

AVALIAÇÃO DA TEMPERABILIDADE, MICROESTRUTURA E TENACIDADE DE TUBOS DE AÇO ESPECIFICADOS PELA NORMA API 5CT*

William Rodrigues Soares¹
Vicente Braz Trindade²
Geraldo Lúcio de Faria³
André Barros Cota⁴

Resumo

Este trabalho apresenta uma avaliação da temperabilidade, microestrutura e tenacidade de dois tubos de aços (A e B) especificados pela norma API 5CT. O aço B tem um teor de elementos de liga maior que o aço A. As amostras foram temperadas em água a 29°C e revenidas a 700°C/15min. Avaliou-se a temperabilidade dos aços por meio do ensaio Jominy e a tenacidade por meio da energia absorvida no ensaio de impacto Charpy. As propriedades mecânicas foram medidas pelo ensaio de tração. A caracterização da microestrutura foi realizada de forma qualitativa por meio de microscopia óptica e eletrônica de varredura. O aço B com maior teor de carbono e de elementos de liga tem maior temperabilidade do que o aço A. Os aços A e B apresentam uma microestrutura constituída de martensita revenida e pequena quantidade de bainita. As amostras do aço B apresentam maior energia absorvida, maior limite de resistência e menor ductilidade que o aço A. A presença de Mo em maior quantidade no aço B faz com que sua tenacidade seja superior ao aço A.

Palavras-chave: Tubo de aço; Temperabilidade; Microestrutura; Tenacidade.

EVALUATION OF HARDENABILITY, MICROSTRUCTURE AND TOUGHNESS OF STEEL PIPES SPECIFIED BY THE API 5CT STANDARD

Abstract

The hardenability, microstructure and mechanical properties of two steel pipes (A and B) specified by the API 5CT standard was evaluated. Steel B has a content of alloying elements greater than steel A. Samples were quenched into water at 29°C and tempered at 700°C/15min. The hardenability and toughness of the steels were evaluated by Jominy and Charpy tests. Mechanical properties were measured by tensile test. The microstructural characterization was performed by means of optical microscopy and scanning electron microscopy. The results show that the steel B has higher hardenability, due to the higher C content and alloying elements than steel A. Both steels have a similar microstructure, that consists of tempered martensite and a small amount of bainite. Steel B tensile strength and Charpy impact energy was higher than steel A and its ductility was lower than the steel A. The greater Mo content in steel B makes higher toughness than the steel A.

Keywords: Steel pipe; Hardenability; Microstructure; Toughness.

¹ Mestre em Engenharias de Materiais, REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

² Doutor, Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento, Vallourec & Sumitomo Tubo do Brasil, Jeceaba, Minas Gerais, Brasil.

³ Doutor, Professor, DEMET, REDEMAT, UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

⁴ Doutor, Professor, DEFIS, REDEMAT, UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A extração de petróleo e gás e o revestimento de poços estão exigindo cada vez mais a crescente demanda por tubos de aços especiais e de alta resistência mecânica. Esta propriedade mecânica, junto com a durabilidade dos tubos são questões importantíssimas para a extração com segurança em grandes profundidades. Além disso, os tubos de aço empregados na extração de petróleo em águas profundas precisam levar em consideração o peso, diâmetro e continuidade das tubulações. Isto pode parecer simples, mas não é, pois a produção de uma mesma liga metálica em diâmetro diferente requer outro tipo de procedimento. Talvez seja necessário desenvolver mais de um aço especial a serem usadas na fabricação de tubos que serão instalados nos poços [1].

