

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA VARIAÇÃO DO APORTE TÉRMICO SOBRE A MORFOLOGIA DA ESTRUTURA MACRO-MICRO DO METAL DE SOLDA UTILIZANDO O PROCESSO GTAW AUTÓGENO DO AÇO AISI304

*

*Rudineli Demarque¹
Ellem Patricia dos Santos²
Anderson Vergilio Queiroz³
Leonardo Martins da Siva⁴
José Adilson de Castro⁵
Carlos Roberto Xavier⁶
Rafaela dos Santos Silva⁷*

Resumo

Este artigo apresenta um estudo das características metalúrgicas, geométricas e microestruturais da soldagem TIG autógena aplicada em chapas de um aço AISI 304, o processo autógeno tipo cordão sobre chapa foi utilizado com a finalidade avaliar o comportamento deste aço quando submetido a ciclos térmicos distintos. A soldagem foi automatizada, na posição plana, e realizada com controle de velocidade com a finalidade de regular a energia adicionada ao material soldado. As variáveis de entrada foram a velocidade da tocha de soldagem TIG, e a corrente setada na máquina de solda. Foram avaliados os efeitos da variação da energia de soldagem sobre as características metalúrgicas do processo, sobre as características geométricas (penetração e largura) do cordão se solda, microestrutura, espaçamento dendrítico e microdureza da seção transversal da junta soldada. Os resultados indicaram uma forte influência sobre a geometria da junta soldadas, aumento de 28,5% na largura, 59,6% na profundidade e 44,6% na área, além de alterações microestruturais, aumento de 100% na quantidade de ferrita δ , 12% na microdureza e 51,69% no espaçamento das dendritas no metal de solda, Além disso observaram-se ausência de defeitos nos passes isolados sobre as chapas.

Palavras-chave: Ferrita δ , espaçamento dendrítico, Aços Inoxidáveis Austeníticos; Soldabilidade.

EVALUATION OF THE EFFECTS OF THE VARIATION OF THERMAL ENERGY ON THE MORPHOLOGY OF THE MACRO-MICRO STRUCTURE OF THE WELD METAL USING THE PROCESS AUTOGENOUS OF GTAW FOR STEEL AISI304

Abstract

This work presents a study of the metallurgical, geometric and microstructural characteristics of the TIG welding applied in AISI 304 steel plates, using the autogenous process of cord type on sheet with the objective of evaluating the behavior of this steel when submitted to different thermal cycles. The welding was automated, in the flat position, and performed with speed control to regulate the energy added to the welded material. The input variables were the speed of the welding torch TIG and the current set in the welding machine. The effects of the weld energy variation on the metallurgical characteristics of the process on the geometric

characteristics (penetration and width) of the weld bead, microstructure, dendritic spacing and microhardness of the weld cross section were evaluated. The results indicated a strong influence on the weld joint geometry, increase of 28,5% in width, 59,6% in depth and 44,6% in the area, besides microstructural changes, increase of 100% in the amount of ferrite δ , 12% in the microhardness and 51,9% in the spacing of the dendrites in the weld metal. In addition, there were no defects in the isolated passages on the plates.

Keywords: Ferrite δ ; Dendritic spacing; Austenitic Stainless Steels; Weldability.

- ¹ Engenharia metalúrgica, Mestre, Doutorando, PPGEM, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.
- ² Engenharia metalúrgica, Engenheira, Mestranda, PPGEM, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.
- ³ Matemática, Mestre, Doutorando, PPGEM, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.
- ⁴ Química, Doutor, Pós- Doutorando, PPGEM, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.
- ⁵ Engenharia metalúrgica, Ph.D., Professor, PPGEM, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.
- ⁶ Engenharia metalúrgica, Doutor, Engenheiro, Petrobrás, UNIFOA, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.
- ⁷ Engenharia metalúrgica, Graduanda, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil..

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis austeníticos por apresentarem propriedades atrativas como resistência à corrosão, ductilidade, tenacidade, soldabilidade e resistência mecânica em temperaturas elevadas segundo Mondenesi [1], são muito utilizados em componentes de reator em indústrias nucleares além de indústria química, petroquímica, farmacêutica, alimentícia e de biotecnologia. Como são aplicações de alta responsabilidade é fundamental importância constantes estudos e pesquisas do material em condições extremas.

