

CORRELAÇÃO ENTRE MICROESTRUTURA E TENACIDADE DE JUNTAS SOLDADAS COM MÚLTIPLOS PASSES EM AÇO API X80

Francisco Edson Nogueira Fraga

E-mail: nfraga@fem.unicamp.br

Roseana da Exaltação Trevisan

E-mail: roseana@fem.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Eng. Mecânica / Dep. de Eng. Fabricação.
Rua Mendeleiv, S/N, Cidade Universitária “Zeferino Vaz”
CEP: 13.083-860, Campinas/S.P, Brasil
Caixa Postal:6122.

Resumo: *Em estudos preliminares realizados junto ao grupo de soldagem da Faculdade de Engenharia da UNICAMP, observou uma grande dispersão nos valores de tenacidade, obtida por ensaios Charpy, nas diferentes regiões de juntas de tubos de aço API X-80 soldadas pelo processo de soldagem a arco com arame tubular. Neste trabalho é feita uma correlação entre os valores obtidos de tenacidade com a microestrutura das diferentes regiões de juntas soldadas. Para tanto foram analisadas juntas soldadas com arame tubular AWS E71T-1, efetuadas com pré-aquecimento de 100 °C e à temperatura ambiente. As juntas foram formadas por seis passes de solda. As amostras foram preparadas por metalografia convencional e analisadas através de microscopia ótica. As microestruturas foram identificadas e através deste estudo qualitativo foi possível justificar a grande dispersão dos resultados obtidos nos ensaios de tenacidade*

Palavras-chave: *Tenacidade, Microestrutura, Soldagem, Dutos.*

1. INTRODUÇÃO

Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) de classificação API apresentam elevadas propriedades mecânicas em função de sua aplicação na indústria petroquímica, e, naturalmente, essas propriedades são requeridas para as juntas soldadas também.

Ordóñez¹, Santos Neto² e Siewert & Trevisan³ obtiveram êxito na junção de aços API utilizando o processo a arco com arame tubular auto-protegido (FCAW-S) e com proteção gasosa (FCAW-G). Loureiro⁴ e Ordóñez¹ destacam ainda as vantagens de unir o processo FCAW à técnica *undermatched*, que consiste em utilizar um metal de adição com o limite de resistência ou o limite de escoamento inferior ao do metal de base.

Durante o processo de soldagem com múltiplos passes, os ciclos térmicos subseqüentes promovem modificações microestruturais tanto nos cordões de solda como também na zona afetada pelo calor (ZAC) destes cordões de solda. Easterling⁵ descreve que a soldagem de múltiplos passes pode provocar defeitos como o crescimento de grão, mas, por outro lado também pode promover alguns benefícios na junta soldada como refinamento na microestrutura, melhorias na tenacidade e redução de tensão residual quando comparado com uma solda de único passe. Easterling⁵ explica ainda que, com o uso de múltiplos passes, uma menor energia de soldagem pode ser inserida por cada passe de solda, reduzindo a quantidade de calor para se fazer a soldagem.

Dentre as propriedades mecânicas de maior relevância, a tenacidade é uma das mais importantes para assegurar o adequado funcionamento e o melhor desempenho de uma junta soldada. A tenacidade é a habilidade de um metal resistir à fratura na presença de um entalhe e acomodar as cargas internas por deformação plástica. O estudo da tenacidade em juntas com múltiplos passes é uma tarefa bastante complexa e controversa.

O principal objetivo deste trabalho é identificar as principais microestruturas presentes em juntas multipasse de aços API 5L-X80 com arame tubular e, através deste estudo, justificar a grande dispersão dos resultados de tenacidade obtidos nestas juntas soldadas.

2. MATERIAL E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material utilizado para o desenvolvimento deste trabalho foram amostras retiradas de juntas soldadas obtidas de um trabalho anteriormente realizado pelo grupo de soldagem da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, desenvolvido por Ordóñez¹. Foram utilizados como metais de base dutos de aço ARBL com especificação API 5L-X80 de dimensões 762mm de Ø externo e 16mm de espessura. A junta em V, foi preenchida com seis passes, sendo um passe de raiz (PR) e 5 passes de enchimento conforme a figura 1. Nesta figura são identificadas as regiões da junta soldada em uma seção transversal da mesma.

