

AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA DE LIGAS NICRALC ¹

Wanderson Santana da Silva²
Hélio Goldenstein³

Resumo

As ligas NICRALC vem sendo desenvolvidas como uma alternativa tecnológica e econômica em aplicações que requerem resistência ao desgaste em altas temperaturas. Neste trabalho, estas ligas são avaliadas do ponto de vista da tenacidade à fratura obtida a partir da metodologia chevron. Os critérios de validade previstos na norma ASTM 1304 são discutidos a partir de considerações da literatura, especialmente no que diz respeito ao parâmetro de plasticidade “p” introduzido por Baker. Para subsidiar as discussões, resultados de materiais de menor tenacidade à fratura, como ferros fundidos brancos de alto cromo e o STELLITE, são apresentados. Os resultados obtidos mostram que a tenacidade à fratura das ligas NICRALC é influenciada por tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento, bem como pela distribuição e tipo de carboneto. Para algumas condições as dimensões dos corpos de prova utilizados não atendem aos requisitos da norma e em outras condições, em que pese a inexistência de evidências de ocorrência de plasticidade, verifica-se que as faixas exigidas para o parâmetro “p” são sistematicamente não atendidas. Desta forma, os resultados obtidos neste trabalho concordam com a literatura quando se verifica que valores elevados do parâmetro “p” estão associados não apenas a atividades plásticas, mas também a fenômenos irreversíveis associados ao crescimento complexo das trincas. Neste sentido, verifica-se a necessidade de revisão das exigências da norma no que diz respeito ao desvio da linearidade elástica, representado pelas faixas de validade do parâmetro “p”.

Palavras-chave: Ligas Nicralc; Tenacidade à fratura; Validade dos ensaios Chevron

NICRALC ALLOYS FRACTURE TOUGHNESS

Abstract

NICRALC alloys have been developed as a technological and economic alternative to high temperature wear resistance application materials. This work aim to investigate the chevron notched short bar fracture toughness of NICRALC alloys. The validity criteria proposed by ASTM 1304 Standard are discussed based on the literature, with emphasis on the “p” plasticity parameter proposed by Baker. Results of fracture toughness for two more brittle materials, high chromium white cast iron and STELLITE Co –W-Cr materials are obtained and used for comparison sake. The obtained results show that fracture toughness of NICRALC alloys is influenced by the homogenizing and aging heat treatments, the type and the distribution of carbides. In some situations, the specimen sizes do not attend the standard requirements while other does not attend the ranges established by ASTM 1304 for the “p” parameter, even without any sign of plasticity. Results from this work agree with literature results suggesting that elevated “p” parameter values associated with deviation from linear elastic behaviour are not only associated with plasticity but can also be a sign of the presence of other irreversible energy dissipation processes during crack opening, like for example complex secondary crack networks. It is suggested that the ASTM 1304 should be reviewed to take those effects into account.

Key words: NICRALC alloys; Fracture toughness; Chevron methodology

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

² *Dr. Eng. Metalurgista, Bolsista Proca-CAPES.*

³ *Prof. Livre Docente. PMT/EPUSP.*

INTRODUÇÃO

Pensando numa alternativa tecnológica e econômica para aplicações que requerem resistência ao desgaste em temperaturas elevadas, isto é, acima de 600°C, Goldenstein e colaboradores^[1-3] introduziram as ligas NICRALC. Estas ligas são similares do ponto de vista microestrutural aos ferros fundidos brancos de alto cromo, com a diferença de que, neste caso a matriz seria constituída pelo composto intermetálico ordenado Ni₃Al, ao invés da matriz martensítica encontrada nos referidos ferros fundidos. Em linhas gerais, esta classe de ligas intermetálicas baseadas no sistema Ni-Al-Cr-C apresentam uma matriz basicamente constituída pela fase γ' ordenada, Ni₃(Al,Cr), com uma dispersão de carbonetos eutéticos de cromo, de forma que proporciona uma elevada resistência ao desgaste em altas temperaturas a partir da associação entre a dureza dos carbonetos e a resistência mecânica a altas temperaturas da matriz, além de resistência à corrosão, oxidação e carburação típicas do sistema Ni-Al-Cr.

Diferentes estudos vêm sendo desenvolvidos com as ligas NICRALC, relativos à caracterização microestrutural, determinação da seqüência de solidificação,^[3-5] fundibilidade,^[6] modelamento termodinâmico,^[3-5,7] comportamento mecânico,^[5,8] bem como resistência ao desgaste,^[5,9] à oxidação^[10] e à carburação.^[11] Além disso, ligas NICRALC obtidas por deposição por spray mostraram elevada resistência ao desgaste abrasivo.^[12] De maneira geral, pode-se afirmar que a resistência mecânica das ligas NICRALC depende fortemente do comportamento da matriz e existem indícios de amolecimentos dos carbonetos de Cr acima de 600°C.^[8] A resistência ao desgaste independe da dureza e do teor de carbono, mas da distribuição e tipo de carbonetos.^[9]

A tenacidade à fratura no estado plano de deformação para muitos materiais metálicos pode ser obtida a partir da metodologia descrita na norma ASTM E399/91,^[13] aqui denominada metodologia convencional, onde se supõe que uma trinca, pré-existente e estática, atinja a instabilidade sob tensões crescentes sem crescimento estável ou com crescimento estável desprezível. Esta pré-trinca é introduzida por fadiga a partir de um entalhe inicial. Na maioria dos casos este procedimento, apesar de demorado e oneroso, é de fácil execução.

Entretanto, para materiais que apresentam grande resistência mecânica acompanhada de comportamento intrinsecamente frágil^[14] e composto de matriz metálica Al-SiC,^[15] o processo de obtenção das pré-trincas é uma tarefa difícil, fato este muitas vezes omitidos. Alguns “artifícios” são utilizados para contornar o pré-trincamento por fadiga. No caso de aços ferramenta, Erickson^[16] propôs o método do “*drop-weight*”, no qual a pré-trinca é introduzida por impacto de pesos em queda e impedida de crescer catastroficamente pela ação de um campo compressivo introduzido por esforços externos. Outros trabalhos^[17] consideram entalhes feitos por eletroerosão a fio ou por disco diamantado suficientemente agudos para se aplicarem os conceitos da MFEL, segundo os procedimentos previstos na norma ASTM E 399,^[13] desde que a o raio da raiz do entalhe varie entre 50 e 100 μm .