No seu trabalho, Silva [2] buscou definir parâmetros de tratamentos térmicos, realizados por meio de têmpera e revenimento, que conduzissem à obtenção de estruturas martensíticas revenidas, utilizando um único tubo de aço com costura de baixo teor de carbono ligado ao boro. O objetivo principal foi atingir os graus N80 tipo Q, L80 tipo 1, C95 e P110, de acordo com a especificação pela norma API 5CT [3]. A composição química (% em peso), do aço baixo carbono ligado ao boro utilizado no experimento foi: 0,3%C; 1,2-1,4%Mn, 0,22%Si, 0,011%P, 0,002%S, 0,039%Al, 0,027%Ti, 0,001-0,003%B, 0,0064%N. Os tubos foram austenitizados a 890°C por 50 minutos, temperados em água e por fim revenidos em faixas distintas de temperaturas que variavam de 465°C a 650°C por 50 minutos. Observou que para os graus P110, C95 e L80 a temperatura de revenimento adequada são em torno de 480°C, 550°C e 610°C, respectivamente. Para alcançar o grau N80 podem-se utilizar as temperaturas de revenimento de 550°C, 590°C e 610°C, que atendem a norma proposta, ou seja, o limite de escoamento de 552MPa a 758MPa é alcançado. Os resultados dos ensaios de impacto Charpy obtidos por Silva [2] mostram que todas as amostras apresentaram fratura dúctil e que o valor de energia absorvida diminui com a diminuição da temperatura de revenimento.

Verifica-se que é escassa a bibliografia referente ao estudo de aços utilizados no revestimento de poços e para a condução/extração de petróleo, especificados pela norma API 5CT [3]. Este fato justifica o interesse científico e também tecnológico deste trabalho, que busca avaliar a temperabilidade, microestrutura e propriedades mecânicas de dois tubos de aços temperados e revenidos que são especificados pela norma API 5CT.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

A siderúrgica Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil (VSB) forneceu amostras de dois diferentes tubos de aço sem costura, aço A e aço B, que apresentam como características, baixos teores de elementos de liga e baixo teor de carbono em sua composição química (% em peso), como mostrado nas Tabelas 1 e 2. Os tubos dos aços A e B exibem diâmetro externo de 244,48mm e 367,00mm e espessura de 13,84mm e 27,62mm, respectivamente.

Tabela 1 - Composição química especificada do aço A (% em peso)

Aço A	C	Mn	Mo	Ti	N	B
Máximo	0,260	0,600	0,330	0,020	0,007	adicionado

Tabela 2 - Composição química especificada do aço B (% em peso)

Aço B	C	Mn	Mo	Ti	N	B
Máximo	0,290	1,000	0,450	0,010	0,012	-

2.2 Métodos

2.2.1 Ensaio de temperabilidade

A avaliação da temperabilidade dos aços A e B foi feita por meio do ensaio Jominy, segundo as normas ASTM A255-10 [4] e NBR-6339-04 [5]. Foram utilizados corpos de provas reduzidos, com as dimensões de 6,4mm de diâmetro e 101,0mm de comprimento.

2.2.2 Amostras para tratamentos térmicos

As amostras que foram utilizadas para realizar os tratamentos térmicos foram retiradas na direção longitudinal dos tubos de aço sem costura. Foram quatro amostras de distintas geometrias extraídas dos dois tubos de aço.

A geometria e dimensões das amostras do aço A utilizadas nos tratamentos térmicos, com formato de tira (fita), são as definidas pela norma ASTM A370-12a [6] e E8/8M- 13a [7]. A geometria e as dimensões das amostras do aço B usadas nos tratamentos térmicos são mostradas na Figura 1.

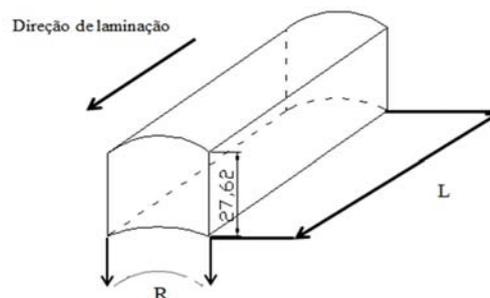


Figura 1 - Geometria e dimensões das amostras do aço B – formato de barra: espessura = 27,62mm, comprimento (L) = 300,0mm e medida de R = 27,62mm

Duas amostras, sendo uma do aço A e outra do B, utilizadas nos tratamentos térmicos e posterior ensaio de impacto Charpy, têm sua geometria e dimensões mostradas na Figura 2 (a) e (b), respectivamente.

