

AValiação DA TENACIDADE À FRATURA DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO 430 ESTABILIZADO AO NIÓBIO¹

Márcio Nascimento Cunha²
Elmo César Marinho Soares²
Ramon Antunes Saturnino²
Ricardo Augusto Faria³

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo sobre a tenacidade de um aço inoxidável ferrítico 430 estabilizado ao nióbio. O objetivo deste trabalho é avaliar a tenacidade à fratura do aço inoxidável 430 estabilizado ao nióbio e obter a temperatura de transição dúctil-frágil através do ensaio Charpy-V. Foram utilizados corpos-de-prova tipo sub-size obtidos a partir de bobinas laminadas a frio e recozidas de espessura 2,50 mm. Foi realizada caracterização do material estudado tanto em termos de composição química quanto microestrutura. A temperatura de ensaio variou entre a temperatura ambiente e -60°C. A análise fratógráfica foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura Philips XL30. O aço estudado apresentou microestrutura homogênea sem presença de martensita, grãos finos e precipitados de Nb(C,N). Boa eficiência de estabilização pelo nióbio. Perda de tenacidade com a redução da temperatura no ensaio Charpy-V. A temperatura de transição conforme aparência da fratura (FATT 50) determinada foi de -20°C e está coerente com a literatura. A análise fratógráfica via MEV confirmou fratura dúctil para corpos-de-prova ensaiados à temperatura ambiente e fratura frágil para a temperatura de -60°C.

Palavras-chave: Tenacidade; Aço inoxidável 430; Estabilização; Temperatura de transição.

EVALUATION OF FRACTURE TOUGHNESS OF NIOBIUM FERRITIC STAINLESS STEEL TYPE 430

Abstract

This work presents a toughness study of niobium stabilized stainless steel ferritic type 430, which makes possible to evaluate the ductile brittle transition temperature (DBTT) in Charpy-V tests. Sub-size Charpy-V specimens were obtained from annealed cold rolling coils with 2.50 mm thickness. It was carried out some characterization analyses, like chemical composition and microstructure. The Charpy-V test was carried out from room temperature to -60°C. The microscopic features of the fracture surface were analyzed by scanning electron microscopy. The studied ferritic stainless steel grade has presented a homogeneous microstructure, no martensitic transformation, fine grains and Nb(C,N) precipitates. It was observed that toughness has decreased with the temperature. It was determined that FATT 50 as well as DBTT is around -20°C, which is similar to the literature. Fractograph analyses by SEM confirmed mode of ductile fracture for room temperature and brittle fracture for temperature of -60°C.

Key-words: Toughness; Stainless steel 430; Stabilization; Transition temperature.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Aluno de graduação em Engenharia de materiais – UNILESTEMG*

³ *Professor de graduação do curso de Engenharia de Materiais - UNILESTEMG*

1 INTRODUÇÃO

O aço inoxidável ferrítico 430 em função das suas propriedades mecânicas, resistência à corrosão e boa aparência superficial apresenta uma gama de aplicações além de um baixo custo de produção quando comparado com o aço inoxidável austenítico que apresenta níquel na sua composição química. Assim sendo há vários estudos com o objetivo de desenvolver novas aplicações para este material visando substituir os aços inoxidáveis austeníticos.⁽¹⁾

O objetivo deste trabalho é avaliar a tenacidade à fratura do aço inoxidável 430 estabilizado ao nióbio e obter a temperatura de transição dúctil-frágil através do ensaio Charpy-V.

Muitas aplicações do aço 430 ficam restritas principalmente, aquelas que exigem algum processo de soldagem. A soldabilidade apresenta certos inconvenientes como o elevado crescimento do tamanho de grão, a formação parcial de martensita e a precipitação de carbonitretos de cromo que resultam em uma fragilidade nas regiões soldadas.⁽¹⁾

