

Adriano José Ferreira da Cunha

**SOLDAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL UNS S32205
COM ELETRODO REVESTIDO E UTILIZANDO A
TÉCNICA DE PASSE DE REAQUECIMENTO**

Monografia apresentada ao Programa de Educação
Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para conclusão do curso de
Especialização.

São Paulo

Março/2014

Adriano José Ferreira da Cunha

(Engenheiro, UNIFIAN, 2006)

SOLDAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL UNS S32205 COM ELETRODO REVESTIDO E UTILIZANDO A TÉCNICA DE PASSE DE REAQUECIMENTO

Monografia apresentada ao Programa de Educação
Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para conclusão de curso de
Especialização.

Área de Concentração: Engenharia da Soldagem

Orientador: Me. Jaime Casanova Soeiro Júnior

Co-orientador: Dr. Sérgio Duarte Brandi

São Paulo
Março/2014

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

Marthin Luther King

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Cristiane e minha filha Isabela.

AGRADECIMENTOS

Ao Me. Jaime Casanova Soeiro Júnior, pela orientação deste trabalho, paciência e confiança depositada;

Ao professor Dr. Sérgio Duarte Brandi, pela co-orientação deste trabalho.

Ao especialista em engenharia de soldagem Marcos Fernandes da Silva e a metalúrgica ATLAS pela soldagem dos corpos de prova.

Ao especialista em engenharia de soldagem Adilson A. Moreno e a empresa Böhler Welding pela doação do consumível de soldagem utilizado no experimento.

Ao Me. Dany Michell Andrade Centeno pelos trabalhos de micrografia, macrografia e ensaios de corrosão.

CURRICULUM VITAE

Adriano José Ferreira da Cunha
e-mail: eng.adrianocunha@hotmail.com

Formação Acadêmica

Gestão de Tecnologia Industrial Sucroalcooleira - 2010
Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR

Engenharia de Segurança do Trabalho - 2008
Faculdade de Engenharia de Agrimensura de Pirassununga - FEAP

Engenharia de Produção Mecânica - 2006
Centro Universitário UNIFIAN - Pirassununga – SP

Experiência Profissional

Procknor Engenharia Ltda – (Desde 11/2008) Coordenador de Projetos.

Abengoa Bioenergia Brasil – Usina São Luiz - (07/2006 a 10/2008) Coordenador Industrial.

Dedini S/A Indústria e Comércio – (11/2002 a 07/2006) Desenhista Projetista.

ADZ Indústria e Comércio Ltda E.P.P. – (08/2001 a 10/2002) Desenhista Técnico.

Máquinas Uliana Ltda – (1996 a 07/2001) Técnico em Mecânica

RESUMO

Os Aços Inoxidáveis Duplex (AIDs) são constituídos de uma microestrutura com 50% de ferrita e 50% de austenita, isto lhes confere elevadas propriedades de resistência mecânica e resistência à corrosão. Os processos de soldagem geram modificações microestruturais, por isto, este trabalho investigou através caracterização de uma junta convencional e outra que sofreu um passe de reaquecimento pelo processo de soldagem com eletrodo revestido o balanceamento de fases, o surgimento de precipitações e fases intermetálicas na zona afetado pelo calor "ZAC" das juntas soldadas. Os experimentos foram realizados com AID denominado UNS S32205 em corpos de prova de chapas de 6,0 mm de espessura e consumível de soldagem ER E 2209-17 AWS A5.4-92. A microestrutura das juntas soldadas foi estudada por análise microestrutural, com a utilização de microscopia óptica, análise de tenacidade por ensaio de impacto Charpy em V à temperatura de -40 °C conforme ASTM A370, ensaio de corrosão intergranular por DL-EPR e contagem de ferrita via software image J. Os resultados obtidos demonstraram que na ZAC dos corpos de prova não apresentaram comprometimento após soldagem, mesmo com indícios de precipitação de nitreto de cromo no corpo de prova 1 e também com diminuição da quantidade de austenita na ZAC dos corpos de prova.

ABSTRACT

The Duplex Stainless Steels (DSS) are composed of a microstructure with 50% ferrite and 50% austenite, this gives them high strength properties and corrosion resistance. The welding processes generate microstructure changes, therefore, this paper investigated through characterization of a conventional gasket and another who suffered a pass reheating the welding process with coated electrode matching stage, the onset of precipitation and intermetallic phases in the zone affected by heat "HAZ" welded joints. The experiments were performed with DSS called UNS S32205 test coupons on plates of 6.0 mm thickness and welding consumable ER E 2209-17 AWS A5.4-92. The microstructure of the welded joints was evaluated by microstructural analysis, using optical microscopy analysis toughness by Charpy impact test V to -40 °C in accordance with ASTM A370, intergranular corrosion test of DL- EPR and count ferrite via software image J. the results showed that the HAZ test coupons showed no involvement after welding, even with evidence of precipitation of chromium nitride the in test coupons 1 and also decrease the amount of austenite in the HAZ of test coupons.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de Schaeffler [7].	3
Figura 2 – Esquema da soldagem com o processo Eletrodo Revestido [22].	12
Figura 3 – Desenho esquemático da junta CP1.	14
Figura 4 – Desenho esquemático da junta CP2.	15
Figura 5 - Microscópio óptico utilizado na caracterização microestrutural.....	19
Figura 6 - CPs usinados antes do ensaio.....	21
Figura 7 - Macrografia da junta soldada do CP1.	23
Figura 8 - Macrografia da junta soldada do CP2.	23
Figura 9 - Microestrutura do metal de base utilizado em ambos os experimentos. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 200X.	24
Figura 10 – Microestrutura do metal de base dos CPs. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 500X.	25
Figura 11 - Raiz e enchimento da zona Fundida na condição de como soldada. As áreas circuladas representam a escória. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento de 200X.	26
Figura 12 - Raiz e enchimento da zona Fundida na condição de como soldada. As áreas circuladas representam a escória. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento de 500X.	27
Figura 13 - Microestrutura do passe de raiz, afetado pelo ciclo térmico do passe de acabamento. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 100X.	27
Figura 14 - Microestrutura do metal de solda no passe de raiz afetada pelo ciclo térmico do passe de acabamento. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 200X.....	28
Figura 15 - Microestrutura da Zona Fundida e ZAC do CP1. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 100X.	28
Figura 16 - Microestrutura da Zona Fundida, ZAC e MB do CP1. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 200X	29
Figura 17 - Microestrutura da ZAC do CP1. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 500X.	29
Figura 18 - Mapeamento da posição das micrografias na junta soldada do CP1.	30

Figura 19 - Zona Fundida, passes de Enchimento e reaquecimento do CP2. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 100X.....	31
Figura 20 - Zona Fundida, passes de Enchimento e Reaquecimento do CP2. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 200X.....	32
Figura 21 - Zona Fundida na condição de como soldada. As áreas circuladas representam a escória. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 500X.	32
Figura 22 - Microestrutura da ZAC, ZF e MB do CP2. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 100X.....	33
Figura 23 - Microestrutura da ZAC, ZF e MB do CP2. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 200X.....	33
Figura 24 - Microestrutura da ZAC, ZF e MB do CP2. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 100X.	34
Figura 25 - Mapeamento da posição das micrografias na junta soldada do CP2.	34
Figura 26 - Representação da obtenção da fração volumétrica de ferrita do metal de base.....	35
Figura 27 – Imagens micrograficas da ZAC do CP1 e CP2 observadas no software Image J para medição de Ferrita.	36
Figura 28 - Gráfico comparativo da fração volumétrica de ferrita dos CP1 e CP2 em relação ao metal de base.	37
Figura 29 (A) - Curva de polarização obtida através da técnica DL-EPR, amostra região da face da solda.....	39
Figura 30 (B) - Curva de polarização obtida através da técnica DL-EPR, amostra região da face da solda.....	39
Figura 31 (C) - Curvas de polarização obtida através da técnica DL-EPR, amostra região da face da solda.....	40
Figura 32 (D) - Curva de polarização obtida através da técnica DL-EPR, amostra região da face da solda.....	40
Figura 33 - Gráfico do resultado do ensaio Charpy V quanto à energia absorvida pelos CPs com seção reduzida.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química e de alguns AIDs. Adaptado da ref. [3].....	6
Tabela 2 - Propriedades mecânicas de alguns AIDs. Adaptado da ref. [15].....	7
Tabela 3 - Fases observadas nos AIDs. Adaptado da ref. [19].....	9
Tabela 4 - Composição química do material utilizado no experimento.	15
Tabela 5 - Propriedades mecânicas do AID utilizado no experimento [15].	15
Tabela 6 - Composição química do eletrodo E 2209-17 em % peso [24].	15
Tabela 7 - Parâmetros de soldagem utilizados no CP1.	17
Tabela 8 - Parâmetros de soldagem utilizados no CP2.	17
Tabela 9 - Resultado das análises da fração volumétrica de ferrita e austenita da ZAC (em %)	36
Tabela 10 - Relação Ir/Ip obtidas no ensaio DL-EPR.....	38
Tabela 11 – Resultados obtidos do ensaio Charpy V dos CPs.....	42

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

AI	Aço inoxidável
AIBL	Aço inoxidável duplex baixa liga
AID	Aço inoxidável duplex
AISD	Aço inoxidável superduplex
ASTM	American society of testing and materials
AWS	American welding society
CP	Corpo de prova
DL-EPR	Double loop electrochemical potentiationkinetic reactivation
ECS	Eletrodo de calomelano saturado
ER	Eletrodo revestido
H	Energia de soldagem
Ip	Corrente de pico
Ir	Corrente de reativação
MB	Metal base
MIG/MAG	Gas metal arc welding
Mpa	Mega pascal
η	Eficiência de soldagem com eletrodo revestido
Pa	Passe de acabamento
Pc	Passe de raiz
Pe	Passe de enchimento
Pr	Passe de reaquecimento
PRE	Índice de resistência à corrosão por pites
PREw	Índice de resistência à corrosão por pites levando em consideração o teor de tungstênio
TIG	Gas tungsten arc welding
UNS	Unified numbered system
v	Velocidade de soldagem
V	Tensão elétrica
ZAC	Zona afetada pelo calor

ZF	Zona fundida
α	Ferrita
α'	Ferrita rica em cromo
γ	Austenita
γ_2	Austenita secundária
σ	Fase sigma
χ	Fase chi

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
CURRICULUM VITAE	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS.....	xi
SUMÁRIO	xiii
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS	2
2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS	3
2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS.....	3
2.4 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS	4
2.5 AÇOS INOXIDÁVEIS ENDURECIDOS POR PRECIPITAÇÃO	4
2.6 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX – AIDs	4
2.6.1 Propriedades Mecânicas dos AIDs.....	7
2.6.2 Resistência à Corrosão dos AIs.....	7
2.6.3 Características Metalúrgicas dos AIDs	8
2.7 SOLDABILIDADE DOS AIDs.....	10
2.7.1 Processos de Soldagem Aplicáveis aos AIDs	11
2.7.2 Processo de Soldagem - Eletrodo Revestido ER.....	11
3 OBJETIVO.....	13
4 MATERIAIS E MÉTODOS	14
4.1 MATERIAIS.....	14
4.1.1 Metal de Base	14
4.1.2 Metal de Adição	15
4.2 PROCESSO DE SOLDAGEM.....	16
4.3 ENSAIOS REALIZADOS	18

4.3.1 Caracterização Metalográfica	18
4.3.2 Determinação do Fração Volumétrica de Ferrita	19
4.3.3 Ensaio de Resistência à Corrosão Intergranular - DL-EPR.....	19
4.3.4 Ensaio Charpy V	20
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1 CARACTERIZAÇÃO METALOGRAFICA	22
5.1.1 Macrografia	22
5.1.2 Caracterização Microestrutural.....	23
5.1.2.1 Caracterização Microestrutural do Metal de Base dos CPs.....	24
5.1.2.2 Caracterização Metalográfica da Junta Soldada do CP 1	25
5.1.2.3 Caracterização Metalográfica da Junta Soldada do CP 2	30
5.2 RESULTADO DA ANÁLISE DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FERRITA.....	35
5.3 RESULTADO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO INTERGRANULAR PELA TÉCNICA DE POLARIZAÇÃO DE REATIVAÇÃO POTENCIOCINÉTICA DE CICLO DUPLO (DL-EPR).....	37
5.3.1 Resultado do - DL-EPR, para o CP1.....	39
5.3.2 Resultado do - DL-EPR, para o CP2.....	40
5.4 RESULTADO DO ENSAIO DE TENACIDADE AO IMPACTO - CHARPY V	41
6 CONCLUSÕES	43
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	44
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os aços inoxidáveis Duplex são altamente resistentes à corrosão, seu elemento de liga predominante é o cromo, dentre os tipos os aços inoxidáveis duplex pode-se citar o UNS S32205 que é uma liga com boas propriedades mecânicas e excelente resistência à corrosão. O aço inoxidável duplex possui uma microestrutura composta por austenita e ferrita, composição química típica com 22% de cromo, 5% de níquel, 3% molibdênio e com adição de nitrogênio [1,2,3].

Comumente os processos de fabricação e manutenção de equipamentos industriais que empregam aços inoxidáveis duplex envolvem operações de soldagem, através destes processos, surgem modificações microestruturais que alteram suas propriedades, por isto a caracterização das juntas soldadas com análise de tenacidade por meio de ensaio de impacto Charpy em V a temperatura de -40 °C, a análise de corrosão DL-EPR, análise microestrutural e contagem de ferrita para entendimento dessas modificações na soldagem por eletrodo revestido é importante para manter balanceamento de fases das juntas soldadas que é intuito deste trabalho [4].

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são conhecidos por sua resistência à corrosão, seu elemento de liga predominante é o cromo (Cr), com uma concentração de pelo menos 11% Cr em peso é requerida para gerar tal característica [1], tipicamente também é composto de níquel com 5 a 10% Ni, molibdênio com 1,5 a 5% Mo, ligado ao nitrogênio e apresenta baixos teores de carbono [5].

Estes aços são de grande interesse para a engenharia por terem boa resistência à oxidação e a corrosão, propriedades mecânicas à temperaturas elevadas e excelente tenacidade em temperatura negativa [6].

As composições químicas mais comuns dos aços inoxidáveis (por exemplo, 12% a 18% Cr + 8% Ni etc.) foram desenvolvidas, “acidentalmente”, no começo do século XX. A partir destas composições, foram estudados os efeitos de diversos elementos de liga como o carbono, o nitrogênio, o molibdênio, etc. [6].

Além do Cr, também são encontrados outros elementos de liga na composição dos aços inoxidáveis, o diagrama de Schaeffler, ilustrado na Figura 1 os elementos de liga com características semelhantes estão agrupados pelo cromo e no níquel equivalente. O diagrama relaciona a microestrutura do aço com a sua composição química, sendo as cinco principais classes de aços inoxidáveis os ferríticos, martensíticos, austeníticos, endurecidos por precipitação e duplex [7,8].

