

Guia prática para a caracterização microestrutural resultante de um aço inoxidável duplex depois de submeter-se ao processo de solda

Guide for micro-structural characterization resulting from stainless steel submitted to a welding process

*Orlando Gámez Córdoba*¹

Resumo

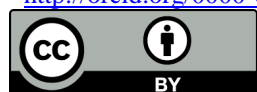
O objetivo do trabalho é propor uma guia para a caracterização microestrutural resultante de um Aço Inoxidável Duplex (DSS) depois de submeter-se ao processo de Solda ao Arco com Gás Protetor e Eletrodo de Tungstênio (GTAW) na disciplina Processos Tecnológicos de Fundição e Soldagem, ditada a estudantes de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Politécnico de Huambo (ISPHbo) de acordo com suas necessidades acadêmicas que permita sistematizar os conhecimentos. Os análises macro e microscópicas realizadas podem-se aplicar em outras disciplinas do currículo. Consegue-se caracterizar a microestrutura resultante do aço inoxidável duplex SAF 2205, obtendo microestruturas livres de fissuras e com boas propriedades mecânicas, (dureza, resistência ao desgaste). As equações desenvolvidas permitem estabelecer o procedimento metodológico dos regimes do processo GTAW.

Palavras-chave: guia, processo de soldagem, aço inoxidável duplex, gtaw, análise microestrutural.

Abstract

The objective of this work is to propose a guide for the microstructural characterization resulting of a Duplex Stainless Steel (DSS) after submitting it to the process of welding to the Arch with

¹Ingeniero Mecánico, Máster en Metalurgia, Industria Cubana del Mueble DUJO, UEB Muebles Ludema, Cuba. Ex profesor del Instituto Superior Politécnico de Huambo, Angola. E-mail: orlandgamez.20041@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4066-2506>



Protector Gas and Tungsten's Electrodes (GTAW) in the Technological process of Foundry and Welding discipline, dictated to students of Mechanical Engineering of Huambo's Higher Polytechnic Institute (ISPHbo), according to its academic needs that permit systematizing knowledge. The macro and microscopic analyses can be applied to other disciplines of the curriculum. It is being able to characterize the resulting microstructure of the duplex stainless steel SAF 2205, obtaining free of fissures microstructures with good mechanical properties (hardness, resistance to the wear). The equations developed permit to establish the methodological procedure of the process GTAW regimes.

Keywords: guide, process of welding, duplex stainless steel, gtaw, microstructural analysis.

Introdução

A formação dos engenheiros e particularmente, a formação dos engenheiros mecânicos, deve responder às necessidades do desenvolvimento social, técnico e econômico do país no âmbito histórico social da época contemporânea.

Em Angola a formação dos engenheiros mecânicos, segundo o Plano Nacional de Desenvolvimento 2013-2017, tem-se declarado políticas para o desenvolvimento de sectores económicos que precisam da formação de profissionais em diferentes linhas das ciências técnicas. O curso de Engenharia Mecânica tem sido apresentado como uma resposta adequada aos novos desafios do desenvolvimento industrial de Angola, procurando satisfazer com qualidade a demanda de técnicos de nível superior que esse desenvolvimento precisa.

A matéria Soldagem que pertence ao programa do grupo de disciplinas Processos Tecnológicos, tem muitos pontos a analisar-se e por conseguinte a estudar-se. Atualmente se faz um estudo teórico ditado em um período de dos horas e esporadicamente se realizam visitas

guiadas para familiarización em diversas empresas a nível local, sem ter a oportunidade de pôr em prática o aprendido durante as aulas teóricas. A falta de laboratório experimental na instituição nos obriga a procurar soluções para que o aluno adquira esses conhecimentos práticos.

Ao contar com classes práticas necessita-se de uma guia que sirva ao estudante poder desenvolver habilidades para a caracterização microestructural de um Aço Inoxidável depois de submeter-se ao processo Solda ao Arco com Gás Protetor e Eletrodo de Tungstênio (GTAW) e estudá-lo de maneira adequada. O desenvolvimento da guia poderá levar a estudante por um caminho ordenado onde se estudarão as equipes utilizadas neste tipo de solda e se familiarizará ao estudante para que possam fazer algum cordão e determinar mediante análise metalográficos a microestructura resultante.

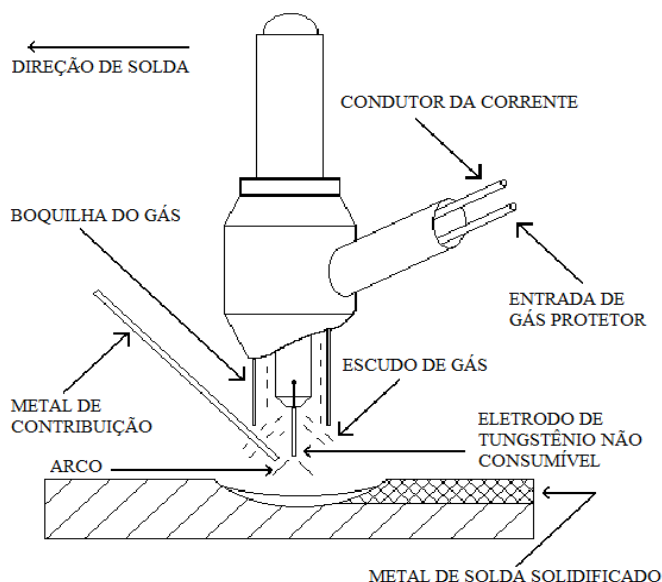
O processo de solda GTAW, é muito utilizado na atualidade para uniões de pranchas magras. Este processo pode realizar-se de duas formas, a primeira utilizando material de contribuição e a outra sem utilizar material de contribuição. Na atualidade o processo GTAW mais utilizado é o que emprega material de contribuição, mas o processo de solda GTAW sem material de contribuição, que cumpra com as propriedades mecânicas requeridas, seria ideal pela vantagem econômica que representa. O processo pode ser usado para soldar aços ao carbono e inoxidáveis, alumínio, magnésio, cobre, etc. (ASM Handbook, 1990; Manual de Soldadura, 1999).

