

EFEITO DOS GASES DE PROTEÇÃO NA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FERRITA DELTA EM JUNTAS SOLDADAS DE UM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO ATRAVÉS DO PROCESSO MIG/MAG*

André de Albuquerque Vicente¹
Débora Arruda Cabral²
Alexandre Bueno³
Hugo Hashimoto⁴
Dany Michell Andrade Centeno⁵
Jorge Alberto Soares Tenório⁶

Resumo

Foram estudadas as microestruturas de quatro juntas soldadas de aço inoxidável austenítico produzidas através do processo MIG/MAG com diferentes gases de proteção, dentro de um projeto que visava estudar o comportamento de juntas soldadas de aços inoxidáveis austeníticos a altas temperaturas. Utilizou-se o metal de adição 22.12.HT e diferentes gases de proteção: 100% Ar, Ar + 2% CO₂, Ar + 4% CO₂ e Ar + 20% CO₂. Para cada mistura gasosa, foi soldado um corpo de prova. Estudou-se a variação das frações volumétricas de ferrita delta em função dos diferentes gases de proteção utilizados. Observou-se aumento no teor de carbono e consequente diminuição das frações volumétricas de ferrita delta nos metais depositados com gases de proteção com maiores concentrações de CO₂, evidenciando-se que o carbono é um forte estabilizador da austenita nos aços inoxidáveis austeníticos.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis; Gases de proteção; Fração volumétrica; MIG/MAG.

EFFECT OF SHIELDING GAS IN THE VOLUMETRIC FRACTION OF DELTA FERRITE IN WELDED JOINTS OF AN AUSTENITIC STAINLESS STEEL THROUGH THE MIG-MAG PROCESS

Abstract

The microstructures of four welded joints of austenitic stainless steel produced by the MIG/MAG process with different shielding gases were studied within a project aimed at the behaviour of austenitic stainless steels welded joints at high temperatures. Were used the welding wire 22.12.HT, and different shielding gases: 100% Ar, Ar + 2% CO₂, Ar + 4% CO₂ and Ar + 20% CO₂. For each gas mixture was welded a specimen. The variation of the volume fractions of delta ferrite according to the different shielding gases used, were studied. There was an increase in carbon content and decreasing volume fraction of delta ferrite in weld metals deposited with shielding gases with higher concentrations of CO₂, indicating that carbon is a strong austenite stabilizer in austenitic stainless steels.

Keywords: Stainless steels; Shielding gases; Volume fraction; MIG/MAG.

¹ *Doutorando do Departamento de Engenharia Química da EPUSP.*

² *Engenheranda do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP.*

³ *Mestrando do Departamento de Engenharia Química da EPUSP.*

⁴ *Doutorando do Departamento de Engenharia Química da EPUSP.*

⁵ *Doutorando do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP.*

⁶ *Professor Titular do Departamento de Engenharia Química da EPUSP.*

1 INTRODUÇÃO

Além do ferro, cromo e níquel, os aços inoxidáveis têm em sua composição outros elementos químicos que podem estabilizar a ferrita e a austenita. Levando em conta os seus efeitos ferritizantes e austenitizantes, Schaeffler [1] agrupou estes elementos em duas expressões denominadas de cromo equivalente e níquel equivalente, respectivamente e propôs um diagrama que é apresentado na Figura 1. O diagrama de Schaeffler não é um diagrama de equilíbrio. Ele foi determinado experimentalmente com o objetivo de prever-se o teor de ferrita delta em soldas de aços inoxidáveis. Além das expressões de cromo equivalente ($C_{req} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb$) e de níquel equivalente ($N_{req} = \%Ni + 0,5\%Mn + 30\%C$) propostas por Schaeffler, foram sugeridas na literatura várias outras expressões incorporando outros elementos, utilizando outras condições de solidificação e diferentes composições químicas. [2-10]

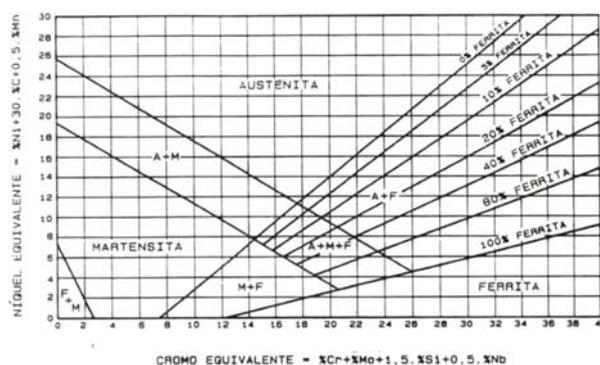


Figura 1 – Diagrama de Schaeffler [1]

