

Tema: Soldagem

## INFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO SOBRE A MICROESTRUTURA EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇO DUPLEX SAF2205\*

Camila Soares Fonseca<sup>1</sup>  
Joel Romano Brandão<sup>2</sup>  
Ivete Peixoto Pinheiro<sup>3</sup>

### Resumo

Os aços inoxidáveis duplex possuem uma microestrutura austeno-ferrítica com fração média de cada fase de cerca 50%. A microestrutura duplex é responsável por melhorar as propriedades mecânicas do material. A soldagem destes aços é frequentemente uma operação crítica. O objetivo desse trabalho é analisar a influência do aporte térmico sobre a microestrutura de juntas soldadas do aço duplex SAF2205. As chapas de aço duplex 2205 foram soldadas pelo processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), variando apenas o aporte térmico. Após essa etapa, as chapas foram cortadas, preparadas para a análise metalográfica, difração de raio X (DRX) e ensaio de microdureza Vickers. As microestruturas do metal base (MB), da zona termicamente afetada (ZTA) e da zona fundida (ZF) foram caracterizadas nesse estudo. Foi verificado que quanto maior o aporte térmico menor a quantidade de ferrita e maior o crescimento de grão da austenita na região fundida. Os ensaios de microdureza mostraram que quanto maior o aporte térmico maior será a ZTA do material.

**Palavras-chave:** Aço duplex; Aporte térmico; GMAW.

### INFLUENCE OF HEAT INPUT CONTRIBUTION ON THE MICROSTRUCTURE WELDED JOINTS IN STEEL DUPLEX SAF2205

#### Abstract

Duplex stainless steels have an austenitic-ferritic microstructure with an average fraction of each phase of about 50%. The duplex microstructure is responsible for improving the mechanical properties of material. The welding of these steels is often a critical operation. The aim of this study is to analyze the influence of heat input on the microstructure of welded joints of duplex steel SAF2205. The steel sheet duplex 2205 were welded by the welding process GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), varying only the heat input. After this step the sheet were cut and prepared for metallographic analysis, X- ray diffraction (XRD) and Vickers hardness test. The microstructures of the base metal (BM), the heat affected zone (HAZ) and the weld zone (WZ) were characterized in this study. It has been found that the greater heat input the smaller was the amount of ferrite and the increased grain growth of austenite in the melt region. The microhardness tests showed that the higher heat input increased the HAZ material.

**Keywords:** Duplex steel; Heat input; GMAW.

<sup>1</sup> Engenharia de Materiais, mestranda, DEMAT, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenharia Mecânica, mestre, professor, DEMAT, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Engenharia Metalúrgica, doutora, professora, DEMAT, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis surgiram no começo do século XX por meio de estudos realizados por metalurgistas franceses [1]. Em 1909 os aços inoxidáveis começaram a serem classificados como ferrítico, martensítico e austenítico. A publicação de estudos sobre aços duplex aconteceu a partir de 1920. Os resultados mostraram que ele possuía uma soldabilidade ruim e que a fase ferrita predominava na estrutura em relação à fase austenita. Devido a estas análises o aço duplex não foi aceito, de imediato, no mercado. Somente quando os problemas com a soldabilidade e com o balanceamento das fases ferrita e austenita foram solucionados é que os aços duplex foram difundidos comercialmente. A escassez de níquel no mercado no final do século XX impulsionou a utilização dos aços duplex. A falta desse elemento de liga favoreceu o desenvolvimento de aços com baixo teor de níquel, com isso os aços inoxidáveis duplex foram se consolidando no mercado como uma alternativa e difundidos como um material versátil para várias aplicações. De acordo com Solomon e Devine [2] o grupo dos duplex que se destaca entre os aços inoxidáveis é constituído por ligas Fe-Cr-Ni-Mo-N que possuem uma microestrutura na qual a composição de ferrita e austenita, tem frações volumétricas próximas a 50%. Para conseguir esta microestrutura é realizada a solidificação ferrítica do metal líquido na faixa de temperatura de 1440 a 1490°C, seguida pela precipitação de austenita, no estado sólido (1200°C), por nucleação e crescimento. Em aplicações em que ocorre um resfriamento rápido, entre 1200 e 800°C, a precipitação de austenita é suprimida e acaba precipitando nitretos de cromo na matriz ferrítica. No caso em que o aço é aquecido em temperaturas menores que aproximadamente 1000°C, sua microestrutura não é estável e pode ocorrer a precipitação de fase sigma ou nitreto de cromo. O aparecimento destas fases pode prejudicar o desempenho dos aços inoxidáveis duplex, principalmente em termos de propriedades mecânicas, resistência à corrosão e soldabilidade.

