

Avaliação da Soldagem Multipasse de Chapas Espessas de Aços Inoxidáveis Lean Duplex UNS S32304 soldadas pelos processos SMAW, GMAW e FCAW – Parte 1: Propriedades Mecânicas

(Evaluation of multipass welding of thick lean duplex stainless steel UNS S32304 plates welded by SMAW, GMAW and FCAW – Part 1: Mechanical Properties)

Ronaldo Cardoso Junior¹, Alexandre Queiroz Bracarense², Frederico Rodrigues Campos², Carla Soares Souza³, Dalila Moreira da Silveira⁴, Vanessa de Freitas Cunha Lins⁴

¹ESAB Industria e Comércio LTDA, Centro de Processos, Contagem, Minas Gerais, Brasil, ronaldo.junior@esab.com.br

²Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica / Laboratório de Simulação e Soldagem, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

³Fiat Automóveis S.A., Centro de Tecnologia em Ciência dos Materiais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

⁴Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Química, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Resumo

Os aços inoxidáveis duplex (AID) vêm se apresentando como uma excelente alternativa para aplicações em que alta resistência à corrosão e alta resistência mecânica são requeridas. Contudo, os AID, incluindo os aços inoxidáveis lean duplex, apresentam soldabilidade inferior em relação aos aços inoxidáveis austeníticos. Nesse sentido, esse trabalho tem como objetivo a avaliação da soldagem multipasse de chapas 22 mm de espessura da liga inoxidável lean duplex UNS S32304, utilizando-se os processos SMAW, GMAW e FCAW e consumíveis com dois tipos de composição química, 22%Cr9%Ni3%Mo e 23%Cr7%Ni, totalizando seis experimentos. Foram empregados chanfros em V com 60° e suporte cerâmico para soldagem do passe de raiz, sendo que o aporte térmico foi mantido praticamente constante em 1,6 kJ.mm⁻¹. Determinou-se os tempos de soldagem e a seqüência de passes, objetivando uma análise de produtividade, em seguida as juntas soldadas foram submetidas à END por raios x. Foram extraídos corpos de prova para ensaios de tração, dobramento, Charpy a -30 °C e microdureza. A produtividade dos processos semi-automáticos se mostrou pelo menos 63 % maior que a do processo SMAW, enquanto o processo FCAW se mostrou de 6 a 18% mais rápido que o GMAW. Foram encontradas descontinuidades (porosidade) consideradas aceitáveis segundo ASME B31.3 em alguns dos experimentos, que não influenciaram negativamente os resultados mecânicos, os quais se apresentaram acima requerimento do metal de base e especificado por normas de fabricação.

Palavras-chave: Duplex, Lean Duplex, Soldabilidade, Soldagem Multipasse, Propriedades Mecânicas.

Abstract: The duplex stainless steels (DSS's) have been placed as an excellent alternative for applications where high corrosion resistance and high mechanical strength are required. However, DSS's, including the lean duplex, present lower weldability than the austenitic stainless steels. Thus, this study aims to evaluate the multipass welding of 22 mm plates of lean duplex stainless steel alloy UNS S32304, using the process SMAW, GMAW and FCAW with consumables with two types of chemical composition, 22%Cr9%Ni3%Mo and 23%Cr7%Ni giving a total of six experiments. V-grooves with 60° and ceramic backing for welding the root pass were used and the heat input was maintained constant at 1.6 kJ.mm⁻¹. It was determined the time and sequence of welding passes, aiming an analysis of productivity. The welded joints were subjected to x-ray END and specimens for tensile, bending, Charpy at -30°C and microhardness were extracted. The productivity of the semi-automatic processes proved to be at least 63% greater than the SMAW process while the process FCAW showed 6-18% faster than the GMAW. It was found discontinuities (porosity) acceptable according to ASME B31.3 in some experiments that did not affect negatively the mechanical results, which stayed above the parent material requirement and meet fabrication standards.

Key-words: Duplex, Lean Duplex, Weldability, Multipass Welding, Mechanical Properties.

1. Introdução

Com o aumento da exploração de petróleo no Brasil e

no mundo, a necessidade de materiais soldáveis com maior resistência mecânica e resistência à corrosão vêm aumentando de forma significativa. Buscando atender este quesito, os aços inoxidáveis duplex (AID) vem se apresentando como uma excelente opção. Cerca de 25 megatoneladas de aços inoxidáveis foram produzidos em 2009[1], os quais foram utilizados no segmento de transporte (11 %), eletrodomésticos e utensílios

(Recebido em 16/02/2012; Texto final em 04/08/2012).

domésticos (21 %), construção (22 %), na indústria de processos (40 %), entre outros [1]. Dentre esses, 0,25 megatoneladas foram de aços inoxidáveis duplex [1].

Os aços inoxidáveis duplex podem ser definidos como aqueles que apresentam uma microestrutura mista de ferrita e austenita, na proporção de aproximadamente 50% para ambas fases [2]. Esses materiais foram desenvolvidos há mais de 70 anos [3] e tem seu uso comercial iniciado de forma extensiva na década de 70 [4]. Os principais elementos de liga utilizados nessa classe de materiais são cromo e níquel, porém frequentemente são adicionados em menores proporções elementos como molibdênio, nitrogênio, cobre, silício e tungstênio [5]. Desta maneira, as principais vantagens desses aços em relação aos que apresentam microestrutura completamente austenítica são os maiores limites de resistência ao escoamento e à tração, bem como melhor resistência à corrosão sob tensão (SSC – stress corrosion crack) [6]. Ressalta-se ainda, a boa tenacidade devido à porção de austenita presente. Entretanto, por apresentar uma solidificação iniciada como ferrita e grande tendência à formação de precipitados intermetálicos, a soldabilidade desses aços é pior que a dos austeníticos, sendo necessário um controle rígido da composição química e do ciclo térmico de soldagem.

O duplex mais comum hoje é o EN grau 1.4462 ou 2205 (UNS S31803/S32205), que tem a composição química nominal de 22 % de Cr, 5 % de Ni, 3 % de Mo e 0,16 % de N. Este aço é usado em um grande número de aplicações em uma grande variedade de produtos e formas. O AID 2205 possui boa resistência à corrosão em diversos ambientes, sendo essa superior à dos aços austeníticos AISI 304, 316 e 317. O aumento da resistência mecânica permite a redução da espessura da parede do componente e, conseqüentemente, a massa do mesmo. Apesar das excelentes propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, os aços duplex 2205 ainda apresentam um elevado custo, principalmente devido aos altos teores de Ni e Mo. Desta maneira, a busca por ligas com microestrutura mista, porém de menor custo levou ao desenvolvimento de aços inoxidáveis lean duplex (AILD).

Nos AILD, o níquel é parcialmente substituído por elementos formadores de austenita, como o manganês e nitrogênio, e o teor de molibdênio é reduzido. Eles apresentam como composição química típica 20-24 % de cromo, 1-5 % de níquel, 0,1-0,3 % de molibdênio e 0,10-0,22 % de nitrogênio [7]. O lean duplex mais comum é a liga UNS S32304 que apresenta composição nominal 23 % de cromo, 4 % de níquel, adições de molibdênio de até 0,6 %, nitrogênio e manganês. Ela foi desenvolvida para competir com a liga austenítica AISI 316L, porém com o dobro do limite de escoamento e melhor resistência à corrosão sob tensão (SSC) [7], devido a maior proporção de ferrita.

