

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS MICRO E MACRODUREZA DE JUNTAS DE AÇO API 5L-X80 SOLDADAS COM ARAME TUBULAR

Robert Eduardo Cooper Ordoñez

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP, Brasil

E-mail - recooper@fem.unicamp.br

José Hilton Ferreira da Silva

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP, Brasil

E-mail - jhilton@fem.unicamp.br

Roseana da Exaltação Trevisan

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP, Brasil

E-mail - roseana@fem.unicamp.br

Resumo. *O trincamento em soldas de dutos é função de um número de variáveis, entre elas, duas das mais importantes são: a dureza (ou nível de resistência do material) e o nível de tensões residuais. Os ensaios de dureza são amplamente usados para avaliação de materiais e, por ser uma propriedade de fácil medição. Entretanto, poucos estudos têm sido realizados analisando o comportamento de juntas de dutos quando soldadas pelo processo a arco com arame tubular (FCAW). Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento da dureza em juntas do aço de alta resistência e baixa liga API 5L X-80, para aplicações em dutos. Como variável de influência foi utilizada a temperatura de preaquecimento em três níveis, para dois tipos de arames tubulares, autoprotégido E71T8-K6 e com proteção auxiliar de gás E71T-1. Inicialmente foram feitas medições de microdureza. Posteriormente, devido ao alto grau de dispersão, o comportamento da dureza foi analisado através de medições de macrodureza. Um Planejamento Aleatorizado por Níveis, para um Modelo de Efeitos Fixos (PAN-MEF) foi usado para análise dos resultados. Os resultados mostraram que o preaquecimento não afetou significativamente o comportamento da junta e que o resultado do ensaio de macrodureza foi mais representativo para a avaliação da dureza das juntas.*

Palavras chave: *Aço API 5L-X80, Arame Tubular, Dureza.*

1. INTRODUÇÃO

Com a atual tendência em incrementar o limite de resistência dos aços para dutos e transportar fluidos cada vez mais corrosivos, a análise do comportamento das juntas soldadas de dutos em campo torna-se um tema de grande interesse. O processo de soldagem pode induzir à formação de zonas com elevadas durezas ou concentração de esforços residuais, fazendo com que as soldas sejam particularmente susceptíveis ao trincamento. É sabido que os aços com níveis de dureza elevados são mais susceptíveis ao trincamento do que os aços com níveis de dureza baixos. Mesmo que não seja o único parâmetro, o controle da dureza oferece um guia para determinar requisitos de dutos em serviço. Os processos utilizando arames tubulares vêm se apresentando como uma

alternativa para a soldagem de dutos. Em função dos requisitos estabelecidos pelas normas API, a soldagem com arames tubulares pode apresentar melhor qualidade e melhor produtividade, quando comparados com o processo tradicionalmente utilizado na soldagem de dutos – soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW). No entanto, poucas informações científicas estão disponíveis sobre as propriedades das juntas e os parâmetros de soldagem adequados para o real aproveitamento do processo. O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento da dureza em juntas de dutos de aço da classe API 5L-X80 soldadas com diferentes arames tubulares e três diferentes níveis de temperaturas de preaquecimento, utilizadas também como temperatura de interpasso. Ainda neste trabalho é feita uma avaliação sobre a utilização dos métodos de ensaio de microdureza e macrodureza.

2. REVISÃO TEÓRICA

A busca por maior produtividade, na indústria petroquímica, tem levado pesquisadores e produtores ao desenvolvimento de novos aços e, conseqüentemente, a novas alternativas para sua soldagem. Dentre estas alternativas, a soldagem a arco com arames tubulares (FCAW) em substituição à soldagem a arco com eletrodos revestidos tem se mostrado bastante promissora (Mota, 1998). Na soldagem de dutos, o processo FCAW tem sido usado, em alguns casos, combinado com o processo de soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW), como apresentado por Silva et al. (2001) e Martawibawa (2002).

Segundo Jones & Luo (1990), com o aumento dos requisitos para as propriedades mecânicas dos aços modernos, a necessidade de controle das temperaturas no processo de soldagem aumentou. O preaquecimento do material busca principalmente minimizar sua susceptibilidade à aparição de trincas a frio, porém esse procedimento afeta a microestrutura resultante da junta soldada e conseqüentemente suas propriedades mecânicas. A temperatura de preaquecimento depende de vários fatores: Composição química e propriedades físicas do metal de base, energia de soldagem, tipo de eletrodo, e espessura do metal base. Para calcular a temperatura de preaquecimento é preciso obter o valor do Carbono Equivalente (CE).

