



INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO E DA CORRENTE DE SOLDAGEM NA SUSCEPTIBILIDADE À TRINCA DE SOLIDIFICAÇÃO DO AÇO INOX 316L

José Hilton Ferreira da Silva

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP, Brasil
E-mail - jhilton@fem.unicamp.br

Francisco Manoel Lemos Arantes

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP, Brasil
E-mail - farantes@fem.unicamp.br

Hipólito Carvajal Fals

Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Mecánica. Santiago de Cuba. Cuba
E-mail - carvajal@fim.uo.edu.cu

Roseana da Exaltação Trevisan

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP, Brasil
E-mail - roseana@fem.unicamp.br

Resumo. Neste trabalho realizou-se um estudo da influência dos gases de proteção CO_2 , Ar + 25% CO_2 e Ar + 2% O_2 , e da corrente de soldagem na susceptibilidade a formação de trincas de solidificação em cordões de solda depositados com eletrodo tubular AWS E316LT-1 no aço inoxidável AISI 316L. Os cordões foram avaliados, quanto a incidência de trincas de solidificação, em um equipamento de teste Transvarestraint. As trincas foram quantificadas, com o auxílio de um microscópio ótico, em função do comprimento máximo de trinca apresentado. A porcentagem de ferrita δ precipitada nos cordões soldados foi medida por um Ferristoscópio Magnético. Os resultados, da susceptibilidade ao trincamento dos cordões soldados, mostraram que, para a minimização das trincas de solidificação na soldagem dos aços inox 316L, é de fundamental importância a escolha adequada do tipo de gás de proteção e corrente de soldagem, pois estas duas variáveis interagiram sobre a incidência de trincas.

Palavras-chave: Trincas de solidificação, Aço inoxidável austenítico, Teste Transvarestraint, FCAW, Gás de proteção

1. INTRODUÇÃO

O Aço Inoxidável é um material da família dos aços contendo no mínimo 11,5% de cromo, que se caracteriza por apresentar elevada resistência à oxidação atmosférica, devido à formação de um resistente filme de óxido de cromo em sua superfície. Em função desta característica, este tipo de aço é muito usado em indústrias químicas, petroquímicas e de alimentos.

O aço 316L é do tipo inoxidável austenítico, com baixo teor de carbono, que além de apresentar boa resistência à corrosão, tem boa ductilidade mesmo em temperaturas criogênicas, o que o torna muito recomendado para confecção de equipamentos conformados e soldados de caldeiraria e tubulação, Woolling (1994). Vários trabalhos (Shankar, 2000; Li et al. 1999; Kou, 1987; Dixon, et

al., 1984) recomendam bastante cuidado na soldagem deste material, por ele apresentar alta susceptibilidade à trincas de solidificação.

Trinca de Solidificação é o fenômeno que ocorre preferencialmente nos contornos interdendríticos e/ou intergranulares do cordão de solda durante o seu resfriamento. Durante a solidificação do cordão soldado, as impurezas presentes na zona fundida formam compostos com ponto de fusão mais baixo que os componentes da matriz metálica. As impurezas tornam-se os últimos elementos a se solidificarem, o que resulta em grãos praticamente solidificados da matriz metálica envoltos pelo soluto, que finalmente se solidificam nos contornos dos mesmos. Este fenômeno provoca a fragilização dos contornos dos grãos às tensões trativas, normalmente provenientes da contração de solidificação do cordão de solda, tornando-os susceptíveis ao trincamento durante esse processo.

A precipitação primária da fase ferrita δ possui grande influência na susceptibilidade à trinca de solidificação dos aços inox austeníticos. A ferrita δ apresenta boa solubilidade às impurezas sulfúricas e fosforosas, reduzindo a concentração das mesmas nos contornos dos grãos, o que provoca a diminuição da susceptibilidade à trincas dos aço inoxidáveis austeníticos. Segundo Kou (1987), a presença de ferrita- δ em concentrações de 5 a 10% nos cordões de solda, tornam os aços inox austeníticos menos susceptíveis à trincas de solidificação.