A corrosão localizada é um dos parâmetros mais importantes dos AID, definindo, por exemplo, o tipo de ambiente em que esses materiais podem ser empregados sem risco de desgaste devido a corrosão por “pitting”. Nesse contexto, surge o PRE (Pitting Resistance Equivalent) que é o parâmetro geralmente aceito como uma estimativa da resistência a corrosão localizada dos aços inoxidáveis duplex. Para aqueles aços com adição de nitrogênio o PRE leva o sufixo N (PRE_N) e é definido pela Equação (1), a qual será utilizada nesse trabalho.

$$PRE_N = 1.(\%Cr) + 3,3.(\%Mo) + 16.(\%N) \quad \text{Eq.1}$$

O AILD UNS S32304 apresenta PRE_N entre 24 e 25%, podendo, portanto, ser usado para substituir tanto o AISI 304L quanto o 316L. Dessa maneira, esse material vem sendo utilizado em tanques de estocagem na indústria de papel e celulose, pontes, estações de tratamento de água, mineração e na indústria offshore [7]. Sua soldabilidade geralmente é boa quando consumíveis com maiores teores de níquel (“over-alloyed”) são utilizados [8], entretanto para uma dada composição química do metal de base a microestrutura da zona termicamente afetada (ZTA) continua dependendo exclusivamente do ciclo térmico. Os consumíveis adequados para soldagem desse material são o EN ISO 23 07 N L, usualmente conhecido como 2307, e o EN ISO 22 09 3 N L, cuja norma AWS o classifica como 2209.

Todos os processos de soldagem por fusão podem ser utilizados, desde que procedimentos de soldagem adequados sejam seguidos. As propriedades do metal depositado, como resistência, tenacidade e resistência à corrosão podem ser prejudicadas por um excessivo desvio no balanço de fases com relação ao metal base [9,10].

Portanto, o objetivo desse trabalho é avaliar a soldabilidade da liga de aço inoxidável lean duplex UNS S32304 buscando o processo de soldagem, consumível e procedimento mais eficaz do ponto de vista de produtividade, metalúrgico e mecânico. Levando-se em consideração os aspectos práticos, chapas espessas de 22 mm foram empregadas e unidas através de soldagem multipasse utilizando-se três processos de soldagem distintos (SMAW, GMAW e FCAW) e consumíveis de composição química do tipo 22%Cr9%Ni3%Mo e 23%Cr7%Ni (sem adição de molibdênio). Nesse artigo, o qual representa a parte 1 do trabalho, serão apresentados os resultados de propriedades mecânicas, enquanto que um outro trabalho (parte 2) abordará as propriedades metalúrgicas e de corrosão.

2. Materiais e Métodos

Foram soldados seis corpos de prova com 350 x 180 x 22 mm, utilizando-se três processos de soldagem distintos (SMAW, GMAW e FCAW) e consumíveis com dois tipos de composição química, 23%Cr7%Ni (sem molibdênio) e 22%Cr9%Ni (com molibdênio), conforme Tabela 1.

Assim como apresentado na Tabela 1, para soldagem pelo processo GMAW um gás de proteção com adição de nitrogênio foi utilizado, já para a soldagem FCAW uma mistura de Ar e CO₂ sem adição de N₂ foi empregada. Ressalta-se que a adição de nitrogênio no gás de proteção no processo GMAW é importante para evitar a perda de nitrogênio, conforme descrito por Westin [10], e por conseqüência a formação excessiva de ferrita em detrimento da austenita. Entretanto para o a soldagem FCAW acredita-se que tal adição não se faz necessária, devido a presença da escória, que ao se solidificar a uma temperatura mais elevada, portanto, primeiro que a poça de fusão, pode atuar como uma barreira à perda de N₂.

O metal de base utilizado foi o UNS S32304 fornecido pela Aperam South America cuja composição química, informada

Tabela 1. Processos, consumíveis e gases de proteção testados.

Dados dos Consumíveis de Soldagem					
Teste	Processo de Soldagem	Tipo	Especificação EN	Diâmetro (mm)	Gás de Proteção
SMAW2307	SMAW	23%Cr 7%Ni	E Z 23 7 N L R	3,25	N.A.
SMAW2209	SMAW	22%Cr 9%Ni	E 22 9 3 N L R 3 2	4,00	N.A.
GMAW2307	GMAW	23%Cr 7%Ni	G 23 7 NL	1,00	Star Gold™ SS
GMAW2209	GMAW	22%Cr 9%Ni	G 22 9 3 NL	1,00	Star Gold™ SS
FCAW2307	FCAW	23%Cr 7%Ni	T 23 7 N L P	1,20	75%Ar + 25%CO ₂
FCAW2209	FCAW	22%Cr 9%Ni	T 22 9 3 N L P	1,20	75%Ar + 25%CO ₂

N.A.: Não se aplica; Star Gold SS: Mistura ternária 95%Ar+3%CO₂+2%N₂ fornecida pela Praxair.

Tabela 2. Composição química do metal de base utilizado.

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	O
Teor (%)	0,019	1,35	0,39	0,0282	0,0004	22,45	3,63	0,44	0,5	0,1128	0,0033

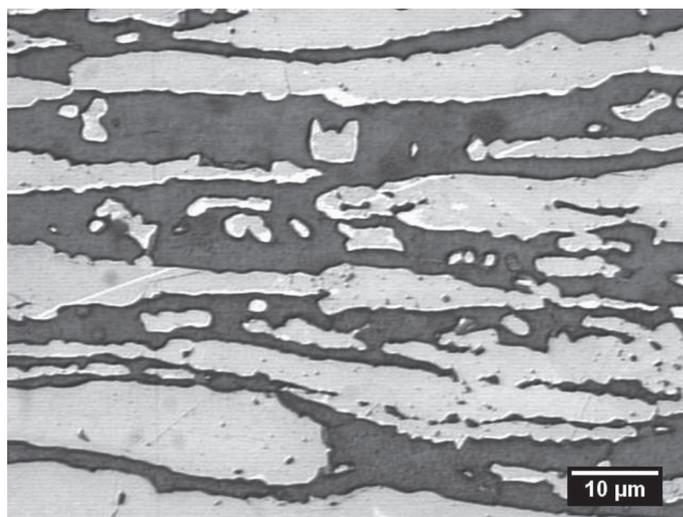
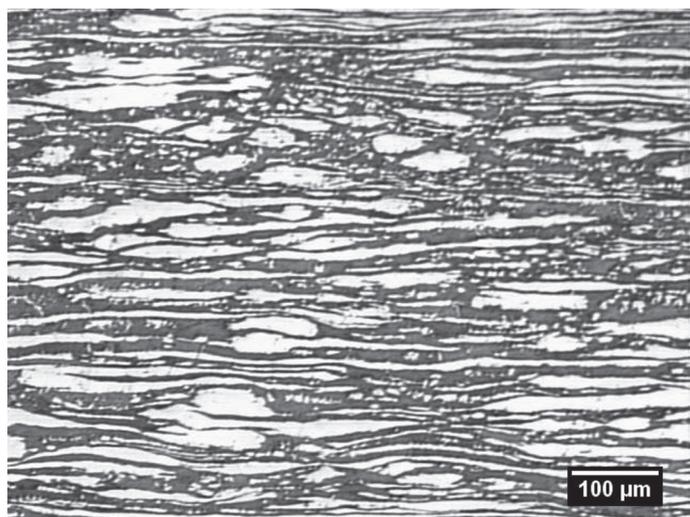


Figura 1. Micrografias do metal de base. Ataque Behara II.

Tabela 3. Composição química dos metais depositados, em %.

Teste	Especificação EN	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
SMAW2307	E Z 23 7 N L R	0,028	0,78	0,96	0,017	0,014	22,60	7,62	0,36	0,26	0,13
SMAW2209	E 22 9 3 N L R 3 2	0,027	0,79	0,99	0,019	0,012	21,92	9,31	3,15	0,06	0,12
GMAW2307	G 23 7 NL	0,03	0,88	0,86	0,017	0,01	23,82	8,92	0,31	0,095	0,13
GMAW2209	G 22 9 3 NL	0,029	1,47	0,57	0,02	0,009	21,94	9,20	3,12	0,14	0,14
FCAW2307	T 23 7 N L P	0,024	0,92	0,96	0,018	0,011	23,7	8,93	0,3	0,095	0,12
FCAW2209	T 22 9 3 N L P	0,022	1,06	0,91	0,022	0,013	21,66	9,2	2,94	0,18	0,15

Nota: Para GMAW e FCAW foram usados os gases da Tabela 1. Enchimentos realizados segundo ASME II Part C[11].