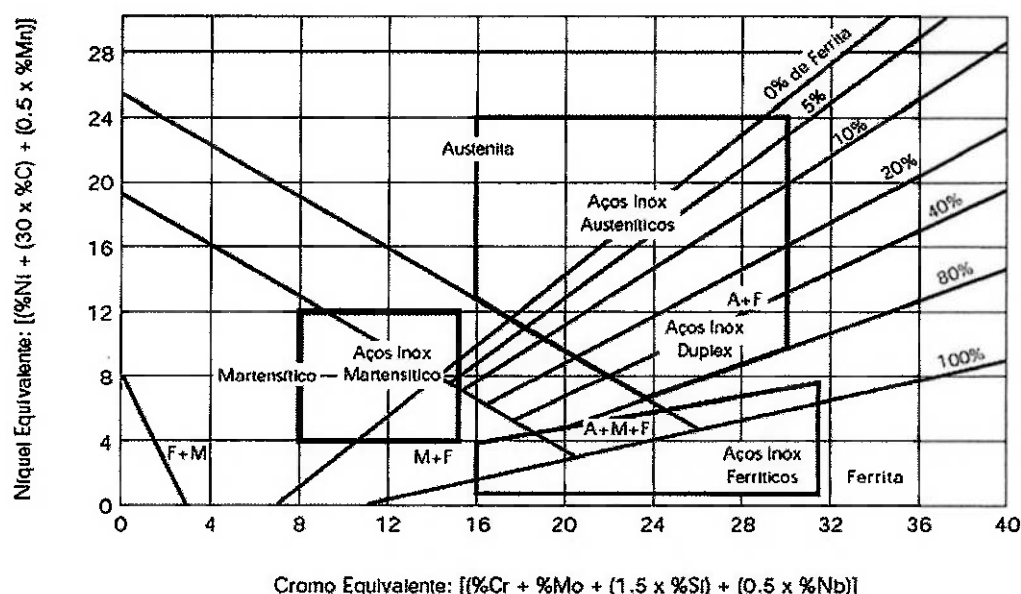


Figura 1 - Diagrama de Schaeffler [7].

2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas de ferro com teores de cromo que podem variar de 11,5% a 27% Cr, conforme o tipo apresentam baixos teores de carbono e altos teores de elementos estabilizadores de ferrita (α), também possuem propriedade magnética, boa resistência à corrosão em meios menos agressivos, boa ductilidade, razoável soldabilidade e não são endurecíveis por tratamento térmico. Os principais tipos conforme a norma AISI 405, 430, 430F, 446 e 502 [6,9].

2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS

Os aços inoxidáveis martensíticos são baseados no sistema ternário de Fe-Cr-C. Eles passam por uma transformação alotrópica e formam martensita a partir da austenita na maioria das situações de processamento termomecânicas, exceto quando o resfriamento é muito lento. Estes aços são geralmente denominados endurecíveis ao ar [10].

Em muitos aspectos, os aços inoxidáveis martensíticos são semelhantes aos aços carbonos que são temperáveis e revenidos, ou aços ligas cujas propriedades mecânicas podem ser modificadas por meio de tratamento térmico [11]. Os principais tipos conforme a norma AISI 410, 420, 440 [6].

2.4 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Os aços inoxidáveis austeníticos são os mais comuns entre os AIs, são caracterizados por boa resistência à corrosão, elevada tenacidade e boa soldabilidade, com adição de níquel sua estrutura estabiliza à temperatura ambiente. Elementos como molibdênio, titânio, ou de cobre podem ser adicionados para melhorar as suas propriedades, tornando mais adequado para varias aplicações críticas envolvendo a alta temperatura, criogenia, bem como a resistência à corrosão. Os principais tipos conforme a norma AISI 304 e 316 [6,12].

2.5 AÇOS INOXIDÁVEIS ENDURECIDOS POR PRECIPITAÇÃO

São ligas de ferro, cromo 12-17%, níquel 4-8% e molibdênio 0-2% contendo adições que permitam o endurecimento da martensita de baixo carbono pela precipitação de compostos intermetálicos (alumínio, cobre, titânio e/ou nióbio) [6].

2.6 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX – AIDs

Segundo LIPPOLD [10], estes aços são conhecidos desde a década de 1930, sua microestrutura é composta por de cerca de 50% ferrita e 50% de austenita. Na década de 1950 era conhecido por sua fragilidade quando soldado, somente em

meados de 1980 com o desenvolvimento do seu processo de fabricação e a melhoria quanto à soldabilidade os mesmos começaram a ser mais utilizados.

Os aços inoxidáveis duplex pertencem a uma classe de materiais que apresentam resistência mecânica superior e elevada resistência à corrosão por pites, por frestas e corrosão-sob-tensão em meios contendo cloretos ou H_2S , quando comparados aos aços inoxidáveis ferríticos ou austeníticos convencionais. Estas características tornam os aços inoxidáveis duplex potenciais substitutos dos aços inoxidáveis em aplicações nas áreas química, petroquímica, de prospecção de petróleo em águas marinhas, papel e celulose e cutelaria, entre outras [2].

Aços inoxidáveis duplex tais como os classificados com os nomes 2205 e 2507 possuem resistência à corrosão, igual ou melhor do que o AISI 304 e 316, e, em geral, a sua resistência à corrosão por pite são superiores ao AISI 316 [12].

Os aços inoxidáveis duplex são ligas de Fe-Cr-Ni-Mo que possuem também o nitrogênio como elemento de liga, substituindo parcialmente o níquel [4]. Algumas ligas, conforme apresentadas na Tabela 1, além dos elementos químicos citados, podem ter em sua composição C, Mn, Cu e W, a substituição do níquel pelo nitrogênio melhora tanto as propriedades mecânicas como as de resistência a corrosão [2].

A distinção entre aços inoxidáveis duplex (AID) e superduplex (AISD) está na composição química. Um AI é classificado como AID ou AISD conforme o índice de resistência à corrosão por pites PRE. A Tabela 1 apresenta a composição química nominal de alguns AID e AISD [2]. Já o aço inoxidável duplex baixa liga, lean duplex (AIBL) diferencia dos demais AID pelo baixo teor de molibdênio (entre 0,05 e 1%), seu teor de Cr em média é de 22% [3].

Tabela 1 - Composição química e de alguns AIDs. Adaptado da ref. [3].

UNS nº	Composição química (%)								PRE
	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W	
Lean Duplex									
S32101	0,04	21,00 - 22,00	1,35 - 1,70	0,10 - 0,80	0,20 - 0,25	4,00 - 6,00	0,10 - 0,80	-	27
S32202	0,03	21,50 - 24,00	1,00 - 2,80	0,45	0,18 - 0,26	2,00	-	-	27
S32304	0,03	21,50 - 24,50	3,00 - 5,50	0,05 - 0,60	0,05 - 0,20	2,50	0,05 - 0,60	-	26
Duplex									
S31803	0,03	21,00 - 23,00	4,50 - 6,50	2,50 - 3,50	0,08 - 0,20	2,00	-	-	34
S32205	0,03	22,00 - 23,00	4,50 - 6,50	3,00 - 3,50	0,14 - 0,20	2,00	-	-	36
S31260	0,03	24,00 - 26,00	5,50 - 7,50	2,50 - 3,50	0,10 - 0,30	1,00	0,20 - 0,80	0,10 - 0,50	39
S32550	0,04	24,00 - 27,00	4,50 - 6,50	2,90 - 3,90	0,10 - 0,25	1,50	1,50 - 2,50	-	40
Super Duplex									
S32750	0,03	24,00 - 26,00	6,00 - 8,00	3,00 - 5,00	0,24 - 0,32	1,20	0,5	-	43
S32760	0,03	24,00 - 26,00	6,00 - 8,00	3,00 - 4,00	0,20 - 0,30	1,00	0,50 - 1,00	0,50 - 1,00	42
S32808	0,03	27,00 - 27,90	7,00 - 8,20	0,80 - 1,20	0,30 - 0,40	1,10	-	2,10 - 2,50	40

Os AIDs são classificados de acordo com a sua composição química e seu PRE, que pode ser determinado por meio das equações 1 e 2 [13].

$$PRE_N = \%Cr + 3,3 \times (\%Mo) + 16 \times (\%N) \quad (1)$$

$$PRE_W = \%Cr + 3,3 \times (\%Mo + 0,5 \times \%W) + 16 \times (\%N) \quad (2)$$

Segundo GUNN [13], tanto o uso da equação (1) quanto o uso da equação (2) são corretas, essa última, porém, considera a adição de tungstênio (W) como elemento de liga e é utilizada principalmente no cálculo do PRE dos AISD.

Ao longo da sua evolução, os AIDs têm sido referenciados comercialmente de três maneiras: lean duplex, duplex, superduplex e os hiperduplex [14].

Duplex: também apresenta teor de Cr de 22% em média, porém com maior teor de Mo em relação ao lean duplex (entre 1,5 e 3,5%), geralmente mais de 80%

dos AIDs produzidos no mundo pertencem a essa categoria, um exemplo desse tipo de AID é o UNS S32205 [3].

2.6.1 Propriedades Mecânicas dos AIDs

As propriedades mecânicas dos AIDs estão incluídas na norma ASTM A240, estes requisitos são listados na Tabela 2, nota-se que as ligas que contêm os níveis mais elevados de cromo e de nitrogênio como as ligas AISI, têm maior resistência que as ligas convencionais, tais como a liga UNS S32205 [10].

Tabela 2 - Propriedades mecânicas de alguns AIDs. Adaptado da ref. [15].

UNS	Limite de resistência	Limite de escoamento	Alongamento
nº	MPa	MPa	(%)
S32304	600	400	25
S31803	620	450	25
S32205	620	450	25
S32900	620	485	15
S32950	690	485	15
S31260	690	485	20
S32520	770	550	25
S32550	760	550	15
S32750	795	550	15
S32760	750	550	25

2.6.2 Resistência à Corrosão dos AIs

A propriedade mais importante dos aços inoxidáveis é a resistência à corrosão. A vida em serviço e o sucesso de seleção do aço inoxidável são frequentemente dependentes desta propriedade. Assim, um conhecimento básico dos fenômenos de corrosão que podem afetar a durabilidade dos itens fabricados em aço inoxidável em serviço é fundamental [6].

Segundo ROBERGE [16], todos os aços inoxidáveis contêm carbono em sua composição, sendo sua fração volumétrica em função da sua classificação, quanto mais carbono, mais cromo deve ser utilizado, pois o carbono pode levar cerca de 17 vezes o seu peso próprio a ligar-se com o cromo e formar carboneto de cromo que tem baixa resistência à corrosão.

Outros elementos de liga são adicionados para melhorar a resistência à corrosão, incluem o níquel, molibdênio, cobre, titânio, silício, alumínio, cromo, e outros que causam alterações metalúrgicas [16].

2.6.3 Características Metalúrgicas dos AIDs

Nos AIDs algumas transformações, podem ocorrer após o processo de soldagem quando resfriados até a temperatura ambiente, como alterações microestruturais no metal da junta na fase pós-solidificação, onde envolve primeiro a transformação ferrita-austenita [17].

Segundo LIPPOLD [10] os AIDs solidificam-se como ferrita e permanecem ferríticos até o final da solidificação dependendo da composição, a fase ferrítica apresenta-se estável em uma elevada faixa de temperatura e após isso, abaixo da linha solvus da ferrita, geralmente ao redor de 1200 °C, inicia-se a precipitação da austenita. A composição química e a taxa de resfriamento determinam como será a transformação da ferrita em austenita e é essa transformação que determina o equilíbrio entre as fases ao final da solidificação.

Mudanças microestruturais, segundo o Welding Handbook [18], podem ocorrer durante a soldagem e levar à formação de fases, redução da tenacidade e da resistência à corrosão, são elas:

Crescimento de grãos de ferrita na ZAC.

Precipitação austenita secundária (γ_2).

Precipitação de nitreto de Cr.

Fase sigma (σ).

Carbonetos (M_7C_6 e $M_{23}C_6$).

Fase chi (χ).

Fragilização por (α'), também conhecido como fragilização à 475 °C.

No trabalho de Londoño [19], apresentado na Tabela 3, são citadas as principais fases que podem ser observadas nos AIDs.

Tabela 3 - Fases observadas nos AIDs. Adaptado da ref. [19].

Fase	Faixa de temperatura (°C)	Composição química (%)				
		Fe	Cr	Ni	Mo	Outros
α Ferrita ^(a)	-	54,5	27,9	8,4	2,9	0,05 N
γ Austenita ^(a)	-	55,5	27,0	10,0	3,6	0,54 N
γ_2 Austenita secundária ^(a)	600-1000	56,8	25,3	11,2	2,4	0,19 N
Nitreto ^(b) (Cr_2N)	550-1000	4,6	85,5	-	4,8	5,1 V N
Nitreto ^(b) (CrN)	550-1000	5,8	83,1	-	9,3	1,8 Mn N
π ^(b) ($Mo_{13}Fe_7N_4$)	500-600	28,4	34,9	2,8	33,9	N
Carboneto ^(b) ($M_{23}C_6$)	550-900	35,0	60,0	2,0	3,0	C
Carboneto (M_7C_3)	950-1100	-	-	-	-	-
χ ($Fe_{18}Cr_6Mo_5$)	400-950	48,2	26,7	3,3	21,8	-
σ ($FeCr$)	650-1000	55,0	29,0	5,0	11,0	-
ε (rica em Cu)	400-650	-	-	-	-	Cu
G ^(c)	300-500	16,0	25,0	26,0	16,0	14,0 Si
α' (α rica em Cr)	350-750	12,0	72,0	3,0	10,0	3,0 Si
R ($Fe_{28}Cr_{13}Mo_{12}$)	550-800	44,8	25,6	-	27,8	1,8 Co
τ ($Fe-Cr-Mo$)	550-650	43,4	23,9	5,9	22,8	3,6 Mn
Laves (Fe_2Mo)	650-815	-	-	-	-	-

Notas: a: As composições da ferrita, austenita secundária são ilustrativas para a liga 25,66% Cr – 9,24% Ni – 3,8% Mo – 0,26% N.

b: Medidos só os elementos metálicos

c: % atômica.

Todas essas fases apresentam um caráter fragilizante, seja por um aumento de dureza, por formação de zonas empobrecidas em cromo na microestrutura ou por alteração na composição química original [4].

Para o processo de soldagem dos AIDs é necessário ter cuidado ao selecionar seus parâmetros a fim de minimizar o risco do surgimento de zonas fragilizadas, fases intermetálicas e regiões com microestrutura desbalanceada que possam comprometer as propriedades de resistência mecânica e de resistência à corrosão da junta soldada. No Welding Handbook da AWS são citados alguns pontos que devem ser observados durante o processo de soldagem, são eles [18]:

- Reações na poça de fusão provenientes da combinação entre metal de base, metal de adição e gás de proteção.
- Solidificação.
- Taxa de resfriamento e tratamento térmico.

2.7 SOLDABILIDADE DOS AIDs

Os AIDs, de forma geral, apresentam boa soldabilidade, porém uma atenção deve ser dada a quantidade de energia aplicada na soldagem e no controle da temperatura de interpasse devido aquecimentos e resfriamentos consecutivos, geralmente pouco controlados, onde pode ocorrer a precipitação de carbeto, nitretos e fases intermetálicas que modificam a microestrutura original e, por consequência, comprometimento do desempenho da junta [14,20].

Nos AIDs, a energia de soldagem está diretamente associada às transformações microestruturais e ao desempenho da junta soldada. Assim, uma energia de soldagem elevada provoca uma baixa velocidade de resfriamento,

favorecendo a precipitação de austenita e o equilíbrio microestrutural típico do aço inoxidável duplex. Entretanto, uma baixa energia de soldagem, resulta numa elevada velocidade de resfriamento, retardando a precipitação de austenita e a formação equilibrada das fases na microestrutura [21].

A metalurgia da soldagem dos aços AIDs deve ser estudada baseando-se nas transformações de fase que ocorrem tanto na zona fundida (ZF) como na zona afetada pelo calor (ZAC), que afetam a fração volumétrica de austenita, isto é, o balanceamento original da microestrutura do material como recebido [4].

2.7.1 Processos de Soldagem Aplicáveis aos AIDs

Os aços inoxidáveis duplex podem ser soldados pela maioria dos processos de soldagem, tais como TIG, MIG, Plasma, Eletrodo Revestido, Arco Submerso, Resistência Elétrica, Feixe de Elétrons, entre outros [20].

O passe de raiz em juntas com acesso unilateral deve ser feito pelo processo TIG ou Plasma com emprego de gás de purga. Em casos nos quais a raiz da junta soldada é acessível para goivagem com esmerilhadeira, os processos MIG/MAG-Pulsado ou eletrodo revestido podem ser usados para o passe de raiz [14].

