

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE TRABALHO NA MICROESTRUTURA E NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO AÇO PATINÁVEL USISAC 350

D. A. de S. Santos⁽¹⁾

M. R. Ribeiro⁽¹⁾

R. R. U. Queiroz⁽²⁾

G. L. de Faria⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidade Federal de Ouro Preto
Campus Universitário do Morro do Cruzeiro, Bauxita
Ouro Preto-MG, CEP: 35400-000

⁽²⁾Instituto Federal de Minas Gerais
Campus Ouro Preto, Bauxita
Ouro Preto-MG, CEP:35400-000

RESUMO

O uso de aços patináveis em tubulações para passagem de vapor de água pode ser viável por eles apresentarem boa resistência à corrosão. Contudo, é necessário analisar as alterações das propriedades em função da exposição em temperaturas elevadas. Este trabalho estudou a influência da temperatura de trabalho sobre a microestrutura e propriedades mecânicas de um aço patinável USISAC-350. Amostras foram submetidas a diferentes tempos de tratamentos isotérmicos a 600°C e suas microestruturas foram avaliadas. A influência da temperatura sobre parâmetros medidos em ensaios de tração e impacto Charpy também foi avaliada. Os resultados obtidos mostraram que para um tempo máximo de 72h submetido a 600°C, não houve significativo aumento do tamanho de grão ferrítico, porém observou-se que a temperatura de 600°C afeta as propriedades mecânicas do aço, implicando em uma redução dos limites de escoamento e de resistência. O aço USISAC-350 mostrou-se susceptível ao envelhecimento dinâmico na temperatura de 300°C.

Palavras-chave: Aço Patinável, Propriedades Mecânicas, Temperaturas Elevadas.

1 INTRODUÇÃO

Por volta de 1930, nos Estados Unidos, a empresa *United States Steel Corporation*, desenvolveu um aço de baixa liga que era menos susceptível aos danos causados pela corrosão. Esse aço recebeu o nome comercial de aço Cor-Ten como abreviação de resistência à corrosão (*CORrosion resistance*) e resistência à tração (*TENSile strength*). Os aços Cor-Ten também são chamados de aços

patináveis devido à tonalidade castanha da cobertura que se forma na superfície deles (pátina) ⁽¹⁻³⁾.

A pátina pode ser definida, como uma película de óxidos e hidróxidos, pouco porosa, aderente e protetora. Essa alteração ocorre devido à adição de alguns elementos de liga específicos no aço que, em quantidades bem determinadas e expostos a condições de elevada umidade, propiciam condições para a formação desta camada. A pátina é amorfa e tem como principal constituinte o δ -FeOOH. A presença dela representa uma barreira que irá proteger a superfície do metal, evitando que ele entre em contato com agentes que estimulem o processo de corrosão ⁽²⁻⁶⁾.

Sabe-se que a adição de certos elementos liga, como o cobre e o níquel, ou o aumento do teor de alguns deles, como o fósforo, tem um efeito positivo para diminuir a taxa de corrosão dos aços quando expostos a condições ambiente ⁽³⁻⁶⁾.

Devido às características destes aços de boa resistência à corrosão em ambientes úmidos, o uso de aços patináveis em tubulações para passagem de vapor de água em indústrias químicas vem sendo avaliado. Contudo, sabe-se que o aumento da temperatura e a exposição a ela durante longos períodos de tempo causa mudanças na estrutura dos metais, como transformações de fases e precipitação de compostos, efeitos estes, que podem diminuir a resistência mecânica e afetar a ductilidade do aço, levando até mesmo, ao seu rompimento prematuro ⁽⁷⁻¹⁵⁾.

Para as aplicações dos aços na engenharia é necessário que se tenha total confiança no desempenho dele. Com este foco, e por meio da realização de ensaios de dureza, tração e impacto, bem como análises microestruturais, este trabalho propõe avaliar a influência da temperatura de trabalho sobre a microestrutura e propriedades mecânicas do aço USISAC 350, com o objetivo de gerar resultados experimentais que permitam investigar a viabilidade de utilização desse aço na forma de dutos para a passagem contínua de vapor de água à 600°C.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O objeto de estudo é o aço patinável USISAC 350, fabricado pela empresa USIMINAS. Sua composição química é apresentada pela

Tabela 1.

