

AVALIAÇÃO DO EFEITO DOS ELEMENTOS QUÍMICOS RESIDUAIS NA USINABILIDADE DOS AÇOS-DE-CORTE-FÁCIL BAIXO CARBONO AO CHUMBO ATRAVÉS DA NORMA VOLVO STD 1018, 712 E FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS.

Marcelo do Nascimento Sousa

Rodrigo Oliveira Rodrigues

Álison Rocha Machado

Marcos Antonio de Souza Barrozo

Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2.121, Uberlândia – MG, 38.408-902, Brasil.

mnascimento@mecanica.ufu.br

Resumo:

Os aços de corte-fácil são especialmente projetados para oferecer melhores resultados mediante a operação com retirada de cavaco, reduzindo o coeficiente de contato ou atrito com a ferramenta. Em geral, estes aços têm que cumprir baixas especificações em outras características como resistência mecânica, resistência à fadiga e temperabilidade, entre outras. Por esta razão os principais elementos de liga que os constituem são destinados à melhoria da usinabilidade. São geralmente aços de baixo carbono com fortes adições de S, Mn, Pb, P etc... . Como são fabricados, normalmente, com materiais recicláveis, elementos como Cr, Ni, Cu e Mo são sempre encontrados em suas composições, sendo considerados elementos residuais. Este artigo visa investigar a influência de pequenas variações nos teores de cobre, níquel e cromo na usinabilidade dos aços de corte-fácil baixo carbono baseado na metodologia descrita na norma VOLVO STD 1018, 712. Ela se baseia em ensaios de vida de ferramentas monocortantes de HSS aplicadas em condições especiais no processo de fresamento frontal. Para uma melhor confiabilidade foram usadas ferramentas estatísticas através da análise de variância e teste t de Student nos resultados obtidos pela norma VOLVO. Os resultados encontrados através dos experimentos mostraram que os elementos residuais realmente influenciam na usinabilidade do aço SAE 12L14, sendo que os mais significativos foram o Ni e Cu.

Palavras Chaves: Aços-de-corte-Fácil, Usinabilidade, Elementos químicos residuais, Norma Volvo STD 1018, 712, Fresamento.

1. INTRODUÇÃO

Para peças feitas de aços de engenharia, não é incomum, que os custos de usinagem representam cerca de 50% do custo final de produção (Apple, 1999). Por isso tem crescido em grande escala a pesquisa nas indústrias siderúrgicas visando a obtenção de aços especiais, que proporcionam um menor custo na fabricação de um componente usinado. Entre esses aços especiais tem-se, os aços de corte livre são aqueles projetados como o objetivo de obter máxima performance em operações de usinagem. Normalmente são adicionados enxofre (para formação de sulfetos de

manganês) e chumbo (Bas, 1995). Estes materiais são considerados aditivos de corte livre que promovem a melhoria da usinabilidade desses aços. De especial importância são os aços de corte livre baixo carbono que responde pelo maior volume consumido dentro deste grupo de aço. Os usuários deste aço verificaram grande variabilidade de usinabilidade entre lotes distintos, apesar de estarem dentro da especificação. Acredita-se que as variações na composição química sejam responsáveis por estas variações na usinabilidade destes aços (Mill E Redford 1983). Algumas empresas utilizam na fabricação, para diminuir o custo, sucatas sem o controle dos elementos químicos, isso por sua vez implica um aumento dos elementos residuais, que apesar de estarem presentes em pequenas quantidades, não são intencionalmente inseridos nos aços, e são de difícil remoção durante o processo de fabricação. Se tem realizado um resumo bibliográfico, sobre a influência dos elementos que normalmente estão inclusos nestes aços proveniente destas sucatas, e que são de difícil eliminação, tais como: Cr, Ni, Mo, Cu, na usinabilidade. Nos aços-de-livre, os elementos residuais são prejudiciais, posto que endurecem o aço e aceleram o desgaste da ferramenta. Para se ter um bom comportamento da usinabilidade tem-se que $Ni+Cr+Cu \leq 0,5\%$. (Echevaria e Corcuera, 1987).