2.7.2 Processo de Soldagem - Eletrodo Revestido ER

Neste processo é utilizado um eletrodo composto de alma metálica "arame" coberto com um revestimento de materiais minerais e/ou outros que no processo de soldagem são consumidos pelo arco elétrico gerado entre sua extremidade e o metal a ser soldado, conforme apresentado na Figura 2. O arco representa a fonte de energia que é utilizada para promover a fusão das duas partes [22,23].

O eletrodo que se funde é transformado em gotas, devido à ação do arco elétrico, que são transferidas sob esta forma para a poça de fusão. Estas gotas serão finas e numerosas, no caso de se soldar com correntes de alta intensidade e apresentarão o formato de gotas maiores, no caso de baixas intensidades de corrente [22].

Para a soldagem dos AIDs o eletrodo revestido deve ter de baixo hidrogênio, garantindo uma concentração de hidrogênio difusível menor que 10 mL por 100 g de metal de solda depositado, evitam-se assim as trincas por hidrogênio na fase ferrítica [14].

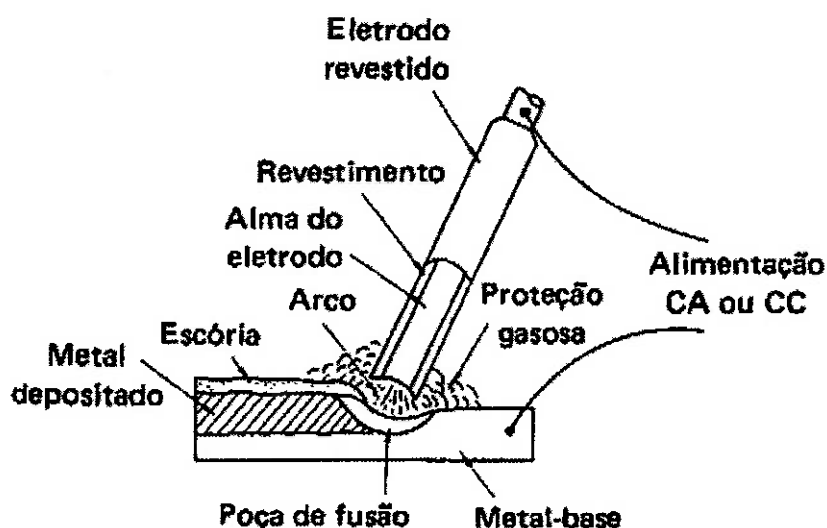


Figura 2 – Esquema da soldagem com o processo Eletrodo Revestido [22].

3 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo caracterizar uma junta convencional do aço inoxidável UNS S32205 e uma junta que sofreu um passe de reaquecimento utilizando o ensaio Charpy V -40 °C, análise de corrosão intergranular e caracterização microestrutural.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Metal de Base

Para a realização dos experimentos foram utilizados 02 corpos de provas em chapas com espessuras de 6,0 mm, sendo os materiais da mesma corrida e classificados como aço inoxidável duplex UNS S32205.

O CP1 foi preparado para processo de soldagem ER convencional conforme apresentado na Figura 3, o comprimento total da chapa é de 200,0 mm, o chanfro em V foi usinado com ângulo de 60° , abertura de raiz de 1,5 mm e face de raiz de 1,5 mm.

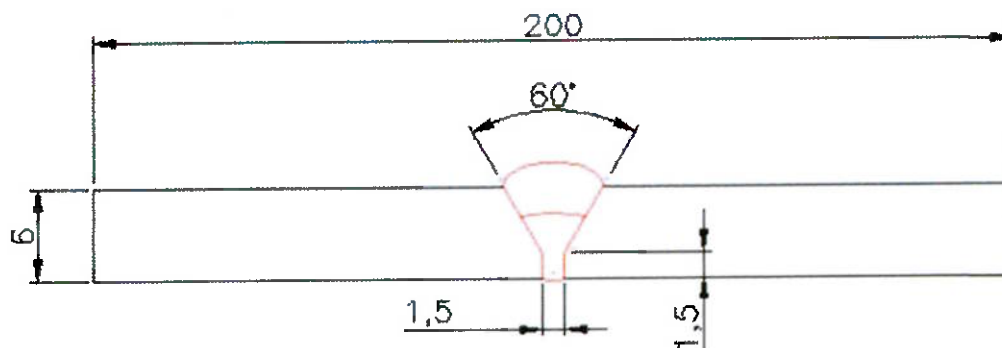


Figura 3 – Desenho esquemático da junta CP1.

O CP2 (Soldado com o Passe de Reaquecimento) apresentado na Figura 4 com dimensões de 400,0 mm de comprimento e 200,0 mm de largura. Foi executado um entalhe por esmerilhamento com disco de corte apropriado no centro da chapa para receber o metal de adição pelo processo de soldagem ER com a técnica do passe de reaquecimento.

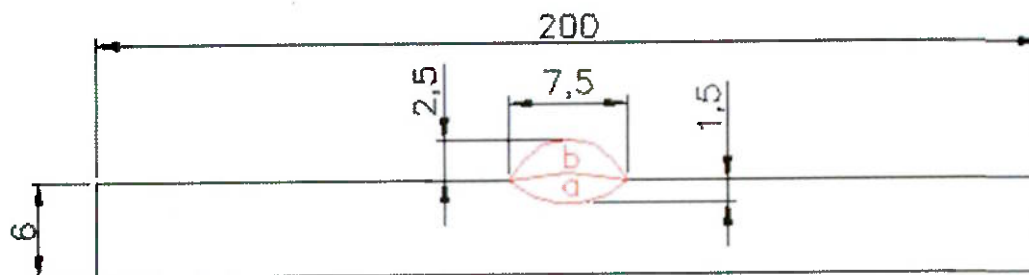


Figura 4 – Desenho esquemático da junta CP2.

A composição química principal e as propriedades mecânicas do AID, fornecidas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 4 e Tabela 5 respectivamente.

Tabela 4 - Composição química do material utilizado no experimento.

UNS Nº	Composição química (%)			
	Ni	Cr	Mo	N
S32205	5,0	22,0	2,8	0,15

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do AID utilizado no experimento [15].

UNS	Limite de resistência	Limite de escoamento	Alongamento
Nº	MPa	MPa	(%)
S32205	655	450	25

4.1.2 Metal de Adição

O material de adição para o processo de soldagem dos CPs foi selecionado para criar o equilíbrio de fase, proporcionando tanto resistência mecânica quanto resistência à corrosão, similar ao metal de base, para isto foi utilizado eletrodo revestido rutilico, classificado como E 2209-17 com diâmetro de 2,5 mm conforme AWS A5.4-92 e sua composição química é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química do eletrodo E 2209-17 em % peso [24].

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
0,03	0,9	0,8	23,0	9,0	3,2	0,17

4.2 PROCESSO DE SOLDAGEM

Para a realização deste experimento foi escolhido o processo soldagem eletrodo revestido (ER), utilizando como fonte um retificador modelo TRR 430 da empresa Bambozzi®, operando em corrente contínua para soldar os CPs. A soldagem dos experimentos foi realizada por um soldador qualificado sobre uma bancada e o CP foi feito na posição horizontal.

No CP1, foi desenvolvida uma junta com chanfro em "V", neste foram executados 02 passes de raiz e posteriormente 02 passes de acabamento pelo processo de soldagem convencional. Os parâmetros utilizados para soldagem são apresentados na Tabela 7.

No CP2 foram executados oito (8) cordões de solda, sendo 4 passes de enchimento do entalhe no centro da chapa (detalhe "a" da Figura 4) e posteriormente realizados 4 passes de "reaquecimento" (detalhe "b" da Figura 4), com o objetivo de realizar um tratamento térmico na junta soldada. Os parâmetros de soldagem são descritos na Tabela 8.

Durante o processo de soldagem foram anotados os parâmetros e variáveis do experimento como, a medição do comprimento dos cordões de solda em (mm), a cronometragem do tempo de soldagem em segundos, a tensão e a corrente elétrica, que por meio da média destes valores indicados na Tabela 7 e Tabela 8, permitiram o cálculo da energia de soldagem através da adaptação da equação (3). A eficiência do processo de soldagem " η ", utilizando eletrodo revestido, foi considerada o valor médio de 0,8 [25].

Equação (3) para cálculo da energia de soldagem (H), adaptado da ref. [26].

$$H = \eta * \frac{V * I}{v} \quad (3)$$

Onde:

H = energia de soldagem (J/mm)

V = tensão elétrica do processo de soldagem

I = corrente elétrica do processo de soldagem (A)

v = velocidade de soldagem (mm/s)

η = eficiência do processo de soldagem com eletrodo revestido 0,8

Tabela 7 - Parâmetros de soldagem utilizados no CP1.

Nº e tipo do Passe	Raiz		Acabamento		Unidade
	1	2	3	4	
Corrente	73,0	72,0	75,0	74,0	A
	76,0	76,0	79,0	79,0	
Tensão	23,0	24,0	24,0	24,0	V
	30,0	31,0	31,0	30,0	
Tempo	44,7	38,8	44,0	43,7	s
Temperatura	26,0	60,0	93,0	87,0	°C
Extensão do cordão	110,0	90,0	100,0	100,0	mm
Velocidade de soldagem	2,5	2,3	2,3	2,3	mm/s
Energia de soldagem	642,1	701,8	744,5	721,9	J/mm

Tabela 8 - Parâmetros de soldagem utilizados no CP2.

Nº e tipo do Passe	Enchimento				Passe de Reaquecimento				Unidade
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Corrente	74,0	74,0	74,0	74,0	75,0	74,0	75,0	74,0	A
	79,0	79,0	80,0	80,0	79,0	77,0	78,0	78,0	
Tensão	24,0	24,0	24,0	25,0	24,0	26,0	26,0	28,0	V
	29,0	30,0	31,0	29,0	29,0	30,0	31,0	31,0	
Tempo	43,9	43,4	44,5	35,9	15,3	41,8	39,8	23,6	s
Temperatura	26,0	63,0	59,0	88,0	39,6	60,6	59,8	88,8	°C
Extensão do cordão	135,0	115,0	117,0	83,0	60,0	150,0	140,0	80,0	mm
Velocidade de soldagem	3,1	2,6	2,6	2,3	3,9	3,6	3,5	3,4	mm/s
Energia de soldagem	527,4	624,0	644,2	719,4	417,4	471,3	495,9	528,9	J/mm

Os Parâmetros de soldagem como corrente e tensão elétrica que são apresentados nas Tabela 7 e Tabela 8 foram selecionados de forma experimental e baseados na recomendação do fornecedor do consumível de soldagem.

4.3 ENSAIOS REALIZADOS

4.3.1 Caracterização Metalográfica

No intuito de analisar a ZAC dos CPs, foi executada análise microestrutural no metal de base e nas ZACs dos cordões de solda do experimento. As análises foram executadas em seções cortadas com dimensões de 26 x 6 mm dos cordões de solda originais, seguidamente foram embutidas à quente em baquelite. Após o embutimento, realizou-se uma preparação na face das amostras com lixas de diferentes granulometrias, a sequência de granulometria das lixas foi: 180, 220, 320, 400, 600 e 1000 “meshes” e polidas com pasta de diamante na sequência: 6, 3 e 1 μm de tamanho médio de partícula.

Uma vez obtida a superfície totalmente polida o material foi submetido a ataque eletrolítico utilizando ácido oxálico 10% ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$), com tempo aproximado de 120 s e uma tensão de 3 V. O equipamento utilizado para o ataque foi o POLECTROL[®] da Struers.

A aquisição de imagens foi feita utilizando a câmera digital Opticam OPT 10000 acoplada no microscópio de marca Olympus BX60M, como apresentado na Figura 5.



Figura 5 - Microscópio óptico utilizado na caracterização microestrutural.

4.3.2 Determinação do Fração Volumétrica de Ferrita

Pelas imagens obtidas através da microscopia óptica das juntas soldadas dos CPs, a metalografia quantitativa foi empregada para avaliar a fração volumétrica de ferrita (α), através do tratamento das micrografias com auxílio do software de análise de imagem, denominado "Image J 1.47v" [27], um software livre programado em Java 1.6.0_20 (64-bit), com o qual foi possível fazer a quantificação das fases presentes. Os valores obtidos foram pontuais devido a utilização de somente 1 imagem micrográfica da ZAC das juntas soldadas de cada CP e, a partir do conhecimento da fração volumétrica de ferrita obteve-se a fração volumétrica de austenita.

4.3.3 Ensaio de Resistência à Corrosão Intergranular - DL-EPR

Devido à prática A da norma ASTM A262-02 ser aplicável somente para aços inoxidáveis austeníticos, foi realizado o ensaio de polarização de reativação potenciocinética de ciclo duplo nas juntas soldadas dos CPs 1 e 2 composto do AID UNS S32205. O método DP-ELR utilizou uma solução 2M H_2SO_4 + 0,5M NaCl + 0,01M KSCN a 30 °C, sendo realizados três ensaios para cada CP.

Foi utilizada uma célula de três eletrodos, sendo estes: eletrodo de referência de calomelano saturado (ECS), contra eletrodo de platina e, como eletrodo de trabalho, as amostras dos CPs. O procedimento adotado pelo método DL-EPR consistiu na polarização anódica da amostra a partir do potencial de corrosão até 500 mV (ECS) com uma taxa de varredura de 6 V/h. Ao se atingir 500 mV, a direção de varredura do potencial foi revertida e este foi varrido até o potencial de corrosão.

Os ensaios eletroquímicos foram feitos em um potenciostato Perkin Elmer Instruments, modelo 283 acoplado a um computador, pelo qual foram monitorados os ensaios, assim como adquiridos os dados.

Para este método, o grau de sensitização é normalmente feito através da relação entre as duas correntes de pico, pela relação I_r (Corrente de reativação) / I_p (Corrente de pico), que quanto maior valor, maior é o grau de sensitização [28].

4.3.4 Ensaio Charpy V

O ensaio de impacto Charpy foi utilizado no intuito de analisar a tenacidade da ZAC dos CPs, para isto, foram cortados corpos de provas utilizando serra automática e posteriormente usinados em fresadora convencional com espessura de forma reduzida, o dimensional final foi de 2,5 x 10 x 55 mm e entalhe "V" na ZAC, os parâmetros de preparo seguiram a norma ASTM A370-2010 [29] com resfriamento dos CPs a temperatura de -40 °C através de nitrogênio líquido dissolvido em álcool. A localização do entalhe para o ensaio foi determinada por meio de ataque macrográfico para identificação da ZAC dos passes de acabamento e reaquecimento das juntas soldadas, a Figura 6 representa os CPs após usinagem e preparados para o ensaio.

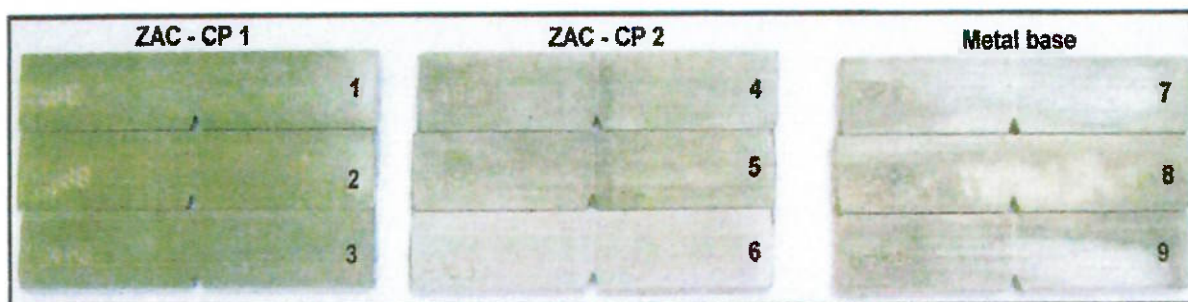


Figura 6 - CPs usinados antes do ensaio.