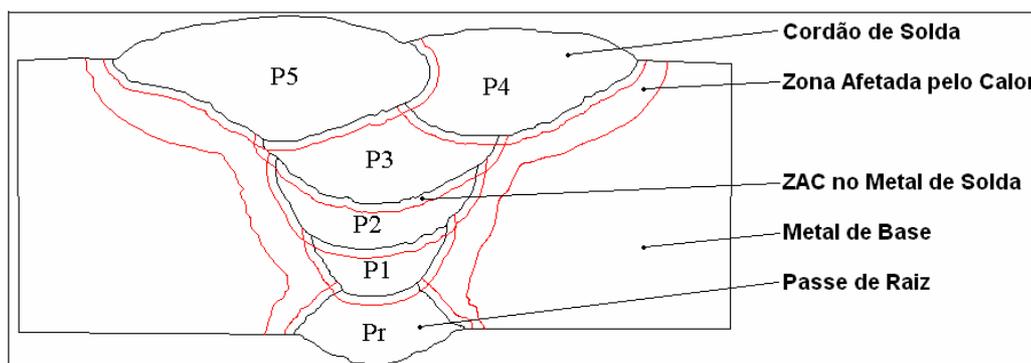


Figura 1: Passes de solda na junta em V e regiões da junta soldada.

No processo de soldagem utilizou-se duas condições diferentes de temperatura de pré-aquecimento, as quais também foram usadas como temperaturas de interpasse. Na primeira condição os passes de solda foram realizados a temperatura ambiente (T_{amb}), enquanto que a segunda condição de soldagem foi realizada a $100^{\circ}C$ (T_{100}). Os cordões de solda foram depositados na posição plana pelo processo de soldagem a arco com arame tubular com proteção gasosa (FCAW-G), usando arame de classificação AWS E71T-1 e diâmetro 1,6mm. Os parâmetros de soldagem são apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros de soldagem para o arame AWS E71T-1.

Condições de Soldagem	Temperaturas de preaquecimento			
	T_{amb}	T_{100}	T_{amb} e T_{100}	T_{amb} e T_{100}
	P_R	P_R	P_1	P_2, P_3, P_4, P_5
I (A)	185	130	185	220
U (V)	25	24	25	26
V_s (mm/min)	260	260	260	230
V_a (m/min)	3,5	2,5	3,5	4,5
DBCP (mm)	19	19	19	19
E_s (kJ/mm)	1,1	0,7	1,1	1,5

Segundo Ordóñez¹, o metal de adição AWS E71T-1 foi selecionado em função da composição química do metal de base (MB), das propriedades mecânicas e em função também da técnica de *undermatched*, para a qual utilizou-se eletrodos com limite de resistência a tração inferior ao do metal de base. Os resultados dos ensaios de tenacidade, obtidos previamente do trabalho desenvolvido por Ordóñez¹, são apresentados na tabela 2. Nesta tabela pode ser observado as médias dos resultados obtidos dos ensaios charpy para o Cordão de Solda (CS), a Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e para Metal de Base (MB), bem como os respectivos desvios padrões entre parênteses.

Tabela 2: Tenacidade no CS e na ZAC. Ordóñez¹

Temperatura de Preaquecimento	TENACIDADE (J)	
	CS	ZAC
(18 - 25) °C	36,52 (9,06)	132,46 (30,21)
100°C	39,77 (10,6)	179,73 (22,64)
Tenacidade (J) do Metal Base	155	

Para o estudo das microestruturas, foram retiradas amostras a partir da seção transversal das juntas soldadas, como ilustrado na figura 2. As amostras foram preparadas por metalografia convencional e analisadas através de microscopia ótica com um aumento de 500x. Para o ataque químico utilizou-se Nital à 2% e 3% com diferentes tempos de ataque. Na tentativa de identificar o microconstituente austenita-martensita foram feitos testes com o reagente LePera, (metabissulfito de sódio) com diferentes concentrações, 2%, 5% e 10%.