Tabela 1: Composição química do aço USISAC 350.

Elemento	C	Mn	P	S	Si	Al	Cu
(% peso)	0,1	0,78	0,036	0,009	1,108	0,03	0,087
Elemento	Mo	Cr	Ni	V	Ti	N	
(% peso)	0,002	0,23	0,012	0,004	0,001	0,0044	

As amostras do aço foram recebidas para o estudo na forma de placas com dimensões de 29,5cm de comprimento, 19,5cm de largura e 6,5mm de espessura.

2.2 Caracterização do estado de entrega

Inicialmente, realizou-se uma caracterização microestrutural na direção transversal e na superfície da placa recebida com o objetivo de se verificar a presença de possível bandejamento da estrutura. Como este não foi detectado, todo o trabalho de caracterização microestrutural realizado na sequência do estudo foi executado apenas na superfície das amostras.

A caracterização microestrutural foi feita de acordo com os procedimentos sugeridos pela norma ASTM E3⁽¹⁵⁾, passando pelos procedimentos de amostragem, desbaste, lixamento, polimento, análise visual e obtenção de imagens com auxílio do microscópio ótico antes e após o ataque químico para observação dos constituintes do aço e suas principais características.

Após a caracterização microestrutural, ensaios de dureza *Brinell* (HB) foram realizados no estado de entrega do aço estudado, seguindo a norma ASTM E10⁽¹⁶⁾. Os ensaios foram realizados em um durômetro universal, da fabricante Otto Wolpert-Werke, com uma carga aplicada de 187,5kg, um penetrador com 2,5mm de diâmetro e uma constante de carga de 30kg/mm². A Figura 1 apresenta uma representação esquemática de onde foram realizados os ensaios de dureza na superfície da amostra no seu estado de entrega.

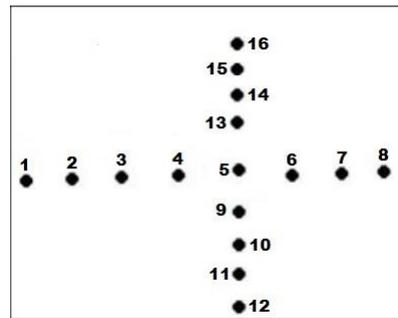


Figura 1: Pontos onde foram realizados ensaios de dureza Brinell na superfície da amostra.

2.3 Estudo da influência do tempo de residência do material à temperatura de 600°C na sua microestrutura e dureza

Oito amostras quadradas com dimensão de 3cm de lado foram retiradas da placa do aço patinável e colocadas dentro de um forno tipo mufla, onde permaneceram por diferentes intervalos de tempo a 600°C. Após a retirada de cada amostra do forno, realizou-se análise microestrutural com medição do tamanho médio de grãos e a medida de dureza (HB) em cada uma dessas amostras. A Figura 2 apresenta um fluxograma que resume esta etapa.

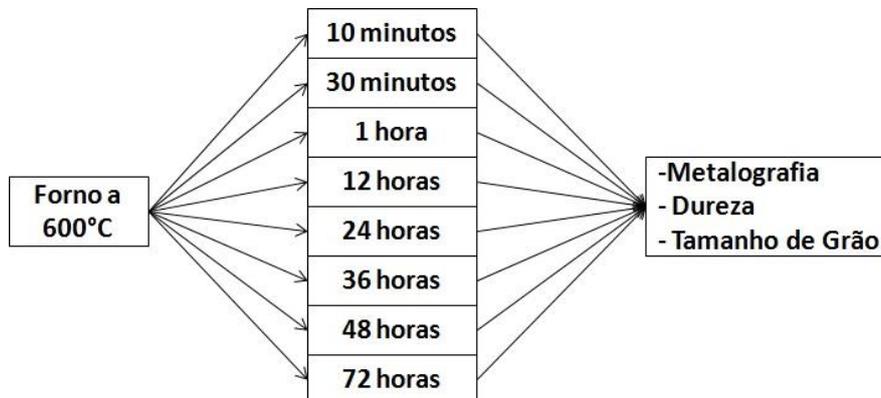


Figura 2: Fluxograma que resume a etapa de análise do efeito do tempo de exposição do material à temperatura de 600°C na sua microestrutura e dureza.