Foram testados os CPs para cada uma das condições como mostra a Figura 6, os CPs foram nomeados de 1 a 9, sendo 1, 2 e 3 para a ZAC do cordão de solda do CP1, já os números 4, 5 e 6 correspondem aos ensaios executados na ZAC do cordão de solda do CP2 e por último para caracterização do material conforme recebido, os números 7, 8 e 9 para os CPs do metal de base, sendo o ensaio executado no sentido de laminação de menor energia da chapa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA

5.1.1 Macrografia

As juntas selecionadas dos corpos de prova 1 e 2 foram submetidas a ensaios macrográficos para verificação e avaliação de possíveis descontinuidades internas. A Figura 7 e Figura 8 apresentam os resultados deste ensaio. O CP1 é apresentado na Figura 7 nota-se a geometria do chanfro da junta em V e em destaque uma linha tracejada, delineando o passe de acabamento (Pa) com a interseção do passe de raiz (Pr), a extensão da zona afetada pelo calor “ZAC” está indicada no metal de base.

Já o CP2 está sendo apresentado na Figura 8 onde a soldagem multipasse preencheu todo entalhe executado na chapa do metal de base “MB”. Na zona fundida é destacada uma linha tracejada separando o passe de enchimento (Pe) e o passe de reaquecimento (Pr).

Para os CPs utilizados nos ensaios, em ambas as progressões não foram encontradas indicações de descontinuidades internas.

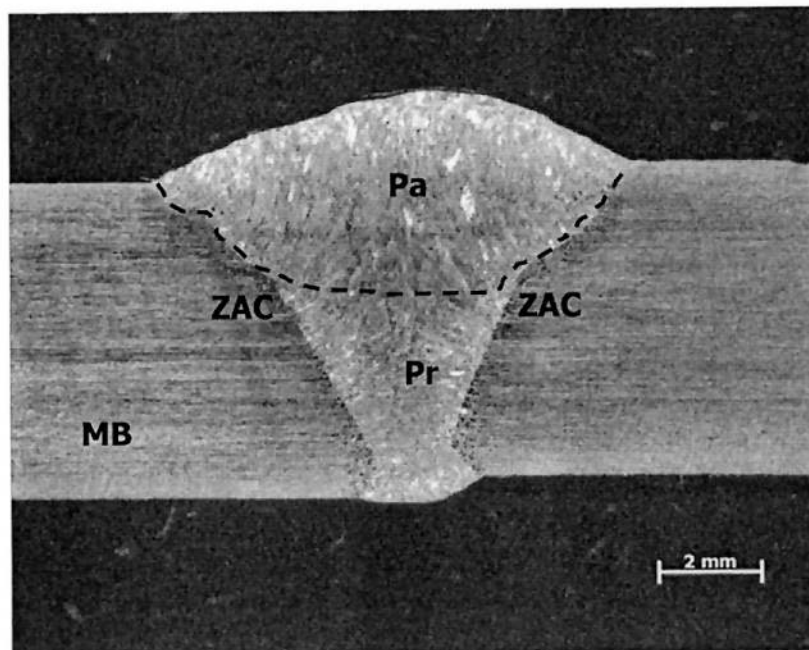


Figura 7 - Macrografia da junta soldada do CP1.

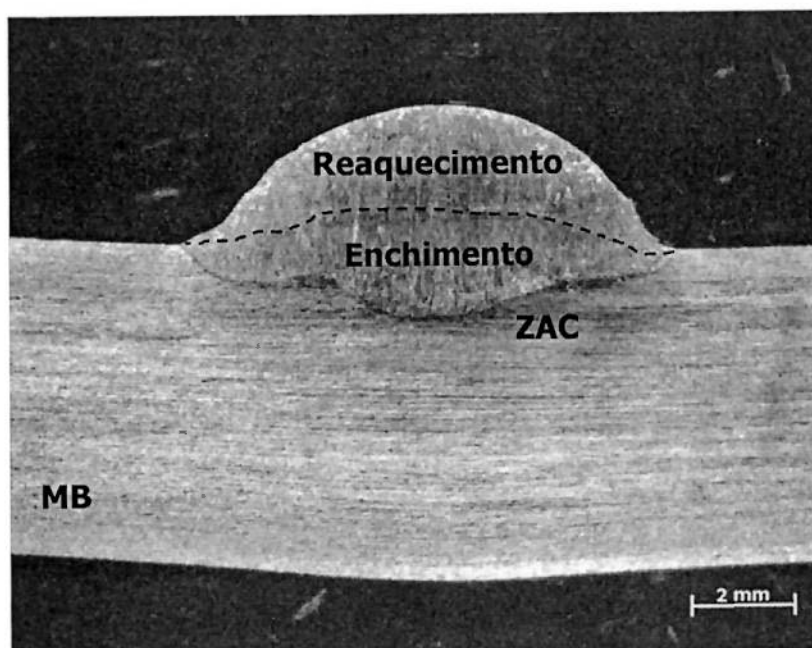


Figura 8 - Macrografia da junta soldada do CP2.

5.1.2 Caracterização Microestrutural

Com as micrografias foi possível uma análise quantitativa e qualitativa das fases presentes de modo a analisar se houve mudanças nas propriedades do metal de base dos CPs.

5.1.2.1 Caracterização Microestrutural do Metal de Base dos CPs

A microestrutura do aço inoxidável duplex UNS S32205, como recebido, utilizado nos experimentos é apresentada na Figura 9 e Figura 10 com escalas de ampliação de 200X e 500X. Observa-se uma microestrutura bem definida, com lamelas alinhadas no sentido de laminação do metal de base, bem organizadas, do ponto de vista de distribuição das duas fases na sua totalidade ferrítica e austenítica, típica de um AID, com aproximadamente 50% de fração volumétrica para a austenita e 50% para a ferrita, os grãos mais claros correspondem a austenita (γ) e a mais escura a ferrita (α).

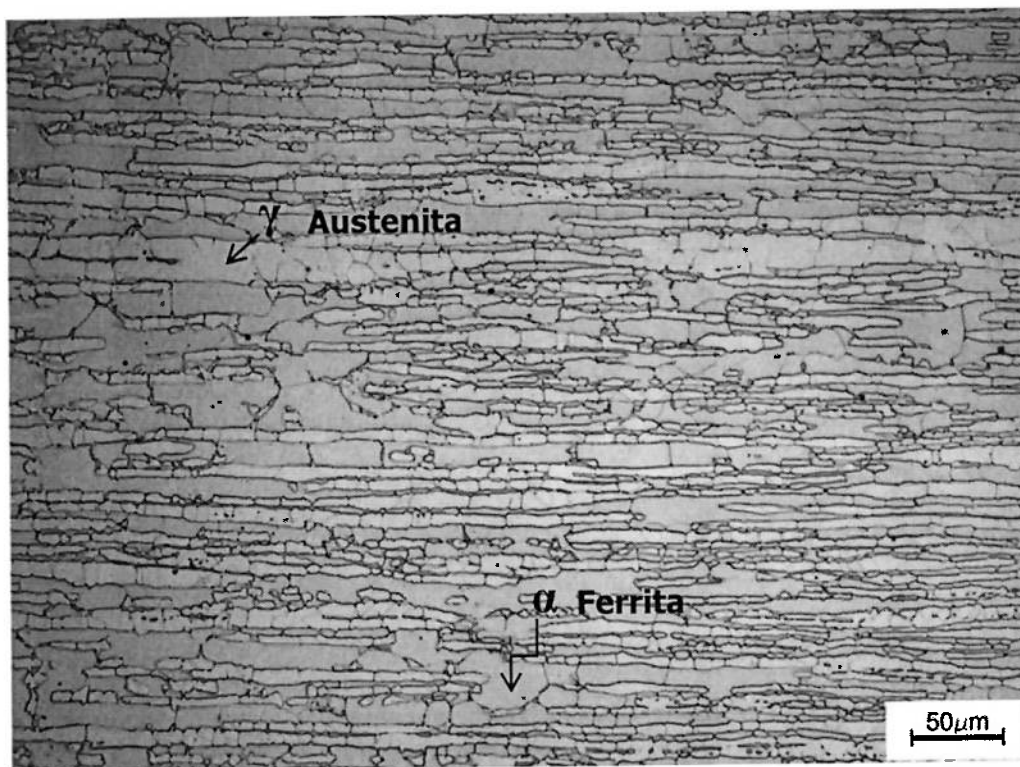


Figura 9 - Microestrutura do metal de base utilizado em ambos os experimentos. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 200X.

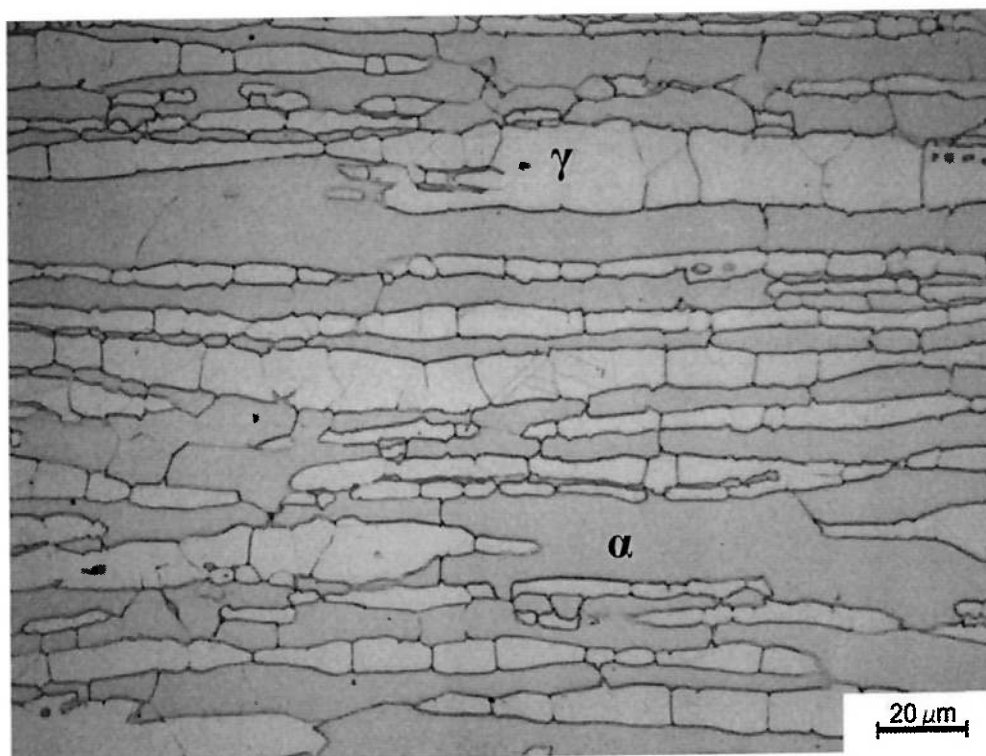


Figura 10 – Microestrutura do metal de base dos CPs. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 500X.

5.1.2.2 Caracterização Metalográfica da Junta Soldada do CP 1

A caracterização principal do corpo de prova 1 foi realizada nas regiões descritas na Figura 18, nota-se a zona fundida ZF, zona afetada pelo calor ZAC e metal de base MB da junta como soldada, abaixo são apontadas as figuras e comentários das mesmas conforme sequência de apresentação.

Na Figura 11 e Figura 12 são apresentadas as micrografias do metal de solda do enchimento na condição como soldado onde pode-se notar a presença de austenita (γ) e ferrita (α) com pontos circulados destacando as inclusões de escória.

Na Figura 13 e Figura 14 observa-se no centro da micrografia a região afetada pelo ciclo térmico do passe de acabamento, uma área desbalanceada com presença acentuada de ferrita, o passe de raiz com presença de ferrita e austenita e escória grosseira diferenciando assim do passe de acabamento, onde nota-se pela linha

tracejada uma quantidade maior de escória mais fina na região do interpasse pela linha tracejada e a divisão entre o passe de raiz e o passe de acabamento. No passe de raiz a presença de austenita (γ) e ferrita (α) com pontos circulados de inclusão de escória.

Na Figura 15 e Figura 16 observam-se as zonas, fundida ZF, afetada pelo calor ZAC e metal de base MB, nestas, o destaque fica para a ZAC composta por austenita (γ) e ferrita (α). O metal de base uma microestrutura disposta com lamelas alternadas de austenita (γ) e ferrita (α) ambas direcionadas ao sentido de laminação da chapa. Na Figura 17 observa-se a ZAC, composta por austenita (γ) e ferrita (α), já os pontos circulados, destacam escórias e precipitação de nitreto de cromo.

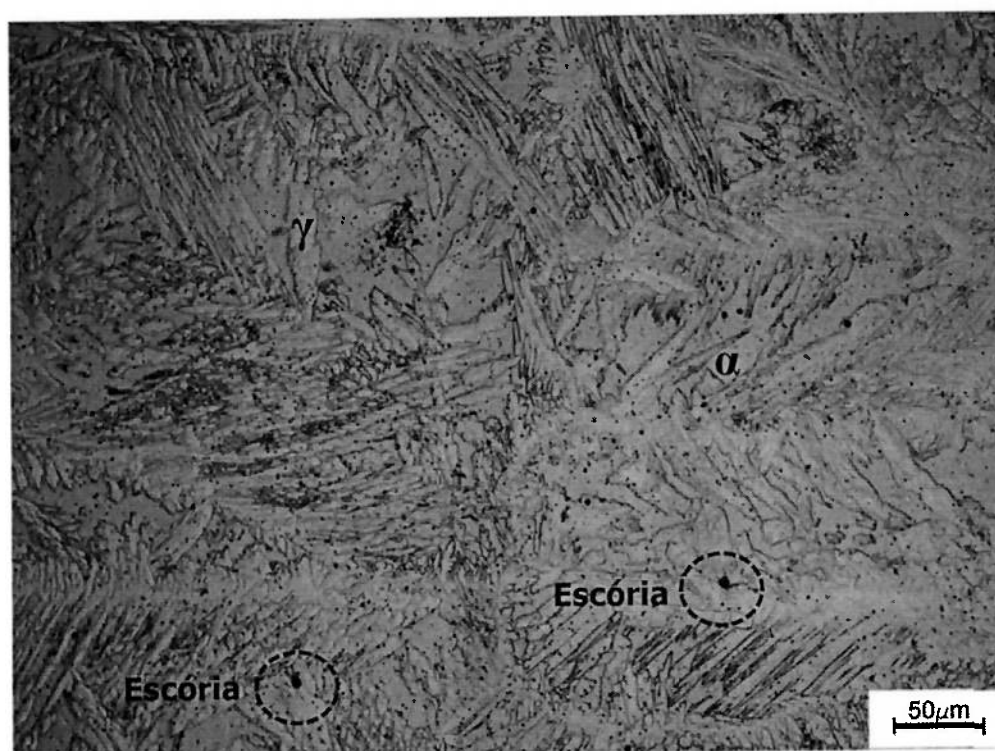


Figura 11 - Raiz e enchimento da zona Fundida na condição de como soldada. As áreas circuladas representam a escória. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento de 200X.

