

MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO DUPLEX 2205 SOLIDIFICADA EM MOLDE DE COBRE

Carlos Triveño Rios¹

Guilherme Henrique de Lima¹

¹Engenharia de Materiais – CECS - Universidade Federal do ABC; Santo André - SP, Brasil
carlos.triveno@ufabc.edu.br, limaghp@gmail.com

Resumo. O objetivo do presente trabalho foi estudar o efeito da solidificação rápida sob a microestrutura e propriedades mecânicas do aço duplex 2205. O aço foi refundido em forno de arco voltaico com atmosfera controlada e vazado em molde de cobre com forma de cilindros escalonados. A caracterização microestrutural foi realizada por microscopia ótica, microscópio confocal de varredura a laser, microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-X. A caracterização mecânica foi realizada por medidas de microdureza Vickers e por ensaios de compressão em temperatura ambiente. As amostras solidificadas rapidamente mostraram predominância de grãos colunares da fase ferrita- δ e baixa fração de volume da fase austenita- γ , formada nos limites dos grãos e se tornaram maiores com a diminuição da taxa de resfriamento. Também se observou um melhoramento significativo na resistência ao escoamento (0,2% de deformação) de até 100% quando comprado à amostra como recebida.

Palavras chave: Aço duplex 2205, Solidificação rápida, Ferrita- δ .

1. INTRODUÇÃO

Aços duplex fazem parte de um grande grupo, os chamados aços inoxidáveis duplex, AID. Esse grupo geralmente corresponde ao sistema Fe-Cr-Ni, apresentando microestrutura bifásica formada pelas fases ferrita (CCC) e austenita (CFC). Segundo Lo et al. (2009) os aços duplex tipo 2205 (UNS S31803) devem ser restritos a aplicações nas quais a temperatura não exceda os 300 °C, ou seja, a microestrutura desse aço deve ser constituída por uma mistura de fases ferrita e austenita. E se devem evitar tratamentos térmicos em temperaturas elevadas, por períodos prolongados para evitar a formação e crescimento de fases intermetálicas frágeis, tipo fase sigma, que são extremamente prejudiciais para a resistência mecânica e resistência à corrosão do material.

O aço Duplex 2205 com teores de 22,71%Cr e 4,88%Ni (Sedriks, 1996), solidifica completamente no campo da fase ferrita- δ , em altas temperaturas e após, resfriamento, ocorre a transformação parcial no estado sólido para a fase austenita- γ , tal como mostrado na Fig. 1. Além da transformação: $\delta \rightarrow \gamma$ em temperaturas mais baixas e resfriamento lento, pode ocorrer a precipitação da fase sigma intermetálica, σ , devido a instabilidades da fase ferrita (Cho e Lee, 2013). Essa fase é a mais prejudicial, interferindo negativamente na tenacidade e resistência à corrosão do material.

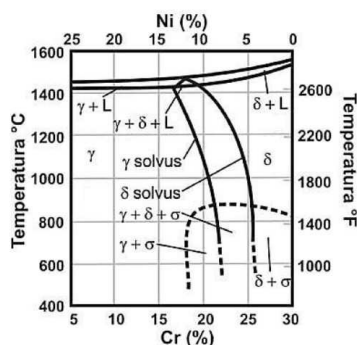


Figura 1. Diagrama pseudo-binário da liga Fe-Cr-Ni, teor de Fe fixado para 70% (Lippold, et al., 2005)

Para manipular a formação de fases e as propriedades mecânicas podem utilizar-se diferentes rotas de processamento. Técnicas de solidificação rápida, como por exemplo, “melt spinning”, fusão a arco e/ou injeção por sucção em moldes metálicos, deposição por “spray forming” são capazes de fornecer microestruturas extremamente finas (Herrera et al., 2008), bem como estruturas metaestáveis ou amorfas (Suryanarayana, 2013). Adicionalmente, durante a solidificação rápida surge menor segregação (Lavernia, 2010), produzindo um arranjo de fases bem diferente das convencionais podendo melhorar a resposta mecânica que em muitos casos é superior a processos convencionais. A solidificação rápida, também ocorre em processos de soldagem, porém as mudanças microestruturais ocorrem de forma