Tabela 4. Propriedades mecânicas do metal de base e consumíveis de soldagem.

Teste	Especificação UNS / Especificação EN	Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)
Metal de Base	UNS S32304	670	520	38
SMAW2307	E Z 23 7 N L R	754	609	26
SMAW2209	E 22 9 3 N L R 3 2	857	691	25
GMAW2307	G 23 7 NL	730	560	32
GMAW2209	G 22 9 3 NL	765	600	28
FCAW2307	T 23 7 N L P	774	626	33
FCAW2209	T 22 9 3 N L P	828	637	26

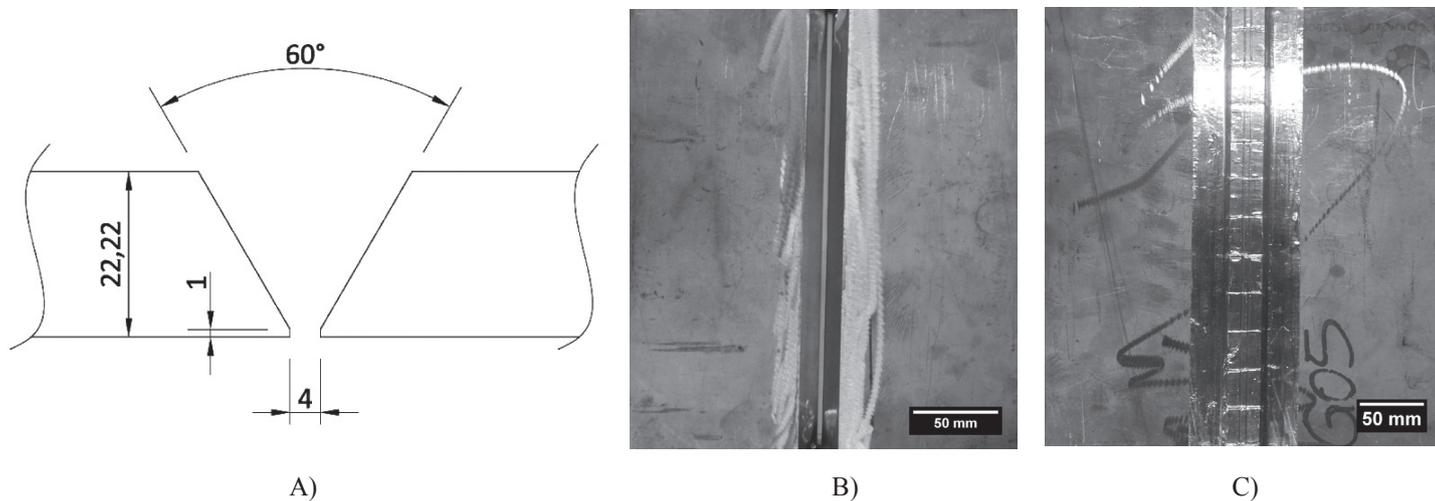


Figura 2. A) Detalhes dimensionais do chanfro e preparação das juntas; B) Corpos de provas montados; C) Região posterior do corpo de prova, mostrando a fixação do suporte cerâmico. Dimensões em mm.

pela mesma empresa, é apresentada na Tabela 2 e a microestrutura é ilustrada pela Figura 1.

A Tabela 3 apresenta a composição química dos consumíveis de soldagem, sendo que foram realizados enchimentos para análise química seguindo a norma ASME II Part C [11] referente a consumível de soldagem. A Tabela 4 apresenta as propriedades mecânicas dos materiais usados. Todos os consumíveis foram fornecidos pela ESAB Indústria e Comércio LTDA.

As chapas foram chanfradas e montadas seguindo o esquema apresentado na Figura 2, sendo que para todos os ensaios utilizaram-se suportes cerâmicos de perfil retangular com 13mm de abertura e 1,3mm de profundidade, os quais dispõem de uma fita metálica auto-adesiva de alumínio para fixação. O perfil retangular foi escolhido devido seu melhor desempenho em aplicações de processos de soldagem que geram escória, os quais representam a maioria dos testes realizados.

Dessa maneira, em todos os seis ensaios realizados foram produzidas três regiões distintas na zona fundida, a raiz, o enchimento e o acabamento. Na primeira, ao contrário do procedimento normalmente utilizado para soldagem dos AID, não se utilizou gás de purga, pois se lançou mão do suporte cerâmico e soldagem manual. Entretanto, para os demais passes empregou-se o trator de soldagem ESAB Railtrac FW1000, de forma a garantir maior homogeneidade dos parâmetros, exceto para o processo SMAW em que toda a soldagem foi manual. A

Figura 3 ilustra os equipamentos e a montagem utilizada para a soldagem.

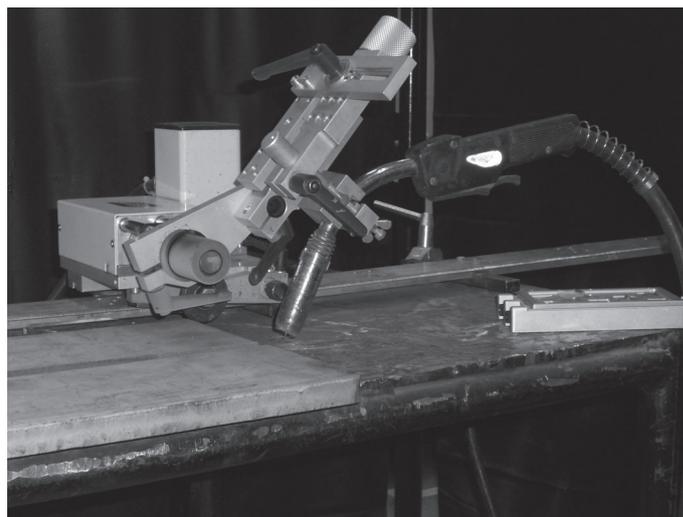


Figura 3. Montagem utilizada para soldagem dos corpos de prova.

A energia líquida de soldagem (H_L) de $1,3 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ foi escolhida com base em testes prévios, em que a zona termicamente afetada (ZTA) foi simulada através da soldagem

Tabela 5. Parâmetros de soldagem reais para os passes de raiz e médios para os demais passes.

Ensaio	Passes	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (cm/min)	H (kJ/mm)	Interpasse (°C)
SMAW2307	Raiz	85	25,0	11,3	1,13	N.A.
	Demais	135	31,1	14,8	1,70	100-150
SMAW2209	Raiz	140	29,0	12,1	2,01	N.A.
	Demais	160	28,7	15,9	1,73	100-150
GMAW2307	Raiz	210	29,0	13,6	2,69	N.A.
	Demais	213	29,0	23,1	1,60	100-150
GMAW2209	Raiz	195	29,0	15,3	2,21	N.A.
	Demais	212	29,0	23,3	1,58	100-150
FCAW2307	Raiz	208	29,0	23,2	1,56	N.A.
	Demais	210	29,0	23,2	1,58	100-150
FCAW2209	Raiz	210	29,0	23,3	1,57	N.A.
	Demais	210	29,0	22,9	1,59	100-150

N.A.: Não se aplica. Não foi realizado pré-aquecimento em nenhuma das situações.

Tabela 6. Ensaios realizados, localização dos corpos de prova e do entalhe Charpy e número de ensaios por condição testada.

