

TENACIDADE À FRATURA E SUA RELAÇÃO COM O TEOR DE CARBONO E OUTRAS PROPRIEDADES PARA AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO DE ALTA RESISTÊNCIA AO DESGASTE¹

*Clenice Moreira Galinari²
Paulo Sérgio de Sairre Bálamo³
Leonardo Barbosa Godefroid⁴
Wander Luiz Vasconcelos⁵*

Resumo

O objetivo deste trabalho é o conhecimento do comportamento dúctil-frágil de um aço inoxidável martensítico de alta resistência ao desgaste em função da variação do teor de carbono. Para isto, foi realizado o ensaio de tenacidade à fratura, obtendo-se o valor de K1c do material para diferentes teores de carbono. Foram elaboradas quatro ligas de composição química similar, variando somente o teor de carbono de 0,3% a 0,7%. Essas ligas foram laminadas a quente até a espessura de 3mm e submetidas em laboratório aos tratamentos de austenitização, têmpera ao ar, têmpera subzero e revenimento conforme aplicados pelo principal cliente desse tipo de aço, a indústria cuteleira. Foram também realizados os ensaios de dureza, tração, e análises da microestrutura e fractográfica. Os valores de dureza e resistência a tração apresentaram-se maiores à medida que se eleva o teor de carbono; a tenacidade à fratura, apresentou valores menores para teores de carbono mais elevados. Verificou-se que entre 0,3% e 0,4% de carbono, os valores obtidos para as características avaliadas apresentaram uma diferença significativa; à partir de 0,4% de carbono os valores tendem a um patamar. A microestrutura revelou carbonetos do tipo $M_{23}C_6$, com fração volumétrica variando de 0,3% a 4,8%. A fractografia revelou características de fratura dúctil e semi-frágil.

Palavras-chave: Inoxidáveis martensíticos; Tenacidade à fratura; Carbonetos.

FRACTURE TOUGHNESS AND YOUR RELATION WITH CARBON CONTENT AND OTHERS PROPERTIES FOR MARTENSITIC STAINLESS STEEL OF HIGH RESISTANCE TO WEAR

Abstract

The objective of this work is know ductile-fragile behavior of martensitic stainless steel of high resistance to wear in function of the carbon content range. The fracture toughness test was made, obtaining K1c values for materials with different carbon contents. Four alloys with similar chemical composition were prepared, changing only carbon content from 0,3% to 0,7%. These alloys were hot rolling to 3mm thickness and submitted to heat treatment of annealing, austenitizing, air quenching, subzero quenching and tempering, in laboratory, following the procedure used by the main customer of this kind of steel, the cutlery industry. Rockwell-C hardness test, tension test, microstructure and microfractography were also analysed. Values of hardness and tensile strength increased with carbon content while fracture toughness decreased with carbon content. It was verified a major difference on the properties in the range of 0,3%C to 0,4%C, while for higher carbon contents, values obtained showed a tendency to stabilization. The microstructure analysis revealed $M_{23}C_6$ carbides with a volumetric fraction ranging from 0,3% to 4,8%. The microfractography revealed characteristics of ductile and semifragile fracture.

Key words: Martensitic stainless steel; Fracture toughness; Carbides.

¹ *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

² *Engenheira Metalurgista, doutora, Magnesita S.A.*

³ *Engenheiro Mecânico, doutor, Acesita S.A.*

⁴ *Engenheiro Metalurgista, PhD, Universidade Federal de Ouro Preto.*

⁵ *Engenheiro Metalurgista, PhD, Universidade Federal de Minas Gerais.*

1 INTRODUÇÃO

O ensaio de tenacidade à fratura é indicado no caso dos aços inoxidáveis martensíticos para cutelaria profissional, pois fornece informações à respeito da resistência do material, sua tenacidade e comportamento dúctil-frágil, importantes para esse tipo de aplicação.