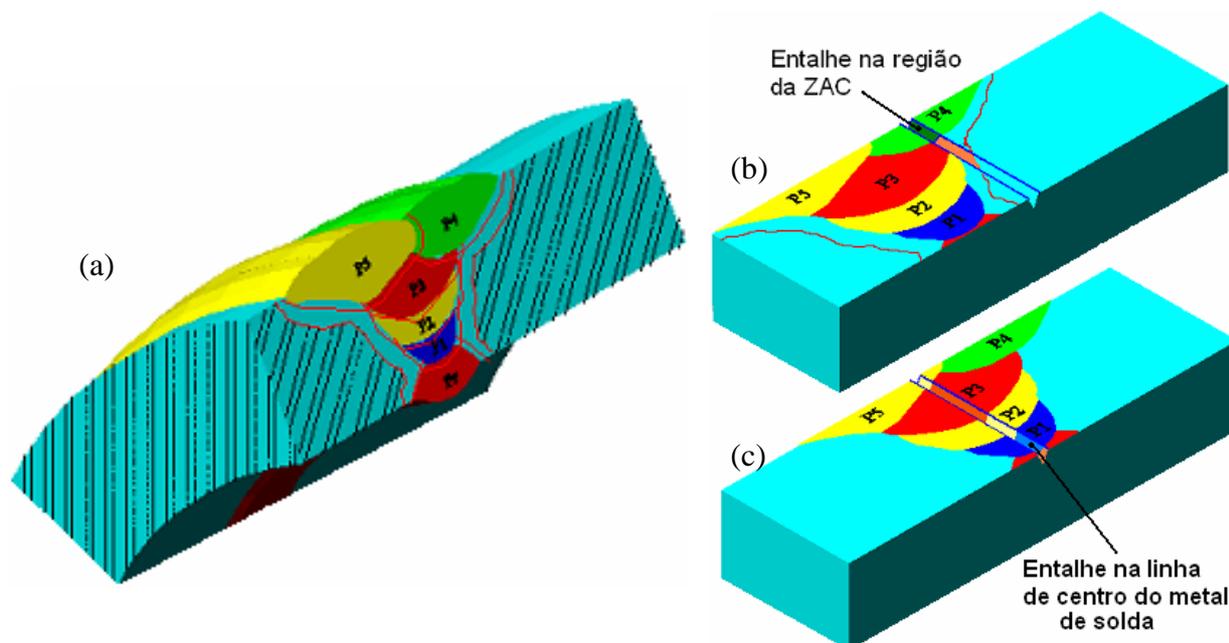


Figura 2: Posicionamento do entalhe dos corpos de prova charpy na seção transversal da junta.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de justificar a elevada dispersão dos resultados de tenacidade, que puderam ser observados na tabela 1, foram estudadas as diferentes microestruturas presentes no metal de solda e na ZAC (Zona Afetada pelo Calor) das juntas soldadas.

A análise micrográfica foi direcionada para as regiões da junta exatamente no local onde foram posicionados os entalhes do ensaio charpy, ou seja, na região central do CS e na região da ZAC. Na figura 2 podem ser observadas a seção transversal da junta soldada (a), a disposição da junta soldada em relação ao corpo de prova charpy e a localização do entalhe no referido corpo de prova tanto na região da ZAC (b) como na região do metal de solda (c).

No presente estudo não foram consideradas as microestruturas do passe de raiz e dos passes P4 e P5. Estes passes foram parcialmente removidas na usinagem do corpo de prova charpy, como pode ser observado na figura 2b e 2c e figura 3.

Considerando que não foi observado diferença nos resultados de tenacidade entre as amostras soldadas com pré-aquecimento de 100°C e as amostras soldadas a temperatura ambiente, bem como também não foram observadas diferenças micro e macroestruturais, decidiu-se analisar apenas as amostras soldadas à temperatura ambiente.

Para melhor entendimento desse trabalho, primeiramente serão apresentados e discutidos os resultados da correlação entre microestruturas e tenacidade da zona afetada pelo calor (ZAC), em seguida os resultados para o cordão de solda (CS).

