

ANÁLISE DOS EFEITOS DO AUMENTO DO APORTE TÉRMICO NA MICROESTRUTURA DA ZONA FUNDIDA EM SOLDAGEM ROBOTIZADA DE AÇO INOXIDÁVEL COM DIFERENTES METAIS DE ADIÇÃO¹

Thales Lucas Diniz de Avila²

Marina Spyer Las Casas³

Eduardo José Lima II⁴

Alexandre Queiroz Bracarense⁵

Resumo

O objetivo desse trabalho foi à avaliação da influência do aporte térmico na formação de ferrita na zona fundida de soldas de aço inoxidável austenítico. O aço inoxidável austenítico AISI 304 é o aço inoxidável mais utilizado no mundo e foi o escolhido para os experimentos. Como consumível foram utilizados os arames AWS ER308LSi e ER309L para avaliar a influência dos componentes químicos na formação da ferrita. Outra variável foi o aporte térmico e sua influência no ciclo térmico e conseqüentemente na formação da ferrita. Os resultados apontaram uma tendência ao aumento da concentração de ferrita com o aumento do aporte térmico até certos níveis de energia de soldagem e a diminuição após esses níveis. A conclusão do estudo foi que o ciclo térmico influencia de formas diferentes em faixas de valores de aporte térmico diferentes.

Palavras-chave: Aço inoxidável; Soldagem robotizada; Ferrita; Aporte térmico.

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF THE INCREASE IN THE HEAT INPUT ON MICROSTRUCTURE OF MOLTEN ZONE ON ROBOTIC WELDING OF STAINLESS STEEL WITH DIFFERENT ADDITION METALS

Abstract

The aim of this study was to evaluate the influence of the heat input in the formation of ferrite in the weld zone of austenitic stainless steel welds. The austenitic stainless steel AISI 304 is the most used in the world and was chosen for the experiments. Consumable wires AWS ER308LSi ER309L were used to evaluate the influence of the chemical components in the formation of ferrite. Another variable was the heat input and influence on the thermal cycle and consequently in the formation of ferrite. The results showed a tendency to increase the concentration of ferrite with increasing of the heat input to certain welding energy levels and decreased after these levels. The study concluded that the thermal cycle influences differently in ranges of values for different heat input.

Key words: Stainless steel; Robotic welding; Ferrite; Heat input.

¹ Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Graduando em Engenharia Mecânica. Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Mestranda em Engenharia Mecânica. Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Doutor em Engenharia Mecânica. Professor. Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil.

⁵ PhD. Professor Titular. Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis austeníticos representam cerca de 65% a 70% do total de aços inoxidáveis produzidos.⁽¹⁾ A Liga AISI 304 foi a mais produzida nos Estados Unidos por vários anos excedendo a soma de aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos produzidos. O aço inoxidável austenítico é o mais utilizado se comparado a outros aços inoxidáveis, pois é o material de melhor soldabilidade e resistência à corrosão, além de boa resistência mecânica.⁽²⁾

O aço inoxidável austenítico possui estrutura cúbica de face centrada (CFC), sendo chamado de austenítico por possuir austenita na fase sólida. O teor de Cromo e Níquel em sua composição varia respectivamente de 16% a 26% e 6 a 22%, sendo a mesma balanceada, dentre outros fatores, de forma a minimizar a formação de ferrita, a qual acima de 10% em volume tende a reduzir a ductilidade, tenacidade e resistência à corrosão do material. Por outro lado, pouca ferrita (menos que 5% em volume) aumenta a tendência à formação de trincas de solidificação no metal de solda.⁽³⁾

Os processos de soldagem a arco alcançam temperaturas de 2000 a 20.000°C⁽⁴⁾. Como o aquecimento é concentrado em uma pequena área e por um curto período de tempo, o resfriamento é rápido, o que leva a zona fundida a possuir características próprias. Segundo Marques, Modenesi e Bracarense⁽⁴⁾ os parâmetros que influenciam no ciclo térmico de soldagem são: tipo de metal de base, geometria da junta, espessura da junta, aporte térmico líquido e temperatura inicial da peça.

