

ESTUDO COMPARATIVO DA SOLDABILIDADE DE AÇOS TEMPERADOS E REVENIDOS (T+R), E AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL) TIPO X80, SOLDADOS PELOS PROCESSOS MANUAL COM ELETRODO REVESTIDO E ARAME TUBULAR¹

Angel Rafael Arce Chilque²

Patrícia Sheilla Costa³

Rúbia da Silva Celina Rocha³

Alexandre Queiroz Bracarense⁴

Resumo

Um estudo do comportamento da microestrutura e das propriedades mecânicas de aços temperados e revenidos (T+R), ligados ao Cromo, Molibdênio e Vanádio, soldados pelo processo manual com eletrodo revestido (SMAW) e com níveis de energia de soldagem de 1500 J/mm foi efetuado e comparado com os resultados obtidos para o aço X80 soldado pelos processos SMAW e arame tubular (FCAW) robotizado. Para tal foi utilizadas técnicas de metalografia óptica e microdureza Vickers Hv no estudo da ZTA dos referidos aços. Nos aços (T+R) os testes foram realizados tanto no estado como soldado, quanto no estado após tratamento térmico de alívio de tensão a 600°C, e no aço X80 apenas como soldado. Os resultados mostram que os aços (T+R), após o tratamento térmico de alívio de tensões, apresentam em geral valores de dureza pouco maiores ou da mesma ordem de grandeza aos do aço X80. Isto indica que o aço X80 pode em determinadas circunstâncias substituir os aços (T+R) em certas estruturas em virtude da sua elevada resistência mecânica, com a vantagem de apresentar uma melhor soldabilidade e a um custo relativamente menor pelo fato de não precisar da operação de tratamento térmico de revenido ou de alívio de tensões após a soldagem.

Palavras-chave: Soldabilidade; Metalurgia da soldagem; Aço ARBL X80; Aços temperados e revenidos.

COMPARATIVE STUDY OF THE WELDABILITY OF STEELS QUENCHED AND TEMPERED (T + R), AND HIGH-STRENGTH STEEL AND LOW-ALLOY (HSLA) TYPE X80, WELDED BY MANUAL PROCESSES WITH SMAW AND FCAW

Abstract

A study of microstructure behavior and mechanical properties of quenched and tempered steels (T+R), alloyed with Chromium, Molybdenum and Vanadium, welded by manual process with coated electrodes (SMAW) and levels of welding energy of 1500 J / mm was made and compared with the results obtained for the X80 steel welded with SMAW and robot FCAW. Optical metallographic techniques and Vickers microhardness (Hv) were used for the HAZ study. In the Q+T steels, the tests were conducted in the as welded state and in the state after heat treating for stress relief at 600 ° C. In the X80 steel only as welded tests were performed. The results show that the Q+T steels after stress relief heat treatment, generally have hardness values somewhat larger or of the same order of magnitude as the X80 steel. This indicates that the X80 steel can replace the Q+T steels, in certain circumstances and in certain structures due to their high mechanical strength, with the advantage of improved weldability and a relatively low cost due to the fact that it do no need operation of tempering and stress relief after welding.

Key words: Weldability; Welding metallurgy; X80 HSLA mteel; Quenched and tempered steels.

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

² *Engenheiro metalúrgico. Dr. es Sc., Professor da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual de Minas Gerais/UEMG. João Monlevade, MG, Brasil.*

³ *Graduanda em Engenharia Metalúrgica da UEMG. João Monlevade, MG, Brasil.*

⁴ *Físico. PhD., Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. Belo Horizonte, MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Devido à grande demanda no setor siderúrgico, a cada dia novos aços têm sido desenvolvidos com o objetivo de atender a requisitos severos de resistência mecânica e tenacidade.

Os aços microligados são exemplos deste desenvolvimento e estão sendo empregados no campo estrutural, nas indústrias petrolíferas e navais como alternativa dos aços tratados termicamente (T+R) devido a apresentarem melhores características de tenacidade e níveis relativamente altos de resistência, e ainda melhor soldabilidade. As juntas soldadas dos aços microligados não precisam passar por tratamentos térmicos após soldagem para atingirem as características desejadas, como é o caso das juntas soldadas dos aços (T+R) que para atingirem propriedades mecânicas adequadas, precisam passar pelo tratamento térmico de revenido, elevando o custo de fabricação. Esses novos aços podem ser utilizados na fabricação de tubos de grandes diâmetros para transmissão do petróleo e gases, plataformas offshore, construção naval, indústria automotiva e outras estruturas metálicas e estas aplicações envolvem severas condições de operação, alta exigência de segurança e como em todo ramo, baixo custo.

