grãos grosseiros da Figura a); imagem apresenta falha de resolução; c) Região entre o 5º e o 6º cordão da primeira camada de uma soldagem de duas camadas; d) Modo de Revenimento (BRZIAK *ET AL.*, 2011)

Como mencionado, o trabalho desenvolvido por Aloraier *et al.* (2010) investigou os efeitos da técnica TBW, em termos de características microestruturais da ZTA e do metal de solda. Foram depositados, usando o processo FCAW, quatro cordões de solda, em uma placa de aço do tipo AS3678-250, 200mm x 100mm x 12mm, e a simulação numérica foi realizada usando o *software FEA VrWeld* para avaliar a microestrutura, dureza e tamanho da ZTA. A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros de soldagem usados no trabalho para investigar os efeitos da aplicação da técnica TBW.

Tabela 4.4 - Parâmetros fixos de soldagem usados no trabalho experimental para investigar os efeitos da técnica TBW na soldagem de um aço do tipo AS3678-250 com uma e com duas camadas

| Parâmetro | Modo de soldagem (CONSISTENTE) | |
|---|--------------------------------|-------------------|
| | Primeira camada | Camada Sobreposta |
| Diâmetro do eletrodo (mm) | 1,6 | |
| Faixa de corrente (A) | 215-245 | |
| Faixa de tensão (V) | 23-25 | |
| Velocidade transversal (mm / min) | 560 | 290 |
| Velocidade de alimentação do arame (mm / min) | 3600 | |
| Distância de fixação do eletrodo. (mm) | 20 | |
| Taxa de fluxo de gás (litro / min) | 20 | |

Fonte: ALORAIER *ET AL.*, 2010

Para analisar a microestrutura, seções transversais das soldas foram lixadas e polidas até um acabamento de $3\mu\text{m}$ e atacadas com solução de Nital 2%. Os cordões de solda e a seção transversal podem ser observados na Figura 4.10. Foram traçadas linhas transversais em todas as amostras, nas mesmas posições e dimensões ao longo das quais a dureza foi medida, com o objetivo de avaliar o efeito do cordão subsequente no metal de solda, na ZTA e no material do cordão anterior.

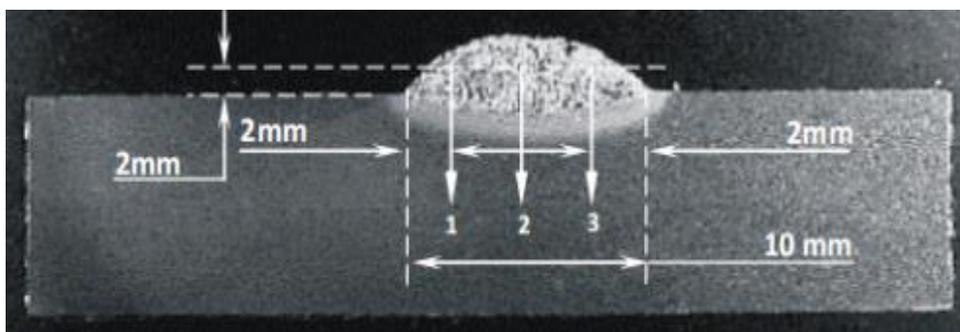


Figura 4.10 - Microestrutura da seção transversal, lixada e polida, com as setas 1,2 e 3 indicando a direção dos perfis de dureza de um cordão de solda em um aço do tipo AS3678-250 (ALORAIER *ET AL.*, 2010)

Foi realizado o ensaio de dureza *Vickers* para medir a dureza em três linhas verticais movendo-se do metal de solda para a ZTA e para o metal base, como indicado na Figura 4.10 pelas setas 1, 2 e 3. Após a deposição de cada cordão de solda, foi preparada uma amostra e a medição de dureza realizada, portanto, considerando que foram depositados quatro cordões, foram geradas quatro amostras. A Figura 4.11 ilustra os gráficos de dureza após a deposição de cada cordão de solda. A Figura 4.11a apresenta a medição de dureza da região do metal de solda, ZTA e metal base após a deposição do primeiro cordão. As Figuras 4.11b, c e d ilustram, após o segundo, terceiro e quarto cordão de solda, respectivamente.