O presente trabalho visa investigar a usinabilidade do aço ABNT 12L14 através de ensaios de vida da ferramenta pelo fresamento e, tendo como objetivo principal determinar a influência dos níveis dos elementos químicos residuais (Cr, Ni, Cu), utilizando um teste desenvolvido e normalizado pela Volvo (1989). Na análise dos resultados foram utilizadas ferramentas estatística (BOX, 1978) e, para garantir maior confiança nos resultados, sendo as ferramentas usadas: análise de variância que possui a finalidade de verificar se realmente existe diferença nos resultados obtidos, o teste t de Student para comparar os materiais em pares.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 TESTE VOLVO:

O teste Volvo foi desenvolvido, e é direcionado para quantificar a usinabilidade de materiais. Este teste envolve medições do desgaste de flanco máximo em uma ferramenta no fresamento frontal. O teste fornece um índice B que define a usinabilidade de um material. As vantagens de se usar o teste Volvo é devido a economia de material e de tempo, que chega a ser á uma razão de 70 em relação a testes tradicionais (Deardo, Garcia, 1993).

2.2 Maquinas e Ferramentas

Os testes foram realizados em uma fresadora CNC fabricada pela Romi, modelo Interat IV, possuindo 7,5 cv de potência em seu eixo árvore e variação contínua de rotação (40 a 4000rpm) e avanço (0 a 4800mm/min).



Fig 1- Foto da Fresadora Romi Interat IV.

Para medição dos desgastes das ferramentas utiliza-se um microscópio ferramenteiro ilustrado na figura 3. Ele tem resolução de 0.01mm e ampliação de 40 vezes.



Fig 2- Foto do microscópio utilizado.

Todos os detalhes relativos à ferramenta, cabeçote porta ferramenta e peça teste estão especificados na norma Volvo (The Volvo Standard Machinability Test, “Std. 1018.712”, 1989).

Para realizar os testes foi fabricado um cabeçote porta ferramenta especial, especificado pela norma (figura 4).



Fig 3- Cabeçote porta ferramenta conforme norma Volvo (The Volvo Standard Machinability Test, “Std. 1018.712”, 1998).

As ferramentas de corte são barras de aço-rápido com dimensões quadradas de 16mm de lado e 80mm de comprimento (figura 3). A tabela 1 mostra a composição química da ferramenta .

Tabela 1– Composição química das ferramentas de aço rápido (dados do fornecedor).

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
0,968	0,523	0,295	0,098	0,0125	4,098	4,859	0,191
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Sn
0,0296	8,58	0,057	0,119	0,002	3,253	6,34	0,026

A peça teste utilizada é cilíndrica, com as seguintes dimensões: diâmetro: 50 ± 0.1 mm e altura aproximada de 150 mm (figura 4).



Fig 4- Foto da peça teste utilizada.

As composições dos 9 materiais testados podem ser visto na tabela 2.

Tabela 2: Composição dos materiais

Material	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Cu	% Mo	% Al	% Pb	% N2	Nível do fator		
													Cr	Ni	Cu
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	1	-1	1
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	-1	1	-1
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	-1	1	1
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	-1	-1	-1
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	1	-1	-1
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	-1	-1	1
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	1	1	-1
H	0.077	0.02	1.22	0.045	0.295	0.13	0.12	0.21	0.03	0.001	0.24	0.0086	0	0	0
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	1	1	1

Nesta tabela o nível 1 é o nível alto do elemento residual , -1 nível baixo e 0 é o nível central.

2.3. PROCEDIMENTO DO TESTE

As condições de corte utilizadas nos testes foram recomendadas pela norma Volvo (1989): profundidade de corte de 1.0mm, avanço de 0.01mm/volta e velocidade de corte que deve ser estipulada para cada material. Para o aço-de-corte-fácil analisado utilizou-se uma velocidade de 125m/min (rotação de 500 rpm). A norma aconselha a utilização de fluido de corte com uma vazão de 10 l/min. A peça teste é usinada até que a ferramenta atinja o desgaste $VB_{Bmáx} = 0.7\text{mm}$ na barra de aço rápido. A figura 7 mostra onde se mede o desgaste de flanco em uma ferramenta.

2.4. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE USINABILIDADE B

Este índice é levantado por meio de testes de fresamento frontal, cujos procedimentos são normalizados pela norma Volvo (The Volvo Standard Machinability Test, "Std. 1018.712", 1998). Nesta escala o aço de corte livre SAE 1112 tem um índice 100. O índice B é determinado em um diagrama de velocidade de corte versus volume de material removido em escalas logarítmicas (figura 8).

