

PROPRIEDADES DE TRAÇÃO E IMPACTO DO AÇO ASTM A-297 GR HP MODIFICADO COM NIÓBIO, EM ALTAS TEMPERATURAS¹

Danilo Borges Villarino de Castro²

Maria Cristina Adami Gatti³

Cassius Olívio Figueiredo Terra Rucker⁴

Dirceu Spinelli⁵

Waldek Wladimir Bose Filho⁵

Resumo

Este trabalho tem como objetivo principal estudar o comportamento mecânico de tração e impacto, em temperaturas elevadas, do aço ASTM A-297 Gr HP, modificado com nióbio. Foram estudadas duas condições do aço: como-recebido (CR) e de envelhecido durante 1000 horas a 927°C (T1000), ensaiados nas temperaturas de 25°C, 871°C, 899°C, 927°C, 954°C e 982°C. Para a avaliação do comportamento da tenacidade ao impacto, foram utilizados corpos de prova Charpy do tipo convencional, com ou sem pré-trinca de fadiga. O tratamento térmico de envelhecimento (T1000), imposto ao material, levou a um aumento do valor dos parâmetros de resistência á tração e diminuição dos parâmetros de ductilidade, em relação à condição CR. Em temperaturas elevadas, foi observada maior ductilidade e menor resistência mecânica para ambas as condições, CR e T1000, se comparadas com os resultados obtidos na temperatura de 25°C. Por fim, as duas condições do material estudado mostraram-se sensíveis à presença de um concentrador de tensão e intensificador de tensão semelhante a uma trinca.

Palavras-chave: Aço ASTM A-297 Gr HP; Tração; Impacto; Altas temperaturas.

IMPACT AND TENSILE PROPERTIES OF A-297 GR HP STEEL, MODIFIED WITH NIOBIUM, IN HIGH TEMPERATURES

Abstract

This work aimed to study the high temperature mechanical behavior in terms of tensile and impact properties of ASTM A-297 Gr HP steel modified with niobium. Two conditions of the steel has been studied: as-received (CR) and aged during 1000 hours at 927°C (T1000), which were tested in room temperature and the temperature range of 871-982°C. The Charpy impact tests were performed with and without fatigue-precracking the specimens. Aging heat treatment (T1000) increased the ultimate strength parameters and reduced the ductility parameters, as compared to the CR condition. At high temperatures, the increase on the ductility and decrease on mechanical strength were noticed for both CR and T1000 conditions, as compared to the results obtained at ambient temperature. Finally, the material tested under both CR and T1000 conditions was sensitive to a crack-like stress concentrator/intensifier.

Keywords: ASTM A-297 Gr HP steel; High temperatures; Mechanical properties.

1 *Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

2 *Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais no Programa de Pós-Graduação Interunidades da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.*

3 *Pós-doutoranda em Ciência e Engenharia de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.*

4 *Professor Doutor do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.*

5 *Professor Titular do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.*

1 INTRODUÇÃO

A composição básica do aço HP, sem adições de Nb e Ti, exibe uma microestrutura típica de um aço fundido resistente ao calor, Este tipo de aço é utilizado em fornos de refino de petróleo, equipamentos militares, turbinas a gás, moinhos de aço, entre outros.⁽¹⁾

No caso particular da indústria petroquímica, esta classe de aços vem sendo usada desde o início dos anos 1960, em substituição às tradicionais superligas de níquel, obtendo-se, assim, uma redução de custos e propriedades similares sob condição de fluência, que é um dos principais mecanismos de degradação para falhas em serviço a altas temperaturas. O entendimento desta relação tem motivado o desenvolvimento de novas gerações de aços de tempos em tempos. Os avanços da técnica de produção, como a fundição por centrifugação, também contribuíram para melhor desempenho observado ao longo dos anos.⁽²⁾

Em aços estruturais microligados, o envelhecimento dinâmico (*dynamic strain aging*, DSA) já é reconhecido desde o início dos anos 70 como um mecanismo efetivo na resistência à deformação em temperaturas elevadas e, por conseguinte, na resistência à fluência também. Esta manutenção das propriedades de resistência mecânica em altas temperaturas, juntamente com o envelhecimento dinâmico, devem-se à interação dinâmica entre discordâncias e dipolos C-elementos de liga.⁽³⁾

Leslie⁽⁴⁾ afirmou que esses dipolos provocam um efeito de endurecimento por solução sólida (*interaction solid-solution hardening*, ISSH), porém podem também interagir com discordâncias, resultando no envelhecimento dinâmico. Em relação aos aços resistentes ao calor, o endurecimento por solução sólida e a presença de precipitados estáveis e finamente dispersos têm sido de grande valia para a manutenção das propriedades de resistência mecânica em altas temperaturas.⁽³⁾

Sob o ponto de vista microestrutural, o material consiste de uma matriz austenítica circundada por carbeto primários (Cr_7C_3), principalmente na região interdendrítica. Quando exposto a temperatura elevada (tratamentos térmicos de envelhecimento ou em serviço), uma fina precipitação secundária de carbeto de cromo ($Cr_{23}C_6$) é promovida no interior da matriz. A Figura 1 evidencia esses dois casos de precipitação. A característica desta precipitação, juntamente com a que ocorre durante a solidificação, chamada de primária, controlam as propriedades mecânicas dos aços desta classe.⁽⁵⁾