Como a distribuição de tamanhos de grãos das amostras era muito heterogênea, tanto no estado de entrega quanto nas termicamente tratadas, por meio da aplicação do *Software UMIAS*, a metodologia empregada na medição dos tamanhos de grãos do material no estado de entrega foi realizar 300 medições nos grãos considerados grosseiros (tamanho médio próximo de 45 μ m) e 120 medições nos considerados finos (tamanho médio próximo de 15 μ m).

2.4 Ensaio de tração

Por meio da utilização da máquina *Time Group* de ensaios mecânicos acoplada a um forno de resistência ôhmica, foram realizados quatro ensaios de tração para cada uma das seguintes temperaturas: temperatura ambiente, 300°C e 600°C.

A Figura 3 ilustra o desenho esquemático dos corpos de prova que foram utilizados nos ensaios de tração. O corpo de prova foi uma adaptação da norma ASTM E8/E8M⁽¹⁷⁾. As cabeças dos corpos de prova são mais longas para proteger as garras da máquina da condução excessiva de calor.

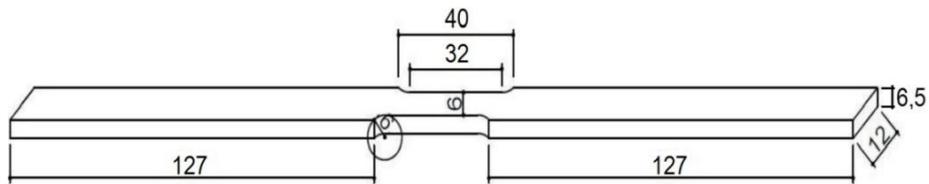


Figura 3: Corpo de prova para o ensaio de tração. As unidades de todas as dimensões estão em mm.

2.5 Ensaio de impacto

Foram realizados ensaios de impacto *Charpy* em escala reduzida utilizando-se a máquina com capacidade máxima de 150J. A Figura 4 apresenta o número de ensaios realizados e as temperaturas utilizadas. A Figura 5 apresenta um desenho esquemático dos corpos de provas utilizados nos ensaios de impacto confeccionados conforme a norma ASTM E23⁽¹⁸⁾.

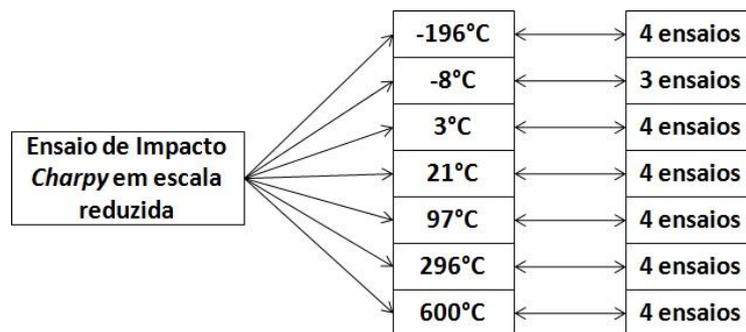


Figura 4: Temperaturas e quantidades de ensaios de impacto Charpy realizados.

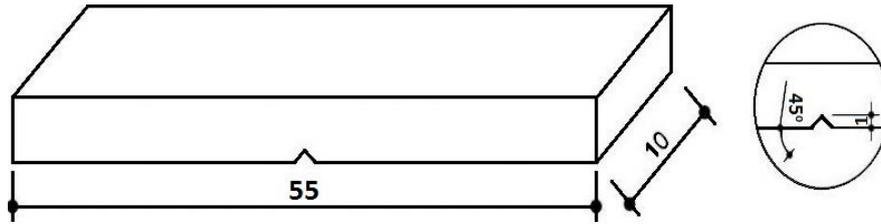


Figura 5: Corpo de prova do ensaio de impacto, no detalhe o entalhe em “V” e o seu ângulo de abertura, as unidades das dimensões são em mm.