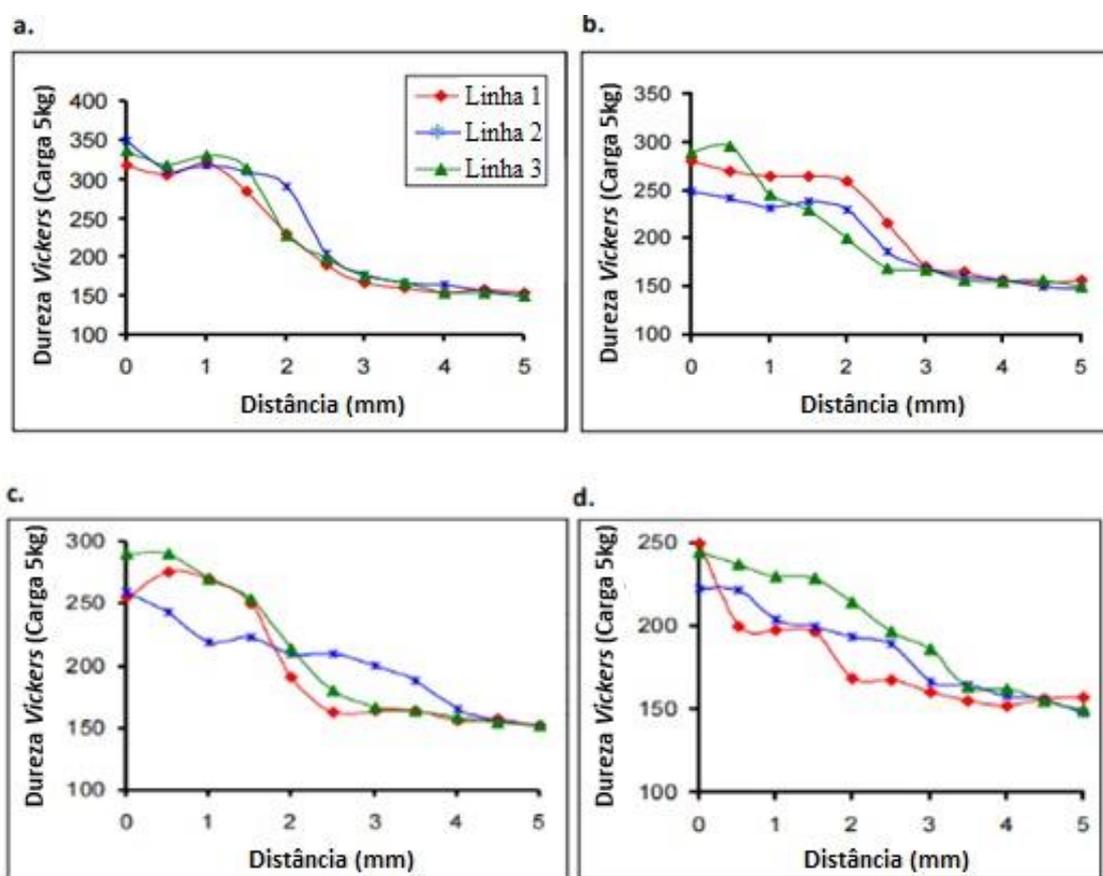


Figura 4.11 - Medições experimentais de dureza após a deposição sucessiva de cada cordão: a) Medição de dureza ao longo das três linhas verticais indicadas na Figura 4.10 na amostra 1, retirada após a deposição do 1º cordão de solda; b) Medição de dureza ao longo das três linhas verticais indicadas na Figura 4.10 na amostra 2, retirada após a deposição do 2º cordão de solda; c) Medição de dureza ao longo das três linhas verticais indicadas na Figura 4.10 na amostra 3, retirada após a deposição do 3º cordão de solda; d) Medição de dureza ao longo das três linhas verticais indicadas na Figura 4.10 da amostra 4, retirada após a deposição do 4º cordão de solda (ALORAIER *ET AL.*, 2010)

Observou-se uma diminuição significativa da dureza após a deposição de cordões subsequentes de solda, como ilustra a Figuras 4.11. Tal diminuição foi resultado do alívio de tensões na martensita. Observou-se também que a ZTA de granulação grosseira relacionada ao primeiro cordão foi totalmente refinada após a deposição dos cordões laterais por soldagem bidirecional. Para a amostra 1, que contém um único cordão, Figura 4.11a, foram registrados valores elevados de dureza na região do cordão de solda e na ZTA de granulação grosseira.

A Figura 4.12 apresenta os gráficos de dureza após a deposição dos cordões de solda ao longo das três linhas, conforme indicado na Figura 4.10. O gráfico da Figura 4.12a apresenta a medição de dureza em quatro tempos diferentes ao longo da linha 1 indicada na Figura 4.10. O eixo das abscissas mede a distância a partir da linha central da placa.