No processo de solda GTAW, a zona de solda é resguardada da atmosfera por um gás inerte que é alimentado através da tocha, Argônio e Hélio podem ser usados com êxito neste processo. A mescla destes dois gases é possível e se usa para aproveitar os benefícios de ambos, mas a seleção do gás ou mescla de gases dependerá dos materiais a soldar.

Quadro 1

GUIA PRÁTICA PARA A CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL RESULTANTE

Esquema de solda com eletrodo de tungstênio e gás (GTAW). Fonte: ASM Handbook, 1990, Manual de Soldadura, 1999.



Os aços inoxidáveis se diferenciam de outros aços durante o processo de solda pelas mudanças morfológicas que sofrem quando lhe aplica o ciclo térmico de solda. Estas mudanças são notáveis pela predição da microestrutura, pelas características da zona afetada pelo calor e pela evolução da microestrutura na zona de fusão (Alpizar, 2003; Ricaurte et al., 2007).

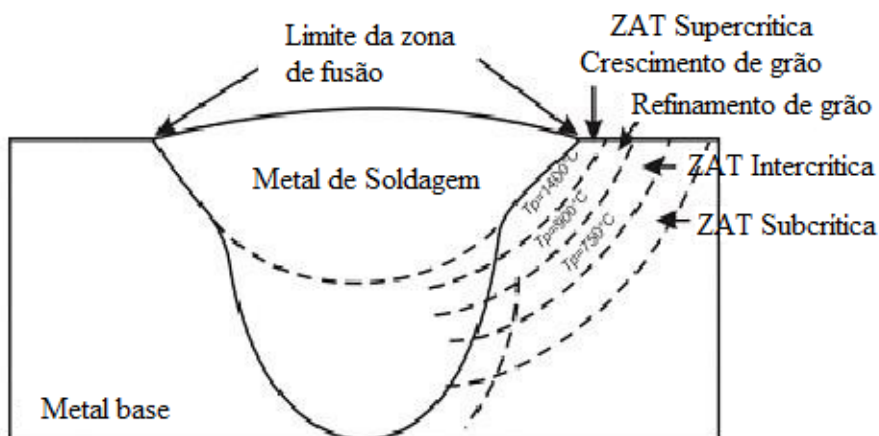
O Aço Inoxidável Duplex SAF 2205 possui uma microestrutura constituída basicamente pelas fases majoritárias ferrita e austenita em proporções aproximadamente iguais. Esta microestrutura proporciona aos aços inoxidáveis duplex propriedades mecânicas e de resistência à corrosão superior a outros tipos de aços inoxidáveis, o que há incremento a utilização dos mesmos para a fabricação de componentes industriais (Nilsson, 1992), sendo utilizado com mais freqüência na indústria química, petroleira, petroquímica e nos meios agressivos que contêm sulfuretos, por sua alta resistência ao fenômeno da corrosão.

Desenvolveram-se investigações sobre a influência dos parâmetros de solda sobre a penetração (Ekroth et al., 2000), não entanto, estes parâmetros tais como a voltagem do arco, a intensidade de corrente e a velocidade de solda são variáveis primárias ou operacionais que podem trocar a geometria, as propriedades mecânicas, localização da zona de falha e a microestrutura das soldas do aço inoxidável duplex SAF 2205.

As mudanças microestructurales no metal de solda acontecem durante o esfriamento; ao alcançá-la temperatura ambiente terão ficado tensões térmicas permanentes de tração cujo valor é da ordem do limite de fluência do material. Não entanto, as microestructuras resultantes diferem das transformações antes mencionadas devido ao comportamento não isotérmico dos processos de solda (Fernández-Columbié et al., 2014).

A evolução microestructural da Zona Afetada Térmicamente (ZAT) nos aços inoxidáveis depende de fatores como a microestructura do metal base, a temperatura pico que se alcança e as velocidades de aquecimento e esfriamento. O quadro 2 esquematiza as diferentes regiões na ZAT; na zona supercrítica é onde ocorre o crescimento de grão, por isso é considerada como a região mais frágil da ZAT.

Quadro 2. Regiones de la ZAT en los aceros. Fonte: Kotecki & Lippold 2013.



Geralmente nos aços inoxidáveis, a microestrutura resultante na ZAT é diferente a que apresenta o metal base, mas muito parecidas com a do metal de solda. A ZAT se apresenta em uma região estreita difícil de distinguir. A formação da ZAT pode ser explicada em função dos ciclos térmicos e sobre a base destes e as temperaturas às que estejam expostos pode dividir-se em três regiões (Kotecki y Lippold, 2013).

Quintero et al. (2006) realizaram soldas em um aço inoxidável duplex 2205 com juntas dispostas a batente, pelo processo de arco de plasma (PAW) através da técnica de olho de fechadura. Obteve-se uma solda com bom aspecto superficial e uma Zona Afetada pelo Calor (ZAC) muito mais estreita que a produzida por outros processos de solda do mesmo aço. Finalmente se estabelece que, o maior conteúdo de ferrita favorece o aumento da dureza e a diminuição da tenacidade do aço duplex 2205 soldado.

Múnez et al. (2007) realizaram soldas mediante o processo GTAW utilizando como material de contribuição um fio duplex ER 2209 e dois austeníticos ER 316LSi e ER 308LSi. Onde se observou que as uniões realizadas com o fio duplex apresentam uma microestrutura similar a do duplex SAF 2205, enquanto que as realizadas com os fios austeníticos apresentam uma morfologia diferente nas que a relação α/γ diminui, e possui menor resistência a corrosión devido ao desequilíbrio da relação de fases.

A partir dou expreso anteriormente neste trabalho se traça como objetivo geral: propor uma guia pratica para a caracterização microestructural resultante de um Aço Inoxidável Duplex (DSS) depois de submeter-se ao processo de solda GTAW.

Desenvolvimento

Composição química do metal base e de contribuição

A Tabela 1 mostra a composição química do metal base e de contribuição empregado no trabalho. Note-se que o material de contribuição empregado é sobre-aleado, quer dizer, possui um conteúdo em níquel maior que o do metal base, com o fim de favorecer a formação de austenita na zona de fusão durante o esfriamento rápido que ocorre nesta zona. Como gás de proteção se empregou argônio puro, por ser inerte e se ioniza facilmente.