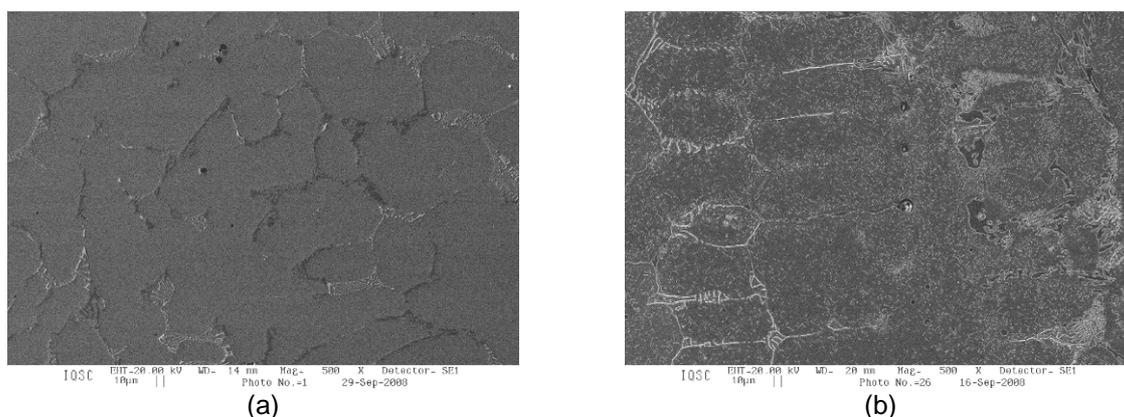


Figura 1. Micrografia ótica de amostras do aço HP nas condições: (a) como recebida e (b) após envelhecimento de 1000 horas na temperatura de 927°C.⁽⁶⁾

O ensaio de Charpy convencional é um método muito utilizado em engenharia para avaliar semi-empiricamente a tenacidade ao impacto de materiais. Entretanto, o ensaio instrumentado Charpy contribui para o aumento de informações, captando grandezas como força máxima (P_m), força no escoamento (P_e) e força de início de propagação da trinca (P_i), que são utilizadas para calcular a tenacidade à fratura elasto-plástica dinâmica (J_d) em materiais dúcteis.

O ensaio consiste em se registrar os sinais da força de impacto do martelo no corpo de prova, e obter gráficos da força (P) em função do tempo (t) e de força (P) em função do deslocamento (s). No sistema instrumentado e informatizado Charpy, o deslocamento na linha de carga é obtido, e a partir das curvas P vs t , e P vs s , obtém-se informações sobre a força de escoamento e força máxima. É medida a força de início da instabilidade da trinca e a de término da instabilidade da trinca, bem como os seus devidos tempos e deslocamentos de escoamento, respectivamente, t_e e s_e ; máximo, t_m e s_m ; e total, t_t e s_t . Da curva de força (F) vs deslocamento (s) pode-se determinar as energias relativas aos estágios de iniciação (E_i) e de propagação (E_p) da trinca, assumida numa análise simples, como, respectivamente, a energia até a força máxima e após a força máxima, que não são possíveis de serem distinguidas nos ensaios clássicos.^(7,8) A energia total absorvida no impacto também pode ser obtida pela integração numérica da curva, como mostrado na Figura 2.⁽⁹⁾

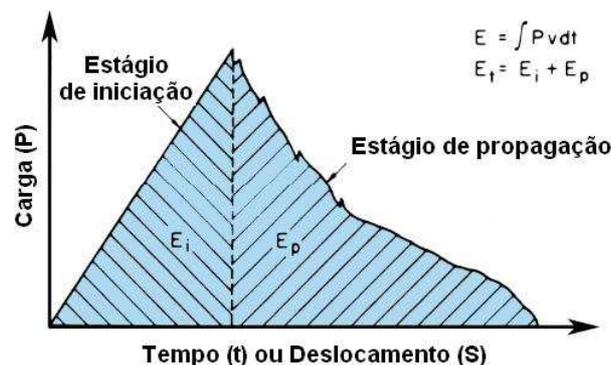


Figura 2. Força em função do deslocamento durante um ensaio de impacto Charpy instrumentado.⁽⁹⁾

Este trabalho faz parte de um projeto maior, cujo objetivo é o de caracterizar o comportamento mecânico em temperaturas elevadas do aço ASTM A-297 Gr HP, modificado com Nb. O aço em questão é aplicado, e.g., em suportes de fornos de tratamentos térmicos que permanecem longos períodos de tempo em temperaturas de operação em torno de 900°C.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 mostra a composição química (% em peso) medida no aço ASTM A-297 Gr HP, modificado com nióbio. Foram estudadas duas condições deste material: CR (como-recebido) e T1000 (envelhecido a 927°C durante 1.000 horas). As temperaturas dos ensaios de tração em amostras CR e T1000 foram as seguintes: 25°C, 871°C, 899°C, 927°C, 954°C e 982°C, segundo as normas ASTM E-8M-08⁽¹⁰⁾ e ASTM E-21-05.⁽¹¹⁾ A Figura 3 apresenta a geometria e dimensões do corpo de prova de tração. Os ensaios foram realizados em uma máquina servo-hidráulica MTS 810 com capacidade de 250 kN. Com a realização desses ensaios foram determinados parâmetros de resistência, tais como o limite de

resistência (σ_R) e o limite de escoamento a 0,2% (σ_e), e parâmetros de ductilidade, como o alongamento total (A_t) e a redução de área (RA).

Tabela 1. Composição química (% em peso) do aço ASTM A-297 Gr HP, modificado com nióbio

Elementos de liga	Valor medido	Valor nominal (ASTM A-297)
C	0,33	0,35 – 0,75
Si	1,31	2,50 (máx)
Mn	0,96	2,00 (máx)
P	0,02	0,04 (máx)
S	0,01	0,04 (máx)
Cr	23,8	24,0 – 28,0
Ni	36,2	33,0 – 37,0
Mo	0,10	0,50 (máx)
Cu	0,08	0,25 (máx)
Nb	1,28	1,00 – 1,50

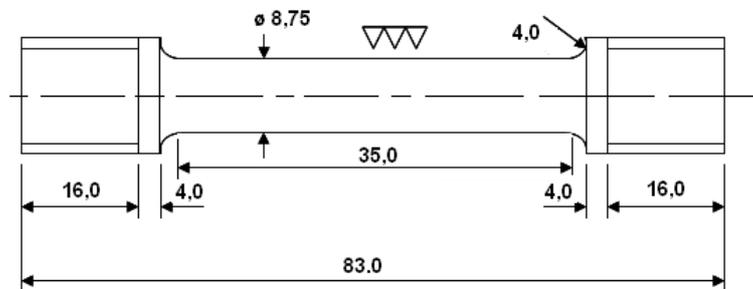


Figura 3. Geometria e dimensões, em mm, dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração.