localizada na zona de fusão e zona afetada termicamente (Aguiar et al., 2015) que é diferente de processos de coquilhamento em molde metálico onde a solidificação rápida e mudanças microestruturais ocorre na totalidade do volume do material. Assim, o principal objetivo deste estudo foi investigar a microestrutura e as propriedades mecânicas do aço duplex 2205 por fusão a arco seguida de vazamento em molde metálico de Cu com diâmetros variáveis. Será avaliada a solidificação rápida e seus efeitos sob a resistência à compressão e de dureza.

2. METODOLOGIA

O material de partida foi uma barra cilíndrica de 36 mm de diâmetro de um aço duplex - UNS S31803- (2205) com composição química apresentada na Tab. 1. Após corte e limpeza da barra cilíndrica (Fig. 2a), lingotes cilíndricos escalonados (Fig. 2b) foram preparados em um forno de fusão a arco voltaico com atmosfera de argônio. O metal fundido em estado líquido foi vazado no interior do molde de cobre com forma cilíndrica escalonada. Após solidificação os lingotes cilíndricos foram retirados do forno e cortados em máquina de precisão, Buehler (IsoMet® 4000) com disco de SiC para obter amostras de 2, 4, 6, 8 e 10 mm de diâmetro.

Tabela 1 - Composição química (% em peso) do aço inoxidável 2205.

Elemento	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo	N	V	Fe
% peso	0,03	1,62	0,50	22,71	4,88	0,042	0,002	2,65	--	0,123	Bal.

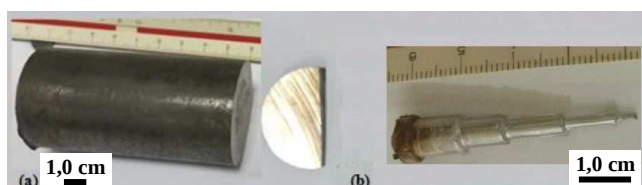


Figura 2. (a) Barra cilíndrica do aço duplex 2205, e, (b) Lingote cilíndrico escalonado após solidificação.

Após lixamento e polimento padronizado em equipamento Arotec (Arapol 2D), seguido de ataque químico em solução Murakami (2 g de ferrocianato de potássio, 2 g de NaOH diluídos em 40 ml de água) aquecida a 95 °C por um tempo de 20 segundos, foi realizada a caracterização microestrutural em microscópio ótico (Zeiss AxioCam ICc 5), microscopia ótica laser confocal (Olympus LEXT OLS4100) e microscopia eletrônica de varredura compacto (JEOL - JSM-6010) equipado com espectrometria de energia dispersiva. Também foi preparado amostras para difração de raios-X usando uma Bruker (D8-Focus) com radiação de Cu-K α , tensão de 40 kV e corrente de 40 mA na faixa angular de 35 a 80° (2 θ). A caracterização mecânica foi realizada por medidas de microdureza Vickers (Equilam - HSV-100) com carga de 1 kgf e tempo de impressão de 15 segundos. As medidas de dureza foram realizadas em seções transversais desde a borda até o centro da seção. Cada valor médio de dureza corresponde a um total de 6 medidas. Também, foram feitos ensaios de compressão (Instron 3369) a temperatura ambiente. O tamanho das amostras cilíndricas foi de 1,5 vezes o diâmetro das amostras de 2, 4, e 6 mm. A velocidade da travessa superior foi de 0,5 mm/min.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a preparação metalográfica e ataque químico de Murakami, por meio da caracterização realizada pela técnica de Microscopia Ótica (MO), na amostra como recebida foi observado que a microestrutura do aço duplex 2205, observado na Fig. 3, é constituída apenas por duas fases; austenita- γ , com contraste clara-amarelo, e ferrita- δ , com contraste escuro-marrom. As frações volumétricas foram de 64,1 % de ferrita e de 35,9% de austenita.