A cutelaria profissional abrange instrumentos de corte utilizados em frigoríficos, abatedouros, açougues, cozinhas industriais e outros segmentos. São instrumentos usados para desossa, sangria, raspagem, retirada de couro e cortes diversos, onde faz-se necessária a conjugação de uma boa resistência ao desgaste para manter o fio de corte por mais tempo e uma boa tenacidade para não quebrar ao sofrer impactos. ⁽¹⁾

A tenacidade de um material representa sua habilidade inerente em resistir a uma dada intensidade de tensão na ponta de uma trinca presente neste material, evitando assim, sua fratura. ⁽²⁾

Os materiais apresentam comportamentos típicos de fratura. Os aços de elevada resistência mecânica como os inoxidáveis martensíticos, por exemplo, apresentam comportamento “elástico linear”; aços de baixa e média resistência apresentam comportamento “elasto-plástico ou completamente plástico”. ⁽²⁾

A Norma ASTM 1820⁽³⁾ concentra todos os procedimentos para determinação da tenacidade à fratura dos materiais com comportamento elástico linear (determinação de K1c) e com comportamento elasto-plástico (determinação de J1c e $\delta 1c$).

Através das Teorias de Elasticidade e Plasticidade, tem-se uma relação matemática entre a tenacidade, o tamanho da trinca e a tensão aplicada no material, como:

$$K = f(a/W) \sigma \sqrt{a}$$

K = fator de intensidade de tensão na ponta da trinca;

f(a/W) = função da geometria do material;

σ = tensão nominal aplicada no material;

a = tamanho da trinca presente no material.

“K1c” corresponde ao fator de intensidade de tensão “K” quando ocorre carregamento estático e condição de deformação plana; para isso é necessário um conhecimento prévio do tipo de material a analisar e a adoção de procedimentos rigorosos no desenvolvimento do ensaio.

O parâmetro “K1c” é relevante na avaliação de propriedades dos materiais, porque é uma constante que independe das dimensões da amostra, servindo para caracterizar os materiais em relação à sua tenacidade, assim como os valores do limite de resistência tirados do ensaio de tração, são utilizados na caracterização da resistência. K1c representa o valor limite mais baixo de tenacidade à fratura de um material.

Objetivando conhecer o comportamento dúctil-frágil e resistência mecânica em função do teor de carbono, para um aço inoxidável martensítico de alta resistência ao desgaste indicado para cutelaria profissional, foram realizados os ensaios de tenacidade à fratura, tração, dureza e analisada a microestrutura e fractografia.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Foram produzidas quatro ligas de aço inoxidável martensítico contendo 13%Cr, 0,5%Mo, 0,2%Mn e 0,4%Si buscando variar somente o teor de carbono. Três dessas ligas (A, B e C) foram produzidas em escala de laboratório com respectivamente 0,28%C, 0,52%C e 0,67%C e uma liga foi produzida em escala industrial pela Acesita S.A. com 0,43%C.

2.2 Método

Após solidificação, as quatro ligas de aço inoxidável martensítico passaram pelos seguintes processos:

Laminação à Quente ⇒ Recozimento ⇒ Austenitização ⇒ Têmpera ao Ar ⇒ Têmpera Subzero ⇒ Revenimento

Procedimento e objetivo de cada processo: ^(1,4,5)

- Laminação à Quente: condução do material entre os cilindros de laminação até a redução da espessura original a uma chapa de 3mm, aplicando temperatura máxima de 1200°C.
- Recozimento: aquecimento até temperaturas da ordem de 800°C e resfriamento lento, dentro do forno com atmosfera controlada. O objetivo é obter uma estrutura ferrítica (sem a formação de martensita) para que o material apresente baixa dureza (em torno de 90HRB) e possa ser trabalhado (cortado, prensado, laminado) de modo a receber a forma do produto final no cliente antes das demais etapas de tratamento térmico.
- Austenitização: aquecimento até temperatura superior à 1000°C e estabilização nessa temperatura, com o objetivo de se obter uma estrutura completamente austenítica.
- Têmpera ao Ar: resfriamento rápido (taxa em torno de 20°C/s) à partir da temperatura de austenitização, objetivando a transformação martensítica.
- Têmpera subzero: resfriamento à temperatura inferior à 0°C objetivando transformar a austenita que tenha permanecido retida, em martensita.
- Revenimento: aquecimento à temperaturas entre 200°C e 300°C para alívio de tensões.

Foram confeccionadas amostras nas dimensões apropriadas a cada ensaio (tenacidade à fratura, tração, dureza) à partir do material recozido e então aplicados os tratamentos térmicos mencionados acima, em laboratório. Após aplicadas todas as etapas de tratamento térmico, foram realizados os ensaios e análise ao microscópio.