O aquecimento dos corpos de prova ensaiados em tração foi realizado por um forno de indução da marca Inductoheat de 7,5 kW de potência e frequência de 200 kHz. As medidas e o controle da temperatura foram feitas sem contato, com o uso de um pirômetro infravermelho, da marca Raytek, equipado com mira a laser. A temperatura medida por este sensor serviu como parâmetro de controle para o forno de indução. Os corpos de prova foram fixados em uma garra própria para a realização de ensaios mecânicos de tração em altas temperaturas modelo MTS 680.01. A Figura 4(a) apresenta uma visão geral do arranjo experimental utilizado para a realização dos ensaios de tração em temperaturas elevadas. A Figura 4(b) mostra em detalhe uma visão local da região de acoplamento do corpo de prova na garra hidráulica, onde podem ser visto a bobina de aquecimento por indução, o extensômetro de hastes cerâmicas e o pirômetro infravermelho.

Os ensaios de impacto foram realizados em corpos de prova Charpy do tipo A, de acordo com a norma ASTM E-23-07,⁽¹²⁾ cujas geometrias e dimensões estão apresentadas na Figura 5. Os corpos de prova das condições CR e T1000 foram retirados na orientação L-S da peça fundida, e três corpos de prova foram ensaiados para cada condição. Esses ensaios foram realizados em seis diferentes temperaturas: 25°C, 871°C, 899°C, 927°C, 954°C e 982°C. Além dos corpos de prova convencionais (entalhe em V), foram utilizados corpos de prova com a presença de pré-trinca na raiz do entalhe, com o intuito de verificar se o material apresenta sensibilidade à presença de uma trinca. A confecção de uma pré-trinca por fadiga de 2 mm, a partir da raiz do entalhe, em cada corpo de prova, foi realizada em uma máquina servo-hidráulica MTS modelo 810, utilizando uma frequência de 30 Hz, razão de carga R=0,1 e carga máxima de 4,5 kN.

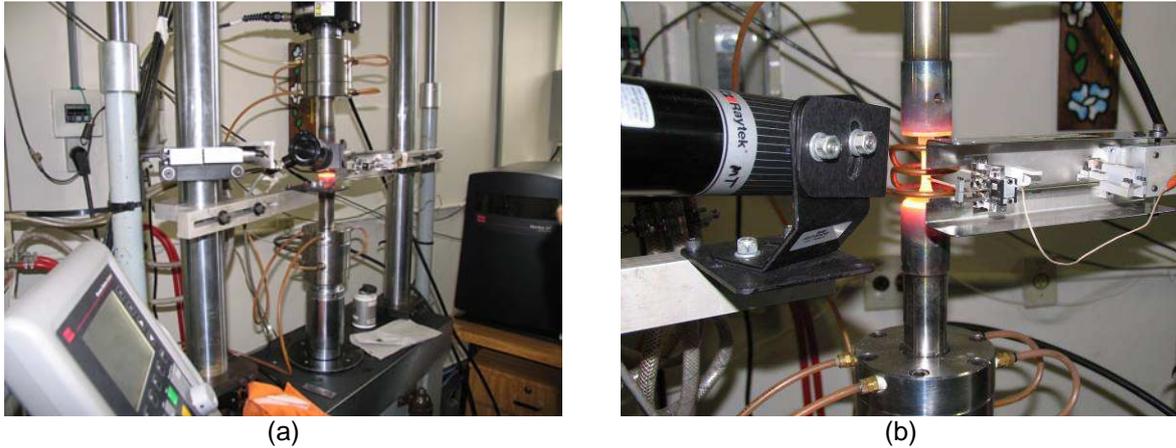


Figura 4. (a) Visão geral do sistema utilizado para ensaios de tração em temperaturas elevadas. (b) Detalhe da região de acoplamento do corpo de prova na garra hidráulica para ensaios em temperaturas elevadas.

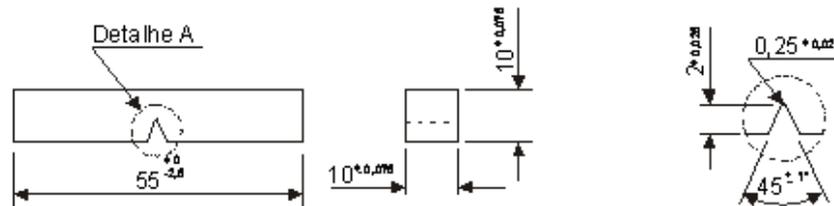


Figura 5. Geometria e dimensões, em milímetros, dos corpos de prova de impacto Charpy tipo A.

Os ensaios de impacto Charpy instrumentado foram realizados em um sistema Instron-Wolpert® PW30 com fundo de escala máximo de 300 Joules e velocidade máxima de impacto de 5,52 m/s, integrado a um microcomputador que opera com programas computacionais desenvolvidos pela Instron® e National Instruments®, os quais são destinados à leitura e tratamento dos dados para interpretação dos resultados finais.

O sistema de impacto abrange a instrumentação do martelo por meio de extensômetros que registram o sinal de carga (P) em um osciloscópio, possibilitando a visualização da variação da carga com o tempo (t). O deslocamento, ou deflexão do espécime na linha de aplicação da carga (s), é monitorado por meio de um dispositivo baseado em raios infravermelhos.

