

ESTUDO DO EFEITO DOS ELEMENTOS RESIDUAIS (Cr, Ni e Cu) NA USINABILIDADE DO AÇO DE CORTE FÁCIL ABNT 12L14 USANDO A TÉCNICA DE PROJETO DE EXPERIMENTOS (DOE)

João Roberto Ferreira

Marcos César de Almeida

Universidade Federal de Itajubá – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão

jorofe@unifei.edu.br

Nelis Evangelista Luiz

Álison Rocha Machado

Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica

alisonm@mecanica.ufu.br

Denise Corrêa de Oliveira

Marcelo Francisco Pimentel

Aços Villares – SIDENOR

denise.oliveira@villares.com.br

***Resumo.** Os aços de corte fácil são conhecidos por terem uma boa usinabilidade devido à facilidade de arranque de cavacos, garantidos pela presença na composição química de altos teores de enxofre, manganês e chumbo. É importante ressaltar que existem outros fatores que influenciam a usinabilidade destes aços como os elementos residuais: cromo (Cr), níquel (Ni) e cobre (Cu). Assim, este trabalho faz uma investigação sobre a influência que estes elementos residuais exercem na usinabilidade do aço ABNT 12L14, através de ensaios de curta duração em torneamento externo longitudinal utilizando ferramenta de metal duro. Os ensaios experimentais mostraram que os elementos residuais têm uma influência significativa na usinabilidade deste material considerando-se a vida da ferramenta. Os ensaios foram planejados segundo a técnica de projeto de experimentos (DOE) e os resultados analisados utilizando-se fundamentos estatísticos.*

***Palavras-chave:** Usinabilidade, Aço de corte fácil ABNT 12L14, Elementos residuais Cr, Ni e Cu, DOE.*

1. INTRODUÇÃO

No setor metal-mecânico a usinagem é sem dúvida um dos processos de fabricação mais utilizados. Assim, o segmento de mercado de usinagem é extremamente importante para os fornecedores de aços, não somente pelos altos volumes de matérias-primas produzidas, mas também pelos altos custos de operação envolvidos. Com o desenvolvimento acelerado das tecnologias das máquinas e ferramentas, aliado às exigências cada vez mais rígidas do mercado em termos de desempenho operacional, o fornecimento de matérias-primas adequadas torna-se um elo fundamental para manter a competitividade desta cadeia produtiva. Portanto, há uma contínua preocupação pelas siderúrgicas em disponibilizar aços que apresentem um desempenho diferenciado na usinabilidade em relação aos seus similares, sem que haja alterações nas propriedades requeridas para sua aplicação [1].

Os aços de corte fácil são conhecidos por terem uma boa usinabilidade devido à facilidade de arranque de cavacos. A característica de boa usinabilidade é obtida, essencialmente, através da

especificação de composição química de altos teores de enxofre e de outros elementos como, por exemplo, o chumbo. É importante ressaltar que existem outros parâmetros (fatores) que influenciam na usinabilidade dos materiais, como a presença dos elementos residuais cromo (Cr), níquel (Ni) e cobre (Cu), podendo haver uma diferença significativa dos percentuais desses elementos residuais que afetam diretamente o comportamento da usinabilidade do aço ABNT 12L14. Os elementos residuais estão sempre presentes nos aços, ainda que seu teor possa variar em função do processo produtivo [2].

Em função das necessidades da indústria metal-mecânica usinar peças com formatos cada vez mais complexos e sendo a operação de usinagem um dos mais importantes fatores no cálculo do custo final da peça, o desenvolvimento de aços com usinabilidade melhorada torna-se cada vez mais pertinente. Portanto, com este trabalho busca-se investigar a influência que os elementos residuais exercem sobre a usinabilidade do aço de corte fácil ABNT 12L14, identificar uma faixa de composição química melhorada para esses elementos (Cr, Ni e Cu) e fornecer subsídios aos fabricantes destes aços para prestar apoio técnico aos clientes além de criar bases para etapas futuras no desenvolvimento de aços de usinabilidade melhorada. Os ensaios de vida foram realizados em operação de torneamento cilíndrico externo com ferramenta de metal duro.

2. USINABILIDADE DOS MATERIAIS

Os primeiros estudos sobre usinabilidade foram publicados por Taylor em 1906 em ensaios de longa duração, onde a quantidade de material usinado era muito grande. Posteriormente muitos métodos foram propostos e testados com o objetivo de simplificar e reduzir custos dos ensaios e aumentar a possibilidade do emprego dos testes pelas empresas [3].