Desde a publicação da primeira fórmula para calcular o CE por Dearden & O'Neill em 1940, um grande número de fórmulas similares têm sido publicadas. Essas fórmulas têm evoluído, sendo utilizadas na prática como um indicador da soldabilidade do material ou como indicador do nível de endurecimento da ZTA na junta. A maioria delas são estabelecidas através de relações empíricas e têm validade limitada dependendo da composição química, sendo aplicáveis somente à classe de aço para a qual foram desenvolvidas. Dixon & Hakansson (1995), comentam que o problema das fórmulas estabelecidas para calcular o CE é que a maioria delas foi desenvolvida entre os anos de 1950 até 1980, e por tanto, são referidas aos aços desenvolvidos nessa época. A maioria das fórmulas não considera, por exemplo, a influencia de pequenas quantidades de elementos de liga como Nb, B e N, utilizados nas composições dos aços modernos.

Segundo a norma API 5L (2000), para os aços de classificação API, duas são as fórmulas sugeridas para o cálculo da temperatura de preaquecimento. A primeira, que é uma das mais empregadas para determinar a soldabilidade de um aço, é a do carbono equivalente (CE), determinada pelo *International Institute of Welding* (IIW). A outra, que é um método para a avaliação do potencial do aço para formar trincas por hidrogênio, é determinada através do cálculo do Pcm (*weld metal cracking Parameter*). A primeira fórmula é válida para aços com alto conteúdo de carbono, superior a 0,12%, e a segunda é válida somente para aços com baixo conteúdo de carbono, igual ou inferior a 0,12%.

Yurioka (2002), realizou uma comparação de quatro métodos utilizados para o cálculo da temperatura de preaquecimento em aços estruturais de conteúdo de carbono entre 0,034% até 0,234%, incluindo aços ARBL para dutos da classe API 5L-X80. Estes quatro métodos foram: a) o método da *British Standard Institution*, BS 5135, baseado no valor do CE (IIW), b) o método da *American Welding Society* (AWS D1.1) que calcula a temperatura mínima de preaquecimento por meio do Pcm, c) o método do CET que calcula a temperatura mínima de preaquecimento como

função do seu CE, espessura do material, hidrogênio difusível no metal de solda e a energia de soldagem, e d) o método do CE_N. Ele concluiu que, para o aço API 5L X80, os métodos da AWS e CE_N são mais apropriados, não sendo necessário à utilização de temperatura de preaquecimento. Ele concluiu, também, que os métodos *British Standard Institution* e CET são extremamente conservadores. Segundo esses dois métodos, na soldagem do aço API 5L X80 se faz necessário o preaquecimento.

A dureza de um metal é comumente relacionada com a resistência à deformação por penetração. Como afirmado por Linnert (1994), a dureza e o limite de resistência estão correlacionados. Segundo Bruno (2003), na medição da dureza de juntas de dutos são normalmente usados os ensaios de macrodureza Brinell, Rockwell ou Vickers. O primeiro é mais utilizado em medições no campo e os dois últimos são empregados em nível de laboratório. Os ensaios de microdureza podem ser do tipo Vickers ou Knoop, e são usados para avaliação de pequenas áreas.

A dureza da junta soldada pode apresentar vários comportamentos, dependendo dos ciclos térmicos impostos durante a soldagem, da composição química dos metais de adição e da equivalência entre as propriedades mecânicas do metal de adição e o metal de base. Esta diferença de comportamento pode ser verificada em alguns trabalhos referentes ao tema. Segundo Mohandas, Reddy & Kumar (1999), os aços ARBL, quando soldados, tendem a perder dureza na zona termicamente afetada pelo calor (ZTA). Esta região exibirá baixa dureza e, por tanto, baixa resistência. Tsay, Chen & Chan (2001), manifestaram que, de forma geral, a ZTA (especialmente na zona adjacente à linha de fusão) é endurecida como consequência do processo de soldagem. Trevisan et al. (2002), estudando o efeito da temperatura de interpasso na microdureza do aço API 5L X65, soldado com arame tubular, encontraram que o maior valor de dureza na junta apresentou-se na região dos cordões de solda (CS).