A primeira alteração marcante foi feita por Delong [11], que inclui o efeito austenitizante do nitrogênio. Dependendo das condições de solidificação, os fatores para os elementos nas expressões de cromo e níquel podem variar bastante e alguns elementos que não influem nas expressões, dependendo do processo, podem ser importantes ao tratar-se de diferentes modos de solidificação.

Tomando-se como exemplo um aço inoxidável austenítico do tipo AISI 316, o qual solidifica através de uma solidificação ferrítica-austenítica, O. Hammar e U. Svensson [7] mostraram que a adição de carbono e nitrogênio no aço diminui a fração de ferrita δ primária até chegar ao ponto em que se formava austenita primária. Existe, portanto, um valor de carbono equivalente que pode mudar o modo de solidificação deste aço. A Figura 2 mostra a variação da fração de ferrita primária em função do carbono equivalente segundo a fórmula $C_{eq} = \%C + 0,65 \%N$ em peso.

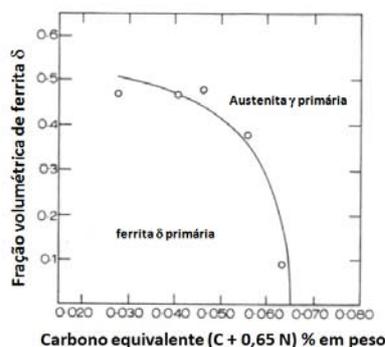


Figura 2- Fração de ferrita primária em função do C_{eq} [7]

Assim, O. Hammar e Svensson [7] propuseram uma nova relação para valores de cromo e níquel equivalentes colocando o efeito do nitrogênio e carbono para o níquel e o efeito do titânio para o cromo.

Afim de prever o modo de solidificação dos aços inoxidáveis através das expressões de cromo e níquel equivalentes propostas por O. Hammar e Svensson [7, 12], Suutala e Moio [13] rearranjaram os resultados obtidos em diversos trabalhos [6,8,14-18] com diferentes velocidades de solidificação. Quando a relação $C_{req}/Ni_{eq} < 1,5$ a solidificação poderá ser austenítica (modo I) ou austenítica-ferrítica (modo II). Quando a relação $1,5 < C_{req}/Ni_{eq} < 2,0$ a solidificação será ferrítica-austenítica (modo III). E, finalmente, quando $C_{req}/Ni_{eq} > 2,0$ a solidificação será ferrítica (modo IV).

A Tabela 1, abaixo, apresenta as expressões de cromo e níquel equivalentes sugeridas por diferentes pesquisadores [1,7,11-12,19-21]:

Tabela 1 – Expressões de cromo e níquel equivalentes sugeridas por diferentes pesquisadores [3]

Autor		Schaeffler	DeLong	Pryce e Andrews (1)	Giraldeng	Potak e Sagalevich apud Hull	Hull (2)	Hammar e Svensson
Condições		Soldagem	Soldagem a Quente	Laminados	Fundidos	Fundidos	Fundidos em Coquilha	Análises Térmicas
Fatores para Constantes dos Elementos Ferritizantes	Cr	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Mo	1,00	1,00	1,00	2,00	1,00	1,21	1,37
	Si	1,50	1,50	3,00	1,50	2,00	0,48	1,50
	Nb	0,50	0,50	4 Nb'	-	0,90	0,14	2,00
	Ti	-	-	10 Ti'	4,00	4,00	2,20	3,00
	W	-	-	-	-	0,50	0,72	-
	V	-	-	-	-	1,50	2,27	-
	Al	-	-	-	3,00	4,00	2,48	-
Fatores para Constantes dos Elementos Austenitizantes	Ta	-	-	-	-	-	0,21	-
	Ni	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Mn	0,50	0,50	0,50	-	0,50	Mn'	0,31
	C	30,00	30,00	21,00	30,00	27,00	24,50	22,00
	N	-	30,00	11,50	20,00	27,00	18,40	14,20
	Cu	-	-	0,44	-	0,33	0,44	1,00
Co	-	-	-	-	0,40	0,41	-	

$$1) Nb' = Nb - 8 [(C-0,03)+N]$$

$$Ti' = Ti - 4 [(C-0,03)+N]$$

$$2) Mn' = 0,11 Mn - 0,0086 Mn^2$$

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Processo de soldagem e preparação dos corpos de prova soldados:

Para a soldagem dos corpos de prova utilizou-se o processo MIG/MAG.