Quando ligas Fe-Cr são envelhecidas na faixa de temperatura entre 400 a 500 °C, a ductilidade à temperatura ambiente e a tenacidade diminuem de forma notável. Este fenômeno é conhecido como fragilidade a 475 °C e é o resultado da precipitação da fase α' rica em cromo. Aços inoxidáveis ferríticos com alto teor de cromo podem ser notavelmente fragilizados devido à precipitação da fase sigma (σ) na faixa de temperatura entre 500 a 900°C. A fase sigma é um composto intermetálico com uma composição aproximada da liga Fe-Cr. Ela é dura, frágil e não magnética e tem célula unitária tetragonal⁽²⁾. Elementos como molibdênio, silício, níquel e manganês alteram a faixa de formação da fase-sigma para baixos teores de cromo.⁽²⁾

O efeito fragilizante dos elementos intersticiais pode ser controlado pela adição de elementos estabilizantes (titânio, nióbio, zircônio e tântalo) que formam carbonetos e nitretos mais estáveis que os carbonetos e nitretos de cromo. Com pouca quantidade destes estabilizantes, os elementos intersticiais apresentam-se como carbonetos, nitretos e/ou carbonitretos estáveis e seus efetivos teores em solução sólida são reduzidos evitando a retirada de cromo da matriz e impedindo a transformação martensítica. Além disso, elementos estabilizantes tendem a refinar o tamanho de grão promovendo uma liga de maior resistência mecânica.⁽²⁾

Os primeiros aços inoxidáveis ferríticos não eram estabilizados e tinham altos teores de elementos intersticiais como carbono e nitrogênio. Devido à solubilidade do carbono e do nitrogênio mais baixa na ferrita do que na austenita, a precipitação de carbonetos e/ou nitretos de cromo tinham um efeito prejudicial na tenacidade.⁽³⁾

A estabilização de aços inoxidáveis ferríticos ao titânio e nióbio é estudada desde 1954. Mas somente mais tarde foi percebido que o nitrogênio e carbono deveriam definir as quantidades de elementos estabilizantes requeridas.⁽³⁾

Em 1977 foram sugeridas várias relações de estabilização.⁽³⁾ Resultados de desenvolvimentos em aços inoxidáveis ferríticos apontam o uso da seguinte relação para uma adequada estabilização em aços estabilizados ao nióbio.⁽³⁾

$$Nb_{\text{calc}} = 0,2 + 4(C + N) \quad (1)$$

Em trabalhos de pesquisas no Japão tem sido sugerida a idéia de dupla estabilização com relação Nb:Ti = 2:1 com adições típicas de 0,3%Nb e 0,15%Ti nos tipos 430, 434 e 444⁽³⁾. Em aços com estabilização mista (Ti + Nb), a ductilidade torna-se superior comparada com a estabilização ao Nb.⁽¹⁾ As quantidades adicionadas devem ser controladas, usualmente 0.4 a 0.7% em peso.⁽²⁾

Estabilizantes em excesso podem ser prejudiciais à tenacidade provocando aumento na temperatura de transição.⁽¹⁾

O aumento no teor de titânio leva a um aumento na temperatura de transição. Este aumento é bem mais suave no caso da estabilização com nióbio.⁽¹⁾ A Figura 1 mostra o efeito do Ti e Nb na temperatura de transição FATT 50 que correspondente à aparência da superfície de fratura (50% dútil e 50% frágil) de um aço inoxidável ferrítico 18%Cr-2%Mo. O efeito do titânio no aumento da temperatura de transição se deve ao aparecimento de precipitados de nitretos de titânio (TiN) que agem como concentradores de tensões promovendo uma fratura frágil.⁽¹⁾ Em ligas com excesso de Nb livre em solução sólida pode aparecer a formação de fase de Laves (Fe_2Nb) deteriorando a tenacidade do material.⁽¹⁾