Desde então, a busca constante para encontrar novas tecnologias para aumentar a usinabilidade dos aços vem ganhando espaço no setor metal-mecânico. Essas tecnologias vão desde o controle apurado do processo de fabricação/transformação do aço, passando pela adição de elementos químicos que promovam a fragilização do cavaco e/ou lubrificação da ferramenta de corte até mesmo a engenharia ou modificação das inclusões de óxidos resultantes do processo de desoxidação [1].

Existem várias definições para o termo “Usinabilidade”. Segundo Datsko⁽⁴⁾ e Ferraresi⁽⁵⁾, a usinabilidade é uma grandeza tecnológica comparativa que expressa por meio de um valor numérico (índice ou porcentagem) a capacidade que um material tem de ser usinado sob determinadas condições de corte com maior ou menor facilidade. O valor numérico que a expressa é chamado de “Índice de Usinabilidade”. Este índice expressa a usinabilidade de um determinado material comparado com outro tomado como padrão

A usinabilidade é uma propriedade que depende da interação entre o processo de fabricação e as características do material da peça. No caso dos aços, a composição química, a microestrutura e os tratamentos térmicos e mecânicos têm um efeito acentuado na usinabilidade dessa classe de materiais metálicos [5].

O tema “Usinabilidade” é muito complexo e demanda uma série de discussões visto que não podem ser comparadas as demais propriedades mecânicas dos materiais. O termo usinabilidade é muito amplo e o índice de usinabilidade expressa uma situação muito particular de um par ferramenta-peça sob determinadas condições de usinagem e por outro lado é de grande interesse para os fabricantes e consumidores dos materiais e das ferramentas. A literatura americana aponta os chamados índices comerciais de usinabilidade, onde o aço AISI B1112 é tomado como padrão, ao qual é atribuído o índice 100 de usinabilidade segundo Ferraresi⁽⁵⁾ citado por Diniz⁽⁶⁾.

A vida da ferramenta é o critério de maior importância na caracterização da usinabilidade de um material. A vida “T” é o tempo que uma ferramenta resiste do início do corte até sua utilização total. A dependência entre a vida da ferramenta e a velocidade de corte obedece a uma curva exponencial, em um diagrama bi-logarítmico é representada por uma reta. Os fatores mais importantes para o aparecimento do desgaste na ferramenta são as partículas duras e abrasivas da peça, bem como a resistência da matriz, além do material da ferramenta empregado [5,6].

Considerando como critério a vida da ferramenta podemos realizar dois tipos de ensaios: ensaios de longa e curta duração. Os ensaios de longa duração são realizados com o objetivo de levantar curvas de vida da ferramenta e fatores que influem na sua forma, e assim, analisar as melhores condições econômicas de usinagem. Esse tipo de ensaio tem como desvantagem o elevado consumo de material e um tempo relativamente longo para sua execução. Geralmente os ensaios são realizados em condições normais de usinagem, onde o desgaste é verificado periodicamente até a dimensão previamente definida como fim de vida da ferramenta.

Os ensaios de curta duração são realizados em condições normais ou em condições forçadas de usinagem. Em condições forçadas, o ensaio consiste de usinagem em altas velocidades de corte onde o desgaste da ferramenta é acelerado; o tempo de vida da ferramenta é reduzido, e o volume de material usinado também. Esta é a grande vantagem deste método de ensaio, principalmente quando se trata de avaliar a usinabilidade relativa de vários materiais, com a mesma ferramenta de corte [5]. Nos ensaios de curta duração em que ferramentas são utilizadas até sua destruição/queima, utiliza-se geralmente ferramentas de aço rápido. Entretanto, neste trabalho apresenta-se os resultados da usinabilidade do aço ABNT 12L14 trabalhando com ferramenta de metal duro, no sentido de buscar uma possível alternativa para a indústria metal-mecânica em usar estes aços em maiores velocidades de corte em máquinas CNC.

2.1 Aços de Corte Fácil e Sua Usinabilidade

Aços de corte fácil podem ser definidos como sendo aqueles aços especialmente desenvolvidos para oferecer os melhores resultados mediante operações com arranque de cavacos. As demais características mecânicas como ductilidade, resistência à tração, resposta ao tratamento térmico e outras são consideradas como secundárias para este tipo de aço. Esse tipo de aço possui baixo teor de carbono e alto teor de enxofre, além de um teor de manganês que garanta uma relação manganês-enxofre propícia para a formação de sulfetos de manganês, em vez de sulfetos de ferro. Os aços de corte fácil são caracterizados por boa usinabilidade e por gerarem cavacos facilmente quebráveis [1,7].

