

INOX: Usinagem

Efeito da temperatura e do teor de níquel nas propriedades mecânicas e a correlação com usinabilidade em ligas Fe-18Cr-Ni

Effect of temperature and nickel content on the mechanical properties and their correlation with the machinability of Fe-18Cr-Ni alloys

Franco de Castro Bubani

Faculdade de Engenharia Mecânica
da UNICAMP, Campinas, SP
E-mail: franco@fem.unicamp.br

Célia Cristina Moretti
Decarli

Faculdade de Engenharia Mecânica
da UNICAMP, Campinas, SP
E-mail: cdecarli@fem.unicamp.br

Gabriela Lujan Brollo

Faculdade de Engenharia Mecânica
da UNICAMP, Campinas, SP
E-mail: gbrolo@fem.unicamp.br

Antonio Celso Barbosa

Villares Metals, Campinas, SP
E-mail: celso.barbosa@villares-
metals.com.br

Anselmo Eduardo Diniz

Faculdade de Engenharia Mecânica
da UNICAMP, Campinas, SP
E-mail: anselmo@fem.unicamp.br

Paulo Roberto Mei

Faculdade de Engenharia Mecânica
da UNICAMP, Campinas, SP
E-mail: pmei@fem.unicamp.br

Resumo

Foram realizados ensaios de tração na temperatura ambiente em ligas Fe-18%Cr, com teor de níquel variando entre zero e 60% e correlacionaram-se as propriedades obtidas com os resultados de usinabilidade obtidos anteriormente pelo grupo. As ligas foram ensaiadas, também, a 350 e 700°C, de modo a determinar suas propriedades, na faixa de temperatura alcançada, no local da usinagem. A liga ferrítica apresentou alongamento e limite de resistência menores que as ligas austeníticas, tanto à temperatura ambiente, como a 350°C, o que explica porque, na usinagem dessas ligas, a vida da ferramenta foi muito maior que nas ligas austeníticas (100 contra 20 a 50 minutos, respectivamente). No ensaio a 350°C, temperatura atingida pela peça na região de usinagem, o aumento do teor de níquel elevou, tanto o limite de resistência das ligas austeníticas, o que dificulta a usinagem, como, também, elevou a ductilidade (alongamento), facilitando a adesão da liga sobre a ferramenta de corte e exigindo maior esforço na usinagem, com conseqüente redução da vida da ferramenta.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis, ligas à base de níquel, propriedades mecânicas, usinabilidade, propriedades em temperaturas elevadas.

Abstract

Tensile tests were carried out at room temperature in Fe-18% Cr alloys, with nickel content varying between zero and 60%, and the properties obtained were correlated with the results of machinability previously obtained by the group. The alloys were also tested at 350 and 700°C in order to obtain these properties in the range of temperature compatible with the machining process. The ferritic alloy presented lower elongation and UTS (ultimate tensile strength) than austenitic alloys at room temperature and 350°C, which explains why, in the machining process, the ferritic alloy shows much greater tool life if compared to austenitic alloys (100 against 20 to 50 minutes, respectively). In the test at 350°C, the temperature reached during machining, the increase in nickel content increased the UTS of austenitic alloys, hampering the machining, and also elevated the ductility (elongation) that produces a higher volume of material adhered on the tool. This higher adhesion capacity, allied to a higher mechanical strength, explains the increase of tool wear as a function of increasing nickel content in the alloy with a consequent reduction in the life of the tool.

Keywords: Stainless steel, nickel-based alloys, mechanical properties, machinability, properties at high temperatures.

