

EFEITO DA TEMPERATURA E DO TEOR DE NÍQUEL NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E A CORRELAÇÃO COM A USINABILIDADE EM LIGAS Fe-18Cr-Ni

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: gbrollo@fem.unicamp.br

Celso Antonio Barbosa

Villares Metals, Sumaré, SP. E-mail: celso.barbosa@villaresmetals.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

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 process of machining. The ferritic alloy presented lower elongation and UTS (ultimate tensile strength) than austenitic alloys at room temperature and 350 °C, which explains why, in 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) what 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.

Key words: stainless steel, nickel-based alloys, mechanical properties, machinability, properties at high temperatures.

RESUMO

Foram realizados ensaios de tração na temperatura ambiente em ligas Fe-18%Cr, com teor de níquel variando entre zero e 60%, e correlacionou-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 destas 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.

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 ligas 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. Encontramos ainda muitas ligas de níquel projetadas para operar em meios altamente corrosivos, como na indústria *off-shore*. Nas ligas estudadas no presente trabalho, todas com teor de cromo fixo em, aproximadamente, 18%, teor esse necessário para conferir a essa família de materiais a resistência a corrosão, a variação do teor de níquel entre zero e 60% levou a composições básicas de aços inoxidáveis ferríticos, aços inoxidáveis austeníticos e ligas de níquel, materiais que representam uma parcela importante das ligas usadas principalmente nas indústrias aeronáutica, petroquímica, naval, alimentícia e biomecânica (PADILHA, 1994). Visando 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 Avançados 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.

Numa segunda etapa este trabalho foi realizado, com o objetivo de 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. MATERIAIS E MÉTODOS

As ligas utilizadas no projeto foram produzidas pelo Centro de Pesquisa da 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 solubilizadas a 1050 °C por 1 hora e resfriadas em água.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina servo-hidráulica 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 nesta temperatura por 5 minutos e então ensaiado.

Tabela 1: Composição química das ligas utilizadas no trabalho (% em massa).

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	N
0Ni	0,012	0,24	0,43	18,1	0	0,18	0,010	0,0033	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. RESULTADOS E DISCUSSÕES

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

Observa-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 apresentam, entre si, valores próximos de alongamento e limite de resistência mecânica, mas que, apresentam estes valores maiores que os da liga ferrítica.

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 FCC. 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 10%Ni, 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 uma discreta tendência ao aumento do valor do LR em função do aumento do teor de níquel. Nas ligas austeníticas, na medida em que se aumenta a temperatura, ocorre uma redução sensível no LR, da faixa de 500 a 600 MPa a temperatura ambiente, para a faixa de 400 a 500 MPa a 350 °C e para a faixa 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 esta propriedade na temperatura ambiente. Isso pode ser explicado pela transformação martensítica induzida por deformação nesta liga, o que causa um aumento na taxa de deformação durante deformação a frio. Como a instabilidade plástica que leva à estrição e a fratura começa quando a taxa de encruamento se iguala à taxa de aumento de tensão, quanto maior a taxa de encruamento, a condição de instabilidade plástica ocorrerá com maiores valores de tensão e deformação (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 na temperatura ambiente quanto a 350 °C, a liga ferrítica (0Ni) apresentou valores mais baixos de alongamento na ruptura que todas as ligas austeníticas, o que pode ser explicado pelo fato 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 a fratura intergranular (TOO, 2002; JIVKOV, 2006 e REMPE, 2008). Estes 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) nestas 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 também 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 a 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, e estudos continuam a ser realizados nas inclusões (Figura 4) pois, segundo a literatura (TESSLER, 1993; 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** concluiu-se que:

- As ligas austeníticas apresentaram LR (limite de resistência) entre 510 e 580 MPa, bem maiores que o 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 %, bem maiores que o da ferrítica (33%). A liga 10 Ni apresentou alongamento de 77% devido à formação de martensita α' (CCC) durante a deformação.

Em relação ao ensaio de **tração na temperatura de 350 °C** concluiu-se que:

- As ligas austeníticas apresentaram LR entre 380 e 480 MPa, bem maiores que o da liga ferrítica (310 MPa). Nas ligas austeníticas o LR aumentou com a elevação do teor de níquel de maneira aproximadamente linear: LR (MPa) = $2x \%Ni + 360$

- As ligas austeníticas apresentaram alongamentos entre 40 e 55 %, bem maiores que o da ferrítica (22%). Nas ligas austeníticas o alongamento aumentou com a elevação do teor de níquel de maneira aproximadamente linear: Alongamento (%) = $0,25x \%Ni + 38$

Em relação ao ensaio de **tração na temperatura de 700 °C** concluiu-se que:

- As ligas austeníticas apresentaram LR entre 250 e 290 MPa, 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 ficou em torno de 55 %. O menor alongamento nas ligas austeníticas foi provocado pela precipitação de fase não identificada no contorno de grão austenítico, que provavelmente deve ser a sigma.