Importantes pesquisas metalúrgicas nos últimos anos estão sendo realizadas com o objetivo de aumentar o desempenho da usinagem (usinabilidade) dos aços [2, 7]. Através dessas pesquisas surgiram os aços de usinabilidade melhorada que tem como objetivo cumprir as características mecânicas de emprego e também aumentar sua aptidão a usinagem por razões econômicas. As técnicas no desenvolvimento dos aços de usinabilidade melhorada variam desde um controle apurado do processo de fabricação/transformação do aço, passando pela adição de elementos químicos que promovam a fragilização do cavaco e/ou lubrificação da ferramenta de corte e até mesmo a engenharia ou modificação das inclusões de óxidos resultantes do processo de desoxidação [1]. Nos aços de corte fácil também existe uma investigação e desenvolvimento para incrementar a sua resposta à usinagem. Além das soluções citadas anteriormente para melhorar a usinabilidade dos aços, existem as soluções clássicas, como o uso de enxofre ou do chumbo e soluções através de metalurgia secundária, como adição de Te e Se para controle das inclusões de sulfetos de manganês; ou o tratamento ao cálcio ou controle de alumínio para se ter um total controle da morfologia de inclusões [7].

Até pouco tempo os aços de corte fácil eram amplamente aplicados na produção de peças em tornos automáticos multifuso em baixas velocidades de corte [7]. Eles têm grande aplicação na fabricação de componentes para bombas, buchas, pistões, componentes de aparelhos domésticos, etc [8]. Entre os tipos de aços de corte fácil, o aço ABNT/SAE 12L14 destaca-se por possuir uma maior demanda de produção nas siderúrgicas.

A usinabilidade dos aços de corte fácil está relacionada diretamente à formação de sulfetos e inclusões metálicas. A formação dos sulfetos apropriados é ocasionada pelo controle do oxigênio ativo durante o processo de fabricação, pela adição de enxofre, telúrio e selênio. As inclusões metálicas são formadas pela adição dos elementos chumbo e bismuto. A adição de alguns aditivos como o boro e o tratamento com o cálcio contribuem para a melhora da usinabilidade dos aços de corte fácil [9, 10].

É importante ressaltar que existem outros parâmetros (fatores) que influenciam na usinabilidade dos materiais, como a presença dos elementos residuais de cromo (Cr), níquel (Ni) e cobre (Cu), podendo haver uma diferença significativa dos percentuais desses elementos residuais que afetam diretamente o comportamento da usinabilidade do aço ABNT 12L14.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Materiais

O material dos corpos de provas utilizados nos ensaios foi o aço de corte fácil ABNT 12L14 fornecido pela Empresa Aços Villares S.A. Este material foi fornecido em nove corridas (A, B, C, ... I) e com as composições químicas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Composições químicas das corridas.

Corrida	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Cu	% Al	% Mo	% Pb	% N2
A	0,090	0,030	1,240	0,046	0,273	0,150	0,080	0,260	0,001	0,020	0,280	0,0079
B	0,140	0,030	1,200	0,045	0,280	0,090	0,170	0,180	0,001	0,030	0,270	0,0084
C	0,072	0,020	1,210	0,044	0,284	0,090	0,170	0,250	0,001	0,010	0,250	0,008
D	0,085	0,020	1,250	0,047	0,272	0,100	0,080	0,110	0,001	0,010	0,240	0,0070
E	0,077	0,020	1,240	0,050	0,277	0,160	0,090	0,080	0,001	0,030	0,250	0,0080
F	0,084	0,020	1,230	0,048	0,297	0,100	0,080	0,270	0,001	0,020	0,230	0,0086
G	0,078	0,030	1,250	0,051	0,273	0,180	0,170	0,170	0,001	0,030	0,260	0,0072
H	0,077	0,020	1,220	0,045	0,295	0,130	0,120	0,210	0,001	0,040	0,240	0,0086
I	0,078	0,030	1,250	0,052	0,279	0,190	0,180	0,260	0,001	0,030	0,250	0,0083

Como o objeto de estudo é fazer uma análise dos elementos residuais, na Tabela 2 é mostrada a variação da faixa percentual dos elementos residuais (em função do processo siderúrgico) e a dureza do aço ABNT 12L14 para cada corrida. Os corpos de prova para realizar os ensaios foram retirados das corridas com as dimensões $\Phi 50 \times 295$ mm, sendo identificados de acordo com sua origem.

Tabela 2. Teores dos elementos residuais e dureza do material.