Outra forma de se contornar o procedimento de pré-trincamento para se obter a tenacidade à fratura no estado plano de deformação é a metodologia chevron, descrita pela norma ASTM E 1304 -97.^[18] Este procedimento vem sendo utilizado na determinação da tenacidade à fratura de diversos materiais como concretos,^[19] ligas de alumínio;^[20] cerâmicos, compósitos Al-SiC,^[15,17] aços ferramenta.^[14] Desenvolvida a partir de estudos ocorridos entre o final dos anos 1970^[20,21] e início dos anos 1980,^[22] na metodologia “*chevron*” o processo de pré-trincamento não se

faz necessário, uma vez que a trinca é nucleada na ponta "afiada" do entalhe (Figura 1-a), mesmo para pequenos carregamentos, devido à grande intensificação de tensões, facilitando a nucleação da trinca. Esta se forma e se propaga, mas devido à largura crescente do entalhe (e por consequência da frente de trinca) a energia necessária para o crescimento de trinca diminui à medida que esta cresce. Desta forma, esforços cada vez maiores são requeridos para que a trinca continue crescendo, de forma que se tem um crescimento estável desta, até se atingir uma carga máxima P_M , correspondente à situação em que a energia potencial para o crescimento da trinca é mínima e tangencial a Curva R da amostra (Figura 1-b). No caso de materiais com curva $R-\Delta a$ plana, P_M é atingida quando se atinge o tamanho de trinca a_m , que é uma característica da geometria do corpo de prova.

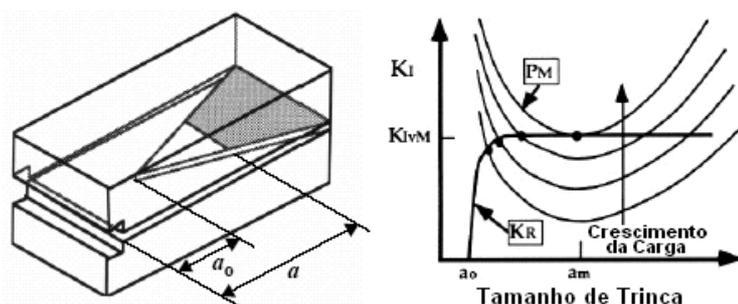


Figura 1 – Ensaio Chevron. (a) Geometria do corpo de prova mostrando os detalhes do entalhe, em que a_0 é o tamanho inicial da trinca, que corresponde à ponta do entalhe; (b) curva R de um material hipotético sobre a qual estão sobrepostas curvas de potencial de crescimento de trinca. A carga máxima é atingida quando se atinge um tamanho de trinca a_m , característico da geometria do corpo de prova, no caso de matérias que apresentam curva R plana (adaptada de [24]).

Atendidas estas condições, a tenacidade à fratura *chevron* (K_{ICV}) pode ser definida a partir da carga máxima P_M , conforme a equação abaixo:

$$K_{ICV} = \frac{P_M}{B\sqrt{W}} Y_C^*$$

desde que a espessura do corpo de prova B seja maior que a espessura crítica B_c :

$$B_c \geq 1,25 \left(\frac{K_{ICV}}{\sigma_{YS}} \right)^2$$

onde: W é o comprimento dos corpos de prova; σ_{YS} é a tensão limite de escoamento do material; Y_C^* o fator de intensidade de tensão geométrico mínimo, definido pela geometria do corpo de prova, ou seja, independente do material.

Além desta vantagem de se poder estabelecer a tenacidade à fratura a partir da carga máxima atingida durante o ensaio, a geometria do entalhe garante a manutenção do estado plano de deformação, permitindo o uso de corpos de prova menores e que requerem menores trabalhos de usinagem se comparados com os corpos de prova convencionais do tipo C(T).

Munz^[20] apresenta resultados em que a tenacidade à fratura de ligas de alumínio de alta resistência 7075, obtida pelos métodos convencional e chevron são similares até valores da ordem de 30 MPa $m^{1/2}$. Acima destes valores, tornam-se distintos, sendo que os obtidos pela metodologia *chevron* são maiores que os obtidos pela metodologia convencional, indicando a influência do comportamento da curva R sobre os resultados verificados nos ensaios chevron. Nestes casos foram propostas correções empíricas para os valores de K_{ICV} .

Por outro lado, quando se tem materiais cujas curvas $R-\Delta a$ são crescentes, ou seja, quando a carga máxima P_M não ocorre quando se atinge o comprimento de trinca a_m , faz-se necessário avaliar este desvio da linearidade elástica. Baker^[21] introduziu o parâmetro de plasticidade “ p ”, a partir do qual seria possível se corrigir os valores de tenacidade à fratura obtidos pela metodologia chevron. Este conceito foi absorvido pela norma ASTM 1304-97^[22] e a plasticidade experimentada pela amostra durante o ensaio é definida pela relação entre distância entre as tangentes médias de dois ciclos adjacentes de descarregamento/carregamento tomada na abscissa, isto é, com carga nula (Δx_0) e a tomada no ponto médio das cargas máximas de cada um dos ciclos de carregamento e descarregamento (Δx), conforme ilustrado na Figura 2-a. Ou seja:

$$p = \Delta x_0 / \Delta x$$

Se p tende a zero, tem-se a situação em que nenhuma atividade inelástica esteve presente durante o ensaio; do outro extremo, se p tende a unidade, tem-se a situação hipotética de que toda a energia presente no sistema foi consumida em deformação plástica e nenhuma superfície de trinca foi criada.