O aço inoxidável AISI 304 se comparado a aços carbono comum possuem menor condutividade térmica e por isso demoram mais para resfriar, possuindo uma tendência ao empenamento além de manter a poça de fusão em temperaturas altas por mais tempo. Nesse artigo foram utilizadas apenas chapas finas, dificultando assim a propagação do calor, pois há apenas duas direções de propagação do mesmo. Segundo Wainer, Brandi e Mello,⁽⁵⁾ nessa condição não há fluxo de calor na direção da espessura da chapa, ou seja, o fluxo é bidimensional.

Segundo Modenesi,⁽¹⁾ durante o resfriamento as fases austenita e ferrita buscam o campo da estabilidade e dessa forma a tendência é a transformação de ferrita em austenita. Porém isso ocorreria caso o aço se mantivesse em altas temperaturas durante um longo intervalo de tempo, situação que ocorre no processo utilizado com os parâmetros utilizados.

Dessa forma, um dos parâmetros de soldagem que mais interfere na taxa de resfriamento é o aporte térmico. Com o aumento desse parâmetro a energia fornecida à solda aumenta e a velocidade de resfriamento diminui, influenciando diretamente na proporção entre as fases ferrita e austenita na zona fundida.

Outro fator que influencia na ocorrência de ferrita é a composição química. Os elementos de liga afetam as relações de equilíbrio entre as fases ferrita e austenita, sendo que alguns promovem a estabilização da austenita e outros da ferrita. O Cromo, Molibdênio, Silício, Nióbio, Titânio, Alumínio, Vanádio e o Tungstênio são formadores de ferrita e o Níquel, Manganês, Carbono, Nitrogênio, Cobre e o Cobalto são formadores de austenita.⁽⁶⁾ O efeito relativo na formação de uma fase ou outra é, em geral, expresso em termos de equivalência de Cromo e Níquel. A microestrutura da zona fundida pode ser analisada observando o corte do sistema Fe-Cr-Ni para 70% de ferro, conforme Figura 1.

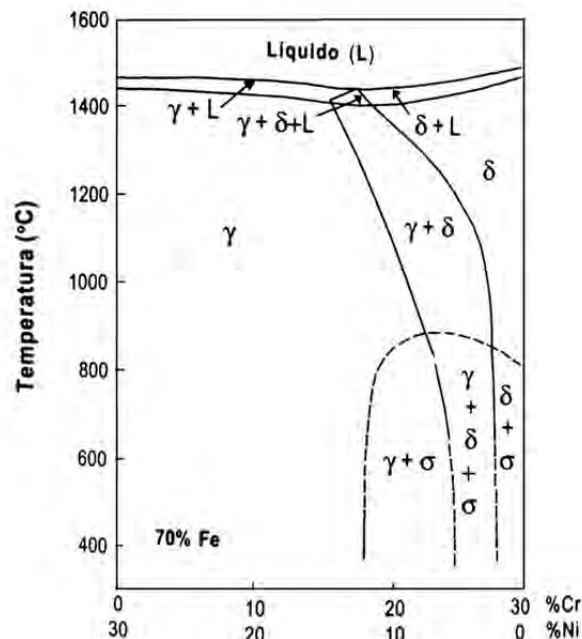


Figura 1. Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni para um teor de ferro de 70%.⁽¹⁾

Segundo o diagrama, o metal líquido pode se solidificar de várias formas dependendo da relação Cr/Ni. Segundo Brooks, Thompson e Williams,⁽⁷⁾ para valores dessa relação superiores a 1,95 o material se solidifica totalmente em ferrita. No caso do metal de base AISI 304 a relação Cr/Ni é igual a 2, sendo sua solidificação iniciada em ferrita.

A soldagem é o processo de união mais utilizado na indústria e devido a necessidade de diminuição dos custos e aumento da produtividade e qualidade a soldagem robotizada é implantada, com objetivo de eliminar a variável “erro humano”. Outro fator que contribui para o aumento da soldagem robotizada é a evolução dos processos de soldagem necessitando maior controle do processo propiciado por esse processo.