Com a expansão de setores como o petroquímico buscando fontes de energia alternativa, a soldagem em aço inoxidável como AISI304, foco deste estudo, foi impulsionada. Alguns estudos têm sido realizados quanto à estrutura obtida com a soldagem de aços inoxidáveis. Rodrigues [2] avaliou a ocorrência da contração mecânica do arco na soldagem A-TIG de aços inoxidáveis austeníticos. Ronqueti [3] estudou o efeito do modo de transferência metálica sobre o comportamento térmico e as transformações metalúrgicas na soldagem GMAW dos aços austeníticos aisi 304 e 316 utilizados em projetos de instalações nucleares. Morelos [4] estudou a melhoria da resistência à corrosão localizada das juntas de aço inoxidável duplex AISI 2205 soldadas por GMAW sob interação eletromagnética de baixa intensidade. Rentería [5] estudou o efeito da interação eletromagnética durante a soldagem do aço inoxidável duplex AISI2205 na resistência a corrosão. Qin [6] avaliou a sensibilidade das forças motrizes sobre o comportamento e defeito na formação da poça de fusão na soldagem TIG de alta velocidade.

Uma revisão dos estudos existentes mostra que a maioria das investigações centrou-se na evolução morfológica da dendrita para diferentes condições de solidificação na região local do metal de solda utilizando um modelo numérico. Alguns estudos também simularam os grãos na estrutura da solda. Contudo, a investigação utilizando resultados experimentais da evolução morfológica das diversas estruturas de solidificação em toda seção transversal da solda aliada a um modelo numérico que simule o ciclo térmico sofrido pelo material soldado não foi relatado, e uma relação entre os parâmetros de soldagem e a solidificação real da solda baseada no ciclo térmico sofrido não foi estabelecida. Para revelar claramente o mecanismo de formação de diferentes estruturas de solidificação da solda, é necessário avaliar as estruturas resultantes de no mínimo três faixas de aportes, simular o comportamento de transferência de calor no componente soldado para os três aportes utilizados e assim definir as tendências.

Este artigo objetiva realizar uma avaliação das transformações de fases, morfologias macro e micro, influência destas sobre a micro-dureza. Induzidas pela interação apenas da energia adicionada e o metal base (aço AISI304).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais utilizados no processo de soldagem experimental do presente trabalho foram três chapas do aço inoxidável austenítico AISI 304. As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, as dimensões das chapas analisadas e a análise química.

É importante lembrar que os materiais, após o processo de fabricação, foram submetidos a tratamento térmico adequado de solubilização com o objetivo de dissolver precipitados formados durante a solidificação.

Tabela 1: Dimensões das chapas dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304.

Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
215	60	10

Tabela 2: Composição química (% em peso) dos aços inoxidáveis AISI 304

C%	Mn%	Si%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	Al%	Cu%	N PPM
0,045	1,13	0,35	0,032	0,002	17,66	8,02	0,083	0,0031	1055	503

2.2 Métodos

O presente trabalho emprega o processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) utilizando aportes distintos, com a finalidade de se realizar uma análise comparativa das características da junta soldada.

A soldagem de todas as chapas foi realizada em um único passe sem deposição de material de adição (processo autógeno), formando um cordão com extensão média de 160 mm ao longo do comprimento das chapas conforme figura 1.

**Figura 11.** Exemplo da deposição de cordão de solda sobre a chapa utilizando o processo TIG.

Considerando como objetivo principal deste estudo a análise e comparação das alterações nas características das juntas soldadas pelo processo TIG para diferentes faixas de aportes térmicos para o mesmo aço, vale lembrar que o fator de rendimento η para o processo TIG é 0,6 com metal de adição, já para a soldagem autógena o fator de rendimento η é 0,8. O aporte térmico pode ser calculado através da equação 1.

$$HI = \frac{I \times V \times \eta}{1000v} \quad \text{equação 1}$$

Onde HI é o aporte térmico, I e V são respectivamente a corrente e a tensão utilizada no processo, η é o rendimento e v é a velocidade de soldagem.