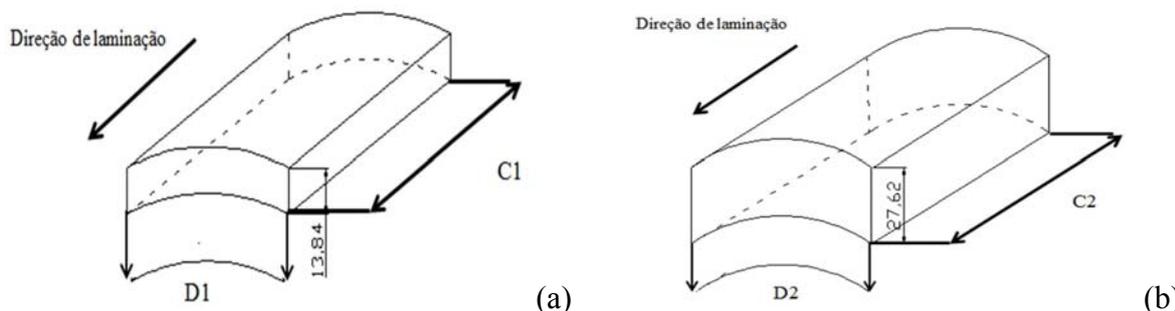


Figura 2 - Geometria e dimensões das amostras dos aços A e B para tratamento térmico e posterior ensaio de impacto Charpy. Aço A: espessura = 13,84mm, C1 = 60,0 mm ($\pm 1,0$ mm) e D1 = 54,0 mm ($\pm 1,0$ mm). Aço B: espessura = 27,62mm, C2 = 60,0 mm ($\pm 1,0$ mm) e D2 = 54,0 mm ($\pm 1,0$ mm).

2.2.3 Tratamentos térmicos

Nos tratamentos térmicos, uma amostra de cada aço foi austenitizada, utilizando o Forno Industrial Heating modelo TEM PERT 30/N2 da VSB, a 910°C com tempo de permanência de 15min. As amostras foram submetidas têmpera em água a temperatura de 29°C, seguida do revenimento a 700°C por 15 minutos e resfriadas ao ar.

Na têmpera, as amostras foram resfriadas na água com agitação suave no tanque Industrial Heating, modelo: TOR/180/500/500 da VSB. As amostras temperadas foram revenidas no Forno Industrial Heating, modelo: TEMPER/R30/N2 da VSB.

A medição das temperaturas das amostras nos fornos foi feita utilizando um termopar (Novus Smart-tmeter) colocado debaixo de cada amostra.

Amostras foram submetidas ao ciclo de tratamento térmico de têmpera e revenimento: três amostras no formato de tira ou barra e uma amostra para posterior ensaio de impacto Charpy, totalizando 4 amostras para o aço A e 4 amostras para o aço B

2.2.4 Ensaio de tração

Os corpos de prova do aço A para o ensaio de tração têm a geometria e dimensões no formato tira e os corpos de prova do aço B foram usinados após os tratamentos térmicos e têm a geometria e dimensões de barra redonda, de acordo com as normas ASTM A370-12a [6] e E8/8M- 13a [7].

Todo o procedimento do ensaio de tração foi baseado nas normas ASTM E8/8M – 13 [7] e ASTM A370 – 12a [6] e foi realizado à temperatura ambiente. Utilizou-se o equipamento EMIC 1000kN, modelo DL -100000, equipada com software e um extensômetro. Foram avaliados os limites de resistência e escoamento, e o alongamento percentual de todas as amostras.