2.6 Fractografia

Após a realização dos ensaios de tração e impacto, algumas superfícies fraturadas das amostras foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV), com intuito de se identificar os mecanismos de fratura.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização microestrutural do estado de entrega

A amostra do estado de entrega apresentou uma dureza média de 136HB, e a sua microestrutura foi analisada ao microscópio óptico. A Figura 6 mostra que a microestrutura do aço USISAC 350 é predominantemente ferrítica (grãos claros), mas também é possível perceber a presença de algumas colônias de perlita (áreas escuras). A partir da Figura 6 é possível perceber o quão heterogêneo é esse material e isso se deve, provavelmente, ao fato de que o tratamento térmico de recozimento de recristalização, que ocorreu após a laminação, não propiciou o crescimento homogêneo dos grãos. Foi constatado também que não havia bandeamento na microestrutura do aço.

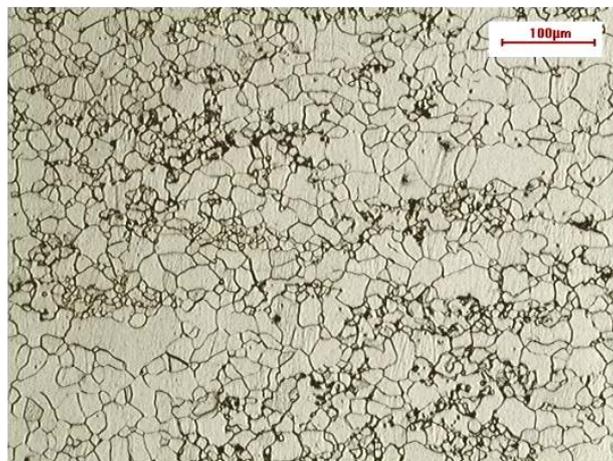


Figura 6: Microestrutura do aço USISAC 350. 200x. Ataque Nital 2%.

3.2 Influência do tempo de residência no forno a 600°C na microestrutura, tamanho de grão e dureza do aço

Devido à heterogeneidade no tamanho de grão ferrítico presente na microestrutura do material no estado de entrega, não foi possível detectar significativas mudanças na microestrutura do aço (transformações de fases, crescimento ou refino de grãos) em função do tempo de tratamentos isotérmicos a 600°C. A Figura 7 apresenta micrografias de áreas diferentes das oito amostras que foram submetidas ao tratamento isotérmico por diferentes intervalos de tempo. Percebe-se que não há um padrão que relacione mudanças na microestrutura com o aumento do tempo de residência no forno.

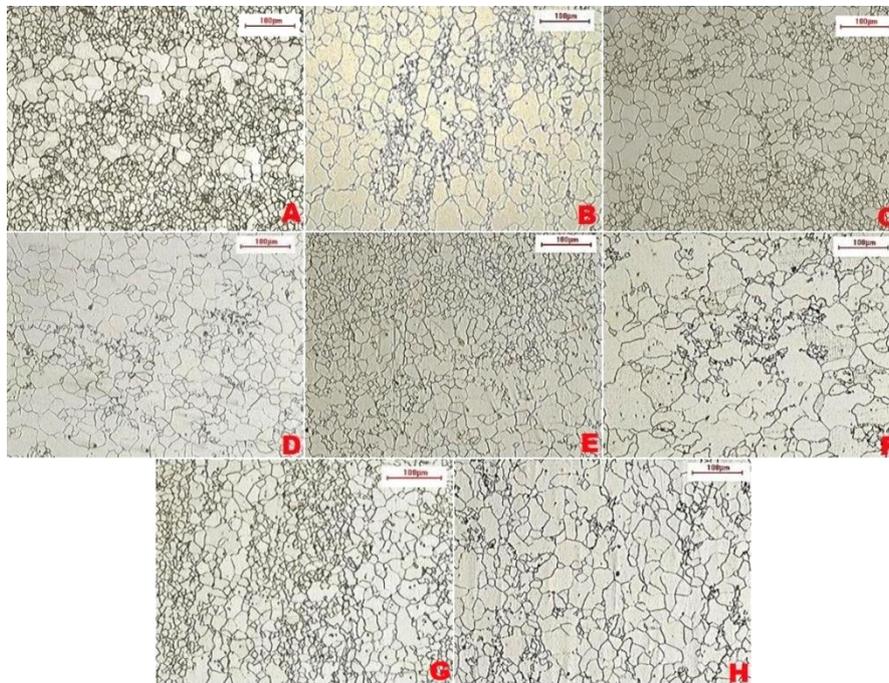


Figura 7: Microestruturas das amostras do aço USISAC 350. 200x. Ataque Nital 2%. Tempo de residência no forno a 600°C: (A) 10 minutos; (B) 30 minutos; (C).1 hora; (D) 12 horas; (E) 24 horas; (F) 36 horas; (G).48 horas; (H) 72 horas.