	Cr	Ni	Cu	Corrida	Cr	Ni	Cu	Dureza Brinell
1a	0,15/0,20	0,08/0,13	0,25/0,30	A	0,15	0,08	0,26	142
2a	0,08/0,13	0,17/0,22	0,10/0,15	B	0,09	0,17	0,18	136
3a	0,08/0,13	0,17/0,22	0,25/0,30	C	0,09	0,17	0,25	123
4a	0,08/0,13	0,08/0,13	0,10/0,15	D	0,1	0,08	0,11	133
5a	0,15/0,20	0,08/0,13	0,10/0,15	E	0,16	0,09	0,08	144
6a	0,08/0,13	0,08/0,13	0,25/0,30	F	0,1	0,08	0,27	127
7a	0,15/0,20	0,17/0,22	0,10/0,15	G	0,18	0,17	0,17	129
8a	0,12/0,18	0,12/0,18	0,18/0,23	H	0,13	0,12	0,21	127
9a	0,15/0,20	0,17/0,22	0,25/0,30	I	0,19	0,18	0,26	145

3.2 Máquina e Ferramenta

Os experimentos foram realizados em um torno CNC da marca NARDINI, modelo LOGIC 175. Ele possui as seguintes características: comando numérico CNC MCS Série 500, potência de 7,5 CV, rotação máxima do eixo árvore de 4000 rpm, torre porta-ferramenta com 8 posições, diâmetro máximo 100 mm e comprimento máximo torneável de 300 mm entre pontas.

As ferramentas de corte utilizadas neste trabalho metal duro classe ISO P35 revestido com três coberturas (Ti(C,N), Al₂O₃, TiN), (GC 4035 Sandvik) na geometria ISO SNMG 09 03 04 – PM e o suporte designação ISO DSBNL 1616H 09.

3.3 Metodologia

Para a determinação das condições de corte, velocidade, avanço e profundidade de corte para a realização dos ensaios de usinabilidade baseou-se na Norma ISO 3685⁽¹⁾. Adotou-se como

velocidade de corte inicial $V_c = 450$ m/min, avanço $f = 0,1$ mm/v e profundidade $a_p = 1$ mm. Depois variou apenas a velocidade de corte para cima (500 m/min) e para baixo (400 m/min). Como critério de fim de vida da ferramenta foi estabelecido o desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmax} = 0,3$ mm) conforme determinado pela norma.

O planejamento dos experimentos partiu de um *Baseline* mostrado na Tabela 2, contendo a seguinte configuração: 3 fatores (%Cr, %Ni e %Cu) em dois níveis (-1 e +1) e um *center point*. O número de experimentos para cada ensaio foi determinado segundo a Equação 1, utilizando um planejamento fatorial completo [12]:

$$\text{Número de experimentos } N = (2 \text{ níveis})^{(3 \text{ fatores})} = 8 \text{ experimentos} \quad (1)$$

Então, utilizando um projeto fatorial completo, um ponto central e uma réplica obteve-se um total de 18 experimentos aleatorizados para cada ensaio. O ponto central foi identificado como sendo a corrida H com as seguintes faixas dos elementos residuais: %Cr = 0,12/0,18; %Ni = 0,12/0,18 e %Cu = 0,18/0,23. Os experimentos foram planejados e analisados com auxílio do software Minitab®.

Tabela 3. Planilha com planejamento fatorial completo e resultados dos experimentos.

Ordem	Corrida	% Cr	%Ni	% Cu	T [min]	T [min]	T [min]
					(400 m/min)	(450 m/min)	(500 m/min)
1	G	1	1	-1	21,04	18,68	10,35
2	B	-1	1	-1	21,60	17,67	12,51
3	D	-1	-1	-1	17,24	11,99	9,06
4	F	-1	-1	1	25,36	17,84	13,80
5	G	1	1	-1	26,10	19,89	11,82
6	F	-1	-1	1	27,46	20,07	14,55
7	D	-1	-1	-1	18,34	12,76	8,37
8	E	1	-1	-1	24,58	18,68	13,80
9	B	-1	1	-1	28,33	21,55	11,10
10	H	0	0	0	18,34	14,89	12,51
11	C	-1	1	1	28,08	19,39	11,82
12	I	1	1	1	21,06	17,76	11,82
13	C	-1	1	1	26,80	20,72	13,05
14	A	1	-1	1	38,62	20,07	13,80
15	A	1	-1	1	35,10	20,72	13,17
16	H	0	0	0	17,56	13,50	14,55
17	I	1	1	1	26,80	15,54	10,35
18	E	1	-1	-1	21,06	15,54	11,82

4. RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta a planilha de contraste gerada com as respectivas corridas dos materiais e a ordem aleatorizada dos ensaios, com correspondentes respostas de vida da ferramenta de metal duro para os 18 experimentos em cada velocidade de corte ensaiada, $V_c = 400, 450$ e 500 m/min. Em função destes resultados, em seguida será efetuada uma análise estatística sobre o efeito dos elementos residuais do aço ABNT 12L14 e de suas interações sobre a vida da ferramenta.