O processo de soldagem também tem grande influência no fenômeno de formação de trincas de solidificação. Os parâmetros como tipo do gás de proteção, intensidade de corrente, tensão do arco e velocidade de soldagem, afetam a formação deste defeito de soldagem.

Na soldagem com eletrodo tubular e proteção gasosa FCAW-G (Flux Cored Arc Welding - Gas), a seleção do gás de proteção é um parâmetro muito importante. O gás de proteção serve para complementar a proteção promovida pelo fluxo interno existente no eletrodo tubular, promover a estabilidade do arco e o tipo de transferência metálica eletrodo peça. O CO_2 é muito usado como gás de proteção na soldagem de aços carbono, devido ao seu baixo custo, boa proteção da poça de fusão, alta condutividade térmica e por promover boas propriedades mecânicas às juntas soldadas. Segundo Konosu et al. (2001), na última década o CO_2 vem sendo usado extensivamente como gás de proteção na soldagem de aços inoxidáveis pelo processo FCAW. O gás de proteção Ar + 25% de CO_2 é utilizado na soldagem de aços carbono, sendo também, recomendado para soldagem de aços inoxidáveis, com eletrodos tubulares. Essa mistura de gases produz cordões de solda com boa penetração e resistência mecânica. O argônio com 1 a 8% de oxigênio é recomendado para soldagem de aços carbono de baixa liga e aços inoxidáveis pelo processo GMAW (Gas Metal Arc Welding). O percentual de O_2 promove um arco com boa estabilidade, aumenta a penetração e a forma do cordão apresenta uma geometria diferenciada com relação ao argônio puro.

A corrente de soldagem atua diretamente sobre o insumo de calor, fator este que tem grande influência na formação de trincas de solidificação. A Literatura é contraditória quando trata da influência do insumo de calor sobre a suscetibilidade à trincas de solidificação. Segundo Goodwin (1990), citado por Braga & Trevisan (2001), o aumento do insumo de calor geralmente aumenta a sensibilidade do material ao trincamento, porém existem outros fatores a serem considerados, como mudanças no modo de solidificação, efeitos da composição química e precipitação de ferrita δ . Já Braga & Trevisan (2001), concluíram que o aumento do insumo de calor, através do aumento da corrente de pulso, produziu uma diminuição no Comprimento Total de Trincas (CTT), ou seja tornou o material menos susceptível à trincas de solidificação.

São usados diversos testes para avaliar a susceptibilidade de juntas soldadas, à trincas de solidificação, sendo o teste Varestraint um dos mais empregados. Foi a partir do teste Varestraint que se derivou o teste Transvarestraint, Kou (1987). Ambos consistem no dobramento de um corpo de prova sobre um bloco de curvatura conhecida, de forma a induzir o surgimento de trincas na solda durante a solidificação. O teste Transvarestraint utiliza uma tensão externa aplicada transversalmente no corpo de prova. Como característica principal, o teste possibilita analisar a variação do grau de restrição sobre a susceptibilidade à trincas do cordão de solda, além de possibilitar o estudo da influência dos parâmetros de soldagem e/ou morfologia dos cordões sobre a possibilidade da ocorrência de trincas na junta soldada. O teste Transvarestraint é amplamente

indicado na avaliação de trincas de solidificação na zona de fusão, pois ele produz trincas ao longo da linha central do cordão de solda em quase todos casos, Shankar et al. (2000).

Segundo Dixon et al. (1984), existe um consenso quanto a operação mecânica do teste Transvarestraint, mas ainda existe discordância a cerca do melhor parâmetro a ser utilizado para avaliar a susceptibilidade à trinca de solidificação de um determinado material. Dois parâmetros bastante utilizados são o Comprimento Máximo de Trincas (CMT), que consiste na medida da maior trinca observada no cordão de solda, e o Comprimento Total de Trincas (CTT), determinado pela soma de todas as trincas observadas no cordão. Shankar et al. (2000), concluíram que o teste Transvarestraint realça a presença da trinca longitudinal (comum nos aços inoxidáveis austeníticos) e apresenta níveis de erro na medição do CMT apreciavelmente menores do que na medida do CTT.