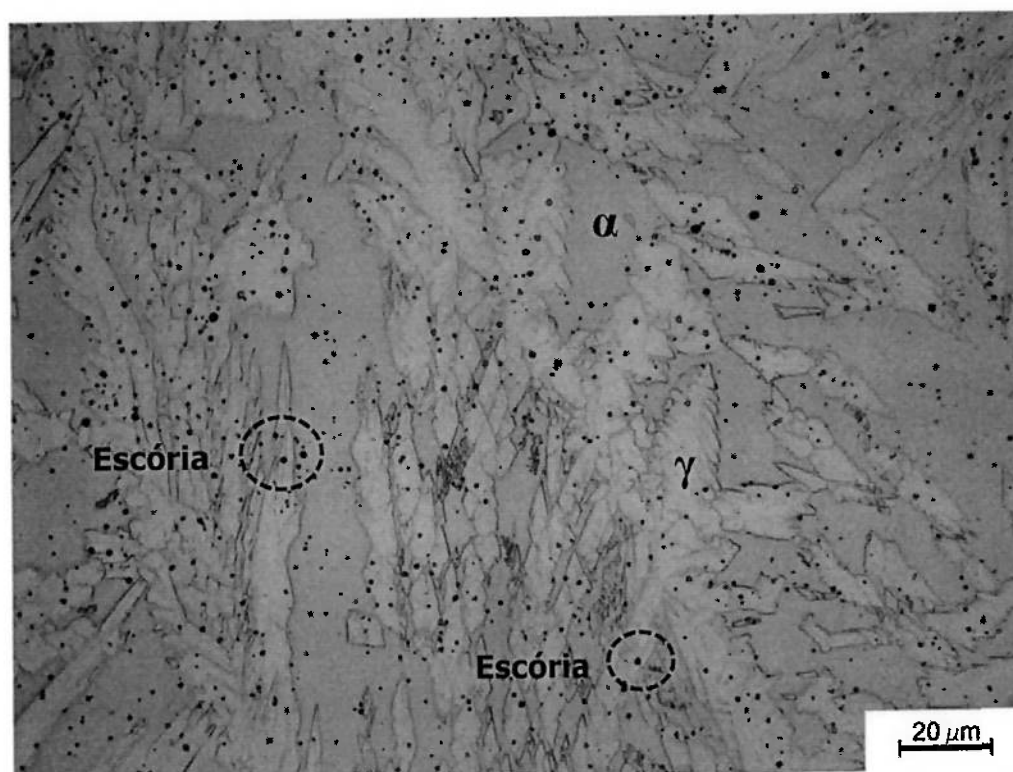


Figura 12 - Raiz e enchimento da zona Fundida na condição de como soldada. As áreas circuladas representam a escória. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento de 500X.

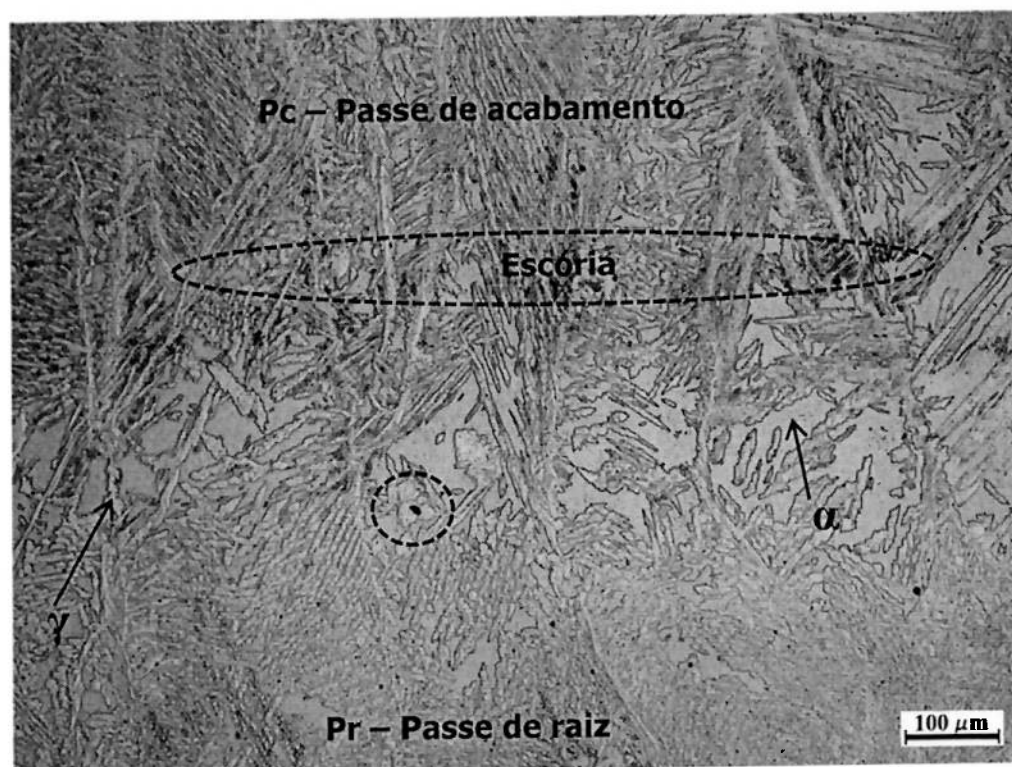


Figura 13 - Microestrutura do passe de raiz, afetado pelo ciclo térmico do passe de acabamento. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 100X.

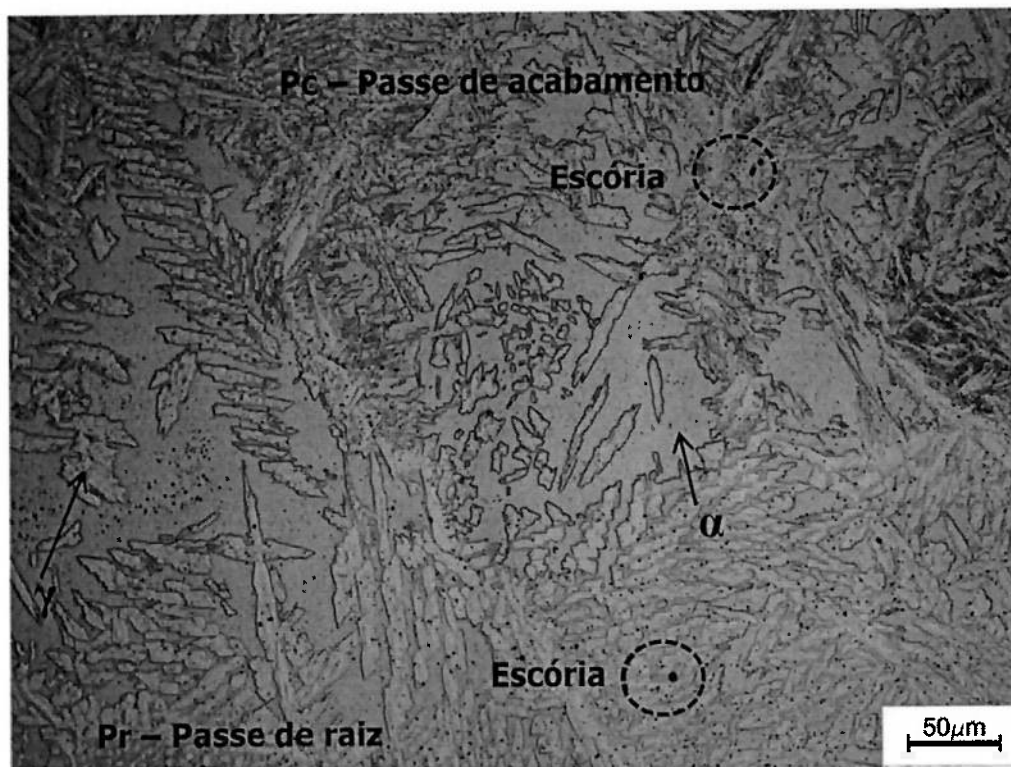


Figura 14 - Microestrutura do metal de solda no passe de raiz afetada pelo ciclo térmico do passe de acabamento. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 200X.

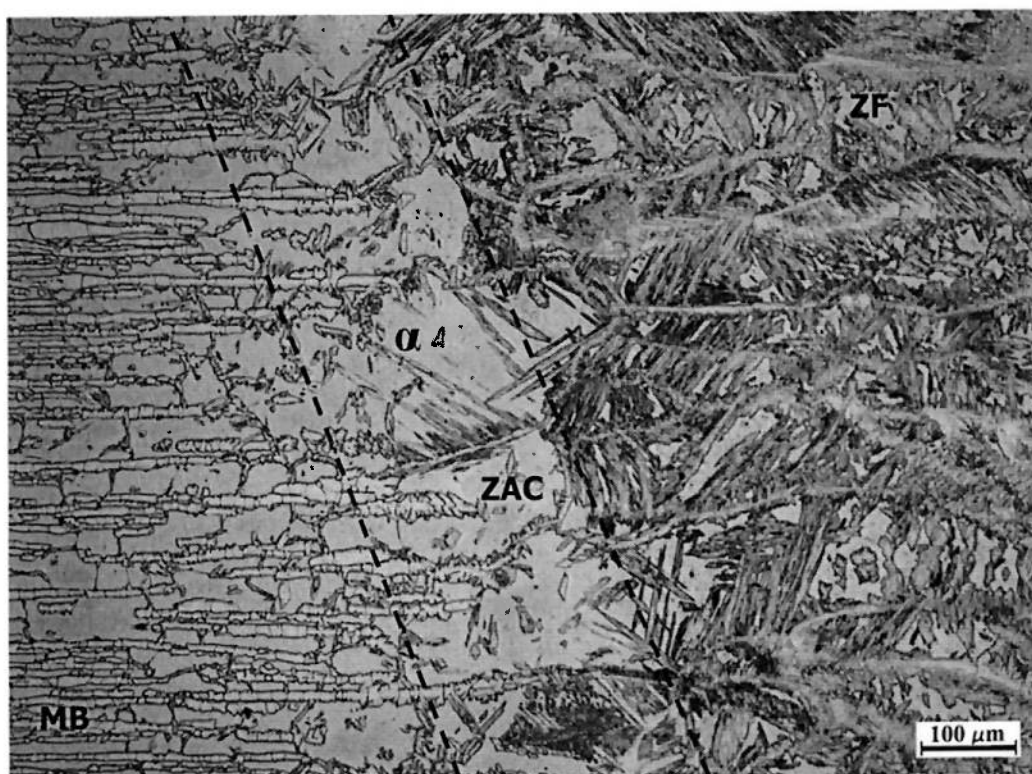


Figura 15 - Microestrutura da Zona Fundida e ZAC do CP1. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 100X.



Figura 16 - Microestrutura da Zona Fundida, ZAC e MB do CP1. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 200X

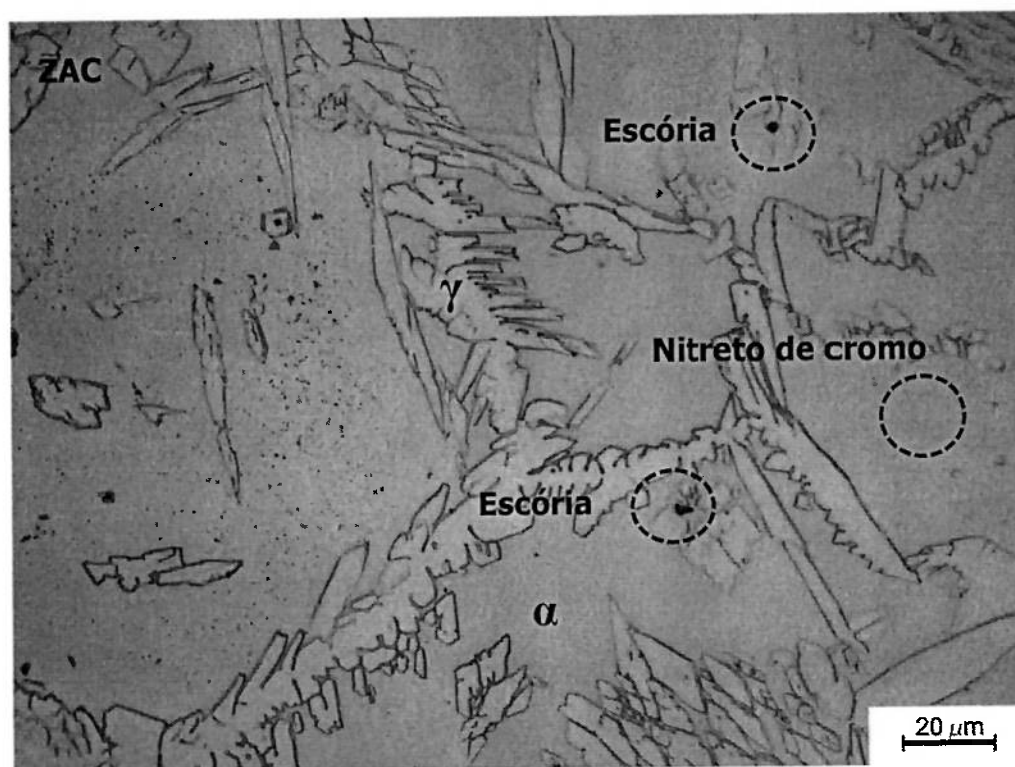


Figura 17 - Microestrutura da ZAC do CP1. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 500X.

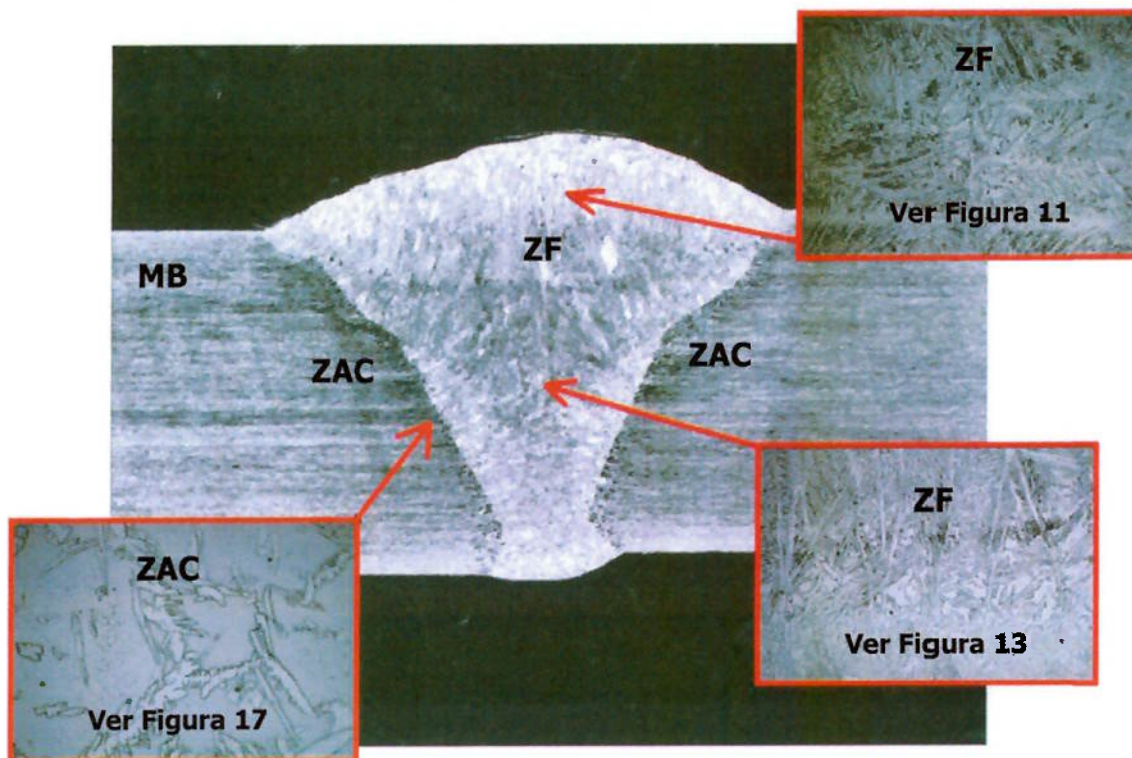


Figura 18 - Mapeamento da posição das micrografias na junta soldada do CP1.

5.1.2.3 Caracterização Metalográfica da Junta Soldada do CP 2

A caracterização principal do corpo de prova 2 foi realizada nas regiões descritas na Figura 25 e é apresentada zona fundida "ZF" dividida em 2 partes, sendo elas "ZFR" Zona fundida do passe de reaquecimento e "ZFE" Zona fundida do passe de enchimento. A zona afetada pelo calor "ZAC" e o metal de base "MB" da junta como soldada, também estão em destaque.

Na Figura 19 e Figura 20 as micrografias da ZF, composta pelo passe de enchimento e passe de reaquecimento, pode-se notar a presença de austenita (γ) e ferrita (α). O ponto circulado destaca inclusão de escória.