3.1 Região da ZAC

A região da junta soldada que foi avaliada nos ensaios charpy para mensurar a tenacidade da zona afetada pelo calor (ZAC) é composta de diferentes macroestruturas. A figura 3 destaca a posição de quatro regiões distintas que foram consideradas para análise da ZAC. Devido o formato da junta ser do tipo em V, o entalhe charpy abrangeu as microestruturas tanto da ZAC de grãos grosseiros, como da ZAC de grãos refinados, além da microestrutura do metal de solda e do metal de base. As proporções dessas regiões, na posição do entalhe, variaram de um Corpo de Prova (CP) para outro, ou seja, as proporções do Metal Base (MB) e Metal de Solda (MS) não foram constantes. Do ponto de vista macroscópico, essa fonte de variabilidade por si só já seria suficiente para justificar o alto desvio padrão observado nos resultados dos ensaios de tenacidade da ZAC das juntas soldadas (vide tabela 2), pois cada uma dessas regiões apresenta características mecânicas distintas.

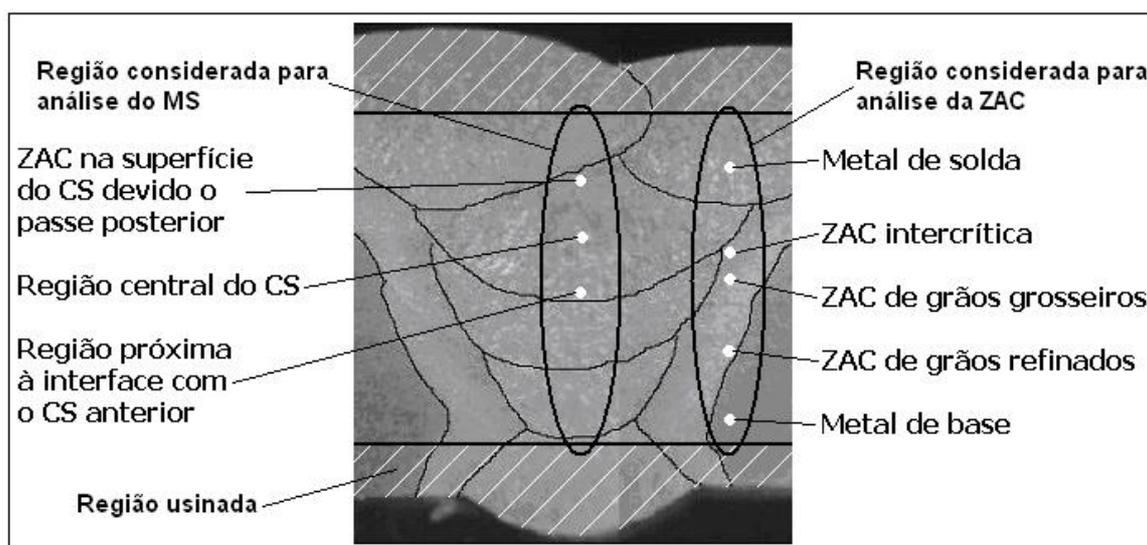


Figura 3: regiões analisadas metalograficamente no MS e na ZAC

Uma mesma microestrutura compõe toda a região da ZAC, mas devido as diferentes velocidades de resfriamento, esta microestrutura se apresentou de forma grosseira e também de

forma refinada. Além disso, como se trata de uma solda de múltiplos passes, observou-se também a presença de uma zona intercrítica onde a microestrutura da ZAC foi reaquescida devido ao passe posterior. A presença de uma microestrutura obtida com diferentes velocidades de resfriamento contribuiu para a elevada dispersão dos resultados de tenacidade. Na figura 4 são apresentadas micrografias representativas das diferentes regiões da ZAC: Região de grãos grosseiros (A), região de grãos refinados (B), ZAC intercrítica, ou seja, a região da ZAC de microestrutura reaquescida (C) e metal de base (D).