Os eletrodos de tungstênio são não consumíveis e se apóiam em sua composição química e regida pela norma AWS A 5.12, se o processo se empregar como é devido, já que não se derretem nem se transferem à solda. Como material de contribuição, a especificação da AWS A 5.16, estabelece varinhas e eletrodos para a solda do aço duplex e ligas (Yamauchi et al., 2002).

Tabela 1

Composição química do metal base e de contribuição empregado (%). Fonte: Yamauchi et al., 2002.

Elemento	Material Base	Material de contribuição ERTi – 2
C	0,020	0,09
Cr	22,54	19,99
Ni	5,7	7,73
Mo	3,1	3,14
Cu	0,2	0,35
W	0,02	-
V	0,149	-
Co	0,055	-
Si	0,61	0,45
Mn	0,98	1,26
Al	-	0,092
Fe	-	66,54

A máquina de solda utilizada é da marca Miller, as características da fonte desta máquina nos permite saber as relações voltagem-intensidade em cada momento de utilização desta e de fato se converte na característica do arco. A vantagem fundamental deste tipo de máquina é sua grande economia no consumo energético.

Análise microestructural

A análise microestructural consiste na observação de uma amostra padrão do material base, quadro 3, a que se empregará para estabelecer o comportamento do material das amostras depois de efetuado a análise de cada uma das partes afetadas.

Quadro 3

Microestructura del acero inoxidable dúplex SAF 2205. Fonte: Yamauchi et al., 2002.

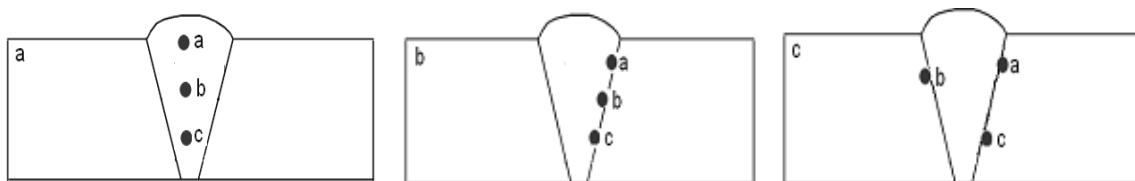


A microestructura do quadro 3 se corresponde com a amostra padrão da liga depois do ataque, distinguem-se os grãos de ferrita, que são mais escuros, que os de austenita. Durante o ataque, a capa de óxido sobre a ferrita se remove para reformar-se logo do ataque. Assim a ferrita se vê mais escura ao microscópio e a austenita, que quase não está atacada, reflete mais a luz e se vê mais brilhante.

Para estabelecer o comportamento microestructural nas diferentes zonas, logo depois de realizado o processo de solda se seguiu o procedimento que aparece refletido no quadro 4.

Quadro 4

Comportamento macroestructural nas diferentes zonas. (4a Microestructura na direção horizontal do cordão, 4b Microestructura na interfase do cordão, 4c Microestructura da zona afetada termicamente na união de solda). Fonte: Yamauchi et al., 2002.



Materiais e equipas empregados na experimentação

Para ensaios microestructurales, a não alteração das propriedades dos materiais é de vital importância, já que a mudança da mesma reflete uma imagem distorcida do que queremos obter.

Polidora metalográfica montasupal

Utilizou-se para obter uma superfície lisa e polida livre de impregnação de impurezas ou raladas.

Microscópio óptico

Para a observação da microestructura da proveta padrão, a qual se empregará para a comparação das micrografias obtidas, empregou-se um microscópio óptico binocular dotado de uma câmara que reflete a fotografia no computador. Para colocar as provetas no microscópio se montam em um dispositivo com plastilina que permite um nivelamento adequado destas.

Preparação metalográfica da proveta

A análise mediante microscópio metalográfico permite resolver aspectos relacionados a microestructura de um metal como, forma e tamanho dos grãos, as fases presente, sua distribuição, defeitos e inclusões e alguns constituintes não metálicos como sulfuretos, óxidos e silicatos.

As superfícies das amostras a investigar devem ser previamente polidas para poder realizar a observação microscópica, por isso se propõe a realização de um conjunto de operações que permitam obter a qualidade superficial desejada. As operações se resumem na seguinte ordem:

Corte, desbastamento, polido, desgordurado, lavado e ataque químico

Corte das amostras

As dimensões da superfície a examinar se cortaram em seções de 15 x 15. Refrigeraram-se constantemente durante o processo de corte, já que a temperatura produzida pelo roce pode alterar radicalmente a estrutura original, pelo menos na superfície obtida.

Desbastamento e polido

Para obter primeiro uma superfície plana e semipolida, mediante o emprego de máquinas ferramenta e papéis abrasivos. O polido com os papéis abrasivos se realizou com a variação da granulometria, da mais grossa a mais fina. Concluído o processo de lixado fino, realizou-se a operação conhecida como polido fino, no que se empregou a massa abrasiva conhecida comercialmente como “Massa GOI”, acrescentada sobre discos providos de panos. No gentil se empregaram lixas do tipo No 320 e 400 conforme norma ISO 9001.

Este polido se levou a cabo com a lixa montada sobre uma placa de vidro, trocando o sentido do lixado 90° ao passar de uma dobra a outro de maneira que se elimine a capa de metal distorcido e deslizado deixado pelo anterior.

Panos para gentil

Uma vez polida as provetas se lavaram com água destilada, secaram-se com papel de filtro e finalmente se voltaram a lavar com tetracloreto de carbono para evitar qualquer vestígio de graxa e massas de polir.

Ataque das amostras para seu exame microscópico

Realizou-se com o objetivo de ressaltar e observar a estrutura metalográfica formada depois do processo de desgaste (ASTM E – 262 – Practice A, 2000). Para a observação das amostras por microscopia óptica foram atacadas a temperatura ambiente com uma mescla de ácido: ácido acético, ácido clorídrico (HCl) e ácido nítrico (HNO₃), em iguais proporcione. A

proveta se inundou durante 45 segundos, considerando que a mescla dos ácidos inicia uma reação na qual se perdem suas características para revelar a ferrita.