A soldagem é uma operação que visa obter a coalescência localizada, na qual o material é aquecido até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição [3].

No processo de soldagem GMAW - Gas Metal Arc Welding ocorre a união de peças por meio do aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça, de acordo com Marques [4].

De acordo com Oliveira e Faria [5] a quantidade de calor adicionada a um material, por unidade de comprimento linear, é denominada energia de soldagem ou aporte térmico ou aporte de calor, em que a unidade usual é em kJ/mm. Pode ser considerado para a soldagem a arco, o arco como a única fonte de calor definida por sua energia de soldagem, conforme mostrado na Equação 1 abaixo:

$$E = \frac{\eta \cdot V \cdot I}{v} \quad (1)$$

onde:

E = energia de soldagem em J/cm;

n = eficiência térmica ou rendimento do processo;

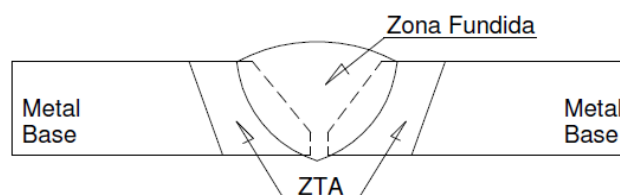
V = tensão no arco, em V;

I = corrente de soldagem, em A;

v = velocidade de soldagem, em cm/s.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

A figura 1 apresenta as regiões da solda, após ser solidificada. A mesma é constituída de três regiões: zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e metal base (MB).

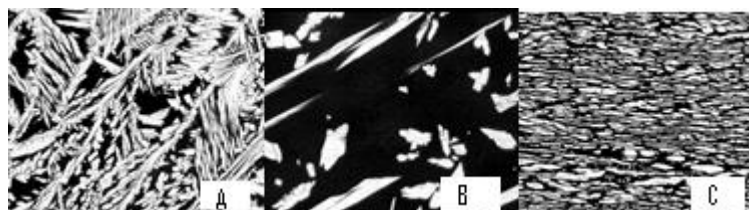


Fonte: *Welding Handbook*, 2004

**Figura 1.** Seção transversal de uma solda.

Uma das maneiras mais utilizadas para controlar o tamanho de grão, de acordo com Oliveira e Faria [5] é, além de utilizar estabilizadores, como o Ti e o Nb, por exemplo, também por meio do controle da energia de soldagem. Quanto menor o valor, menor é o tamanho de grão resultante. É recomendável soldar com uma menor energia de soldagem possível para obtenção de grãos menores e uma ZTA com tamanho de grão próximo a do metal base.

Ao analisar a microestrutura de aço 2205 que passou pelo processo de soldagem apresentada na figura 2, conforme demonstrado por Abreu et al [6], é possível perceber a diferença entre a microestrutura da zona fundida, da zona termicamente afetada (ZTA) e do metal base. Nas imagens as partes escuras são de ferrita e as claras de austenita.



Fonte: Abreu et al [6].