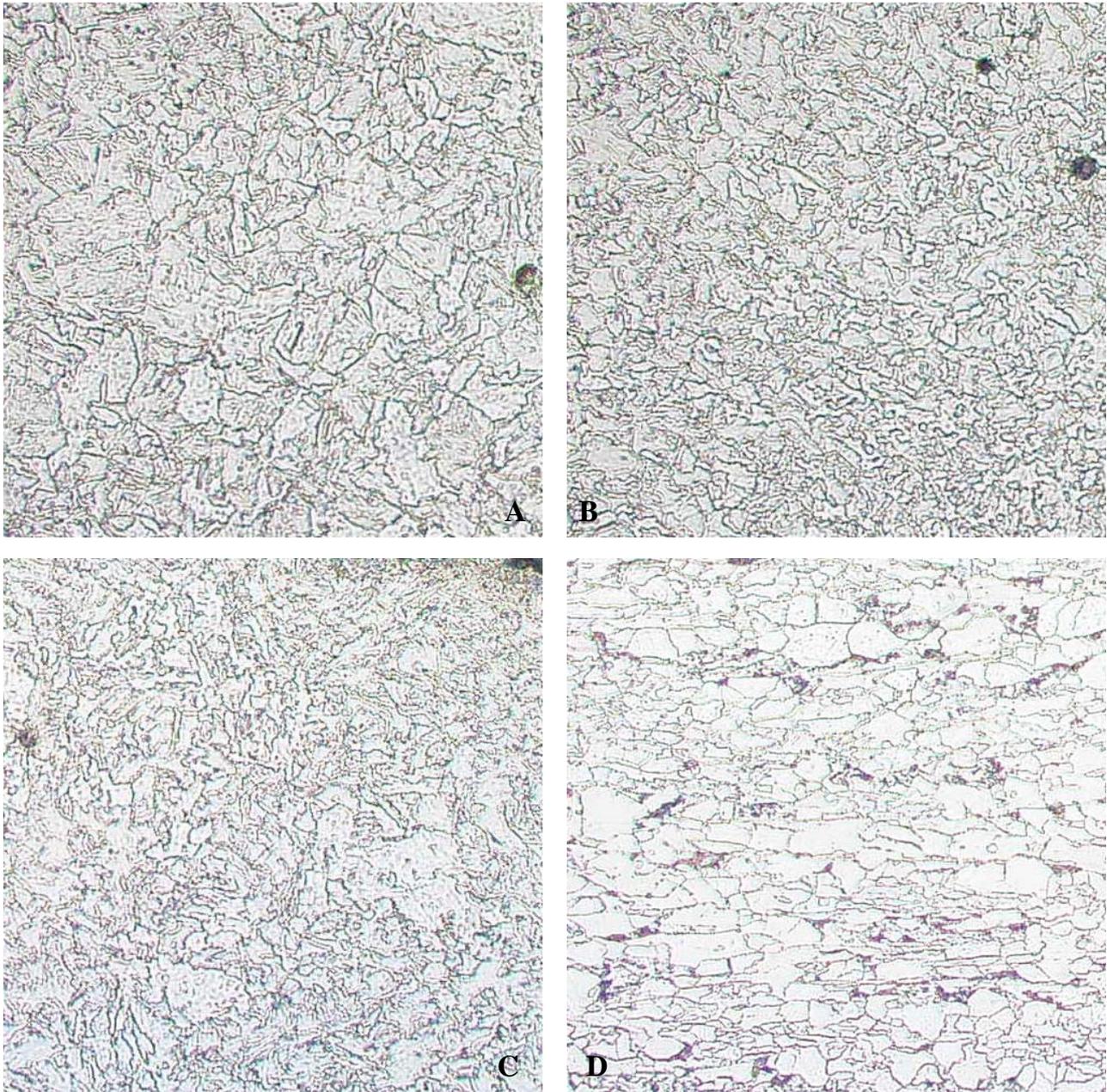


Figura 4: ZAC de grãos grosseiros (A), ZAC de grãos refinados (B), ZAC intercrítica (C) e metal base (D).
Aumento de 500X

De acordo com Dixon & Hakansson⁶, Fairchild⁷ e Siewert & Trevisan³, o ideal, para minimizar a dispersão dos resultados de tenacidade, seria trabalhar com o chanfro em semi-V onde a ZAC seria melhor avaliada, pois com o chanfro em semi-V é possível posicionar o entalhe charpy apenas na ZAC.