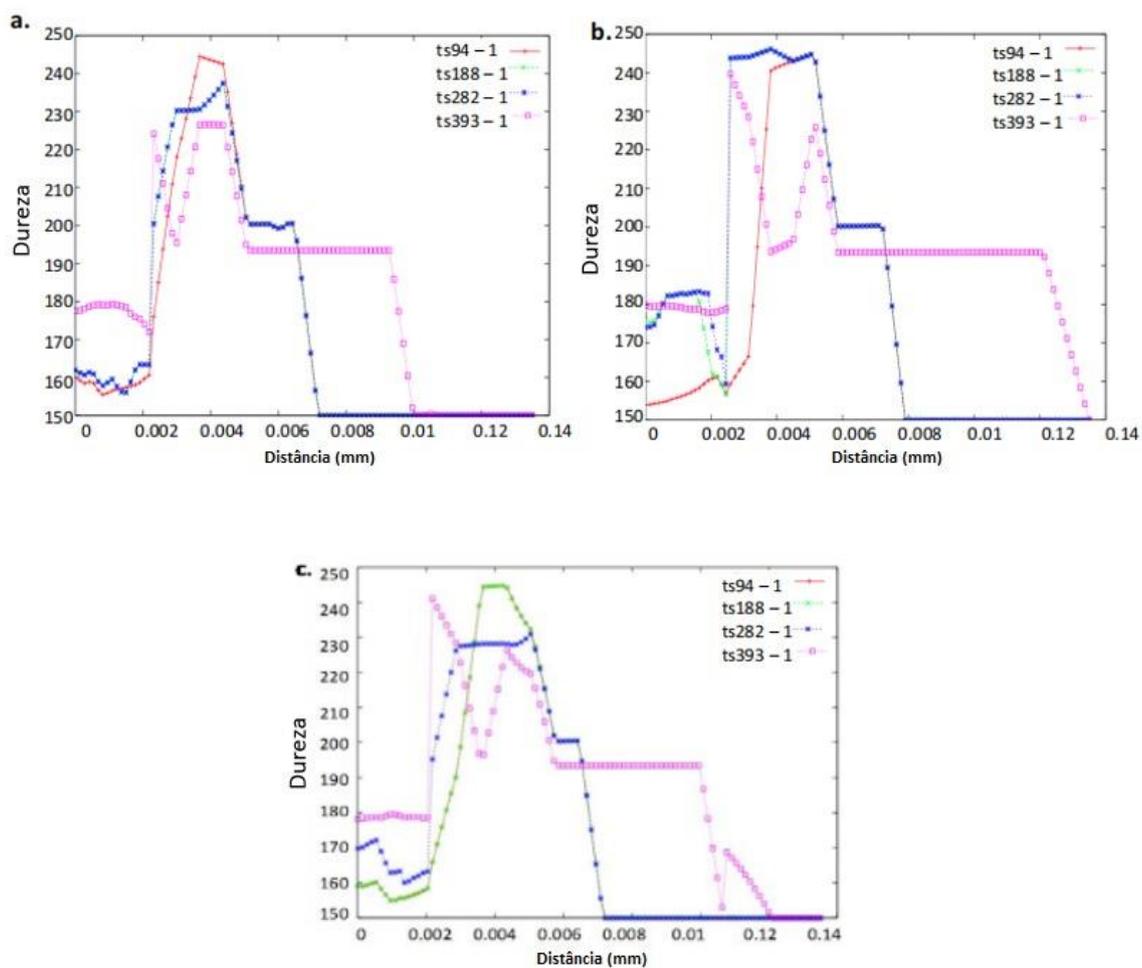


Fig. 4.12. Gráficos de dureza após a deposição sucessiva dos cordões de solda ao longo da: (a) linha 1, (b) linha 2, e (c) linha 3 indicadas na Figura 4.9 (ALORAIER *ETAL.*, 2010)

Nota-se, pela Figura 4.12 que após a deposição dos cordões subsequentes, os valores de dureza diminuíram consideravelmente. A zona de granulação grosseira associada ao primeiro cordão foi refinada após a deposição dos cordões esquerdo e direito. A redução da dureza foi resultado do alívio das tensões internas dos grãos de martensita e da segregação dos átomos de carbono nas discordâncias/deslocamentos. Os resultados obtidos indicaram um refinamento de grãos da ZTA, além disso, uma redução na dureza foi obtida com a deposição do segundo cordão de solda.

O aço manganês - molibdênio - níquel (tipo SQV2A) também foi analisado por Mizuno *et al.* (2004). Foram simulados, em equipamento *Gleeble* 1500, ciclos térmicos simples, duplos, triplos e quádruplos para a realização de uma soldagem GTAW. O primeiro ciclo térmico produziu uma ZTA de granulação grosseira, como apresenta a

Figura 4.13, com uma temperatura de pico (Tp1) de aproximadamente 1350°C. A temperatura de pico do segundo ciclo térmico (Tp2) variou de 600°C a 1000°C. O terceiro e quarto ciclos térmicos foram simulados com as temperaturas de pico (Tp3 e Tp4) na faixa de 300°C a 800°C, respectivamente.