**Figura 2.** Microestrutura do aço SAF 2205 (A) Zona fundida; (B) ZTA e (C) Metal base.

Em muitas aplicações feitas de aços duplex é utilizado o processo de soldagem. Para que esse processo não altere as propriedades do material são necessários alguns cuidados. O objetivo desse trabalho é analisar a influência do aporte térmico sobre a microestrutura de juntas soldadas do aço inoxidável duplex SAF 2205.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material analisado consiste em uma chapa de aço duplex SAF2205 laminada a frio, fabricada pela Aperam South America. O material estava com espessura de 4mm cada chapa. A análise da composição química do aço SAF2205 foi realizada na Aperam South America.

As chapas, sem nenhuma preparação prévia, foram soldadas pelo processo de soldagem GMAW, no laboratório de soldagem da ESAB. O equipamento utilizado para a solda foi o Raltrec FW1000. Os parâmetros da soldagem foram definidos e mantidos constantes, variando apenas o aporte térmico. Foi utilizada uma tensão de 28 volts e uma corrente de 200 ampéres. Considerou-se a eficiência do processo igual a 80%. Utilizando os parâmetros definidos e a Equação 1, foi calculada a

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

velocidade de soldagem para cada aporte térmico. Na Tabela 1 é possível analisar os parâmetros usados na soldagem para cada aporte térmico.

**Tabela 1.** Parâmetros utilizados na soldagem das chapas.

Chapa	Aporte térmico (kJ/mm)	Tensão (volts)	Corrente (ampéres)	Velocidade de soldagem (cm/min)
A	0,5	28,0	200,0 (+/- 30)	54,0
B	1,0	28,0	200,0 (+/- 30)	27,0
C	1,5	28,0	200,0(+ /- 30)	18,0

As chapas foram soldadas utilizando o arame sólido OK Autrod 2209, este possuía em sua composição química 0,024%C; 0,41%Si; 1,55%Mn; 0,028%P; 0,001%S; 21,79%Cr; 8,30%Ni; 3,09%Mo, a quantidade de N não foi possível identificar. O gás de proteção utilizado possui em sua composição 95%Ar, 3%CO<sub>2</sub> e 2%N<sub>2</sub>. O processo foi realizado com um passe de solda, em posição plana. Durante a soldagem o aporte térmico foi variado em 0,5kJ/mm, 1,0kJ/mm e 1,5kJ/mm. Foram soldadas três chapas, uma chapa para cada aporte térmico utilizado. Primeiramente foi realizado um cordão de solda no centro de cada chapa e posteriormente os cordões de solda foram feitos nas laterais de cada chapa, com seus respectivos aporte térmicos.

O ensaio de Difração de Raio X foi realizado em amostras do aço duplex SAF2205 soldada com cada aporte térmico no Laboratório de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, com o aparelho Shimadzu, X-Ray Diffractometer XRD-7000.

Foi realizado o ensaio de microdureza Vickers das amostras, em um microdurômetro Shimadzu HMV-2. A microdureza foi feita com replicação de 3 vezes. A carga utilizada foi de 980,7mN (100gf) por 15 segundos. Foram realizadas medições a partir do centro do cordão de solda a uma distância de 0,3, 0,8 e 1,3mm da superfície de topo. O espaçamento na zona fundida e no metal de base foi de 0,3mm, já na ZTA, foi de 0,1mm. Foi realizada a média dos 3 grupos de medições.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da análise da composição química realizada na Aperam South América pode ser observado na tabela 2 abaixo.

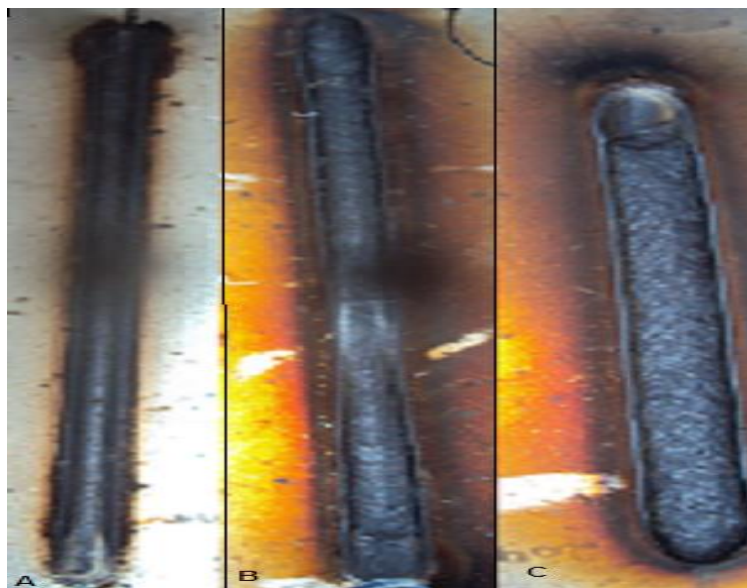
**Tabela 2.** Percentual da composição química do aço SAF2205