Em relação à **usinabilidade** concluiu-se que:

- 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 destas 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 que não acompanhou essa tendência foi a de 30%Ni, e estudos continuam a ser realizados nas inclusões pois, segundo a literatura, elas facilitam a usinabilidade de ligas inoxidáveis principalmente porque funcionam como lubrificantes, protegendo a superfície da ferramenta.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, Villares Metals e Bosch pelo suporte financeiro dado a esse projeto. Aos técnicos do DEMA e do DEF da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

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. 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.

DIETER, G. E. *Mechanical metallurgy*. 3ed. New York: McGraw-Hill, 1986, 751p.

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, P. 355-369, 1999.

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., DECARLI, C. C. M., BUBANI, F. C., BARBOSA, MEI, P. R. e DINIZ, A. E. – “Efeitos da adição de níquel em ligas ferro-cromo. Parte II: tempo de vida da ferramenta em processo de torneamento”. *REM – Revista da Escola de Minas*, vol. 60, nº 01, p. 71-74, 2007.

MILLER, M.R., MULHOLLAND, G., ANDERSON, C. experimental cutting tool temperature distributions. *J. Manufacturing Science And Engineering*, V. 125, 2003, P. 667-673.

PADILHA, A. F. E 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.

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.

TESSLER, M., BARBOSA, C.A., The Machinability of Stainless Steels. *Metal. Mater. ABM*, V. 49, no. 413, pp. 32-36, 1993.

TOO, C. H. Sensitization of austenitic stainless steels, Cambridge: University of Cambridge, 2002, 56 P. Tese (Mestrado).

UMA VISÃO GERAL DOS FATORES METALÚRGICOS QUE INFLUENCIAM NA USINABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS E AS DIFERENTES FORMAS DE MELHORÁ-LA

Nicolas Renaudot¹, Marc Mantel¹, Antonio S. Viana².

¹UGITECH, Schmolz + Bickenbach group, Research Center, Avenue Paul Girod , 73403 Ugine , France

²Schmolz BickenBach do Brasil

Resumo:

Usinabilidade, capacidade de um material ser usinado, é muito difícil definir devido a numerosos critérios existentes. Para um dado conjunto de parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, lubrificantes,...), ferramenta de desgaste, quebra de cavacos ou a potência consumida pelo torno mecânico são alguns desses critérios.

É um assunto empiricamente consolidado. Para os materiais e condições padrões (histórico termomecânico), os parâmetros de corte podem ser encontrados prontamente nas tabelas publicadas disponíveis, com exceção para as novas classes de aços inoxidáveis como os duplex e para os aços inoxidáveis com a «usinabilidade melhorada» como os UGIMA®.

Em vez de simplesmente produzir dados, o presente documento centra-se sobre os fatores metalúrgicos que regem a usinabilidade dos aços inoxidáveis padrões e as diferentes formas de melhorá-lo para mostrar as possibilidades e os limites dessas classes.

Abstract:

Machinability, i.e. the ability to be machined, is very difficult to define because of the numerous existing criteria. For a given set of cutting parameters (cutting speed, feed rate, depth of cut, lubricant, ...), tool wear, chip breakability or the power consumed by the lathe are some of these criteria.

It is a very empirically mature subject. For standard materials and conditions (thermo-mechanical history), the recommended cutting parameters can be found in readily available published tables, except for new stainless steel grades such as duplex and for "improved

machinability" stainless steels such as UGIMA®.

Rather than simply producing data, this paper is focused on the metallurgical factors governing the machinability of standard stainless steels and the different ways to improve it in order to show the possibilities and limits of these grades.

Introdução:

Entre as numerosas técnicas empregadas para trabalhar os aços inoxidáveis, os processos de usinagem dizem respeito principalmente aos produtos longos, apesar de perfurações, fresagem e furos de rosca serem frequentemente realizados em produtos planos. Neste último caso, estas operações muitas vezes precedem uma união mecânica com parafusos, pinos ou rebites. Em geral, usinagem é um processo no qual o material é removido com o auxílio de uma ferramenta de corte. A facilidade com que isto pode ser feito depende, entre outras coisas do material que a peça é feita. Isso deu origem ao conceito de usinabilidade, aplicada a um material ou a uma família de materiais.

No caso dos aços inoxidáveis, a usinabilidade foi a muito tempo considerada de importância secundária, uma vez que estes materiais foram classificados como sendo de difícil usinagem, especialmente a classe austenítica. No entanto, empresas siderúrgicas têm envidado esforços no sentido de controlar essas propriedades e foram bem sucedidos no desenvolvimento de uma classe de aços inoxidáveis de fácil usinagem, dos quais dois tipos destacam-se:

- Classe de aços resulfurizados de fácil usinagem;
- Classe de aços de fácil usinagem «Controlada com óxidos tratados», sendo a mais conhecida a família UGIMA®, cuja