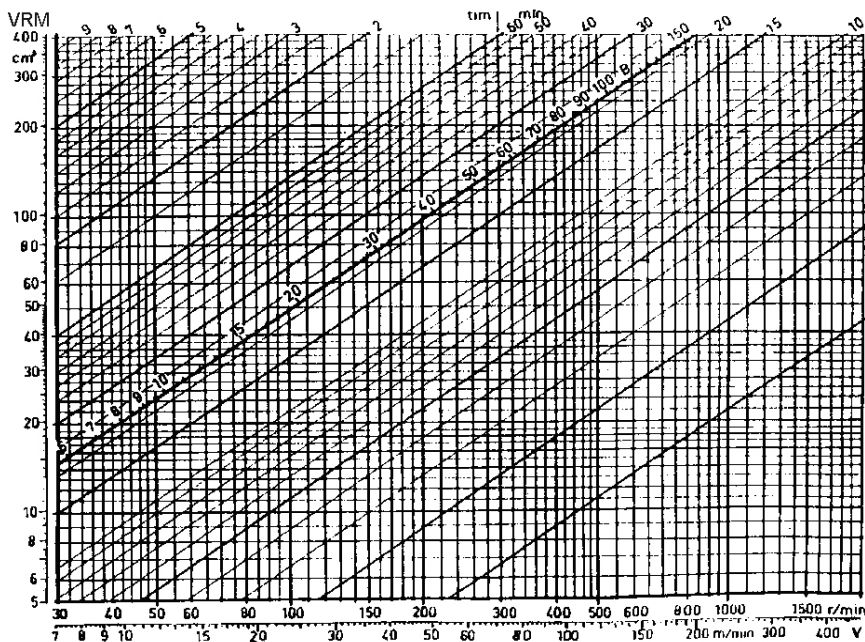


Figura 8 - Diagrama de Determinação do índice B (Volvo, 1989).

Para uma melhor precisão deve-se realizar no mínimo 3 testes e no máximo 6 testes nas mesmas condições para cada velocidade de corte empregada, onde é calculado a razão entre volume mínimo (abaixo da linha de referência) e volume máximo (acima da linha de referência) de material em cada teste, a tabela 3 fornece a regra para determinação do número de testes.

Tabela 3: Regra para determinação do número de testes em cada velocidade de corte.

Min/max	Número de sub-testes
1.0-0.93	Três
0.93-0.87	quatro
0.87-0.81	cinco
0.81-0.75	seis
<0.74	Material não apropriado

4 RESULTADO DOS ÍNDICES DE USINABILIDADE B

A tabela 3 apresenta os resultados obtidos para o índice de usinabilidade B, bem como os valores médios resultantes dos 27 testes e a figura 5.1 mostra um diagrama com esses valores médios, sendo que estes índices são da forma de quanto maior melhor a usinabilidade do material.

Tabela 3. Valores dos índices de usinabilidade B encontrados nos nove materiais testados.

	Material A	Material B	Material C	Material D	Material E
Índice B	94,4	92,0	92,6	100,5	96,3
	93,7	91,5	94,4	102,8	98,0
	94,4	94,4	92,6	98,3	98,7
Média	94,1	92,6	93,2	100,5	97,6
	Material F	Material G	Material H	Material I	
Índice B	93,7	89,8	93,7	87,2	
	94,4	92,0	93,7	88,8	
	95,5	94,4	95,5	88,0	
Média	94,5	92,0	94,3	88,0	