Aço	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	N
220	0,01	1,81	0,26	0,02	0,000	22,42	5,42	3,00	0,00	0,19	0,15
5	4	2	3	4	2	0	0	7	2	1	3

Fonte: Aperam South América.

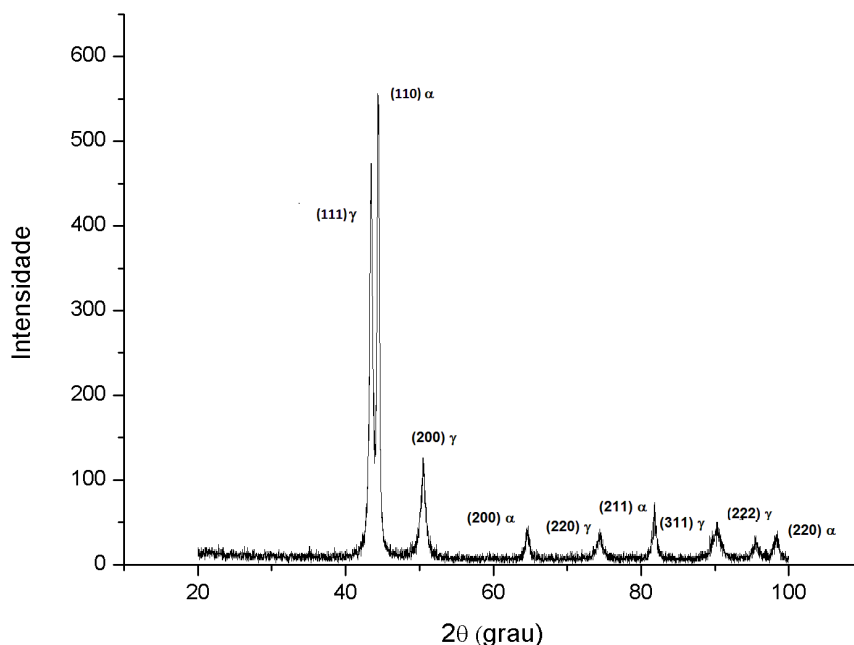
Foi observado na soldagem das chapas que quanto maior o aporte térmico maior foi a espessura do cordão de solda (Figura 3).

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 3.** Solda com aporte térmico de (A) 0,5kJ/mm; (B) 1,0kJ/mm e (C) 1,5kJ/mm.