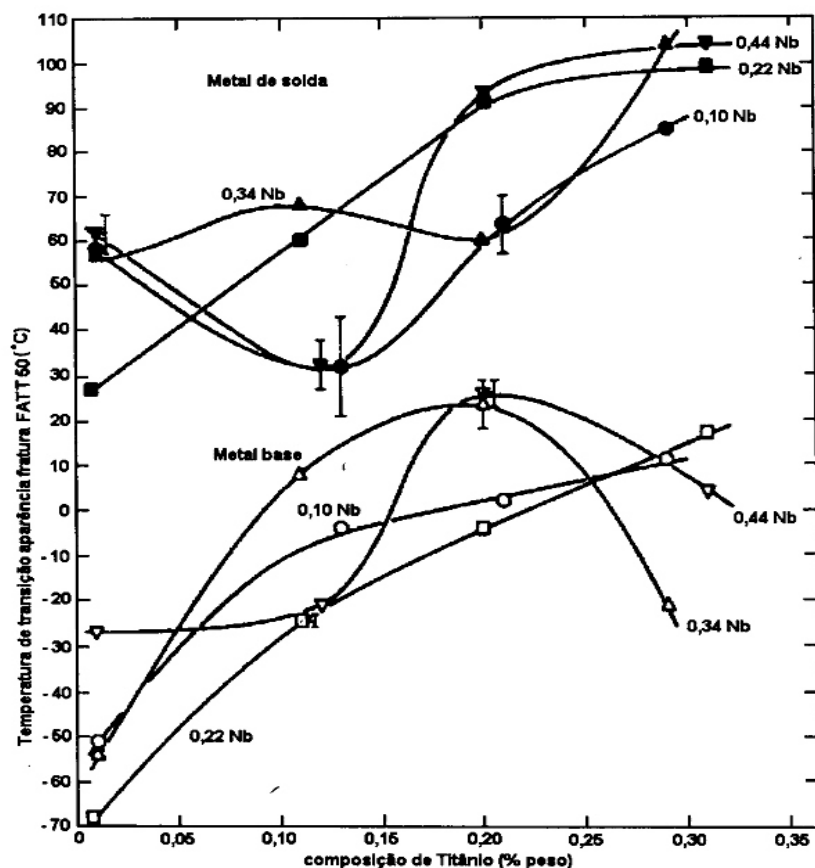


Figura 1: Tenacidade ao impacto de aços inoxidáveis ferríticos 18%Cr-2%Mo como uma função dos teores de nióbio e titânio. Amostra charpy V seção reduzida.⁽³⁾

A microestrutura de aços estabilizados ao Ti apresenta precipitados de Ti que são maiores e menos dispersos. Além disto, a quantidade de inclusões em aços estabilizados ao Ti é maior, o que propicia perda maior de tenacidade.⁽¹⁾

Kuzucu et al.⁽⁴⁾ investigaram o efeito da adição de nióbio em algumas propriedades mecânicas de aços inoxidáveis ferríticos variando o teor de nióbio de 0 a 3%. Neste trabalho conclui-se que a tenacidade aumentou com o aumento da quantidade de nióbio devido à diminuição da quantidade de carbonetos $M_{23}C_6$ formados nos contornos de grãos e a diminuição da dureza da matriz e que a tenacidade de aços inoxidáveis ferríticos com adições de 0.5 a 1.0%Nb é próxima a de aços sem adição de nióbio.

Shams⁽⁵⁾ estudou a tenacidade à fratura em aços carbono de alta resistência e baixa liga tratados ao nióbio obtendo temperatura de transição das ligas com diferentes adições de nióbio concluindo que a adição de nióbio altera consideravelmente as características de tenacidade nos aços baixa liga aumentando a temperatura de transição com o aumento no conteúdo de nióbio.

Experimentos em ligas com alto teor de elementos intersticiais, tratadas termicamente à alta temperatura de recozimento, mostraram perda na tenacidade como resultado da precipitação de carbonetos e nitretos de cromo nas discordâncias, fragilizando a liga. Em contraste com a fragilidade à alta temperatura observada nas ligas com alto teor elementos intersticiais, ligas com baixo intersticiais experimentaram um aumento significativo na tenacidade como resultado da ausência de carbonetos e nitretos de cromo precipitados, tornando-se evidente que a perda de tenacidade depende do grau de precipitação de carbonetos $Cr_{23}C_6$, nitretos Cr_2N e carbonitretos.⁽²⁾

Parâmetros estruturais, como tamanho de grão, influenciam nas propriedades de tenacidade de aços inoxidáveis ferríticos.⁽²⁾ Como pode ser observado na figura 2, quanto menor o tamanho de grão ou maior o tamanho de grão ASTM do aço, menor a temperatura de transição dúctil-frágil.⁽¹⁾