Foram utilizados o metal de adição 22.12.HT e diferentes concentrações de gases de proteção: 100% Ar, Ar + 2% CO₂, Ar + 4% CO₂ e 80% Ar + 20% CO₂. Para cada mistura gasosa, foi soldado um corpo de prova.

A Tabela 2 abaixo apresenta a composição química, fornecida pela fabricante, do metal de adição (22.12.HT) utilizado neste trabalho:

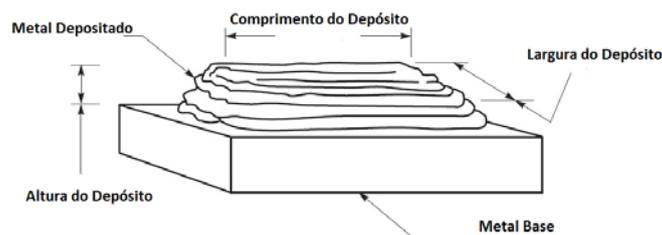
Tabela 2 - Composição química do metal de adição de soldagem [% em massa]

Grau	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Ce
22.12.HT	0,068	1,58	0,52	0,016	0,000	20,90	10,17	0,17	0,03

Ajustou-se o equipamento MIG/MAG de forma a permitir uma soldagem estável para os quatro gases de proteção.

Para reduzir a diluição, utilizou-se a deposição de passes sobrepostos depositando-se, aproximadamente, 25 mm de metal depositado sobre o metal base.

A Figura 3 descreve como os corpos de prova foram confeccionados:

**Figura 3 – Esquema da confecção dos corpos de prova soldados através de processo de soldagem MIG/MAG**

Para a confecção dos corpos de prova, utilizou-se como metal base chapas de aço inoxidável austenítico AISI 304L com 6 mm de espessura, cortadas nas dimensões 70 X 50 mm.

O dimensional dos corpos de prova conforme a Figura 3 foi:

- Comprimento do depósito: >50 mm
- Altura do depósito: >20 mm
- Largura do depósito: >30 mm
- Quantidade de camadas depositadas: > 5

Utilizou-se MIG/MAG convencional. A Tabela 3 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados na confecção dos corpos de prova soldados:

Tabela 3: Parâmetros de soldagem utilizados na confecção dos corpos de prova soldados

Corpo de Prova	Gás de Proteção	Vazão (l/min)	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem (mm/min)	Energia de Soldagem (kJ/mm)
CP1	Ar	20	204	26	240	1,33
CP2	Ar + 2% CO ₂	20	210	27	256	1,33
CP3	Ar + 4% CO ₂	20	212	26	253	1,31
CP4	Ar + 20% CO ₂	20	209	27	263	1,29

A Figura 4, apresenta os corpos de prova soldados:

**Figura 4 – Fotos dos CPs soldados. a) Vista superior b) Vista frontal.**

Os gases de proteção utilizados são:

CP1: 100% Ar, CP2: Ar + 2% CO₂, CP3: Ar + 4% CO₂ e CP4: Ar + 20% CO₂

2.2 Corte das amostras:

Inicialmente, os CPs soldados foram dissecados utilizando-se um “cut-off”. A Figura 5 abaixo mostra um CP soldado dissecado:

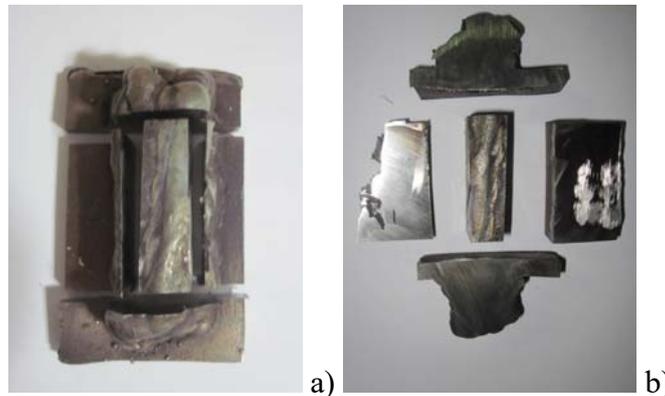


Figura 5 – Fotos de um CP soldado dissecado. Vista superior a) e Vista explodida b)