2.2.5 - Ensaio de Impacto Charpy

Os corpos de prova para a realização do ensaio de impacto Charpy foram usinados das amostras (Figura 2) submetidas a têmpera e revenimento. De cada amostra foram geradas três corpos de prova, cuja geometria e dimensões estão indicadas na Figura 3. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM E23 – 12c [8] e ASTM A370 – 12a [6]. Os corpos de prova das amostras do aço A têm dimensões reduzidas (sub-size), sendo necessário normalizar os resultados da energia absorvida de acordo com o item 7.3.6 da norma API 5CT 2012 [3]. A norma estabelece que a mínima energia absorvida requerida em ensaios com amostras de dimensões reduzidas será aquela especificada para a amostra padrão (full-size) multiplicada por um fator de redução, que neste trabalho é 0,8. Assim, os valores de energia absorvida medidos para o aço A deverão ser divididos por 0,8.

O ensaio de impacto Charpy foi realizado a 0°C, mantendo as amostras em uma solução líquida de álcool 99% a 0°C, com tempo de imersão de 5 minutos, antes de realizar o ensaio. Utilizou a máquina de Impacto Instron 406,7 modelo SI-1D3 que se encontra no laboratório mecânico da VSB.

As superfícies de fratura dos corpos de prova de impacto Charpy foram analisadas via MEV, com aumento de 2000X. Este equipamento se encontra no Nanolab - REDEMAT – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e é da marca VEGA 3 TESCAN com Detector EDS Oxford X-ACT.

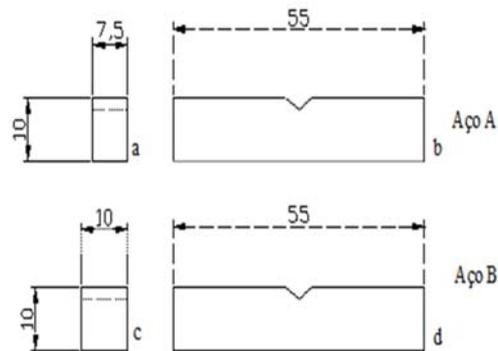


Figura 3 - Dimensões (mm) das amostras para o ensaio de impacto Charpy para o aço A e B. Representações: (a) e (c) das seções transversais; (b) e (d) das seções longitudinais.

2.2.6 Caracterização microestrutural

Para a análise microestrutural, utilizaram-se amostras que foram extraídas da extremidade dos corpos de prova de tração dos aços A e B. Estas foram embutidas e submetidas ao processo de lixamento e polimento metalográfico padrão.

Depois do polimento, as amostras foram atacadas quimicamente por Nital 5%, com tempo de imersão da amostra durante 5 segundos.

Para análise da microestrutura utilizou-se um microscópio óptico marca Leica. Também se adquiriu imagens via microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados

3.1.1 Temperabilidade

Na Figura 4 é mostrada as curvas de temperabilidade Jominy dos aços A e B, representadas pela dureza Rockwell C (HRC) em função da distância absoluta da extremidade temperada do corpo de prova. Pode-se observar que o aço B apresenta maior temperabilidade, pois os valores de dureza são superiores ao aço A. Isto está relacionado ao maior teor de carbono e de elementos de liga do aço B.

A adição de B(boro) ao aço A aumentou a temperabilidade da liga, mas devido a pequena quantidade de Ti adicionado ($Ti/N < 3,5$) necessária para formar TiN e deixar o B quimicamente livre, sua efetividade não foi muito elevada. [9]

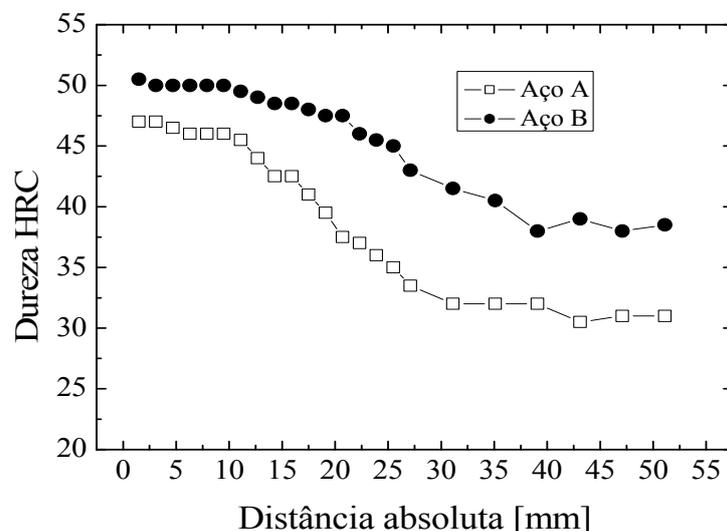


Figura 4 - Curva de Temperabilidade Jominy dos aços A e B.