3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

O metal de base utilizado para o desenvolvimento experimental deste trabalho foi o aço API 5L-X80 (API 5L, 2000). O material foi recebido na forma de anéis de tubos com as seguintes dimensões: diâmetro externo de 762 mm e espessura de 16 mm. A composição química e as propriedades mecânicas do material, fornecidas pelo fabricante, estão mostradas na Tab. (1). Este aço pertence a um dos novos sistemas Nb-Cr-Mo, utilizados para a produção de aços ARBL no Brasil (Kojima, Sampaio & Bott, 2002).

Tabela 1. Composição química e propriedades mecânicas do aço API 5L-X80.

Composição Química (% em peso)								
C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V
0,04	0,17	1,75	0,019	0,004	0,032	0,01	0,073	0,005
Ti	Cr	Ni	Mo	N	B	Ca	Sb	CE (Pcm)
0,013	0,21	0,02	0,16	0,0035	0,0002	0,0014	0,01	0,156
Propriedades Mecânicas								
Limite de Escoamento L _E (MPa)		Limite de Resistência L _R (MPa)		Alongamento - ε (%)		Dureza (HV10)		
561		674		27		206		

Foram utilizados como metal de adição dois diferentes arames tubulares, o autoprotetido E71T8-K6 (AWS A5.29-98), e o arame com proteção auxiliar de gás E71T-1 (AWS A5.20-95), os diâmetros foram de 1,7 mm e 1,6 mm respectivamente. O gás de proteção usado com o arame E71T-1 foi o CO₂ com vazão de 14 l/min. A Tabela (2) apresenta as propriedades mecânicas dos arames tubulares, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 2. Propriedades mecânicas dos arames tubulares.

Propriedades Mecânicas				
Arame	L_E (MPa)	L_R (Mpa)	ε (%)	Dureza (HV)
E71T8-K6	420	525	25	159
E71T-1	558	607	27	185

Como pode ser observado, comparando-se a Tab. (1) com a Tab. (2), as resistências mecânicas dos arames são inferiores às do metal de base. A seleção dos arames baseou-se no fato do metal de base possuir L_E maior do que 485 MPa, o que permite a seleção de arames tubulares com resistência menor que a do metal de base, utilizando a técnica conhecida como *undermatched* (Miller, Hietpas & Depue, 2002).

As soldas foram realizadas no LabSolda da UNICAMP. Foi usada uma célula composta por uma central de soldagem a arco microprocessada, multiprocessos e sinérgica “MTE Digitec 450/600”, um suporte para fixação da tocha e um dispositivo mecânico para girar o tubo, equipado com um inversor de frequência para controle da velocidade. A central de soldagem foi ajustada no modo tensão constante com corrente contínua com eletrodo negativo para o arame autoprotetido, e em corrente contínua com eletrodo positivo para o arame com proteção auxiliar de gás.

Os ensaios experimentais consistiram na soldagem circunferencial dos tubos. As juntas foram produzidas em soldas de topo, posição plana (1G), com a tocha fixa, perpendicular ao plano tangente dos tubos, que giravam sobre um dispositivo mecânico. A configuração do chanfro foi definida baseado no comportamento de cada arame sobre a penetração axial e a influência da dilatação térmica sobre a abertura da raiz. Foi definida uma junta de topo em “V” simples, tendo ângulo de chanfro total de 60°. Para a soldagem com o arame E71T-1 a abertura de raiz foi 1,2 mm e altura do nariz de 1,0 mm, enquanto para o arame E71T8-K6 a abertura de raiz foi 1,6 mm e altura do nariz de 2 mm.

Para a soldagem com os diferentes eletrodos foi adotado como valor de controle a energia nominal de soldagem (E_s) gerada pelo arco. A energia de soldagem é calculada em função da corrente (I), da tensão (U) e da velocidade de soldagem (V_s), como mostrado na Eq.(1).

$$E_s = \frac{60 \cdot I \cdot U}{1000 \cdot V_s} \quad (1)$$

A corrente e tensão de soldagem foram monitoradas por um sistema de aquisição computadorizado, constituído de uma placa A/D e do Software Oscilos4.