1. Introdução

As ligas Fe-Cr-Ni possuem alto valor agregado, sendo utilizadas em diversas aplicações. Os principais representantes das ligas de composição básica Fe-Cr (sem adição de níquel) são os aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos, utilizados em diversas aplicações, que vão desde a indústria química e alimentícia, até a de cutelaria e utensílios de cozinha. Os principais representantes das ligas Fe-Cr-Ni são os aços inoxidáveis austeníticos e as superligas à base de níquel, com várias aplicações industriais. As superligas à base de níquel possuem resistência mecânica satisfatória a temperaturas elevadas e, por isso, são utilizadas em turbinas de motores aeronáuticos, turbocompressores etc. Nas ligas estudadas no presente trabalho, todas com teor de cromo fixo em, aproximadamente, 18%, a variação do teor de níquel entre zero e 60% levou a composições básicas de aços inoxidáveis ferríticos, aços inoxidáveis austeníticos e superligas, materiais que representam uma parcela importante das ligas usadas, principalmente, nas indústrias aeronáutica, química, naval, alimentícia e biomecânica (Padilha, 1994).

Visando a estudar o efeito de adições de até 60% de níquel na estrutura, propriedades mecânicas e usinabilidade do sistema Fe-18Cr, foi desenvolvido

um projeto de pesquisa com suporte do CNPq e das empresas Bosch e Villares Metals dentro da REMAUSME - Rede de Materiais de Usinabilidade Melhorada. Primeiramente, foi estudado o efeito do níquel no desgaste das ferramentas em torneamento por Marques (Marques, 2007), o qual observou que o aumento do teor de níquel provocava uma redução contínua na vida da ferramenta.

Paralelamente ao trabalho de Marques (Marques, 2007), o presente trabalho foi realizado para verificar a influência do teor de níquel e da temperatura nas propriedades mecânicas das ligas Fe-Cr-Ni, de modo a correlacionar tais propriedades com os resultados de usinabilidade obtidos por Marques. As ligas foram ensaiadas a diferentes temperaturas (ambiente, 350 e 700°C), de modo a determinar suas propriedades na faixa de temperatura compatível com o processo de usinagem, de acordo com a literatura (Grzesik, 1999 e Miller, 2003).

2. Material e métodos

As ligas utilizadas no projeto foram produzidas pela Villares Metals. O material foi entregue na forma de barras de seção circular, com diâmetro de 54 mm, cuja composição é apresentada na Tabela 1. As ligas foram forjadas e laminadas em temperaturas na faixa de 1150 a 1180°C. A liga com 0% de níquel foi recozida a 790°C por 1 hora e resfriada

rapidamente, com ar soprado. As demais ligas foram recozidas a 1050°C por 1 hora e resfriadas em água.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina MTS, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos, com comprimento da parte útil de 30 mm e diâmetro da parte útil de $4,95 \pm 0,05$ mm. Foram realizados ensaios de tração à temperatura ambiente, 350 e 700°C. O aquecimento foi feito através de um forno de resistências elétricas. Atingida a temperatura de ensaio, o corpo-de-prova era mantido nessa temperatura por 5 minutos e, então, ensaiado.

3. Resultados e discussões

Na Figura 1, são apresentados os resultados do ensaio de tração na temperatura ambiente.

Observam-se 3 grupos de ligas:

1. A liga ferrítica (sem adição de níquel), que suporta a menor deformação plástica (alongamento), e, também, apresenta o menor limite de resistência mecânica.
2. O grupo de ligas austeníticas, com níquel variando de 20 a 60% Ni, que apresenta, entre si, valores próximos de alongamento e limite de resistência mecânica, mas que apresenta tais valores maiores que os da liga ferrítica.

Tabela 1 - Composição das ligas utilizadas no trabalho (% em peso).

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	N
0Ni	0,012	0,24	0,43	18,1	0,0	0,18	0,100	0,0100	0,0036
10Ni	0,016	0,22	0,40	18,0	10,2	0,11	0,011	0,0035	0,0300
20Ni	0,014	0,21	0,41	18,0	20,0	0,09	0,010	0,0031	0,0280
30Ni	0,013	0,22	0,44	18,0	30,2	0,07	0,007	0,0027	0,0310
40Ni	0,015	0,21	0,45	18,0	40,2	0,05	0,007	0,0026	0,0050
50Ni	0,012	0,20	0,44	18,1	50,0	0,03	0,006	0,0023	0,0050
60Ni	0,010	0,21	0,46	17,8	60,2	0,02	0,006	0,0017	0,0050