Os gráficos $P-t$ e $P-s$ fornecem informações precisas sobre a carga de escoamento, carga máxima, início e freamento de trinca instável, dentre outros parâmetros.

As energias parciais absorvidas na iniciação (E_i) e na propagação (E_p) da trinca, respectivamente, durante o impacto, foram estimadas via integração da curva $P-s$, respectivamente até carga máxima, e após carga máxima, tal como ilustrado na Figura 2.

Desta forma, a energia total despendida no processo completo de fratura (E_t) compreende as duas parcelas ($E_t = E_i + E_p$). Os valores E_t foram automaticamente corrigidos para as perdas de energia decorrentes da fricção entre o corpo de prova e o suporte do martelo com o ar, e do lançamento do corpo de prova já fraturado.

O aquecimento dos corpos de prova foi realizado com a utilização de um forno horizontal, tipo mufla, da marca EDG FI-2. A temperatura do corpo de prova dentro do forno foi calibrada com um termopar do tipo Pt-PtRh13%. A Figura 6 apresenta as fotos do arranjo experimental utilizado para a realização dos ensaios de impacto em temperaturas elevadas.



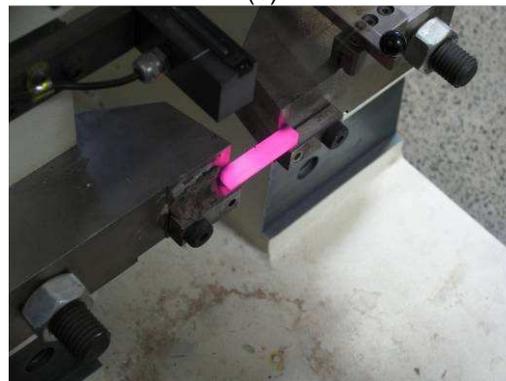
(a)



(b)



(c)



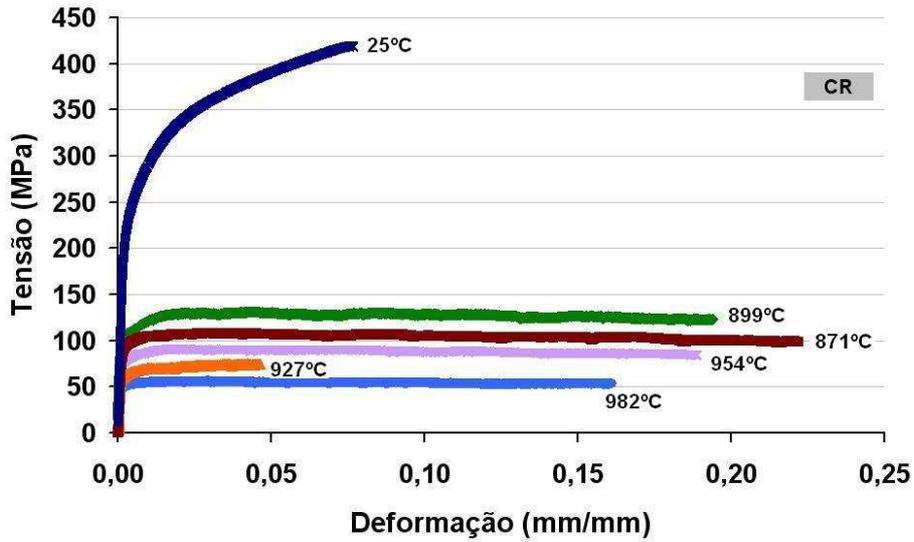
(d)

Figura 6. Arranjo experimental utilizado para a realização dos ensaios de impacto a alta temperatura: (a) equipamento Instron-Wolpert, (b) forno de mufla horizontal, (c) detalhe do corpo de prova aquecido dentro da câmara do forno, e (d) corpo de prova posicionado na máquina para a realização do ensaio.

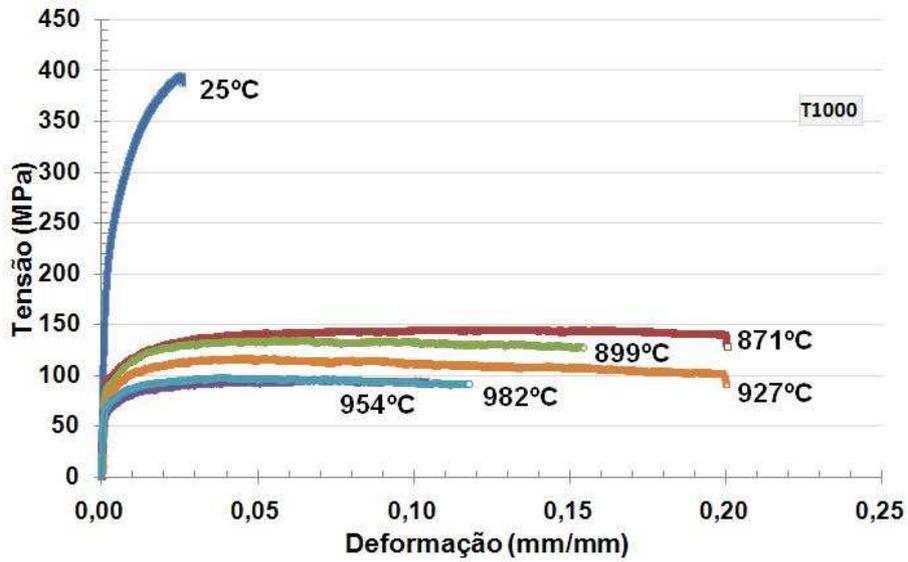
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com os resultados mostrados na Tabela 1, pode-se concluir que, com exceção do carbono e do cromo, que se encontram levemente abaixo da faixa nominal, os teores de elementos de liga estão dentro das especificações exigidas pela norma ASTM A-297-97.⁽¹³⁾