Ensaio	Localização	Número de Corpos de Prova por condição
Tração retangular	Junta soldada	1
Charpy a 2mm da superfície	CS e ZTA	3
Charpy a 2mm da raiz	CS e ZTA	3
Dobramento lateral	Junta soldada	2
Microdureza	Junta soldada	1

Nota: CS – Centro de Solda; ZTA – Zona Termicamente Afetada.

autógena pelo processo GTAW e, em seguida, foi determinada a proporção austenita/ferrita. Os testes prévios para determinação do aporte térmico ideal para soldagem do AILD UNS S32304 não serão detalhados nesse artigo.

Admitindo-se o rendimento térmico (η) dos processos SMAW, GMAW e FCAW igual a 0,8 e utilizando-se a Equação 2, determinou-se a energia de soldagem (H) de 1,62 kJ.mm⁻¹, o qual buscou-se seguir em todos os testes, entretanto devido a questões operacionais houveram oscilações em torno desse valor. Para os passes de raiz, ocorreram maiores discrepâncias, de forma que o soldador se limitou apenas às questões operacionais, buscando a obtenção de um perfil de cordão adequado (acabamento e penetração). Apesar disso, todos os procedimentos e passes se mantiveram dentro das recomendações dos fabricantes dos AID, os quais indicam a energia entre 0,5 e 2,5 kJ.mm⁻¹ [12,13]. A Tabela 5 apresenta os parâmetros reais e médios, dos passes de raiz e demais, respectivamente.

$$H_L = \eta \cdot H \quad \text{Eq. 1}$$

Durante a soldagem, a seqüência de passes e todos os tempos de arco aberto foram registrados de forma a se determinar a produtividade e compará-la em função do processo de soldagem. Após isso, todas as juntas soldadas foram submetidas

ao ensaio não destrutivo de raios-x. Em seqüência, os corpos de provas para ensaios mecânicos foram retirados através de corte a frio com serra fita, segundo a Tabela 6.

As trações retangulares e os dobramentos laterais foram extraídos transversalmente aos cordões de soldagem, com dimensões seguindo o código ASME IX [14]. A Figura 4 mostra exemplos dos corpos de prova de dobramento, que tiveram sua superfície retificada e foram atacados com reagente BEHARA II para identificação da solda e o correto posicionamento na execução do ensaio. O UNS S32304 pela ASME IX é um P-Number 10H, portanto essa mesma norma solicita a utilização de um cutelo de 40mm de diâmetro e um ângulo de curvatura de 180°. Os ensaios de tração e dobramento foram executados na máquina de tração da marca Lousenhousewerk.

Para o ensaio Charpy foram utilizados corpos de prova “full size” de 10 x 10 x 55 mm e entalhe conforme ASTM A370 [15], retirados a 2 mm da superfície e da raiz, conforme Figura 5A. A posição do entalhe foi no centro de solda (CS) e a 2 mm da linha de fusão a partir do centro da espessura do corpo de prova, conforme Figura 5B, sendo o último considerado aqui como zona termicamente afetada (ZTA). A Figura 6 exemplifica o método empregado para marcação do local do entalhe nas quatro regiões avaliadas nesse trabalho. A temperatura de ensaio foi de -30 °C.

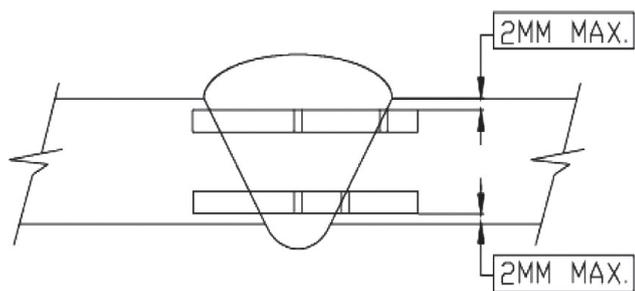


A)

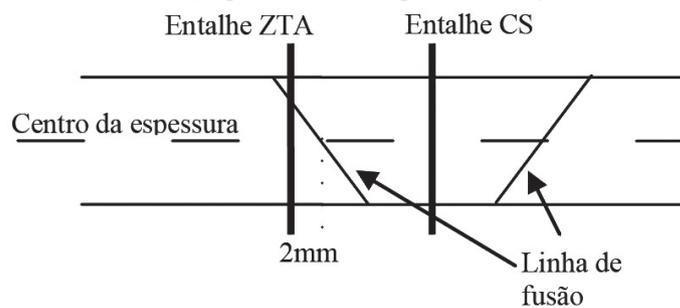


B)

Figura 4. A) Corpos de prova de dobramento com a solda devidamente identificada; B) Aparato utilizado para a execução do teste.

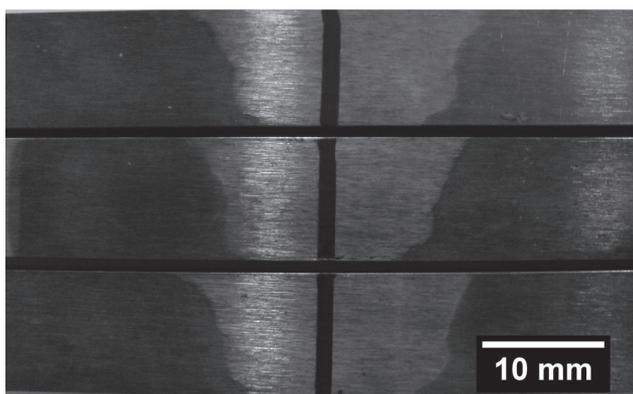


A)

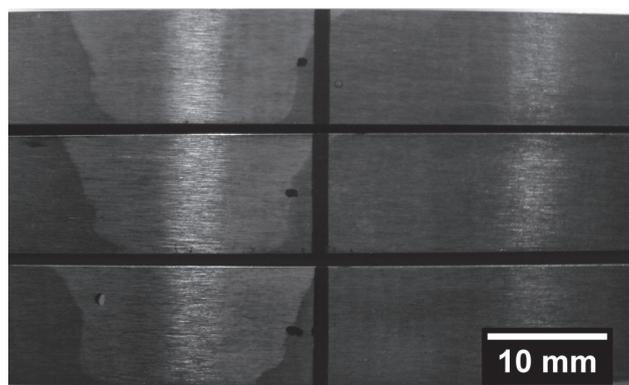


B)

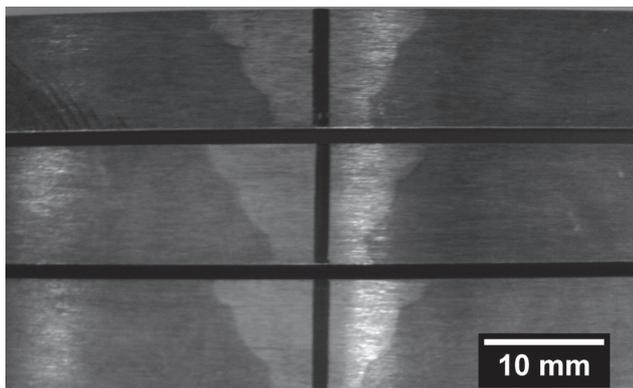
Figura 5. A) Local de remoção dos corpos de prova; B) Localização dos entalhes.



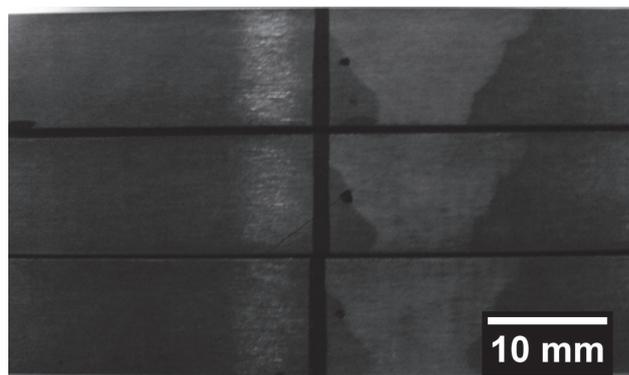
A)



B)



C)



D)

Figura 6. Exemplo de marcação dos entalhes nos corpos de prova de ensaio Charpy. A) A 2 mm da superfície no CS; B) A 2 mm da superfície na ZTA; C) A 2 mm da raiz no CS; D) A 2 mm da raiz na ZTA.