Na Figura 21 a micrografia apresenta a zona fundida ZF na condição como soldado e pode-se notar a presença de austenita (γ) e ferrita (α). Os pontos circutados destacam inclusões de escória.

Na Figura 22 e Figura 23 observam-se as zonas afetadas pelo calor ZAC composta por austenita (γ) e ferrita (α). O metal de base uma microestrutura disposta com lamelas alternadas de austenita (γ) e ferrita (α), ambas direcionadas ao sentido de laminação da chapa.

Na Figura 24 é observada uma diferença na extensão da ZAC, a região de maior largura está mais próxima do centro da junta soldada e, na medida em que se distancia do centro, há uma diminuição da largura. Este aspecto é muito provável que tenha surgido devido às extremidades da junta possuir maior massa para dissipação da energia de soldagem, outro fator é que na face inferior, onde esta locada o passe de enchimento e devido ao passe de reaquecimento a região ao centro é afetada pelo ciclo térmico do passe de acabamento.

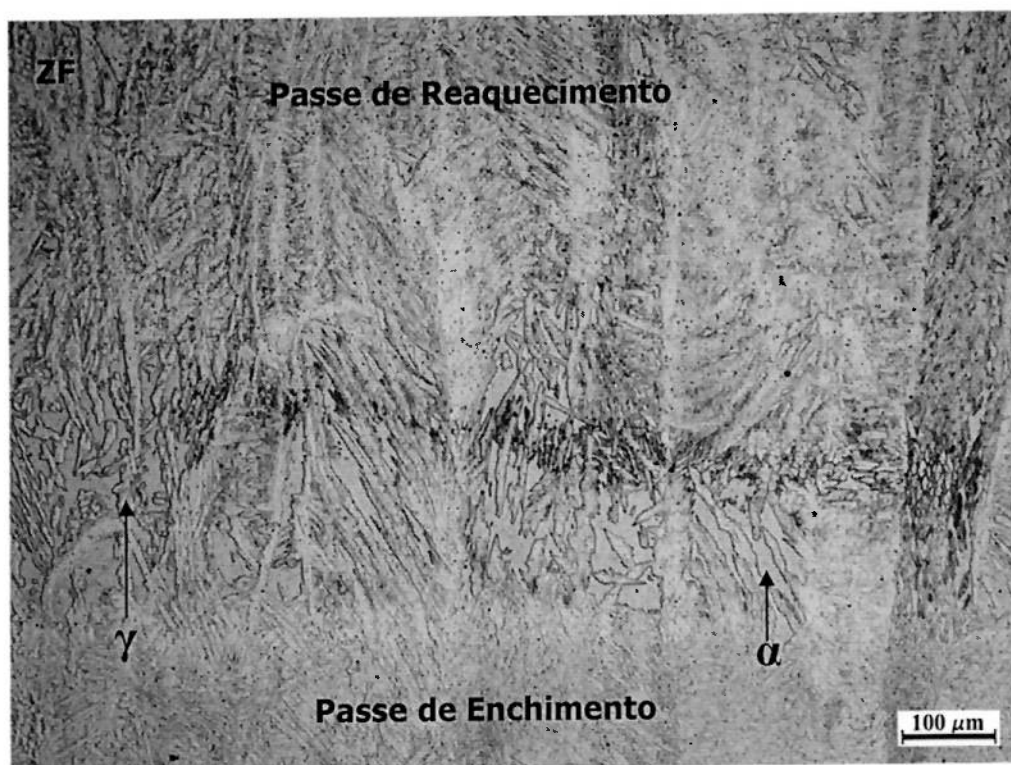


Figura 19 - Zona Fundida, passes de Enchimento e reaquecimento do CP2. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 100X.

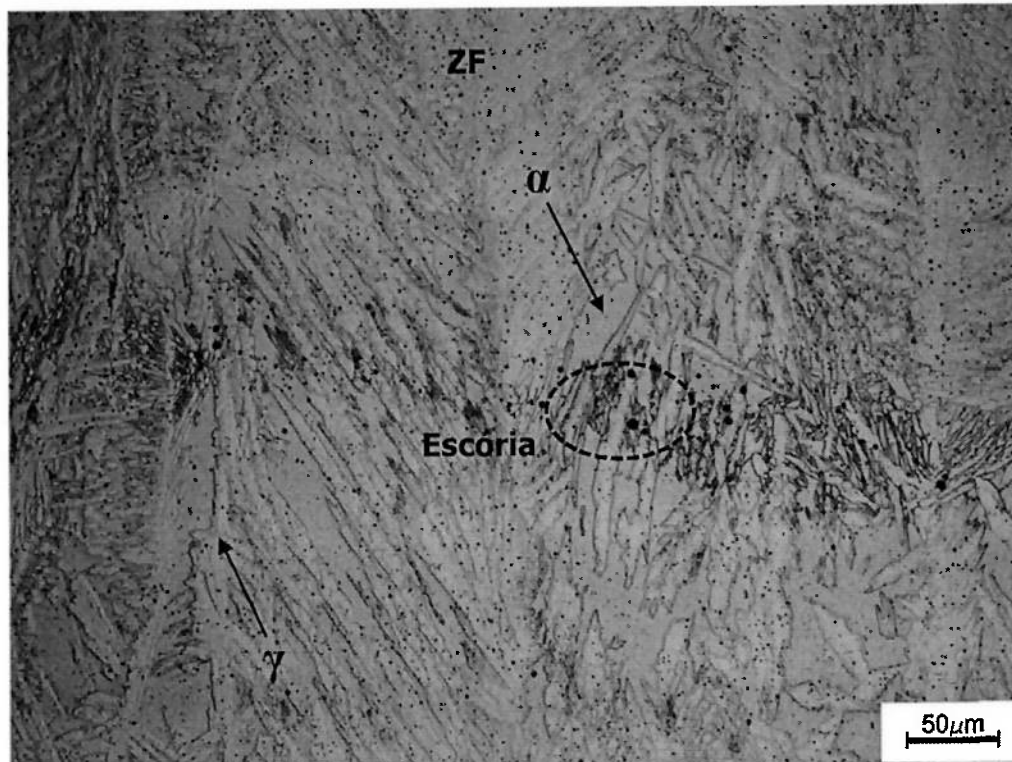


Figura 20 - Zona Fundida, passes de Enchimento e Reaquecimento do CP2. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 200X.

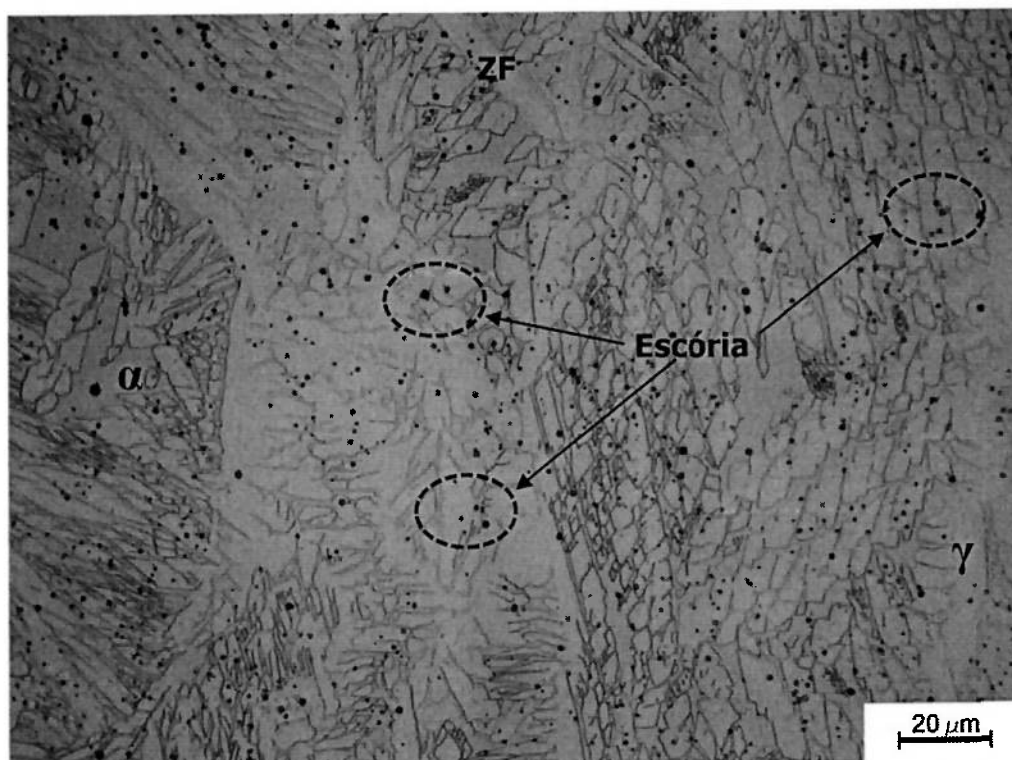


Figura 21 - Zona Fundida na condição de como soldada. As áreas circuladas representam a escória. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 500X.



Figura 22 - Microestrutura da ZAC, ZF e MB do CP2. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 100X.

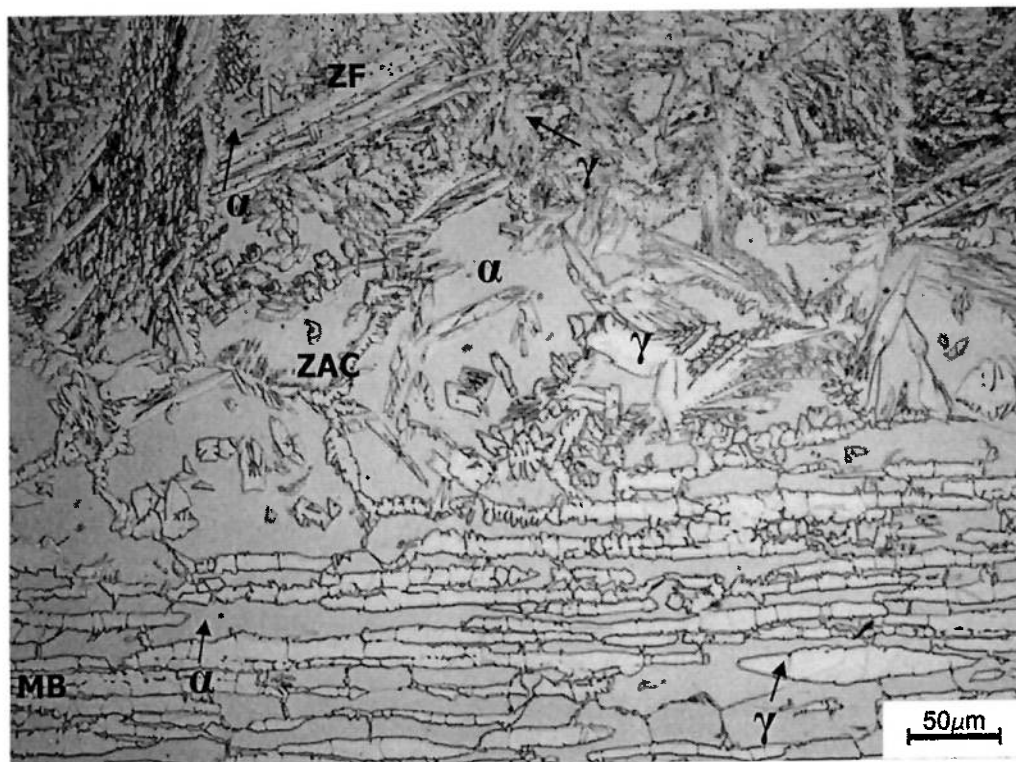


Figura 23 - Microestrutura da ZAC, ZF e MB do CP2. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 200X.

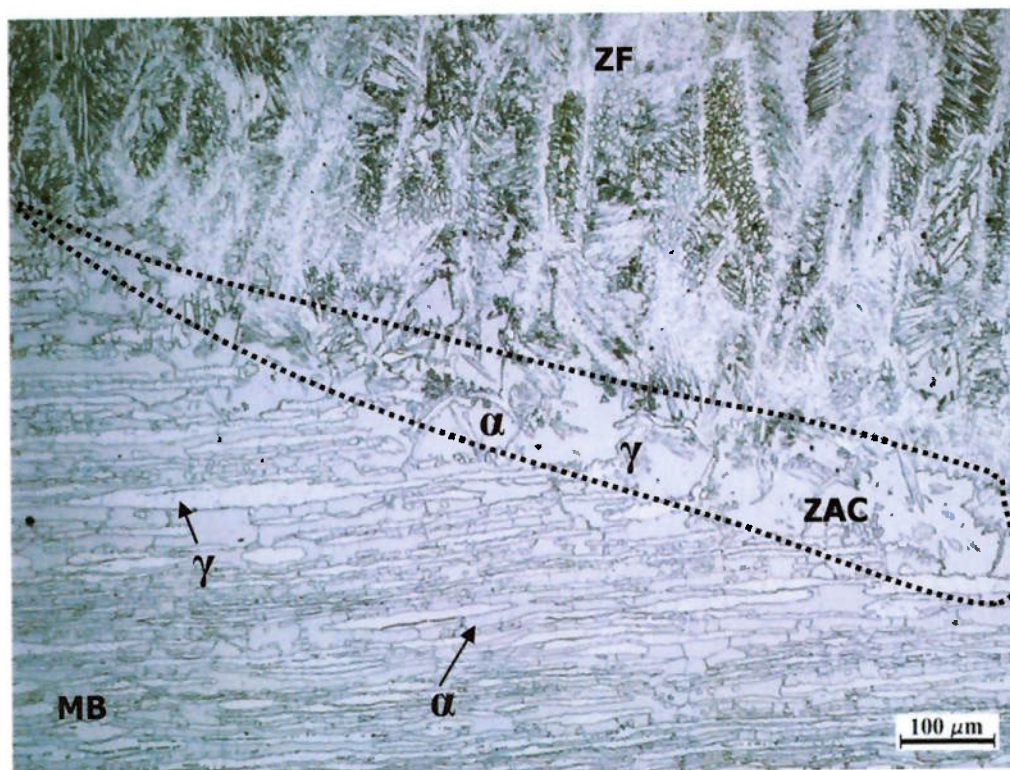


Figura 24 - Microestrutura da ZAC, ZF e MB do CP2. Ataque ácido oxálico 10%. Aumento 100X.

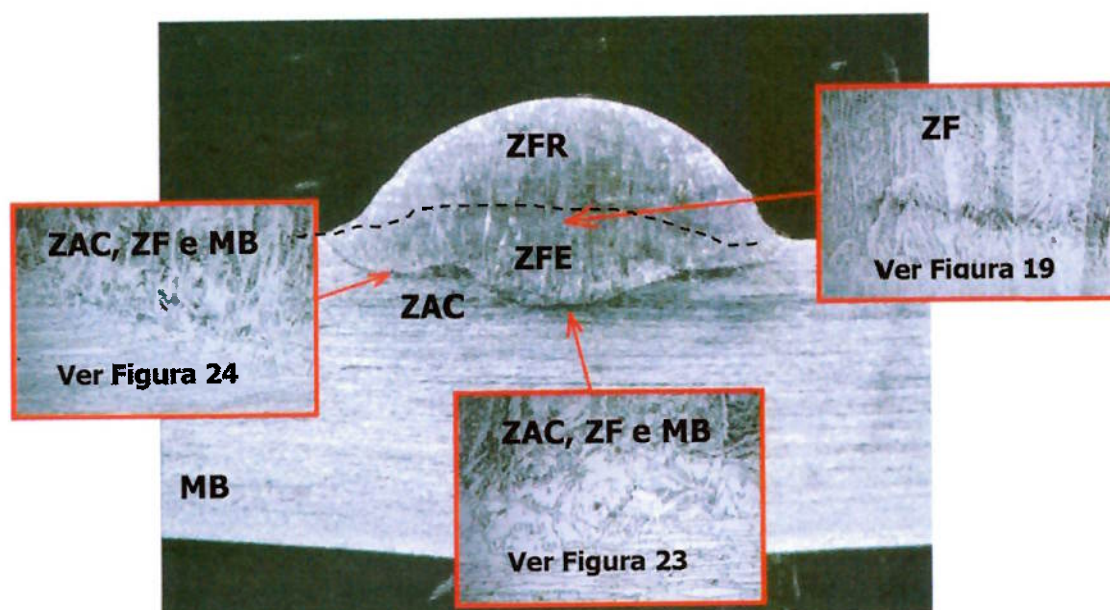


Figura 25 - Mapeamento da posição das micrografias na junta soldada do CP2.