Porém, o uso de novas tecnologias como a robotização deve ser alinhada a automação e controle do processo. Nessa vertente vem sendo desenvolvido métodos para a programação de robôs de acordo com características desejáveis da solda. Um exemplo são as redes neurais, que através de dados de treinamento o sistema percebe as influências e através de dados de entrada, como geometria e porcentagem de ferrita, gera os dados de saída, como por exemplo, corrente e tensão de soldagem.⁽⁸⁾

No estudo da geometria do cordão, um parâmetro importante para a análise da porcentagem de ferrita na zona fundida é a diluição, que, em conjunto com o metal de adição, determina a composição química final da solda. Representada na Figura 2, a diluição é a relação entre a área da zona fundida que pertence à chapa (A2) e a área total da zona fundida (A1 + A2) sendo essa influenciada pelo aporte térmico, com o aumento do mesmo é esperado o aumento da diluição.

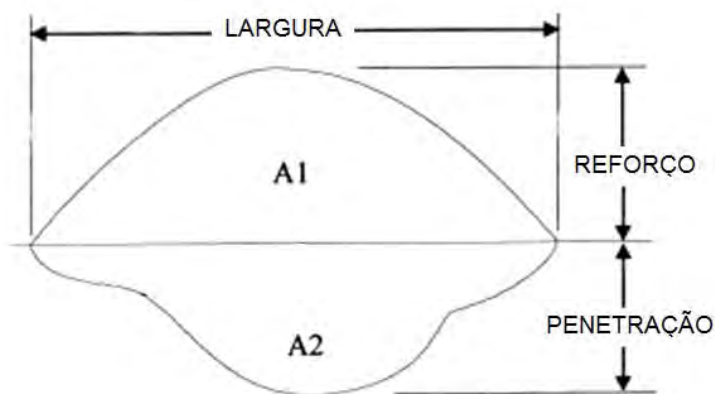


Figura 2. Parâmetros geométricos do cordão de solda.⁽⁸⁾

O aumento da tensão tende a achatar o cordão e aumentar a largura da zona de fusão. A redução da tensão torna os cordões de solda mais estreitos, com um maior reforço e maior penetração.⁽⁹⁾

Este artigo tem como objetivo avaliar a influência do aporte térmico e por consequência da taxa de resfriamento na formação de ferrita, na zona fundida. Posteriormente, em outro trabalho estes dados irão alimentar uma rede neural para estendê-los para outros aços inoxidáveis e aplicações com robô.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os corpos de prova foram preparados cortando-se as chapas de aço inoxidável austenítico AISI 304 de 6 mm de espessura em chapas menores de 150 x 250 mm utilizando o corte a plasma. Os consumíveis utilizados foram os arames sólidos AWS ER308LSi e AWS ER309L ambos com 1,2 mm de diâmetro. A Tabela 1 apresenta a composição química dos consumíveis da soldagem segundo o fabricante, enquanto a Tabela 2 apresenta a análise química real do metal de base em questão segundo o fabricante.

Tabela 1. Composição química dos consumíveis segundo fabricante

Classificação AWS dos ARAMES	Composição, %P*					
	*Valores sozinhos são as porcentagens máximas					
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
ER308LSi	0,025	20,0	10,5	-	1,8	0,9
ER309L	0,025	23,5	13,5	-	1,8	0,9

Fonte: Catálogo Consumíveis de Soldagem Sandvik.

Tabela 2. Análise química do metal de base - Aço inoxidável AISI 304

Composição, %P*									
C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	N	Cu
0,24	18,21	8,01	0,096	1,35	0,55	0,034	-	-	0,0778

Fonte: Relatório fornecido pela Arcelor Mittal

As soldas foram realizadas por um robô industrial modelo SK-6 do fabricante Motoman. O robô foi utilizado como forma de garantir a repetibilidade do processo e eliminar a influência do componente humano durante a soldagem, além de manter constantes parâmetros como distância bico de contato peça, ângulo de soldagem,

velocidade de soldagem e vazão de gás. O robô em questão é alimentado por uma fonte de soldagem tipo retificadora de tensão constante do mesmo fabricante e as soldas foram realizadas pelo processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). Todos os cordões foram realizados na posição plana e puxando a poça, visando maior penetração, menos respingo e arco mais estável. Os parâmetros de soldagem utilizados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem

Parâmetros de Soldagem	
Corrente (A)	100 a 212
Tensão (V)	15 a 23
Aporte Térmico (kJ/mm)	0,19 a 0,57
Velocidade de Soldagem (cm/min)	50
Gás de Proteção	Agamix12 - Argônio com 8% CO ₂ *
Vazão do gás (L/min)	15
Distância Bico de Contato – Peça (mm)	18
Ângulo de Solda (°)	75

* - sugestão do fabricante

Os parâmetros corrente e tensão foram variados dentro dos limites apresentados com o objetivo de variar o aporte térmico. Foram soldados três cordões de cada vez, por exemplo, na chapa 1 os cordões 1,3 e 5 foram realizados em sequência. Esses cordões possuem espaçamento suficiente para que o calor da soldagem de um cordão não influenciasse na temperatura inicial dos demais cordões. Depois de aguardar o resfriamento da chapa foram realizado outros três cordões na mesma chapa no espaço deixado, cordões 2, 4 e 6. As chapas foram fixadas na mesa de trabalho do robô através de grampos, para que a deformação da chapa não influenciasse a distância entre o bico de contato e a peça. A Figura 3 demonstra o esquema utilizado.

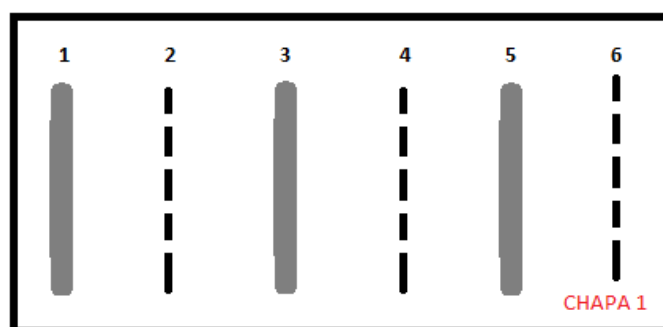


Figura 3. Desenho esquemático dos cordões na chapa

Dessa forma foram realizados 52 cordões sendo 23 utilizando consumível AWS ER308LSi e 29 AWS ER309L. A princípio o objetivo era realizar 30 cordões de cada consumível, porém algumas amostras foram descartadas por não apresentarem características visuais de acabamento satisfatórias, ou por erro de programação e operação.

Para a caracterização da geometria do cordão foi realizada metalografia em todos os cordões, sendo retirada uma amostra da região central, a qual em seguida foi embutida em baquelite e lixada com as lixas 80 a 1200 mesh. Depois foi realizado um ataque químico por imersão de 8 segundos em Behara II. As imagens obtidas foram analisadas no software Quantikov⁽¹⁰⁾ e com a relação entre as áreas

determinou-se a diluição de cada amostra. Cada medida foi realizada 3 vezes e a medida final é proveniente da média entre elas. A Figura 4 mostra algumas metalografias realizadas.



Figura 4. Exemplos de metalografias realizadas.

A quantidade de ferrita foi obtida por um ferritometro (*feritscope*) que se baseia na diferença de comportamento, frente a um campo magnético apresentado pela ferrita (ferromagnético) e a austenita (paramagnético). Assim o material que é constituído por ferrita e austenita apresenta uma resposta ao campo magnético proporcional a seus constituintes. Este método de medida utilizando essas características magnéticas foi homologado com parâmetros de calibração em 1974 pela Welding Resource Council e publicada pela America Welding Society como a norma A4.2 em 1985.⁽¹⁾

Os resultados desse método são expressos na porcentagem de ferrita do volume total da área mensurada. A Figura 5 demonstra o aparelho utilizado nos experimentos desse artigo.



Figura 5. Ferritometro (*Feritscope*).