Para ensaio de microdureza foram utilizados corpos de provas extraídos transversalmente a junta com 10 x 22 x 100 mm, os quais foram posteriormente lixados e polidos até a pasta de diamante de 9 µm. Foi usado o microdurometro Shimadzu com carga de 2 kg, que representa 19,614 N, e as impressões foram realizadas ao longo da junta soldada a 1,5 mm da superfície e da raiz, conforme Figura 7. Vale ressaltar que foi utilizado a norma SBM SPF92033A1[16] como critério de avaliação, sendo que a mesma tem como limite máximo 350 Hv.

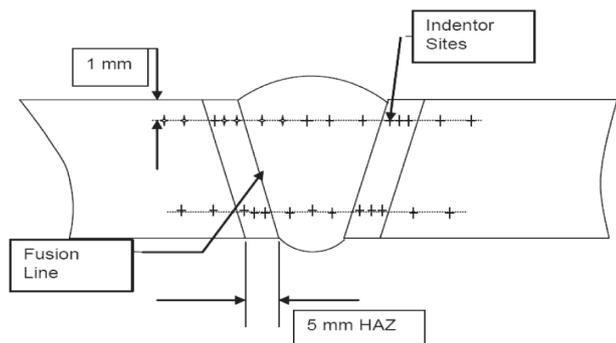


Figura 7. Localização das impressões de microdureza [17].
Figura modificada.

3. Resultados e Discussão

A Figura 8 apresenta a seqüência de passes resultante, enquanto os dados de tempo de soldagem são apresentados na Tabela 7. Nota-se que ambos os CP's soldados com eletrodos revestidos apresentaram mesmo número de passes e produtividades muito próximas, sendo que o teste SMAW2209 mostrou-se cerca de 7 % mais produtivo que o SMAW2307. Isso se deve a maior corrente média empregada, a qual foi possível devido ao maior diâmetro de eletrodo. Já para soldagem semi-automática, que engloba os demais processos, a produtividade se mostrou pelo menos 63 % maior que para soldagem SMAW.

Apesar da taxa de deposição do processo FCAW ser até 20 % maior que do processo GMAW para uma mesma corrente de soldagem e stick-out, quando se compara os testes GMAW2307, GMAW2209, FCAW2307 e FCAW2209 se observa que o aumento de produtividade é de cerca de 6 a 18 %, dependendo do arame. Isso pode ser explicado pelo fato dos testes com GMAW terem sido realizados com arame de 1,00 mm de diâmetro, enquanto os outros foram executados com arames de 1,20 mm, dessa maneira o aumento de densidade de corrente propiciado pelos arames tubulares foi relativamente menor, pois os mesmos foram comparados com arames sólidos de 1,00 mm.

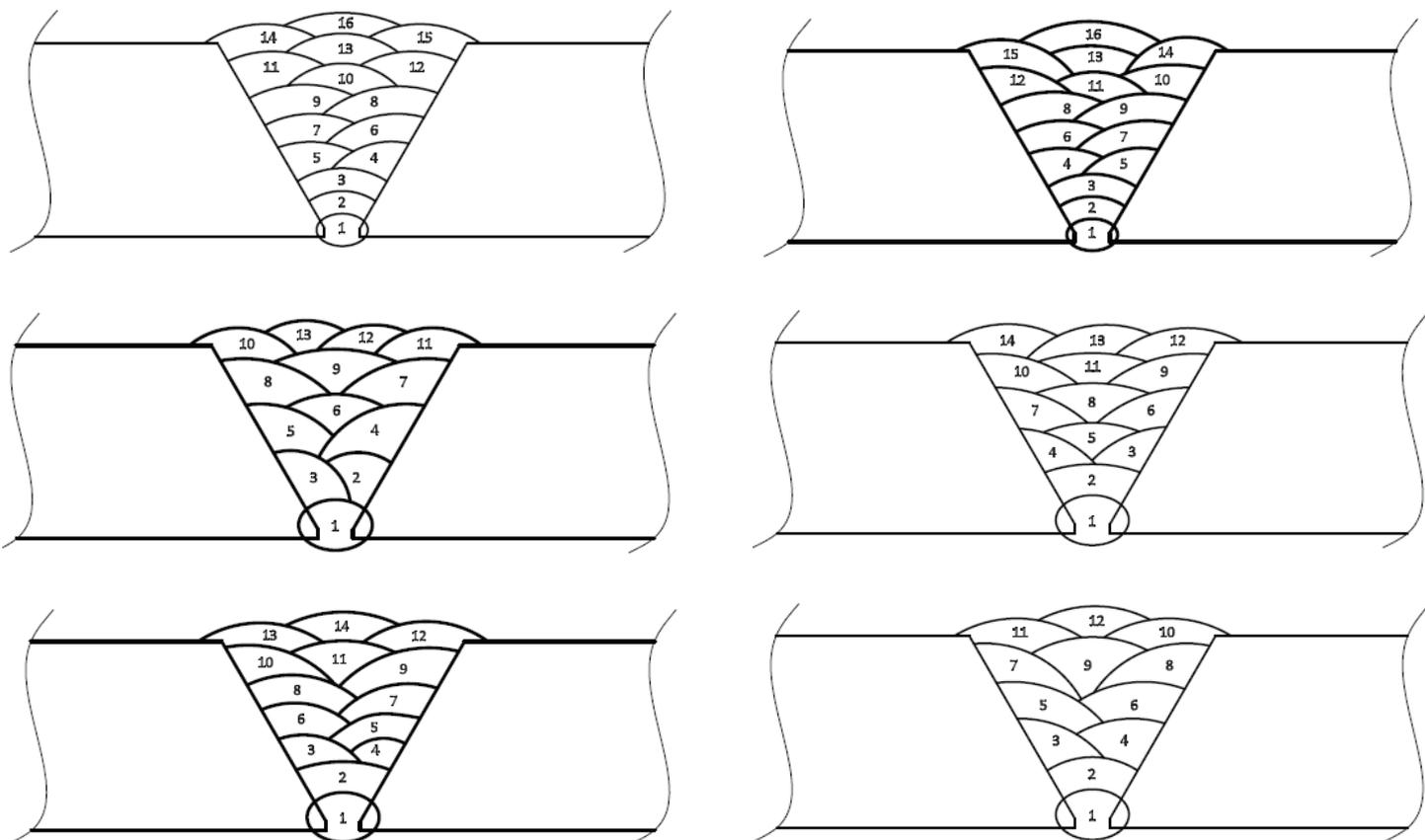


Figura 8. Croqui do número e seqüência de passes utilizada.

Tabela 7. Dados referente a produtividade dos testes realizados.

Teste	Número de Camadas	Número de Passes	Tempo Total de aa (min)	Produtividade (m/haa)
SMAW2307	9	16	39,1	0,54
SMAW2209	9	16	36,4	0,59
GMAW2307	6	13	22,8	0,93
GMAW2209	6	14	22,3	0,96
FCAW2307	7	14	21,5	0,99
FCAW2209	5	12	18,7	1,14

Nota: aa – arco aberto

Apesar de ser um dado muito importante em termos de produtividade, nesse trabalho não foram determinados os ciclos de trabalho para cada teste, pois foi considerado que um corpo de prova soldado em condições experimentais não representaria a realidade no chão de fábrica, ao contrário da produtividade por tempo de arco aberto, a qual é função da corrente de soldagem, que foi similar em todos os testes realizados com processos semi-automáticos. Além disso, o ciclo de trabalho depende também da peça soldada e, sobretudo, de fatores culturais da mão de obra.

Os ensaios de raios-x mostraram que as soldas apresentaram-se livres de defeitos, porém, em alguns casos, com descontinuidades, as quais foram consideradas aceitáveis segundo ASME B31.3 [17], assim como apresentado na Tabela 8.

