

DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO DE TAYLOR EXPANDIDA ATRAVÉS DAS TÉCNICAS DE ANÁLISE DIMENSIONAL E DE OTIMIZAÇÃO DE ENSAIOS

Sandro Cardoso Santos

Júlio César Giubilei Milan

Márcio Bacci da Silva

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 38400-000, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. E-mail: scsantos@mecanica.ufu.br

Resumo

Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados da equação de Taylor expandida, obtidas para o estudo da usinabilidade de um aço para fabricação de moldes. Uma das amostras do aço foi tratada com cálcio, com o objetivo de ter sua usinabilidade melhorada, enquanto a outra foi obtida através de tratamento convencional. As amostras tiveram a equação de Taylor expandida, para o fresamento de topo, obtidas através das técnicas de análise dimensional e de otimização de ensaios. Ambas as técnicas apresentaram resultados com desvios significativos para a predição do fim da vida das ferramentas. Como indicadores da usinabilidade, as equações obtidas apresentaram resultados satisfatórios.

Palavras chave: Equação de Taylor, usinabilidade

1. Introdução

A evolução do desgaste da ferramenta é responsável por alterações nas características do corte, tais como aumento do nível de vibração, aumento da força de usinagem, piora no acabamento superficial, perda do controle dimensional das peças produzidas e aumento da temperatura na interface cavaco-ferramenta. Quando as alterações provocadas pelo desgaste se tornam críticas, diz-se que a ferramenta de corte atingiu o fim de vida. Desta forma a vida de uma ferramenta de corte pode ser definida como o período durante o qual o seu desempenho segue critérios previamente estabelecidos, conhecidos como critérios de fim de vida. Os critérios de fim de vida são fixados com base na alteração de uma ou mais das características citadas anteriormente.

A vida da ferramenta pode ser expressa através da curva de vida, que representam a vida da ferramenta em função da velocidade de corte, conhecida como equação de Taylor. Estas curvas são fundamentais no estudo das condições econômicas de corte. Uma análise mais completa relaciona a vida da ferramenta com os demais parâmetros de corte, resultando na chamada equação de Taylor expandida (Machado et al., 1998).

A equação de Taylor expandida é um dos mais eficientes indicadores da usinabilidade de um material, por estabelecer uma relação entre a vida da ferramenta, os parâmetros de usinagem e o critério de fim de vida adotado. A equação de Taylor expandida pode ser representada na forma:

$$T = k \cdot v_c^{x1} \cdot f_z^{x2} \cdot a_p^{x3} \cdot VB_B^{x4} \quad (1)$$

Onde:

T = vida da ferramenta

k = constante

v_c = velocidade de corte
 f_z = avanço por dente
 a_p = profundidade de corte
 VB_B = desgaste de flanco médio

De modo geral, os trabalhos que têm por objetivo estudar a usinabilidade de materiais o fazem através da determinação da equação de Taylor expandida (Lourenço, 1996; Milan, 1999).

Uma dificuldade encontrada para o equacionamento da vida da ferramenta é o fato de envolver a medida do desgaste, que apresenta caráter sistêmico, de modo que o relacionamento de todas as variáveis que influenciam o fenômeno é uma tarefa de difícil realização. Como a equação de Taylor expandida não envolve todos os parâmetros que afetam o desgaste, é natural que os resultados indicados apresentem desvios em relação aos reais. Este fato tem justificado a realização de trabalhos cujo objetivo é desenvolver recursos computacionais que permitam a obtenção da equação de Taylor expandida através da realização de um número mínimo de ensaios (dos Santos, 1996).

Este trabalho tem por objetivo apresentar a equação de Taylor expandida obtida através de duas técnicas distintas: a análise dimensional e um programa computacional desenvolvido especificamente para este fim (dos Santos 1996).

O programa computacional otimiza os ensaios experimentais, de modo que sejam realizados um número mínimo de experimentos. A princípio são fornecidos ao programa as faixas de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, admissíveis para o par ferramenta-peça. Com base nestes valores, o programa fornece quatro condições de corte. Para cada condição, deve-se criar uma matriz cujas colunas correspondem às condições de corte e ao valor do desgaste, medido ao longo da vida das ferramentas. A partir dos dados obtidos com as quatro primeiras condições, o programa calcula os coeficientes da equação de Taylor expandida, o erro correspondente e fornece uma nova condição de corte. Alimenta-se o programa com a matriz obtida a partir desta nova condição e um novo valor do erro. O programa continua fornecendo novas condições de corte até que o erro obtido convirja para um valor, o procedimento é então encerrado. Este método de cálculo dos coeficientes da equação de Taylor expandida apresenta como aspecto positivo o grande número de valores utilizados nos cálculos, de modo que os resultados tendem a se tornar mais confiáveis. Outro ponto positivo do método é que os procedimentos são encerrados após a convergência do valor do erro, ou seja, há a garantia de que novos experimentos realizados a partir daí não reduzirão o erro. Um ponto negativo é o fato de que o método não permite o planejamento prévio dos experimentos, pois o número de testes a serem realizados é, a princípio, desconhecido.