3.1.2 Ensaio de tração

As propriedades mecânicas limite de escoamento, limite de resistência e alongamento percentual obtidas nos ensaios de tração são mostradas na Tabela 3 para os aços A e B, respectivamente.

Ao analisar os limites de escoamento e de resistência, observa-se que o aço B apresenta resultados superiores em relação ao aço A. Este resultado está relacionado à maior quantidade de elementos de liga em sua composição e ao maior teor de carbono, que juntos aumentam a resistência mecânica pelo mecanismo de endurecimento por solução sólida.

Com relação ao alongamento, observa-se na Tabela 3 que o aço B apresenta valores bem menores que o aço A, ou seja, o aço B apresenta menor ductilidade.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas de tração dos aços A e B: L.E. (0,5%) = limite de escoamento medido a 0,50% de deformação; L.R. = limite de resistência; AL.(%) = alongamento percentual.

Aço	Média L.E. 0,50% (MPa)	Média L.R. (MPa)	Média AL. [%]
A	690	795	34
B	694	812	26

3.1.3 Energia absorvida

Os resultados da energia absorvida obtidos pelo ensaio de impacto Charpy e a porcentagem de fratura dúctil das amostras dos aços A e B são apresentados na Tabela 4, respectivamente.

Deve-se destacar a elevada energia absorvida no ensaio de impacto pelas amostras do aço A e B, na condição de tempera em água a 29°C e revenimento a 700°C, sendo que o aço B apresenta maior tenacidade.

Ao analisar visualmente a superfície das amostras no ensaio de impacto Charpy, observa-se que elas apresentam praticamente fratura dúctil.

A superfície da fratura da amostra temperada e revenida do aço A é apresentada na Figura 5a. Nesta imagem, observa-se que o comportamento do aço é essencialmente de fratura dúctil, sendo encontrados grandes e pequenos dimples. Verifica-se também uma pequena região que aparenta exibir planos de clivagem, característicos de fratura frágil. Esta imagem fractográfica apresenta as mesmas características das amostras temperadas e revenidas do aço B, Figura 5b.

Tabela 4 - Energia absorvida e % da fratura dúctil dos aços A e B

Aço	Média da energia absorvida (J)	Fator de redução	Média da energia absorvida – resultados normalizados (J)	Média da fratura dúctil (%)
A	114	0,8	142	100
B	182	-	182	100

3.2 Discussão

De acordo com a Figura 4, que exhibe os resultados do ensaio Jominy, o aço B apresenta maior temperabilidade que o aço A, isso pode ser observado na medida de dureza HRC na extremidade do corpo de prova de ambos os aços, pois é a região que tende a formar mais martensita, então para o aço B o valor de dureza é de 51 HRC, já o aço A o resultado é de 47 HRC. Logo o primeiro aço tenderá a formar mais martensita em sua microestrutura, acarretando assim maior dureza.

Os valores do alongamento percentual dos aços A e B (Tabela 3) têm, para o ciclo térmico utilizado neste trabalho, um comportamento inverso aos valores de limite de resistência, ou seja, quanto maior o limite de resistência menor é o alongamento percentual (menos dúctil é o material).