2.3 Preparação e Análise das Amostras

A ASTM⁽³⁾ apresenta cinco tipos de corpo de prova para a realização do ensaio de tenacidade à fratura. Foi utilizado o tipo “compact tension” C(T) obedecendo as relações de dimensão expressas na Figura 1, com o sentido do entalhe paralelo ao sentido da laminação do material.

O pré-trincamento realizado antes do ensaio de tenacidade à fratura propriamente dito, foi feito por intermédio de um controle cuidadoso de cargas cíclicas (número de ciclos entre 10^4 e 10^6) até a obtenção do tamanho desejável: entalhe + pré-trinca entre 0,45W e 0,55W para determinação de K1c.

Para a realização dos ensaios, foi utilizada uma servo-hidráulica de 10t. O ensaio fornece o registro da carga aplicada no corpo de prova, medido por célula de carga, e a medida de um deslocamento no corpo de prova, medido por “clip-gage” acoplado na boca do entalhe. Através de uma curva de calibração, o deslocamento determinado pelo “clip-gage” é transformado em tamanho de trinca.

Os requisitos para a obtenção do valor de K1c do material^(2,3) foram atendidos. Os ensaios foram realizados em três corpos de prova para cada liga, obtendo-se K1c como o valor médio das três medidas.

As condições nas quais os ensaios de tenacidade à fratura foram realizados são apresentadas abaixo:

- Norma ASTM E 1820-01, determinação de K1c em deformação plana, velocidade de deslocamento de 0,5mm/min, temperatura de 20°C, umidade relativa do ar de 55%, relação $P_{máx}/P_Q < 1,10$.

Os corpos de prova para o ensaio de tração foram confeccionados segundo Norma ASTM⁽⁶⁾ para chapas, com comprimento total de 200mm, largura de 20mm e espessura de 2,85mm. Foi utilizada máquina Instron modelo 5583 para a realização dos ensaios.

A dureza Rockwell-C (carga de 141N) foi medida em amostras de 30mm x 50mm. Tais amostras foram cortadas, embutidas e polidas para análise da microestrutura. Utilizou-se o reagente químico Groesberck (4g permanganato de potássio, 4g hidróxido de sódio, 100ml água destilada) para revelação dos carbonetos.⁽⁷⁾ As amostras foram então submetidas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV XL30 Philips) e microsonda (JXA 8900RL Jeol) para análise química. Para verificar a quantidade de carbonetos, foram micrografados 40 campos ao longo da espessura das amostras com 3000X de aumento no MEV, e submetidos ao analisador de imagens LECO IA-3001.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Tenacidade à Fratura

A curva “Carga P x Deslocamento de abertura da trinca” (“Load x COD”) apresentada na Figura 2 ilustra o resultado do ensaio de tenacidade à fratura para determinação de K1c ($K_Q = K1c$) para a liga Y; as curvas das demais ligas apresentaram comportamento similar.

O valor de K1c e os valores do limite de escoamento (σ_{ys}) para cada liga são apresentados na Tabela 1, assim como os valores típicos para alguns metais de engenharia à título de comparação.⁽⁸⁾

Na Figura 3 verificam-se os valores de tenacidade à fratura (K1c) em função do limite de escoamento. Os valores tendem a uma estabilização à partir de 0,4% de carbono. A liga A é mais tenaz, apresentando K1c duas vezes maior que as ligas Y e B, e três vezes maior que a liga C.

A fractografia da liga A, Figura 4a, revela também o seu comportamento mais tenaz em função da grande presença de “dimples”. A fractografia das ligas Y, B e C apresenta facetas de clivagem características da fratura frágil, mas são verificados também “micro-dimples” sobre as facetas e entre as facetas, o que é sinal de

ductilidade, conforme apresentado na Figura 4b para a liga Y, podendo-se dizer que essas ligas apresentam fratura semi-frágil.

É comum aços temperados e revenidos apresentarem fratura frágil que se propaga por clivagem ou quase clivagem (clivagem em escala pequena em planos que não são bem definidos devido à presença de martensita e carbonetos).^(2,8) O fato das ligas ensaiadas com teor de carbono superior à 0,4% apresentarem comportamento semi-frágil é positivo para a aplicação desse tipo de aço, que sofre impactos em uso.