Dessa forma o desenvolvimento da metalurgia desses aços torna-se cada vez mais importante, principalmente relacionado à soldabilidade. Gorni e Mei⁽¹⁾ afirmam que para melhorar a soldabilidade dos produtos soldados é necessária uma diminuição no teor de carbono do material e por isso esses novos aços microligados precisam passar por mecanismos de endurecimento que elimine a necessidade deste elemento.

As alternativas mais viáveis para conseguir um aço com baixo teor de carbono e que possua propriedades de resistência, tenacidade e soldabilidade adequadas seriam os aços endurecíveis por precipitação de cobre ou os aços bainíticos com extra-baixo carbono e microelementos. Dessa forma os aços microligados endurecíveis por precipitação ou os aços microligados bainíticos (Nb, V, Ti) apresentam um baixo teor de carbono, o que melhora a soldabilidade e ainda oferece boa resistência mecânica e tenacidade que são conseguidas através de adições de elementos de liga em baixa quantidade e processo de laminação controlada.

Assim os aços microligados são mais baratos por não precisarem passar por tratamentos térmicos após sua fabricação. Porém estes aços têm suas aplicações restritas devido ao pouco conhecimento sobre o assunto, sendo assim, este estudo torna-se necessário para se conhecer e controlar melhor a estrutura metalúrgica desses aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) soldados e em consequência as suas propriedades mecânicas e de uso. Além disso, é importante considerar o comportamento do metal de base quando soldado e ainda a utilização de processos de alta produtividade como o processo com Arame Tubular Robotizado (FCAW-Flux Cored Arc Welding) de forma a otimizar a soldagem, principalmente nos passes de enchimento e acabamento de juntas circunferenciais.

Por outro lado, num âmbito de estudo mais amplo da soldabilidade dos aços temperados e revenidos, foram elaborados aços sintéticos com uma composição de elementos de liga controlados, visando verificar a influência dos elementos de liga na soldabilidade dos mesmos.⁽²⁾

Dessa forma, este trabalho aborda de forma comparativa os estudos metalográficos e de microdureza feitos ao longo de juntas soldadas do aço API 5L X80 obtidas pelo processo FCAW robotizado e SMAW, comparando-os com

aqueles dos aços temperados e revenidos com teores controlados de Cr, Mo, Nb e V, soldados pelo processo manual com eletrodo revestido (SMAW).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas amostras de aço ao carbono, baixa liga convencional do tipo A36, aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) tipo API5L X80 e aços baixa liga temperados e revenidos ligados ao cromo, molibdênio, vanádio e nióbio. As amostras dos aços (T+R) correspondem a corpos de prova para estudo da soldabilidade segundo a técnica dos “implantes”.⁽²⁾ A composição química dos aços em estudo é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do metal de base do aço API 5L X80 e dos aços temperados e revenidos incluindo o carbono equivalente calculado

Aço	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO METAL DE BASE									
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Nb	Ti	Co
API 5L X80	0,07	1,72	0,23	0,13	0,010	0,19	0,021	0,063	0,013	-
*C-Mn	0,14	1,04	0,25	0,06	0,120	0,07	0,005	0,005	0,005	0,03
*C-Mn-Cr	0,15	1,05	0,26	0,99	0,121	0,06	0,005	0,005	0,005	0,04
*C-Mn-Cr-Nb	0,15	1,06	0,23	1,04	0,120	0,07	0,005	0,072	0,005	0,02
*C-Mn-Cr-Mo	0,13	1,07	0,24	1,05	0,125	0,52	0,005	0,005	0,005	0,02
*C-Mn-Cr-Mo-V	0,15	1,01	0,19	0,97	0,050	0,48	0,280	0,005	0,006	0,03
Aço	Cu	Al	N	B (ppm)	S	P	As	Sn	Sb *	Ce _(TW) (%)
API 5L X80	0,01	0,035	-	-	0,002	0,02	-	-	-	0,43
*C-Mn	0,06	0,013	0,008	≤ 1	0,006	0,01	0,028	0,005	0,0028	0,35
*C-Mn-Cr	0,06	0,017	0,006	≤ 1	0,007	0,01	0,028	0,005	0,0028	0,55
*C-Mn-Cr-Nb	0,04	0,005	0,008	-	0,003	0,01	0,034	0,005	0,0028	0,56
*C-Mn-Cr-Mo	0,04	0,008	0,01	3 ≥ 2	0,009	0,01	0,036	0,005	0,0028	0,63
*C-Mn-Cr-Mo-V	0,005	0,009	0,009	1 ≤ 2	0,004	0,00	0,003	0,004	0,0002	0,67