5.2 RESULTADO DA ANÁLISE DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FERRITA

Com base nas micrografias realizadas pode-se visualizar as fases ferrítica e austenítica características do AID UNS S32205, e a quantificação de fases via software de análise de imagem "Image J®". Verificou-se a formação de lamelas alternadas características de ferrita e austenita ao longo da ZF e MB, já na região da ZAC, observa-se um aumento de grãos ferríticos.

A Figura 26 - apresenta como foi obtida a fração volumétrica de ferrita utilizando o software. A imagem específica, trata-se do material de base com micrografia ampliada 500X.

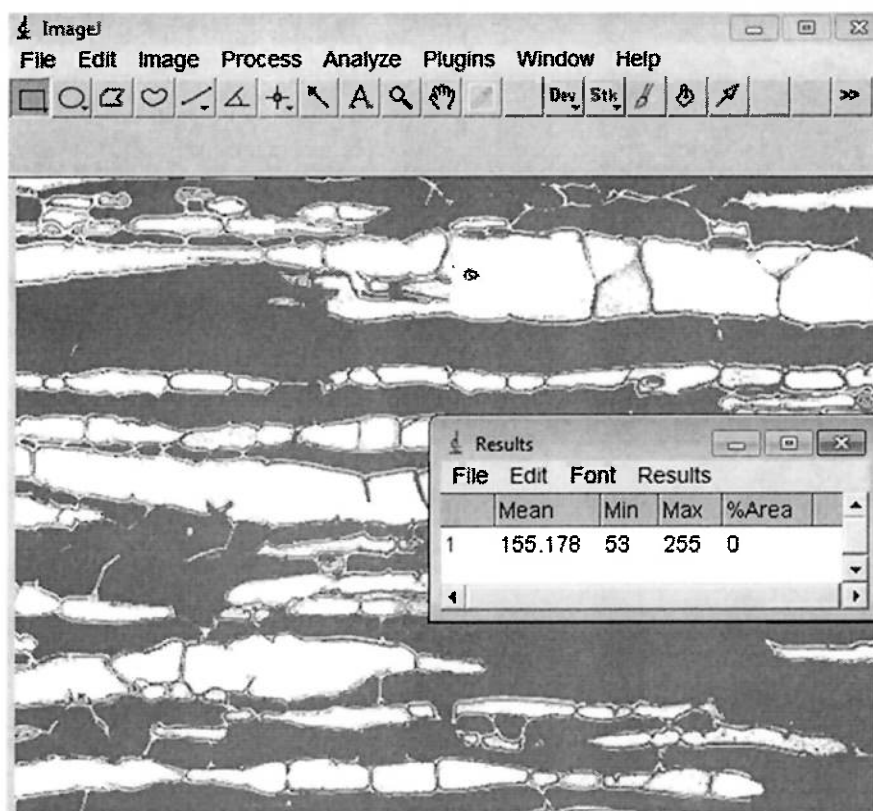


Figura 26 - Representação da obtenção da fração volumétrica de ferrita do metal de base.

As micrografias utilizadas para análise de quantificação de fases na ZAC do CP1 e do CP2 são mostradas na Figura 27, onde a ferrita está destacada na cor preta e a austenita na cor branca.

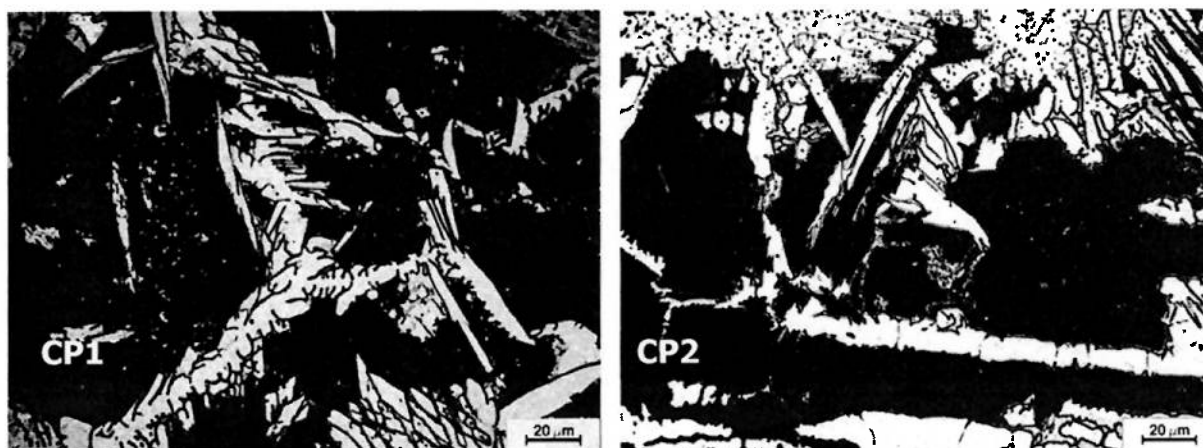


Figura 27 – Imagens micrográficas da ZAC do CP1 e CP2 observadas no software Image J para medição de Ferrita.

Os CPs foram avaliados e os dados utilizados para efeito comparativo com as amostras do mesmo material nas diferentes condições de soldagem são demonstrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultado das análises da fração volumétrica de ferrita e austenita da ZAC (em %)

CP	Fração de ferrita	Fração de austenita
1	78,2	21,8
2	66,6	33,4
MB	50,0 ^(a)	50,0 ^(a)

Nota: (a) Os valores foram estimados conforme capítulo 2.6.

No gráfico da Figura 28 são mostrados os dados obtidos por meio da medição do software Image J[®]. Ao se analisar a figura fazendo a comparação entre o CP1 e o CP2, observa-se que houve um decréscimo na fração volumétrica de ferrita na junta soldada em relação ao metal de base UNS S32205.

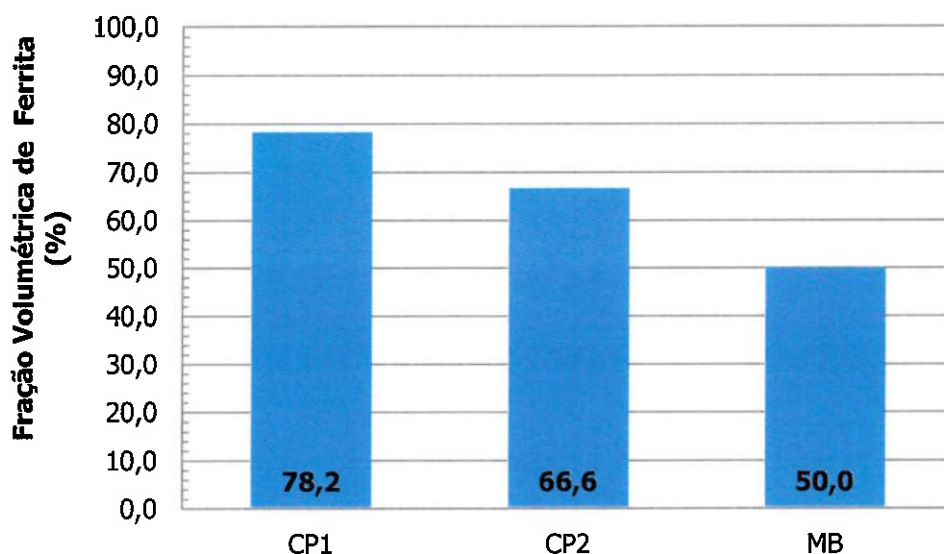


Figura 28 - Gráfico comparativo da fração volumétrica de ferrita dos CP1 e CP2 em relação ao metal de base.

O metal de base MB como recebido foi utilizado como parâmetro, onde tanto CP1 como o CP2 apresentaram balanceamento de fases. Para o CP1 o processo de soldagem foi executado com energia de soldagem mais elevada do que o CP2, esta elevação tende a produzir uma taxa de resfriamento menor da junta, e consequência favorece a precipitação de austenita a partir da ferrita. Nota-se, no gráfico da Figura 28, que a fração volumétrica de ferrita do CP1 é maior que a do CP2.

5.3 RESULTADO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO INTERGRANULAR PELA TÉCNICA DE POLARIZAÇÃO DE REATIVAÇÃO POTENCIOCINÉTICA DE CICLO DUPLO (DL-EPR)

Através dos dados da varredura contínua de potencial (mV ecs) e o registro da densidade de corrente pela área (A/cm^2) gerada no ensaio DL-EPR, foi possível a

plotagem das curvas de dupla polarização e indicação da relação Ir/Ip para o estudo do comportamento eletroquímico.

Analisados os resultados obtidos indicados na Tabela 10, pode-se afirmar que não houve sensibilização em nenhum dos casos devido ao baixo valor da relação Ir/Ip no material.

Tabela 10 - Relação Ir/Ip obtidas no ensaio DL-EPR.

Corpo de Prova	Ensaio	Ir	Ip	Relação Ir/Ip
CP 2	A	1,21E-08	3,92E-06	0,00309
	B	8,61E-09	6,02E-06	0,00143
CP 2	C	2,39E-09	4,52E-06	0,00053
	D	2,30E-09	4,41E-06	0,00052

As curvas de polarização obtidas são apresentadas conforme a sequência do ensaio (A e B) na Figura 29 e Figura 30 para o CP1 e sequência (C e D) na Figura 31 e Figura 32 para o CP2 onde em totalidade as figuras conforme a “relação Ir/Ip tende a zero” não foram detectadas susceptibilidade a corrosão intergranular.

No entanto o CP1, e em especial apresentado na Figura 29 mostra valores de relação Ir/Ip que indicam uma tendência maior para a sensibilização, vale ressaltar que este CP, conforme apresentado no gráfico da Figura 28, apresenta uma maior fração volumétrica de ferrita e possivelmente uma maior fração de nitretos de cromo precipitados na ferrita. Isto é atribuído ao fenômeno de reaquecimento desta região, no momento do passe final de solda, atingindo temperaturas críticas que promoveram a precipitação de fases ricas em cromo e o consequente empobrecimento de Cr nos contornos de grão e nas interfaces.

5.3.1 Resultado do - DL-EPR, para o CP1

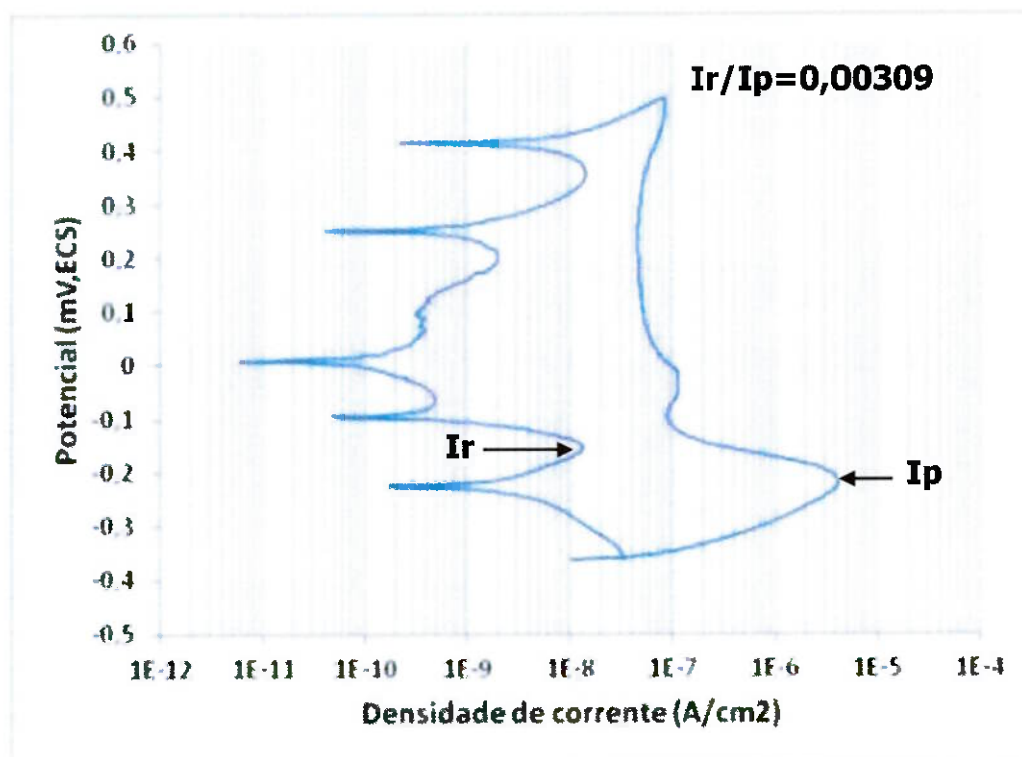


Figura 29 (A) - Curva de polarização obtida através da técnica DL-EPR, amostra região da face da solda.

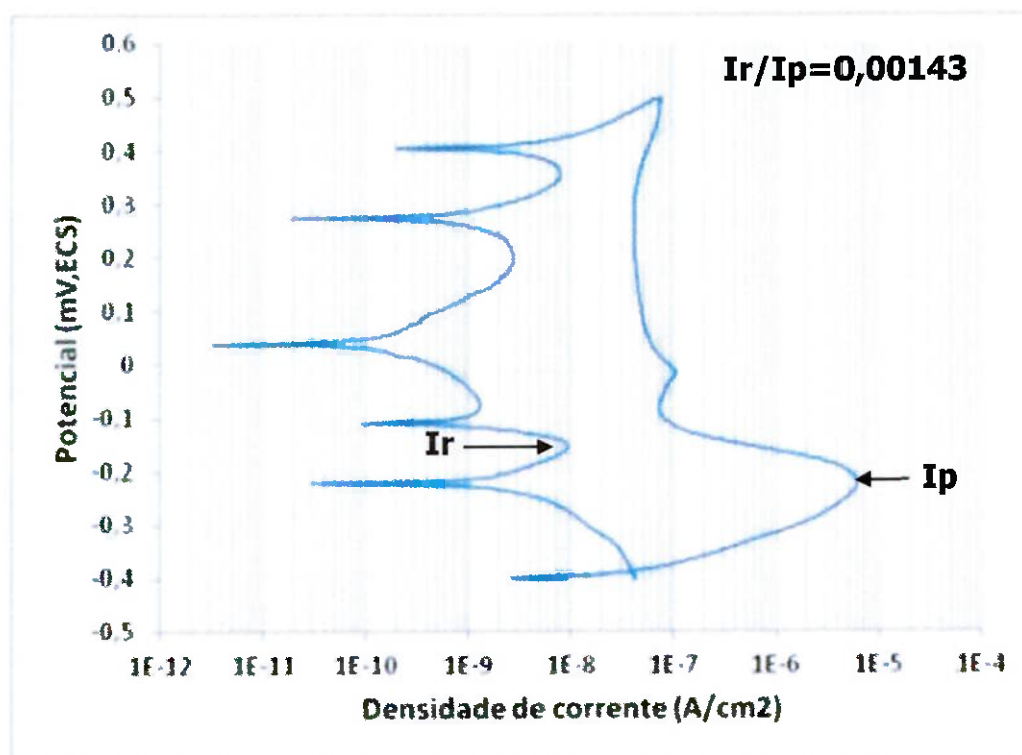


Figura 30 (B) - Curva de polarização obtida através da técnica DL-EPR, amostra região da face da solda.