O preaquecimento foi realizado com chama de oxiacetileno. O monitoramento e aquisição dos ciclos térmicos de soldagem foram realizados por um sistema composto com um microcomputador, um programa Aqdados da Lynx Technology, com uma placa de conversão A/D, e um termopar mineral “Tipo K” com um diâmetro de 1,6mm, localizado na região da ZTA de cada junta soldada.

Para medir a microdureza foi utilizado um microdurômetro, marca BUEHLER, digital, com carga de 500 gf, preparado para medir microdureza Vickers e equipado com penetrador piramidal de diamante com base quadrada, conforme previsto pela norma ASTM-E 384 (1999). O tempo de permanência da carga foi de 15 segundos para cada medição. Para medir a macrodureza foi utilizado um medidor de dureza Vickers/Brinell, modelo HPD250, marca HECKERT-WPM, análogo, com diâmetro de esfera de 2,5 mm e 62,5 Kgf de carga. O tempo de permanência da carga foi de 15 segundos para cada medição.

A preparação dos corpos de prova para análise de micro e macrodureza seguiu as recomendações da norma ASTM-E3 (2001). Em cada corpo de prova foi feito um ataque macrográfico para revelar a região dos passes ou cordão de solda (CS) e da zona afetada pelo calor (ZTA). O ataque químico foi realizado por imersão com reagente Nital 4% durante 30 segundos.

Medições foram feitas para cada passe da junta considerando que os mesmos apresentam características metalúrgicas diferentes entre eles. Cálculos preliminares determinaram que um

número total de 6 medições por passe era suficiente. As medições foram feitas em duas amostras ou réplicas da mesma condição. Na região do CS foram feitas medições dentro da área demarcada para cada passe, totalizando 36 medições nos seis passes. Na região da ZTA foram feitas 18 medições e no metal base (MB) foram feitas quatro medições. Todas as medições foram feitas de forma aleatória dentro de cada região. A macrografia da Fig. (1) apresenta o aspecto típico das regiões da junta onde foram feitas as medições de dureza. Para evitar a interferência de um tipo de medição de dureza no outro, primeiramente foram feitas as medições de microdureza, seguido de lixamento para apagar as marcas, e depois as medições de macrodureza.

Para analisar o efeito da temperatura de preaquecimento sobre a dureza nas três regiões da junta – CS, ZTA, MB – foi utilizado o planejamento aleatorizado por níveis com um único fator, usando o modelo de efeitos fixos (Montgomery, 1996). Para todas as análises estatísticas deste trabalho foram adotados um nível de confiança de 95% e uma precisão (\cdot) da estimativa \cdot de 5%.

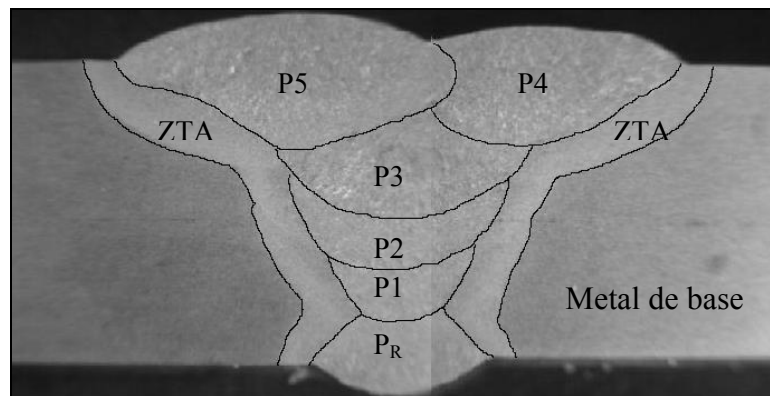


Figura 1. Macrografia representativa das regiões da junta e da sequência de passes.

4. RESULTADOS

A seleção das temperaturas de preaquecimento utilizadas nos ensaios baseou-se no estudo de Yurioka (2002). Os arames tubulares utilizados nos ensaios, possuem hidrogênio difusível entre 5 e 10 ml/100g. Assim, a temperatura ambiente (T_{amb}) foi escolhida considerando os métodos CE_N e da AWS, como a recomendada para este tipo de aço, já seleção da temperatura de 100 °C (T_{100}) corresponde ao método BS, que é o mais conservador dos quatro apresentados por Yurioka, enquanto a temperatura de 160 °C (T_{160}) foi escolhida atendendo a uma recomendação de um fabricante de arames, para soldagem de dutos em campo (Martawibawa, 2002).