Na Tabela 2 têm-se o programa de testes de soldagem aos quais os aços foram submetidos. Os aços sintéticos foram soldados pelo processo ao arco elétrico manual com eletrodo revestido (SMAW) básico de 4 mm de espessura, e com energia de soldagem de 1500J/mm. Já o aço API 5L X80 foi soldado por SMAW (manual e mecanizado) e pelo processo arame tubular robotizado (CP05) utilizando energias diferentes mostradas no Quadro 2. Em particular, o corpo de prova CP01 do aço X80 foi soldado com 1500J/mm, da mesma ordem que os aços sintéticos.

Tabela 2. Programa de soldagem das amostras de aço X80 e aços temperados e revenidos

Tipos de Processo	Tipo de Aço	Corpo de prova	Eletrodo	chanfro	Energia Média	Temperatura de pré-aquecimento	Temperatura Interpasses
SMAW Manual	X80	CP01	Básico (E9018-M)	V	1500 J/mm	100 °C	250 °C
FCAW Robotizado	X80	CP05	Arame Tubular (E91T8-K8/E621T8-K8) 2,0 mm	V	650 J/mm	NR	NR
SMAW Manual	C- Mn	0Cr	Básico (4mm)	NR	1500 J/mm	150 °C	NR
SMAW Manual	C-Mn-Cr	1Cr	Básico (4mm)	NR	1500 J/mm	150 °C	NR
SMAW Manual	C-Mn-Cr-Nb	1CrNb	Básico (4mm)	NR	1500 J/mm	150 °C	NR
SMAW Manual	C-Mn-Cr-Mo	1CrMo	Básico (4mm)	NR	1500 J/mm	150 °C	NR
SMAW Manual	C-Mn-Cr-Mo-V	7CrMoV	Básico (4mm)	NR	1504 J/mm	150 °C	NR

NR: Não Realizado

Após soldagem os corpos de prova dos aços sintéticos denominados 0Cr, 1Cr, 1CrNb, 1CrMo e 7CrMoV foram submetidos a um tratamento térmico de

revenimento a 600°C por um período de aproximadamente 2 horas num forno tipo mufla.

Após a soldagem, as amostras soldadas passaram por inspeção visual e posteriormente foram preparadas para micrografia e microdureza utilizando as etapas de preparação metalográfica que incluíram corte, lixamento, polimento com alumina e ataque químico com reagente Nital a 2%. A Microscopia ótica das amostras soldadas foi realizada com Microscópio Olympus nos aumentos de 50, 100, 200, 500 e 1000 vezes. Para a análise qualitativa dos constituintes se considerou o aumento de 500 vezes. Realizou-se o ensaio de microdureza Vickers ao longo de toda a junta soldada com carga de 100g durante 15 segundos utilizando microdurômetro Shimadzu.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição Química

De acordo com a composição química calcula-se o carbono equivalente desses aços, mostrado no Quadro 1. O carbono equivalente é um índice do grau de soldabilidade dos aços e que de acordo com o International Institute of Welding (IIW)⁽³⁾ pode ser calculado pela fórmula:

$$\%C_{e(IIW)} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{\%(Ni+Cu)}{15} \quad (1)$$

Se o valor for superior a 0,45% diz-se que o aço é temperável e, portanto sensível à fissuração a frio,⁽⁴⁾ precisando-se então de cuidados especiais para a soldagem de aços com maior carbono equivalente. Em particular, o valor do carbono equivalente do aço X80 (0,43%), mostrado na Tabela 1, é menor que nos aços baixa liga temperados e revenidos, indicando que em princípio o aço X80 possui melhor soldabilidade, exceto o aço 0Cr (C-Mn) que apresenta um valor de carbono equivalente de 0,35%.