As Figuras 7(a) e 7(b) apresentam as curvas tensão vs. deformação obtidas nos ensaios de tração do material para as condições CR e T1000, respectivamente, em função da temperatura de ensaio, para uma velocidade de ensaio de 2 mm/min. Observa-se a presença de serrilhados nas curvas de tração relacionadas às temperaturas elevadas, caracterizando o escoamento plástico descontínuo conhecido como efeito Portevin-LeChatelier (PLC). Este serrilhado se encontra nas cinco temperaturas em altas temperaturas escolhidas para a realização destes ensaios. A escolha de cinco níveis de temperatura em torno de 900°C se deu devido ao nível de temperatura de operação do equipamento fabricado com este material variar em torno de 900°C. A presença do efeito PLC nas curvas de tração, σ - ϵ , é um aspecto clássico do envelhecimento dinâmico, observado em aços de baixo teor de carbono, indicando que nos aços resistentes ao calor, este envelhecimento tem características semelhantes.⁽³⁾



(a)



(b)

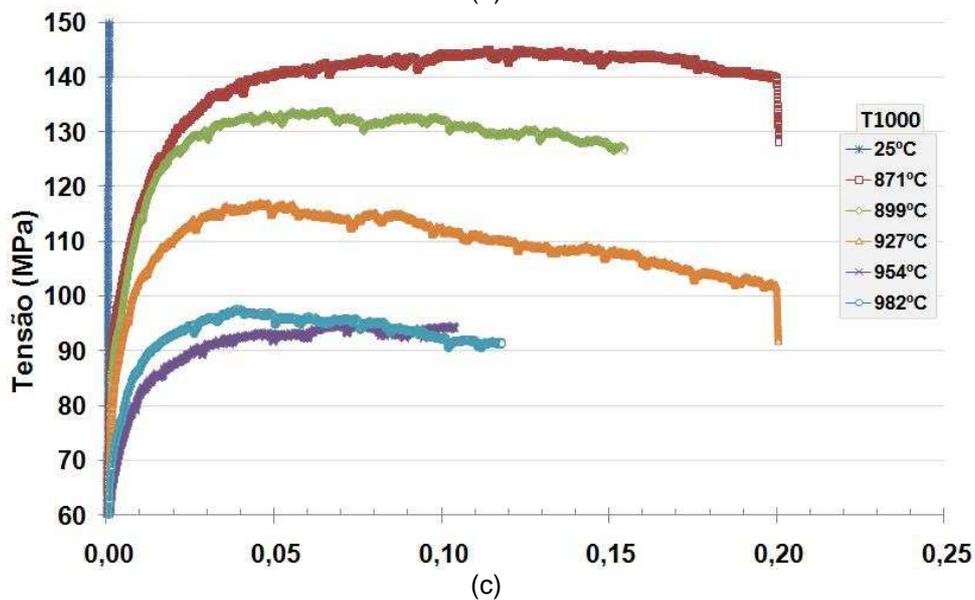


Figura 7. Curvas do comportamento em tração em função da temperatura para as condições: (a) CR e (b) T1000; (c) destaque do efeito PLC na condição T1000 em ensaios em temperaturas elevadas.



A Figura 8 apresenta outros resultados do material obtidos nos ensaios de tração e que comprovam que o tratamento térmico de envelhecimento teve como resultado o aumento dos parâmetros de resistência mecânica a 25°C, devido à precipitação de carbeto secundários (provavelmente o $Cr_{23}C_6$) na matriz austenítica.⁽⁶⁾ Em temperaturas elevadas, os parâmetros de resistência mecânica, de ambas as condições do material estudado, decrescem com o aumento da temperatura de ensaio, enquanto que os parâmetros de ductilidade aumentam consideravelmente.