3.2 Dureza, Tração e Fração Volumétrica de Carbonetos

A dureza é crescente com o teor de carbono conforme representado na Figura 5, mas à partir de 0,4%C os valores tendem a uma estabilização.

A Figura 6 apresenta graficamente o limite de resistência em função do percentual de carbono. Os valores do limite de resistência são crescentes com o teor de carbono, e também tendem a uma estabilização acima de 0,4%C.

A microestrutura revelou carbonetos do tipo $M_{23}C_6$, sendo "M" composto por cromo, ferro e molibdênio. Verifica-se através da Figura 7 que a liga A quase não apresenta carbonetos; as ligas Y e B apresentam fração volumétrica de carbonetos similares, e para a liga C, a fração volumétrica de carbonetos é superior.

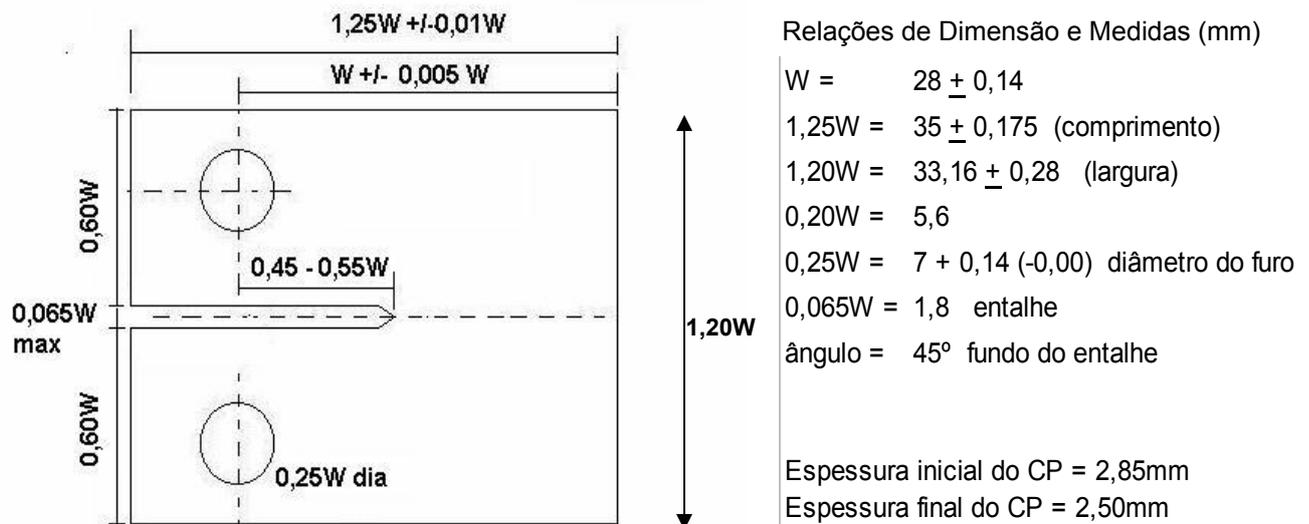


Figura 1. Corpo de prova tipo compact tension para ensaio de tenacidade à fratura (ABNT, 2001) com relações de dimensão e medidas utilizadas.