3.3 Perfil de Microdureza

A análise da Figura 1 indica que os aços (T+R), com exceção do C-Mn, no estado como soldado, apresentaram maior dureza ao longo da junta soldada que os corpos de prova do aço X80, mesmo este sendo soldado por vários processos. Esse comportamento da dureza (Hv) é coerente com os resultados de carbono equivalente encontrados para esses aços, isto é, quanto maior a quantidade de elementos de liga maior é a dureza na junta, nas condições de soldagem escolhidas.

A maior diferença nos valores de microdureza da junta soldada dos aços em estudo está na região de crescimento de grão da ZTA, onde os aços (T+R) ligados ao Cr, Mo e V e também ao Nb, apresentaram elevados valores de dureza Hv entre 350 e 600, devido à presença de martensita. A dureza Hv aumenta na medida que se adiciona elementos de liga nos teores indicados, na sequência: Mn – Cr – Mo – V; O Nb foi adicionado somente no aço 1CrNb. Por outro lado, os corpos de prova do aço API 5L X80 apresentaram na ZTA valores de microdureza inferiores a 350Hv, medidas efetuadas no último cordão de acabamento à 2 mm da superfície externa, indicando a ausência de martensita nas condições de soldagem fixadas.

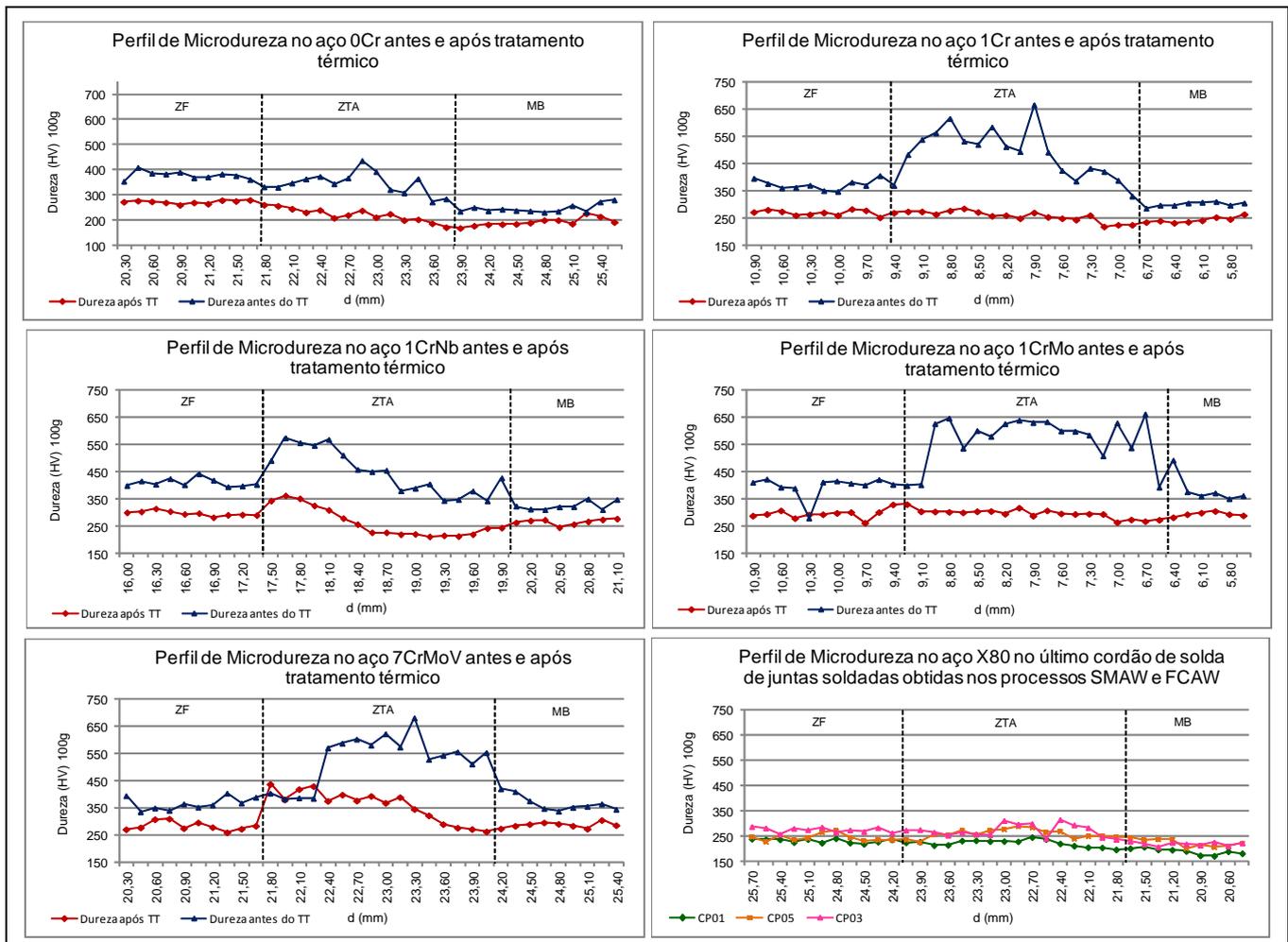


Figura 1. Perfil de Microdureza Vickers ao longo das juntas soldadas para os aços (T+R) sem e com tratamento térmico de revenido e para o aço API 5L X80, na condição como soldado.

A Figura 2 mostra a microdureza Vickers em baixo do cordão, isto é, na região de crescimento de grão da ZTA nos aços em estudo no estado como soldado (as - welded). Verifica-se que o aço X80 apresentou dureza da ordem de 220 a 300 Hv e todos os aços sintéticos (T+R) apresentaram na mesma região dureza variando entre 350 a 600 Hv. Estes resultados corroboram os apresentados na Figura 1.