As condições de soldagem foram definidas buscando-se a maior similaridade possível, entre os experimentos. Essa similaridade considerou a energia de soldagem (I , U , V_s), a estabilidade do arco e a realização dos cordões de solda com qualidade, em termos de ausência de defeitos. As Tabelas (3) e (4) apresentam as condições de soldagem definidas e utilizadas na soldagem dos tubos, para os arames E71T-1 e E71T8-K6 respectivamente e os diferentes passes.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem para o arame E71T-1, para os diferentes passes.

Condições de Soldagem	Temperaturas			
	T_{amb}	T_{100} e T_{160}	T_{amb} , T_{100} e T_{160}	T_{amb} , T_{100} e T_{160}
	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
DBCP (mm)	19	19	19	19
E_s (kJ/mm)	1,1	0,7	1,1	1,5

Tabela 4. Parâmetros de soldagem para o arame E71T8-K6, para os diferentes passes.

Condições de Soldagem	Temperaturas		
	Tamb, T100 e T160		
	P _R	P1	P2, P3, P4, P5
I (A)	110	170	230
U (V)	19	20	21
V _S (mm/min)	230	190	190
DBCP (mm)	25	25	25
E _S (kJ/mm)	0,6	1,1	1,5

A sequência de aplicação dos passes e o total preenchimento da junta podem ser observados na Fig. (1). Para cada junta soldada foram executados seis passes (cordões de solda). O primeiro passe ou passe de raiz (P_R) foi depositado na parte interna do duto e os cinco passes de enchimento na parte externa (P1, P2, P3, P4, P5).

Inicialmente foram realizados ensaios de microdureza *Vickers*. Os resultados obtidos apresentaram um alto grau de dispersão, razão pela qual optou-se por realizar medições de macrodureza, ou dureza *Brinell*. Os resultados do ensaio de microdureza são apresentados nas Tab. (5) e (6), para cada tipo de arame. Para facilitar a análise, estas tabelas apresentam as médias para cada conjunto de dados e seu desvio padrão entre parênteses. O MB apresentou um valor médio de 235,1 HV com desvio padrão de 12,3.

Tabela 5. Microdureza do cordão de solda e da ZTA. Arame E71T-1.

Temperatura (°C)	DUREZA HV (500 gf)						
	P _R	Passe 1	Passe 2	Passe 3	Passe 4	Passe 5	ZTA
Ambiente (18 - 25)	187,5	202,2	198,9	204,7	222	218,55	218,5
	(10,1)	(12,0)	(25,8)	(25,8)	(22,8)	(5,3)	(6,78)
100	178,2	227,1	223,5	220,2	228,1	229,1	207,7
	(18,1)	(20,6)	(10,2)	(15,5)	(7,9)	(19,0)	(12,9)
160	183,8	218,4	192,8	202	213,8	206,6	205,5
	(8,5)	(26,2)	(19,9)	(14,6)	(15,5)	(11,1)	(5,7)

Tabela 6. Microdureza do cordão de solda e da ZTA. Arame E71T8-K6.

Temperatura (°C)	DUREZA HV (500 gf)						
	P _R	Passe 1	Passe 2	Passe 3	Passe 4	Passe 5	ZTA
Ambiente (18 – 25)	205,2	205,9	207,9	205,1	225,1	229,2	209,4
	(13,8)	(18,1)	(12,9)	(17,4)	(15,3)	(10,9)	(13,77)
100	208,2	222	200,1	184	215,8	222	204,2
	(17,4)	(4,8)	(4,0)	(11,1)	(7,6)	(7,0)	(15,2)
160	196,1	214	206,1	200,5	213,7	225,5	207,1
	(9,3)	(8,6)	(11,5)	(7,3)	(5,2)	(6,5)	(6,1)