4.1 – Análise Estatística para $V_c 400$ m/min

Na Tabela 4 é mostrado os coeficientes do modelo de vida e valores de P. Pode-se inferir que o elemento %Cu, as interações de 2ª ordem entre os elementos %Cr%Ni, %Ni%Cu e o ponto central

são significativos para a usinabilidade do aço ABNT 12L14, uma vez que o valor $P < 0,05$ (nível de significância estatística). Dessa maneira pode-se montar a equação (2) para a vida (T):

$$T = 25,473 + (1,322\%Cr) + (-0,497\%Ni) + (3,187\%Cu) + (-2,548.\%Cr\%Ni) + (0,413\%Cr\%Cu) + (-2,478.\%Ni.\%Cu) \quad (2)$$

Sabendo-se que a resposta para a vida da ferramenta T é do tipo “quanto maior melhor” e respeitando o princípio da hierarquia e atribuindo os níveis (+1)%Cr, (-1)%Ni e (+1)%Cu, encontra-se uma vida $T = 35,918$ min. Para a $V_c = 400$ m/min, os níveis dos elementos residuais nas faixas: (+1)%Cr: 0,15-0,20; (-1)%Ni: 0,08-0,13; (+1)%Cu: 0,25-0,30 da corrida (A) apresentaram melhor usinabilidade.

Complementando a análise fatorial, a Tabela 4 apresenta a Análise de Variância para o experimento. Nota-se que as interações de 2ª ordem e a curvatura foram significativas, uma vez que os valores de P são inferiores ao nível de significância de 5%. Isto indica que os níveis utilizados dos fatores (Cr, Ni e Cu) estão em uma região otimizada.

Tabela 4. Análise fatorial (ANOVA) com ponto central – V_c 400 m/min.

TERMO	EFEITO	COEF.	ERRO COEF.	T	P
Constante		25,473	0,6884	37,00	0,000
% Cr	2,644	1,322	0,6884	1,92	0,087
% Ni	-0,994	-0,497	0,6884	-0,72	0,489
% Cu	6,374	3,187	0,6884	4,63	0,001
%Cr * % Ni	-5,096	-2,548	0,6884	-3,70	0,005
%Cr * % Cu	0,826	0,413	0,6884	0,60	0,563
%Ni * % Cu	-4,956	-2,478	0,6884	-3,60	0,006
%Cr*%Ni*%Cu	-1,884	-0,942	0,6884	-1,37	0,204
Ponto central		-7,523	2,0653	-3,64	0,005

A Figura 1 mostra o efeito principal dos elementos residuais na usinabilidade do aço ABNT 12L14. Os melhores níveis definidos para os elementos residuais são: (+1)%Cr, (-1)%Ni e (+1)%Cu. Por essa análise pode-se dizer que a composição química da corrida (A) apresentou melhor usinabilidade na velocidade de 400 m/min.

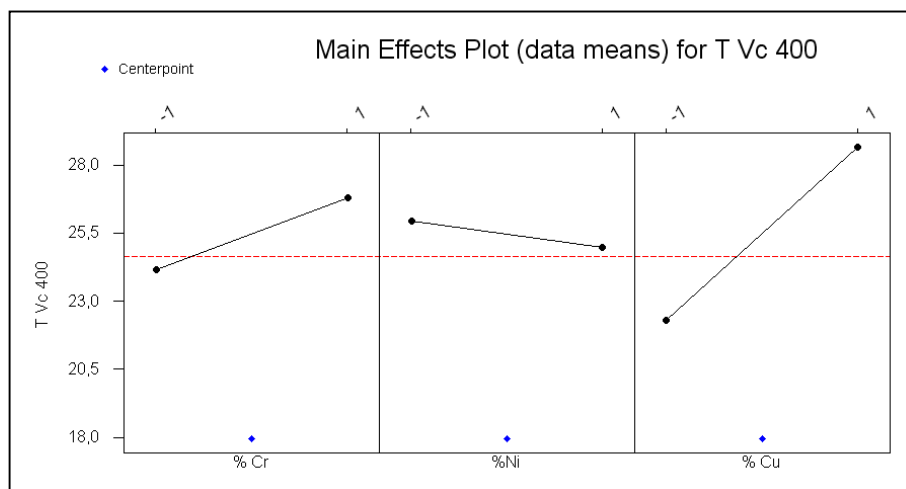


Figura 1. Efeitos principais dos elementos residuais na vida – V_c 400 m/min.