Em trabalho anterior,⁽⁵⁾ mostrou-se que em condições muito severas o aço X80 pode também dar lugar a formação de martensita na região de superaquecimento, como foi no caso da soldagem subaquática e no ultimo cordão da camada de acabamento quando soldado com baixa energia (650J/mm) sem preaquecimento. Esses resultados mostram que de todas as maneiras a região de superaquecimento é para todos os aços estudados a região mais crítica da ZTA.⁽³⁾

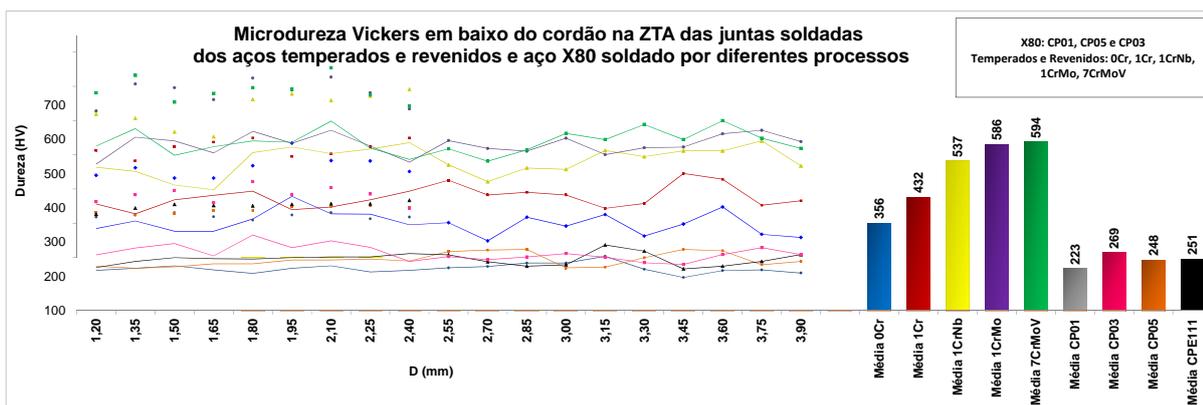


Figura 2. Microdureza Vickers em baixo do cordão na ZTA na condição como soldado, das amostras dos aços em estudo.

3.2 Análise das Microestruturas

As Figuras 3 e 4 apresentam as microestruturas do metal de base dos aços em estudo; o aço X80 apresenta estrutura de ferrita e bainita, em forma típica dos aços laminados pelo processo TMCP (Thermo Mechanical Control Process), que é um processo de laminação controlada, com uma dureza Hv entre 200 e 230.

Já o metal de base dos aços baixa liga sintéticos, apresentam estrutura de têmpera e revenido com valores de dureza Hv entre 250 e 330, superiores às do aço X80. Após a soldagem dão origem a estruturas mais duras na região de superaquecimento (região de grão grosseiro) da junta soldada, como mostrado na Figura 3. Ressalta-se que a dureza Hv no metal de base, aumenta a medida em que se adiciona elementos de liga, indicando com isto que a dureza desses aços aumenta por solução sólida desses elementos de liga na ferrita e eventualmente como precipitados.