Foram realizadas 15 medidas ao longo de cada cordão obedecendo uma distância de 10 mm das extremidades dos cordões. O próprio aparelho fornece a porcentagem de ferrita e o desvio padrão das medidas, que foi desconsiderado pois não interferia na formação dos gráficos, uma vez que foram inferiores a 0,5%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com intuito de melhor entender a influência da variação do aporte térmico e como consequência da diluição na formação de ferrita, os valores obtidos de diluição, porcentagem de ferrita e aporte térmico foram plotados em gráficos. Assim

obtiveram-se os gráficos de porcentagem de ferrita por aporte térmico (Figura 6), e porcentagem de ferrita por diluição (Figura 7).

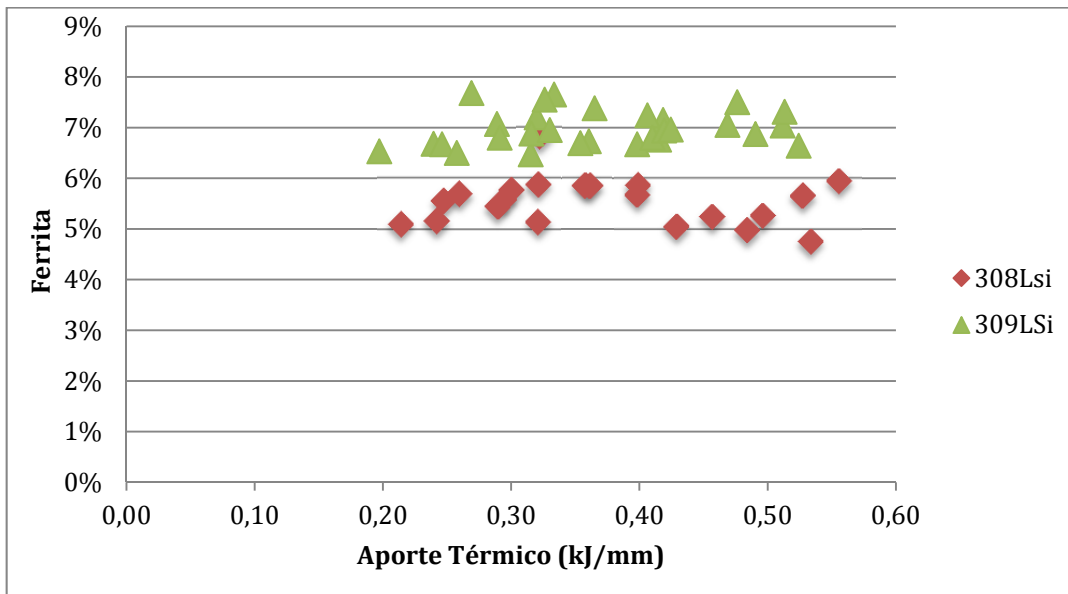


Figura 6. Representação gráfica da porcentagem de ferrita por aporte térmico.