3.2 Região do Metal de Solda

O fato de se ter trabalhado com mais de um passe de solda em uma mesma junta resultou em um metal de solda com diferentes macro e microestruturas. Três regiões distintas puderam ser destacadas para a análise do metal de solda. A localização dessas regiões pode ser observada na figura 3. As três regiões destacadas apresentam morfologias distintas, mas cada uma se repete de forma semelhante nos passes P1, P2 e P3.

A primeira região se localiza na parte inferior do Cordão de Solda (CS), a segunda no centro do CS e a terceira é uma zona termicamente afetada na superfície de cada CS formada devido o passe posterior. Estas regiões específicas foram definidas em função da microestrutura observada, onde, na parte inferior do MS pôde-se observar a presença de grãos colunares, no centro do MS houve a formação de grãos equiaxiais e na superfície, grãos mais refinados. Esse processo também gera uma ZAC na superfície dos passes de solda anteriores e promove mudanças microestruturais no MS já depositado devido o alto aporte térmico dos passes subsequentes.

Na região da parte inferior do CS, mostrada de maneira representativa na microestrutura da figura 5, pode-se observar a predominância do microconstituente ferrita acicular (AF), essa microestrutura compõe a região de crescimento colunar do cordão de solda e é caracterizado por altas taxas de resfriamento e fluxo de calor mais direcional, o que favorece a formação dos grãos colunares. Santos Neto² e Davis & King⁸ também observaram esse microconstituente.

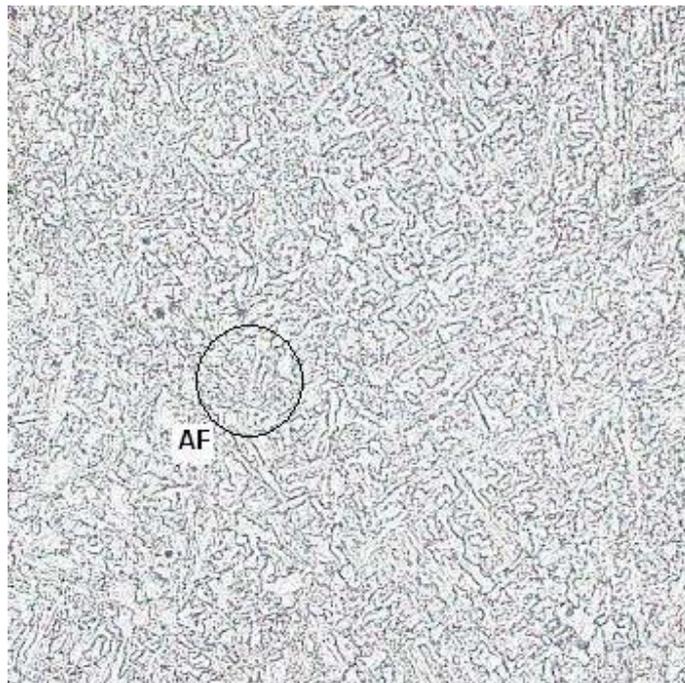


Figura 5: Ferrita acicular (AF). Parte inferior do CS, aumento de 500X.

A micrografia representativa apresentada na figura 6 caracteriza a região do centro do CS. A referida microestrutura apresenta ferrita de contorno de grão (GF) que, provavelmente, originou-se no contorno de grão da austenita primária ou austenita retida (AR). O que também foi observado por Santos Neto² e Davis e King⁸.