Em função dos fatores, fenômenos e ferramentas até aqui relatados, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de analisar a influência do tipo de gás de proteção e corrente de soldagem do processo FCAW-G com eletrodo tubular AWS E316LT-1, na susceptibilidade à trincas de solidificação do aço inoxidável austenítico AISI 316L, utilizando o teste Transvarestraint.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados corpos de prova com dimensões de 260 x 160 mm e espessura de 9,5 mm, com chanfro central em "U" (raio de 5 mm), onde foram depositados os cordões. O material analisado, como metal de base, foi o aço inoxidável austenítico, classificação AISI 316L, caracterizado por apresentar alta susceptibilidade à trincas de solidificação. O material de adição utilizado foi o eletrodo tubular AWS 316LT-1, com 1,6 mm de diâmetro. As composições químicas do metal de base e do eletrodo estão mostradas na Tab. (1).

Tabela 1. Composição química do aço inox AISI316L e do eletrodo AWS 316 LT-1 (% em peso)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Cu	Mo
Aço Inox AISI 316L	0,026	0,26	1,35	0,021	0,008	17,6	10,5	0,02	0,07	1,94
Eletrodo AWS 316 LT-1	0,03	0,3 à 0,65	1,0 à 2,5	0,02	0,015	18 à 20	11 à 14	-	-	2 à 3

Para a soldagem dos corpos de prova foram mantidas constantes a tensão em 29 V, velocidade de soldagem em 250 mm/min, distância bico de contato peça em 20 mm e vazão do gás de proteção em 15 l/mm. Antes de serem soldados, os corpos de prova passaram por uma limpeza superficial, que consistiu de um jateamento abrasivo, seguido de escovamento e sopro com ar comprimido.

Os corpos de prova foram soldados utilizando-se uma fonte de soldagem multi-processo "Inversal". A operação foi totalmente automatizada, usando o processo FCAW-G em polaridade inversa (CC⁺). A tocha de soldagem foi montada formando um ângulo de 90° com a peça na posição plana.

Com o intuito de induzir a formação de trinca de solidificação foi utilizado o Teste Transvarestraint com uma deformação tangencial de 5%, que é a mais severa, possibilitando uma maior ocorrência de trincas. O equipamento de teste utilizado foi construído e aferido no laboratório de soldagem da UNICAMP. A tensão tangencial foi aplicada imediatamente após a extinção do arco elétrico.

O equipamento utilizado para medição do Comprimento Máximo de Trinca (CMT) foi um microscópio óptico de medir coordenadas ZKM 250.

A porcentagem média de ferrita δ precipitada nos cordões de solda dos corpos de prova analisados, foi medida com um *Ferristoscópio Magnético MP3*, com precisão de $\pm 2\%$.

O planejamento experimental usado foi o planejamento fatorial, que permitiu estudar os efeitos das duas variáveis de influência, corrente de soldagem e gás de proteção, sobre a variável de resposta, que foi o Comprimento Máximo de Trincas (CMT). A metodologia adotada para avaliar

os resultados obtidos consistiu de uma análise de variância. Essa análise verifica se os fatores e suas interações têm ou não influência sobre a variável de resposta.

A Tabela (2) apresenta os níveis em que foram analisados os fatores corrente de soldagem e gás de proteção, para avaliar a susceptibilidade à trincas de solidificação do aço inox 316L.

Tabela 2. Variáveis de influência estudadas e seus respectivos níveis

Variáveis de Influência	Níveis		
Corrente (A)	200	250	300
Gás de Proteção	CO ₂	Ar + 25% CO ₂	Ar + 2% O ₂

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Realizadas as soldas, pode-se observar que todos os cordões apresentaram trincas longitudinais bem definidas nos centros dos mesmos, característica dominante da trinca de solidificação. A Figura (1) mostra uma trinca representativa para cada condição do teste. Nesta mesma figura pode ser observado que os cordões de solda não sofreram mordedura ou seja houve preenchimento total do chanfro. Os cordões não apresentaram porosidade e o nível de respingo foi muito baixo.