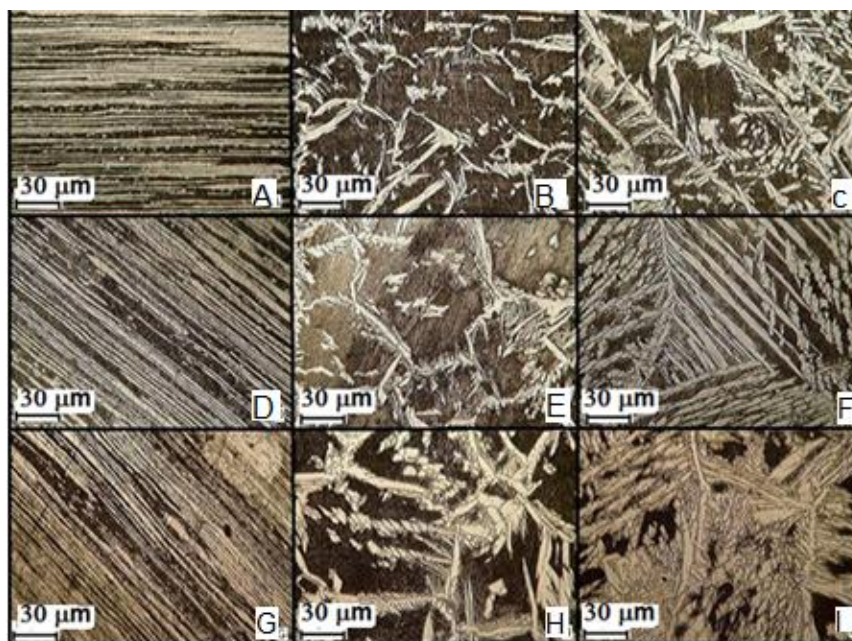
O resultado da difração de raios X do aço inoxidável duplex SAF2205 como recebido confirmou que as fases presentes no aço são apenas ferrita ( $\alpha$ ) e austenita ( $\gamma$ ) conforme pode ser observado na figura 4. A partir do difratograma (figura 4) foi realizada uma análise semiquantitativa por meio da técnica das intensidades integradas com auxílio do Origin 8.0, o resultado encontrado no material como recebido foi de 41% ferrita e de 59% austenita.



**Figura 4.** Difratograma raios-X do aço inoxidável duplex SAF2205 conforme recebido.

A partir da análise metalográfica foram observadas as micrografias no metal base, ZTA e zona fundida de amostras soldadas com aporte térmico de 0,5kJ/mm, 1,0kJ/mm e 1,5kJ/mm (figura 5).

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 5.** Micrografias das amostras soldadas: com aporte térmico de 0,5kJ/mm - A) metal base, B) ZTA e C) ZF; com aporte térmico de 1,0kJ/mm - D) metal base, E) ZTA e F) ZF; com aporte térmico de 1,5kJ/mm G) metal base, H) ZTA e I) ZF.

Na figura 5 as regiões mais claras da figura são da fase austenita e as regiões mais escuras são da fase ferrita. No metal base, verifica-se na figura 5 (A), (D) e (G), a presença de ferrita e a austenita orientadas em bandas paralelas e alongadas na direção de laminação. Nas amostras soldadas com aporte térmico de 0,5 kJ/mm observa-se na figura 5 (B) e (C) a microestrutura da zona termicamente afetada (ZTA) e da zona fundida (ZF), respectivamente. Na ZTA nota-se uma quantidade de ferrita maior quando comparada ao metal base e na ZF os grãos da austenita imerso na matriz ferrítica são menores comparados aos dos demais aportes térmicos. Nas amostras soldadas com aporte térmico de 1,0 kJ/mm observa-se na figura 5 (E) e (F) a microestrutura da zona termicamente afetada (ZTA) e da zona fundida (ZF), respectivamente. Verifica-se tanto na ZTA e na ZF que o tamanho de grão austenítico ficou maior comparado à condição de aporte térmico de 0,5kJ/mm. Nas amostras soldadas com aporte térmico de 1,5kJ/mm observa-se na figura 5 (H) e (I) a microestrutura da zona termicamente afetada e da zona fundida, respectivamente. Verifica-se que o tamanho de grão austenítico ficou maior comparado à condição de aporte térmico de 1,0kJ/mm tanto na ZTA quanto na ZF. Para a zona termicamente afetada e a zona fundida verifica-se que quanto maior o aporte térmico utilizado na soldagem, maior é a quantidade de austenita (parte clara) e maior o tamanho do grão austenítico. As variações micrográficas nessas regiões evidenciam a forte influência da energia de soldagem nelas. O fato observado de que quanto maior o valor do aporte térmico, maior é a quantidade de austenita na zona fundida pode ser justificado pelo fato de que aumentando o aporte térmico, ocorre a redução da velocidade de resfriamento, resultando no aumento da quantidade de austenita. O aço inoxidável duplex SAF2205 sem ter sofrido nenhum tratamento térmico ou mecânico possui a dureza igual a 260HV. A dureza obtida para o material como recebido foi igual 283 HV (+/-3HV). O maior valor de dureza encontrado pode ser justificado, uma vez que o material recebido é uma chapa laminada a frio, processo de conformação que resulta no encruamento do material, portanto, proporciona um aumento de dureza.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Observa-se na figura 6 o perfil de dureza das amostras. Na amostra com aporte térmico de 0,5kJ/mm a ZTA está entre 4,9mm e 5,4mm de distância do centro do cordão de solda. Já para a amostra com aporte de 1,0kJ/mm a ZTA está entre 6,1mm e 7,0mm. E na amostra de 1,5kJ/mm a ZTA está entre 8,8mm e 10,4mm. Dessa forma, observa-se que quanto maior o aporte térmico maior a zona termicamente afetada.