A partir das análises originais de Baker^[21] a norma ASTM E1304 – 97^[18] estabelece como válidos ensaios que apresentem variações de “ p ” entre $-0,05$ e $0,10^1$. Esta norma, entretanto, utiliza esta faixa de valores de p apenas como um parâmetro de validação do ensaio, não recomendando a correção do valor da tenacidade à fratura, conforme proposto anteriormente por Baker.^[21] A norma ASTM C1421-99,^[23] por outro lado, estabelece o uso da correção plástica (ou inelástica) do valor da tenacidade à fratura, além de ampliar a faixa dos valores de p tomados como válidos ($-0,10 < p < 0,15$). No caso de ensaios em concreto estrutural, Bittencourt *et al.*^[19] também utilizam a correção “inelástica”, mas enfatiza ao final do trabalho a necessidade de mais estudos para garantir a “*acuracidade*” do método e superar a “*subjetividade de análise*”. Além disso, apresentam valores de p variando entre $0,09$ e $0,45$.

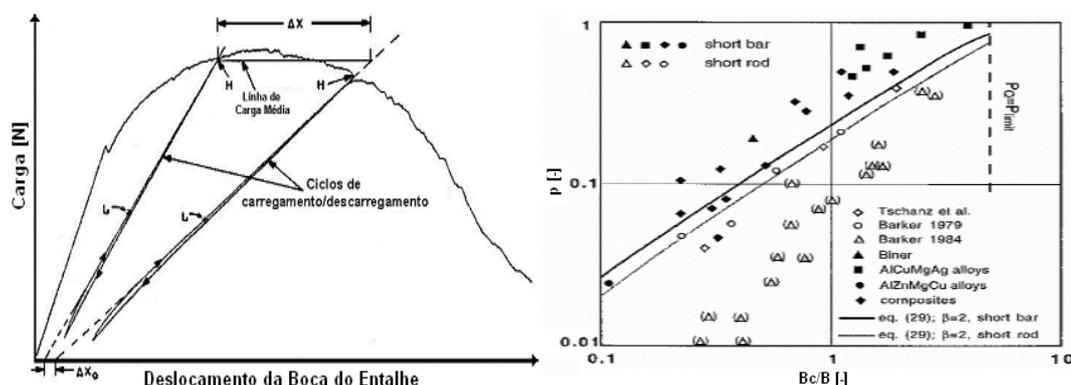


FIGURA 2 – (a) Ciclos de carregamento/descarregamento durante um ensaio com entalhe *chevron*. Note a presença das tangentes médias. Adaptada de [18]. (b) Correlação entre o parâmetro de plasticidade p e a relação entre a largura crítica (mínima permitida) e a largura real das amostras *chevron* (adaptada de [24]).

Mais recentemente, Mortensen *et al.*^[24] passaram a questionar a consistência do uso da faixa de valores de “ p ” proposta inicialmente por Barker^[21] e assumida pela norma ASTM 1304-97.^[18] Aqueles pesquisadores verificaram que, mesmo em situações em que a atividade plástica, medida por métodos foto-elásticos, se mostrava baixa, dentro dos limites da linearidade elástica, os valores obtidos de “ p ”

¹ Os valores negativos de p de maneira geral,^[24] são atribuídos a tensões residuais presentes nas amostras.

graficamente mostraram-se acima de 0,20. Discutem a necessidade, a partir de tratamentos analíticos, considerando o modelo de Irwin simplificado da zona plástica na ponta da trinca, que as relações de dimensões previstas na norma devem ser revistas e o grande trunfo dos ensaios chevron, que são as reduzidas dimensões dos corpos de prova, deve ser reconsiderado, uma vez mantida a faixa de validade do parâmetro de plasticidade “p”. De qualquer forma, demonstram que, existe uma relação diretamente proporcional entre o parâmetro “p” e a relação Bc/B e que os valores interpolados de “p” (Figura 2-b) para o tamanho mínimo requerido pela norma ASTM 1304 (Bc) é de 0,20, isto é, o dobro do estabelecido por esta mesma norma.

Neste sentido, Miserez e Mortensen^[15] apresentam valores de “p” variando entre 0,15 e 0,40, para tenacidades à fratura variando entre 11 e 34 MPa.m^{1/2} para compósitos Al-SiC fundidos. Alguns dos resultados obtidos pela metodologia chevron (K_{ICV}), foram comparados com valores equivalente obtidos a partir de ensaios J (K_{Jeq}) e independentemente dos valores de p, os resultados de K_{ICV} mostraram-se maiores que os de K_{Jeq} acima de 10%. A atribuída plasticidade em excesso verificada a partir dos valores de p, sistematicamente maiores que 0,10, não encontra justificativa no comportamento frágil sob tração verificado para os mesmos materiais. Além disso, valores elevados de “p”, que em tese poderiam estar associadas a materiais mais tenazes, também são encontrados em materiais cuja tenacidade à fratura medida é baixa. Desta forma, atribuem os valores de “p” acima dos estabelecidos na norma, não à plasticidade excessiva, mas aos danos experimentados pelas partículas duras na frente trinca, o que causa uma abertura de trinca irreversível durante o ciclo de descarregamento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho sintetizamos os principais resultados obtidos nos ensaios de tenacidade à fratura chevron, executados de acordo com os conceitos sistematizados na norma ASTM E1304-97^[17] e baseados nos procedimentos desenvolvidos anteriormente.^[14] Os materiais avaliados neste trabalho estão apresentados na Tabela 1, bem como suas respectivas composições químicas. As microestruturas típicas das ligas avaliadas no estado bruto de fundição (BF) estão descritas em trabalhos anteriores.^[5]

Tabela 1 – Composição Química dos Materiais estudados neste trabalho.