As faixas de aportes térmicos apresentadas na Tabela 3 foram escolhidas visando estudar um limite inferior ao recomendado para a soldagem destes materiais (0,4 a 0,7 kJ/mm), um limite superior ao recomendado (1,8 a 2,2 kJ/mm) e um valor muito acima da faixa recomendada (3,2 a 3,5 kJ/mm). Além disso, os parâmetros utilizados na soldagem das três chapas do AISI 304 foram todos iguais, sendo a variação do aporte obtida apenas pela variação da velocidade de soldagem.

Tabela 3: Parâmetros de soldagem

Amostra	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (mm/s)	Aporte Térmico (KJ/mm)
1	240	15,1	4,6	0,63
2	240	151	1,45	2,00
3	240	15,1	0,87	3,33

2.3 Caracterização microestrutural

Após corte e embutimento da amostra como recebida, para fins comparativos a mesma foi lixada e lixadeira manual utilizando lixas de carbetto de silício das seguintes granulometrias: 100, 220, 320, 400, 600, 800, 1200, 2500 e 4000 mesh. Posteriormente, foi realizado o polimento mecânico das amostras em politrizes manuais utilizando como abrasivo pasta de diamante de granulometria de 1 μm e, então, a amostra foi atacada por imersão com o reagente beraha, com composição conforme tabela 5.

Tabela 6: Solução utilizada para ataque dos materiais como recebido, Beraha

AISI 316L- Reagente	
Água destilada	80ml
Ácido Clorídrico (HCl) 37%	25ml
Metabissufito de Potássio	0,5g

Após o processo de soldagem, foi retirada uma amostra de cada chapa para realização de caracterização microestrutural (análise de fases, medição de tamanho de grão austenítico, quantificação de ferrita δ na zona fundida), dimensionamento da zona fundida, medição da Microdureza Vickers nas diferentes zonas (zona termicamente afetada, zona fundida e metal base), e medição do espaçamento dendrítico.

2.4 Metodologia numérica

A modelagem computacional aplicada nesta avaliação objetiva simular os efeitos da variação do aporte térmico de soldagem sobre o ciclo térmico de temperatura no material soldado (AISI 304). No processo de modelagem computacional são considerados os fenômenos de transferência de calor (radiação, convecção e condução) acoplados aos fenômenos de transferência de massa (aquecimento, fusão, resfriamento e solidificação). A fim de simplificar e tornar viável a elaboração do modelo para simulação computacional, algumas considerações foram feitas segundo Xavier [7]:

- ✓ A velocidade de soldagem é constante;
- ✓ A perda de calor na superfície da chapa ocorre por convecção e radiação;
- ✓ Deposição de somente um cordão de solda;
- ✓ Eletrodo de soldagem percorrendo a chapa;
- ✓ A distância entre eletrodo e chapa é constante.

Este modelo se baseia na resolução da equação diferencial da conservação de energia (Equação 2), sendo a temperatura (T) a variável dependente, conforme equação 2:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \text{div}[\rho c_p (\vec{u}) T] = \text{div}[k[(\text{grad}(T))]] + S \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

ρ : Densidade do aço

c_p : Calor específico

k : Condutividade térmica

\vec{u} : Vetor velocidade

T : Campo de temperatura

S : Termo fonte, que corresponde a todas as fontes de entrada ou perda de calor no processo (energia/calor adicionado na soldagem, transformação de fase, fusão e solidificação) que neste trabalho será dado pelo modelo duplo-elipsóide proposto por Goldak [8].

O modelo de Goldak [7] (Equação 2) é também conhecido como duplo-elipsóide, pois a distribuição de calor é modelada (em volume) como duas elipses, uma à frente da fonte de calor e outra atrás, conforme mostra a Figura 2. Para modelar o processo de soldagem e fazer a previsão de temperatura na chapa foram considerados os mesmos parâmetros do processo experimental, e foram feitas algumas considerações adicionais a fim de tornar viável a simulação computacional. O modelo numérico de previsão de temperatura consiste na resolução da equação de conservação de energia (Equação 2) aplicada sobre o volume da chapa como domínio de estudo.