Figura 4.13 – Microestrutura típica da ZTA GG para um único ciclo térmico de soldagem de aço manganês - molibdênio - níquel - tipo SQV2A simulado em equipamento Gleeble 1500 (MIZUNO *ETAL.*, 2004)

O primeiro ciclo térmico gerou uma estrutura com maior dureza e, conseqüentemente, menor absorção de energia de impacto quando comparado com o resultado do ensaio realizado no metal base. A energia absorvida pelo material diminuiu cerca de um terço e a dureza dobrou de valor.

De acordo com Mizuno *ETal.*, para um ciclo duplo, realizado para averiguar a influência da segunda camada de solda, houve um aumento da energia absorvida sob impacto pela ZTA de granulação grosseira, de 100J para 200J, induzindo uma taxa de recuperação de energia absorvida de aproximadamente 70%. Houve também uma diminuição da dureza de cerca de 457HV para menos de 350HV.

A Figura 4.14 apresenta as microestruturas após o ciclo térmico duplo. Para temperatura de pico menor do que Ac1 (670°C), não foi observado o constituinte MA, Figura 4.14a. Foi observada a precipitação de carbonetos como consequência do efeito de revenimento do segundo ciclo na martensita formada no primeiro ciclo térmico. Para temperatura de pico na faixa de temperatura Ac1 a Ac3 (837°C), Figuras 4.14b e d, foi

observado o constituinte MA e uma região reaustenitizada ao longo dos contornos de grão de austenita anterior. Para temperatura de pico superior a Ac_3 , foram observados os grãos de austenita anterior refinados, devido à reaustenitização e transformação em martensita, novamente, da microestrutura do primeiro ciclo, como ilustra a Figura 4.14c.

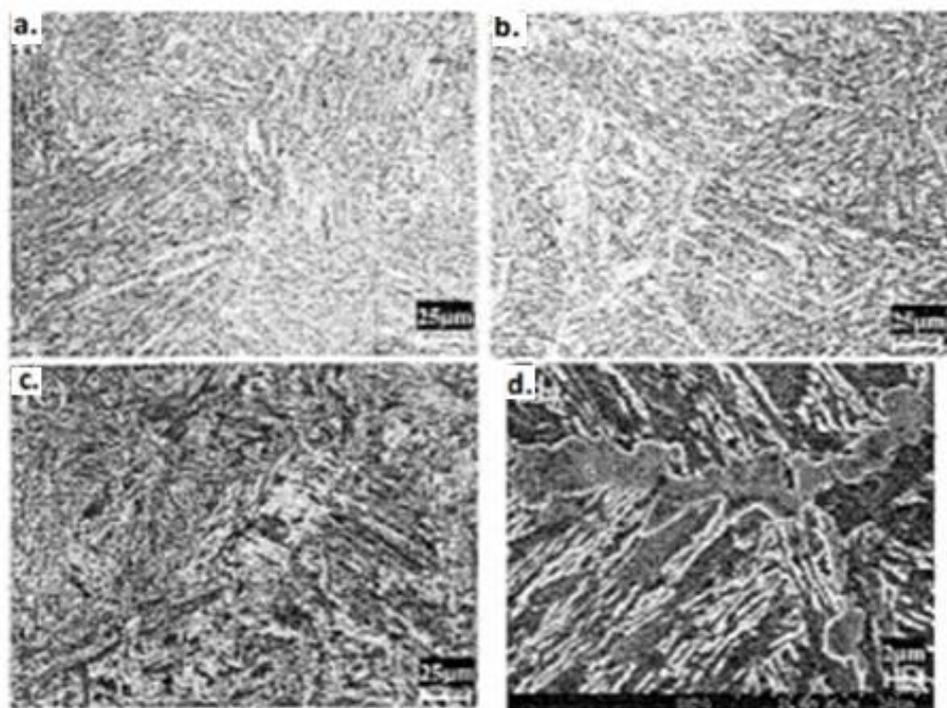


Figura 4.14 - Microestrutura típica da ZTA GG para um ciclo térmico duplo de soldagem de aço manganês - molibdênio - níquel - tipo SQV2A simulado em equipamento *Gleeble* 1500 (MIZUNO ETAL., 2004)