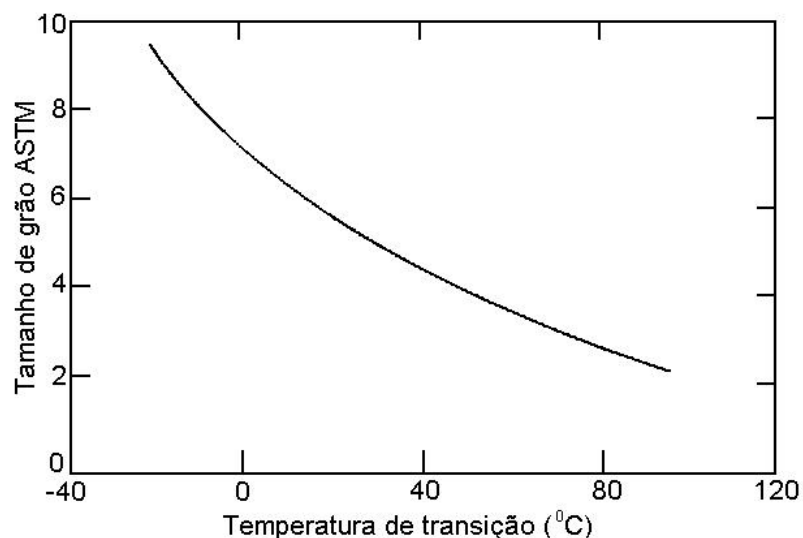


Figura 2: Efeito do tamanho de grão na temperatura de transição aço AISI 430.⁽¹⁾

Processos termomecânicos podem afetar significativamente a tenacidade através do controle do tamanho de grão e precipitação de carbonetos, nitretos e fase-sigma.⁽²⁾

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas amostras obtidas a partir de bobinas laminadas a frio e recozidas de aço inoxidável 430Nb de 2,50 mm de espessura produzidas na empresa ACESITA S/A.

A análise da composição química foi realizada em um espectrômetro de emissão óptica para análise de aços. A Tabela 1 apresenta a composição química e o cálculo de estabilização feito com auxílio das equações (1) e (2).

$$\Delta Nb = Nb_{\text{calc}} - Nb_{\text{liga}}. \quad (2)$$

Tabela 1: Composição química do aço 430 estabilizado ao nióbio.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Nb	N	ΔNb
0,0242	0,191	0,3907	0,0233	0,002	16,234	0,4	0,0247	0,004

As características microestruturais foram investigadas com uso de um analisador de imagens acoplado a um microscópio ótico. Foi utilizado ataque vilella com tempo de duração de 1 minuto.

A tenacidade à fratura foi avaliada através de ensaio Charpy-V, conforme norma ASTM E23-04, utilizando corpos-de-prova do tipo sub-size com entalhe em V nas seguintes dimensões: 2.5 x 10 x 55.⁽⁶⁾ Os corpos-de-prova foram ensaiados em diferentes temperaturas variando de 25°C a -60°C. Para cada temperatura foram ensaiados 5 corpos-de-prova.

A temperatura de transição conforme aparência da fratura (FATT 50), que corresponde à fratura 50% dúctil e 50% frágil foi determinada com análise macroscópica da superfície de fratura dos corpos-de-prova ensaiados. Foram calculadas as áreas correspondentes às regiões dúctil e frágil e correlacionadas com a área total do corpo-de-prova.

A análise fratógráfrica foi realizada com a utilização de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Philips XL30. A superfície de fratura dos corpos-de-prova ensaiados nas temperaturas de 25°C, -20°C e -60°C foram analisadas em duas posições: próximo ao entalhe e lado oposto em relação à largura do corpo-de-prova.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição Química

Conforme observado na Tabela 1, a adição de 0,4% de nióbio foi suficiente para garantir a boa estabilidade microestrutural, uma vez que o teor de nióbio livre em solução sólida (ΔNb) foi igual à zero. Isto permite considerar que todo o carbono e nitrogênio encontram-se na forma de precipitados de nióbio, o que impede a precipitação de carboneto de cromo e a transformação martensítica.

Além disto, o fato de ΔNb ser igual a 0, permite considerar que o nióbio em solução sólida não terá efeito sobre a tenacidade e a temperatura de transição dúctil-frágil, podendo apenas ter efeito na forma de precipitado.