Tabela 8. Resultados de ensaios não destrutivos por raios-x.

Teste	Tipo de Descontinuidade	Laudo
SMAW2307	Ausente	Aprovado
SMAW2209	Porosidade	Aprovado
GMAW2307	Porosidade	Aprovado
GMAW2209	Porosidade	Aprovado
FCAW2307	Porosidade	Aprovado
FCAW2209	Ausente	Aprovado

Nota: Critério de aceitação de acordo com ASME B31.3[18]. Laudo emitido por inspetor nível 2 devidamente qualificado.

A Tabela 9 apresenta os resultados de tração para cada um dos testes. De acordo com a norma ASTM A790 e EN-10216-6, o limite de resistência mínimo do AILD UNS S32304 e EN14362 (equivalente ao UNS S32304) é de 600 MPa, enquanto o limite de escoamento mínimo é de 400 MPa. Dessa maneira, observa-se que para todas as juntas soldadas a ruptura ocorreu bem acima do limite mínimo do metal de base, mostrando que a solda não comprometeu a resistência à tração da junta. Além disso, todas as rupturas ocorreram no metal base, o que é evidenciado na Figura 9. Isso já era esperado, visto que o metal depositado por todos os consumíveis de soldagem apresentam limites de resistência superiores ao metal de base, assim como descrito na Tabela 4.

Tabela 9. Resultados de resistência a tração das juntas soldadas.

Teste	Limite de Resistência (MPa)	Local de Ruptura
SMAW2307	718	Metal de base
SMAW2209	722	Metal de base
GMAW2307	706	Metal de base
GMAW2209	727	Metal de base
FCAW2307	723	Metal de base
FCAW2209	711	Metal de base

Os valores dos ensaios de dobramentos laterais apresentaram-se satisfatórios, pois não houveram descontinuidades superiores a 3,2 mm (Tabela 10), valor que representa o critério máximo de aceitação segundo ASME IX [14]. Na verdade, apenas uma das amostras do teste 10 apresentou uma pequena indicação, como pode ser visto na Figura 10, possivelmente iniciada por uma porosidade, pois o ensaio de raios-x mostrou a presença desse tipo de defeito no teste 10. Entretanto, tal indicação é aceitável segundo o código ASME IX[14], pois tem um tamanho não superior a 1,0 mm.

Tabela 10. Resultados dos ensaios de dobramentos laterais.

Teste	Amostra 1	Amostra 2
SMAW2307	Sem descontinuidade	Sem descontinuidade
SMAW2209	Sem descontinuidade	Sem descontinuidade
GMAW2307	Sem descontinuidade	Sem descontinuidade
GMAW2209	Sem descontinuidade	Sem descontinuidade
FCAW2307	Descontinuidade menor que 1,0mm	Sem descontinuidade
FCAW2209	Sem descontinuidade	Sem descontinuidade

Todos os ensaios apresentaram valores superiores a 27 J, valor tipicamente especificado pelos códigos ASME's, incluindo o ASME II Part C [11], mostrando que uma junta de UNS S32304 soldada pelos processos SMAW, GMAW e FCAW com dois tipos de consumíveis apresentam boa tenacidade a -30 °C, tanto na zona fundida quanto na ZTA, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11. Valores médios de energia absorvida, em J, no ensaio de impacto Charpy a -30°C.

Teste	Localização			
	Superfície CS	Superfície ZTA	Raiz CS	Raiz ZTA
SMAW2307	35 ± 4	59 ± 9	36 ± 1	51 ± 5
SMAW2209	41 ± 0	49 ± 14	39 ± 5	44 ± 6
GMAW2307	122 ± 14	55 ± 7	92 ± 22	66 ± 9
GMAW2209	86 ± 5	88 ± 30	92 ± 14	59 ± 12
FCAW2307	52 ± 5	83 ± 15	46 ± 1	60 ± 5
FCAW2209	56 ± 1	69 ± 22	49 ± 2	57 ± 7

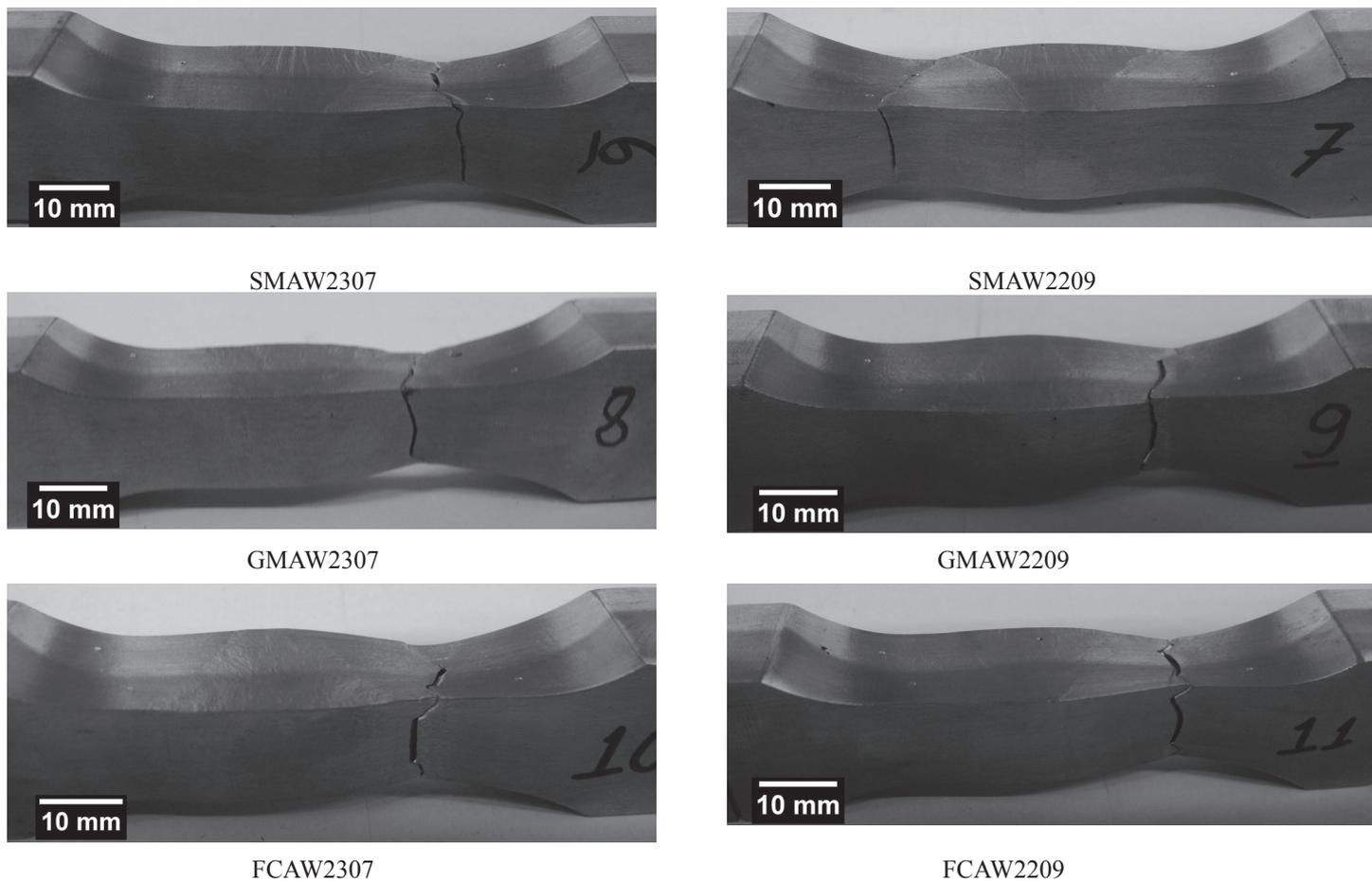


Figura 9. Local de ruptura dos corpos de provas submetidos ao ensaio de tração.