Para o ciclo térmico triplo, realizado para investigar a influência da terceira camada, no caso de Tp_2 ($650^{\circ}C$), menor que Ac_1 , a energia absorvida sob impacto e a dureza após Tp_3 , entre $450^{\circ}C$ e $550^{\circ}C$, não apresentaram alterações quando em comparação com os resultados do segundo ciclo térmico. No caso de Tp_2 ($790^{\circ}C$), entre Ac_1 e Ac_3 , a energia absorvida sob impacto recuperou-se rapidamente entre 50% e 70% daquela do aço original, e a dureza diminuiu para valores inferiores a 350HV com Tp_3 de $350^{\circ}C$ a $550^{\circ}C$. No caso de Tp_2 maior que Ac_3 e Tp_3 entre $350^{\circ}C$ a $550^{\circ}C$, a energia absorvida sob impacto aumentou e atingiu o mesmo valor do aço original. Todavia, a energia absorvida sob impacto diminuiu novamente quando a temperatura de pico Tp_3 atingiu os $750^{\circ}C$ e a dureza decaiu com o aumento de Tp_3 , mas ainda maior que 350HV.

A Figura 4.15 apresenta a microestrutura após a realização do ciclo térmico triplo. Pela Figura 4.15a observou-se a decomposição do constituinte MA e a precipitação de carbonetos, onde $T_{p2} \sim 750^{\circ}\text{C}$, ou seja, está entre A_{c1} e A_{c3} , e $T_{p3} \sim 458^{\circ}\text{C}$, menor que A_{c1} . Na Fig. 4.15b observou-se a precipitação de carbonetos, o que resultou no efeito de revenimento. Nesse caso, a temperatura de pico no segundo ciclo foi de 927°C , superior a A_{c3} , e T_{p3} igual a 455°C , menor que A_{c1} .

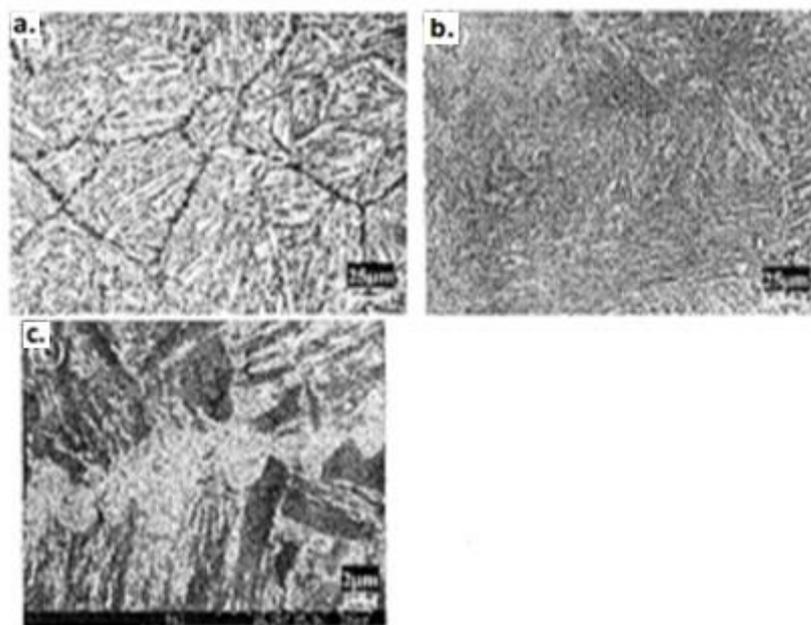


Figura 4.15 - Microestrutura típica da ZTA GG para um ciclo térmico triplo de soldagem de aço manganês - molibdênio - níquel - tipo SQV2A simulado em equipamento *Gleeble* 1500 (MIZUNO ET AL., 2004)

O ciclo térmico quádruplo objetivou avaliar a influência da quarta camada de solda na ZTA. Para essa situação, o segundo ciclo térmico foi simulado com picos de temperatura 615°C , inferior a A_{c1} , 725°C e 825°C , entre A_{c1} e A_{c3} , e 900°C , superior A_{c3} . Para as três temperaturas de segundo ciclo inferiores a A_{c3} , a temperatura do terceiro ciclo térmico foi simulada com 450°C , pois essa temperatura promoveu uma recuperação suficiente, conforme a Figura 4.16a, que é semelhante à Figura 4.15a. A temperatura do quarto ciclo térmico foi variada em 300°C , 400°C , 600°C , 700°C e 800°C . Para a temperatura de segundo ciclo superior a A_{c3} , a temperatura de terceiro ciclo variou nas temperaturas de pico médias de 560°C , 650°C e 750°C , e a temperatura de quarto ciclo térmico variou nas temperaturas de 350°C , 450°C e 550°C , respectivamente. A Figura

4.16b ilustra a microestrutura obtida com $Tp2=906^{\circ}\text{C}$, $Tp3=574^{\circ}\text{C}$ e $Tp4=372$. Nota-se uma microestrutura temperada de grãos finos.