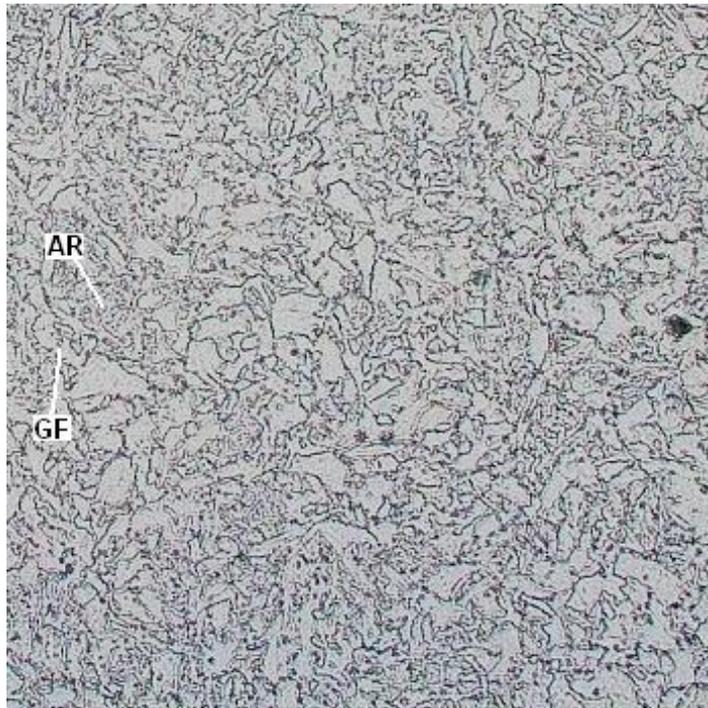


Figura 6: Ferrita de contorno de grão (GF) e austenita retida (AR). Parte intermediária , aumento de 500X.

Na figura 7 são caracterizadas microestruturas observadas na região da parte superior do cordão de solda. Ferrita de contorno de grão (GF), ferrita acicular mais refinada (AF) e ferrita com fase secundária alinhada (AC), o que está de acordo com as observações de Abson⁹ e Santos Neto².

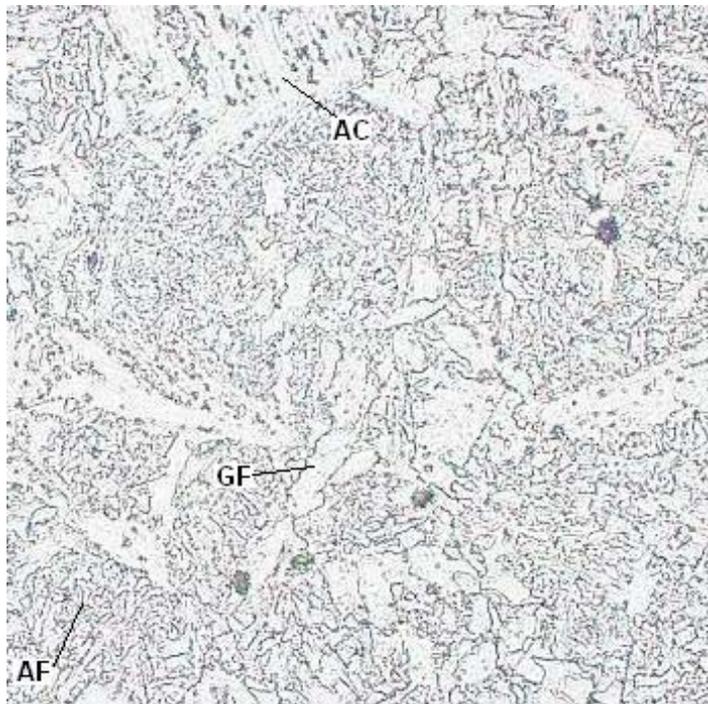


Figura 7: Ferrita de contorno de grão (GF), ferrita acicular mais refinada (AF) e ferrita com segunda fase alinhada (AC). Parte superior , aumento de 500X

Também observou-se visualmente que todos estes microconstituintes não se apresentaram nas mesmas proporções nos diversos passes de solda e que, a quantidade da microestrutura variou provavelmente devido a diferentes velocidades de resfriamento do metal de solda. Apesar das afirmações do Easterlig⁵ descritas na introdução deste trabalho, de que múltiplos passes melhoram a

tenacidade da junta soldada, certamente essas variações de proporções das microestruturas ao longo dos cordões de solda e a presença de diferentes microestruturas promoveram uma elevada dispersão nos resultados dos ensaios de tenacidade.

4. Conclusões

Baseado nos experimentos realizados pôde-se concluir que:

No processo de soldagem multipasse de aço API 5L-X80 com arame tubular com proteção gasosa AWS E71T-1, o uso de temperatura de pré-aquecimento e de interpasse de 100°C não apresentou mudança micro e macroestrutural significativa comparado com as soldas feitas a temperatura ambiente.