Para a análise metalográfica objetivou-se as regiões centrais dos CPs dissecados. A Figura 6, abaixo, ilustra a região alvo de um CP soldado para a retirada das amostras para a caracterização metalográfica:

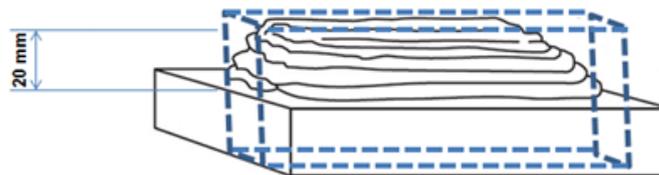


Figura 6 – Região alvo de um CP soldado para caracterização metalográfica

2.3 Preparação metalográfica das corpos de prova:

Empregou-se o lixamento manual convencional utilizando-se lixas d'água (180, 220, 320, 400 e 600 mesh) seguido de polimento com alumina até superfície especular. As amostras foram atacadas através de ataque eletrolítico com NaOH 20% com 6,5 V por 2,5 minutos.

2.4 Microscopia óptica e medição das frações volumétricas de ferrita:

Todas as amostras foram analisadas em um microscópio óptico com 100 X de aumento. Realizou-se a medição das frações volumétricas de ferrita e austenita em todos os corpos de prova sempre a 20 mm do metal base.

No intuito de quantificar as frações volumétricas de ferrita utilizou-se o software analisador de imagens “Image J”.

Analisou-se 10 micrografias de cada corpo de prova nos sentidos transversal e longitudinal conforme proposto pela norma ASTM E 562-02. [22]

2.5 Análises químicas:

Realizou-se as análises químicas em todos os corpos de prova sempre a 20 mm do metal base através de espectrômetro de emissão ótica, conforme a norma ASTM E 1086-08. [23]

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 7 apresenta os corpos de prova soldados dissecados indicando as regiões alvo das análises microestruturais na transversal e na longitudinal dos mesmos:

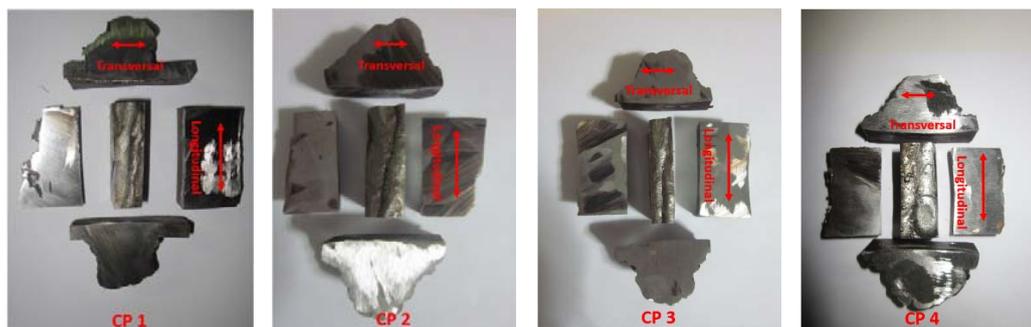


Figura 7 – Regiões alvo dos CPs soldados para as análises microestruturais na transversal e longitudinal

As Figura 8 e 9 apresentam micrografias obtidas a aproximadamente 20 mm do metal base nos sentidos transversal e longitudinal dos corpos de prova soldados, respectivamente.