Ainda na Figura 3, percebe-se a presença de estrutura martensítica na região de superaquecimento dos aços baixa liga sintéticos, o que justifica os elevados valores de dureza Hv encontrados. Para os aços X80 soldados com diferentes procedimentos de soldagem, a região à grão grosseiro apresenta em geral, estrutura de ferrita, carbonetos e bainita justificando uma menor dureza do que os aços baixa liga sintéticos. Os resultados preliminares permitem prever uma melhor resistência ao impacto e à fissuração a frio das juntas soldadas do aço X80.

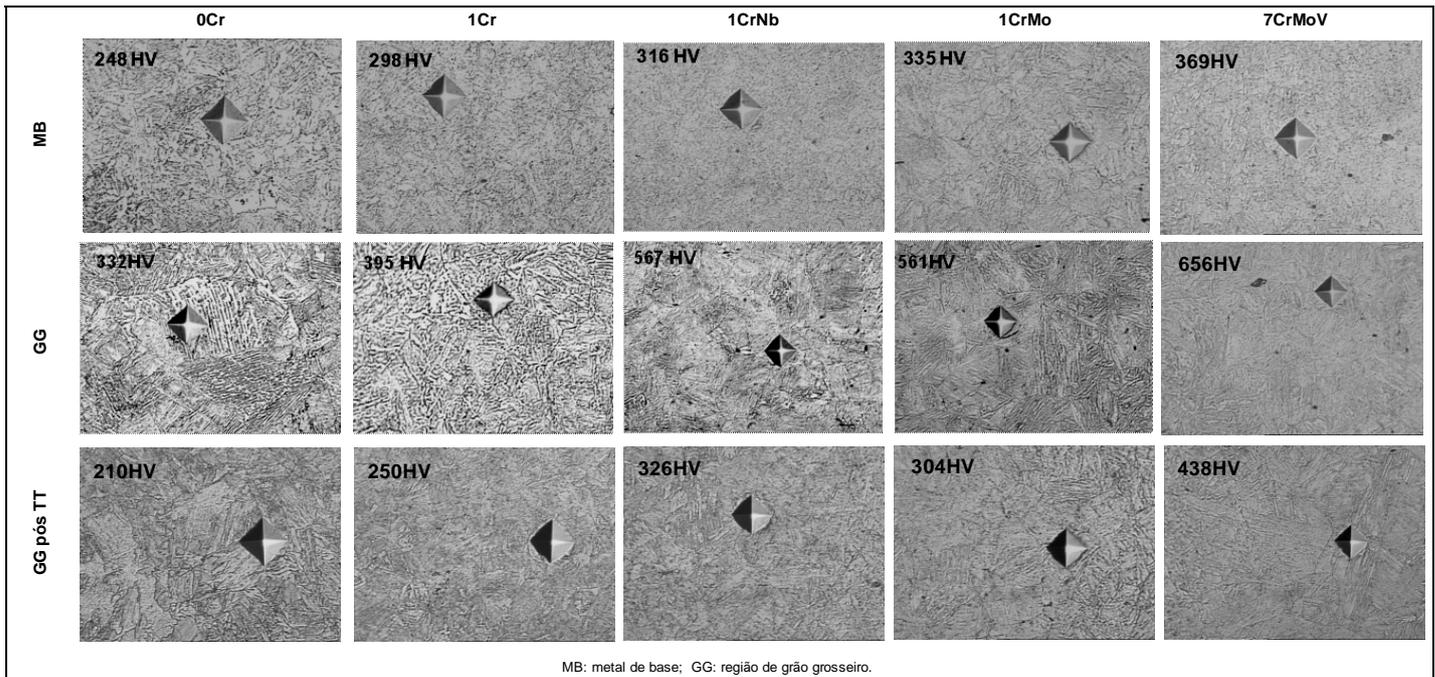


Figura 3. Micrografias do Metal de Base e da região de grão grosseiro da ZTA antes e após tratamento térmico de revenido dos aços (T+R); Aumento de 500X.