4.2. Análise Estatística para Vc 500 m/min

Observando-se os valores de P na Tabela 5, pode-se dizer que o elemento %Cu e as interações de 2ª ordem entre os elementos %Cr%Ni, %Cr%Cu e %Ni%Cu foram significativos para a usinabilidade do aço ABNT 12L14, uma vez que $P < 0,05$ (nível de significância). Dessa maneira pode-se montar a equação 3, que é o modelo para a vida da ferramenta (T).

$$T = 11,9494 + (0,1669\%Cr) + (-0,3469\%Ni) + (0,8456\%Cu) + (-0,6844\%Cr\%Ni) + (-0,6769\%Cr\%Cu) + (-0,6881\%Ni\%Cu) \quad (3)$$

Sabendo-se que a resposta para a vida da ferramenta T é do tipo “quanto maior melhor” e respeitando o princípio da hierarquia e atribuindo os níveis (+1)%Cr, (-1)%Ni e (+1)%Cu, encontra-se uma vida da ferramenta $T = 14,004$ min. Para a $V_c = 500$ m/min os níveis dos elementos residuais nas faixas: (+1) %Cr: 0,15-0,20; (-1) %Ni: 0,08-0,13; (+1) %Cu: 0,25-0,30 da corrida (A) apresentaram também melhor usinabilidade.

Tabela 5. Análise do fatorial (ANOVA) com ponto central – Vc 500 m/min.

TERMO	EFEITO	COEF	ERRO COEF	T	P
Constante		11,9494	0,2454	48,70	0,000
% Cr	0,3337	0,1669	0,2454	0,68	0,514
% Ni	-0,6938	-0,3469	0,2454	-1,41	0,191
% Cu	1,6913	0,8456	0,2454	3,45	0,007
%Cr * % Ni	-1,3688	-0,6844	0,2454	-2,79	0,021
%Cr * % Cu	-1,3538	-0,6769	0,2454	-2,76	0,022
%Ni * % Cu	-1,3763	-0,6881	0,2454	-2,80	0,021
%Cr*%Ni*%Cu	1,0388	0,5194	0,2454	2,12	0,063
Ponto central		1,5806	0,7361	2,15	0,060

Complementando a análise fatorial, a Tabela 5 apresenta a Análise de Variância para o experimento. Nota-se que o elemento %Cu, as interações de 2ª ordem e ponto central ($p = 0,06\%$) foram significativas. Pode-se constatar que as composições químicas dos elementos residuais estão em uma região de ótimo, ou seja região de maior vida da ferramenta.

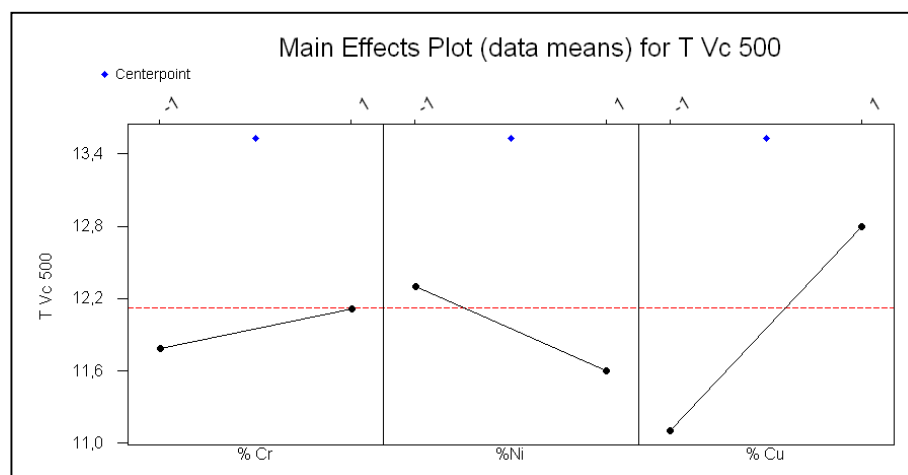


Figura 2. Efeitos principais dos elementos residuais na vida – Vc 500 m/min.

A Figura 2 mostra os efeitos principais dos elementos residuais na usinabilidade do aço ABNT 12L14. Observa-se que os níveis definidos para os elementos são: (+1) %Cr, (-1) %Ni e (+1) %Cu.

Portanto, confirma-se que composição química dos elementos residuais da corrida (A) apresentou melhor usinabilidade na $V_c = 500$ m/min.

4.3 – Análise Global dos Resultados

Através das análises estatísticas realizadas para os resultados nas velocidades de corte $V_c = 400$, 450 e 500 m/min, a Tabela 6 apresenta os níveis das faixas dos elementos residuais que influenciaram de forma positiva na usinabilidade do aço ABNT 12L14. Os níveis dos elementos %Cr, %Ni e %Cu não se alteraram para as três velocidades ensaiadas, mantendo uma regularidade significativa. Assim, pode-se dizer que a corrida (A) possui os elementos residuais nas faixas que melhor contribuíram para a usinabilidade deste aço.