Cálculo para o processo de solda

Em qualquer tipo de processo de solda, a melhor que se pode obter, é aquela onde a união e o material base compartilham as mesmas propriedades químicas, metalúrgicas e físicas. Para obter essas condições a solda fundida deve estar protegida da atmosfera durante a operação de soldeo, de outra forma, o oxigênio e o nitrogênio da atmosfera se combinariam, literalmente, com o material fundido resultando em uma solda débil e com porosidade. Os parâmetros mais aceitos para a solda do aço inoxidável duplex com o uso do método de solda GTAW aparecem na tabela 2.

Tabela 2

Parâmetros para o processo de soldagem. Fonte: ASTM –262–Practice A (2000).

Dimetro do electrodo (mm)	3,2
Longitude do arco (mm)	2,5
Temperatura do fusão (°C)	1 450
Temperatura de ignição (°C)	34
Rendimento (%)	0,75
Conductibilidade térmica (W/m·K)	18

O diâmetro do eletrodo determina a intensidade de soldeo. Se empregarmos uma intensidade inadequada para um diâmetro de eletrodo dado poderíamos ocasionar instabilidade do arco, originar erosão e fusão da ponta do eletrodo, assim como inclusões de tungstênio no metal soldado.

Cálculo do ciclo térmico

O regime de solda depende de diversos fatores: tipo de material base, tipo de arame, fundente, tipo de união. Este processo ocorre em tempos muito curtos e com uma variação de temperaturas extremas que vão da fusão até aquelas que não afetam a estrutura do metal base.

Em geral a velocidade do arco ao longo da peça de trabalho é muito maior que a velocidade de difusividade térmica. Em outras palavras, o fluxo de calor na direção do trabalho é pequeno comparado com o da direção perpendicular de avanço.

Intensidade de corrente

A intensidade da corrente de solda depende do diâmetro do eletrodo, o qual se seleciona atendendo: à espessura do metal base, ao tipo de construção soldada, além disso o tipo de revestimento e da posição do cordão no espaço influem na magnitude da intensidade e segundo (Quintero *et al.*, 2006) determina-se como:

$$I_s = 2,5d_e^2 + 35,5d_e - 18 \quad (1)$$

Onde:

I_s - intensidade de corrente de soldagem; A

d_e - diâmetro do eletrodo; mm

Voltagem do arco elétrico

As funções principais da tensão (voltagem) é estabilizar o arco e proporcionar um cordão liso, sem salpicados; além disso, a tensão é dependente do gás usado para a solda. A tensão de arco não influi significativamente no largo do cordão; influi notavelmente no reforço (forma côncava ou convexa do mesmo), tendo-se soldas plainas (com tensões altas) e avultadas (com tensões baixas), mas sempre no intervalo de ter um arco estável e segundo Rodríguez (1987) determina-se como:

$$U_a = 0,05 \cdot I_s + 10 \quad (2)$$

Onde:

U_a - tensión del arco; V

Velocidade de soldagem

É o deslocamento do eletrodo a uma velocidade adequada (velocidade de solda) fundindo constantemente uma porção do metal base e adicionando metal de contribua com produto de sua própria fusão. Na medida que o processo se desenvolve o banho metálico solidifica e forma o metal da costura, segundo Rowe e Jeffeus (2008) determina-se como:

$$V_s = \frac{\alpha_a \cdot I_s}{F \cdot \rho} \quad (3)$$

Onde:

V_s - velocidade de soldagem; mm/s

α_a - coeficiente de contribuição; g/A min ($\approx 10 \% I_s$)

F - área da seção do cordão, cm^2

ρ - densidade do metal fundido; g/cm^3

Energia linear do processo de soldagem

Quando se deposita uma passada de solda sobre a superfície de uma placa, o fluxo de calor afeta cada ponto produzindo tensões em função da distância à fonte de calor, Talero y Muñoz, (2000) propõe a seguinte equação:

$$E_L = 60 \cdot \eta \frac{U_a \cdot I_s}{v_s} \quad (4)$$

E_L - energia linear; J/cm

η - eficiência da fonte de calor; %

A eficiência (η) do processo de solda GTAW oscila entre 0,6 a 0,8 (Cary, 1998). Aos efeitos dos cálculos realizados, assumiu-se eficiência de 0,7.

O consumo do gás protetor na solda em atmosfera de gases protetores depende da espessura do material base e correspondentemente à intensidade de corrente de solda. Para o cálculo segundo Holzhauser et al. (1999), propõe a seguinte expressão:

$$Q_{\text{gas}} = 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot (I_s)^{0,75} \quad (5)$$

Onde:

Q_{gas} - consumo do gás protetor; m³/s

Cálculos numéricos para a solda por arco de tungstênio e gás

O cálculo da longitude do atoleiro de solda (Cerjak, 1998), mostrará o rádio efetivo da distribuição do calor e de sua influência na zona afetada pelo calor.

$$L_l = \frac{Q}{2\pi\lambda(T_s - T_0)} \quad (6)$$

Onde:

L_l - longitude do atoleiro de soldagem; mm

Q - energia entrante; W

λ - condutibilidade; W/mm K

T_s - temperatura de fusão; °C

T_0 - temperatura inicial; °C

Para o cálculo da energia entrante se emprega a seguinte equação:

$$Q = q \cdot l \quad (7)$$

Onde:

q - energia de calor em Joule por metro linear de solda; J/m

l - longitude a soldar; m

O calor, que se gera em um arco mutável (Howard, 1992) ou a energia entrante, pode calcular-se como:

$$q = \frac{I_s \cdot U_a}{v_s} \eta \quad (8)$$

Onde:

v_s - velocidade de deslocamento; m/s

η - rendimento do processo

Velocidade de esfriamento do cordão

O método mais usual é determinar a velocidade de esfriamento sobre a linha central de solda em um instante no qual o metal passa através de uma temperatura de interesse T_c , sua expressão matemática é:

$$\tau = d \sqrt{\frac{\rho C_e (T_c - T_0)}{q}} \quad (9)$$

Onde:

τ - parâmetro adimensional de espessura relativa da placa

d - espessura da placa: mm

ρ - densidade do material; g/cm³

C_e - calor específico; J/m °C

T_c - temperatura de fusão; °C

T_0 - temperatura inicial; °C

A velocidade de esfriamento para uma placa fina está dada por:

$$R = \frac{2\pi\lambda(T_c - T_0)^2}{q} \quad (10)$$

O tempo de esfriamento do cordão determina-se pela equação 11.

$$t = \eta \frac{I_s^{(1,24 + 0,0005T_e - 0,005v_s)} \cdot U_a^{0,59}}{108 \cdot v_s^{(0,78 - 0,0005T_c)}} \quad (11)$$

O formato proposto para a guia é o seguinte:

Tabela 3

GUIA PRÁTICA PARA A CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL RESULTANTE

Formato proposto para a guia.