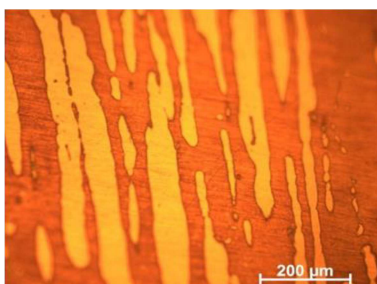


Figura 3. Imagem de MO mostrando a microestrutura da amostra como recebida do aço duplex 2205.

A Fig. 4a da amostra de 6 mm de diâmetro é uma macroestruturas típica do aço 2205 solidificado rapidamente em diferentes diâmetros. Em todos os diâmetros foi observada uma estrutura de grãos colunares na direção da extração de calor, entretanto, o tamanho de grão foi menor para taxas de resfriamento mais rápidas ocorridas nas amostras de menor diâmetro. O refinamento microestrutural é observado na Fig. 4b, onde o tamanho dos grãos colunares é menor em lingotes de diâmetro menor onde a taxa de resfriamento é maior que em lingotes de diâmetro maior. Uma ampliação dessas microestruturas com microscópio confocal de varredura a laser é observada nas Figs. 5a, 5b e 5c dos lingotes de 2, 4 e 6 mm de diâmetro, respectivamente. Observa-se que a estrutura solidificada é formada por grãos grosseiros tipo monofase com contornos de grão muito finos. Os contornos de grão são muito refinados e apresentam saliências em forma de agulhas. Segundo, Aaronson (1962) e Aguiar et al. (2015) os contornos de grão com morfologia intergranular tipo alotrimórfica e as saliências que crescem para o interior do grão com placas tipo Widmanstätten correspondem à fase austenita- γ . Já os grãos grosseiros correspondem à fase ferrita- δ . As mesmas estruturas são observadas na imagem MEV de elétrons secundários (Fig. 5d). Uma análise de espectrometria de energia dispersiva, EDS/MEV mostrou que os elementos Mo e Cr estão em maior teor na ferrita- δ que na austenita por serem estabilizantes da fase ferrita, tal como mostrado na Tab. 2. A presença das fases ferrita- δ e austenita- γ , também foi confirmada por análise de difração de raios-X, observada na Fig. 6, que é concordante com trabalhos da literatura (Aguiar et al., 2015). Além disso, se observa maior fração da fase austenita- γ , na amostra como recebida e nas amostras com diâmetro maior (4 e 6 mm) com menores taxas de resfriamento, quando comparado à amostra de 2 mm de diâmetro com maior taxa de resfriamento. Isso sugere que quando a fase líquida resfria bruscamente, a primeira fase sólida a se transformar é a ferrita- δ , e que é congelada até a temperatura ambiente. E à medida que a taxa de resfriamento é reduzida a fase austenita- γ se nucleia formando contornos de grão e se tem crescimento direto desde os contornos de grãos para dentro do grão da ferrita- δ .

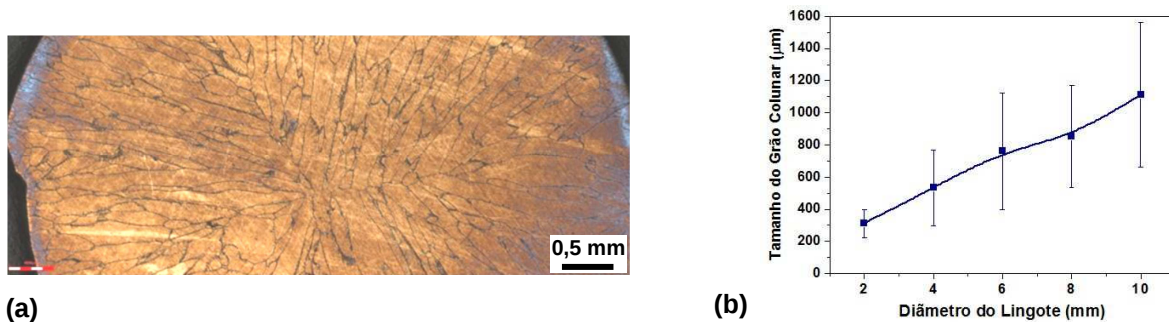


Figura 4. (a) Macroestrutura típica de microscópio confocal de varredura a laser de lingote com 6,0 mm de diâmetro do aço 2205, b) Tamanho do grão colunar em função do diâmetro dos lingotes cilíndricos.