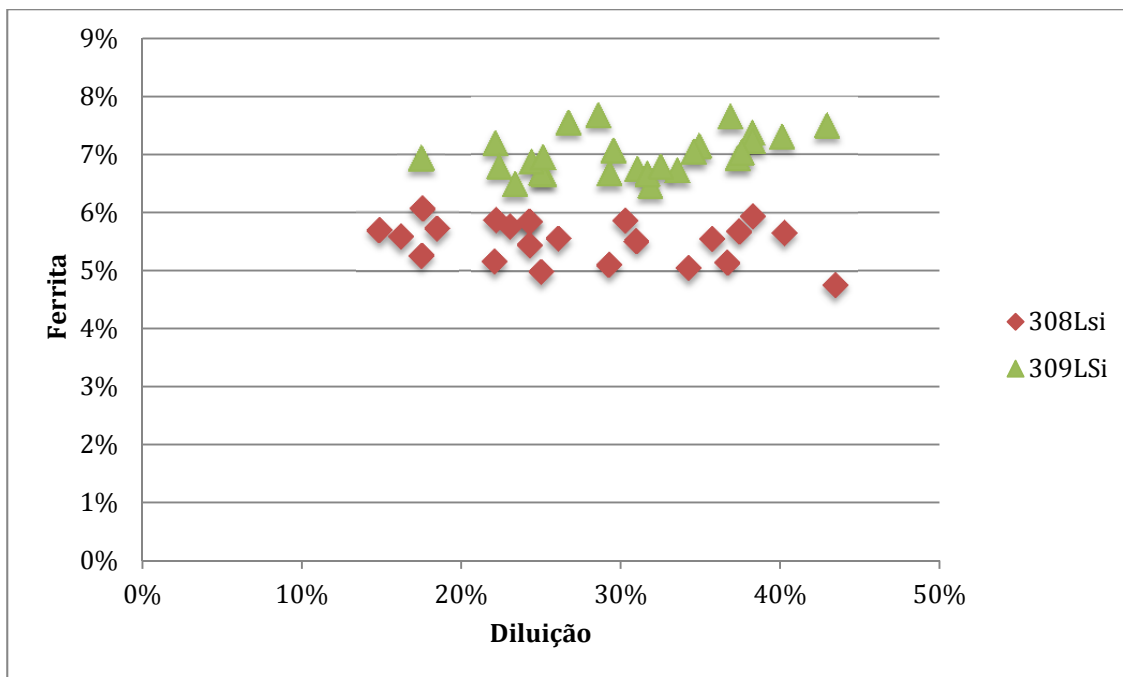


Figura 7. Representação gráfica porcentagem de ferrita por diluição.

Com o aumento do aporte térmico ocorre o aumento da energia fornecida à solda. Como o material possui baixa condutividade térmica, a zona fundida permanece por um tempo considerável em alta temperatura, sendo assim com o aumento do aporte térmico é esperado uma diminuição dos níveis de ferrita. Porém essa influência é limitada, pois para aportes térmicos menores a chapa fica menos tempo em altas temperaturas do que para altos aportes térmicos. Sendo esse tempo determinante para a formação de ferrita, esse fenômeno é observado para ambos os consumíveis. Em torno de 0,4kJ/mm a tendência de aumento pára e ocorre a diminuição dos níveis de ferrita.

Considerando o aumento da diluição em função do aporte térmico é esperada a diminuição dos níveis de ferrita, uma vez que segundo a Tabela 4, o Cromo equivalente do metal de base é menor que dos metais de adição.

Tabela 4. Cromo e Níquel Equivalente dos Materiais Utilizados

		ER 308LSi	ER 309L	AISI 304
Schaeffler ⁽¹²⁾	$Ni_{eq} = Ni + 30C + 0.5Mn$	12,15	15,15	12,9
	$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb$	21,35	24,85	19,1

Dessa forma, se for plotado os dados no Diagrama de Schaeffler da Figura 8 essa proposição se comprova.