Ligas	Teores dos Elementos [% em peso]							
	C	Ni	Cr	Al	B	Si	Fe	Outros
NICRALC C1	0,84	Bal.	12,18	7,63	-	2,29	1,44	-
NICRALC 5-1								
NICRALC 5-2								
NICRALC 05	0,57	Bal.	7,10	10,08	0,014	0,03	-	Mn=0,04
NICRALC 07	0,67	Bal.	11,07	9,25	0,039	0,05	-	Mn=0,04
NICRALC 10	0,86	Bal.	12,01	8,55	0,019	0,05	-	Mn=0,045
NICRALC 13	1,31	Bal.	11,10	9,28	0,045	0,05	-	Mn=0,04
NICRALCOSP	0,50	Bal.	8,00	9,44	0,060	-	-	-
STELLITE 6	1,20	3,00	30,00	-	-	2,00	3,0	Co=Bal; W=4,5; Mo=1,5
Fofo BACr	2,62	1,25	16,32	-	-	0,45	Bal.	Mn=1,03; Mo=1,19; Nb=1,85

As ligas NICRALC fundidas foram projetadas utilizando ferramentas de computação termodinâmica previamente desenvolvidas,^[3,4,7] com o objetivo de, a partir de diferentes teores de carbono, apresentarem diferentes estruturas brutas de fundição: hipoeutéticas, eutéticas e hipereutéticas, respectivamente, constituída por carbonetos de Cr (M_7C_3 e/ou M_3C_2) distribuídos numa matriz predominantemente de γ' (Ni_3Al). Para efeitos de comparação dos resultados, são avaliadas também uma liga NICRALC produzida por spray,^[12] o STELLITE e um ferro fundido branco de alto cromo. As ligas NICRALC fundidas e o STELLITE foram obtidas por fundição de precisão ao ar, conforme trabalho anterior.^[6] O ferro fundido branco de alto Cr foi produzido por fundição convencional em moldes de areia, gentilmente cedido pela DIMET/IPT e por deposição por spray.^[12]

As ligas NICRALC C1 e NICRALC 05 são ligas claramente hipoeutéticas, enquanto que as ligas 07 e 10 tendem para uma distribuição eutética dos carbonetos. A liga NICRALC 13 por sua vez é hipereutética. Além disso, as ligas NICRALC apresentam dois carbonetos de cromo (M_7C_3 e M_3C_2), conforme demonstra a análise das microestruturas, os resultados de DR-X, bem como de EDS. Morfologicamente, verifica-se a possibilidade da ocorrência da reação: $\gamma + M_7C_3 \rightarrow \gamma' + M_3C_2$, incompleta.^[5] A análise pelo método de Rietveld dos difratogramas obtidos a partir dos carbonetos extraídos mostra a coexistência dos carbonetos M_7C_3 e M_3C_2 em todas as ligas NICRALC 05, 07, 10 e 13 fundidas. Nas ligas NICRALC 05, 07 e 10, predomina o carboneto M_7C_3 (acima de 85%), ao passo que, na liga NICRALC 13, predomina o carboneto M_3C_2 (acima de 90%). A liga NICRALC OSP apresenta uma matriz ordenada na qual está dispersa finos carbonetos primários e “ilhas” de eutético $\gamma' + \gamma$. Os carbonetos presentes nas ligas STELLITE e ferro fundido branco de alto cromo são majoritariamente do tipo M_7C_3 . Estão presentes ainda os carbonetos do tipo MC, sendo WC na liga STELLITE e o NbC, no caso ferro fundido.

As diferentes ligas NICRALC foram avaliadas em distintas condições de tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento,^[5] bem como no estado bruto de fundição. O STELLITE foi avaliado na condição bruta de fundição. Os ferros fundidos foram avaliados tanto no estado bruto quanto no estado temperado e revenido.

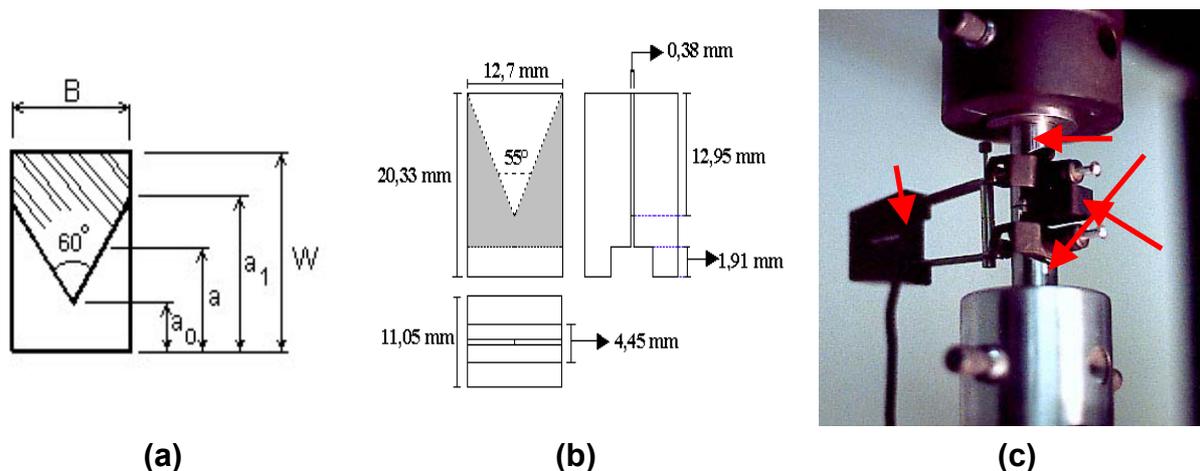


FIGURA 4 – Configuração do ensaio de tenacidade à fratura *chevron*. (a) Características geométricas do entalhe *chevron*; (b) Dimensões dos corpos de prova utilizados neste ensaio, entalhados por EDM; (c) configuração do ensaio, detalhando a montagem do extensômetro e das garras e da amostra.^[14]

Os ensaios de tenacidade à fratura chevron foram realizados na máquina eletromecânica Instron TT-DML de 100.000 N de capacidade e a velocidade de avanço do carro da máquina também foi de 0,2 mm/min. Os corpos de prova *chevron* foram entalhados por eletro-erosão a fio (EDM), com ângulo do entalhe *chevron* de 55° e abertura de entalhe de 0,38 mm (Figura 4-b). Os dispositivos de ensaio (garras) foram fabricados em aço de alta resistência mecânica, tratado para dureza acima de 40 HR_C (Figura 4-c). O fator Y_C^* foi estabelecido a partir das soluções analíticas propostas por Munz,^[20] para corpos de prova retangulares cujas características geométricas são as seguintes: $3,0 \leq W/H \leq 4,0$; $0,2 < \alpha_0 < 0,4$; e $\alpha_1 = 1$, onde $\alpha_0 = a_0/W$; $\alpha_1 = a_1/W$ (Figura 4-a).