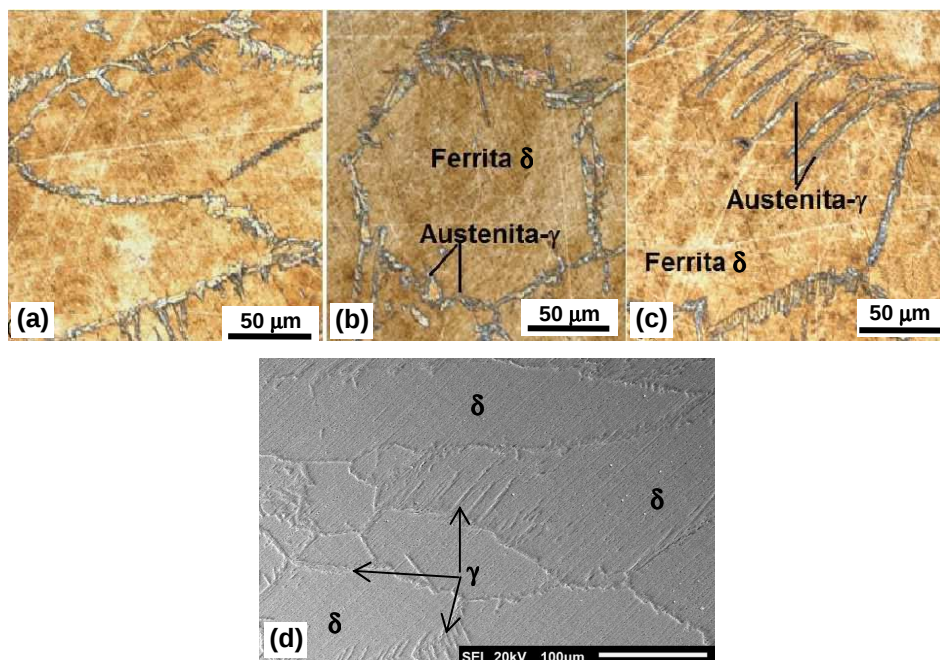


Figura 5. (a, b, c) Micrografias de microscópio confocal de varredura a laser de 2,0; 4,0 e 6,0 mm de diâmetro, respectivamente, (d) Micrografia típica MEV de 4,0 mm de diâmetro.

Tabela 2. Composição química por EDS/MEV das fases austenita e ferrita.

Fase	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
Austenita- γ	20,8 $\pm$ 2,1	3,1 $\pm$ 0,3	71,3 $\pm$ 3,3	4,8 $\pm$ 2,6	-
Ferrita- δ	23,2 $\pm$ 1,6	-	69,6 $\pm$ 1,0	3,1 $\pm$ 2,4	4,1 $\pm$ 1,0

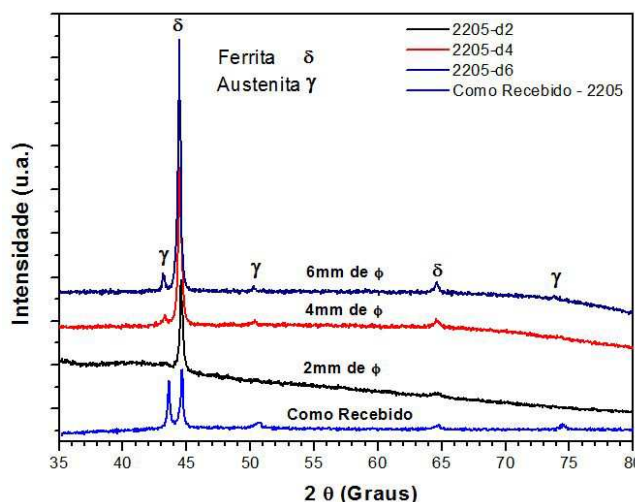


Figura 6. Difratograma de raios-X do aço duplex 2205 de amostra na condição como recebida e de amostras cilíndricas de diferentes diâmetros solidificadas rapidamente em molde de cobre cilíndrico.