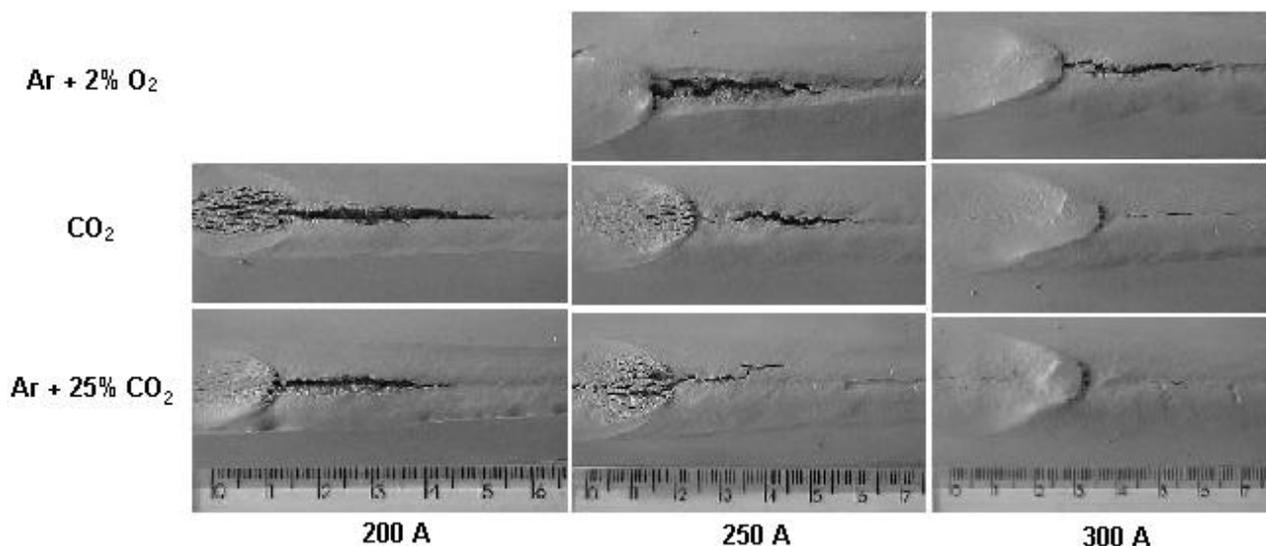


Figura 1 - Corpos de prova mostrando as trincas formadas no centro dos cordões

Ainda analisando a Fig. (1) verifica-se que, para os gases CO₂ e Ar + 25% CO₂, os cordões se desenvolveram de forma regular e homogênea em toda sua extensão, correspondendo com repetitividade às condições normais de uma boa solda comercial. Os cordões soldados com o gás Ar + 2% O₂, nas condições de corrente de soldagem de 250 e 300 A, apresentaram-se bastante irregulares, com um rechupe ao longo do mesmo, e na condição de 200 A, tornou-se impraticável a soldagem dos corpos de prova.

Os resultados obtidos para o CMT em função do tipo de gás de proteção e intensidade de corrente utilizados, estão apresentados na Tab. (3). Para uma melhor visualização estes resultados são apresentados de maneira gráfica na Fig. (2).

Tabela 3. Resultados do CMT (em mm) para os cordões soldados

Gás	Corrente (A)		
	200	250	300
CO ₂	33,4	25,9	22,0
Ar + 25% CO ₂	31,5	24,6	5,9
Ar + 2% O ₂	-	34,6	27,2

Os resultados apresentados mostram que, a medida que aumentou-se a corrente de soldagem, ocorreu uma redução no CMT, tornando o cordão de solda menos susceptível à trincas de solidificação, independente do tipo de gás de proteção usado. Com relação aos gases de proteção observou-se que, os gases CO₂ e Ar + 25% CO₂, para as correntes de 200 e 250A, apresentaram resultados similares quanto ao CMT. No entanto, o gás Ar + 25% CO₂, para a corrente de 300 A, apresentou uma maior redução na suscetibilidade à trincas de solidificação, tornando-o mais apropriado para minimização de trincas de solidificação do aço inox 316L. O gás Ar + 2% O₂ produziu cordões irregulares e mais susceptíveis à trinca de solidificação, não se mostrando adequado para ser utilizado pelo processo de soldagem aqui estudado.