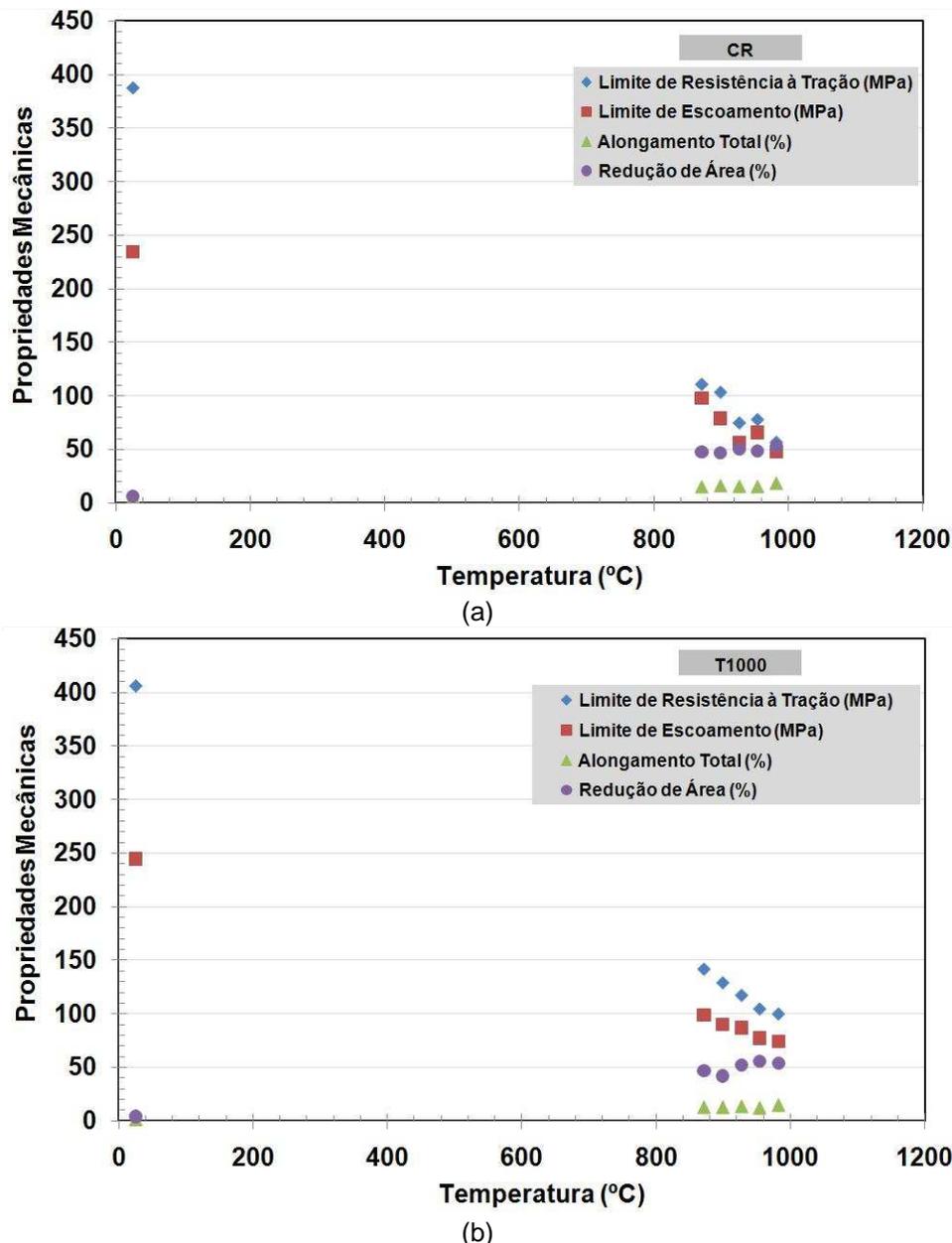
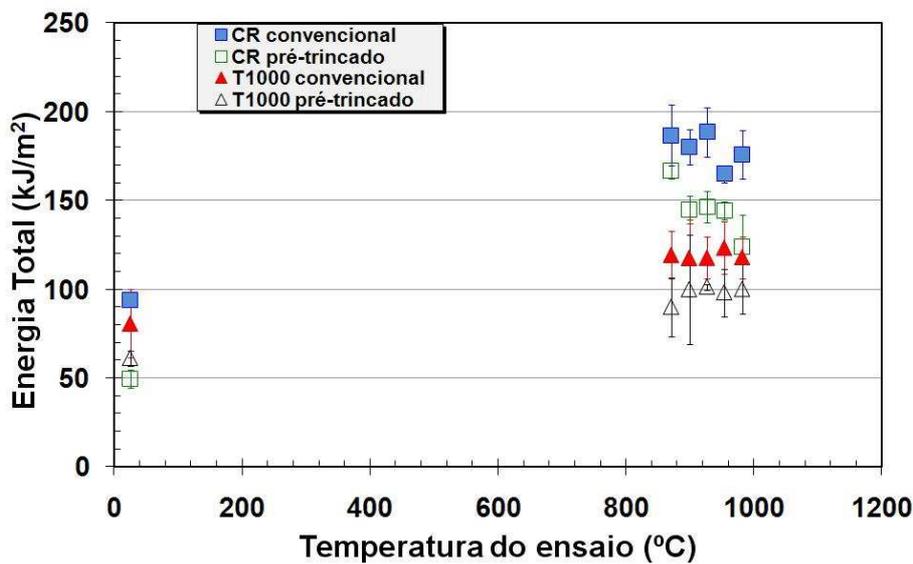


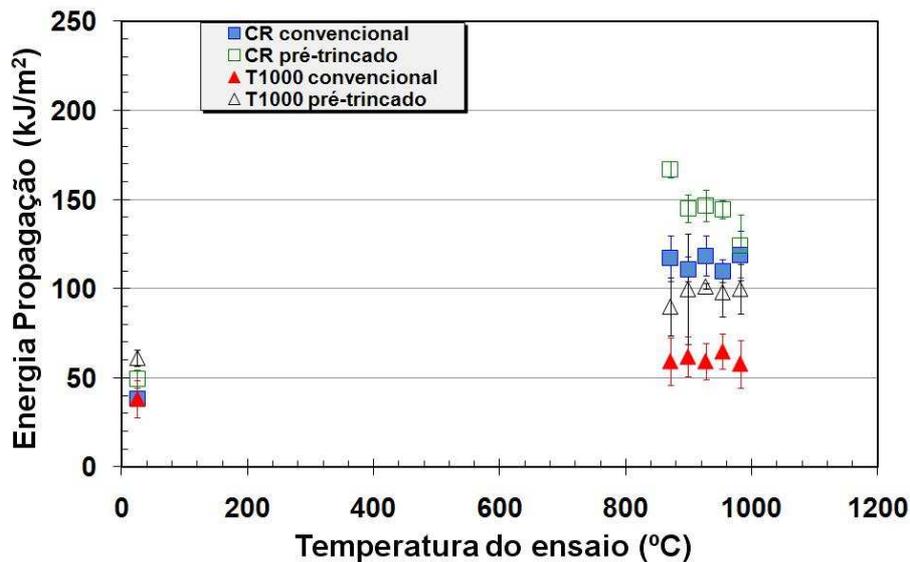
Figura 8. Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração em função da temperatura de ensaio para as condições: (a) CR e (b) T1000.