3. A liga com 10% Ni, que apresenta um limite de resistência mecânica parecido com os das demais ligas austeníticas, mas que apresenta um alongamento muito maior se comparado com as demais ligas austeníticas. Isto ocorreu pela formação de martensita α' durante a deformação à temperatura ambiente (Bubani, 2008). A elevação da temperatura (Figura 2) provocou reduções sucessivas no limite de escoamento (LE) da liga ferrítica (0%Ni). O fato de a liga ferrítica apresentar valores mais altos que as austeníticas, nas duas condições de ensaio (temperatura ambiente e 350°C), pode ser associado à sua estrutura cristalina, uma vez que materiais com estrutura CCC, como a ferrita, oferecem maior resistência ao deslizamento de planos cristalinos do que a austenita, que tem estrutura CFC. Para as ligas austeníticas (10 a 60% Ni), observou-se uma tendência de elevação do LE com o aumento do teor de níquel, discreta à temperatura ambiente e a 350°C, mas bastante acentuada a 700°C. Observa-se, ainda, que os valores do LE diminuem à medida que aumenta a temperatura de ensaio; esse comportamento é esperado, uma vez que o aumento da temperatura facilita o deslizamento de planos atômicos.

O limite de resistência à tração (LR) da liga ferrítica é menor que o das ligas austeníticas, para todas as condições estudadas. Na curva obtida à temperatura ambiente, para as ligas austeníticas, observa-se que o LR mais alto é o da liga 10Ni, devido à formação de martensita, já descrita anteriormente; as demais ligas austeníticas apresentam LR semelhantes.

Para as ligas austeníticas, observa-se, nos ensaios realizados a 350°C, um aumento do valor do LR à medida que aumenta o teor de níquel das ligas e, a 700°C, há uma discreta tendência ao aumento do valor do LR, isto em função do aumento do teor de níquel. Nas ligas austeníticas, na medida em que se aumenta a temperatura, ocorre uma redu-

ção sensível no LR, na faixa de 500 a 600 MPa, à temperatura ambiente, na faixa de 400 a 500 MPa, a 350°C, e, na faixa de 200 a 300 MPa, a 700°C. Observa-se, claramente, o efeito de aumento de resistência por solução sólida, causado pela adição de níquel.

Em relação ao alongamento, a liga com 10% de níquel apresentou um valor, significativamente, mais alto, para essa propriedade na temperatura ambiente. Isso pode ser explicado pela transformação martensítica induzida por deformação nessa liga, o que causa um aumento na taxa de deformação, durante deformação a frio. A instabilidade plástica, que leva à estricção e à fratura começa quando a taxa de encruamento se iguala à taxa de aumento de tensão. O aumento da taxa de encruamento, determina que os valores de tensão e deformação, para a condição de instabilidade, sejam maiores. (Dieter, 1986). Para 350°C, não ocorre a formação de martensita e o alongamento na liga fica próximo aos das ligas com 20 ou 30% Ni. A 350°C, observa-se uma tendência ao aumento do valor do alongamento à medida que aumenta o teor de níquel nas ligas austeníticas. Tanto à temperatura ambiente quanto a 350°C, a liga ferrítica (0% Ni) apresentou valores mais baixos de alongamento na ruptura que todas as ligas austeníticas, o que pode ser explicado pelo fato de que a estrutura CCC, que

possui menos sistemas de escorregamento que a estrutura CFC, suporta menos deformação plástica final. Os valores de alongamento, na ruptura, obtidos nos ensaios realizados a 700°C, mostraram um comportamento diferente do observado nas outras condições. Para esses ensaios, o alongamento da liga ferrítica foi maior que o das ligas austeníticas.