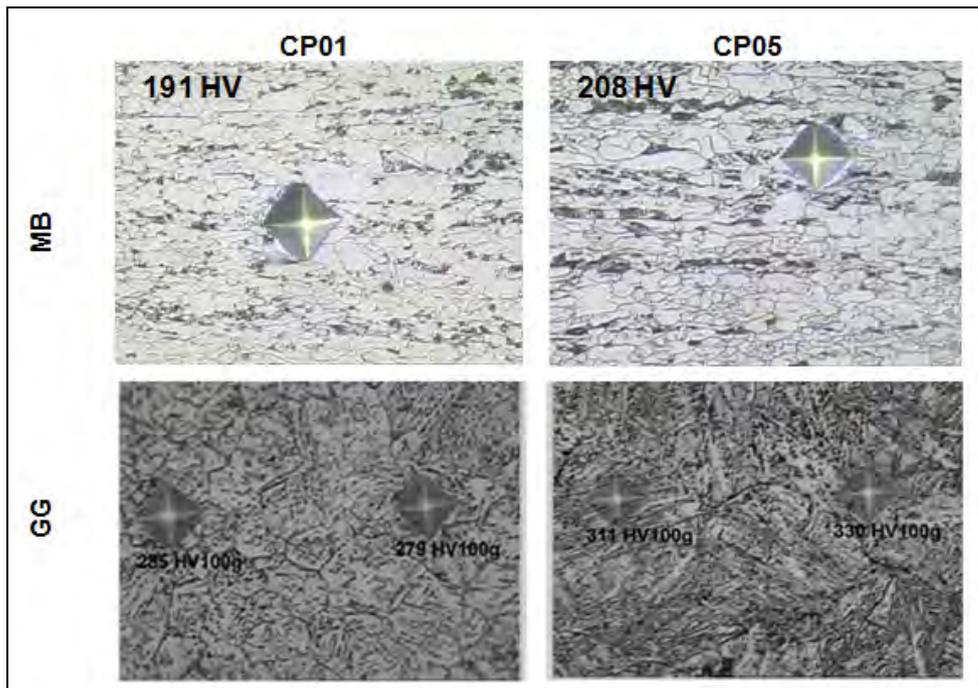


Figura 4. Micrografias do metal de base e da Região de Crescimento de grão da ZTA do aço X80. 500X.

3.3 Tamanho de Grão

Na Tabela 3, apresentam-se os resultados das medidas do tamanho do antigo grão austenítico dos aços temperados e revenidos; estes aços apresentam tamanho de grão entre 30 e 40 μm aproximadamente. A ZTA do aço X80 soldado com diferentes procedimentos apresentam valores entre 18 e 30 μm . Estes resultados mostram que o tamanho de grão da região de grão grosseiro da ZTA dos aços (T+R) são maiores que do aço X80. Mesmo no caso do corpo de prova do aço X80, CP01,

soldado com pré aquecimento e mesmo nível de energia de soldagem que os aços temperados e revenidos (1500J/mm), o tamanho de grão é inferior ao apresentado pelos aços (T+R).

Tabela 3. Tamanho de grão no cordão de acabamento da ZTA

Tipo de Processo	Tipo de Aço	Corpo de Prova	Diâmetro do grão da ZTA (µm)	Desvio Padrão (±) (µm)	TG ASTM
SMAW Manual	X80	CP01	28	2,1	7,04
SMAW Mecanizado	X80	CP03	18	1,2	8,31
FCAW Robotizado	X80	CP05	21,2	1,5	7,84
FCAW Robotizado	X80	CPE111	23,7	3,3	7,53
SMAW Manual	C-Mn	0Cr	35,3	2,9	6,37
SMAW Manual	C-Mn-Cr	1Cr	40,3	4,0	5,99
SMAW Manual	C-Mn-Cr-Nb	1CrNb	31,4	3,1	6,71
SMAW Manual	C-Mn-Cr-Mo	1CrMo	34,4	1,0	6,44
SMAW Manual	C-Mn-Cr-Mo-V	7CrMoV	30,9	5,1	6,59

3.4 Resistência à Tração

A Tabela 4 mostra a resistência à tração (R_m) e limite de escoamento (σ_e) dos aços em estudo. Nota-se que os valores da relação σ_e / R_m dos diferentes aços são bastante próximos e o aço X80 apresenta inclusive, um dos valores mais baixos que os aços temperados e revenidos, o que é interessante para os projetistas de estruturas metálicas que se interessam numa relação mais baixa possível.

Tabela 4. Propriedades mecânicas do metal de base dos aços em estudo.