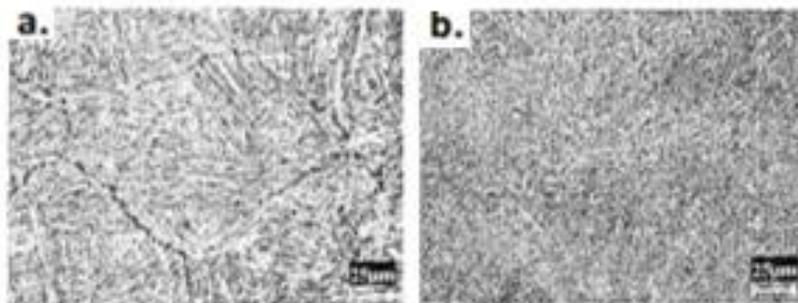


Fig. 4.16. Microestrutura típica da ZTA GG para um ciclo térmico quádruplo de soldagem de aço manganês - molibdênio – níquel - tipo SQV2A simulado em equipamento *Gleeble 1500* (MIZUNO *ETAL.*, 2004)

Considerando os resultados obtidos no trabalho de Mizuno *et al.*, para a ZTA GG, após a utilização da técnica TBW, deve-se considerar uma dureza máxima com valores inferiores a 350HV, pois, para valores de dureza maiores há maior possibilidade de ocorrência de trincas induzidas por hidrogênio. Quanto à energia de impacto Charpy absorvida, deve ser no mínimo 70% do metal base.

Considerando os segundos ciclos térmicos, tem-se a temperatura de pico em três situações, a saber: inferior a $Ac1$, entre $Ac1$ e $Ac3$ e superior a $Ac3$. Na condição em que a temperatura foi menor que $Ac1$, 550°C , a energia absorvida em impacto na ZTA GG aumentou para cerca de 70% do metal base e a dureza diminuiu para valores inferiores a 350HV.

Quando a temperatura de pico de segundo ciclo atingiu valores entre $Ac1$ e $Ac3$, a energia absorvida em impacto na região da ZTA GG diminuiu para menos de 25% em relação à do metal base, e a dureza aumentou para valores superiores a 350HV. Já no terceiro ciclo térmico da temperatura de pico de 450°C , a energia absorvida em impacto alcançou aproximadamente 70% do metal base e a dureza caiu para menos de 350HV.

No caso de temperatura de segundo ciclo superior a $Ac3$, a energia absorvida sob impacto na região da ZTA GG foi superior a 70% do metal base, porém, a dureza foi superior a 350HV devido à re-têmpera da ZTA durante o processo de soldagem. Isso se deve ao fato da temperatura da ZTA experimentar a temperatura de austenitização.

No terceiro ciclo térmico com temperatura de 450°C, a energia absorvida sob impacto foi comparada à do metal base e a dureza da região da ZTA GG foi menor que 350HV. Para temperatura de quarto ciclo de 450°C, a energia absorvida sob impacto praticamente não se alterou, mas a dureza diminuiu para valores menores que 350HV.

Considerando a realização de pré-aquecimento, em todos os casos, a dureza da primeira camada foi superior a 350HV, porém, em algumas regiões foi inferior devido ao efeito do cordão adjacente. Para duas camadas, a dureza da ZTA de granulação grosseira da primeira camada foi inferior a 350HV pelo efeito de têmpera da segunda camada. A confecção de uma terceira camada quase não afetou a dureza devido ao baixo valor de temperatura de pico do ciclo térmico. No caso de três camadas, a dureza foi superior a 350HV após a realização da 2ª camada, porém alcançou valores menores que 300HV após a soldagem da terceira camada (MIZUNO *ET AL.*, 2004).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os trabalhos analisados indicam a efetividade da aplicação da técnica de soldagem com passes de revenimento no reparo de aços estruturais, como os aplicados na fabricação de vasos de pressão, que demandam alta confiabilidade. Quando os ciclos térmicos adequados foram empregados, houve o revenimento, o refino da microestrutura da ZTA GG, a redução da dureza e das distorções associadas às tensões residuais. A dureza e a tenacidade ao impacto são os principais critérios de avaliação do efeito revenido e são afetadas por fatores como a temperatura de pico e número de ciclos térmicos.

Os resultados do trabalho de Aloraier *et al.* (2010) indicaram um refinamento significativo na microestrutura. A redução da dureza foi alcançada após a deposição do segundo cordão de solda, validando a técnica de TBW.