3.2 Análise da Microestrutura

A microestrutura apresentou matriz ferrítica homogênea com grãos recristalizados e finos de tamanho ASTM 9. A Figura 3 apresenta a microestrutura do aço 430Nb.

Conforme observado na Figura 3, existe a presença de pequenos precipitados de Nb(C,N) dispersos na matriz e alinhados no sentido de laminação após tratamento térmico, além da presença de pequenas inclusões tipo óxidos. Não foram observadas a precipitação de carbonetos de cromo e a formação de martensita.

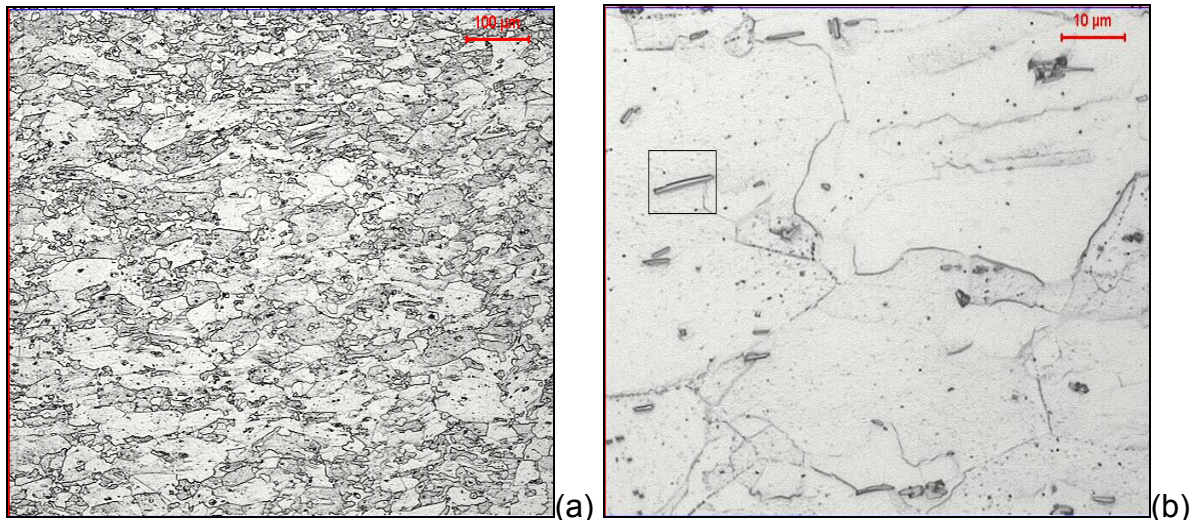


Figura 3: Microestrutura do aço 430Nb. (a) matriz ferrítica. (b) partícula de Nb(C,N) no detalhe. Ataque vilella.

3.3 Ensaio Charpy-V e Determinação da FATT 50

A Figura 4 mostra a curva Energia absorvida x Temperatura obtida no ensaio Charpy-V. Cada ponto corresponde a uma média de 5 corpos-de-prova ensaiados.