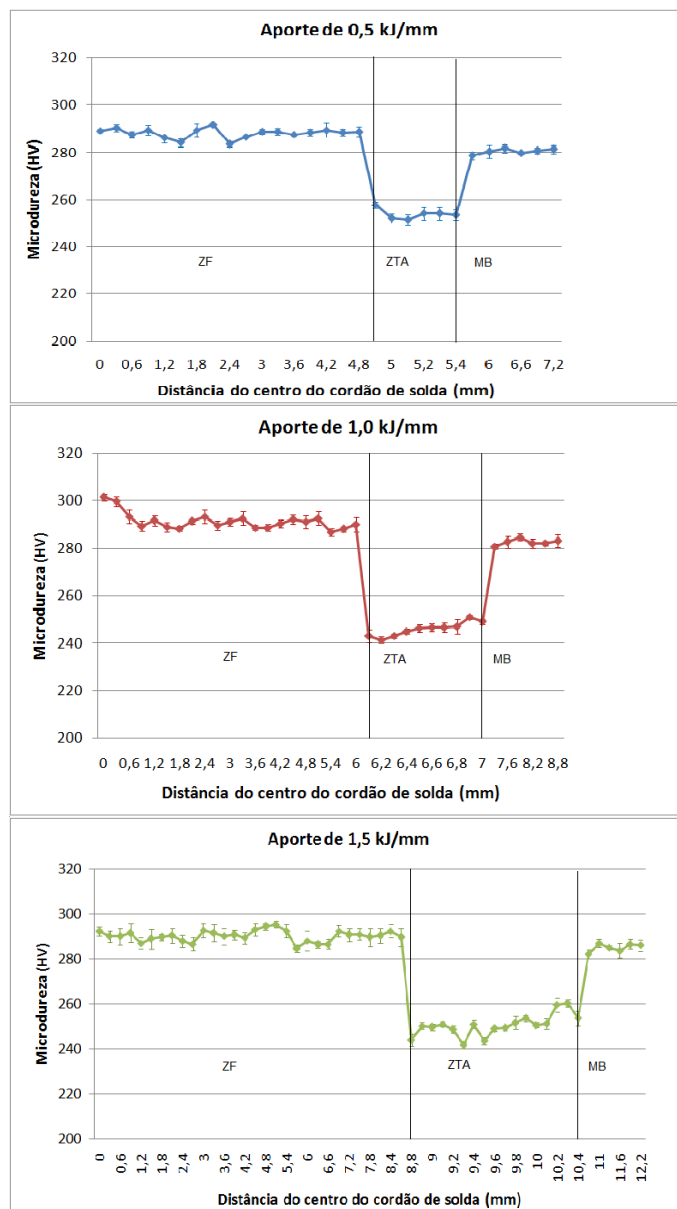


Figura 6. Perfil de dureza em função do aporte térmico.