Ao contrário, mas pelo mesmo motivo, nota-se a queda nos valores da energia absorvida por impacto, em todas as temperaturas estudadas, tanto na condição T1000 como na CR. Isso se deve ao fato da maior plasticidade do aço estudado em altas temperaturas.⁽¹⁴⁾ Desta forma, o fortalecimento da matriz austenítica causou um decréscimo dos valores de tenacidade do aço em torno de 25% a 35%, conforme

se observa na Figura 9(a), a qual apresenta os valores de energia total absorvida por impacto, em kJ/m^2 , de cada condição, em cada temperatura. Ainda, em relação aos ensaios de impacto, quando se trata de comparar os resultados obtidos em corpos de provas entalhados e entalhados + pré-trinca, nota-se que, para ambas as condições CR e T1000, o material exibiu menor tenacidade ao impacto com a existência de pré-trinca. Isto pode ser comprovado pelos resultados dos valores de energia de propagação obtidos (por impacto, em kJ/m^2) conforme mostrado na Figura 9(b). Os corpos de prova entalhados e pré-trincados em ambas as condições estudadas apresentaram valores de tenacidade ao impacto de 10% a 28% menores do que os valores obtidos para os corpos de prova somente entalhados, isto para a mesma temperatura de ensaio. No entanto, nota-se que os valores médios de energia absorvida por impacto obtidos a 25°C para os corpos de prova, com e sem pré-trinca por fadiga, são bem inferiores aos valores obtidos em temperaturas elevadas.



(a)

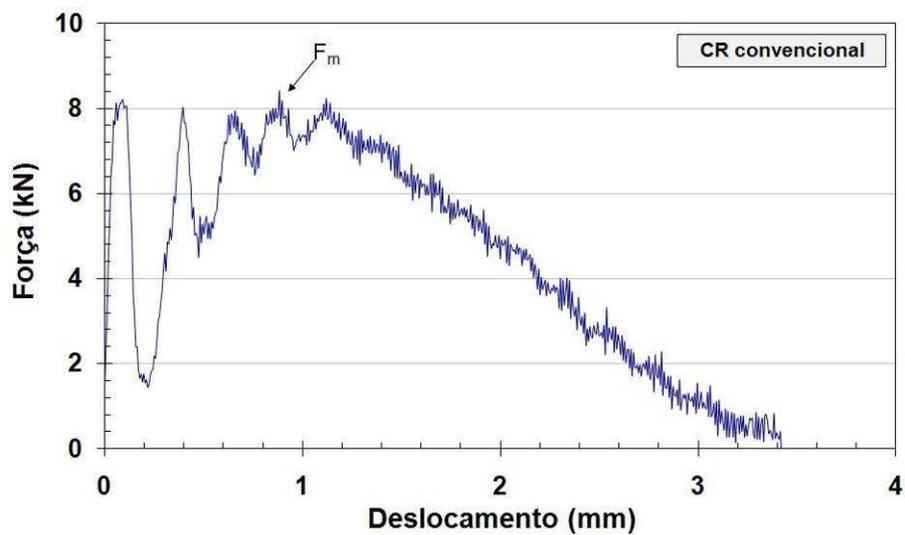


(b)

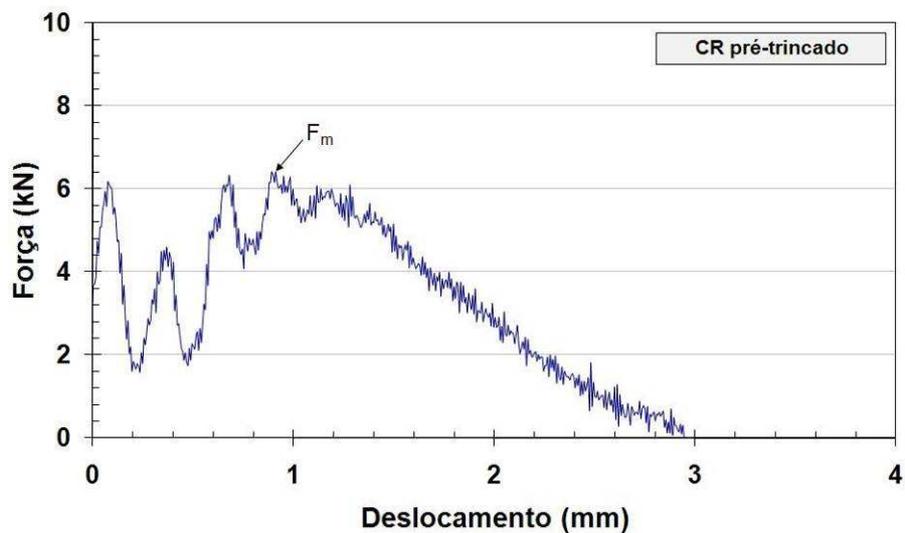
Figura 9. Energia absorvida por impacto (kJ/m^2), das condições estudadas, em função da temperatura de ensaio: (a) energia total e (b) energia de propagação.

Dessa forma, verifica-se que a energia de propagação por impacto de um corpo de prova somente entalhado apresenta um valor mais próximo da energia total que os corpos de prova pré-trincados, comprovando que a existência da pré-trinca é suficiente para suprimir a energia necessária para a iniciação da trinca por impacto (em torno de 50 kJ/m^2 a 75 kJ/m^2). A energia tem que ser menor no caso dos espécimes pré-trincados, pois a área resistente é menor. Assim sendo, deve-se calcular a energia de iniciação e de propagação, levando-se em consideração a área resistiva.

As Figuras 10(a) e 10(b) apresentam o comportamento obtido da curva P vs s de espécimes da condição CR convencional e pré-trincado, ensaiados em 927°C , respectivamente. Nota-se que o espécime pré-trincado possui menor valor de força máxima ($P_m = 6,4 \text{ kN}$) que o espécime convencional ($P_m = 8,2 \text{ kN}$), conforme já era de se esperar.



(a)



(b)

Figura 10. Comportamento da força versus distância, obtido de ensaios de impacto Charpy de espécimes da condição CR ensaiados a 927°C : (a) convencional e (b) pré-trincado.



4 CONCLUSÕES

O tratamento térmico de envelhecimento do aço ASTM A-297 Gr HP modificado com nióbio, na temperatura de 927°C por 1.000 horas (T1000) provocou um aumento dos valores dos parâmetros de resistência mecânica e uma diminuição nos parâmetros de ductilidade das propriedades mecânicas de tração, quando comparados com valores destes parâmetros na condição de como recebido (CR).