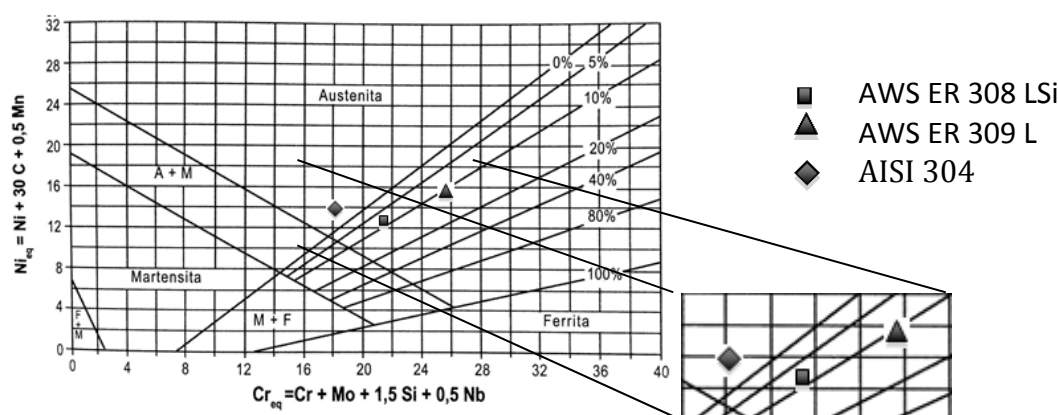


Figura 8. Pontos dos metais utilizados plotados no Diagrama de Schaeffler.⁽¹¹⁾

Traçando uma linha do Metal de Base, losango, a cada um dos consumíveis, 308, quadrado e 309, triângulo, o ponto que representa a diluição se desloca ao longo da linha e com seu aumento sai do metal de adição em direção ao metal de base. Dessa forma, o ponto do arame 309 que para a diluição igual à zero está sobre a indicação de 10% de ferrita, para 100% de diluição estaria na região de austenita. Já o arame 308 que estaria para diluição igual à zero também em 10%, também iria para região de austenita, uma vez que o metal de base é o mesmo. Essa diminuição pode ser observada em ambos os consumíveis na Figura 6 para valores de aporte térmico maiores que 0,4kJ/mm.

Observando a Figura 7 é possível observar que a tendência é de aumento dos níveis de ferrita para o consumível 309 e diminuição para o 308 ao longo de todos os testes. Com o aumento da diluição ocorre um maior mistura dos componentes químicos do metal de base e do metal de adição. Como o metal de base tem menor quantidade de elementos de liga que os consumíveis, com o aumento da diluição é esperada a diminuição dos elementos de liga na zona fundida. No arame ER308LSi ocorre a diminuição dos níveis de Cromo e dessa forma a diminuição dos níveis de ferrita. Na Figura 7 para as amostras desse arame o ponto com maior diluição, 43,38%, possui os menores níveis de ferrita, 4,77%. No arame ER309L os níveis mais baixos de ferrita, 6,47%, foram observados para uma diluição de 31,81% que não é a maior encontrada.

5 CONCLUSÃO

Os principais fatores que influenciam a formação de ferrita na zona fundida de soldas em aços inoxidáveis austeníticos são o ciclo térmico de soldagem e a composição química dos metais envolvidos. O ciclo térmico age de duas formas, primeiro aumentando os níveis de ferrita e após certos valores de aporte térmico diminuindo. A composição química age durante toda a evolução dos valores de aporte térmico, mas tem seu efeito pronunciado, apenas quando somado ao efeito gerado pelo aporte térmico de diminuição da ferrita.

Agradecimentos

Agradecemos ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, especialmente o Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação e ao professor Paulo J. Modenesi, pela oportunidade de contribuir para a ciência.

REFERÊNCIAS

- 1 MODENESI, P. J. Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis. *SENAI-SP*. Osasco, 2001.
- 2 ANSELMO, N. et al. Corrosion behavior of supermartensitic stainless steel in aerated and CO₂-Saturated synthetic seawater. *Materials Science and Engineering A*. v.428, p. 7379, 2006
- 3 KOU, S. *Welding Metallurgy*. John Wiley & Sons, Hoboken, 2003.
- 4 MARQUES, P. V. MODENESI, P. J. BRACARENSE, A. Q. Soldagem - Fundamentos e Tecnologia. *Ed UFMG*. Belo Horizonte, 2011.
- 5 WAINER, E. BRANDI, S. D. MELLO, F. D. H. Soldagem - Processos e Metalurgia. *Edgard Blucher Ltda*. São Paulo, 1992.
- 6 LIPPOLD, J. KOTECKI, D. *Welding Metallurgy and Weldability os Stainless Steels*. Wiley-Interscience. New Jersey, 2005.
- 7 BROOKS, J. A. THOMPSON, A. W. WILIANS, J. C. 'Microstructural development and solidification cracking susceptibility of austenitic stainless steel welds'. *International Material Reviews*, 36(1), 1991, p. 16-44.
- 8 CHAN, B. PACEY, J. BIBBY, M. Modelling gas metal arc weld geometry using artificial neural network technology. *Canadian Metallurgical Quarterly*. n.1, p.43-51, 1999, Vol. V.38.
- 9 AWS. *Welding Handbook: Welding Processes*. Miami : R. L. O'Brien, 1997. Vol.2.
- 10 PINTO, L., *Quantikov: um analisador microestrutural para ambiente Windows*, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1996.
- 11 Schaeffler, A.L. Constitution diagram for stainless steel weld metal. *Metal Progress* 56(11):680 - 680B, 1949.