A 700°C, observa-se que o alongamento das ligas austeníticas cai drasticamente com o aumento do teor de níquel, a partir de 20%. Observações microestruturais revelaram a presença de precipitados nos contornos de grão, sendo que, em algumas ligas, ocorreu separação entre os grãos durante os ensaios de tração a 700°C, indicando que a precipitação observada (Bubani, 2008) fragilizou as ligas austeníticas, levando à fratura intergranular (Too, 2002; Jivkov, 2006 e Rempe, 2008). Esses precipitados não foram identificados.

A Figura 3 apresenta a vida da ferramenta em função da resistência à tração e alongamento a 350°C. O ensaio de vida de ferramentas foi realizado por Marques (Marques, 2007) nessas mesmas ligas. A liga ferrítica apresentou a maior vida de ferramenta, porque ela tem a mais baixa resistência à tração (e, conseqüentemente, a mínima energia necessária para cortar o material) e, tam-

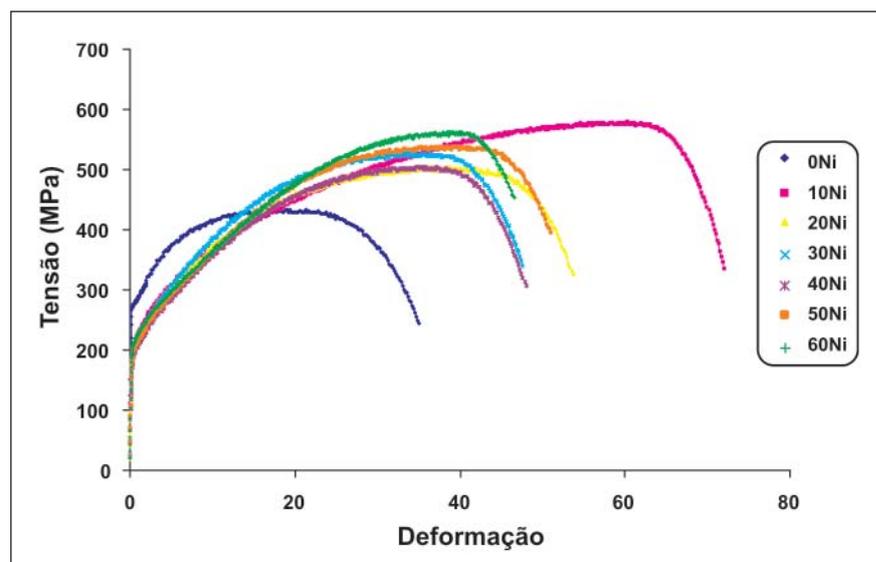


Figura 1 - Curvas do ensaio de tração na temperatura ambiente.

bém, por causa de sua baixa ductilidade. A ductilidade é outro fator que explica a redução da vida da ferramenta com o aumento do teor de níquel na liga, pois o aumento do teor de níquel aumenta a deformação que a liga suporta.

Assim sendo, a área ocupada pelo material da peça/cavaco na ferramenta aumentou, com o aumento do teor de níquel, e um maior volume de material aderiu à ferramenta (Sun, 1998) e essa adesão ocorreu com maiores forças de adesão (Marques, 2007). Esses fenômenos favoreceram a adesão e o mecanismo de remoção de partículas da ferramenta, o qual foi o principal mecanismo de desgaste da ferramenta. Essa alta capacidade de adesão, aliada à resistência mecânica mais elevada, explica o aumento do desgaste da ferramenta, com o aumento do teor de níquel na liga.

A liga que não acompanhou essa tendência foi a de 30% Ni, a qual apresentava uma fração volumétrica de inclusões (Figura 4) maior que as outras ligas estudadas. Essas inclusões eram, basicamente, compostos com cálcio e magnésio e, segundo a literatura (Fang, 1996; Akasawa, 2003 e Bletton, 1990), elas facilitam a usinabilidade de ligas inoxidáveis, principalmente, porque funcionam como lubrificantes, protegendo a superfície da ferramenta.

4. Conclusões

Em relação ao ensaio de **tração na temperatura ambiente**, algumas conclusões puderam ser tiradas, as quais estão apresentadas a seguir.

