

INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS QUÍMICOS RESIDUAIS CROMO, NÍQUEL E COBRE NA TEMPERATURA DE USINAGEM DO AÇO ABNT12L14 NO PROCESSO DE TORNEAMENTO A SECO¹

*Nelis Evangelista Luiz²
Vitor Tomaz Guimarães Naves³
Álisson Rocha Machado⁴
Rosemar Batista da Silva⁴
Marcos Antonio de Souza Barrozo⁵*

Resumo

O principal objetivo deste trabalho é investigar a influência dos elementos químicos residuais na temperatura da interface cavaco-ferramenta durante a usinagem de aço de corte livre. As análises foram feitas usando aços com níveis altos e baixos dos elementos químicos residuais (Cr, Ni e Cu). A temperatura média foi determinada pela técnica do termopar ferramenta-peça em torneamento a seco com ferramenta de aço rápido em várias condições de usinagem. Os resultados mostram que pequenas variações nos níveis dos elementos residuais podem influenciar a temperatura da interface cavaco-ferramenta. As condições de corte (velocidade, profundidade e avanço) também exercem influência importante.

Palavras-chave: Elementos residuais; Aço de livre corte; Temperatura da interface cavaco-ferramenta; Torneamento.

INFLUENCE OF TRAMP ELEMENTS (Cr, Ni and Cu) ON THE CUTTING TEMPERATURE OF ABNT 12L14 STEELS IN DRY TURNING

Abstract

The present work aims to determine the influence of the tramp elements on the tool-chip interface temperature during turning of free-machining steels. Low and high levels of tramp elements (Cr, Ni and Cu) on the steels were considered for the analysis. The mean temperatures were determined by the tool-workpiece thermocouple technique in dry cutting with HSS tools under several cutting conditions. The results showed that small variation on the amount of the tramp elements can affect the chip-tool interface temperatures. The cutting conditions (cutting speed, feed rate and depth of cut) also have great influences.

Key words: Tramp elements; Machinability of free- machine steels; Tool-chip interface temperature; Turning

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Eng. Dr. em Eng. Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia – Brasil*

³ *Eng. Mestrando em Eng. Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia – Brasil*

⁴ *Prof. Dr. Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia – Brasil*

⁵ *Prof. Dr. Faculdade de Engenharia Química - Universidade Federal de Uberlândia – Brasil*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Aços de Corte Fácil e Elementos Químicos Residuais

Os processos de usinagem podem refletir em até 70% dos custos finais de fabricação de um componente usinado. Desta forma, pesquisas em busca do desenvolvimento de aços com usinabilidade melhorada ganharam grande importância.

Os aços de corte-fácil são aqueles projetados com o objetivo de obter máximo desempenho em operações de usinagem. Normalmente são adicionados enxofre (para formação de sulfetos de manganês) e chumbo. Estes são considerados aditivos de corte-fácil que promovem a melhoria da usinabilidade. De especial importância são os aços de corte-fácil baixo carbono que respondem pelo maior volume consumido dentro deste grupo de aço. Porém, seus usuários verificam grande variabilidade de usinabilidade entre lotes distintos, apesar de estarem dentro da especificação. As variações na composição química podem ser umas das principais responsáveis por estas variações de usinabilidade.

Os elementos residuais, em aços de corte-fácil, são definidos como aqueles elementos (Cu, Ni, Cr, Mo etc.) não intencionalmente adicionados durante o processo de fabricação de aços e que são de difícil remoção por meio de processos metalúrgicos simples.⁽¹⁾

Atualmente, muitas indústrias siderúrgicas produzem aços de corte-fácil a partir de sucata. A utilização da sucata, entretanto, requer um controle maior na análise da composição química, visto que os níveis de impurezas podem ser maiores. Com isso, aços de corte fácil podem ter sua usinabilidade comprometida devido ao acúmulo dos elementos residuais que foram agregados.