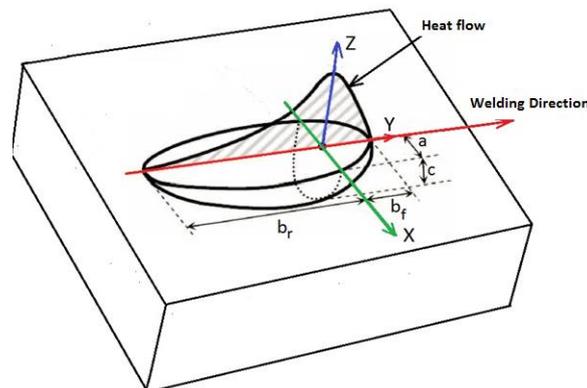


Figura 2. Modelo da fonte de calor duplo elipsoide. Adaptada de Goldak e Akhlaghi [9].

Neste trabalho de Goldak et al. [9], o calor do arco de soldagem em movimento é aplicado como uma fonte de calor volumétrica com uma distribuição em duplo elipsoide.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Microestrutura do Material no Estado como Recebido

A Figura 3 mostra a micrografia do metal base (MB) deste estudo, o aço AISI 304 obtido por microscopia eletrônica de varredura. A microestrutura deste aço é constituída por grãos recristalizados de austenita, com a presença de maclas de recozimento que são características deste material. Porém, observou-se heterogeneidade da matriz, evidenciada pelos diferentes tamanhos de grãos. Além disso, pode-se perceber a presença de pequenas bandas de ferrita δ confirmadas por Tiedra [10].

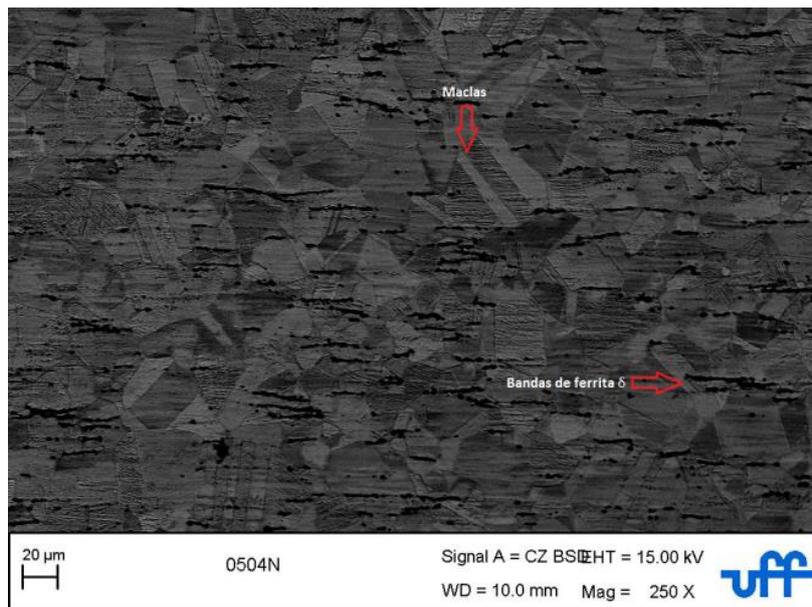


Figura 3: Microestrutura do aço inoxidável austenítico AISI 304. Matriz constituída por grãos poligonais de austenita, presença de maclas e bandas de ferrita δ . Ataque Beraha, MEV aumento 250x.

O valor médio da microdureza Vickers do aço AISI 304 no estado como recebido com um intervalo de confiança de 95% é $170 \pm 3,0$ HV.

3.2 Microestrutura do MS das Juntas Soldada

A figura 3 apresenta a microestrutura do metal de solda da junta soldada com aporte térmico de 0,63KJ/mm, a figura 4 apresenta o ciclo térmico calculado pelo modelo numérico que a mesma foi submetida respectivamente. A reta tangente a curva de resfriamento indica a taxa de resfriamento calculada que o metal foi submetido após o processo de soldagem originando a microestrutura da figura 3. A figura 5 mostra a foto tirada durante o processo de soldagem pela câmera térmica FLIR.



Figura 7. MS do AISI 304 , aporte térmico de 0,63KJ/mm. Ataque Beraha, MO aumento 200X.

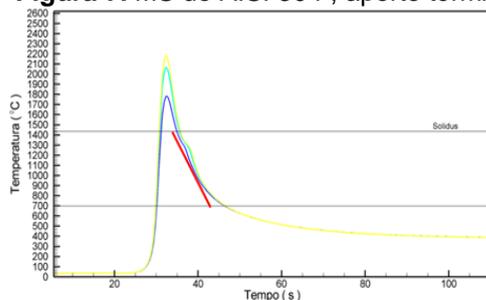


Figura 8. Ciclos térmicos calculados pelo modelo numérico para o AISI 304 aporte de 0,63 kJ/mm.