Os resultados do trabalho de Mizuno *et al.* (2004) indicaram que a confecção da segunda camada de solda já induziu uma melhora na tenacidade ao impacto e uma diminuição da dureza que atendeu aos critérios estabelecidos. Com ciclos térmicos adequados, três camadas de soldagem são suficientes para alcançar uma dureza inferior a 350HV.

Diante do exposto, pode-se considerar que a técnica TBW induz resultados satisfatórios em termos de microestrutura e propriedades mecânicas quando aplicada nos aços estruturais submetidos à soldagem, reduzindo a dureza, aumentando a tenacidade ao impacto da ZTA e promovendo o alívio de tensões residuais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALORAIER, A. S.; JOSHI, S.; ASADI, M.; ALENA, R.G.; GOLDAK, J. A. Microstructural and hardness modeling: effect of multiple bead deposition in temper bead welding technique. **International Journal of Energy & Technology**, v. 2, n. 16, p. 1-11, 2010.

BEREZHNYTS'KA. M. P. Research and Testing Methods: Methods for Determining Residual Welding Stresses and Their Relief (A Review). **Materials Science**, v. 37, p. 933–939, 2001.

BRZIAK, P.; ŁOMOZIK, M.; MIZUNO, R.; MATSUDA, F. Repair Welding of Sqv2A Pressure Vessel Steel by Temper Bead Techniques Without Post Welding Heat Treatment. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 56, 205-216, 2011.

CALLEGARI, D. B.; DADALTO, I. T. Análise Técnico-Econômica dos Processos de Soldagem na Reforma do Alto Forno I da Arcelor Mittal Tubarão. 2011. 75 folhas. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução de Sergio Murilo Stamile Soares. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 912p.

CÂNDIDO, L. C. (2015). Aula: Metalurgia da Soldagem de Aços: Carbono, Baixa Liga e Inoxidáveis. [PDF de apoio à disciplina Tecnologia e Metalurgia da Soldagem, lecionada na UFOP, EM].

CÂNDIDO, L. C.; GODEFROID, L. B. (2012). Aula: Mecanismos de endurecimento: Endurecimento por precipitação. [PDF de apoio à disciplina Metalurgia Mecânica, lecionada na UFOP, EM].

CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO - CBCA. Aços Estruturais. Disponível em: <<https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/acos-estruturais.php>> Acesso em 23 de jul. de 2021.

CRUZ, R. L. S. Avaliação dos efeitos da técnica da dupla camada na soldagem do aço ASTM A 516 GRAU 60. 2006. 114 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

DOBROTĂ, D. Optimizing the Shape of Welded Constructions Made through the Technique “Temper Bead Welding”. **Metals**, v. 10, 2020.

DOX BRASIL. Chapas Grossas - Vasos de Pressão: A516 / A517-B. Disponível em: <<https://www.doxbrasil.com.br/produtos/acos/chapas-grossas/chapas-grossas-vasos-de-pressao-a516-a517-b>> Acesso em: 07 ago. 2021.

ESAB. Tratamento Térmico de Alívio de Tensões na soldagem. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/tratamento_termico_alivio_tensoes_soldagem.cfm> Acesso em: 11 jul. 2021.

GASPAR, N. J.; NERIS, M. M.; MORAIS, W. A.; FARIAS, E. S.; MORILLA, J. C. Potencial uso do passe de revenimento no reparo de soldas: avaliação via mapeamento de durezas. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 67, 2012, ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA METALÚRGICA, DE MATERIAIS E DE MINAS – ENEMET, 12, São Paulo. Anais... São Paulo: ABM, 2012.

GOMES, L. S. M. Biomateriais em Artoplastia de Quadril: Propriedades, Estrutura e Composição. In book: O Quadril (pp.121-143). Atheneu, 2010.

GOSWAMI, P. P. Temper Bead Welding-Review of Design Codes and Established Practices. 2017. Disponível em: <https://www.weldfabtechtimes.com/article/___trashed-2/> Acesso em: 30 jul. 2021.

HUANG, T.; JIN, L.; CHEN, T.; QIU, Z. Development and evaluation of welding repair for threaded hole of Reactor Pressure Vessel flange. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 191, 2021.

LANT, T.; ROBINSON, D.L.; SPARFFORD, B.; STORESUND, J. Review of Weld Repair Procedures for Low Alloy Steel Designed to Minimize the Risk of Future Cracking. **International Journal of Pressure Vessel and Piping**, v. 78, p. 813-818, 2001.

MACHADO, I. G. **Condução do Calor na Soldagem: Fundamentos & Aplicações**. Porto Alegre: UFRGS, 2020. 128p.