A literatura técnica e científica a respeito da influência dos elementos residuais na usinabilidade dos aços é escassa⁽²⁾ e este trabalho vem no sentido de contribuir para melhor esclarecimento.

1.2. Temperatura de Usinagem

Em usinagem grande parte da energia consumida é transformada em calor. Uma pequena porcentagem fica retida no sistema como energia elástica e outra parte está associada à geração de novas superfícies. Grande parte deste calor gerado é dissipada pelo cavaco, uma pequena porcentagem é dissipada pela peça e uma outra pelo meio ambiente. O restante vai para a ferramenta de corte. Apesar de esse restante representar apenas pequenos percentuais (8% a 10%), o aumento da temperatura associado com este calor é significativo, podendo chegar, em alguns casos, a 1.100°C.⁽³⁾

O estudo das condições de geração e transmissão de calor em usinagem em função de diferentes fatores de corte permite determinar as dimensões e as formas mais convenientes das ferramentas, além do melhor regime de trabalho e durabilidade das mesmas.⁽⁴⁾

O método do termopar ferramenta-peça é um dos mais usados atualmente para medição de temperatura em usinagem.⁽⁵⁾ Nele a temperatura de corte é relacionada com a força eletromotriz gerada pela junção quente entre a ferramenta e a peça durante a usinagem (Figura 1).

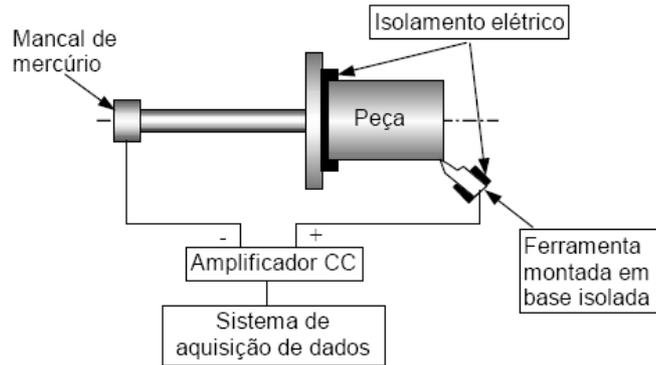


Figura 1. Esquema de medição da temperatura de corte com o método termopar ferramenta-peça.⁽⁶⁾

A técnica, apesar de simples, possui uma série de particularidades que devem ser levadas em conta durante sua utilização e montagem.⁽⁷⁾ Dentre elas pode-se citar: o par ferramenta-peça que deve ser sempre formado por materiais condutores de eletricidade – ferramentas de cerâmica e peças de materiais não metálicos não podem ser usados; a temperatura medida sempre representa uma média das temperaturas que ocorrem na região de corte – o contato da ferramenta com o cavaco não é estável, existem picos e vales nesta região, a junção quente pode ser considerada como um termopar finito com um número infinitamente grande de fontes interligadas num circuito em paralelo.⁽⁸⁾

Este trabalho investiga a influência dos elementos químicos residuais Cr, Ni e Cu na temperatura da interface cavaco-ferramenta durante a usinagem de aço de corte-fácil ABNT 12L14.

2 METODOLOGIA

2.1 Materiais

Foram produzidas nove corridas (ou lotes) de materiais com composições químicas (Tabela 1) previamente definidas (dentro dos limites da capacidade do processo de fabricação). Neste planejamento tem-se a variação a dois níveis (Tabela 2) dos seguintes fatores: teor de níquel, teor de cromo e teor de cobre, todos medidos em percentuais em peso. A corrida H constitui material com elementos residuais em nível intermediário sendo usada para calibração do termopar ferramenta-peça.