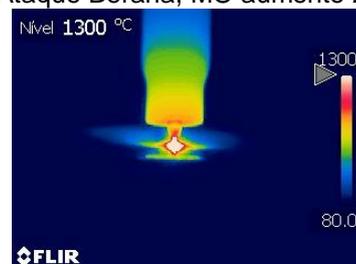


Figura 9. Fotografia tirada durante o processo de soldagem com aporte térmico de 0,63KJ/mm utilizando a câmera térmica FLIR

A figura 10 apresenta a microestrutura do metal de solda da junta soldada com aporte térmico de 2,00KJ/mm, a figura 11 apresenta o ciclo térmico calculado pelo modelo numérico que a mesma foi submetida respectivamente. A reta tangente a curva de resfriamento indica a taxa de resfriamento calculada que o metal foi submetido após o processo de soldagem originando a microestrutura da figura 10. A figura 12 mostra a foto tirada durante o processo de soldagem pela câmera térmica FLIR.



Figura 10. MS do AISI 304 , aporte térmico de 2 KJ/mm. Ataque Beraha, MO aumento 200X.

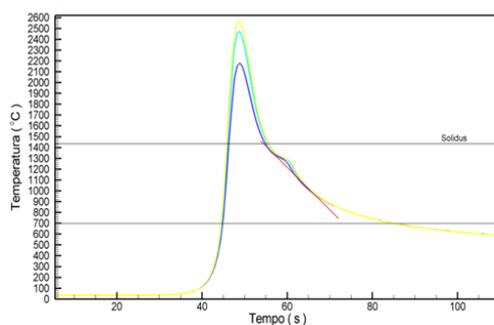


Figura 11. Ciclos térmicos calculados pelo modelo numérico para o AISI 304 aporte de 2 kJ/mm.

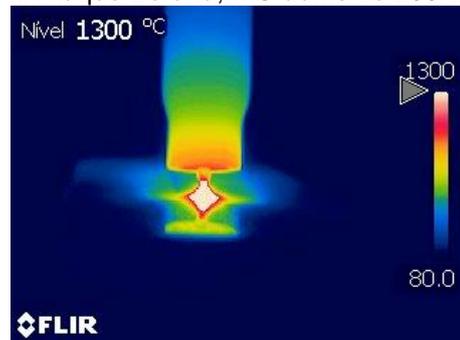


Figura 12. Fotografia tirada durante o processo de soldagem com aporte térmico de 2KJ/mm utilizando a câmera térmica FLIR

A figura 13 apresenta a microestrutura do metal de solda da junta soldada com aporte térmico de 3,33KJ/mm, a figura 14 apresenta o ciclo térmico calculado pelo modelo numérico que a mesma foi submetida respectivamente. A reta tangente à curva de resfriamento indica a taxa de resfriamento calculada que o metal foi submetido após o processo de soldagem originando a microestrutura da figura 13. A figura 15 mostra a foto tirada durante o processo de soldagem pela câmera térmica FLIR.



Figura 13. MS do AISI 304 , aporte térmico de 3,33KJ/mm. Ataque Beraha, MO aumento 200X.

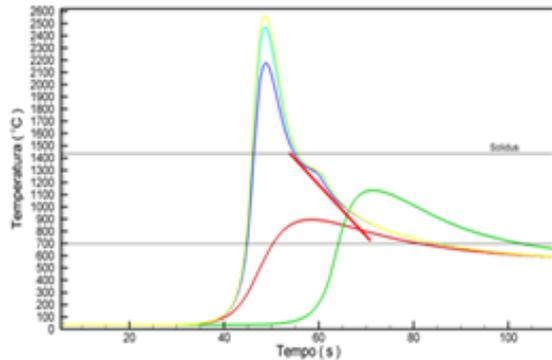


Figura 14. Ciclos térmicos calculados pelo modelo numérico para o AISI 304 aporte de 3,33KJ/mm