MANSUR, T. R.; ATANAZIO FILHO, N. DO N.; GOMES, P. DE T. V.; RABELLO, E. G.; SILVA, L. L. DA; SCORALICK, G. A.; SANTOS, M. C. DE V.; BRACARENSE, A. Q. Estudo das tensões residuais em juntas soldadas de materiais dissimilares e determinação dos limites de resistência à fadiga dos metais de base. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v.16, n. 3, p.274-284, jul/set 2011.

MARTINS, M. Temperabilidade Jominy e Influência do Revenido sobre a Dureza - Um Estudo em Aços Estruturais Nacionais. 2002. 115 folhas. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MATOS, G. da S. Estudo dos efeitos térmicos da técnica da dupla camada na soldagem do aço ASTM A 516 grau 70. 2017. 147 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais - PPGCEM, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

MIZUNO, R; BRZIAK, P; LOMOZIK, M; MATSUDA, F. Appropriate Welding Conditions of Temper Bead Weld Repair For Sqv2A Pressure Vessel Steel. In: 30th MPA-Seminar in conjunction with the 9th German-Japanese Seminar Stuttgart. Germany, out/2004.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. Belo Horizonte: UFMG, 2011. 27 p.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 209 p.

OLIVEIRA, G. L. G. de. Soldagem dissimilar dos aços AISI 8630M e ASTM A182 F22 para aplicações subaquáticas. 2013. 228 folhas. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais.) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

OLIVEIRA, G. L. G. de. Avaliação de tensões residuais de soldagem em chapas planas do aço estrutural ASTM A516 G70. 2009. 140 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

PAREDES, R. S. C. Corrosão e Proteção dos Materiais. [PDF Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagem Especiais – Labats DEMEC/TC/UFPR]. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM314/Corros%C3%A3o%20e%20Prote%C3%A7%C3%A3o%20dos%20Materiais.pdf>. Acesso em: 22 out. 2022.

PORCARO, R. R. (2021). Aula 15: Fundamentos do Fluxo de Calor na Soldagem. [PDF de apoio à disciplina Tecnologia e Metalurgia da Soldagem, lecionada na UFOP, EM]. Disponível em: <https://drive.google.com/drive/folders/1VOwrxU2yBYe_Sz2SxZtVQIw-DRawWz-4>. Acesso em: 30 jul. 2022. Material de curso.

ROCHA, M. T. de A.; SILVA, A. S.; SANTOS, S. V. dos; ESTEFANY, R.; GRIZA, S. Análise da Integridade Estrutural do Aço ASTM A516 Gr 55 Aplicado Como Vaso de Pressão Petroquímico através do Ensaio da/dN X ΔK . 2013. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 68, 2013, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABM, 2013.

RODRIGUES, L. D. Medição de Tensões Residuais em Tubos Visando a Determinação de Esforços em Dutos Enterrados. 2007. 155 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Técnico Científico, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SANTOS, J. N. S dos. Corrosão em vasos de pressão. Disponível em: <https://adqconsultoria.com/>. Acesso em: 15 ago. 2021.

SILVA, F. H. A.; CÂNDIDO, L. C; REIS, T. A. J.; BARBOSA, R. A. N. M.; CAMEY, K.; ANDRADE, M. S. Influência do Aporte Térmico na Dureza da Região de Crescimento de Grão da ZTA Simulada na Máquina Gleeble® de Um Aço HTP*. In: Congresso Anual da ABM – Internacional, 73, 2018, São Paulo. Anais... São Paulo: ABM, 2018.

STEWART, J.; ALEXANDROV, B. Quantification of the hardness response in the heat-affected zone of low alloy steels subjected to temper bead welding. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 66, p. 325-340, 2021.

TELLES, P. C. S. **Vasos de pressão**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 302p.

TOMKÓW, J.; ROGALSKI, G.; FYDRYCH, D.; ŁABANOWSKI, J. Advantages of the Application of the Temper Bead Welding Technique During Wet Welding. *Materials* 2019, v. 12, 915.

ZEEMANN, A. Tensões Residuais de Soldagem. 2013. Disponível em <<https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/metal/tenses-residuais-na-soldagem.pdf>> Acesso em: 15 jun. 2021.

YU, L.; NAKABAYASHI, Y.; SASA, M.; ITOH, S.; KAMEYAMA, M.; HIRANO, S.; CHIGUSA, N.; SAIDA, K.; MOCHIZUKI, M.; NISHIMOTO, K. Neural Network Prediction of Hardness in HAZ of Temper Bead Welding Using the Proposed Thermal Cycle Tempering Parameter (TCTP). *ISIJ International*, v. 51, n. 9, p. 1506–1515, 2011. *ISIJ International*, v. 51, n. 9, p. 1506–1515, 2011.