Como o processo de fabricação dos aços em aciaria não permite um controle pontual de sua composição química, o nível dos elementos teve que ser fixado em faixas dentro da capacidade do processo conforme definido a seguir:

- %Cr: nível -1 = faixa de 0,08/0,13
nível +1 = faixa de 0,15/0,20
nível 0 = faixa de 0,12/0,18
- %Ni: nível -1 = faixa de 0,08/0,13
nível +1 = faixa de 0,17/0,22
nível 0 = faixa de 0,12/0,18
- %Cu: nível -1 = faixa de 0,10/0,15
nível +1 = faixa de 0,25/0,30
nível +0 = faixa de 0,18/0,23

Tabela 1 - Composição química das corridas ensaiadas.

Código	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Cu	% Mo	% Al	% Pb	% N2
A	0.090	0.03	1.24	0.046	0.273	0.15	0.08	0.26	0.020	0.001	0.280	0.0079
B	0.140	0.03	1.20	0.045	0.280	0.09	0.17	0.18	0.020	0.001	0.270	0.0084
C	0.072	0.02	1.21	0.044	0.284	0.09	0.17	0.25	0.020	0.001	0.250	0.0080
D	0.085	0.02	1.25	0.047	0.272	0.10	0.08	0.11	0.010	0.001	0.240	0.0070
E	0.077	0.02	1.24	0.050	0.277	0.16	0.09	0.08	0.010	0.001	0.250	0.0080
F	0.084	0.02	1.23	0.048	0.297	0.10	0.08	0.27	0.030	0.001	0.230	0.0086
G	0.078	0.03	1.25	0.051	0.273	0.18	0.17	0.17	0.030	0.001	0.260	0.0072
H	0.077	0.02	1.22	0.045	0.295	0.13	0.12	0.21	0.030	0.001	0.240	0.0086
I	0.078	0.03	1.25	0.052	0.279	0.19	0.18	0.26	0.040	0.001	0.250	0.0083

Tabela 2 - Matriz de experimentos para os fatores cromo, níquel e cobre.

Código	Valor codificado		
	Cr	Ni	Cu
I	1	1	1
G	1	1	-1
A	1	-1	1
E	1	-1	-1
C	-1	1	1
B	-1	1	-1
F	-1	-1	1
D	-1	-1	-1
H	0	0	0

2.2 Condições de Usinagem

As condições de usinagem usadas são aquelas descritas na Tabela 3. Os ensaios foram realizados no torno Revolution RV-220 com rotação máxima de 2500 rpm. Todos os ensaios foram realizados a seco.

Tabela 3 - Valores dos níveis dos parâmetros de corte usados nos testes.

Fatores	Nível	Valor	Valor codificado
Velocidade de corte [v_c] (m/min)	Baixo	35	-1
	Alto	88	1
Avanço [f] (mm/rot.)	Baixo	0,138	-1
	Alto	0,242	1
Profundidade de corte [a_p] (mm)	Baixo	1	-1
	Alto	2	1

Estes ensaios foram feitos com ferramentas de aço-rápido com 10% de cobalto cuja composição química é apresentada na Tabela 4. A geometria destas ferramentas está mostrada na Tabela 5.

Tabela 4 - Composição química das ferramentas de aço-rápido.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Sn
1,22	0,30	0,32	0,016	0,017	4,06	4,90	0,12	<0,005	8,40	0,06	<0,01	<0,005	2,96	6,22	0,008
Percentuais em peso.															

Tabela 5 - Geometria das ferramentas de aço-rápido usadas nos ensaios de temperatura de usinagem.

Especificação	AISI M3:2 C
Ângulo de saída (γ_o)	6°
Ângulo de posição (χ_r)	75°
Ângulo de inclinação (λ_s)	0°
Ângulo de ponta (ϵ_r)	90°
Ângulo de folga (α_o)	8°
Raio de ponta	sem raio de ponta

2.3 Curva de Calibração

A calibração do termopar ferramenta-peça foi apresentada em outro trabalho⁽⁹⁾. Ela consistiu no aquecimento da junta soldada de material da peça e da ferramenta em forno de resistência. A temperatura do forno e a força eletromotriz da junta soldada foram registradas e com isso construiu-se a curva de calibração – Figura 2. Neste trabalho foi feita a calibração com o material H apenas, em função do fato do material H possuir todos os elementos residuais em estudo no nível médio.