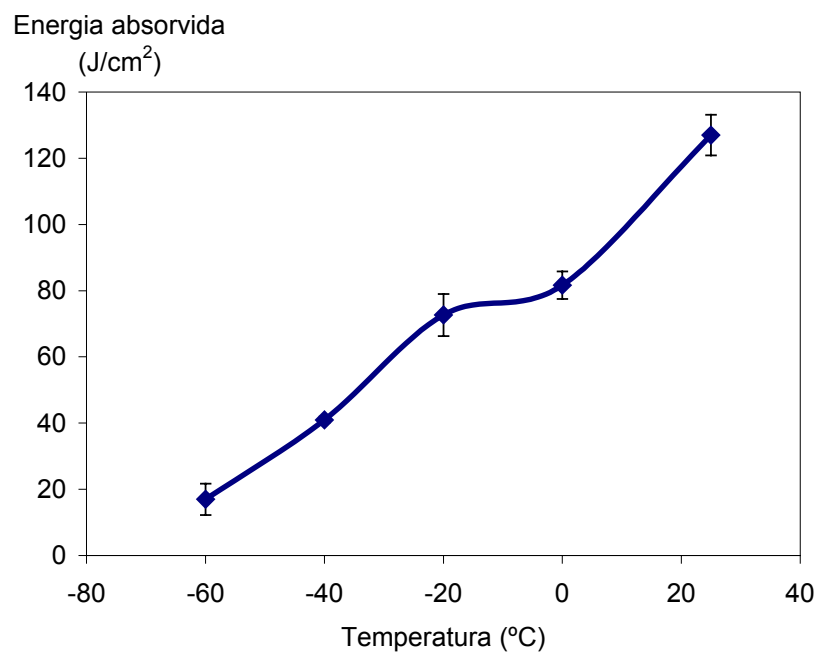


Figura 4: Resultados do ensaio Charpy do aço 430Nb em corpos-de-prova sub-size.

Conforme verificado na Figura 4, o aço 430Nb apresentou perda de tenacidade com a diminuição da temperatura sendo possível confirmar a sensibilidade da estrutura CCC dos aços inoxidáveis ferríticos ao abaixamento da temperatura. Embora a temperatura de transição dúctil-frágil não tenha ficado bem definida na curva, pode-se considerar que seu valor está em torno de -20°C , a partir da consideração da energia média durante o estágio de queda da energia absorvida.

Para uma melhor identificação da TTDF, definiu-se determinar a transição via análise macrográfica obtendo a temperatura de transição conforme aparência da fratura (FATT 50), conforme mostrado na Figura 5.