Os critérios de validade dos ensaios chevron utilizados foram os seguintes: i) $P_M < 1,10 P_Q$; ii) inclinação do plano de trinca menor que 10° até pelo menos 1/3 do ligamento remanescente; iii) curva típica de crescimento estável, isenta da ocorrência de ruptura catastrófica durante o processo de nucleação da trinca na ponta do entalhe; iv) relação entre a largura do corpo de prova mínima B_c e a largura real do corpo de prova chevron B menor que a unidade ($B_c/B < 1$). O parâmetro “p” apesar de considerado, não foi utilizado diretamente na validação dos resultados. Os valores de tenacidade à fratura obtidos em situações onde p mostrou-se maior que 0,20 são tomados apenas como K_{ICVQ} , isto é, aparente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios de tenacidade à fratura, bem como os valores de B_c/B e p, estão apresentados na Tabela 2. Verifica-se que nem todos os resultados de tenacidade à fratura, utilizando os ensaios chevron, foram tomados como válidos. De maneira geral, os casos de invalidação dos resultados estão associados à relação $B_c/B > 1$. Onde esta relação foi atendida, mesmo para o caso de valores de “p” maiores que 0,20, os resultados foram tomados considerados como aparentemente. Verifica-se que os valores de “p” elevados estão associadas a valores da relação $B_c/B > 1$. Os resultados de tenacidade à fratura inválidos mostraram-se elevados e estão associados a dois fenômenos, que levaram à esforços requeridos para o crescimento estável de trinca mais elevados: crescimento secundário de trincas e crescimento fora do plano do entalhe.

Tabela 2 – Síntese de todos os resultados de tenacidade à fratura das ligas avaliadas neste trabalho.

Material	K_{ICV} [MPa.m ^{1/2}]*	B_C/B	"p"	Validade do Ensaio
NICRALC C1 BF	55,2 +/- 3,1	0,8	0,21	VÁLIDO
NICRALC C1 TTI	65,6 +/- 3,6	1,3	0,62	INVÁLIDO
NICRALC C1 TTII	61,9	1,0	0,65	INVÁLIDO
NICRALC C1 TTIII	63,8 +/- 3,1	0,8	0,48	Valor Aparente
NICRALC C1 TTIV	76,1 +/- 3,4	1,3	0,72	INVÁLIDO
NICRALC C1 TTV	68,5 +/- 2,4	1,1	0,74	INVÁLIDO
NICRALC 5-1 BF	76,3+/- 2,3	1,8	0,60	INVÁLIDO
NICRALC C5-1 TTII	82,2+/- 2,5	1,6	0,70	INVÁLIDO
NICRALC 5-2 BF	53,6+/- 7,8	0,6	0,33	Valor Aparente
NICRALC 5-2 TTII	59,8	0,8	0,48	Valor Aparente
NICRALC 05	65,8+/- 3,4	1,2	0,71	INVÁLIDO
NICRALC 07	52,6+/- 4,5	0,5	0,48	Valor Aparente
NICRALC 10	59,8	0,8	0,50	Valor Aparente
NICRALC 13	49,6+/- 4,9	0,2	0,38	Valor Aparente
NICRALC OSP	35,5 +/- 3,6	0,3	0,18	VÁLIDO
STELLITE BF	39,1 +/- 0,8	0,2	0,24	VÁLIDO
FOFO CONV TT	21,4+/- 0,3	0,1	0,14	VÁLIDO
FOFO CONV BF	21,8+/- 1,7	0,1	0,16	VÁLIDO
FOFO OSP TT	27,0+/- 0,6	0,2	0,04	VÁLIDO
FOFO OSP BD	17,8+/- 0,7	0,1	0,19	VÁLIDO

* Tenacidade à Fratura Condicional; $B_C = 1,25 \times (K_{ICV}/\sigma_{ys})^2$; Os valores de σ_{ys} utilizados foram obtidos em trabalhos anteriores.^[5, 8]

Resumidamente, pode-se verificar que os valores de tenacidade à fratura tendem a diminuir com o aumento da dureza e do limite de escoamento medidos anteriormente.^[5, 8] Prova isto o fato de a tenacidade à fratura das ligas NICRALC 05, 10 e 13 aumentar com a diminuição da microdureza e do STELLITE, a mais dura entre as superligas estudadas, ter apresentado a menor tenacidade à fratura.

Onde foi possível avaliar a tenacidade à fratura, pode-se verificar que os tratamentos de solubilização e envelhecimento das ligas NICRALC atuam no sentido de aumentar a tenacidade à fratura, com pode ser visto no caso das ligas NICRALC C1 BF e submetida ao tratamento TTIII (descrito em Silva^[5]) e C5-2 BF e submetida ao tratamento TTII (descrito em Silva^[5]).

Os ferros fundidos produzidos por fundição convencional, apresentam comportamento clássico, no qual a tenacidade à fratura depende basicamente da distribuição dos carbonetos, ou seja, é independente da dureza da matriz, isto é, com as condições de tratamento térmico.^[25] Assim como no caso anterior, esperava-se que o ferro fundido depositado por spray, apresentaria valores de tenacidade à fratura independentes das características da matriz. Entretanto, verifica-se que o tratamento de têmpera e revenimento atuou no sentido aumentar a tenacidade à fratura. A explicação deste comportamento ainda está em andamento. Chama a atenção o fato de que mesmo no caso dos materiais de alta resistência os valores de p encontrados estão acima dos limites da norma ASTM 1304.^[18]

A Figuras 5 mostra os aspectos típicos das curvas obtidas durante os ensaios considerados válidos, neste caso, das ligas NICRALC C1 e STELLITE, respectivamente. Neste caso pode-se verificar que o formato da curva atende aos requisitos estabelecidos e durante o ensaio verifica-se um crescimento estável de trinca bem definido, isento de "pop in's".