Analisando os resultados de tração obtidos em temperaturas elevadas, observa-se um aumento dos parâmetros de ductilidade e uma diminuição significativa dos parâmetros de resistência para ambas as condições CR e T1000, quando comparados com os resultados obtidos na temperatura de 25°C. Estes resultados demonstram que o aço estudado apresenta maior ductilidade quando solicitado em carregamento trativo em temperaturas em torno de 900°C.⁽¹⁴⁾

Os resultados de tenacidade ao impacto Charpy comprovaram o fortalecimento da matriz austenítica do aço estudado, pois o tratamento de envelhecimento (T1000) aumentou os valores de energia total absorvida em relação à condição CR na temperatura 25°C. Outra observação importante é que a tenacidade ao impacto foi maior nas temperaturas elevadas, quando comparada com os resultados obtidos a 25°C, para ambas as condições estudadas. Novamente, isso se deve ao fato do aumento da tenacidade do aço quando submetido a altas temperaturas.⁽¹⁴⁾ Ainda, o fortalecimento da matriz austenítica causado pelo tratamento de envelhecimento (condição T1000), fez com que os valores de tenacidade ao impacto fossem menores que na condição CR em torno de 35% nas temperaturas elevadas e 25% para a temperatura ambiente.

Com relação aos resultados obtidos nos ensaios de impacto instrumentado, pode-se concluir que em ambas as condições, CR e T1000, a liga estudada mostrou-se sensível à presença de um intensificador de tensão (entalhe + pré-trinca). Tal fato pode ser comprovado comparando-se os valores da energia absorvida durante o processo de iniciação e propagação da trinca nos corpos de prova entalhados com a energia total absorvida pelos corpos de prova com entalhe + pré-trinca.

A ocorrência do fenômeno de envelhecimento dinâmico em altas temperaturas parece ser um componente importante no mecanismo de aumento de resistência mecânica por fluência desta liga, quando submetida a carregamentos em temperaturas elevadas.

Agradecimentos

Os autores expressam os seus sinceros agradecimentos a Capes e ao CNPq pelas bolsas de pós-doutorado e doutorado concedidas:

Processos Capes nº23038038434/2008-33 e CNPq nº142653/2008-0.

REFERÊNCIAS

- 1 NUNES, F.C., ALMEIDA, L.H., DILLE, J., DELPLANCKE, J.L., LE MAY, I. *Microstructural changes caused by yttrium addition to NbTi-modified centrifugally cast HP-type stainless steel. Materials Characterization*, v.58, p.132-142, 2007.
- 2 LIAW, P.K., SAXENA, A., SCHAEFER, J. *Creep crack growth behavior of steam pipe steels: effects of inclusion content and primary creep. Engineering Fracture Mechanics*, v.57, p.105-130, 1997.



- 3 CASTRO, C.S.B., GONZALEZ, B.M., BARBOSA, R. Estudo do envelhecimento dinâmico em um aço Nb-Mn-Cr-Mo. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, v.5, n.2, p.121-125, 2008.
- 4 LESLIE, W.C. *The physical metallurgy of steels*. Tóquio: McGraw-Hill, 1982.
- 5 NUNES, F.C. Alteração da microestrutura e das propriedades mecânicas pela adição de ítrio em aços inoxidáveis do tipo HP modificado fundidos por centrifugação. 2005, 288p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia Metalúrgica), Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, COPPE/UFRJ-RJ, Rio de Janeiro/RJ.
- 6 CASTRO, D.B.V., MALUF, O., BUENO, L.O., BOSE FILHO, W.W., SPINELLI, D., RUCKERT, C.O.F.T. Efeito do envelhecimento nas propriedades mecânicas do aço ASTM A-297 Gr HP modificado com nióbio. *CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, Porto de Galinhas/PE, Brasil, n.18, p.5852-5864, nov. 2008.
- 7 HIRAYAMA, R., SANTOS, G.P, TOKIMATSU, R.C., GONÇALVES, A.C., LAGO, D.F. Charpy instrumentado - Aplicação de um filtro eletrônico baseado na transformada de Fourier para eliminar sinais interferentes oriundos do martelo e corpo-de-prova. *Anais do 8º Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica*, Cusco, Peru, 6p, out. 2007.
- 8 PASCHOALOTTO, L.A.C., MOREIRA, R.F., TOKIMATSU, R.C., FERREIRA, I. Análise dos sinais obtidos do martelo e do corpo-de-prova durante carregamento por impacto de um ensaio Charpy. *Anais do 8º Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica*, Cusco, Peru, 8p, out. 2007.
- 9 GATTI, M.C.A., TARPANI, J.R. *Charpy impact toughness of conventional and advanced composite laminates for aircraft construction. Proceedings of COBEM 2007*. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. Brasília/DF, Brasil, 10p, nov. 2007.
- 10 ASTM E-8M-08. *Standard test methods for tension testing of metallic materials. American Association State Highway and Transportation Officials Standards. AASHTO No.: T68 an American National Standard*, 2008.
- 11 ASTM E-21-05. *Standard test methods for elevated temperature tension tests of metallic materials. ASTM International*, 2005.
- 12 ASTM E-23-07. *Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials. ASTM American National Standard*, 2007.
- 13 ASTM A-297-97. *Standard test methods for steel castings, iron-chromium-nickel, heat resistant, for general application. Reapproved in 1998. ASTM American National Standard*, 1998.
- 14 CASTRO, D.B.V., ROSSINO, L.S., BUENO, L.O., SPINELLI, D., BOSE FILHO, W.W., RUCKERT, C.O.F.T. Propagação de trinca por fadiga do aço ASTM A-297 Gr HP modificado com nióbio. *Anais do 64º Congresso Anual da ABM (Associação Brasileira de Materiais, Metalurgia e Mineração)*, Belo Horizonte/MG, Brasil, n.64, 12p, jul. 2009.