Tabela 6 – Níveis dos elementos com contribuição positiva na usinabilidade.

Velocidade Vc (m/min)	Nível %Cr	Nível %Ni	Nível %Cu	Corrida
400	+1	-1	+1	A
450	+1	-1	+1	A
500	+1	-1	+1	A

Para identificar qual faixa dos elementos residuais que apresentaram pior usinabilidade, fez-se uma análise do tipo “quanto menor pior”. Na Tabela 7 é mostrado os resultados e observa-se que os níveis dos elementos %Cr, %Ni e %Cu ficaram em (-1), mantendo uma regularidade significativa. Constatando-se que a corrida (D) possui os elementos residuais nas faixas que menos contribuíram para a usinabilidade do aço ABNT 12L14.

Tabela 7 – Níveis dos elementos com contribuição negativa na usinabilidade.

Velocidade de corte m/min	Nível %Cr	Nível %Ni	Nível %Cu	Corrida
400	-1	-1	-1	D
450	-1	-1	-1	D
500	-1	-1	-1	D

A corrida (A) foi a que apresentou a melhor usinabilidade, devido basicamente aos seguintes motivos: o elemento cobre (0,26%), que foi estatisticamente significativo para a vida da ferramenta, está favorecendo fortemente a usinabilidade do aço. Em baixas velocidades de corte, o cobre atua como elemento endurecedor da ferrita prejudicando a usinagem. Em ensaios deste material com ferramentas de aço rápido, os elementos residuais nas faixas %Cr(+1), %Ni(-1) e %Cu(-1) da corrida (E) apresentaram melhor usinabilidade [13]. Enquanto que para altas velocidades de corte como no caso deste trabalho, o cobre estaria atuando como um elemento causador de fragilização a quente do material. Segundo Deeley⁽¹⁴⁾, quando em atmosfera oxidante se têm teores de cobre acima de 0,20%, pode haver a formação de uma fase rica em cobre, de baixo ponto de fusão (em torno de 1090°C), nos contornos de grão. Considerando-se que, em altas velocidades de corte, são desenvolvidas altas temperaturas de corte na interface cavaco-ferramenta (acima da temperatura de fusão da fase rica em cobre) e nesta condição proporcionaria a formação de cavacos frágeis. Outro motivo foi que esta corrida apresentou o maior teor de chumbo (0,28%) e o chumbo melhora intensamente a usinabilidade devido ao seu efeito lubrificante e fragilizante [15,16].

A corrida (D) apresentou pior usinabilidade, pois possui um percentual menor de que 0,20% de cobre (0,11% Cu). Neste %Cu não ocorreu a fragilização do cavaco mesmo em altas temperaturas e conseqüentemente a diminuição da usinabilidade. Comparando os níveis da corrida que apresentou melhor usinabilidade (Tabela 6) com a que apresentou pior usinabilidade (Tabela 7) observa-se que eles são opostos, com exceção do nível do %Ni mas, como o %Ni não foi significativo nessas velocidades de cortes desconsidera-se seu efeito. Essa comparação mostra novamente que a

mudança causada na resposta do experimento (melhor/pior usinabilidade) é proveniente da alteração dos níveis dos elementos residuais, e neste principalmente pelo nível %Cu.

5. CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos na investigação da influência dos elementos residuais (Cr, Ni e Cu) na usinabilidade do aço de corte fácil ABNT 12L14 pode-se concluir que:

- Os elementos residuais possuem uma influência significativa na usinabilidade do aço ABNT 12L14, isolados e/ou através de suas interações. Nem sempre os níveis mais baixos de residuais são os mais indicados para uma boa usinabilidade. No presente trabalho os elementos residuais nas faixas %Cr(+1), %Ni (-1) e %Cu(+1), ou seja, (%Cr: 0,15-0,20; %Ni: 0,08-0,13; %Cu: 0,25-0,30) da corrida (A) apresentaram melhor usinabilidade;
- Os elementos residuais nas faixas %Cr(-1), %Ni (-1) e %Cu, (-1) ou seja, (%Cr: 0,08-0,13; %Ni: 0,08-0,13; %Cu: 0,10-0,15) da corrida (D) apresentaram pior usinabilidade, principalmente pelo baixo teor de cobre nesta corrida;
- Os resultados alcançados com ferramenta de metal duro nas diversas velocidades de corte, apontando para as composições dos elementos residuais nos níveis (+), torna-se vantajosa para a indústria siderúrgica, devido às dificuldades de redução dos níveis destes elementos no seu processo de produção;
- A técnica de projeto e análise de experimentos mostrou-se uma excelente ferramenta para o planejamento dos ensaios bem na análise dos resultados, permitindo o modelamento da vida da ferramenta em função dos níveis dos elementos residuais (Cr, Ni e Cu).