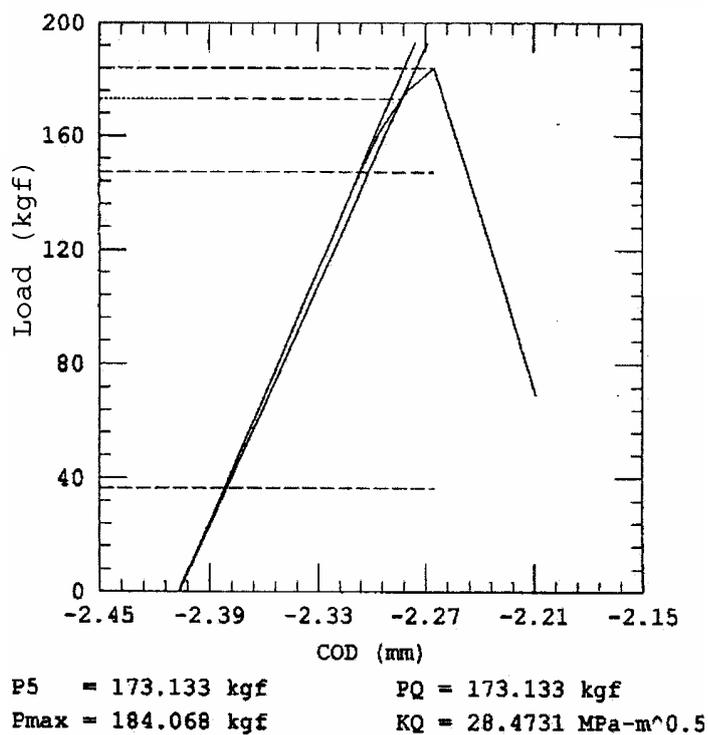


Figura 2. Carga P (Load) em função dos deslocamento de abertura da trinca (COD) no ensaio de tenacidade à fratura para a liga Y.

Tabela 1. Valores de K1c e limite de escoamento (σ_{ys}) para as amostras ensaiadas e alguns materiais de engenharia.⁽⁸⁾

Material	K1c (MPa√m)	σ_{ys} (MPa)
Liga A	60,8 ± 1,81	1260
Liga Y	27,3 ± 1,59	1510
Liga B	28,6 ± 0,71	1480
Liga C	21,1 ± 0,78	1540
2014 – T651	24,2	455
Ti-6Al-4V	55,0	1035
4340	60,4	1515
350 Maraging	55	1550

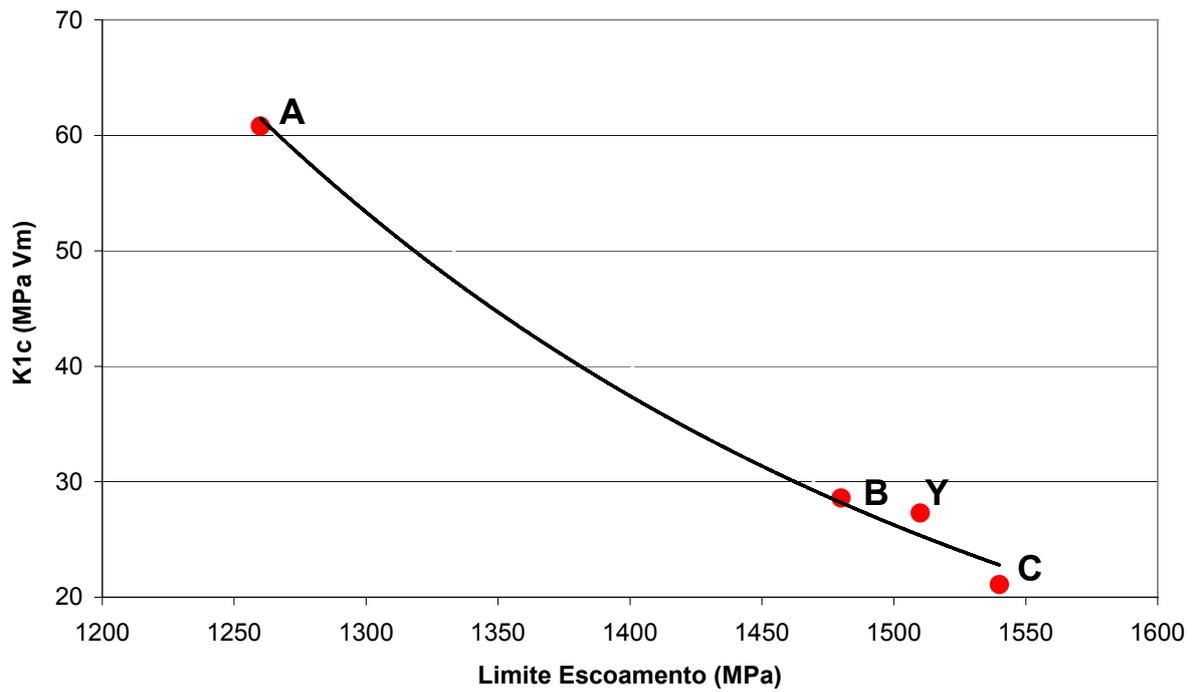


Figura 3. Tenacidade à fratura (K1c) em função do limite de escoamento para as Ligas A, Y, B e C.