Título (Indicar o título da prática)
Objetivo (Estabelecer o ou os objetivos da prática)
Breve Introdução Teórica (Desenvolver uma breve introdução teórica do processo GTAW e da prática a desenvolver)
Procedimento Experimental (Indicar todos os passos a seguir para a prática)
Equipamentos Utilizados (Descrever os equipamentos utilizados)
Gráficos e/ou Tabelas (Colocar todos os gráficos, fotos e/ou tabelas obtidos na prática)
Análise de Resultados (Analisar os resultados a partir dos objetivos da prática com fotografias e comentários)
Conclusões (Estabelecer conclusões da prática)

Fonte: (elaboração própria do autor)

As seguintes tabelas são umas referências úteis ao momento de efetuar os ajustes iniciais para o sistema aplicado.

Tabela 4

Guia para determinar o tipo de corrente a usar-se em GTAW. Cerjak (1998).

Diâmetro do eletrodo em Polegadas	AC*		DCSP	DCRP
	Usando Tungstênio Puro (Amp.)	Usando Tungstênio Thoriado ou Electrodo "Rare Earth" ** (Amp.)	Usando Tungstênio Puro, Thoriado, ou "Rare Earth" (Amp.)	
1/16"	50 – 100	70 – 150	70 – 150	10 – 20
3/32"	100 – 160	140 – 235	150 – 250	15 – 30
1/8"	150 – 210	225 – 325	250 – 400	25 – 40
5/32"	200 – 275	300 – 425	400 – 500	40 – 55
3/16"	250 – 350	400 – 525	50 – 800	55 – 80
1/4"	325 – 475	500 – 700	800 – 1000	80 – 125

* Os valores máximos mostrados foram determinados usando um transformador de onda desbalanceada, se um transformador de onda balanceada é usado, reduza estes valores 30% ou use o próximo diâmetro de eletrodo mais grosso. Isto é necessário dado o alto calor que aplica ao eletrodo uma onda balanceada.

**Os eletrodos com a ponta arredondada são os que melhor sustentam estes níveis de corrente.

DCSP= Corrente Direta Polaridade Direta

DCRP= Corrente Direta Polaridade Inversa

Tabela 5

Guia para determinar o tipo de corrente aplicada em GTAW. Quintero et al. (2006).

GUIA PRÁTICA PARA A CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL RESULTANTE

Material	Corrente Alternada*		Corrente Direta
	Com estabilização de alta frequência	Com Polaridade Negativa (DCSP)	Com Polaridad Positiva (DCRP)
Magnésio até 1/8" de espessura	1	NR	2
Magnésio por cima de 3/16" de espessura	1	NR	NR
Magnésio Coado	1	NR	2
Alumínio até 3/32" de espessura	1	NR	2
Alumínio por cima de 3/32" de espessura	1	NR	NR
Alumínio Coado	1	NR	NR
Aço Inoxidável	2	1	NR
Ligas de Latão e Bronze	2	1	NR
Prata	2	1	NR
Revestimentos de Prata	1	NR	NR
Endurecimentos	1	1	NR
Ferro Coado	2	1	NR
Aço sob Carbono, 0.015 a 0.030 in	2**	1	NR
Aço sob Carbono, 0.030 a 0.125 in.	NR	1	NR
Aço sob Carbono, 0.015 a 0.030 in.	2	1	NR
Aço sob Carbono, 0.030 in. o mas	2	1	NR
Cobre desoxidado***	NR	1	NR
Titânio	NR	1	NR

1. Excelente Operação

2. Boa Operação

NR Não recomendado

* Onde AC é recomendado como segunda opção, use perto de 25% corrente mas alta do recomendado para polaridade negativa

** Não use corrente AC quando as peças tenham texturas muito complexas

*** Use lhe Funda de Silicone Bronze para 1/4 polegadas ou mais grosso

Tabela 6

Seleção do Gas segundo o proceso e metal a ser aplicado. Fonte: Cerjak (1998).

Metal	Tipo de Solda	Gás ou Mescla de Gases	Rasgos sobressalentes / Vantagens
Aço Doçe	Ponteada	Argônio	Larga duração do eletrodo, melhor contorno do cordão, mais fácil de estabelecer o arco inicial

	Manual	Argônio	Melhor controle do cordão especialmente em posições especiais
	Mecanizada	Argônio - Hélio	Alta velocidade, menos fluxo de gás que com Hélio
		Hélio	Mais velocidade que a obtida com Argônio
Alumínio e Magnésio	Manual	Argônio	Melhor arranque do arco, melhor ação de limpeza e qualidade de solda, menos consumo de gás
		Argônio - Hélio	Mais alta velocidade de solda, maior penetração que com Argônio
	Mecanizada	Argônio - Hélio	Boa qualidade de solda, mais sob fluxo de gás requerido que com Hélio só
		Helio DCSP	Mais profunda penetração e maior velocidade de solda, pode prover ação de limpeza para as soldas em alumínio e magnésio
Aço Inoxidável	Punteada	Argônio	Excelente controle da penetração em materiais de sob calibre
		Argônio - Hélio	Mais alta entrada de calor para materiais de maior calibre
	Manual	Argônio	Excelente controle do cordão, penetração controlada
		Mecanizada	Argônio
		Argônio - Hélio	Mais alta entrada de calor, mais velocidade de solda é possível
		Argônio - Hidrogeno (Hasta 35% H ₂)	Minimiza o corte nos borde do cordão, produz soldas de contornos desejáveis a sob nível de corrente, requer sob fluxo de gás
Cobre, Níquel e Ligações Cu-Ni	Manual solamente	Argônio	Excelente controle do cordão, penetração em materiais de sob calibre
		Argônio - Hélio	Alta entrada de calor para compensar a alta dissipação térmica dos materiais mais pesados
		Hélio	Mais alta temperatura para sustentar mais altas velocidades de solda em seções de materiais mais pesados

Análise dos resultados

Regimes de solda

A tensão do arco necessária para realizar o processo de solda foi de 16 E V, sendo esta magnitude permissível dentro dos parâmetros da solda GTAW, que é de 5 E V a 30 V. A velocidade de solda determinada foi de 0,007 m/s. O valor obtido para a energia linear é de 18 898, 52 J/mm. A quantidade de gás que se requer para executar o processo de soldeo na união é de 0,12 m³/s.