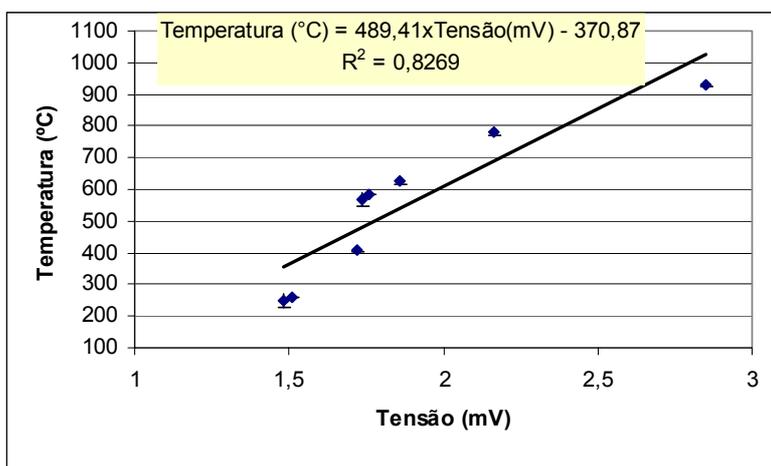


Figura 2 - Curva de calibração do termopar ferramenta peça (material H).

2.4 Planejamento de Experimentos

Usou-se um planejamento experimental 2^6 , sendo que os fatores analisados foram: percentual de cromo, percentual de níquel, percentual de cobre, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Foi realizada uma réplica totalizando 128 ensaios.

2 RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de temperatura de corte – fatores e interações – estão mostrados na Tabela 6. As linhas em vermelho representam os efeitos e as interações significativas.

Tabela 6 - Estimativa dos efeitos para temperatura de usinagem.

Fator	Efeito (°C)	t (42)	p	Erro padrão (°C)
Média	534,5	104,4440	0,0000	± 5,12
Cr	109,3	10,6816	0,0000	± 10,24
Ni	-72,5	-7,0865	0,0000	± 10,24
Cu	-110,8	-108247	0,0000	± 10,24
v_c	122,9	12,0115	0,0000	± 10,24
f	28,9	2,8199	0,0073	± 10,24
a _p	8,6	0,8558	0,3970	± 10,24
Cr x Ni	37,4	3,6578	0,0007	± 10,24
Cr x Cu	21,8	2,1260	0,0394	± 10,24
Cr x v _c	6,1	0,5912	0,5575	± 10,24
Cr x f	11,6	1,1331	0,2636	± 10,24
Cr x a _p	0,2	0,0174	0,9861	± 10,24
Ni x Cu	85,3	8,3365	0,0000	± 10,24
Ni x v _c	-11,0	-1,0707	0,2904	± 10,24
Ni x a _p	-6,3	-0,6202	0,5384	± 10,24
Ni x f	4,6	0,4449	0,6587	± 10,24
Cu x v _c	4,0	0,3936	0,6959	± 10,24
Cu x f	-4,4	-0,4269	0,6716	± 10,24
Cu x a_p	21,2	2,0700	0,0446	± 10,24
v _c x f	9,1	0,8851	0,3811	± 10,24
v _c x a _p	3,4	0,3297	0,7433	± 10,24
f x a _p	-13,5	-1,3141	0,1960	± 10,24
Desvio padrão = 124,1956 (°C) ²				

A velocidade de corte é o mais significativo dos efeitos, sendo que a mudança do nível -1 para o nível +1 provoca um aumento médio de 122,9°C na temperatura de usinagem (Figura 3). A velocidade de corte tem relação direta com a taxa de deformação desenvolvida nos processos de usinagem. Maiores velocidades de corte implicam em maiores taxas de deformação e maior geração de calor. Maior calor gerado implica em aumento da temperatura de usinagem.