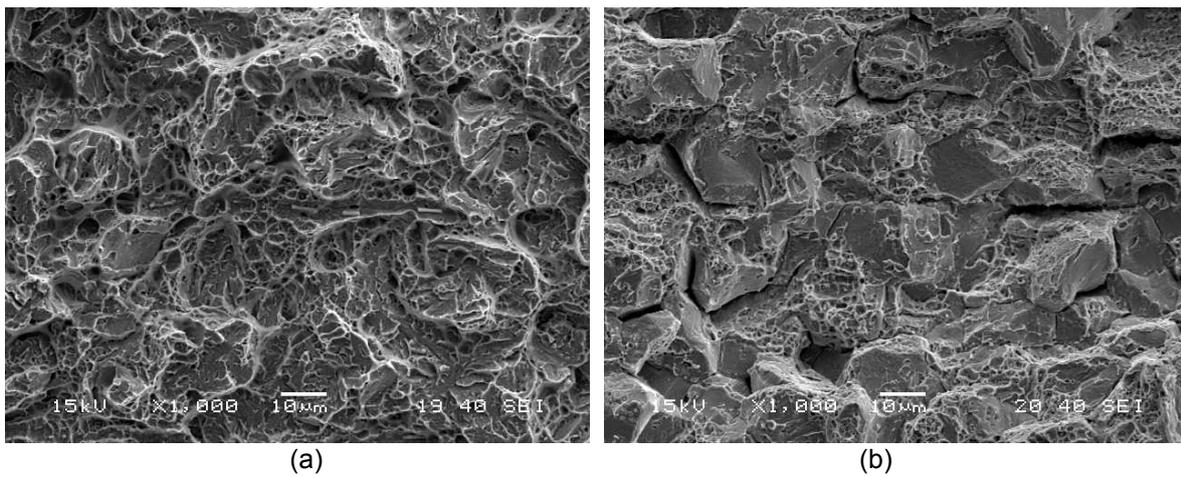


Figura 4. Fractografia dos corpos de prova após ensaio de tenacidade à fratura, realizada em MEV com aumento de 1000X. (a) Liga A, presença de dimples, característicos de comportamento dúctil. (b) Liga Y, facetas de clivagem e micro-dimples, característicos de fratura semi-frágil.

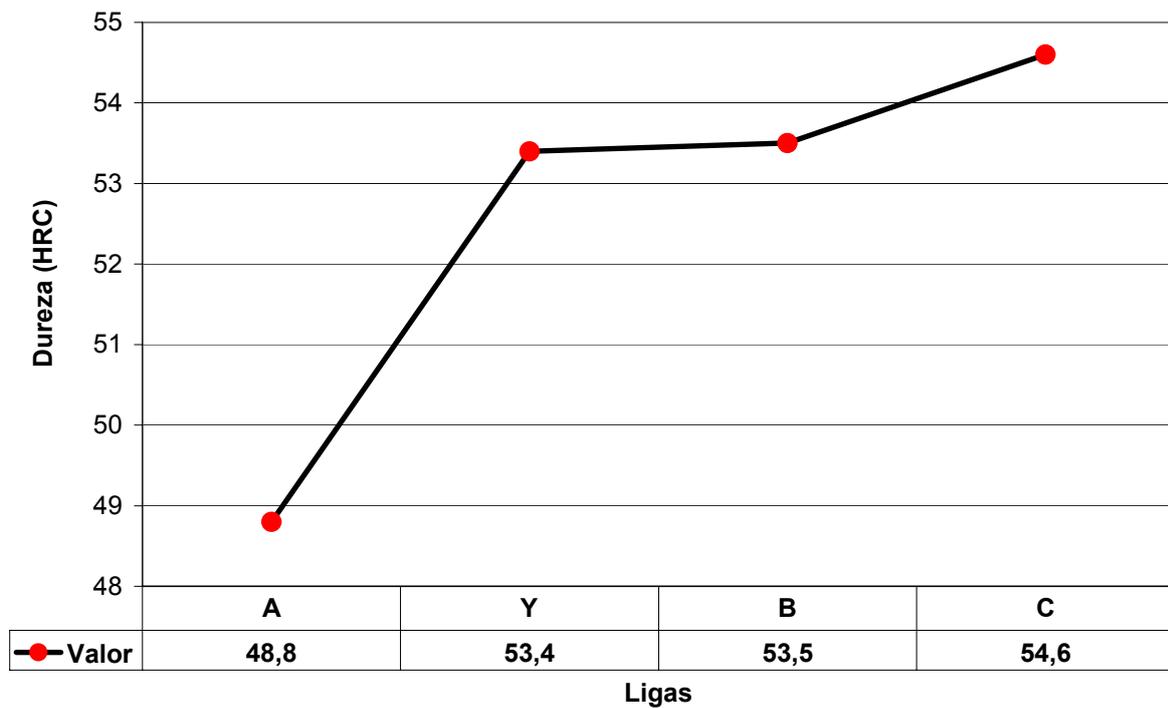


Figura 5. Dureza Rockwell-C das ligas A, Y, B e C.