A Figura 8 apresenta o gráfico que relaciona a dureza medida no estado de entrega com as das amostras que passaram pelos tratamentos isotérmicos a 600°C. Assim como verificado pela caracterização microestrutural, o tempo de duração do tratamento isotérmico não causou mudanças consideráveis na dureza do material, o que, a princípio, é bom para a aplicação almejada.

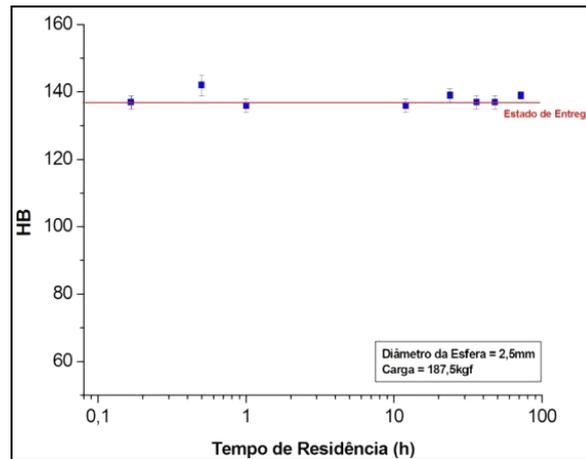


Figura 8: Gráfico relacionando a dureza da amostra, e o desvio médio, com o tempo de residência no forno a 600°C.

A análise da influência do tempo de exposição à temperatura de 600°C sobre o tamanho de grãos também foi feita por meio de um histograma para grãos grosseiros e outro para grãos finos. Neles são relacionados faixas de tamanhos de grãos com suas frequências de ocorrência. A Figura 9 apresenta estes histogramas reunindo os dados de todas as amostras, desde a amostra do estado de entrega até a amostra que permaneceu 72 horas no forno. É possível perceber que, assim como para a dureza e para a microestrutura, não houve alterações significativas nos tamanhos dos grãos, tanto os considerados finos, como os grosseiros, pois as distribuições normais seguem o mesmo padrão.

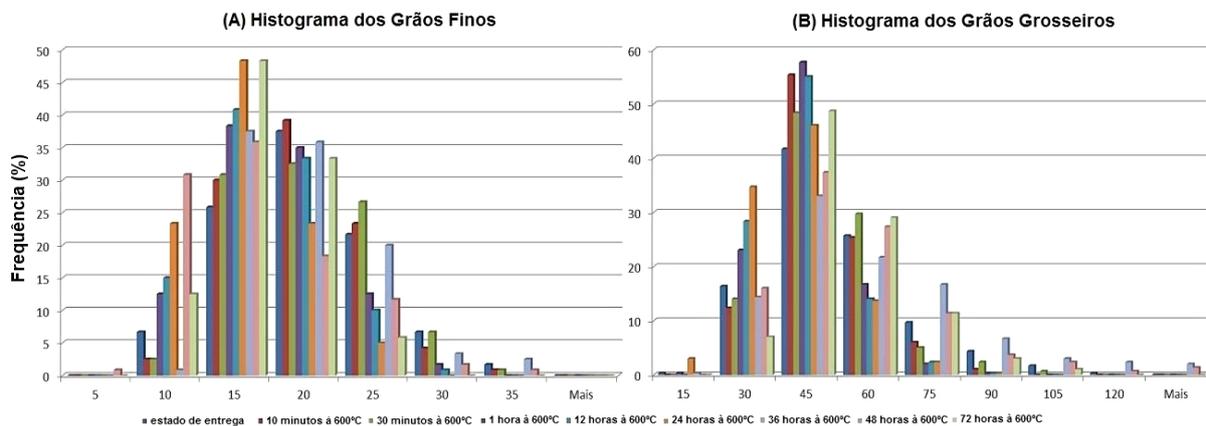


Figura 9: Histograma relacionando faixas de tamanhos em “ μm ” e a frequência que elas apareceram nas amostras, para os grãos considerados (A) finos e (B) grosseiros.