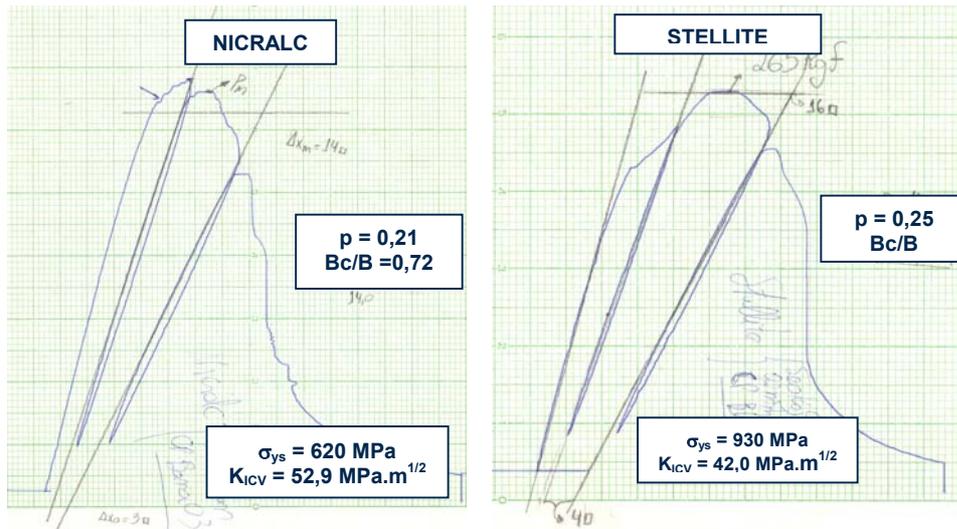
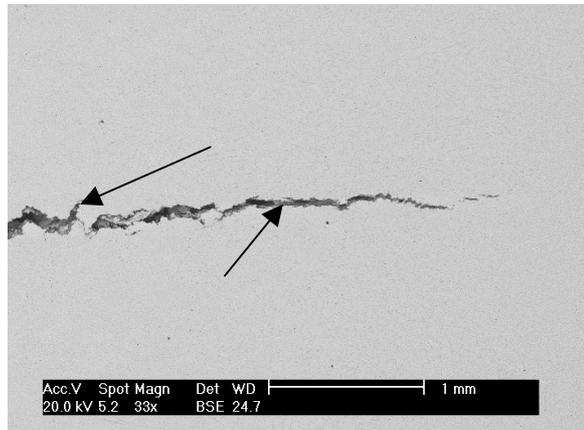
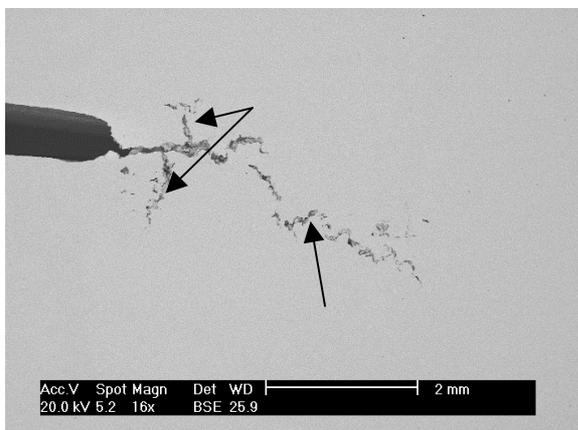
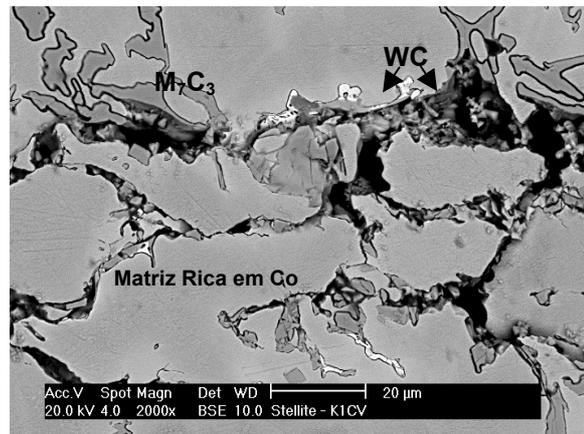
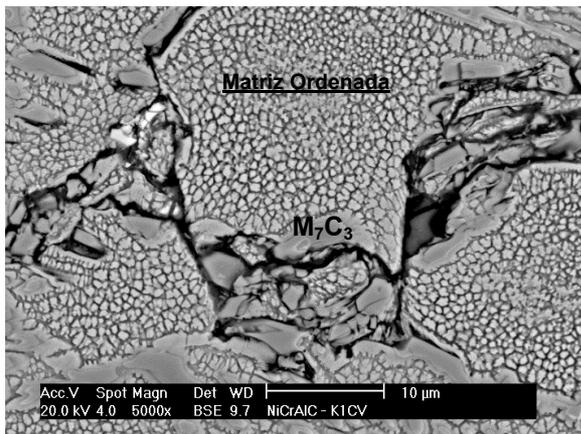


FIGURA 5 – Formato das curvas carga versus deslocamento típicas obtidas nos ensaios de tenacidade à fratura das ligas NICRALC C1 (a) e STELLITE (b), ambas no estado bruto de fundição.

Do ponto de vista dos mecanismos de fratura, verifica-se comportamento similar no caso das ligas NICRALC C1 e STELLITE. Qualitativamente podemos afirmar que o crescimento de trinca se dá preferencialmente na interface carboneto matriz associado ao crescimento de trincas secundárias, acompanhando a distribuição eutética (Figuras 6-a e 6-b).