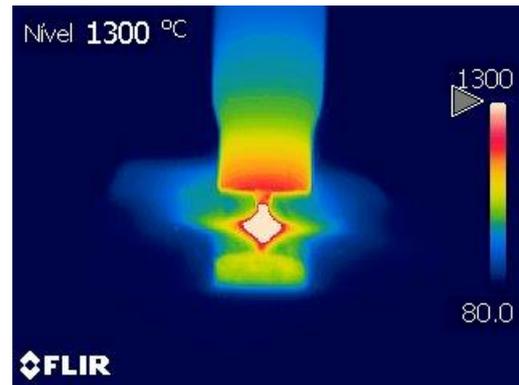


Figura 15. Fotografia tirada durante o processo de soldagem com aporte térmico de 3,33KJ/mm utilizando a câmera térmica FLIR

Pode-se observar que a reta da taxa de resfriamento indicada pelo modelo na figura 8, apresenta inclinação mais acentuada que a indicada na figura 11 que por sua vez é mais inclinada que a da figura 14. Isso ocorre devido ao aporte térmico mais elevado na figura 10, que fornece mais energia para junta soldada resultando em uma temperatura final mais elevada, assim sua taxa de resfriamento é menor.

À luz da caracterização microestrutural a taxa de resfriamento menor resulta em dendritas mais finas com espaçamentos dendríticos menores (figura 7), a taxa de resfriamento intermediária resulta em espaçamentos dendríticos medianos (figura 10), já a taxa de resfriamento superior fornece dendritas mais grosseiras com espaçamentos maiores (figura 13).

3.3 Quantificação da ferrita delta no MS

A tabela 7 apresenta uma análise quantitativa da presença de ferrita delta na região do material como recebido (CR) e região do metal de solda (MS), para que posteriormente possa se identificar a ligação entre o aumento do aporte térmico e o surgimento desta fase em meio as dendritas do MS.

Tabela7: Quantificação de ferrita δ no MS das juntas soldadas do AISI 304 com diferentes faixas de aporte

Amostra	Aporte(KJ/mm)	Fv ferrita(%)
CR	-----	5
1	0,63	7,2
2	2	12,07
3	3,3	14,45

3.4 Espaçamento Dendrítico

Para realizar a medida do espaçamento dendrítico das amostras soldadas foi utilizado o software SMART SEM instalado no microscópio eletrônico de varredura (MEV), conforme mostrado na figura 16. Para obter uma maior confiabilidade foram feitas três imagens de regiões diferentes do metal de solda com aumento de 2000 vezes, em cada imagem foram realizadas 10 medidas totalizando 30 medidas por amostra e então foi calculado um espaçamento médio para cada imagem, posteriormente foi calculada uma média final a partir dos três espaçamentos médios de cada amostra.

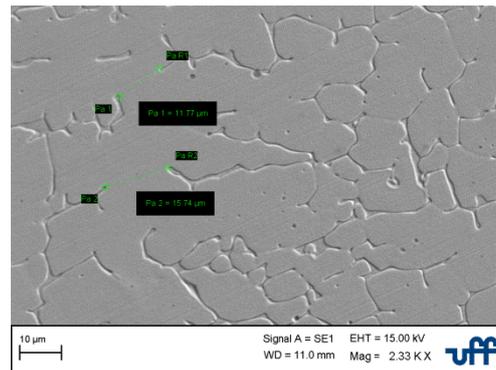


Figura 16. Método utilizado para medir o espaçamento dendrítico, Microscopia eletrônica de Varredura.

Tabela 8: Medidas dos espaçamentos dendríticos do AISI 304 soldado com diferentes faixas de aporte

	Amostra 1 (µm)	Amostra 2 (µm)	Amostra 3 (µm)
Média 1	7,628	10,6876	12,614
Média 2	7,1369	9,4684	8,013
Média 3	6,9195	8,7405	11,356
Média Final	7,0282	9,6322	10,661

Os valores das médias finais apresentados na tabela 8 mostram que aumento do aporte térmico ocasionou um aumento no espaçamento dendrítico. Isso ocorre devido ao aumento da energia adicionada na junta soldada, que conseqüentemente resulta em uma temperatura final mais alta. Logo a taxa de resfriamento diminui com o aumento do aporte térmico que ocasiona um tempo de resfriamento maior, resultando em dendritas mais espaçadas pois tiveram mais energia e tempo para crescer e aumentar seu espaçamento.