Ainda é possível notar na Figura 9 que para os grãos finos, duas faixas, entre 10-15 μm e 15-20 μm são predominantes, somando cerca de 60% para todas as

amostras. Isso não ocorre para os grãos grosseiros apenas uma faixa (30-45 μ m), abrange cerca de 40% dos grãos para basicamente todas as amostras.

3.3 Influência da temperatura no comportamento em tração

A Figura 10 apresenta as curvas tensão-deformação que foram obtidas nos ensaios de tração realizados no material à temperatura ambiente, 300°C e 600°C.

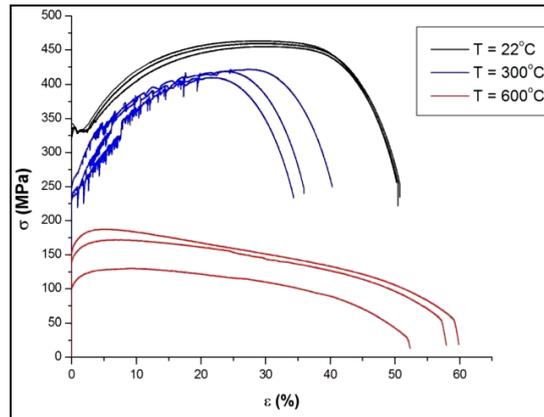


Figura 10: Comparativo entre as curvas de tensão-deformação obtidas para as três temperaturas nas quais os ensaios foram realizados.

Por meio dos dados obtidos, verificou-se que:

a) Com o aumento da temperatura de trabalho houve uma redução nos valores de limite de escoamento e de resistência do material; b) o efeito *Portevin-Le Chatelier* foi observado nos corpos de prova ensaiados à temperatura de 300°C, e assim, nota-se uma redução significativa da ductilidade do material, quando comparado às outras temperaturas de ensaio⁽⁸⁻¹⁴⁾; c) para os corpos de prova ensaiados à temperatura de 600°C, observa-se um aumento expressivo da ductilidade do material, porém com redução do limite de escoamento em até metade do valor obtido para corpos de prova ensaiados à temperatura de 22°C.

3.4 Influência da temperatura na tenacidade ao impacto

Os dados que relacionam a energia absorvida nos ensaios, e seu desvio médio, com a temperatura em que eles foram realizados, são apresentados na Figura 11.

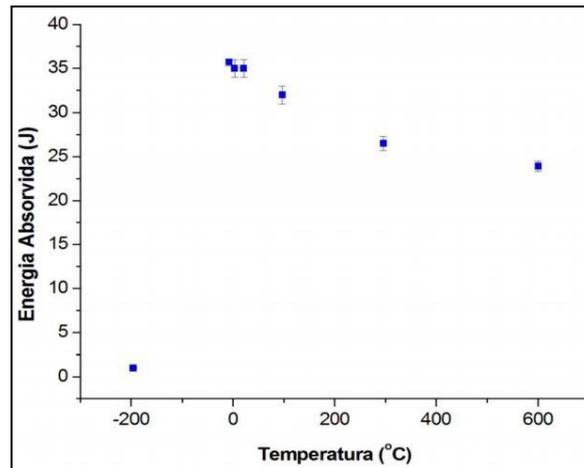


Figura 11: Gráfico relacionando a energia absorvida com a temperatura de ensaio (corpos de prova *subsize*).

Nota-se, na Figura 11, que com o aumento da temperatura ocorreu uma redução da quantidade de energia absorvida. Este resultado está coerente com os resultados de tração, visto que com o aumento da temperatura houve diminuição da resistência mecânica e da ductilidade, diminuindo assim o módulo de tenacidade do aço. Este efeito seria causado pela interação de átomos de soluto com discordâncias no volume do material⁽⁸⁻¹⁴⁾. É possível perceber que na temperatura de -196°C foi absorvido um valor muito baixo de energia quando comparado às outras temperaturas, característica esta, típica de uma fratura 100% frágil.