Análise dos cálculos numéricos

Para uma temperatura de fusão de 1 450 °C e uma temperatura ambiente de 34 °C se tem que a longitude de união é de 0,496 m, por isso o resultado da energia entrante é de 95 283,84 W e a longitude do atoleiro é de 60,1 mm.

O parâmetro espessura relativa da placa τ é de 0,83. Considera-se como espessura de placa fina. A velocidade de esfriamento a qual solidifica o aço duplex é de 0,83 °C/s, por isso o tempo de esfriamento do cordão será de 12 min.

Análise do comportamento microestructural

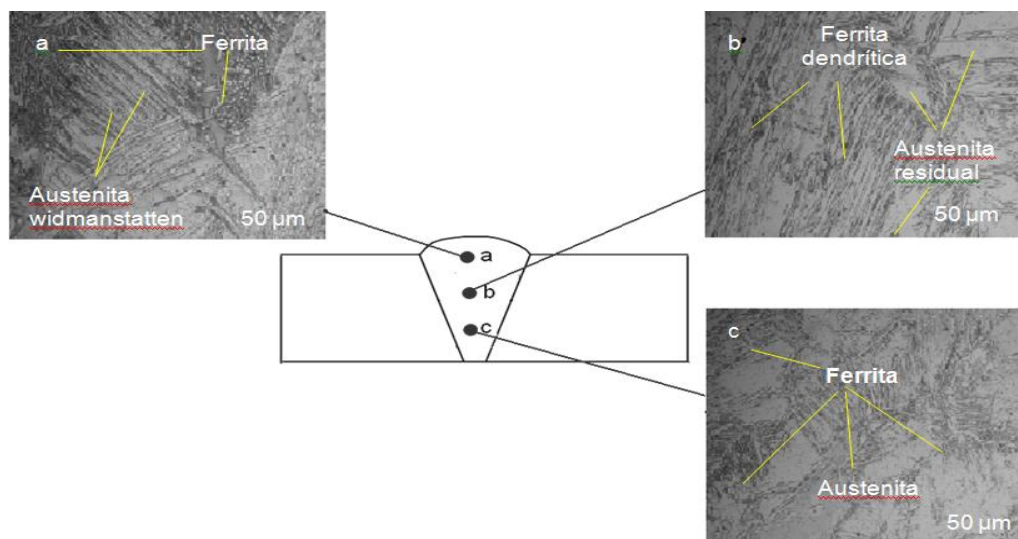
Para esta análise se tem em conta as diferentes zonas do cordão de solda.

Análise do comportamento microestructural na interfase

O quadro 5 apresenta as diferentes zonas do cordão de solda analisadas na direção vertical.

Quadro 5

Zonas do cordão em direção vertical. Fonte: elaboração propri do autor.



Como se aprecia no quadro 5, no cordão de solda, proporciona-se a estrutura equilibrada de ferrita / austenita, isto é devido a que o material de contribuição sempre está batido as asas com níquel. Desta forma, apresenta a distribuição uniforme de ferrita e austenita. Dada a alta difusividade do nitrogênio, a austenita se forma com maior facilidade, mais rapidamente.

A formação de austenita com tendência ramificada de braços aciculares (morfologia widmanstatten) (fase clara), como se observa no quadro 5a foi altamente marcada nesta zona da solda. Quer dizer, os braços de austenita são muito mais pronunciados e as partículas isoladas de austenita com certo alongamento sem chegar a ser aciculares.

No quadro 5b, observa-se a distribuição, forma e orientação das diferentes fases, devido a que a velocidade de esfriamento foi mais lenta. Esta disposição e morfologias de fases presentes na Zona Fundida (ZF) estão associadas ao ciclo térmico de solda, já que ao depositar um cordão sobre o outro e converter-se em solda de multipasada, esta atua como um tratamento térmico de recozido, o qual provoca um esfriamento mais lento. Obteve-se nesta zona a formação de austenita e de ferrita dendrítica.

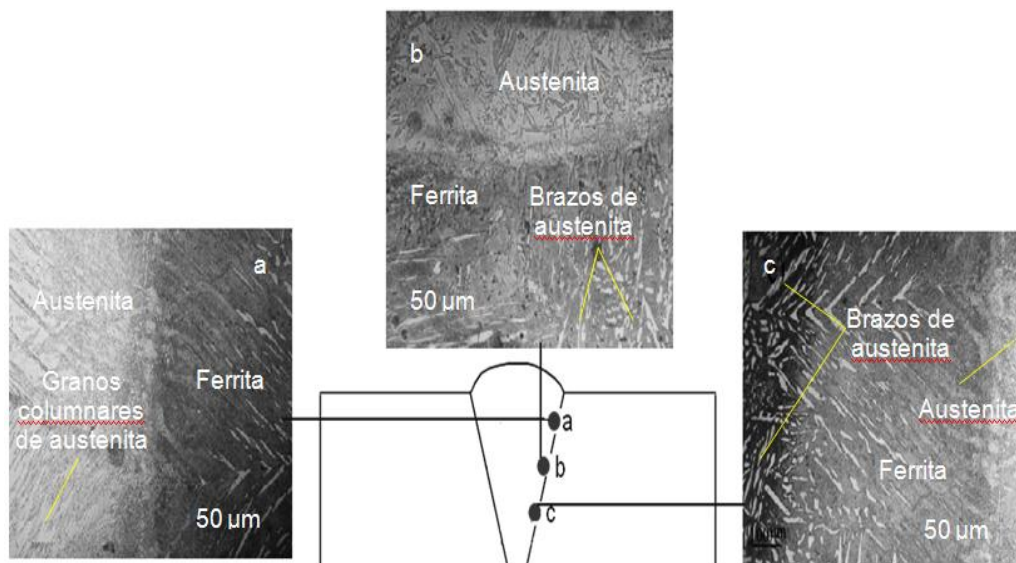
Para esta zona da solda quadro 5c, a austenita (fase clara) estão orientadas ao azar, não existe a formação de braços secundários de austenita, além disso as partículas isoladas de austenita estão em maior quantidade nesta zona em comparação com as observadas na zona adjacente ao metal de base.