A análise dimensional é uma técnica que, aplicada ao estudo de um experimento, permite a sistematização da coleta de dados e a redução do número de variáveis para o equacionamento de um fenômeno físico. A análise dimensional é fundamentada no teorema de Buckingham (Murphy, 1984; Carneiro, 1996) que diz que “se uma operação envolvendo k variáveis é completa, então esta equação pode ser reduzida a $k - m$ números independentes adimensionais, onde m é o número de variáveis primárias”. A aplicação do teorema de Buckingham além de reduzir o número de variáveis envolvidas permite a verificação da influência isolada de cada uma das variáveis no fenômeno físico, através das chamadas equações componentes, que combinadas formam a equação descritiva do fenômeno. A técnica tem como aspecto positivo o fato de os testes poderem ser planejados previamente e o menor número de dados necessários para o cálculo. O aspecto negativo da técnica é que os resultados podem apresentar grandes erros devido ao fato de serem utilizados um número menor de pontos para a determinação dos coeficientes da equação.

2. Procedimentos Experimentais

2.1 Materiais utilizados

Foram utilizados dois tipos de aço para matrizes, VP20 e VP20 UF, cuja composição química é apresentada na tabela 1. Os dois materiais apresentam a mesma composição química e faixa de dureza, diferenciando-se entre si apenas pelo tratamento ao cálcio, pelo qual o VP20 UF foi submetido com o objetivo de melhorar a sua usinabilidade.

Tabela 1 -Composição química dos aços

Elem. químico	C	Mn	Cr	Mo	Ni
Teor (%)	0,36	1,30	1,80	0,20	1,00

2.2 Peça

A preparação do material consistiu em cortar os blocos nas dimensões mostradas na figura 1. Em seguida o material foi colocados na mesa de trabalho da máquina, onde suas superfícies, inferior e superior, foram aplainadas através de fresamento frontal, com o objetivo de garantir a planicidade e o paralelismo destas superfícies.

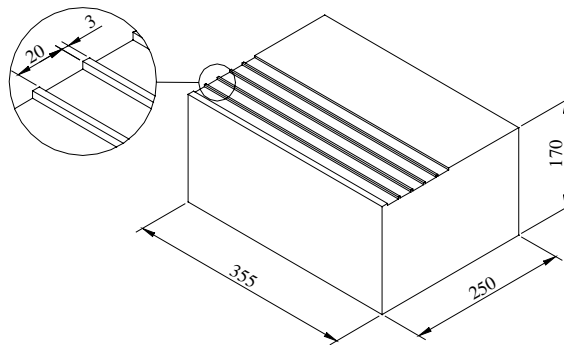


Figura 1. Dimensões dos blocos utilizados nos ensaios

Todos blocos foram utilizados inicialmente nestas dimensões, e os canais foram feitos no sentido da maior dimensão (355 mm). A cada 10 canais, com distância de 3mm entre eles, a superfície do bloco foi aplainada com uma fresa frontal para que não houvesse qualquer tipo de interferência (rebarbas) dos canais anteriormente usinados sobre a superfície da ferramenta.

2.3 Ferramentas

As ferramentas utilizadas nos ensaios de vida no fresamento de topo foram as R215.44-09 02 08M-WH 4030, pastilhas de metal duro com revestimento múltiplo de TiN, TiC e Al₂O₃, classe P25 . A fresa utilizada foi a R215 44 20 BD 09C, fresa de topo de 20 mm de diâmetro com 03 pastilhas intercambiáveis.

2.4 Equipamentos utilizados

Os ensaios para determinação da vida da ferramenta foram realizados em uma Fresadora CNC ROMI INTERACT IV, com 22 cv . (16 KW) de potência. O desgaste foi medido em um microscópio ferramenteiro desenvolvido no LEPU, especificamente para medição de desgaste em ferramentas multicortantes. A figura 2 mostra, de forma esquemática, o equipamento utilizado para a medida do desgaste.