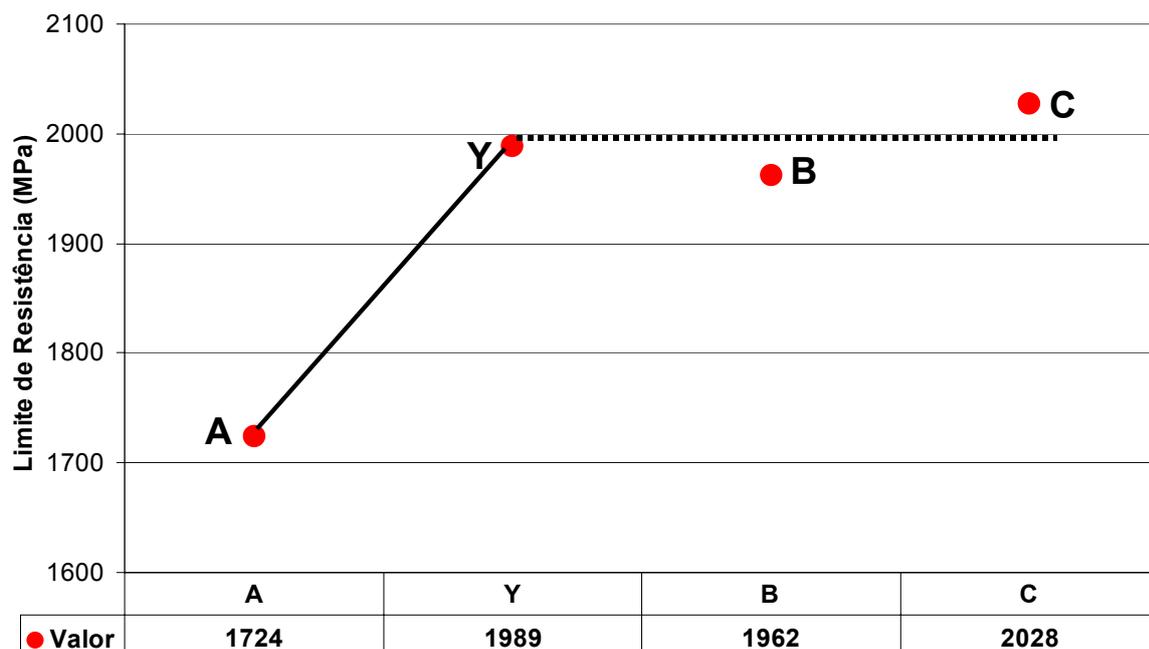


Figura 6. Limite de resistência obtido por tração para as ligas A, Y, B e C.