Analisando os valores de microdureza correspondentes ao CS (formada pelos 6 passes) e ZTA, apresentados nas duas tabelas anteriores, pode ser visto que não existe uma tendência clara

para descrever o comportamento da dureza, quando influenciada pela temperatura de preaquecimento. Os desvio padrão das medições apresentaram valores altos, portanto, através do ensaio de microdureza não pode ser definida uma tendência do comportamento da dureza. Muito provavelmente estes resultados estão relacionados com o alto grau de dispersão proveniente das medições, o qual é produto das transformações microestruturais resultantes, decorrentes dos ciclos térmicos ocasionados pelo processo de soldagem. A dureza dos diferentes constituintes individuais da microestrutura polifásica ocasiona esta dispersão. Esse resultado está de acordo com o apresentado por Linnert (1994), segundo o qual, as medições de microdureza podem variar consideravelmente dependendo da natureza da microestrutura e a área onde é localizado o indentador para medir a dureza. Bruno (2003), também afirmou que os ensaios de microdureza são utilizados para avaliar pequenas áreas de juntas em dutos, mas o seu significado ainda continua causando controvérsia por causa da dispersão nos resultados.

Os resultados da análise estatística dos valores obtidos do ensaio de microdureza mostraram que a temperatura de preaquecimento não tem influência no comportamento da dureza de cada passe do CS e da ZTA.

Os resultados do ensaio de macrodureza são apresentados nas Tab. (7) e (8), para cada tipo de arame. Para facilitar a análise, estas tabelas apresentam as médias para cada conjunto de dados e seu desvio padrão entre parênteses. O MB teve um valor médio de 218 HB com desvio padrão de 9,5.

Tabela 7. Macrodureza do cordão de solda e da ZTA. Arame E71T-1

Temperatura (°C)	DUREZA HB (62,5 kgf)						
	P _R	Passe 1	Passe 2	Passe 3	Passe 4	Passe 5	ZTA
Ambiente (18 – 25)	187,2 (7,55)	198,8 (4,83)	191,2 (9,24)	191,2 (6,94)	209,2 (9,24)	214 (9,06)	221,0 (10,69)
100	176,3 (3,50)	202,7 (8,38)	200,2 (9,75)	193,2 (9,37)	212 (6,93)	221,8 (7,91)	204,0 (4,52)
160	200 (3,10)	196,3 (9,50)	186,5 (8,67)	189,2 (9,33)	198,8 (4,83)	211,8 (8,26)	201 (9,93)

Tabela 8: Macrodureza do cordão de solda e da ZTA. Arame E71T8-K6.

Temperatura (°C)	DUREZA HB (62,5 kgf)						
	P _R	Passe 1	Passe 2	Passe 3	Passe 4	Passe 5	ZTA
Ambiente (18 – 25)	186 (5,90)	193,3 (3,61)	190,2 (4,83)	198,8 (7,39)	209,3 (5,16)	224 (5,59)	201,0 (8,91)
100	191,5 (8,07)	208,7 (8,16)	189,2 (5,23)	184,2 (9,02)	209,7 (7,84)	211 (7,67)	198 (7,73)
160	197,8 (4,12)	191,2 (4,12)	190 (2,45)	185,2 (7,28)	208,5 (10,11)	213 (5,90)	191 (6,75)

Os resultados do ensaio de macrodureza mostraram um grau menor de dispersão nas medições feitas. As tendências do comportamento da dureza nas diferentes regiões da junta, isto é, cordão de solda (CS), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de base (MB), mostraram que a dureza do MB foi maior do que a dureza na ZTA e esta, por sua vez maior do que no CS, como pode ser

observado no gráfico apresentado da Fig. (2). Mesmo que a dureza no MB tivesse a tendência de ser maior que no CS e ZTA, ainda os valores medidos nas três regiões não são considerados críticos.