3.5 Fractografia

As superfícies fraturadas dos corpos de prova ensaiados em tração, nas três temperaturas de trabalho, são apresentadas na Figura 12. Nota-se a presença de *dimples* para todas as condições, indicando que as fraturas foram dúcteis. Percebe-se que o tamanho dos *dimples* são menores nas imagens do ensaio a 300°C, quando comparado com o ensaio a 600°C. Isso ocorre porque na temperatura de 300°C houve grande precipitação de carbonetos, assim, a densidade de pontos para nucleação dos *dimples* é maior do que a 600°C, deixando-os menores.

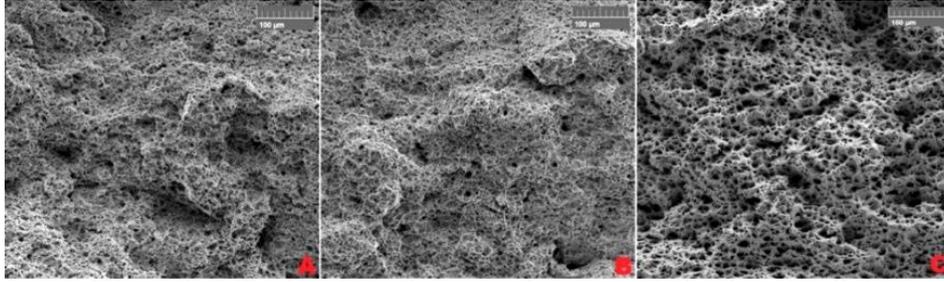


Figura 12: Fractografia do ensaio de tração nas temperaturas: (A) Ambiente; (B) 300°C; e (C) 600°C. MEV. 500x.

A Figura 13 apresenta as fractografias dos corpos de prova ensaiados em impacto Charpy nas temperaturas de -196°C, 21°C, 296°C e 600°C. Observa-se que a única fratura tipicamente frágil foi verificada para a temperatura de -196°C, sendo as demais dúcteis.

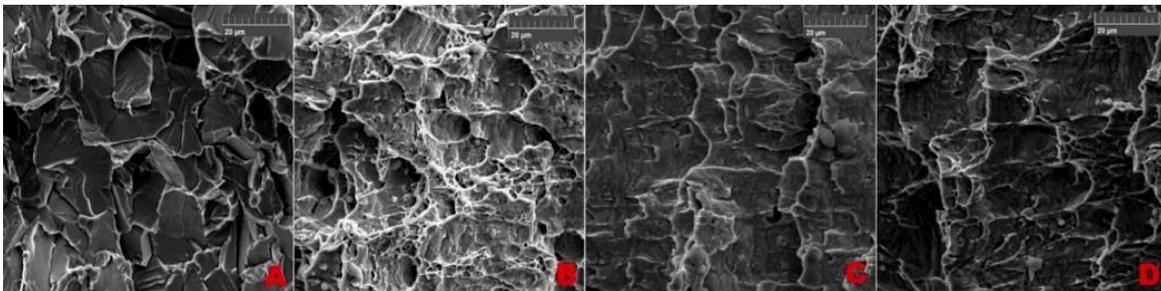


Figura 13: Fractografia do ensaio de impacto nas temperaturas: (A) -196°C; (B) 21°C; (C) 296°C; e (D) 600°C. MEV. 3000x.

4 CONCLUSÕES

O tempo de exposição à temperatura de 600°C não tem influência significativa sobre a microestrutura, tamanho de grão e dureza do aço patinável USISAC 350.

O aço USISAC 350 teve uma redução considerável de seus limites de escoamento e de resistência quando solicitado em tração em temperaturas superiores a ambiente, especialmente na temperatura de 600°C.

O aço USISAC 350 é susceptível ao envelhecimento dinâmico no ensaio de tração à 300°C.

Todas as amostras de ensaio de tração, analisadas na fractografia, apresentaram fratura dúctil.

Finalmente, a temperatura de trabalho de 600°C, afeta as propriedades mecânicas do aço USISAC 350 e este fato deve ser considerado no projeto de dutos para condução de vapor de água.