O aumento do avanço também provoca aumento significativo da temperatura de usinagem (média de 28,9°C) – Figura 4. No entanto, sua influência é menor que a velocidade de corte. Isto porque o avanço aumenta a velocidade de deformação o que provoca um aumento de temperatura, porém ele aumenta também a área da seção de corte, diminuindo a densidade de energia bem como a tendência de aumento de temperatura.⁽⁴⁾

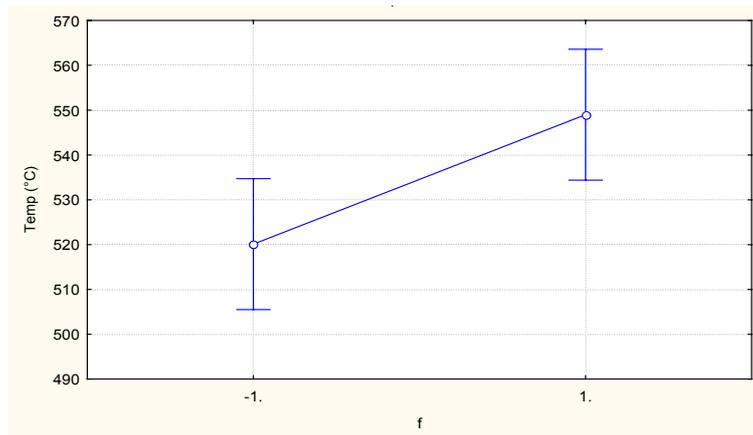


Figura 3 - Efeito da velocidade de corte sobre a temperatura de usinagem.

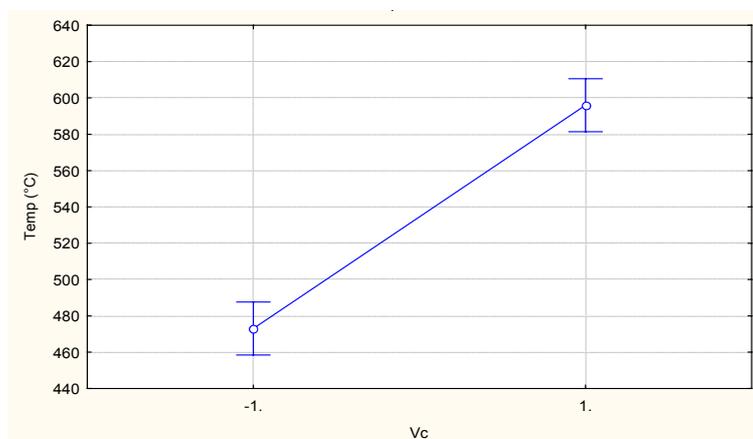


Figura 4 - Efeito médio do avanço sobre a temperatura de usinagem.

O aumento do nível de cobre de -1 para +1 reduz a temperatura de usinagem, em média, em 110,8°C (Figura 5). É o mais significativo efeito dos elementos residuais. Como a temperatura de usinagem é medida indiretamente pela força eletromotriz entre a junção quente (zona de fluxo) e a junção fria (água a 0°C), supõe-se que o cobre teria um efeito marcante sobre as propriedades de condutividade elétrica dos aços (mesmo em pequenas quantidades). Este efeito explicaria porque o aumento do teor de cobre diminui a temperatura de usinagem. O que pode estar ocorrendo é o aumento da condutividade térmica da junta, ocasionando uma diminuição do potencial elétrico.

O mesmo raciocínio se aplica ao efeito do níquel (Figura 6). Porém, o efeito do cromo é contrário aos outros dois (Figura 7). O cromo é um pobre condutor de eletricidade, portando o seu efeito sobre a condutividade do aço seria menor. Dessa forma o efeito do cromo apresentado teria uma relação mais restrita com a temperatura efetiva de usinagem. Sendo assim, o cromo aumentaria a temperatura de usinagem por causa de seu efeito de aumentar a resistência da matriz pelo mecanismo de solução sólida. Este aumento de resistência faz com que a energia necessária para usinar o material também seja maior acarretando um aumento de temperatura.