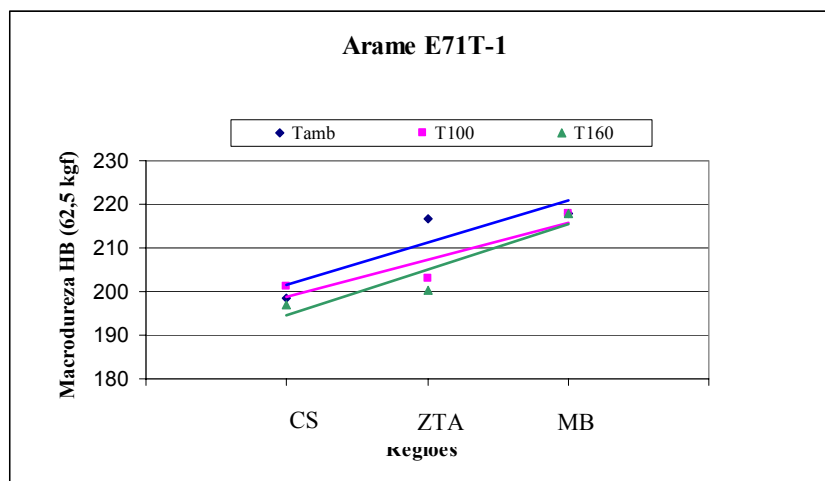


Figura 2. Gráfico típico da tendência do comportamento da dureza nas regiões da junta.

Analisando os valores correspondentes à região do CS (formada pelos 6 passes) e ZTA, apresentados nas duas tabelas anteriores, percebe-se que os passes superiores (passes 4 e 5) tiveram a tendência de serem mais duros do que os outros passes. Esse comportamento também foi observado por Tsay et al. (2001), em soldas realizadas em tubos de aço API 5L X65. No experimento, essa tendência apresentou-se em todas as condições analisadas. Já o comportamento da dureza na ZTA, tendendo a diminuir com o aumento da temperatura de preaquecimento foi observado por Eroglu & Aksoy (2000), para aços de baixo conteúdo de carbono. Esse comportamento também foi observado por Trevisan et al. (2002), em soldas de múltiplos passes de juntas de aço API 5L X65, ao afirmarem que o aumento da temperatura de preaquecimento causa um aumento na energia de soldagem do sistema, propiciando tempos maiores para o resfriamento, o que causa transformações de fases com tamanhos de grão grande, ocasionando diminuição no valor da dureza na ZTA.

Os resultados da análise estatística dos valores obtidos pelo ensaio de macrodureza mostraram que a temperatura de preaquecimento tem influência no comportamento da dureza de cada passe do CS e na ZTA. Este resultado está mais de acordo com o comportamento indicado na literatura. Através dos resultados obtidos no ensaio de macrodureza foi possível registrar essas diferenças, ao contrário do que aconteceu com o ensaio de microdureza.

5. CONCLUSÕES

Baseado nos resultados experimentais obtidos, neste trabalho, pode-se concluir que:

- Em todos os casos, o metal de base apresentou uma maior dureza que as outras regiões das juntas soldadas.
- Os resultados das medidas de macrodureza mostraram que com o aumento da temperatura de preaquecimento ocorre uma tendência de diminuir a dureza da junta na região do cordão de solda e na zona termicamente afetada, independentemente do arame utilizado.
- O comportamento da dureza na junta, influenciada pela temperatura de preaquecimento, foi melhor caracterizado pelo ensaio de macrodureza.
- As medidas dos ensaios de microdureza apresentaram um alto grau de dispersão, o que mostrou ser este teste inapropriado para avaliar a dureza de juntas de aço API 5L-X80.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fapesp e ao CNPq pelo auxílio financeiro, que foram de fundamental importância para o desenvolvimento desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing Materials, 2001, “ASTM E 3-01: standard guide for preparation of metallographic specimens”. Philadelphia, 12 p.
- American Society for Testing Materials, 1999, “ASTM E 384-99: standard test method for microindentation hardness of materials”. Philadelphia, 1999. 24 p.
- American Petroleum Institute, 2002, “API 5 L: Specification for Line Pipe” Washington, 42nd ed., 153 p.
- American Welding Society, 1995, “ANSI/AWS A5.20-95: Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding”. Miami, 33 p.
- American Welding Society, 1998, “ANSI/AWS A5.29-98: Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding”. Miami, 39 p.
- Bruno, T. V., 2003, “SSC Resistance of Pipeline Welds”, Disponível em: <http://www.metallurgical.com/publications/publication_23.pdf>. Acesso em: 11 agosto 2003.
- Dixon, B. and Hakansson, K., 1995, “Effects of welding parameters on weld zone toughness and hardness in 690 MPa steel”, Welding Journal, v. 74, n. 4, p. 122s-132s.
- Eroglu, M. and Aksoy, 2000, “M. Effect of initial grain size on microstructure and toughness of intercritical heat affected zone of a low carbon Steel”, Materials Science & Engineering: A. vol. A286, p. 289-297.
- Jones, J.E and Luo, Y., 1990, “Pre- and Post-Weld Heat Treatment” Welding: Theory and Practice, Elsevier, p. 293 – 323.
- Kojima, S. S., Sampaio, M. A. and Bott, I. S., 2003, “The development of API 5L-X80 steel for pipe production by the TMCR process”, TB Petroleum, n. 15, p. 68-70.
- Linnert, G. E., 1994, “Welding Metallurgy – Carbon and Alloy Steels”, 4th ed. Miami: American Welding Society, 940 p.
- Martawibawa, V., 2002, “Manual de soldagem duto Leste-Oeste China” Hobart Brothers, 28 p.
- Miller, D. K.; Hietpas, J. and Depue, R., 2002, “Welding FAQs. Welding Journal, v. 81, n. 12, p. 41.
- Mohandas, T; Madhusudan Reddy, G; Kumar, B. S., 1999, “Heat-affected zone softening in high-strength low-alloy steels”, Journal of Materials Processing Technology, v. 88, p. 284-294.
- Montgomery, D. C., 1996, “Design and analysis of experiments”, 4th ed. John Wiley & Sons, 704 p.