5 REFERÊNCIAS

1. GIONGO, V. Corrosão dos Aços Carbono e Patinável em Ambiente Marinho. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 1993.
2. ARRUDA, E. A. F. Estudo Comparativo do Processo Corrosivo do Aço Patinável e do Aço Carbono Comum. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica. Instituto de Tecnologia. Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.
3. PANNONI, F. D. *Princípios Da Proteção de Estruturas Metálicas Em Situação de Corrosão e Incêndio*. 2007. 90f. Coletânea do uso do aço. 4ªEd.
4. ZHANG, Q. C., WU, J.S., WANG, J.J., ZHENG, W. L., CHEN, J. G., LI, A. B. *Corrosion Behavior of Weathering Steel in Marine Atmosphere. Materials Chemistry and Physics*, v. 77, p. 603–608, 2002.
5. KAMIMURA, T., Hara, S., MIYUKI, H., YAMASHITA, M., UCHIDA, H. *Composition And Protective Ability of Rust Layer Formed on Weathering Steel Exposed to Various Environments*. *Corrosion Science*, v. 48, p.2799–2812, 2006.
6. WANG, J., SHI, P., LIU, C., JIANG, M. Corrosion Behavior of S450EW Low-alloy Weathering Steel in Cyclically Alternate Corrosion Environments. *Journal of Iron and Steel Research*. 22:1020-2013. 2015.
7. QUEIROZ, R. R. U.; FONSECA, E. J.; BUONO, V. T. L.; ANDRADE, M. S.; SILVA, E. M. P. ; GONZALEZ, B. M. High Temperature Mechanical Behavior of a Drawn Pearlitic Steel. *Wire Journal International*, 32:76–81. 1999.
8. QUEIROZ, R. R. U., CUNHA, F. G. G., GONZALEZ, B. M. Study of Dynamic Strain Aging in Dual Phase Steel. *Materials Science and Engineering A*. 543:84-57. 2012.
9. NABARRO, F. R. N. Work Hardening and Dynamical Recovery of F.C.C. Metals in Multiple Glide. *Acta Metallurgica*, 37:1521–1546. 1989.
10. CHOUDHARY, B. K.; RAO K. B. e MANNAN, S. L. *Effects Of Strain Rate And Temperature on Tensile Deformation And Fracture Behaviour Of Forged Thick Section 9Cr-Lmo Ferritic Steel*. *Journal. Pres. Ves. & Piping*, v.58, p.151-160, 1994.
11. LIU, D.; HUMPHREYS, A. O.; TOROGHINEZHAD, M. R.; JONAS, J. J. The Deformation Microstructure and Recrystallization Behavior of Warm Rolled Steels. *ISIJ International*, 42:751–759. 2002.
12. MURARI, F. D.; MELO, T. M. F. D.; GONZALEZ, B. M. Kinetics of Strain Aging in Cold Rolled Low Strength Multiphase Steel. *ISIJ International*, 50:463–468. 2010.
13. TAHERI, A. K.; MACCAGNO, T. M.; JONAS, J. J. Dynamic Strain Aging and the Wire Drawing of Low Carbon Steel Rods. *ISIJ International*, 35:1532–1540. 1995.
14. WEIDIG, C.; ESPÍNDOLA, M.; RODRIGUES, P. C.; GONZALEZ, B. M.; SPANGLER, M. Dynamic Strain Aging in Low Carbon Steel Rod. *Wire Journal International*, 31:82–85. 1995.
15. ASTM International. ASTM E3: Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. 2001.
16. ASTM International. ASTM E10: Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. 2008.

17. ASTM International. ASTM E8/E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 2009.
18. ASTM International. ASTM E23: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. 2007.

INFLUENCE OF OPERATING TEMPERATURE ON STRUCTURE AND MECHANICAL BEHAVIOUR OF WEATHERING STEEL USISAC 350

ABSTRACT

The use of weathering steel in pipes for passage of water vapor is desirable because of this steel good corrosion resistance. However, it is necessary to analyze the changes on steel mechanical properties when it works at high temperatures. This work studied the influence of work temperature on microstructure and mechanical properties of a USISAC-350 steel. Several samples were submitted to different times of isothermal heat treatments at 600°C and their microstructures were evaluated. The effect of temperature test on parameters measured in tensile and Charpy tests was also studied. The obtained results showed that for 72h at 600°C, no significant effect were noticed on ferritic grain size. However, it was observed that the temperature work has a great influence on mechanical properties, mainly on steel tensile test behavior, with a strong decrease on yield and tensile strength. The USISAC-350 steel is susceptible to dynamic aging phenomena at 300°C.

Key-words: Weathering Steel, Mechanical Properties, High Temperatures.