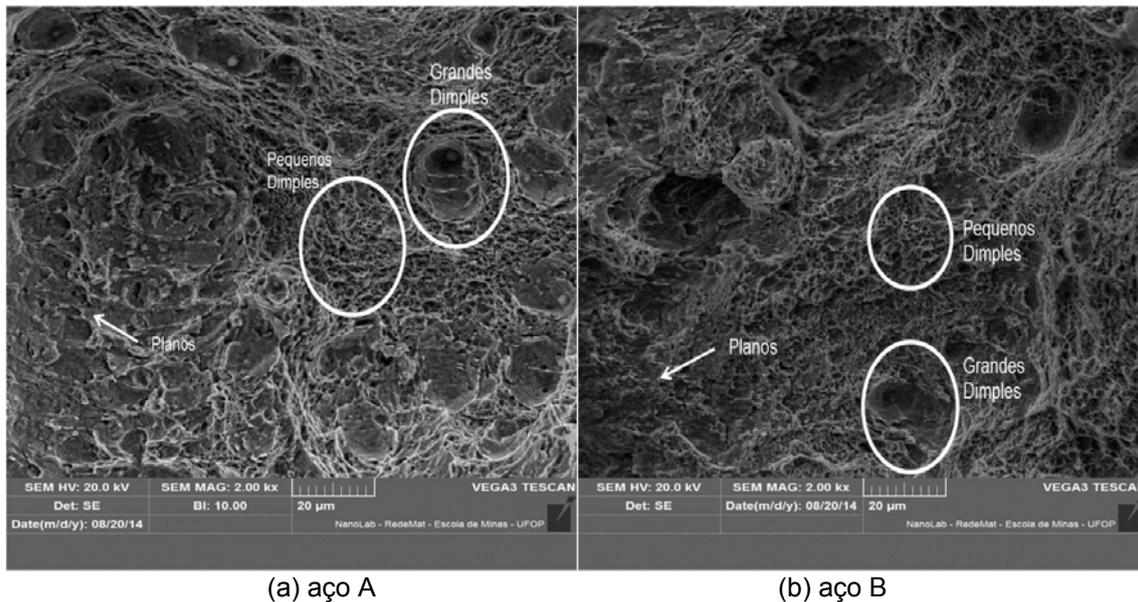


Figura 5 - Fractografia das amostras dos aços A e B submetida ao ciclo térmico com resfriamento em água a 29°C e revenimento a 700°C/15min. MEV – 2000X

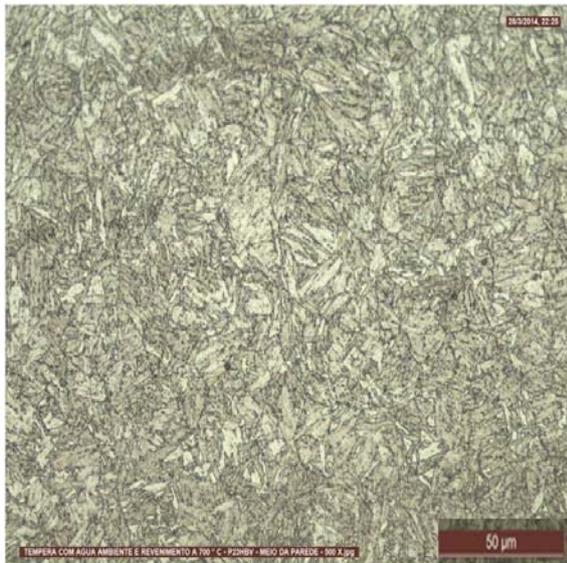
Na Figura 6, observam-se as microestruturas das amostras dos aços A e B temperadas em água a 29°C e revenidas a 700°C, respectivamente, obtidas via microscopia ótica e eletrônica de varredura. A microestrutura é composta de martensita revenida e bainita.