Os efeitos significativos das interações dos níveis dos elementos residuais (Figuras 8 a 10) seriam resultados da interação cruzada destes efeitos sobre a condutividade elétrica do aço.

A interação entre o cobre e a profundidade de corte também se mostrou significativa (Figura 11). Este fato poderia ser explicado por uma distribuição não uniforme do cobre ao longo da seção transversal o que provocaria gradiente de condutividade. Em processos de lingotamento contínuo o gradiente transversal de concentração é um fenômeno comum em função da solidificação se dar da periferia para o centro do lingote.

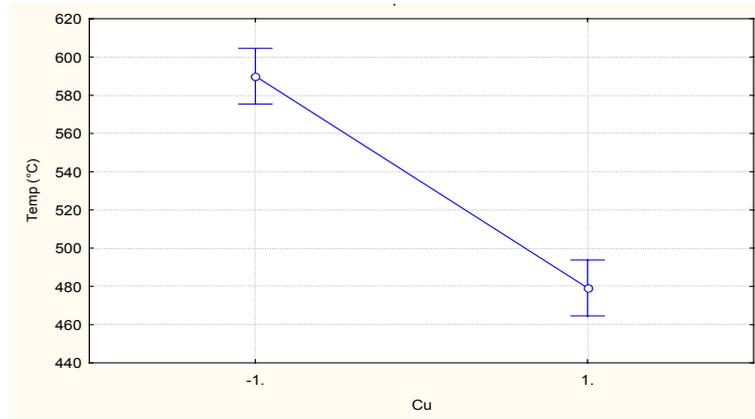


Figura 5 - Efeito médio do cobre sobre a temperatura de usinagem.

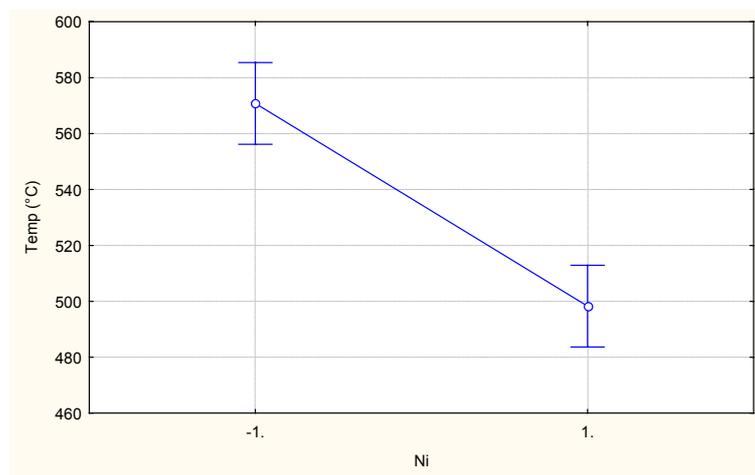


Figura 6 - Efeito médio do níquel sobre a temperatura de usinagem.

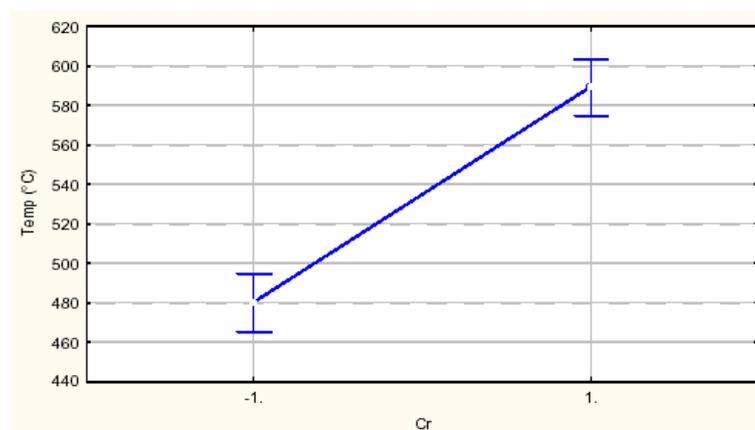


Figura 7 - Efeito do cromo sobre a temperatura de usinagem.