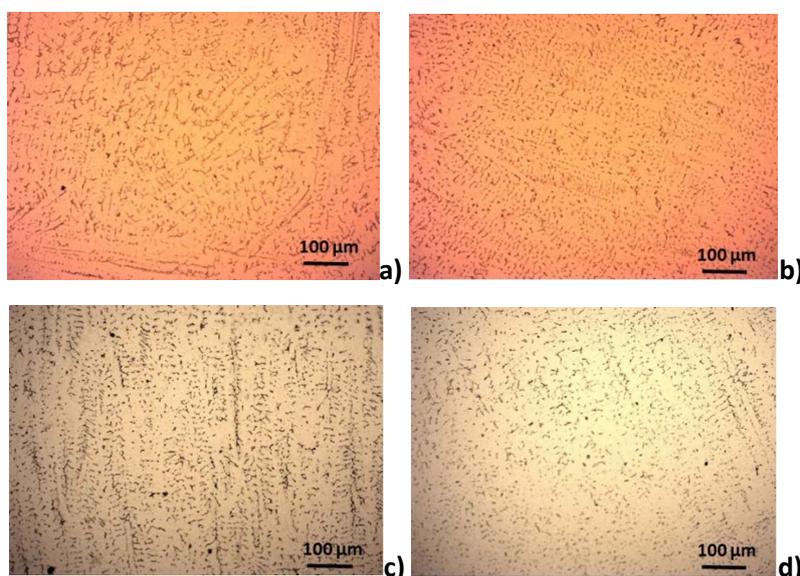


Figura 8 – Micrografias dos cortes transversais dos corpos de prova soldados.
a) CP1, b) CP2, c) CP3 e d) CP4 (ataque eletrolítico com NaOH 20% com 6,5 V por 2,5 minutos)

Conforme esperado, a análise metalográfica revelou microestrutura austenítico-ferrítica.

A análise metalográfica dos corpos de prova soldados revelou que o aumento da concentração de CO₂ nos gases de proteção diminui a fração volumétrica de ferrita δ no metal depositado.

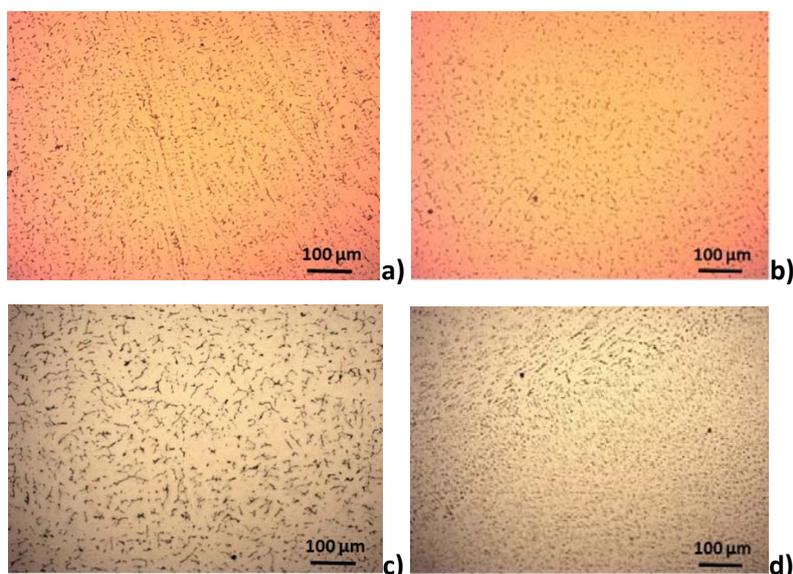


Figura 9 – Micrografias dos cortes longitudinais dos corpos de prova soldados. a) CP1, b) CP2, c) CP3 e d) CP4 (ataque eletrolítico com NaOH 20% com 6,5 V por 2,5 minutos)

A constatação é evidenciada na Tabela 4 que apresenta as frações volumétricas de ferrita δ dos corpos de prova soldados nos sentidos transversal e longitudinal.

Tabela 4 - Fração Volumétrica de Ferrita δ dos Corpos de Prova Soldados

Fração Volumétrica de Ferrita δ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
CP1 Transversal	8,0	7,6	7,7	7,3	6,4	9,4	8,2	10,1	8,9	10,3	8,4 +/- 1,2
CP1 Longitudinal	7,6	8,4	7,4	7,3	6,5	6,8	6,2	5,0	5,3	7,5	6,9 +/- 1,1
CP1 Média	7,6 +/- 1,4										
CP2 Transversal	7,3	7,9	8,5	7,3	8,4	8,7	10,8	7,0	6,5	7,5	8,0 +/- 1,1
CP2 Longitudinal	4,6	6,2	5,5	7,3	7,5	6,5	6,3	6,2	6,6	6,0	6,1 +/- 0,7
CP2 Média	7,1 +/- 1,3										
CP3 Transversal	6,7	5,8	6,0	7,3	4,8	5,3	7,5	6,5	7,4	8,2	6,3 +/- 1,2
CP3 Longitudinal	5,0	5,3	4,3	7,3	4,0	5,6	5,5	5,8	5,7	6,3	5,2 +/- 0,6
CP3 Média	6,0 +/- 1,1										
CP4 Transversal	4,4	4,3	3,7	7,3	2,7	3,3	4,1	3,8	3,1	3,3	3,6 +/- 0,5
CP4 Longitudinal	4,2	4,7	3,7	7,3	4,1	4,5	4,9	4,4	6,1	4,4	4,5 +/- 0,6
CP4 Média	4,4 +/- 1,2										