3.5 Microdureza Vickers

A análise do perfil de microdureza Vickers da junta soldada é de fundamental importância quando se deseja avaliar as características da região soldada, pois, esta propriedade está diretamente ligada a fenômenos de transformações de fases e microestruturais decorrentes dos diferentes ciclos térmicos sofridos em diferentes regiões.

A Tabela 9 exibe os valores médios de Microdureza Vickers da MB, ZTA e MS de todas as chapas do AISI 304.

Tabela 9: Valores médios de Microdureza Vickers (HV) das juntas soldadas do aço AISI 304.

Amostra	Região	Microdureza Vickers (HV)
1	ZF	191
	MB	175
2	ZF	178
	MB	174
3	ZF	174
	MB	169

Considerando-se que o valor de microdureza Vickers média do aço AISI 304 no estado como recebido é de $170 \pm 3,0$ HV, percebe-se que os valores de microdureza Vickers para as diferentes zonas (MS e ZTA) e metal base (MB) não apresentaram variações significativas após o processo de soldagem (considerando a escala

Vickers que abrange valores de 100HV até aproximadamente 900HV). Desta forma, este resultado pode ser explicado em função das medições terem sido realizadas na matriz austenítica, onde a espessura das dendritas de ferrita δ se apresenta muito fina, dificultando assim a medição da microdureza Vickers somente nesta fase. Resultado semelhante foi obtido por Pessanha [11] no estudo do aço inoxidável austenítico 347 soldado.

3.6 Dimensões do MS e da ZTA

Com a finalidade de avaliar a influência do aumento do aporte térmico utilizado na geometria e dimensões dos cordões de solda, com o auxílio do software Geogebra e do Perfilômetro foi realizado o dimensionamento das regiões das seções transversais dos cordões de solda para os três aportes térmicos utilizados na soldagem do AISI304, conforme mostra a figura 12 e a tabela 10.

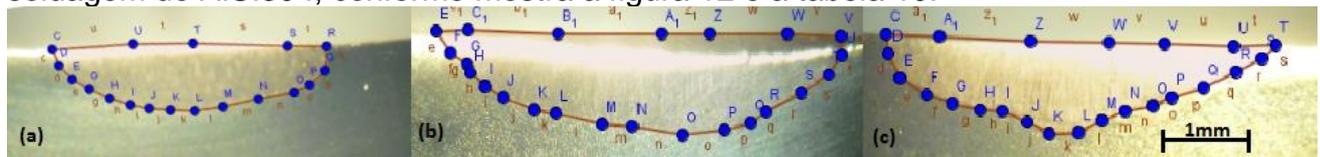


Figura 17. Metodologia utilizada para dimensionar o metal de solda na Macrografia do cordão de solda do AISI 304, (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3.

Tabela 10: Dimensões dos cordões de solda para os diferentes aportes.

Amostra	Aporte (KJ/mm)	MS (altura mm)	MS (largura mm)	Área MS (mm ²)
1	0,63	1,086	8,706	9,66
2	2,00	1,145	9,971	12,61
3	3,33	1,733	11,191	13,97

A figura 13 apresenta um gráfico com o comportamento da área, largura e altura do metal de solda em função do aporte térmico.

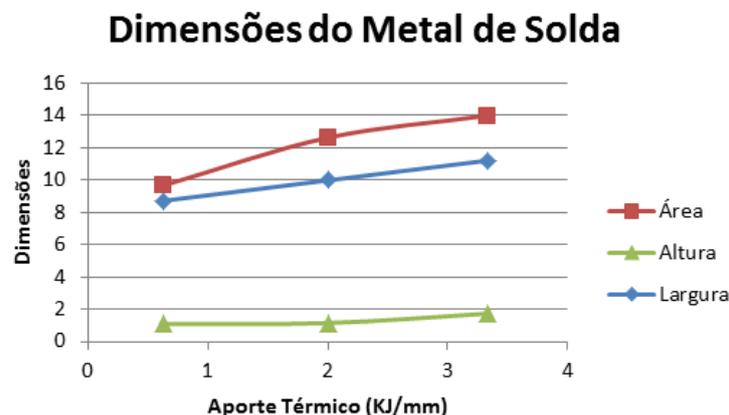


Figura 18. Gráfico da área do metal de solda versus aporte térmico para os três aportes utilizados.