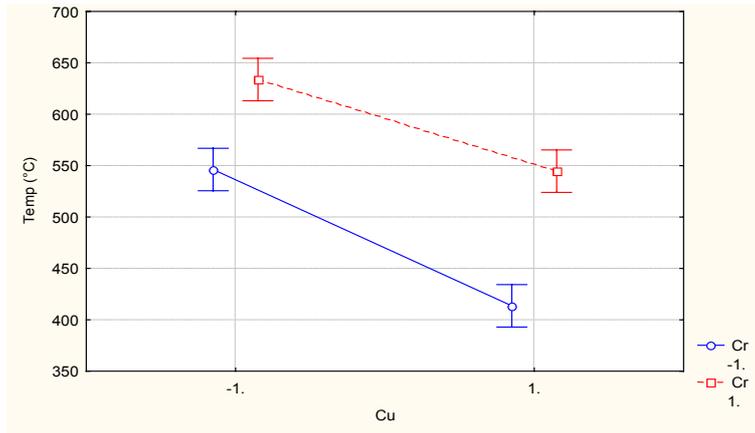


Figura 8 - Efeito médio da interação entre o cromo e o cobre sobre a temperatura de usinagem.

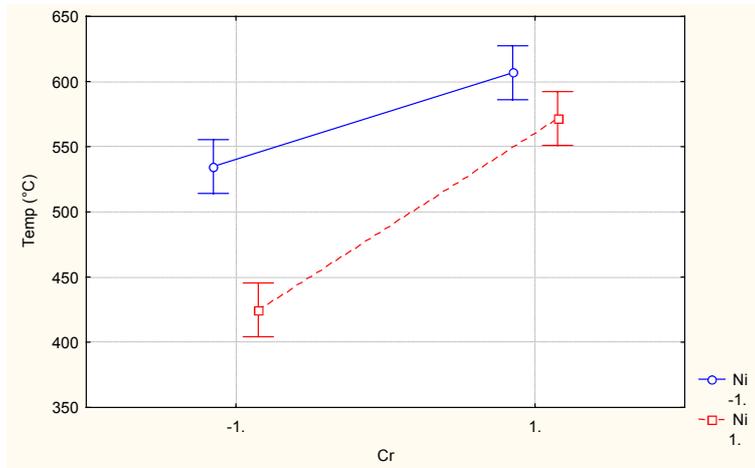


Figura 9 - Efeito médio da interação entre o níquel e o cromo sobre a temperatura de usinagem.

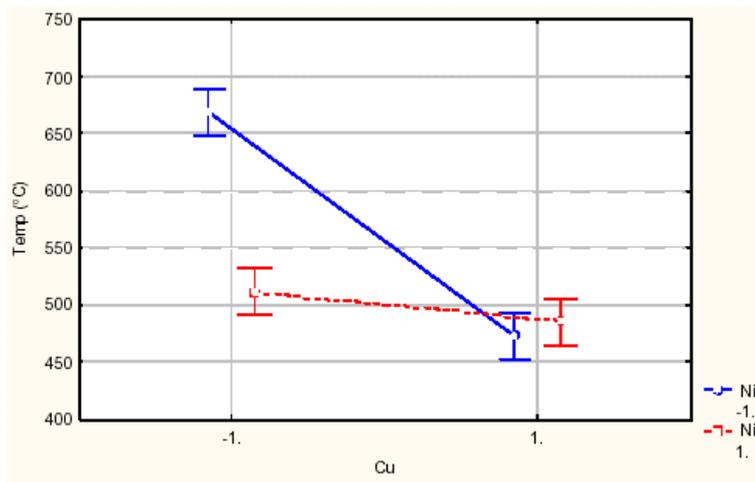


Figura 10 - Efeito médio da interação entre o níquel e o cobre sobre a temperatura de usinagem.