- As ligas austeníticas apresentaram LR (limite de resistência) entre 510 e 580 MPa, valores bem maiores que os da liga ferrítica (400 MPa). Nas ligas austeníticas, não houve uma relação entre o LR e o teor de níquel.
- As ligas austeníticas de 20 a 60% Ni apresentaram alongamentos entre 50 e 55%, valores bem maiores que os da ferrítica (33%). A liga 10 Ni apresentou alongamento de 77%, devido à formação de martensita α' (CCC), durante a deformação.

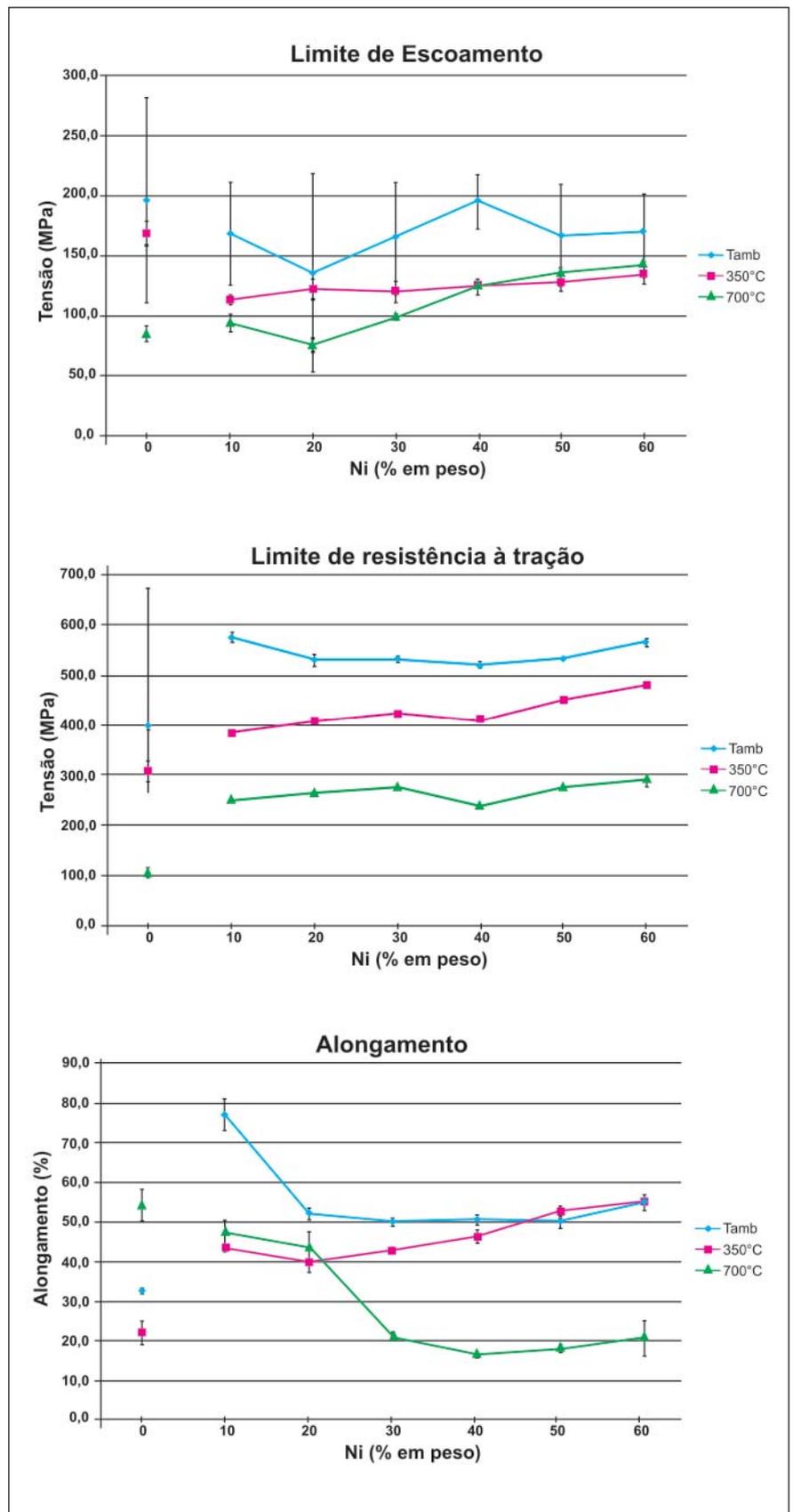


Figura 2 - Efeito da temperatura nas propriedades mecânicas de ligas de níquel.

Em relação ao ensaio de **tração na temperatura de 350°C**, algumas conclusões puderam ser tiradas, as quais estão apresentadas a seguir.

- As ligas austeníticas apresentaram LR entre 380 e 480 MPa, valores bem maiores que os da liga ferrítica (310 MPa). Nas ligas austeníticas, o LR aumentou com a elevação do teor de níquel de maneira aproximadamente linear:

$$LR \text{ (MPa)} = 2x \%Ni + 360.$$

- As ligas austeníticas apresentaram alongamentos entre 40 e 55 %, alongamento bem maior que o da ferrítica (22%). Nas ligas austeníticas, o alongamento aumentou com a elevação do teor de níquel de maneira aproximadamente linear:

$$\text{Alongamento (\%)} = 0,25x \%Ni + 38$$

Em relação ao ensaio de **tração na temperatura de 700°C**, algumas conclusões puderam ser tiradas, as quais estão apresentadas a seguir.

- As ligas austeníticas apresentaram LR entre 250 e 290 MPa, valores bem maiores que o da liga ferrítica (100 MPa). Nas ligas austeníticas, o LR aumentou discretamente com a elevação do teor de níquel.
- Nas ligas austeníticas com 10 e 20 %Ni, o alongamento ficou em torno de 45%, mas, nas ligas de 30 a 60 % Ni, caiu para 20%, enquanto que, na liga ferrítica,