Como pode ser notado na tabela 10 e no gráfico da figura 13, quando o aporte térmico sofre um acréscimo a área do metal de solda tende a aumentar. O mesmo ocorre com a largura do metal de solda, a altura do metal de solda também aumenta com o aporte mas de forma menos expressiva que a largura e a área. Isso se dá devido ao aumento da energia sob forma de calor inserida na junta soldada, com isso a quantidade de material fundido é maior resultando em um aumento nas dimensões da junta soldada com indica o gráfico da figura 13.

4 Conclusões

O aumento do aporte térmico ocasionou um aumento nas dimensões do metal de solda, na fração volumétrica de ferrita δ e no espaçamento dendrítico na região do MS. A morfologia de ferrita δ evidenciada no MS é vermicular, não foi observada na junta soldada a presença de precipitados ou fases intermetálicas indesejadas, os valores de microdureza Vickers medidos nas diferentes zonas não exibiram variações significativas.

O aporte de 3,3 kJ/mm apresentou elevada fração volumétrica de ferrita δ , que juntamente com o crescimento excessivo das dendritas no MS pode ocasionar fragilização da região, e até mesmo o surgimento de fases deletérias comuns em aços desta classe como a fase σ . Os aportes de 0,63 e 2,00 kJ/mm fornecem os melhores resultados, com menores teores de ferrita δ no MS, assim como dimensões do MS e espaçamentos dendríticos menores, fornecendo propriedades mecânicas e metalúrgicas mais favoráveis para a obtenção de propriedades mais favoráveis em uma junta soldada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal Fluminense, CAPES, CNPq e Faperj pelo financiamento dos materiais e equipamentos de análises.

REFERÊNCIAS

- 1 MODENESI, P. J. Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis. SP: SENAI-SP, 2001.
- 2 Rodrigues, F. G. P. Avaliação da Ocorrência de Construção Mecânica do Arco na Soldagem A-TIG de Aços Inoxidáveis Austeníticos. Revista soldagem e Inspeção, 21(4), p. 428-443, 2016
- 3 Ronqueti, L.A., Efeito do modo de transferência metálica sobre o comportamento térmico e as transformações metalúrgica na soldagem GMAW dos aços austeníticos AISI 304 e 316 utilizados em projetos de instalações nucleares, Dissertação de Mestrado, Escola Engenharia Indústiral Metalúrgica de Volta Redonda, PPGEM,UFF, p 1-163, 2014.
- 4 Morelos, L. V. H., Improvement of localised corrosion resistance of AISI 2205 Duplex Stainless Steel joints made by gas metal arc welding under electromagnetic interaction of low intensity. Applied Surface Science, 321, p. 252–260, 2014.
- 5 Rentería, G. M. A., Effect of electromagnetic interaction during fusion welding of AISI 2205 duplex stainless steel on the corrosion resistance. Applied Surface Science, 396, P. 1187–1200, 2017
- 6 Qin, G., Sensitivity of driving forces on molten pool behavior and defect formation in high-speed gas tungsten arc welding. International Journal of Heat and Mass Transfer, 107, p.1119–1128, 2017.
- 7 XAVIER, C. R. Simulação numérica da soldabilidade dos aços ferríticos T/P23 e T/P24. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS. 2009.
- 8 GOLDAK, J.; CHAKRAVARTI, A.; BIBBY, M. A New Finite Element Model for Welding Heat Sources. Metallurgical Transactions B, v. 15B, p. 299-305, 1984.
- 9 GOLDAK, J. A.; AKHLAGHI, M. Computatiol Welding Mechanics. Springer, 2005.
- 10 TIEDRA, P. de., MARTÍN, O. Effect of welding on the stress corrosion cracking behaviour of prior cold worked AISI 316L stainless steel studied by using the slow strain rate test. Materials and Design, p. 103 – 109, 2013.
- 11 PESSANHA, de C. E. Quantificação da ferrita delta e avaliação da relação microestrutura/ propriedades de um aço inoxidável austenítico 347 soldado. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense / UENF, Campos dos Goytacazes – RJ. 2011.