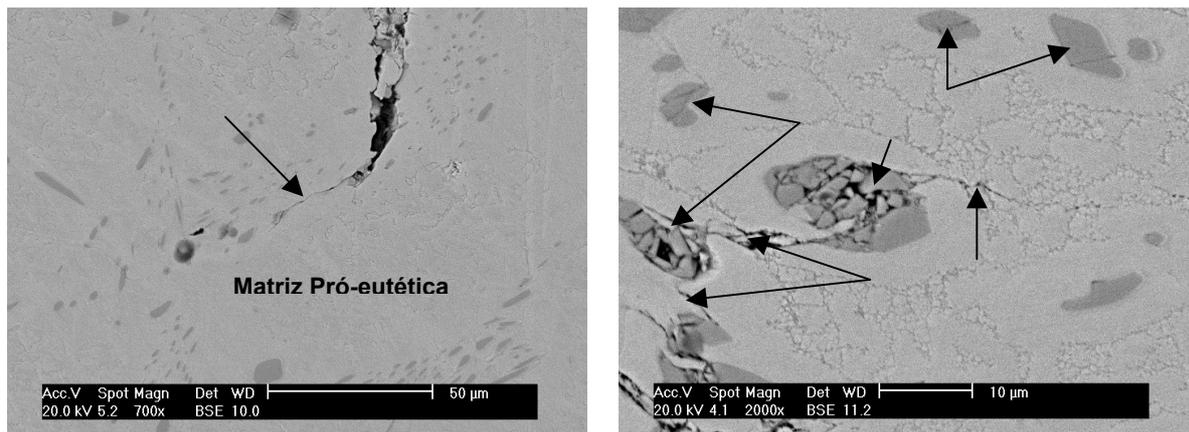


Figura 6 – Caminhos de trinca após ensaios chevron. (a) NICRALC C1-BF; (b) STELLITE-BF; (c) aspecto geral do crescimento de trinca na liga NICRALC 05-TTII; (d) aspecto geral do crescimento de trinca na liga NICRALC 13-TTII, mostrando o crescimento secundário de trincas; (e) detalhe da figura do crescimento de trinca na liga NICRALC 05-TTII NICRALC 13 – TTII; (f) detalhe do crescimento de trinca na liga NICRALC 05-TTII. MEV-ERE. Ataque por reagente de Marble.

Do ponto de vista da relação entre o caminho de trinca e o estabelecimento dos valores para o parâmetro “p”, as Figuras 6-c e 6-d mostram a diferença existente entre os fenômenos ocorridos durante crescimento de trinca e a validade do ensaio. No caso da liga NICRALC 05 (Figuras 6-c), fica evidenciada forte ocorrência de crescimento secundário de trinca e crescimento fora do plano do entalhe, aos quais pode-se associar os elevados valores encontrados para o parâmetro “p” para esta liga. No caso, da liga NICRALC 13 (Figuras 6-d), cujos ensaios foram considerados válidos e cujos valores obtidos para “p” foram os menores entre todas as ligas NICRALC ensaiadas, pode-se verificar um crescimento de trinca mais bem comportado, com pequena incidência de crescimento secundário. Ainda assim, se verifica que os valores de “p” encontrados estão acima do estabelecido na norma. Neste caso parece razoável atribuir este fato não às atividades plásticas na ponta da trinca, mas sim ao crescimento complexo desta trinca, caracterizado pela forte clivagem dos carbonetos do tipo M_3C_2 , conforme apontado na Figura 6-f. Desta forma, durante o processo de descarregamento-carregamento efetuado para a avaliação do parâmetro “p”, a dificuldade que a frente de trinca encontrará para se “fechar” levaria aos desvios da linearidade elástica, mas não associado diretamente a atividades plásticas, mas principalmente a atividades inelásticas decorrentes das múltiplas frentes de trincas. Neste sentido, os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com o previsto discutido por Miserez e Mortensen.^[15]

Do ponto de vista dos valores do fator de plasticidade “p” verificamos para as ligas NICRALC três categorias de materiais: i) ligas C1-BF e NICRALC OSP, cuja tenacidade à fratura mostrou-se relativamente menor e cujos valores de “p” da ordem de 0,20, estão de acordo com a discussão proposta por Mortensen et al.;^[24] ii) ligas NICRALC submetidas a diferentes tratamentos térmicos com valores intermediários de “p”, mas que tem os demais parâmetros de validade atendidos; e por último, iii) ligas NICRALC com valores de “p” muito elevados, e que também não atenderam os demais requisitos de validade dos resultados chevron.

Na primeira categoria de ligas, aceita a consideração da literatura,^[24] os valores de tenacidade à fratura são válidos. No segundo caso, os valores de “p” indicam que, apesar das considerações sobre os fenômenos irreversíveis ocorridos durante o crescimento de trinca, os valores da tenacidade à fratura podem estar

superestimados. Os resultados verificados para o STELLITE e os ferros fundidos, bem como para as ligas NICRALC C1-BF e NICRALC OSP, tanto para os valores da relação B_c/B quanto para “p” podem indicar ainda a necessidade de se utilizar corpos de prova maiores. Na terceira categoria, fica evidenciado que os tamanhos dos corpos de prova utilizados estão aquém do comportamento verificado.

CONCLUSÕES

De acordo com os resultados verificados neste trabalho é possível concluir que:

- 1- Conforme descrito na literatura, os valores de “p” obtidos mostraram-se acima do exigido pela norma ASTM 1304, mesmo no caso de amostras de menor tenacidade, o que indica que este parâmetro sofre outras influências além da plasticidade na ponta da trinca. O caminho de trinca e o micromecanismo de fratura também interferem nos valores obtidos.
- 2- A distribuição homogênea e refinada da microestrutura obtida por deposição por spray proporcionaram a menor tenacidade à fratura entre as ligas NICRALC, o que está de acordo com comportamento clássico previsto na literatura para materiais de alta resistência.
- 3- A utilização da metodologia chevron, dentro das condições aplicadas, não permitiu estabelecer plenamente a tenacidade à fratura das ligas NICRALC.
- 4- Os resultados de tenacidade à fratura obtidos para as ligas NICRALC indicam a possibilidade de utilização da metodologia chevron, entretanto, indicam também a necessidade de se utilizar corpos de prova de maiores dimensões

Dedicatória

Este trabalho é dedicado à memória do Eng. Aroldo Mourisco.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPESP, CAPES e CNPq, ao IPT pela doação de amostras de ferro fundida branco de alto cromo.