O resultado obtido sugere que o aumento da concentração de CO₂ nos gases de proteção aumenta o Ni_{eq} da liga através do aumento da concentração de C no metal depositado.

Utilizando-se as expressões propostas por DeLong para cromo e níquel equivalentes [11] é possível calcular as frações volumétricas de ferrita δ teóricas esperadas.

A Tabela 5 apresenta as composições químicas do metal de adição utilizado e dos corpos de prova soldados, bem como os valores de cromo e níquel equivalentes utilizando-se as expressões de DeLong [11] e os valores de carbono equivalente utilizando-se a expressão de O. Hammar e U. Svensson [7].

Tabela 5 - Composições químicas do metal de adição 22.12.HT e dos corpos de prova soldados [% em massa]

	C	Si	Mn	Cr	Ni	N	Ce	Cr _{eq}	Ni _{eq}	Cr/Ni	C _{eq}
22.12.HT	0,068	1,58	0,52	20,90	10,17	0,170	0,03	23,27	17,57	1,32	0,179
CP1	0,059	1,51	0,50	20,12	10,31	0,172	0,03	22,39	17,49	1,28	0,171
CP2	0,069	1,45	0,48	20,10	10,33	0,166	0,03	22,28	17,62	1,26	0,177
CP3	0,072	1,38	0,46	20,10	10,32	0,162	0,03	22,17	17,57	1,26	0,177
CP4	0,093	1,36	0,45	20,04	10,33	0,162	0,03	22,08	18,21	1,21	0,198

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb \quad [11]$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 0,5\%Mn + 30\%C + 30\%N \quad [11]$$

$$C_{eq} = \%C + 0,65\%N \quad [7]$$

4 CONCLUSÃO

O aumento da concentração de CO₂ nos gases de proteção aumenta o Ni_{eq} da liga através do aumento da concentração de C no metal depositado.

Os resultados obtidos sugerem que com aumento da concentração de CO₂ nos gases de proteção ocorra uma diminuição no Cr_{eq} das ligas devido à oxidação seletiva dos elementos Cr e Si.

O aumento da concentração de C diminui a fração volumétrica de ferrita δ no metal depositado.

Quando a relação Cr_{eq}/Ni_{eq} < 1,5 a solidificação poderá ser austenítica (modo I) ou austenítica-ferrítica (modo II). Todas as ligas estudadas apresentaram relação Cr_{eq}/Ni_{eq} < 1,5.

Os resultados obtidos sugerem que a solidificação das ligas estudadas seja austenítica-ferrítica (modo II).

Verifica-se que o aumento da concentração de CO₂ nos gases de proteção ocorre diminuição do Cr_{eq} e aumento do Ni_{eq}, resultando na diminuição da relação Cr_{eq}/Ni_{eq} das ligas.

Agradecimentos

Ao Prof. Manuel Saraiva Clara pelo apoio incondicional na elaboração da parte prática deste trabalho permitindo a utilização de todos os recursos da Soudage – Welding Experts, além das inúmeras discussões técnicas.

À SMT – Sandvik Materials Technology, representada pelo caro colega politécnico Fausto Camargo e pelo caro amigo Luiz Gobbis, por acreditar neste projeto e pela doação do metal base e do metal de adição bem como por sempre apoiar a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo quando existe o interesse em realizar-se estudos envolvendo ligas resistentes à corrosão.

À Prax Air representada pelos caros colegas Marcos Lobato e Jeferson Costa, por acreditar neste projeto e pela doação dos gases de proteção para a soldagem e do ar sintético para os ensaios de oxidação bem como por sempre apoiar a Escola

Politécnica da Universidade de São Paulo quando existe o interesse em realizar-se estudos envolvendo gases especiais.