Ao analisar o perfil de dureza comparativo das amostras em função do aporte térmico (figura 6) nota-se que todas as amostras, independente do aporte térmico, apresentaram uma queda da dureza na ZTA. Esse fato pode ser justificado porque essa região apresenta maior quantidade de ferrita que austenita quando comparada ao MB e a ZF. Uma vez que a fase ferrítica apresenta uma dureza inferior à da fase austenítica, ocorre a queda da dureza nessa região.

De acordo com Jana [7] a dureza do aço inoxidável duplex SAF2205 reduz com o aumento do aporte térmico entre 0,4 e 0,8kJ/mm. Amostras soldadas com valores

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



superiores de aporte térmico possuem pouca variação da dureza em função desse parâmetro. Esse fato pode ser observado na ZTA das amostras. As amostras de 0,5 kJ/mm apresentaram dureza maior na ZTA quando comparada com as amostras de 1,0 kJ/mm. Já comparando as amostras de 1,0 kJ/mm com as de 1,5 kJ/mm, não foi possível observar uma alteração significativa no valor da dureza.

## 4 CONCLUSÃO

Através da análise dos resultados obtidos é possível concluir que:

- Os resultados da difração de raio X do aço inoxidável duplex SAF2205 confirmaram que as fases presentes no aço como recebido foram de 41% ferrita e de 59% austenita.
- O aporte térmico influencia nas características finais do cordão de solda. Quanto maior o aporte térmico durante a soldagem maior será a espessura do cordão de solda.
- Quanto maior o aporte térmico utilizado durante o processo de soldagem menor é a quantidade de ferrita na zona fundida. Esse fato pode ser justificado pelo fato de que aumentando o aporte térmico, e conseqüentemente a energia fornecida ao processo, ocorre a redução da velocidade de resfriamento, resultando no aumento da austenita.
- A análise das micrografias das amostras mostrou que ao aumentar o aporte térmico ocorre crescimento dos grãos da austenita na zona fundida.
- O ensaio de microdureza Vickers mostrou que quanto maior o aporte térmico maior será a zona termicamente afetada do material.

## Agradecimentos

Ao Reginaldo Barbosa, da Aperam South America, pela disponibilização do material de estudo desse trabalho. Ao Ronaldo Júnior e Cândido Mendes, da ESAB, pela ajuda na realização dos ensaios e pelo apoio. Ao Bruno Cordeiro Silva e ao Paulo Renato Paiva do Laboratório de Caracterização e Microscopia de Engenharia de Materiais pela colaboração. A CAPES pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 Aços inoxidáveis duplex. 2011 [acesso em 26 ago. 2012]. Disponível em: [http://www.infomet.com.br/acos-e-ligasconteudo.php?cod\\_tema=9&cod\\_secao=10&cod\\_assunto=119](http://www.infomet.com.br/acos-e-ligasconteudo.php?cod_tema=9&cod_secao=10&cod_assunto=119).
- 2 Solomon HD, Devine TM. Duplex stainless steels - a tale of two phases. In: Lula RA. Anais do Duplex Stainless Steels, 1982. Materials Park: Ed. ASM; 1984. p.693-756.
- 3 Welding Handbook (AWS). Fundamentals of welding. 9. ed., v.1, 2004.
- 4 Marques PV. Tecnologia de soldagem. Belo Horizonte: Fundação Cristiano Otoni – FCO. ESAB.; 2002.
- 5 Oliveira TR, Faria RA. Metalurgia da soldagem dos aços inoxidáveis ferríticos. In: Anais do 4º Seminário Inox; 2000; São Paulo, Brasil. 2000. p.85-92.
- 6 Abreu HFG, Menezes JWA, Ribeiro JEM, Miranda HC. Efeito da energia de soldagem sobre a fração volumétrica da fase ferrítica no aço inoxidável duplex UNS S 31803. In: Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gas; 2005; Salvador, Brasil.
- 7 Jana S. Effect of heat input on the HAZ properties of two duplex stainless steels. Journal of Materials Processing Technology. 1992;33:247-261.

---

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.