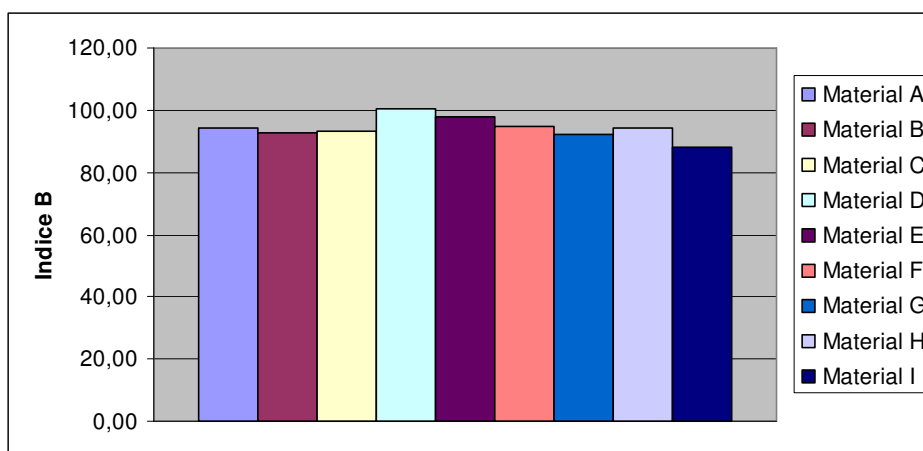


Figura 9 - Diagrama dos valores médios dos índices de usinabilidade B dos nove materiais.

Observando-se os resultados obtidos através da soma dos teores de Cr, Ni e Cu mostrado acima, tem-se que os materiais que tiveram a soma de seus teores de Cr, Ni e Cu acima de 0,5% foram os que tiveram piores índices de usinabilidade. Isto reforça a orientação de Echevarria e Corcuera, (1987), que recomendam $Ni+Cr+Cu \leq 0.5\%$. Observa-se também que quanto maior for o valor da soma da porcentagem dos teores de Cr, Ni e Cu pior é o índice de usinabilidade.

O material D que possui os mais baixos níveis de resíduos $Cr = -1$ (0,08/0,13%), $Ni = -1$ (0,08/0,13%) e $Cu = -1$ (0,10/0,15%) teve um índice de usinabilidade médio 13% melhor que o material I que possui os mais elevados níveis residuais $Cr = 1$ (0,15/0,20%), $Ni = 1$ (0,17/0,22%) e $Cu = 1$ (0,25/0,30%).

Para se ter uma relação mais confiável nas repostas encontradas pelo teste Volvo uma análise estatística mais apurada se faz necessário. Primeiramente utilizou-se uma comparação de K tratamentos através da análise de variância, para verificar se realmente existe diferença entre os resultados dos materiais testados. Depois foi feita uma comparação de pares de resultados através de t de Student.

4.2 RESULTADO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA

A tabela 4 mostra o quadro de análise de variância para os resultados dos índices de usinabilidade B.

Tabela 4 Quadro de análise de variância para os 27 testes

	SQ	g.l	Q.M	F	p
Média	239192,8	1	239192,8	119133,1	0,000000
Efeitos dos materiais	295,9	8	37,0	18,4	0,000000
Resíduo	36,1	18	2,0		

Adotando-se um nível de significância de 5%, tem-se que o valor de p é menor que este nível, então rejeita-se H_0 e aceita-se H_1 como explicado no capítulo 3, portanto conclui-se que existe diferença entre pelo menos dois dos materiais.

Sabendo-se que existe uma diferença entre pelo menos dois materiais através da análise de variância, utilizou-se a comparação de 2 tratamentos através do teste t de Student com um nível de significância de 5 %.

A seguir será feita uma comparação entre os materiais 2 a 2 utilizando a estatística t de Student, variando apenas um nível residual e deixando os outros dois constantes, para verificar quais desses elementos residuais mais influenciam na usinabilidade deste material.

Primeiramente será feita a comparação do material D que possui o melhor índice de usinabilidade B e os níveis residuais Cr = -1, Ni = -1 e Cu = -1 com o material E, que possui os níveis residuais Cr = 1, Ni = -1 e Cu = -1. Verifica-se que eles não se diferem estatisticamente, portanto nesta situação onde os níveis de níquel e cromo estão baixos a elevação do nível de cobre de -1 para 1 não influencia na usinabilidade. Este mesmo material D se difere estatisticamente do material B que possui níveis residuais Cr = -1, Ni = 1 e Cu = -1, concluindo-se, assim, que passando o nível de Ni -1 para 1 e permanecendo com os níveis residuais de cromo e cobre baixo tem-se um decréscimo na usinabilidade. Este resultado entretanto é questionável pois o material B possui um teor de carbono superior aos demais materiais ver tabela 4.1. O material D também se difere estatisticamente do material F que possui os níveis residuais Cr = -1, Ni = -1 e Cu = 1, portanto tem-se que mudando o nível residual de Cu de -1 para +1 e conservando os níveis de Cr e Ni baixos tem-se também um decréscimo na usinabilidade.