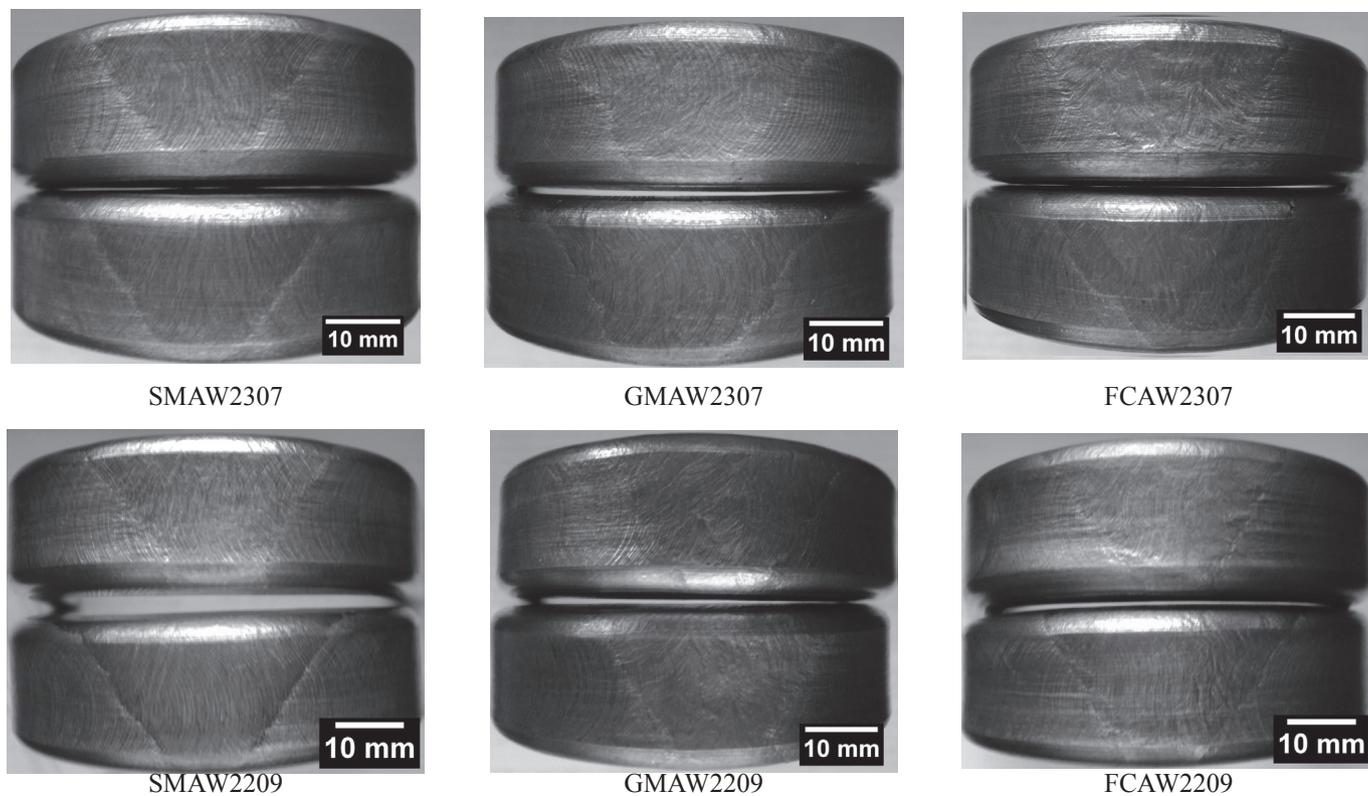


Figura 10. Corpos de prova de dobramento após ensaio. Pequena descontinuidade indicada pela seta vermelha.

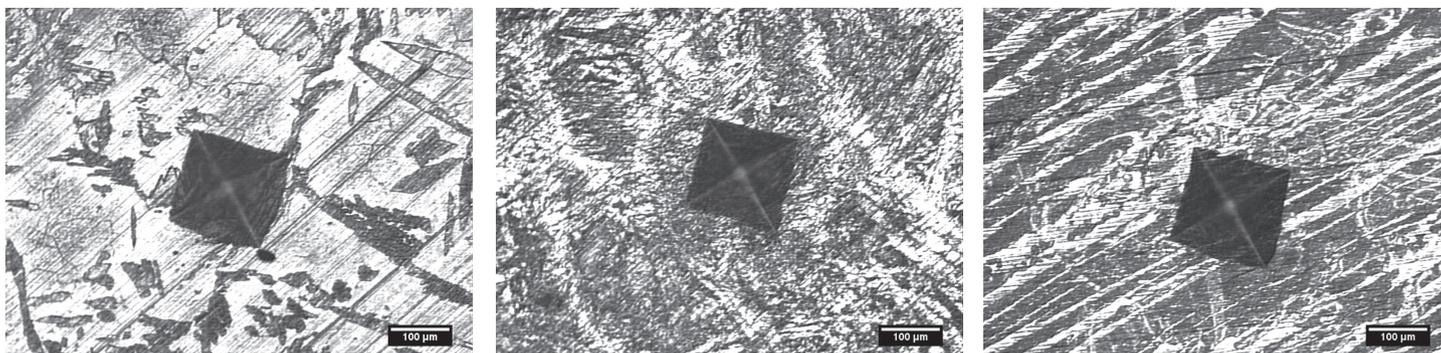


Figura 11. Impressões realizadas na ZTA, ZF e MB. O teste FCAW2209 foi usado para produzir esse exemplo.

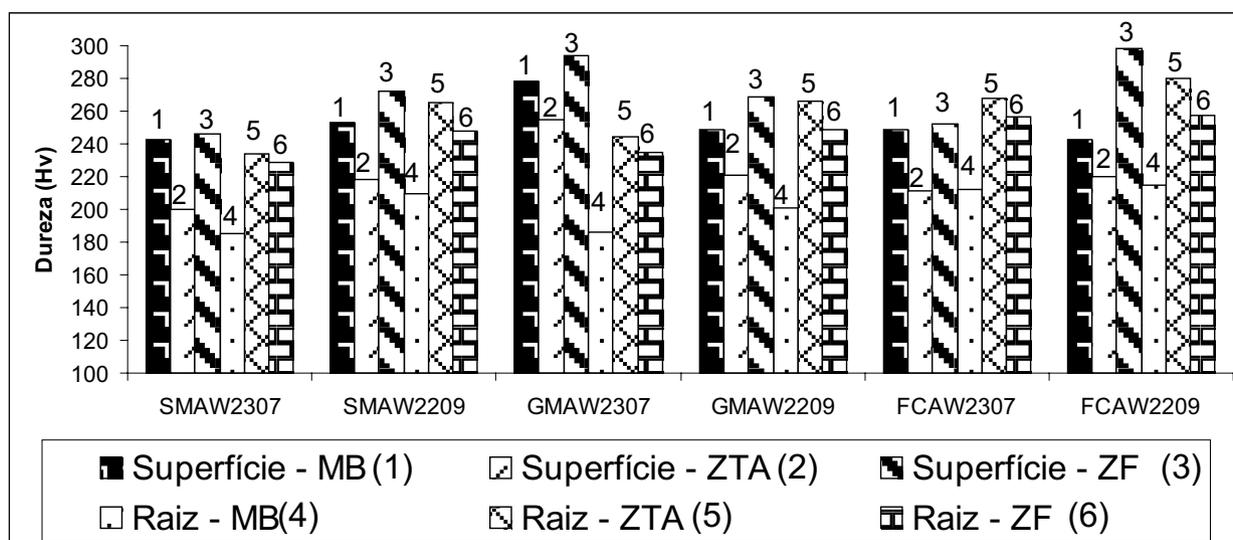


Figura 12. Resultados médios de microdureza (carga de 2kg), por teste e por região.