Na Fig. 7a, se observa a microdureza Vickers para as amostras solidificadas em molde cilíndrico escalonado. Nota-se que entre as amostras solidificadas rapidamente, a amostra de 2 mm de diâmetro apresentou um maior refino microestrutural, exibindo o maior valor de dureza em torno de 290 HV. As amostras de maior diâmetro sofreram uma queda na dureza, sendo 270, 260 e ~255 HV para a amostra de 4, 6 e 10 mm de diâmetro. A dureza das amostras com 4 e 6 mm de diâmetro esta de acordo com zonas afetadas termicamente e zona fundida produzidas por soldagem com gás inerte com eletrodo de tungstênio (TIG) (Aguiar et al., 2015). Esses valores de dureza são ligeiramente superiores ao do material como recebido que foi de 244 HV. A melhoria na dureza se deve principalmente a diferenças nas taxas de resfriamento das amostras cilíndricas e ao refino microestrutural.

Na Fig. 7b, se observa as curvas tensão versus deformação compressiva. Observa-se que as amostras não apresentam um limite de resistência compressiva e podem ser deformadas inclusive acima de 50%. Entretanto, nota-se que a resistência ao escoamento para uma deformação de 0,2% sofreu variações, sendo de 398 MPa para a amostra como recebida e para as amostras solidificadas rapidamente se observou um melhoramento, sendo 513, 616 e 805 MPa, para as amostras cilíndricas de 6,0; 4,0 e 2,0 mm de diâmetro. O melhoramento nas propriedades mecânicas esta intimamente ligada à taxa de resfriamento sendo maior em amostras de menor diâmetro.

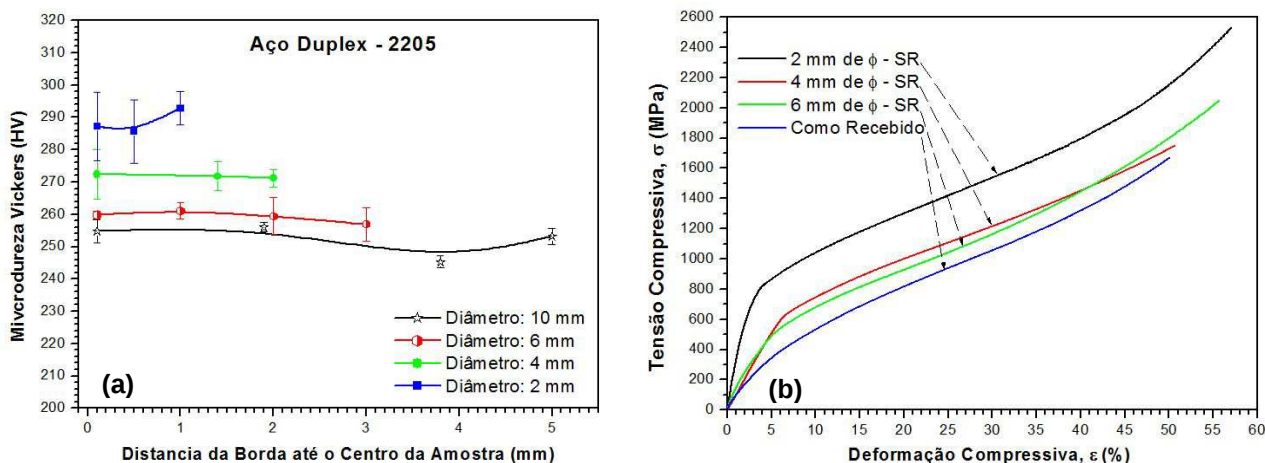


Figura 7. (a) Medidas de microdureza Vickers com carga de 1000 gf, e, (b) Curva tensão & deformação compressiva de amostras cilíndricas solidificadas em molde de cobre do aço duplex 2205.