5.3.2 Resultado do - DL-EPR, para o CP2

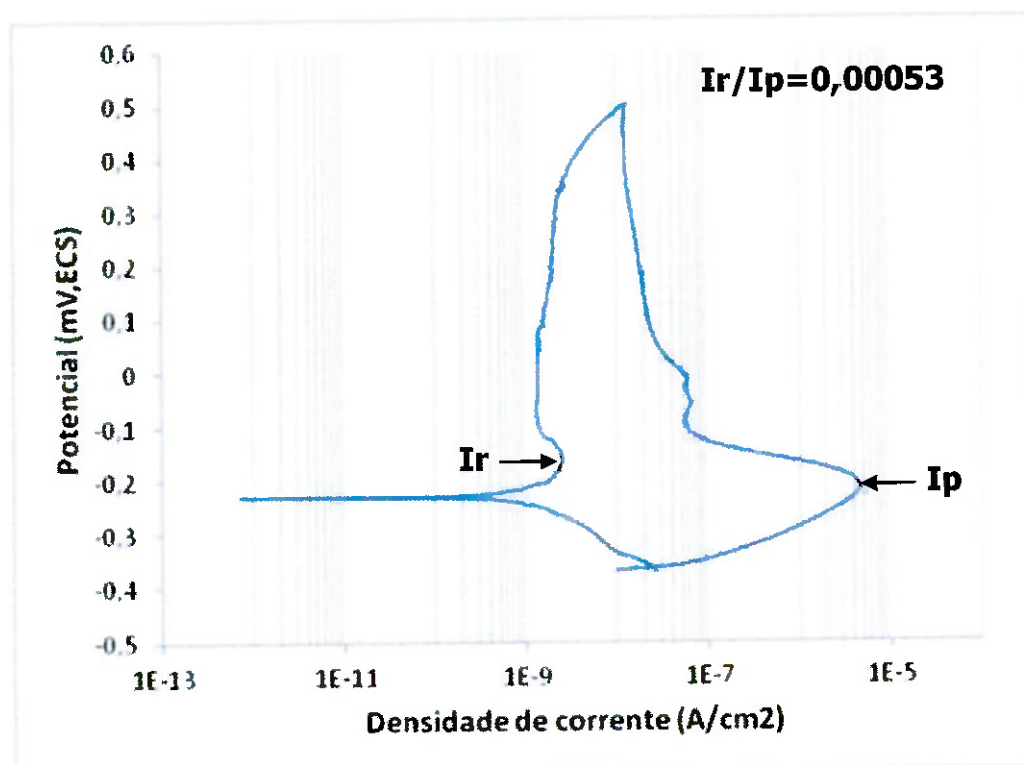


Figura 31 (C) - Curvas de polarização obtida através da técnica DL-EPR, amostra região da face da solda.

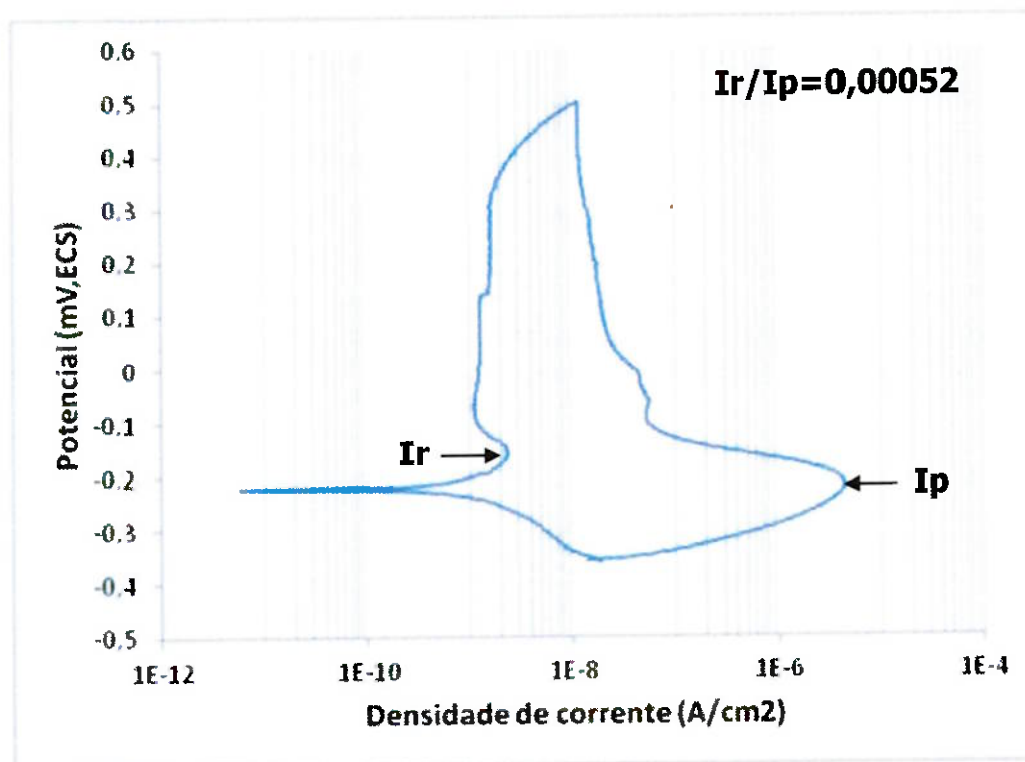


Figura 32 (D) - Curva de polarização obtida através da técnica DL-EPR, amostra região da face da solda.

5.4 RESULTADO DO ENSAIO DE TENACIDADE AO IMPACTO - CHARPY V

O desempenho mecânico avaliado pelo ensaio Charpy é apresentado na Tabela 11. No gráfico da Figura 33 os resultados revelaram uma queda dos valores de tenacidade das ZACs das juntas em relação ao MB. Já o material como recebido "MB" por possuir uma microestrutura balanceada apresentou energia absorvida mais elevada, em média 37,7 J. Também na Tabela 11 pode ser observada uma dispersão dos resultados, traduzidos pelo valor de desvio padrão, similares para o metal de base e para o CP2. Já o CP1 demonstrou menor energia absorvida, em média 15,7 J. Se comparamos estes valores com o metal de base representam cerca de 41,6% do valor da energia absorvida no ensaio.

Em termos gerais, pode-se notar que na região da ZAC do CP1 houve uma diminuição de resistência mecânica, esse fato pode ser explicado considerando as quantidades reduzidas de austenita na ZAC em relação ao MB e também pela apresentação de precipitação de nitreto de cromo, como mostrado na Figura 17, uma vez que os ciclos térmicos acusaram temperaturas suficientes para a ocorrência precipitação de fases fragilizantes.

Das juntas soldadas, o melhor resultado foi encontrado no CP2 com o valor médio de 33,3 J número bem superior ao valor de 15,7 J encontrado no CP1 que, embora tenha demonstrado uma quantidade de energia absorvida baixa, este resultado fica acima do valor mínimo exigido para qualificação da junta segundo a norma NORSOK M-601 que é de 27 J a -46 °C para corpos de prova *Full size*. Como neste experimento, foram utilizados corpos de prova reduzidos o valor de referência

é $27/4=6,75$ J, portanto o resultado do CP1 é maior que o valor mínimo especificado na norma, mesmo sendo executado a -40 °C e não a -46 °C.

Tabela 11 – Resultados obtidos do ensaio Charpy V dos CPs

Corpo de Prova	Sequência de ensaio	Energia absorvida - J	Expansão Lateral - mm
CP1	1	14,0	0,3
	2	13,0	0,4
	3	20,0	1,0
	Média	15,7	0,6
	Desv. Padrão	3,8	0,4
CP2	4	34,0	1,7
	5	34,0	1,2
	6	32,0	1,0
	Média	33,3	1,3
	Desv. Padrão	1,2	0,4
MB	7	39,0	1,2
	8	36,0	1,4
	9	38,0	1,5
	Média	37,7	1,4
	Desv. Padrão	1,5	0,2

Obs.: Todas as fraturas tinham aspecto dúctil.

Para melhor visualização dos resultados da Tabela 11 quanto à energia absorvida pelos CPs, os dados foram plotados no gráfico da Figura 33 -.

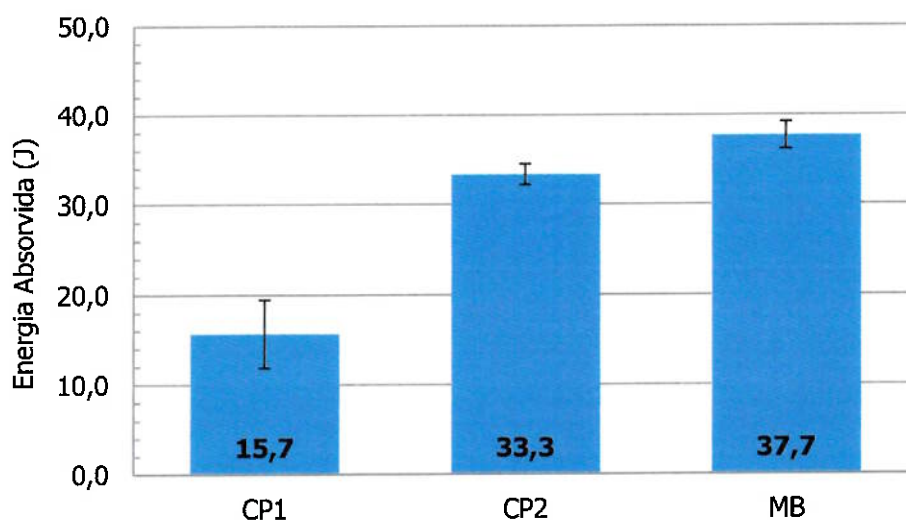


Figura 33 - Gráfico do resultado do ensaio Charpy V quanto à energia absorvida pelos CPs com seção reduzida.

6 CONCLUSÕES

Com base nos materiais e técnicas empregadas neste trabalho é possível concluir que:

1. Os resultados do ensaio DL-EPR para o CP1 e CP2 quando submetido às técnicas de soldagem empregadas neste trabalho, não detectaram a existência de precipitação de fases intermetálicas em quantidade suficiente para afetar a resistência à corrosão das juntas soldadas.
2. Houve um decréscimo na fração volumétrica de austenita na junta comparado ao metal de base UNS S32205 devido aos parâmetros de soldagem utilizados. Para o CP 1 obteve-se a maior energia de soldagem e, o aumento da energia de soldagem favoreceu a precipitação de austenita porque a velocidade de resfriamento foi suficiente para promover esta transformação de fase.
3. As ZACs das juntas soldadas, tanto para o CP1 quanto para o CP2, apresentam valores de tenacidade inferiores aos do metal base avaliados pelo ensaio Charpy, devido à quantidade reduzida de austenita destas regiões e a presença de outras fases precipitadas. Os valores obtidos das energias absorvidas mostraram que ambas as juntas estão aprovados segundo a norma NORSOK M-601.
4. As regiões de intersecção entre dois cordões subsequentes, para ambos os corpos de prova, apresentaram uma maior formação da fase ferrítica.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

1. Execução de triplo passe de reaquecimento conforme técnica do CP2.
2. Realização do mesmo estudo em aços inoxidáveis superduplex.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. WILLIAM D. CALLISTER, J.; JR., J. W. **Materials Science and Engineering An Introduction**. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 1991. 364 p.
2. BRANDI, S. D.; LIPPOLD, C. Considerações sobre a metalurgia da soldagem de aços inoxidáveis duplex e superduplex. **Metalurgia & Materiais**, São Paulo-SP, v. v. 53, n. Bimestral, p. 141, março 1997. ISSN 463, 429.
3. ASSOCIATION, I. M. **IMOA**, 2009. ISSN 9781907470004. Disponível em: <http://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/Duplex_Stainless_Steel_2d_Edition.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2013.
4. BRANDI, S. D.; SILVEIRA, M. Y.; VASCONCELLOS, L. B. Aplicação da norma ASTM A923 prática A para identificação de fases intermetálicas em junta soldada de aço inoxidável superduplex 2507. Disponível em: <<http://www.nucleoinox.org.br/upfile>>. Acesso em: 7 dez. 2013.
5. SOLOMON, H. D.; DEVINE, T. M. A tale of two phases. **Conference Duplex Stainless Steels'82**, St. Louis-USA, p. 693-756, 1982. Proceedings. Ohio, American Society of Metals 1983.
6. SILVA, A. L. V. D. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 2a. ed. São Paulo, SP: Edgard Blucher Ltda, 2006. 407, 408, 409, 417 p.
7. ACESITA.
http://www.soldaaautomatica.com.br/index_arquivos/Arquivos/PDF%20-ACESITA%20A%C3%A7os%20Inoxid%C3%A1veis.pdf. **Aços Inoxidáveis**. Acesso em: 28 mar. 2014.
8. SOCIETY, A. W. **The Practical Reference Guide to Welding Metallurgy Key Concepts for Weldability**. [S.l.]: [s.n.], 1999. 21 p.
9. NUCLEOINOX. Coletânea de informações técnicas. Disponível em: <http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/A%E7o%20Inoxid%E1vel_No%E7%F5es%20b%E1licas.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2013.
10. LIPPOLD, C.; KOTECKI, . **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. [S.l.]: Wiley-Interscience, 2005. 56, 230, 238 p.
11. INSTITUTE, A. I. A. S. **Welding of Stainless Steels and Other Joining Methods**, 1988. 5 p.
12. METALS, A. S. **The Atlas Specialty Metals Technical Handbook of Stainless Steels**, 2008. 4, 5 p.
13. GUNN, R. N. **Duplex Stainless Steels Microstructure, properties and applications**. 1997. ed. [S.l.]: Abington Publishing, 204 p.
14. PETROBRAS. **N-133 L**, 2013. 63, 64, 67 p.
15. ASTM. **A 240/A 240M – 02 -Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications**. West Conshohocken, 2001. 8 p.
16. ROBERGE, P. R. **Handbook of Corrosion Engineering**. 710, 711 e 714. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2000.

17. KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2º. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 21 p.
18. AWS. **Welding Handbook - Materials and Applications**. [S.l.]: American Welding Society, v. 4, 2011. part 1. 9 p.
19. RAMÍREZ LONDOÑO, A. J. Estudo da precipitação de nitreto de cromo e fase sigma por simulação térmica da zona afetada pelo calor na soldagem multipasse de aços inoxidáveis. **Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais**, São Paulo - SP, Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. D, 1997. 151 p.
20. CUNHA, J. A. R.; BRANDI, J. Aços Inoxidáveis Duplex: considerações sobre sua soldagem e processos empregados. **Núcleo Inox**, v. IV, p. 6-8, 1996. ISSN 7.
21. FEDELE, R.; BRANDI, J.; LEBRÃO, G. Soldagem multipasse do aço inoxidável duplex UNS S31803 por eletrodo revestido. **XXV CONSOLDA Congresso Nacional de Soldagem**, Belo Horizonte - MG. 4.
22. OKUMURA, J.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicação**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1982. 9 p.
23. SLD-04 Processos de Soldagem e Junção – Processo Eletrodo Revestido- (Material de aula) Especialização em Engenharia de Soldagem. POLIUSP. São Paulo. 2012.
24. WELDING, B. **Eletrodo BÖHLER FOX CN 22/9 N**. [S.l.]. Janeiro, 2008.
25. BRANDI, S. D. **SLD 026 - Metalurgia da soldagem, tensões residuais e controle de deformação - (Material de aula) Especialização em Engenharia de Soldagem**. POLIUSP. São Paulo. 2013.
26. WAINER, J.; BRANDI, J.; DE MELLO, F. D. H. **Soldagem - Processos e Metalurgia**. São Paulo - SP: Edgard Blucher Ltda., 2004. 69, 72 p. ISBN 8521202385.
27. HEALTH, N. I. O. <http://imagej.nih.gov/ij/download.html>. **Image J - 1.47v**, 6 dez. 2013.
28. WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2000. 132-136 p.
29. ASTM. **ASTM A370 - Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**, 2010.