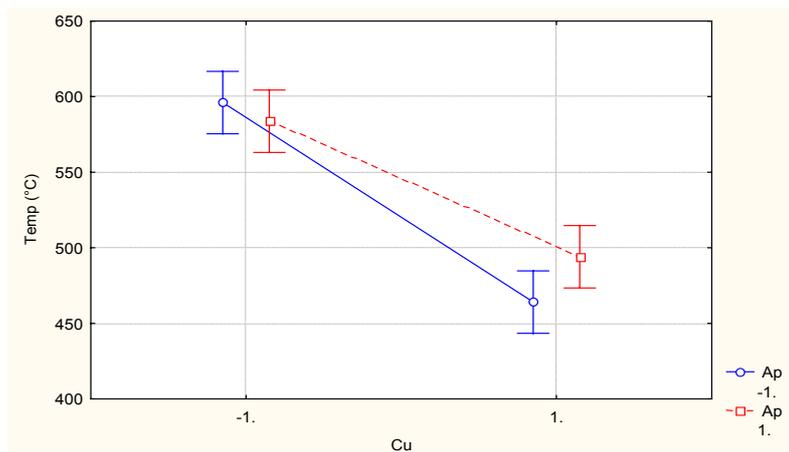


Figura 11 - Efeito médio do cobre e a profundidade de corte sobre a temperatura de usinagem.

3 CONCLUSÕES

Os elementos residuais têm efeito conjugado maior sobre a temperatura do que as condições de corte. No entanto, estes efeitos podem estar mascarados pela curva de calibração. A velocidade de corte aumenta fortemente a temperatura de usinagem. O avanço também tem efeito importante, embora bem menor que o da temperatura.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e ao CNPq pela concessão de bolsas de estudos, ao Fundo Verde-Amarelo do CNPq através do processo N°. 400607/2004-2, à FAPEMIG e ao IFM pelo suporte financeiro, ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) pela estrutura e equipamentos. Agradecem também à empresa Aços Villares S.A pelo fornecimento dos corpos de prova.

REFERÊNCIAS

- 1 Herman, J,C. Leroy, V. "Influence of Residual Elements on Stell Processing and Mechanical Properties" 38TH MWSP CONF. PROC., ISS, VOL. XXXIV, 1997 pp 545.
- 2 Evangelista Luiz, N. Usinabilidade do Aço de Corte Fácil Baixo Carbono ao Chumbo SAE 12L14 com Diferentes Níveis de Elementos Químicos Residuais (Cromo, Níquel e Cobre). Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2007.
- 3 Machado, A, R; Silva, M, B. "Usinagem dos Metais". Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Versão 7. Agosto de 2004.
- 4 Ferraresi, D. "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1977, 751 págs.
- 5 Longbottom, J. M.; Lanham, J. D. Cutting temperature measurement while machining – a review. Aircraft Engineering an Aerospace Technology: An Intenational Journal. 77/2 (2005) 122-130.
- 6 Carvalho, S. R. Determinação do campo de temperatura em ferramentas de corte durante um processo de usinagem por torneamento. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade De Engenharia Mecânica. 2005.

- 7 Melo, A. C. A. “Estimação da Temperatura de Corte Utilizando Problemas Inversos em Condução de Calor”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1998, Uberlândia, MG.
- 8 Qureshi, A. J., Koenigsberger, F. An investigation into the problem of measuring the temperature distribution on the rake face of a cutting tool, *Annals of the CIRP*, vol. XIV, 1966, p. 189-199.
- 9 Naves, V. T. G.; Evangelista Luiz, N.; Machado, A. R.; Dantas, N. O. “Calibração de um Sistema Termopar Ferramenta-peça para Medição de Temperatura de Usinagem”. 16º POSMEC – Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica. Uberlândia. 2006.