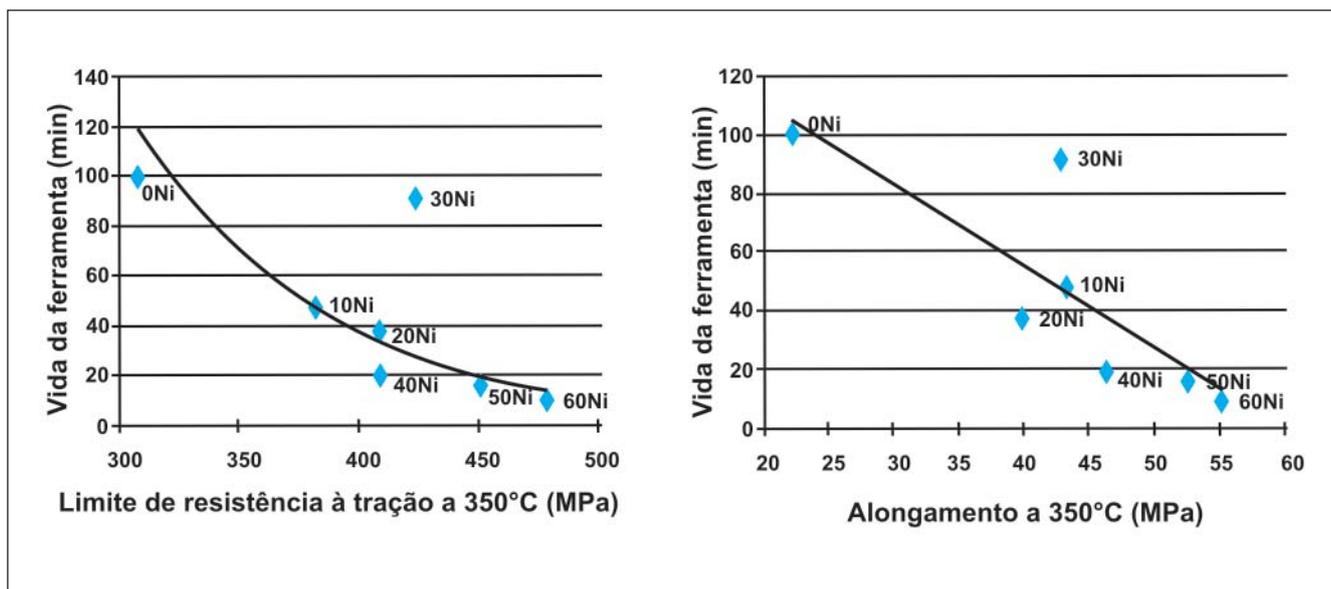


Figura 3 - Vida da ferramenta em função do limite de resistência à tração e alongamento a 350°C. Ensaio de torneamento com metal duro revestido, usando velocidade de corte de 230 m/min, avanço de 0,1 mm/volta e profundidade de usinagem de 0,6 mm.

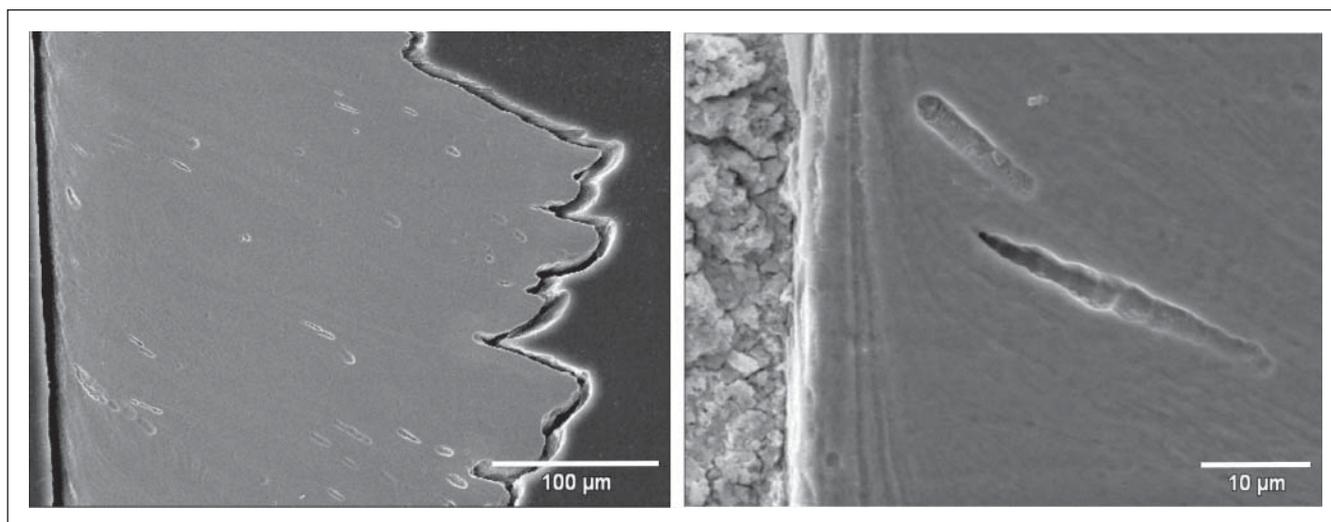


Figura 4 - Cavaco da liga 30% Ni proveniente do ensaio de quick-stop. Observam-se, no MEV, inclusões alongadas dentro do cavaco.

ficou em torno de 55 %. O menor alongamento, nas ligas austeníticas, foi provocado pela precipitação de fase não identificada no contorno de grão austenítico, fase que, provavelmente, deve ser a sigma.

Em relação à **usinabilidade**, algumas conclusões puderam ser tiradas, as quais estão apresentadas a seguir.