Através da Tabela 11 é possível observar que o processo de soldagem por eletrodos revestidos apresentou os menores resultados, enquanto a soldagem GMAW mostrou maior tenacidade, sendo isso possivelmente devido ao maior nível de inclusões não metálicas dos processos SMAW e FCAW e menor nível do processo GMAW, o que será verificado via análise microestrutural na parte 2 deste trabalho.

Em geral a ZTA apresentou maiores resultados que a zona fundida, porém menor resultado que o aço, mostrando certa degradação da tenacidade. Entretanto, tal fato pode ser mascarado devido ao entalhe abranger parte da zona fundida o que é decorrente do tipo de chanfro escolhido. A configuração ideal do chanfro seria em K ou meio V, o que geraria uma ZTA retilínea, permitindo o entalhe somente na zona termicamente afetada, contudo essas configurações não foram usadas nesse trabalho, pois o foco não é a avaliação da tenacidade e sim do aspecto de aplicação prática do material, em que o chanfro em V se enquadra melhor que os outros.

No ensaio de microdureza não foi priorizada nenhuma fase presente, ferrita ou austenita, conforme ilustrado na Figura 11 em micrografias da região ensaiada, incluindo a impressão da microdureza. Ressalta-se que devido a grande massa de resultados (28 pontos por amostra, totalizando 168 pontos) os resultados individuais não foram apresentados, entretanto as

médias são descritas na Figura 12.

Todos os valores individuais encontram-se dentro do requerimento da SBM SPF92033A1 [16], ou seja, são menores que 350 Hv, sendo que o maior valor obtido foi de 322 Hv, o qual estava situado na ZTA da superfície da amostra GMAW2307. Apesar disso, na média os valores foram inferiores a 280 Hv, assim como representado na Figura 12. A zona fundida a 2 mm da superfície (Superfície – ZF) foi a região que apresentou maior dureza em todos os testes, exceto para o FCAW2307, isso se deve ao fato da maior quantidade de elementos de liga no metal de solda, principalmente carbono, nitrogênio e cromo (conforme Tabela 2 e Tabela 3), quando comparado com o metal de base. Adicionalmente, essa região não sofreu nenhum tipo de reaquecimento, levando a crer que a maior dureza pode também ser proveniente da ausência de revenido de fases duras, bem como menor proporção de austenita. Já o metal de base próximo à raiz apresentou menor dureza, possivelmente devido ao reaquecimento provocado pelos passes subsequentes.

4. Conclusões

Através desse trabalho foi possível concluir que:

1 – Em função do processo de soldagem e consumíveis, foram utilizados de 11 a 16 passes para a soldagem das juntas,

sendo que a soldagem semi-automática foi pelo menos 63 % mais produtiva em termos de tempo de arco aberto que a soldagem com eletrodos revestidos. Quando comparam-se os processos GMAW e FCAW, o segundo se mostrou de 6 a 18 % mais produtivo que o primeiro;

2 – Através do ensaio não destrutivo por raios-x, foi possível detectar poros nos testes SMAW2209, GMAW2307, GMAW2209 e FCAW2307, entretanto todos foram considerados aceitáveis segundo a ASME B31.3;

3 – No ensaio de tração retangular todas as rupturas ocorreram no metal de base e os valores do limite de resistência foram acima de 700 MPa, o que está superior ao valor especificado para a liga UNS S32304, que é 600 MPa.

4 – No ensaio de dobramento, apenas uma das amostras do experimento FCAW2307 apresentou uma descontinuidade, que foi inferior a 1,00 mm, sendo, portanto, considerada aceitável pela ASME IX. Todas as demais amostras apresentaram-se completamente livre de defeitos.

5 – Em geral, os ensaios de Charpy mostraram que a energia absorvida no centro de solda foi menor que na ZTA para as amostras soldadas com SMAW e FCAW e superior no processo de soldagem GMAW. Apesar disso, todos os valores foram superiores a 27 J, a qual é a energia tipicamente usada pelos códigos ASME como valor mínimo requerido.

6 – O ensaio de microdureza mostrou menor dureza no metal de base próximo a raiz da solda, região reaquecida pelos demais passes, enquanto que a maior dureza foi observada na superfície da zona fundida. A norma SBM SPF92033A1 especifica a dureza máxima de 350 Hv, portanto os valores atenderam a mesma, já que o maior valor encontrado foi de 322 Hv.

Sendo assim, de maneira geral, todos os ensaios se apresentaram valores satisfatórios de propriedades mecânicas, as quais atenderam as normas de fabricação usualmente empregadas para utilização dos aços inoxidáveis duplex.

5. Agradecimentos

A Aperam South América pelo fornecimento do aço e suporte, a ESAB Industria e Comércio LTDA pelo fornecimento dos consumíveis e ao LRSS-UFGM pelo fornecimento da infraestrutura para execução da soldagem e análises.

6. Referências Bibliográficas

- [1] GENETM.; OROBANC.. Steel, Alloys and Stainless. Laplace Conseil and COMC 2010. In: Stainless Steel World, Beaune, October 2010. Disponível em: <<http://www.worldstainless.org/NR/rdonlyres/15DDB61C-4F41-4639-8335-F16488C840BD/6105/DuplexConferenceLaplaceConseilCOMC.pdf>>. Acesso em: 26/02/2012.
- [2] ALVAREZ-ARMAS I.. Duplex Stainless Steels: Brief History and Some Recent Alloys. Recent Patents on Mechanical Engineering 2008, 1, 51-57, 2008.
- [3] OLSSON J, LILJAS M. 60 years of DSS applications. In: NACE Corrosion 94 Conf, paper No. 395, Baltimore, MD, 1994.
- [4] POHL M. The Ferrite/Austenite Ratio of Duplex Stainless

- Steels. Zeitschrift Metallkunde. (2) 86, pp. 97-102. 1995.
- [5] REBELLO J. M. A., MATTOS O. R., NUNES F. C., MATOS T. F., SALUSTIANO A. Z., SANTOS N. B., MOTA R. O. COOPETEC Fundação. Aços Duplex e Superduplex, Estado da Arte. 2006.
- [6] ASM, American Society for Metals (1990) Metals Handbook – Volume 1 – Properties and selection: Irons, Steels and High performance alloys, ASM International, US.
- [7] WESTIN, E. M.. Microstruture and properties of welds in the lean duplex stainless steel LDX 2101®. Doctoral Thesis in Material Science. Stockholm, Sweden, 2010.
- [8] OLSSON C. A. The influence of nitrogen and molybdenum on passive films formed on the austenoferritic stainless steel 2205 studied by AES and XPS. Corrosion Science, vol. 37, p. 467-479, 1995.
- [9] LILJAS, M.; QVARFORT, R. Influence of nitrogen on weldments in UNS S31803. In: Duplex, stainless steels '86. Proceedings. The Hague, 1986, p. 244-256.
- [10] KUDO T., TSUGE H., MOROISHI T.. Stress Corrosion Cracking Resistance of 22%Cr Duplex Stainless Steel in Simulated Sour Environments. Corrosion, vol. 45. 831-838. 1989.
- [11] ASME II Part C. Specifications for Welding Rods Electrodes and Filler Metals. ASME, 2010.
- [12] Pratical guideline for the fabrication of duplex stainless steels. IMO, London, 2° ed, 2009.
- [13] Pettersson C.; Fager S. Welding practice for the Sandvik duplex stainless steels SAF 2304, SAF 2205 and SAF 2507. AB Sandvik Steel, Sweden, 1995.
- [14] ASME IX 2010. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX: Welding and Brazing Qualifications. American Society of Mechanical Engineering, 2010.
- [15] ASTM A370 - 11a Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. American Society of Testing and Materials, 2011.
- [16] SBM SPF92033A1. FPSO Fabrication, Welding and Erection Specification. Switzerland, 2011.
- [17] ASME B31.3. Process Piping. ASME, American Society of Mechanical Engineering, 2002.