A presença da bainita (placas de ferrita) na microestrutura revenida está associada ao fato de que a bainita se forma a temperaturas relativamente altas, quando comparada com a martensita, onde a microestrutura sofre recuperação durante a transformação. Assim, quando a microestrutura bainítica de um aço baixo carbono é revenida da à temperatura de 700°C, existe apenas uma pequena recuperação e pouca mudança na morfologia das plaquetas de ferrita [10]

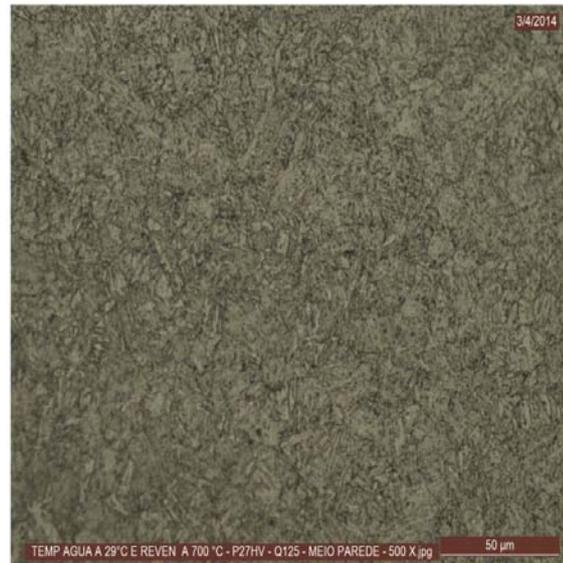
Foi observado que as amostras do aço B apresentam as mesmas características microestruturais do aço A, ou seja, a microestrutura é composta de martensita revenida e bainita.

Ao comparar os resultados do alongamento percentual (Tabela 3) dos aços A e B, observa-se que o aço B apresenta menores valores no ciclo de tratamento térmico realizado nesse trabalho em relação ao aço A. Este resultado está relacionado à maior quantidade de carbono e elementos de liga do aço B em relação ao aço A, que resulta em uma maior tendência em formar carbonetos, diminuindo o alongamento.

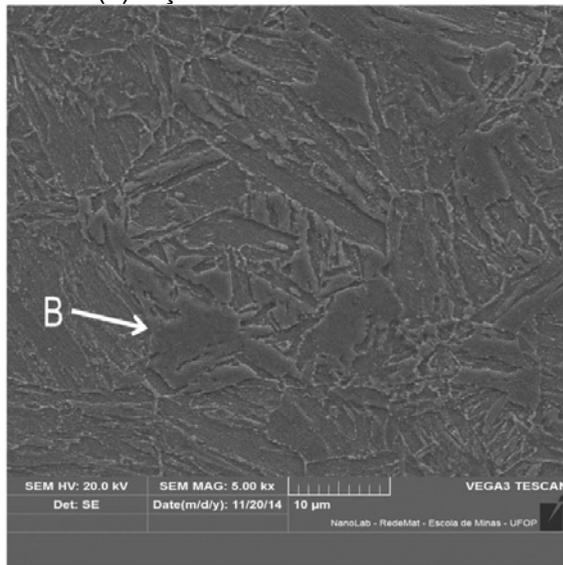
As amostras temperadas e revenidas do aço B têm maior tenacidade que as respectivas amostras do aço A, sendo que o aço B apresenta maior limite de resistência e menor ductilidade que o aço A. O aço B contém um conteúdo maior de Mn do que o aço A. Sabe-se que o Mn, em aços baixo carbono, aumenta a temperabilidade martensítica e aumenta a resistência mecânica pelo mecanismo de solução sólida [11].