Análise do comportamento microestructural na interfase

No quadro 6 se pode observar o comportamento microestructural da união soldada na interfase do cordão.

Quadro 6

Zonas do cordão na interfase. (elaboração propia).



O quadro 6 que mostra o comportamento do cordão na interfase, pode-se observar o crescimento dos grãos de austenita para dentro do cordão de solda em forma de grãos columnares, aonde os grãos columnares são alargados. Assim também a formação de pequenos grãos de austenita secundária perto da linha de fusão.

A fase austenita (fase clara), com apreciável morfologia Widmanstätten e uma morfologia quase esferoidizada estão orientadas para a parte superior do cordão de solda e na raiz esta orientação foi menos pronunciada, já que a velocidade de esfriamento foi menor.

A distribuição e proporção de ferrita (fase escura) e austenita (fase clara) tanto na ZAC como na ZF quadro 6a foi mais uniforme, já que a velocidade de esfriamento foi mais lenta. Observam-se braços secundários de austenita com forma acicular menos pronunciados e uma série de partículas isoladas de austenita em maior quantidade. Também se observa uma certa fragmentação das placas de austenita na zona adjacente ao metal base.

O quadro 6c mostra a diferença de microestructura entre o cordão de solda e o metal base. Aqui se obteve uma microestructura intermédia entre laminar e Widmanstätten e por sua percentagem maior de ferrita comparado com o metal base. Isto se deve a que nesta zona o calor

GUIA PRÁTICA PARA A CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL RESULTANTE

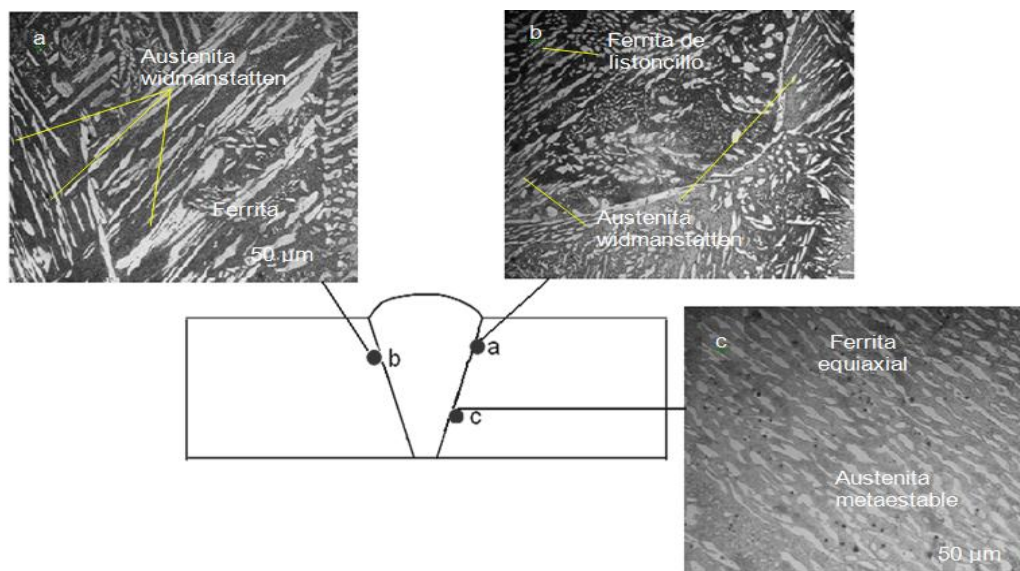
gerado pela solda converte todo o material em ferrita e a austenita se reforma durante o esfriamento. Devido a que nesta zona a velocidade de esfriamento é muito grande, a austenita não precipita por completo, por isso não se consegue conseguir o balanço de fases de equilíbrio.

Análise do comportamento microestructural na ZAT

As características na soldabilidade nesta zona depende principalmente dos parâmetros ou variáveis que têm major influencia sobre o processo, tais como: a corrente de solda, a velocidade de avanço, o fluxo de gás e o equilíbrio de forças de pressão do arco sobre o atoleiro metálico, obtendo uma relação ancho/profundidad elevada por seu caráter pontual, obtendo-se soldas de alta qualidade, quer dizer soldas com o ZAC bem reduzidas, bom aspecto superficial, bom reforço de raiz, em um só passe com ou sem material de contribuição. No quadro 7 se mostram os resultados microestructurales desta zona.

Quadro 7

Microestructuras obtidas na ZAT. (elaboração propia).



Na ZAT se observaram braços secundários de austenita com morfologias tipo widmanstätten e partículas isoladas menos pronunciadas. Nesta zona se experimentaram temperaturas próximas a recristalização, o qual propicia que a ferrita nesta zona se regenere e a

austenita fique em forma maior dado que desta forma a ferrita origina maior dureza e maior fragilidade nesta zona.

No quadro 7a se observou o efeito do calor gerado pelo processo de solda, modificando-a microestructura típica do material original (ferrita (fase escura) e austenita (fase clara) orientados na direção de laminação) na possível ZAC e ZF. Além disso, foi observada a formação de braços secundários sobre as lâminas de austenita, as quais cresceram ao longo de todo seu perímetro umas mais pronunciadas que outras e pequenas partículas isoladas de austenita.

Esta modificação se deveu a uma série de processos de transformação de fases que ocorrem no aço durante a solda tanto na etapa de aquecimento como na etapa do esfriamento (recristalização de grãos livres de deformação, crescimento de grão, transformação da ferrita primária em austenita com diferentes morfologias, recocidos parciais), o qual foi reportado pelo Capello et al. (2003) e Sieurin e Sandström (2006).

O quadro 7b mais perto da interfase do cordão de solda, mostra uma morfologia de ferrita de listoncillo, produto do ciclo térmico imposto ao material base, a austenita nesta zona se mostra do tipo widmännstatten, mas com uma tendência menos prolongada que a obtida no quadro 7a, neste processo de união do ponto de vista operativo tem um major contribua com térmico e velocidade baixa, o que também induz à geração de fases secundárias que fazem que esta zona se comporte dura, frágil e sensível à corrosão.