- Mota, C. A. M, 1998, “Níquel e manganês como controladores da tenacidade na soldagem com arames tubulares autoprotégidos”, Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 182p.
- Silva et al., 2001, “CT-19 Estudo de soldabilidade de tubos sem costura temperados e revenidos em aço API 5L X70 e X80”, In: Congresso Nacional de Soldagem. 27., CD-Rom, Campinas-SP.
- Trevisan, R. E. et al., 2002, “IPC02-27112 - Effect of interpass temperature on morphology, microstructure and microhardness of welded API 5L X65 steel”, In: International Pipeline Conference, CD-Rom, Calgary, Canada.
- Tsay, L. W., Chen, Y. C. and Chan, S. L. I., 2001, “Sulfide stress corrosion cracking and fatigue crack growth of welded TMCP API 5L X65 pipe-line steel”, International Journal of Fatigue. Volume: 23, Issue: 2, pp. 103-113.
- Yurioka, N., 2002, “Comparison of preheat predictive methods. IIW Document (IX-2025-02).

STUDY OF MICRO AND MACROHARDNESS BEHAVIOR OF API X80 PIPELINE JOINT WELDED WITH FLUX-CORED WIRE

Robert Eduardo Cooper Ordoñez

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

E-mail - recooper@fem.unicamp.br

José Hilton Ferreira da Silva

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

E-mail - jhilton@fem.unicamp.br

Roseana da Exaltação Trevisan

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

E-mail - roseana@fem.unicamp.br

Abstract: *Hydrogen Induced Cracking (HIC) occurs in pipeline welded due mainly to the combined presence of hardness, tensile residual stresses and Hydrogen absorbed during welding. Hardness tests are widely used to indicate the cracking susceptibility of the material. They are popular for being non destructive and easy to apply. Developments in steel manufacturing have constantly improved the pipe steel properties including hardness by changing composition and microstructure. Nevertheless few studies have been published on the mechanical properties of pipe joint welded by Flux Core Wire. The scope of this work is to study the hardness behavior of weld joints of API 5L X80 steel pipes welded by the Flux Cored Arc Welding Gas-Shielded Wire (AWS E 71 T-1) and the Flux Cored Arc Welding Self-Shielded Wire (AWS E 71T8-K6). Three different preheat and/or interpass temperatures were used (at room temperature, 100 °C and at 160 °C). All welding were carried out using automated FCAW, while keeping the same heat input. First microhardness tests were used, but due to the high scatter of the results, the macrohardness (Brinell) test was applied. Statistical analysis (analysis of variance) was used for the test design and the result interpretation. The obtained information, allowed to conclude that preheat and/or interpass temperatures have no influence on the hardness behavior of the weld joint. Results also showed that macrohardness tests are more appropriated for hardness evaluation in pipeline weld than microhardness tests.*

Key words: *API 5L-X80, Flux Cored Wire, Hardness.*