Aço	R_m (Mpa)	σ_e (Mpa)	σ_e/R_m	ϵ (%)
API 5L X80	683	561	0,82	34,00
C-Mn	671	556	0,83	22,50
C-Mn-Cr	724	640	0,88	19,60
C-Mn-Cr-Nb	755	655	0,87	18,00
C-Mn-Cr-Mo	829	661	0,80	20,00
C-Mn-Cr-Mo-V	837	727	0,87	19,00

4 CONCLUSÕES

A análise dos resultados apresentados permite chegar às seguintes conclusões:

1. O metal de base do aço X80 possui estrutura de ferrita e bainita, enquanto que os aços temperados e revenidos (T+R) apresentam estrutura de martensita revenida, uma estrutura pouco mais dura que a do aço X80;
2. Para os aços baixa liga temperados e revenidos (T+R), o aumento da dureza H_v na região de superaquecimento da ZTA, na condição após soldado, está diretamente relacionada à presença de estrutura de têmpera (martensita) obtida com os procedimentos de soldagem utilizados;
3. O aço API 5L X80 possui propriedades mecânicas comparáveis aos aços temperados e revenidos (T+R), porém com a vantagem de dispensar o uso de

tratamento térmico após a soldagem, simplificando e diminuindo os custos de fabricação, o que justifica a consideração deste aço como uma alternativa ao uso dos aços (T+R) para determinadas aplicações;

4. Os aços ao Nb, Mo e ao V, apresentam na ZTA uma maior dureza mesmo após o tratamento térmico de revenido, quando comparado aos demais; Isto pode estar relacionado ao fato de que estes elementos podem formar precipitados durante o tratamento térmico pós – soldagem da ZTA, apresentando valores entre 450 e 300 HV enquanto que os aços API 5L X80 apresentaram valores inferiores a 300 HV;

6. O aço API 5L X80 apresenta melhor soldabilidade que os aços temperados e revenidos (T+R) em estudo, devido à ausência de martensita na região de superaquecimento da ZTA nas condições de soldagem empregadas; estes resultados são coerentes com os valores de carbono equivalente calculados para os referidos aços;

7. De todos os modos, a região de superaquecimento dos aços estudados, é a região mais sensível da zona termicamente afetada pelo calor, seja nos aços (T+R) como no aço ARBL X80, pela presença de estruturas mais frágeis, pelo crescimento de grão e pela presença de precipitados, entre outros fatores. Outros estudos metalográficos complementares, utilizando microscopia eletrônica de transmissão e a realização de outros ensaios mecânicos e de soldabilidade é desejável serem efetuados de modo a aprofundar e ampliar este estudo comparativo.

Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar seu agradecimento à USIMINAS pelo fornecimento da chapa do aço API 5L X80 em estudo, ao CDTN (Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear), à ESAB pelo fornecimento de consumíveis, ao LRSS do departamento de mecânica da UFMG onde se realizou o estudo do aço X80, ao Institut de Soudure Paris France, onde se desenvolveram os estudos de soldabilidade dos aços baixa liga utilizando o método dos Implantes, ao CETEN pela cessão das amostras dos aços sintéticos temperados e revenidos e pelo apoio fornecido durante o desenvolvimento deste trabalho e à ArcelorMittal Monlevade pelo apoio nas medições de tamanho de grão.

REFERÊNCIAS

- 1 GORNI, A.A.; MEI, P.R. Aços alternativos ao HY-80 sem a necessidade de aplicação de têmpera e revenido. Revista Metalurgia & Materiais, Ouro Preto, v. 56, n. 4, 2003. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rem/v56n4/v56n4a12.pdf>>. Acesso em: 25 outubro 2011.
- 2 ARCE CHILQUE, Angel Rafael. Fragilisation et Fissuration au rechauffage D'aciers soudés. 1979. Tese (Doutorado em Ciências) – A L'Universite Pierre et Marie Curie, Paris, 1979.
- 3 ARCE CHILQUE, A.R; et al. Estudo comparativo da microestrutura e propriedades mecânicas de soldas do aço X80 feitas pelos processos SMAW, por gravidade (normal e subaquática) e FCAW robotizados. Trabalho apresentado no 67º Congresso anual da ABM no Rio de Janeiro, 2012.
- 4 I.I.W. Doc. Nº IX – 1533-88 Guide to the Light Microscope Examination of Ferritic Steels Weld Metals, IIW Doc. 1533-88, 1988.
- 5 ARCE CHILQUE A.R; ET AL. Estudo da Soldabilidade do aço API5L X80 na soldagem ao arco elétrico manual, mecanizado e robotizado. Trabalho apresentado na Exposol Conferência de Tecnologia da soldagem e inspeção – SENAI, CTS Solda Rio de Janeiro, 2008.