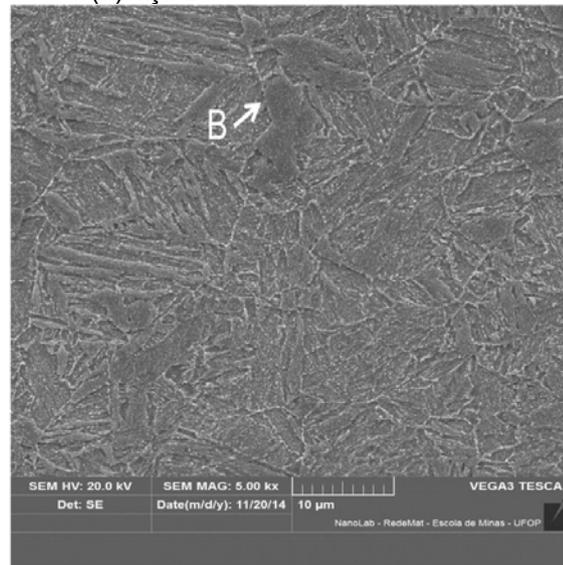
(a) Aço A - MO – Nital 5% - 500X



(b) Aço B - MO - Nital 5% - 500X



(c) Aço A - MEV – Nital 5% - 5000X



(d) Aço B - MEV - Nital 5% - 5000X

Figura 6 - Microestrutura das amostras dos aços A e B submetidas ao ciclo de tratamento térmico com têmpera em água a 29°C e revenimento a 700°C (a) e (b) microscopia óptica; (c) e (d) microscopia eletrônica de varredura. B: bainita

A maior tenacidade do aço B pode estar associada à maior quantidade de Mo em sua composição, que promove o refinamento dos carbonetos precipitados durante o processo de revenimento [12].

Os aços A e B temperados a 29 e revenidos a 700°C podem ser classificados pela norma API 5CT 2011 como grau C90 ou T95. Essa conclusão foi baseada na comparação entre composição química, propriedades mecânicas e processo de fabricação desses graus (norma API 5CT) com os resultados obtidos neste trabalho.

4 CONCLUSÃO

- O aço B com maior teor de carbono e de elementos de liga tem maior temperabilidade do que aço A.

- Os aços A e B, submetidos à têmpera em água a 29 seguido de revenimento 700°C, têm uma microestrutura constituída de martensita revenida e pequena quantidade de bainita.
- Ao analisar os limites de escoamento e de resistência, observa-se que o aço B apresenta resultados superiores em relação ao aço A. Este resultado está relacionado à maior quantidade de elementos de liga em sua composição e ao maior teor de carbono, que juntos aumentam a resistência mecânica pelo mecanismo de endurecimento por solução sólida
- Observou-se que as amostras temperadas e revenidas do aço B têm maior tenacidade que as respectivas amostras do aço A, devido à presença de Mo em maior quantidade no aço B.
- A superfície da fratura da amostra temperada e revenida dos aços A e B é essencialmente de fratura dúctil, sendo encontrados grandes e pequenos dimples.
- Com base na composição química, propriedades mecânicas e processo de fabricação, observou-se que o grau dos aços A e B será C90 ou T95, como especificado pela norma API 5CT 2011.

Agradecimentos

À empresa Vallourec e Sumitomo Tubos do Brasil, VSB, e funcionários do Laboratório Mecânico. À REDEMAT, ao DEMET-UFOP e a CAPES pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 Silveira M. Grandes profundidades: Tubo & Companhia. São Paulo. 2010. [Acesso em 5 fev. 2014]; 33: 18 - 27. Disponível em <http://www.cipanet.com.br/revistatuboecia/revistas/033>.
- 2 Silva RC. Caracterização de um aço microligado ao boro e tratado termicamente utilizado na fabricação de tubos. [Dissertação de Mestrado]. Guaratinguetá: UNESP; 2009
- 3 API 5CT - American Petroleum Institute Specification for Casing and Tubing. 2011
- 4 ASTM A255-10 - Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel, 2010
- 5 NBR 6339 - Determinação da temperabilidade (Jominy), 2004
- 6 ASTM A370-12a - Standard Test Method and Def. for Mech. Testing of Steel Products, 2012
- 7 ASTM E8/8M- 13a - Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2013
- 8 ASTM E23 - 12c - Standard Test Methods for Notched Bar Impact Test. of Metallic Materials, 2012
- 9 Taylor KA. Grain-Boundary Segregation and Precipitation of Boron in 0.2 Percent Carbon Steels. Metallurgical Transactions A.1992;23A:107-119
- 10 Bhadeshia HKDH. Bainite in Steels: Transfor., Micros. and Prop. London: IOM Commu; 2001
- 11 Krauss G. Steels: Processing, Structure, and Performace. Ohio: ASM International, 2005.
- 12 Bhadeshia HKDH, Honeycombe RWK. Steel Microstructure and Propert..Oxford: BH, 2006