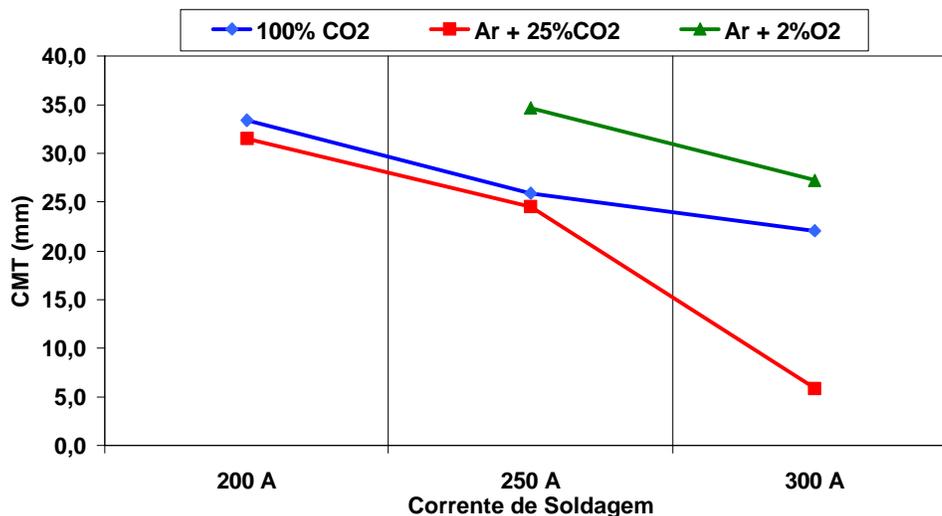


Figura 2. CMT em função do tipo de gás e corrente de soldagem

Para uma melhor interpretação quantitativa, os resultados para o CMT foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) com um nível de significância de 5%, o que indica uma confiabilidade de 95% nos resultados. Com base nos resultados apresentados na Tab. (3) ou Fig. (2) e na análise de variância, verificou-se que a corrente de soldagem foi o fator que mais influencia no CMT. Foi observado também que, o gás de proteção influencia no CMT e que a interação desses fatores é estatisticamente significativa para o CMT.

Com o intuito de esclarecer a redução do CMT com o aumento da corrente de soldagem, ponto controvertido na Literatura (Goodwin, 1990; Braga & Trevisan, 2001) efetuou-se a medição da presença de ferrita δ precipitada nos cordões de solda ensaiados. Os resultados médios para a precipitação da ferrita δ estão mostrados no gráfico da Fig.(3). Este gráfico ressalta o aumento de ferrita δ precipitada com o aumento dos níveis de corrente de soldagem. Observa-se também que a porcentagem de ferrita δ concentrou-se entre 5 e 10%, segundo Kou (1987), nessas condições o aço inox austenítico é menos susceptível à trincas de solidificação.

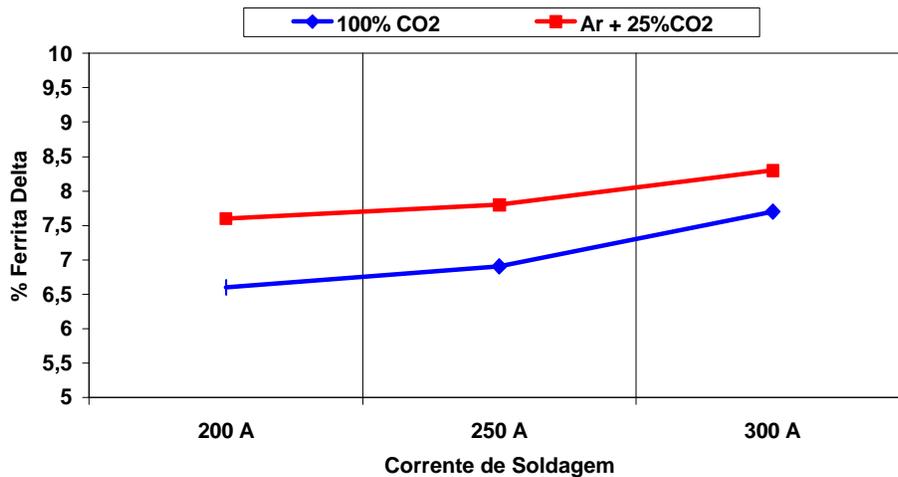


Figura 3. CMT em função da precipitação da ferrita δ

Para avaliar o comportamento do CMT em função da ferrita δ presente nos cordões soldados, foi utilizado o gráfico apresentado na Fig. (4). Neste gráfico do tipo tendência, os resultados experimentais do CMT foram plotados em função da porcentagem de ferrita δ e gases de proteção.