Observando-se agora o material E que possui o segundo melhor índice de usinabilidade e níveis residuais Cr = 1, Ni = -1 e Cu = -1, verifica-se que ele se difere estatisticamente do material G, que possui níveis residuais Cr = 1, Ni = 1 e Cu = -1. Portanto, passando o nível de Ni de -1 para 1 conservando os níveis de Cr alto e o nível de Cu baixo tem-se um decréscimo na usinabilidade. Este mesmo material E não se difere estatisticamente do material A que possui níveis residuais Cr = 1, Ni = -1 e Cu = 1. Isto significa que passando o nível de Cu de -1 para 1, conservando o nível de Cr alto e o nível de Ni baixo não afeta a usinabilidade.

Continuando-se as análises, comparando o material G que possui o segundo pior índice de usinabilidade e níveis residuais Cr = 1, Ni = 1 e Cu = -1 como o material I que possui níveis

residuais Cr = 1, Ni = 1 e Cu = 1 verifica-se que eles se diferem estatisticamente, então tem-se que passando nível de Cu de -1 para 1, permanecendo com os níveis de Cr e Ni altos, piora a usinabilidade.

Por último, comparando-se o material I com os materiais C, que possui níveis residuais Cr = -1, Ni = 1 e Cu = 1, A, que possui os níveis residuais Cr = 1, Ni = -1 e Cu = 1 e G que tem os seguintes níveis residuais Cr = 1, Ni = 1 e Cu = -1, verifica-se que eles se diferem estatisticamente. Conclui-se, então que passando o nível de qualquer elemento residual de 1 para -1, conservando os outros dois elementos altos tem-se uma melhora na usinabilidade.

Através da análise de variância e do teste t de Student, pode-se observar que os materiais D, que possui baixos elementos residuais, e E, que possui alto nível residual de cromo e baixo nível residual de níquel e cobre, foram os que apresentaram melhores usinabilidade e o material I, que possui alto nível de residuais, foi o que apresentou pior usinabilidade.

Em função dos resultados de usinabilidade obtidos através do teste Volvo (1989), pra verificar a influência dos elementos químicos residuais (Cr, Ni, Cu) no Aço SAE 12114, pode-se concluir que:

Os elementos químicos residuais realmente influenciam na usinabilidade deste aço, sendo que os níveis residuais mais baixos Cr = -1 (0,08/0,13%) , Ni = -1 (0,08/0,13%) e Cu = -1 (0,10/0,15%), correspondente ao material D, e os níveis Cr = 1, Ni = -1 e Cu = -1, que corresponde ao material E, foram os que apresentaram melhor usinabilidade

O material I, com os elementos residuais altos Cr = 1 (0,15/0,20%), Ni = 1 (0,17/0,22%) e Cu = 1 (0,25/0,30%), foi o que apresentou pior usinabilidade.

A diferença dos índices de usinabilidade “B” entre o melhor e o material foi de aproximadamente 13%.

Os elementos Cu e Ni que tiveram maior influencia na usinabilidade deste aço, e Cr foi o elemento que menos influenciou.

Os materiais com maiores somas das percentuais dos teores de Cr, Ni e Cu, obtiveram os piores índices de usinabilidade.

5 AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), CNPq, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), Aços Villares em nome de: Kiyoshi Miyada, Marcelo Franciso Pimentel e Denise Correa.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Apple, C.A, The Relation ship Between Inclusions and the Machinability of Steel, Mechanical Working and Steel Processing Proceedings, pp 415-426, 1989.

Bas, J., A Usinabilidade dos Aços Especiais, Relatório Interno Gerdau S.A, Charquea, Rs, 1995.

Box, G. E and Hunter, J.S., Statistics for Experiments, Printed in the United States of America, 1978.

DeArdo, A.J., Garcia, C.I, A Better way to assess Machinability, American Machinist, may 1993.

Echevarría, E. e Corcuera, P., Influencia de Los Elementos Residuales En La Maquinabilidad y El Coste de Los Aceros de Facil Maquinabilidad, Agrupación I+D Aceros Especiais, 1987

Mill, B. and Redford, A.H, Machinability of Engineering Materials, Apliede Science Publishers, London and New York, pp 98-107, 1989

The Volvo Laboratory for Mfg Research, Trollhattan, Sweden, The Volvo Standard Machinability Test, Std. 1018.712, 1989.