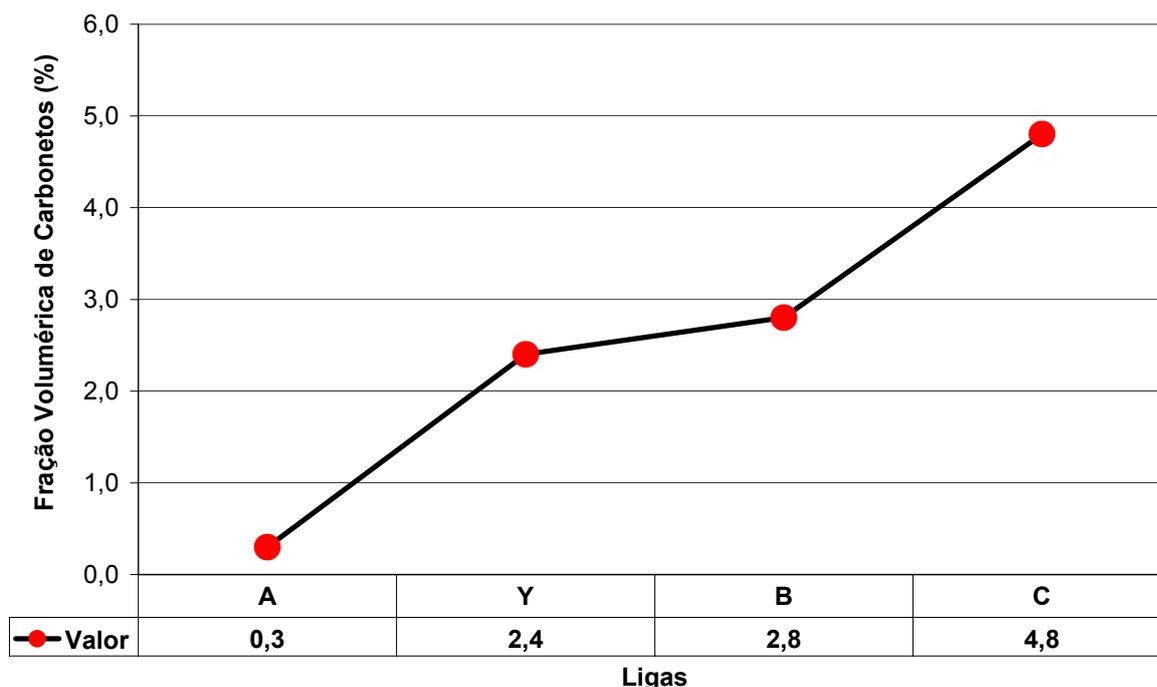


Figura 7. Fração volumétrica de carbonetos para as ligas A, Y, B e C.

4 CONCLUSÃO

O comportamento verificado nos ensaios de tenacidade à fratura é condizente com as propriedades de dureza e resistência a tração. A liga A com 0,28%C que apresentou comportamento dúctil, apresentou baixa dureza e baixo limite de resistência a tração. As ligas Y, B e C com 0,43%C, 0,52%C e 0,67%C respectivamente, que apresentaram comportamento semi-frágil, apresentaram também valores de dureza e resistência a tração muito próximos, com os valores de Y e B tendendo a um patamar e os valores de C ligeiramente superiores. A presença de carbonetos do tipo $M_{23}C_6$ é mais intensa com o aumento do teor de carbono, apresentando a curva de fração volumétrica de carbonetos, comportamento similar às propriedades, em proporções diferentes.

Embora seja comum os aços temperados e revenidos apresentarem fratura frágil, o aço inoxidável martensítico avaliado apresentou fratura semi-frágil, o que é benéfico para sua aplicação principal, a cutelaria profissional.

REFERÊNCIAS

- 1 GALINARI, C.M., BÁLSAMO, P.S.S., VASCONCELOS, W.L. Estudo da Microestrutura de Aço Inoxidável Martensítico nos Processos de Siderurgia e Cutelaria. In: 60º CONGRESSO ANUAL DA ASSOC. BRAS. DE METALURGIA E MATERIAIS, 2005, Belo Horizonte, MG. Anais ABM, 2005. 1 CD.
- 2 GODEFROID, L.B., CÂNDIDO, L.C., MORAIS, W.A. Análise de Falhas, **Assoc. Bras. de Metalurgia e Materiais**, Belo Horizonte, MG, 2004, 467p.
- 3 ASTM, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, Annual Book of ASTM Standards, v.03.01, E 1820-01, West Conshohocken, 2001.
- 4 ROMBEAUX, P. Traitements thermiques et resistance a la corrosion des aciers inox martensitiques pour la coutellerie. **Journée A.T.T.T.**, France, p. 01-09, 1992.

- 5 GARCIA, C., ALVAREZ, L.F. Less common aspects of solid-solid phase transformations in martensitic stainless steels. **Rev. Metal. Madrid**, p.417-422, 1997.
- 6 ASTM, Metals – Mechanical Testing, Metallography, Annual Book of ASTM Standards, v.03.01, Philadelphia, 1996.
- 7 HERTZBERG, R.W., Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, John Wiley & Sons, New York, 1989.
- 8 CABALLERO, F.G., CAPDEVILA, C., ALVAREZ, C., ANDRÉS, C., Thermoelectric power studies on a martensitic stainless steel. **Scripta Materialia**, v. 50, p. 1061-1066, 2004.