4. CONCLUSÕES

O efeito da solidificação rápida na microestrutura e nas propriedades mecânicas do aço inoxidável duplex 2205 foi investigado. A microestrutura foi composta por grãos colunares de ferrita- δ com austenita- γ nucleada nos limites dos grãos, que se tornaram maiores com a diminuição da taxa de resfriamento à medida que se aumenta o diâmetro dos lingotes cilíndricos. Durante a solidificação, em altas temperaturas, ocorre transformação inicial para a fase ferrita- δ e em temperaturas mais baixas ocorre transformação de ferrita- δ para austenita- γ . Houve um melhoramento não significativo na microdureza nas amostras cilíndricas solidificadas rapidamente. Não entanto, a resistência ao escoamento compressivo foi melhorada em torno de 100, 50 e 30 % nas amostras de 2, 4 e 6 mm de diâmetro, respectivamente, quando comparado à amostra como recebida.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Central Multiusuário CEM-UFABC pela facilidade experimental e ajuda técnica.

6. REFERÊNCIAS

- Aaronson, H. I. 1962. The proeutectoid ferrite and the proeutectoid cementite reactions. Symposium decomposition of austenite by diffusion processes. Easton: [s.n.]. p. 387-548.
- Aguiar V. I., Escobar P. D., Santos B. D., Modenesi J. P., 2015. Microstructure characterization of a duplex stainless steel weld by electron backscattering diffraction and orientation imaging microscopy techniques, Revista Materia, v.20, p212-226.
- Cho, H., Lee, K., 2013. Effect of cold working and isothermal aging on the precipitation of sigma phase in 2205 duplex stainless steel. Materials Characterization, v.75, p. 29-34.
- Herrera C., de Lima N. B., Kliuga A. M., Padilha A. F., 2008. Microstructure and texture of duplex stainless steel after melt-spinning processing, Mater. Charact., v. 59, n. 1, p. 79-83.
- Lavernia J. E., T.S. Srivatsan S. T., 2010. The rapid solidification processing of materials: Science, principles, technology, advances, and applications J. Mater. Sci. v.45, p. 287-325.
- Lippold J. C., Kotechi D. J., 2005. Welding, metalurgy and weldability of Stainless Steels, Ohio; John Wiley & Sons Inc., 356p.
- Lo K. H., Shek C. H., Lai J. K. L., 2009. Recent Developments in Stainless Steels, Mat. Sc. Eng., R.65, p. 29-104.
- Sedriks, A.J., 1996. Corrosion of stainless steels. John Wiley, NY, 2 Ed. Cap. 1 e 2.
- Suryanarayana C., Inoue A., 2013. Iron-based bulk metallic glasses, Int. Mater. Rev., v.58, p. 131-166.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Microstructure and Mechanical Properties of Steel Duplex 2205 Solidified in Copper Mould

Carlos Triveño Rios¹

Guilherme Henrique de Lima¹

¹Engenharia de Materiais – CECS - Universidade Federal do ABC; Santo André - SP, Brasil
carlos.triveno@ufabc.edu.br, limaghp@gmail.com

Abstract. The objective of the present work was to study the effect the rapid solidification on the microstructure and mechanical properties of the duplex steel 2205. The steel was melted in an arc furnace with controlled atmosphere and casting in a copper cylindrical mould with varying diameters. The microstructural characterization was performed by optical microscopy, confocal laser scanning microscope, scanning electron microscopy and X-ray diffraction. The mechanical characterization was performed by Vickers microhardness measurements and by compression tests at room temperature. The solidified samples showed a predominance of columnar grains of ferrite- δ and low volume fraction of austenite- γ , formed at the grain boundaries and became larger with the decrease of the cooling rate. A significant improvement in the yield strength up to 100% was also observed when compared to the sample as received.

Keywords: Duplex steel 2205, Rapid solidification, Ferrite- δ .

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.