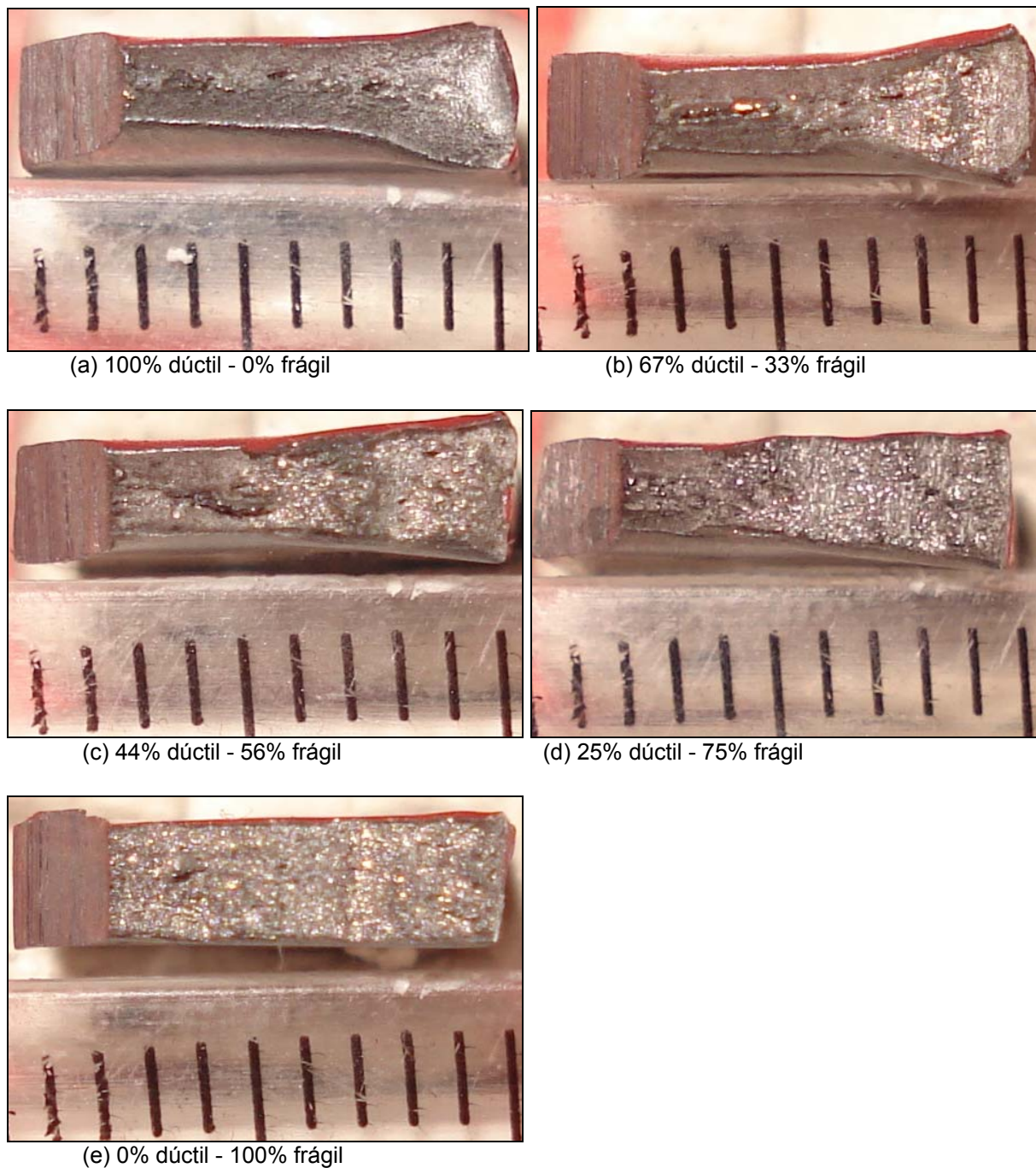


Figura 5: Evolução da superfície de fratura em função da temperatura de ensaio. (a) 25°C. (b) 0°C. (c) -20°C. (d) -40°C. (e) -60°C.

Conforme observado na Figura 5, a FATT 50 para o aço 430Nb é em torno de -20°C, o que ratifica o valor encontrado na temperatura de transição dúctil-frágil na curva obtida no ensaio Charpy V. Além disto, a temperatura de transição FATT 50 mostrou-se coerente com a literatura, conforme Figura 1 para uma liga inoxidável ferrítica com adição de estabilizantes (0,44%Nb e 0% Ti) e conforme Figura 2 para um aço 430 com tamanho de grão ASTM 9.

3.4 Análise Fratográfica via MEV

A Figura 6 apresenta a análise fratógráica dos corpos de prova ensaiados nas temperaturas de 25, -20 e -60°C. As Figuras 6(a) a 6(c) correspondem à posição mais próxima do entalhe no corpo-de-prova. A Figura 6(d) corresponde à região do lado oposto do entalhe em relação à largura do corpo-de-prova.