REFERÊNCIAS

- 1 YOSHIMURA, H.N. e GOLDENSTEIN, H., “Compostos Intermetálicos Fundidos Brancos – WCIC’ – Uma nova família de ligas para fundição resistentes a altas temperaturas”. Anais do 51º Congresso Anual da ABM, Porto Alegre, RS, 1996.
- 2 YOSHIMURA, H.N.; MATSUBARA, Y.; GOLDENSTEIN, H., “WCI – White Cast Intermetallic Compound – A New High Temperature Foundry Material”. Acta Microscopica. Vol.6, Supl. A, p. 174-175, September, 1997.
- 3 GOLDENSTEIN, H., SILVA, Y.N., YOSHIMURA, H.N., “Designing a New Family of High Temperature Wear Resistant Alloys Based on Ni₃Al IC - Experimental Results and Thermodynamic Modelling”, Intermetallics, 2001.
- 4 SILVA, Y.N., “CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E VALIDAÇÃO DE BANCO DE DADOS TERMODINÂMICO PARA SIMULAÇÃO DE PROPRIEDADES DE LIGAS DO SISTEMA AL-C-CR-NI”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, PMT/EPUSP, Julho de 2003, São Paulo/SP – Brasil.

- 6 Silva, W.S., Avaliação da Propriedades Mecânicas e Tribológicas de Ligas NICRALC, Tese de Doutorado, EPUSP 2006.
- 7 HISATO, M. K., "Estudos de Fundibilidade de uma Liga NiCrAlC". Trabalho de Formatura, PMT/EPUSP, 2005.
- 8 FARINA, A. B.; GOLDENSTEIN, H.; SILVA, W. S.; BENEDUCE NETO, F., "Progressos no desenvolvimento do banco de dados termodinâmicos para o sistema Ni-Cr-Al-C". In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2004, Porto Alegre - RS. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 2004. v. XVI, p. 1-13.
- 9 Silva, W.S., Ferrandini, P.L., Caram, R., Goldenstein, H., Estudo da Resistência Mecânica de Ligas NICRALC em diferentes temperaturas, XVII CBECIMAT, Foz do Iguaçu, 2006
- 10 Silva, W. S.; Souza, R.M.; Mello, J.D.B; Goldenstein, H., Room Temperature Mechanical Properties and Tribology of Nicralc and Stellite as Cast Alloys, a ser publicado.
- 11 KUNIOSHI, C.T., SILVA, W.S., RAMANATHAN, L.V., GOLDENSTEIN, H., "Oxidation Resistance of NICRALC Alloys – A Preliminary Study", International Conference – Abrasion 2005, São Paulo, Brasil, p. 213-225
- 12 Silva, W.S, Maia, L.P., Moreira, M.F., Goldenstein, H., Avaliação da Resistência à Combustão de Ligas NICRALC, XVII CBECIMAT, Foz do Iguaçu, 2006.
- 13 MOURISCO, A.; SILVA, Y.N.; GOLDENSTEIN, H.; KIMINAMI, C.S.; BOLFARINI, C., "Microstructure of Wear Resistant Nickel Alloys Produced by Spray Forming", In: EUROMAT'2001, 2001, Rimini. Proceedings of the EUROMAT 2001. Associazione Italiana di Metallurgia / FEMS, 2001.
- 14 ASTM E399 – 90, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", Annual Book of ASTM Standards, 1991, p. 485-515.
- 15 Silva, W.S., Estudo da tenacidade à fratura do aço rápido M2 fundido, modificado e tratado termicamente, Dissertação de Mestrado, EPUSP, 2001.
- 16 Miserez, A. Mortensen Fracture of aluminium reinforced with densely packed ceramic particles: influence of matrix hardening, Acta Materialia 52 (2004) 5331–5345
- 17 Eriksson, K. "A Rapid Method for Pre-cracking of Brittle Materials", Scandinavian Journal of Metallurgy, Vol 4, pp 182-184, 1975
- 18 Crowe, C.R., R.A. Gray, and D.F. Hasson. *Microstructure Controlled Fracture Toughness of SiC/Al Metal Matrix Composites*. in *Fifth International Conference on Composite Materials ICCM*. Proc. Conf., 1985: San Diego, CA, The Metallurgical Society, TMS, Warrendale, PA.
- 19 ASTM E1304 – 97, "Standard Test Method for Plane-Strain (Chevron-Notch) Fracture Toughness of Metallic Materials", ASTM Committee E-24, Annual Book of ASTM Standards, 1989, p 962-972.
- 20 Bittencourt, T.N., Borges, J. U.A., Prado, E. P., Guimarães A. E. P., Santos, A.C., Ferreira, L.E.T., "Estudo Experimental do Fraturamento do Concreto Estrutural por meio de Corpos-de-Prova Cilíndricos", Boletim Técnico PEF-EPUSP, São Paulo, Janeiro de 2000.
- 21 Munz, D., "Determination of Fracture Toughness of High Strength Aluminium Alloys with Chevron Notched Short and Short Bar Specimen", Engineering Fracture Mechanics, Vol 15, pp. 231-236, 1981.
- 22 Barker, L.M., "Theory for determining K_{IC} from small, non-LEFM specimens, supported by experiments on aluminium". International Journal of Fracture, pp 515-536, 1979.

- 23 Newman, J. C. "A Review of Chevron-Notched Fracture Specimens", in Chevron Notched Specimens – Testing and Stress Analysis. Editors: Underwood, Freiman & Barata, ASTM Committee E-24 on Fracture Testing, Louisville, Ky, 21 April 1983.
- 24 ASTM B 771 – 87, "Standard Test Method for Short Rod Fracture Toughness of Cemented Carbides", ASTM Committee B-9, Annual Book of ASTM Standards, 1990, p.561 – 567.
- 25 T.J. Grant, L. Weber, A. Mortensen. Plasticity in Chevron-notch fracture toughness testing p 1-32. Engineering Fracture Mechanics 67 (2000) 263±276
- 26 Broeckmann, C., "Fracture of Tool Steels on a Microscopical Scale". Proc. Conf. Tooling – Progress in Tool Steels, 1996, p.491-499.