- A liga ferrítica apresentou alongamento e limite de resistência bem menores que as ligas austeníticas, tanto à temperatura ambiente, como a 350°C, o que explica porque, na usinagem dessas ligas, a vida da ferramenta foi muito maior nas ligas austeníticas (100 contra 20 a 50 minutos, respectivamente).
- No ensaio a 350°C, temperatura atingida pela peça na região de usinagem, o aumento do teor de níquel elevou tanto o limite de resistência das ligas austeníticas, o que dificulta a usinagem, como também elevou a ductilidade, facilitando a adesão da liga sobre a ferramenta de corte e exigindo maior esforço na usinagem, com conseqüente redução da vida da ferramenta.
- A liga com 30% Ni apresentou inclusões que se alongaram no processo de usinagem. Verificou-se a presença de inclusões de cálcio, elemento que age como lubrificante durante a usinagem, facilitando o processo. Por isso, a vida da ferramenta na liga 30% Ni foi bem maior que nas outras ligas austeníticas (90 e 20 a 50 minutos, respectivamente).

5. Referências bibliográficas

- AKASAWA, T., SAKURAI, H., NAKAMURA, M., TANAKA, T., TAKANO, K. Effects of free-cutting additives on the machinability of austenitic stainless steels, *Materials Processing Technology*, v. 143-144, p. 66-71, 2003.
- BLETTON, O., DUET, R., PEDARRE, P. Influence of oxide nature on the machinability of 316L stainless steels, *Wear*, v. 139, p. 179-193, 1990.
- BUBANI, F. C., DECARLI, C. C. M., BROLLO, G. L., BARRETO, E. H., DINIZ, A. E., MEI, P. R. Efeito da

temperatura na estrutura e estabilidade de ligas Fe - 18 Cr - (0 a 60) Ni. (Trabalho apresentado no Congresso INOX 2008 - São Paulo, Nov/2008).

- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*, (4. Ed.), São Paulo: Artliber Editora, 2003. 248p.
- FANG, X. D., ZHANG, D. An investigation of adhering layer formation during tool wear progression in turning of free-cutting stainless steel. *Wear*, v. 197, p. 169-178, 1996.
- GRZESIK, W. Experimental investigation of the cutting temperature when turning with coated indexable inserts. *International Journal Of Machine Tools & Manufacture*, v. 39, n. 3.
- JIVKOV, A.P., STEVENS, N.P.C., MARROW, T.J. A three-dimensional computational model for intergranular cracking. *Computational Materials Science*, v. 38, p. 442-453, 2006.
- MARQUES, D. C. *Estudo da influência do teor de níquel na usinabilidade de ligas Fe-Cr-Ni*. Campinas: Unicamp, 2007. 95 p. (Tese de Mestrado).
- MILLER, M.R., MULHOLLAND, G., ANDERSON, C. Experimental cutting tool temperature distributions. *J. Manufacturing Science And Engineering*, v. 125, p. 667-673, 2003.
- PADILHA, A. F., GUEDES, L. C. *Aços inoxidáveis austeníticos: microestrutura e propriedades*. São Paulo: Hemus, 1994. 171p.
- REMPE, J.L., KNUDSON, D.L. High temperature thermal properties for metals used in LWR vessels. *Journal of Nuclear Materials*, v. 372, p. 350-357, 2008.
- SILVA, A. L. V. da C., MEI, P. R. *Aços e ligas especiais*. (2. ed.). Rev. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- SUN, F. L. et al. Adhering wear mechanism of cemented carbide cutter in the intervallic cutting of stainless steel. *Wear*, v. 214, n. 1, p. 79-82, jan. 1998.
- TOO, C. H. *Sensitization of austenitic stainless steels*. Cambridge: University of Cambridge, 2002. 56 p. (Tese de Mestrado).

Artigo recebido em 22/06/2009 e aprovado em 18/01/2010.

**A REM tem novo endereço:
FUNDAÇÃO GORCEIX - REM
Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57
Bairro: Vila Itacolomy
35400-000 - Ouro Preto - MG
(31) 3551-4730 (31) 3559-7408
www.rem.com.br**