Devido o tipo de chanfro, a região analisada da ZAC apresentou uma grande diversidade macroestrutural, o que já seria suficiente para justificar a dispersão nos resultados de tenacidade da ZAC.

A presença de uma microestrutura obtida com diferentes velocidades de resfriamento contribuiu para a elevada dispersão dos resultados de tenacidade tanto para a região da ZAC como para o metal de solda.

No metal de solda foram identificadas três regiões diferentes para cada cordão, cada uma dessas regiões apresentou uma microestrutura característica, bem como uma não regularidade das proporções destas microestruturas. O que torna as propriedades mecânicas de juntas multi-passes susceptíveis à elevados desvios padrões.

5. Agradecimentos

A CAPES pelo apoio financeiro.

Ao Msc. Robert Eduardo Cooper Ordóñez pelos dados necessários para dar suporte a este estudo.

6. Referências Bibliográficas

- 1 – ORDÓÑEZ, R. E. C. **Soldagem e Caracterização das Propriedades Mecânicas de Dutos de Aço API 5L-X80 com Diferentes Arames Tubulares.** 2004. 111 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas
- 2 – SANTOS NETO, N. F. **Caracterização de soldas em aço API-5L com diferentes arames tubulares e temperaturas de preaquecimento.** 2003. 87p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- 3 – SIEWERT, T.A. , Trevisan, R.E. e Purtscher, P.T. - "Fusion Line Shape Versus Toughness in Hy-80 GMA Welds ". Publicado pelo National Bureau of Standards (NBSIR 86 - 3043)- Boulder - Colorado - USA - abril de 1986.
- 4 – LOUREIRO, A. J. R. Effect of heat input on plastic deformation of undermatched welds. **Journal of Materials Processing Technology**, 128, p. 240-249, 2002.
- 5 – EASTERLING, K.E. **Introduction to the physical metallurgy of welding.** 1st ed. Butter Worths & Co Ltd, 1983. 231 p.

6 – DIXON, B., HAKANSSON, K. Effects of welding parameters on weld zone toughness and hardness in 690 MPa steel. **Welding Journal**, v. 74, n. 4, p. 122-132, Apr. 1995.

7 – FAIRCHILD, D. P., et al. A study concerning intercritical HAZ microstructure and toughness in HSLA steels. **Welding Journal**, 321-329, Dec. 1991.

8 – DAVIS, C. L., KING, J. E. Effect of cooling rate on intercritically reheated microstructure and toughness in high strength low alloy steel. **Materials Science and Technology**. V. 9, p. 8-15, Jan. 1993.

9 – ABSON, D. J. Microstructure and mechanical properties of gas-shielded welding of C-Mn-Ni steel. **Welding Journal**, 173-187, May. 1993.

RELATION BETWEEN MICROSTRUCTURE AND TOUGHNESS IN API X80 WELDED IN MULTIPLE PASSES

Francisco Edson Nogueira Fraga

E-mail: nfraga@fem.unicamp.br

Roseana da Exaltação Trevisan

E-mail: roseana@fem.unicamp.br

Mechanical Engineering Faculty

State University of Campinas

CP: 6122

CEP: 13083-860

Campinas, S.P. – Brazil

Abstract: *Previous studies, carried out by the welding group of the Mechanical Engineering Faculty at UNICAMP, have shown a great dispersion in the values of toughness obtained by Charpy tests in different regions of API X-80 pipe joints welded by flux-cored arc welding. This paper shows that a correlation exists between the toughness values and the microstructure in the different regions of the welded joints. In the investigation, welded joints obtained with tubular wire AWS E71T-1 were analyzed. Welds were carried out either with a preheating of 100°C or at room temperature. The joints were formed by six-fold weld beads. Samples were prepared by conventional metallography and analyzed by optical microscopy. The microstructures were identified and through this qualitative study, it was possible to justify the great dispersion of the results obtained in the toughness tests.*

Keywords: *Toughness, Microstructure, Welding, API Steel.*