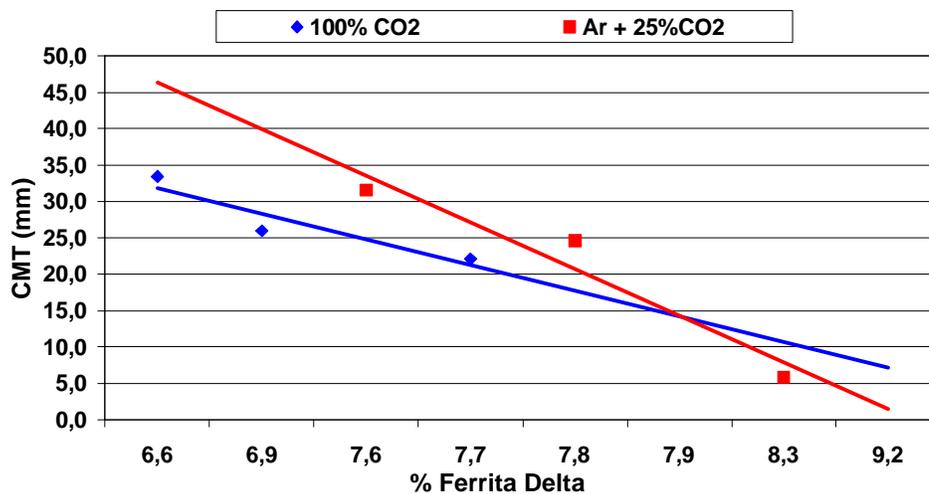


Figura 4. CMT em função do tipo de gás e da Ferrita δ .

Analisando as Fig. (3) e (4) verifica-se que, os cordões soldados com proteção de Ar + 25% de CO₂ apresentaram maior precipitação de ferrita δ para todos os níveis de corrente de soldagem utilizados, conseqüentemente, esses cordões se mostraram menos susceptíveis à trincas de solidificação.

Da análise do gráfico mostrado na Fig. (4) constatou-se que a susceptibilidade à trinca de solidificação reduziu significativamente com o aumento da precipitação de ferrita δ , conforme relatado na literatura (Kou, 1987; Linnert, 1996). Estes resultados indicam que, provavelmente, o aumento da precipitação de ferrita δ foi a principal razão para a redução da susceptibilidade à trinca de solidificação com o aumento da corrente de soldagem.

4. CONCLUSÕES

Em função dos resultados apresentados para a soldagem de aço inox 316L com o processo FCAW-G e com o eletrodo AWS 316LT-1, conclui-se que:

- O aumento da corrente de soldagem reduziu a susceptibilidade à trinca de solidificação, independente do gás utilizado. Esta redução se deve, provavelmente, ao aumento da precipitação da ferrita δ , com o aumento da corrente.
- A influência dos gases de proteção na susceptibilidade à trinca de solidificação foi observada na corrente de 300 A, onde o gás Ar + 25% CO₂ produziu cordões de solda com menor CMT.
- O gás Ar + 2% O₂ não se mostrou recomendável por produzir cordões irregulares e mais susceptíveis à trincas de solidificação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP e CNPq pelo auxílio financeiro e a ACESITA pelo fornecimento de chapa de aço inox 316L, que foram de fundamental importância para a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Braga, E. M. & Trevisan, R. E., 2001, "Estudo das Trincas de Solidificação Através do Teste Transvarestraint", Aceito para publicação no XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil.
- Dixon, B.F., Phillips, R.H. and Ritter, J.C., 1984, "Cracking in the Transvarestraint Test, Part 1 A New Procedure for Assessment of Cracking", Metal Construction, pp. 86 – 90.
- Dixon, B.F., Phillips, R.H. and Ritter, J.C., 1984, Cracking in the Transvarestraint Test, Part 2 The Pattern of Solidification Cracking, Metal Construction, pp. 154 – 160.
- Goodwin, G. M., 1990, Test Methods for Evaluating Hot Cracking Review and Perspective, United States - Japan Symposium on Advances in Welding Metallurgy, San Francisco and Yokohama, pp. 59-78.
- Konosu, S., Mashiba, H., Takeshima M. and Ohtsuka T., 2001, "Effects of Pretest aging on Creep Crack Growth Properties of Type 308 Austenitic Stainless Steel Weld Metals", Engineering Failure Analysis 8, pp. 75 - 85.
- Kou, S., 1987, "Welding Metallurgy", 1th. ed., John Wiley & Sons, New York, USA, Cap. 11 "Solidification Cracking of the Fusion Zone", pp. 211-236.
- Lee, H.W., Kang, S.W. and Park, J.U., 2001, "Fatigue Strength Depending on Position of Transverse Cracks in FCAW Process", Welding Research Supplement, pp.137-141.
- Li, L., Messler, R. W., 1999, "The Effects of Phosphorus and Sulfur On Susceptibility to Weld Hot Cracking in Austenitic Stainless Steels", Supplement to The Welding Journal, pp. 387-396.
- Linnert, George E., 1996, "Welding Metallurgy", 4.ed. v.1, American Welding Society - AWS, Miami, Florida, USA, Cap. 6 – Welding Methods and Processes, pp. 503 - 651 and Cap.8 - Fluxes, Slags and Gases for Shielding, pp. 707-785.
- Norrish, J., 1992, "Advanced Welding Processes", Institute of Phishing Publishing, Bristol, USA, Cap. 5 - Gases for Advanced Welding Processes, pp. 75 – 94.

Shankar, V., Gill, T.P.S., Mannan S.L and Sundaresan, S, 2000, "Criteria for Hot Cracking Evaluation in Austenitic Stainless Steel Welds Using Longitudinal Vastrestraint and Transvastrestraint Tests", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 5 No. 2, pp. 91–97.

Woollin, P., 1994, "Developments in fusion welding of stainless steels", Welding & Metal Fabrication, Publishers – DMG Business Media Ltd., Vol. 62, pp. 18 – 26.

INVESTIGATION OF WELD SOLIDIFICATION CRACKING IN STAINLESS STEEL 316L WELDED WITH DIFFERENT WELDING PARAMETERS

José Hilton Ferreira da Silva

State University of Campinas, Ability of Mechanical Engineering. Campinas, SP, Brazil

E-mail - jhilton@fem.unicamp.br

Francisco Manoel Lemos Arantes

State University of Campinas, Ability of Mechanical Engineering. Campinas, SP, Brazil

E-mail - farantes@fem.unicamp.br

Hipólito Carvajal Fals

University of Oriente, Ability of Mechanical Engineering. Santiago of Cuba, Cuba

E-mail - carvajal@fim.uo.edu.cu

Roseana da Exaltação Trevisan

State University of Campinas, Ability of Mechanical Engineering. Campinas, SP, Brazil

E-mail - roseana@fem.unicamp.br

***Abstract.** This paper aims to analyze the influence of welding parameters such as current and shielding gas on the susceptibility to the formation of solidification crack on the bead weld. For that, Flux Cored Arc Welds (FCAW) was used in a stainless steel AISI 316L. The consumables used were the commercially available (AWS E316LT-1) with 1.6 mm in diameter. The Transvastrestraint test was used for the quantitative evaluation of the solidification cracking susceptibility of the material. The cracks were quantified with the aid of an optical microscope in relation with maximum crack length presented. A magnetic Ferritoscope measured the percentage of delta ferrite precipitated. Test results have shown that for minimization of solidification cracks is crucial to choose a suitable type of shielding gas and welding current. The results also were submitted to analysis of variance and pointed to interdependence of the variables.*

***Keywords.** Solidification cracking, Stainless steel, Transvastrestraint test, FCAW, Shielding gas*