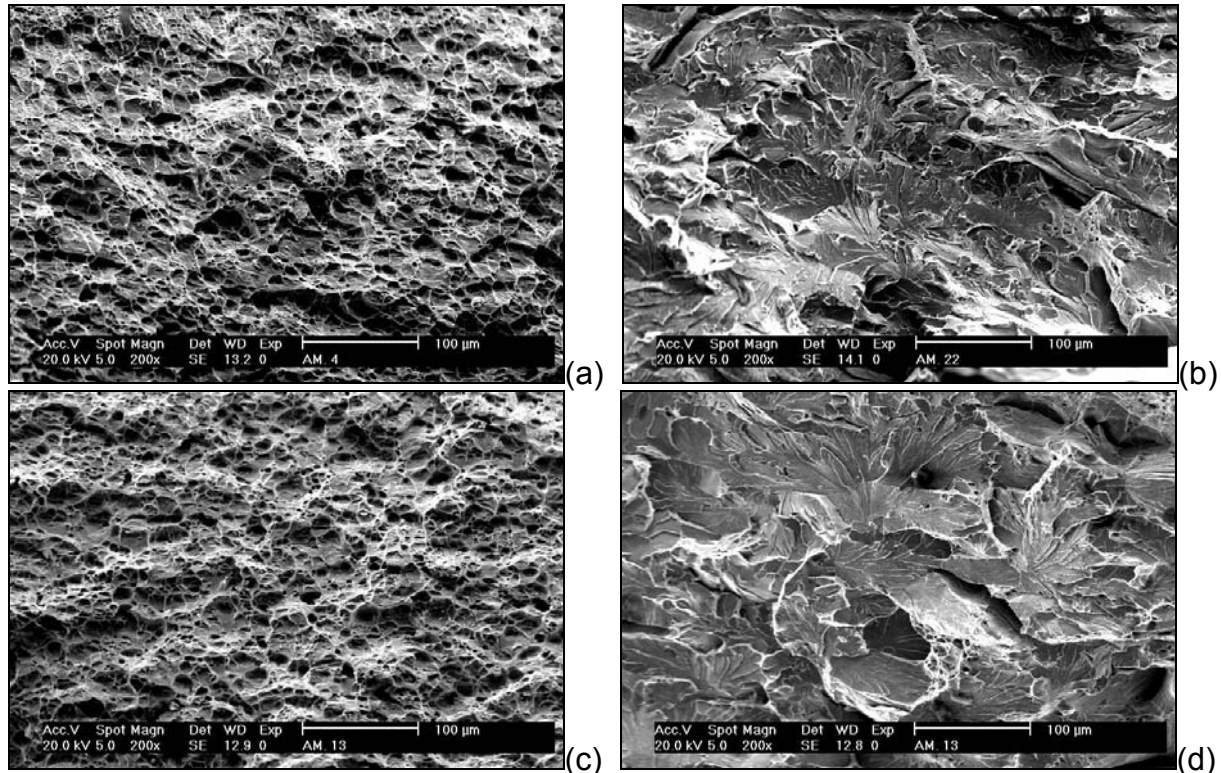


Figura 6: Fratógráias das superfícies de fratura de corpos-de-prova ensaiados. (a) 25°C. (b) -60°C. (c) -20°C, área próxima ao entalhe. (d) -20°C, área oposta ao entalhe.

A análise fratógráica permitiu observar que, para a temperatura de 25°C e figura 6(a), o aço 430 Nb apresenta uma fratura dúctil, onde se observa a presença de “alvéolos” ou “dimples”, os quais são formados pelo mecanismo de crescimento e coalescimento de microcavidades. Conforme observado na Figura 6(b), o aço 430Nb apresenta uma fratura frágil para a temperatura de -60°C. É possível observar as facetadas de clivagem, típicas para este tipo de falha. Tanto para a temperatura de 25°C quanto para -60°C, os corpos-de-prova mantiveram o mesmo tipo de fratura ao longo de sua largura.

Para a temperatura de -20°C, observou-se a presença de uma fratura dúctil na região próxima ao entalhe e uma fratura frágil na região oposta do corpo-de-prova. Este resultado confirma que a temperatura de transição dúctil frágil do aço 430Nb está em torno de -20°C.

4 CONCLUSÃO

As principais conclusões deste trabalho foram:

- O aço inoxidável ferrítico 430Nb apresentou microestrutura homogênea sem martensita, grãos finos, precipitados de Nb(C,N) e boa eficiência de estabilização pelo nióbio;
- Perda de tenacidade com a redução da temperatura no ensaio Charpy-V;
- A temperatura de transição dúctil-frágil determinada no ensaio Charpy V e confirmada via FATT 50 está em torno de -20°C para o aço 430Nb. Este resultado é coerente com a literatura;
- Modo de fratura dúctil para corpos-de-prova ensaiados à temperatura ambiente e fratura frágil para a temperatura de -60°C;

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa ACESITA S.A. pela doação das amostras e disponibilização de pessoal e equipamentos para realização dos ensaios e análises bem como à empresa RAMAC usinagem que realizou a preparação dos corpos-de-prova.

REFERÊNCIAS

- 1 FARIA, R. A. **Efeito da composição química de aços inoxidáveis ferríticos no desempenho de juntas soldadas pelo processo a arco metálico gasoso (SAMG)**. São Paulo, 2000. Dissertação de Mestrado em engenharia - Faculdade de exatas - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- 2 ZWIETEN, V. A. C. T. M.; BULLOCH, J. H. Some considerations on the toughness properties of ferritic stainless steels - A brief review. **Int. J. Pres. Ves & Piping**, n. 56, p. 1-31, 1993.
- 3 KEOWN, S. R. Niobium in ferritic stainless steels. **Niobium Technical Report**. Report 09/86, December 1986.
- 4 KUSUKU, V.; AKSOY, M.; KORKUT, M. H.; YILDIRIM, M. M. The effect of niobium on the microstructure of ferritic stainless steel. **Materials Science and Engineering**, n. A230, p. 75-80, 1997.
- 5 SHAMS, N. Fracture toughness in niobium treated steels. **Journal of Metals**, p. 14-17, March 1988.
- 6 ASTM E 23-04. **Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials**, 2004.