O quadro 7c, mostra grãos de ferrita equiaxial e grãos de ferrita columnar, além da presença de austenita metaestable ao redor dos grãos de ferrita. Observa-se que a rede de austenita não esta muito bem formada ao redor dos grãos em algumas zonas possivelmente devido à rápida velocidade de esfriamento.

A presença de austenita widmännstatten é reduzida e se apresentam finos precipitados de austenita secundária dentro da ferrita em pouca quantidade. Nos grãos grandes de ferrita, pode-se observar linhas escuras correspondentes a sub-limites de grão.

Nas três zonas microestructurales analisadas, as microestructuras das zonas representativas de solda são similares, onde no metal base não se observa modificação alguma da microestructura, mantendo-se igual ao metal originalmente em estado de entrega, mas na ZAC se evidencia que houve uma dissolução de austenita para aumentar a ferrita. A morfologia da austenita é de forma Widmännstatten, o lado superior esquerdo da fotomicrografia mostra a interfase com a zona de fusão, enquanto que, na zona inferior direita, apresentam-se grãos alargados como o do metal base. Na zona de fusão se pode evidenciar mais claramente a forma columnar da austenita, a qual possui ramificações tipo Widmännstatten em uma matriz ferrítica, resultados que coincidem com Quintero et al. (2006), Musauel (2003) e Karlsson (1999).

Conclusões

A guia permite aos estudantes realizar as práticas de solda com total facilidade, de maneira ágil e com segurança.

Os análises macro e microscópicas realizados para analisar os efeitos devido à variação de parâmetros de solda, podem-se aplicar nas disciplinas Ciências dos Materiais, Materiais de Engenharia, Fundição, Tratamentos Térmicos.

Consegue-se caracterizar a microestructura resultante do aço inoxidável duplex SAF 2205 logo depois de ser submetido ao processo de solda GTAW, obtendo microestructuras livres de fissuras e com boas propriedades mecânicas, (dureza, resistência ao desgaste).

As equações desenvolvidas permitem estabelecer o procedimento metodológico dos regimes do processo de solda GTAW para o aço inoxidável duplex SAF 2205, em função do tipo de junta a soldar, ficando estabelecido o ciclo térmico de solda.

Referencias

- Alpízar, E. (2003). *Determinación de tecnologías de soldadura por arco eléctrico*. Ed. Universitaria.
- ASM Handbook. (1990). *Welding, Brazing and Soldering, Vol. 6*. Davis JR, Ferjutz K, Wheaton ND (eds.). ASM International (American Society for Metals),
- ASTM. (2000). Annual Book of ASTM Standards, 03(01) *ASTM Standard E, 837(99)*, 675- 684.
- Capello, E., Chiarello, P., Previtali, B. e Vedani, M. (2003). *Laser welding and Surface treatment of a 22Cr_/5Ni_/3Mo duplex stainless steel*. Materials Science and Engineering.
- Cary, H. (1998). *Modern Welding Technology, 4th ed*. Prentice Hall.
- Cerjak, H. (1998). *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 4*. Materials Modelling Series.
- Ekroth, M., Frykholm, R., Lindholm, M., Andrén, H. & Agren, J. (2000). Gradient zones in WC-Ti (C.N) – Co. *Acta Materialia, based cemented carbides: Experimental study and computer simulations, 48(32)*. 2177-2185.
- Fernández-Columbié, T., Rodríguez-González, I., Correa- Suárez, R. e Alcántara-Borges, D. (2014). Junta de soldadura disímil de la aleación HK- 40 y del hierro fundido 24. *Ingeniería Mecánica, 17(2)*, 98-107.
- Holzhauser, J., Spitzer, K. & Schwerdtfeger, K. (1999). Laboratory study of heat transfer through thin layers of casting steel: minimization of the slag/probe contact resistance. *Steel Research, 70(10)*, 430-436.

- Howard, B. (1992). *Manual de Soldadura Moderna Tomo 3*. Prentice Hall, Segunda edición.
- Karlsson, L. (1999). *Intermetallic phase precipitation in duplex stainless steels and weld metals: metalurgy, influence on properties, welding and testing aspects*. Welding Research Council. Bulletin 438.
- Kotecki, D. J. & Lippold, J. (2013). Welding metallurgy and weldability of stainless steels. *Journal of Materials Processing and Technology*, 1, 474-483.
- Manual de Soldadura (American Welding Society). (1999). Vol. 2. Prentice Hall Hispanoamerica.
- Múñez, C. J. Utrilla, M.V., Ureña, A. e Otero, E. (2007). Influencia del material de aporte en la resistencia a la corrosión por picaduras en uniones soldadas de un acero dúplex 2205. *Revista de Metalúrgia*, 1-6.
- Musauel, C. (2003). *Caracterización por Microscopía Óptica y Electrónica de los aceros inoxidables Dúplex 2205, después del proceso de soldadura GMAW*. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, U.C.V.
- Nilsson, J. O. (1992). *Mater. Sci. Technol*, 8(8), 685-700.
- Quintero, M., Cerpa, S., Mejias, G., León, J. e Quintero, A. (2006). Soldadura de un acero inoxidable dúplex 2205 por el proceso de soldadura GTAW. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 56(4), 1-3.
- Ricaurte, O., Aguirre, H. e Parra, H. (2007). Soldabilidad en aceros inoxidables y aceros disimiles. *Scientia et Technica*, 13(34), 273-278.
- Rodríguez, H. (1987). *Metalurgia de la soldadura*. Pueblo y Educación.
- Rowe, R. e Jeffeus, L. (2008). *Manual de Soldadura GMAW (MIG-MAG)*. Paraninfo Ediciones.

Sieurin, H. & Sandström, R. (2006). Austenite reformation in heat affected zone of dúplex stainless steel 2205. *Materials Science & Engineering, A*(418), 250-256.

Talero, J. e Muñoz, M. (2000). *Introducción al cálculo de estructuras metálicas según Eurocódigo 3*. Bajo Cero Ediciones.

Yamauchi, A., Sorimachi, K. & Sakuraya, T. (2002). Effect of solidus temperature and crystalline phase of mould flux on heat transfer in continuous casting mould. *Ironmaking and Steelmaking*, 29(3), 203-207.