REFERÊNCIAS

1. SCHAEFFLER, A. L.. Constitution diagram for stainless steel weld metal. Metal Progress, vol. 56, n.5, p. 680-680B, 1949.
2. PADILHA, A. F.. Algumas observações sobre o descobrimento e o desenvolvimento dos aços inoxidáveis. IN: 1º Seminário Brasileiro Sobre Aços Inoxidáveis, ABM, p. 3-15; 1989.
3. GAZIRE, R.C.. Efeito da Velocidade de Resfriamento na Microestrutura de solidificação de Aço Inoxidável Austenítico Tipo AISI 316L com Adições de Boro. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Metalúrgica, São Paulo, 1993.
4. KOU, S.. Welding Metallurgy. 2a ed., John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, EUA, p. 216-242, 2003.
5. COLOMBIER, L.; HOCHMANN, J..Stainless and Heat Resisting Steels. Edward Arnold Publisher, p 532-540, 1967.
6. FREDRIKSSON, H.. The Solidification Sequence in a 18-8 Stainless Steel, Investigated by Directional Solidification. Metallurgical Transactions, vol 3, p. 2989-2997, nov., 1972.
7. HAMMAR, O.; SVENSSON, U.. Influence of Steel Composition on Segregation and Microstructure During Solidification of Austenitic Stainless Steels. Solidification and Casting Metals, London, Metals Society, p. 401- 410, 1979.
8. SUUTALA, N.; TAKALO, T.; MOISIO, T.. Ferritic-Austenitic Solidification mode in Austenitic Stainless Welds. Metallurgical Transactions A, vol 11A, p. 717-725, 1980.
9. WOLYNEC, S.. Corrosão e Proteção. Apostila do Curso PMT-592, Escola Politécnica da USP, p. 4.8-4.9, 1994.
10. PADILHA, A. F., L.C. GUEDES.. Aços inoxidáveis austeníticos - Microestrutura e Propriedades..São Paulo, Ed. Hemus, p.147-162, 1994.
11. DeLONG, W. T.. A modified phase diagram for stainless steel weld metals. Metal Progress, p. 98-100B, 1960.
12. HAMMAR, O. ; SVENSSON, U.. IN: A Guide of solidification, Jernkontoret, Stockholm, p. 269, 1977.
13. SUUTALA, N.; MOISIO, T.. Use of chromium and nickel equivalents in considering solidification mode in austenitic stainless steel welds. Solidification and Casting Metals, London, The Metals Society, p. 310- 314, 1979.
14. SUUTALA, N.; TAKALO, T.; MOISIO, T.. The relationship between solidification and microstructure in austenitic-ferritic stainless steel welds. Metallurgical Transactions A, vol. 10A, p.512-514, 1979.
15. TAKALO, T.; SUUTALA, N.; MOISIO, T.. Austenitic solidification mode in austenitic stainless steel welds. Metallurgical Transactions A, vol. 10A, p. 1173-1181, 1979.
16. SUUTALA, N.; TAKALO, T.; MOISIO, T.. Single-phase ferritic solidification mode in austenitic-ferritic stainless steel welds. Metallurgical Transactions A, vol. 10A, p. 1183-1190, 1979.
17. BLANC, G.; TRICOT, R.. Solidification, ségrégation et homogénéisation des aciers inoxydables austénitiques contant de la ferrite delta. Mémoires Scientifiques Rev. Métallurg., vol. 11, p. 735-753, 1971.
18. FREDRIKSSON, H.. Transition from peritectic to eutectic reaction in iron-base alloys. In: Solidification and Casting of Metals, London, Metals Society, p. 131-138, 1979.
19. PRYCE, L.; ANDREWS, K. W.. Practical estimation of composition balance and ferrite content in stainless steels. Journal of the Iron and Steel Institut, p. 415-417, 1960.
20. GUIRALDENQ, P. Action alphasgène et gammagène des principaux elements d'addition dans le aciers inoxydables nickel-chrome derives du type 18-10. Mémoires Scientifiques Rev, Métallurg., vol.11, p.907-939, 1967.

21. HULL, F.C.. Delta ferrite and martensite formation in stainless steels. Welding Research Supplement, vol. 52, n. 5, p. 193s-203s, 1973.
22. ASTM E562-02: Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count, ASTM International, West Conshohocken, PA, EUA, 2002.
23. ASTM E1086-08: Standard Test Method for Optical Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Stainless Steel by the Point-to-Plane Excitation Technique, ASTM International, West Conshohocken, PA, EUA, 2008.