6. AGRADECIMENTOS

À Aços Villares – SIDENOR pelo fornecimento das corridas de material e à CAPES, CNPq-FINEP através do Projeto REMAUSME e IFM pela concessão de bolsa e apoio financeiro.

7. REFERÊNCIAS

1. KLUJSZO, L. A. C. et. al. Novos desenvolvimentos de aços de usinabilidade melhorada. **Revista Máquinas e Metais**, Abril. 2003.
2. PIMENTEL, M. F. et.al. Usinabilidade de aços de corte fácil baixo-carbono. **Revista Siderurgia Brasil**, GriP Editora, Ano 5, n. 20 Set./Out. 2004.
3. PARENT, S. Measure de l'usinabilité des melleables. **Fondeire**. 31(356), p.165-175, Mai, 1976.
4. DATSKO, J. Machinability index material properties and manufacturing processes. **Material Properties and Manufacturing Processes**, John Wiley & Sons. Inc. , p. 444-468, 1967.
5. FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1977. 751 p.
6. DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; e COPPINI. N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. Artliber Editora, 5ª ed. São Paulo, 2005. 244p.
7. **EVANGELISTA LUIS, N.; MACHADO, A.R.**, Investigação com vistas ao desenvolvimento de aços de corte livre alternativos sem adição de chumbo. **Rede de Pesquisa de Materiais Avançados de Usinabilidade Melhorada** – Sub-Projeto Tema 1, Campinas, 2004.
8. **PRADO, E. L.; PIMENTEL, M.F.** Produção de Aços de corte fácil na Aços Villares. **Anais do Workshop de Materiais Avançados com Usinabilidade Melhorada**, Sub-Projeto Tema 1, Campinas, 2004.
9. BARRETOS, M. S. **Influência das inclusões metálicas de bismuto na tenacidade e fadiga de um aço SAE 1045 com usinabilidade melhorada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
10. BAS, J. Aços especiais de usinabilidade melhorada. **Anais do USINAGEM 2000, FEIRA E CONGRESSO**, Aranda Eventos, São Paulo, 2000.

11. International Organization for Standardization. **ISO 3685**: Tool life testing with single-point turning tools. Switzerland, 1993. 50 p.
12. MONTGOMERY, D. C. **Designs and Analysis of Experiments**. ed. John Wiley & Sons, 1997.
13. Ferreira, J.R. et al. Influência dos elementos residuais (Cr, Ni e Cu) no torneamento do aço de corte fácil ABNT 12L14. **Anais do USINAGEM 2006, FEIRA E CONGRESSO**, Aranda Eventos, São Paulo, 2006. 1-18p.
14. DEELEY, P. D.; KUNDING, K. J. A., SPENDELOW JR., H. R., (1981). **Ferroalloys and alloying additives handbook**. New Jersey: Newfield, 1981. p. 42-43.
15. WARKE, W. R.; BREYER, N. N. Effect of steel composition on lead embrittlement. **Journal of the Iron and Steel Institute**, New York, v. 209, n. 10, p. 779-784, 1971.
16. WINEGARD, W. C. **An introduction to the Solidification of metals**. London: Mc Gannon, 1964. 211p.

STUDY OF THE INFLUENCE OF TRAMP ELEMENTS (Cr, Ni e Cu) ON THE MACHINABILITY OF FREE-MACHINING STEEL ABNT 12L14 USING DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE)

João Roberto Ferreira

Marcos César de Almeida

Universidade Federal de Itajubá – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão

jorofe@unifei.edu.br

Nelis Evangelista Luiz

Álison Rocha Machado

Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica

alissonm@mecanica.ufu.br

Denise Corrêa de Oliveira

Marcelo Francisco Pimentel

Aços Villares – SIDENOR

denise.oliveira@villares.com.br

***Abstract.** The free-machining steels are known by having a good machinability due to easiness of chip formation. The characteristic of a good machinability is determined, essentially, by the chemical composition of the material with high sulphur contents and other elements as, for example, the lead. It is important to point out that there are others factors that influence the machinability of steels such as the presence of the tramp elements chrome (Cr), nickel (Ni) and copper (Cu). However, concerning to the tramp elements (Cr, Ni and Cu), the influence their contents in the machinability of these steel is unknown. Thus, this work studies the influence of these elements in the machinability of the ABNT 12L14 steel, through short term duration tests with cemented carbide tools. The results showed that the tramp elements have a significant influence in the tool life. The tests were planned according to technique of Design of Experiments (DOE) and the results analyzed using statistical procedure fundamentals.*

***Keywords:** Machinability, Free-Machining Steel ABNT 12L14, Residuals Elements Cr, Ni and Cu, DOE*