2.5 Metodologia

A metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho consistiu basicamente na medida do desgaste de flanco médio ao longo da vida das ferramentas, em diferentes condições de corte.

As condições de cortes adotadas para a realização dos ensaios foram tomadas dentro das faixas de valores indicadas pelo fabricante da pastilha. A tabela 2 apresenta esses valores.

Tabela 2. Faixa de condições de corte indicada pelo fabricante.

	Mín.	Máx.
V_c (m/min)	120	220
a_p (mm)	1,0	3,0
f_z (mm/dente)	0,075	0,15

Os valores apresentados na tabela 2 alimentaram o programa de otimização de ensaios que forneceu as seguintes condições de corte iniciais:

- 1 - $v_c = 123$ m/min – $f_z = 0,141$ mm/dente
- 2 - $v_c = 196$ m/min – $f_z = 0,098$ mm/dente
- 3 - $v_c = 208$ m/min – $f_z = 0,090$ mm/dente
- 4 - $v_c = 128$ m/min – $f_z = 0,084$ mm/dente

condições de corte adicionais:

- 5 - $v_c = 220$ m/min – $f_z = 0,082$ mm/dente
- 6 - $v_c = 220$ m/min – $f_z = 0,091$ mm/dente
- 7 - $v_c = 220$ m/min – $f_z = 0,093$ mm/dente
- 8 - $v_c = 120$ m/min – $f_z = 0,113$ mm/dente

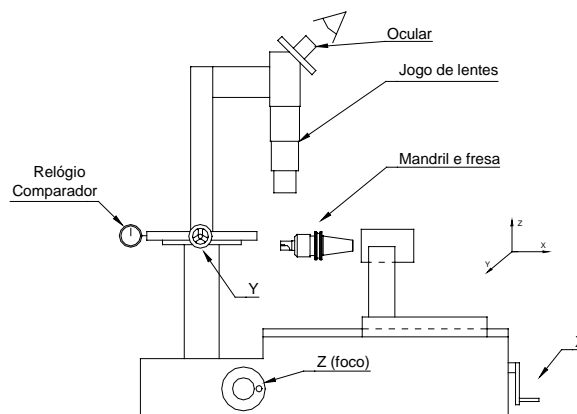


Figura 2. Esquema de funcionamento do microscópio ferramenteiro utilizado na medição do desgaste.

O intervalo de medição do desgaste da ferramenta varia de acordo com a severidade dos testes. O parâmetro utilizado como critério de fim de vida foi o desgaste de flanco médio $VB_B = 0,4$ mm. Assim que apenas uma ou mais pastilhas atingiu este valor ou valor superior o ensaio foi encerrado.

2.6 Determinação dos π -termos

O cálculo dos termos adimensionais (π -termos) utilizados na determinação da equação de Taylor é apresentado a seguir:

A – Levantamento das variáveis que influenciam o fenômeno:

$$\mathbf{T} = \mathbf{f}(\mathbf{v}_c, \mathbf{f}_z, \mathbf{VB}_B), \text{ onde:}$$

T = vida da ferramenta (min)

v_c = velocidade de corte (m/min)

f_z = avanço por dente (mm/dente)

VB_B = desgaste de flanco médio (mm)

Foi verificada a não influência da profundidade de corte no fenômeno (Milan, 1999).

B – Determinação dos π -termos

Análise dimensional

$$[T]^a \cdot [v_c]^b \cdot [f_z]^c \cdot [VB_B]^d = 1 \rightarrow [T]^a \cdot [L \cdot T^{-1}]^b \cdot [L]^c \cdot [L]^d = 1$$

$$k = 4; m = 2 \rightarrow 2 \pi\text{-termos}$$

$$T \rightarrow a - b = 0$$

$$L \rightarrow b + c + d = 0$$

$$\pi_1 : a = 1 \rightarrow b = 1 ; d = 0 \rightarrow c = -1 \rightarrow \pi_1 = T \cdot v_c / f_z$$

$$\pi_2 : a = 0 \rightarrow b = 0 ; c = 1 \rightarrow d = -1 \rightarrow \pi_2 = f_z / VB_B$$

3. Resultados e Discussões

Os gráficos da figura 3 mostram as curvas de regressão obtidas para os π -termos referentes aos dois materiais analisados. As curvas apresentam um comportamento esperado para estudo de fenômenos relacionados com o desgaste. Pode-se verificar que os pontos ocupam uma faixa de valores ao longo da reta de regressão. Este comportamento pode ser explicado pela dificuldade de se determinar a medida exata do desgaste.

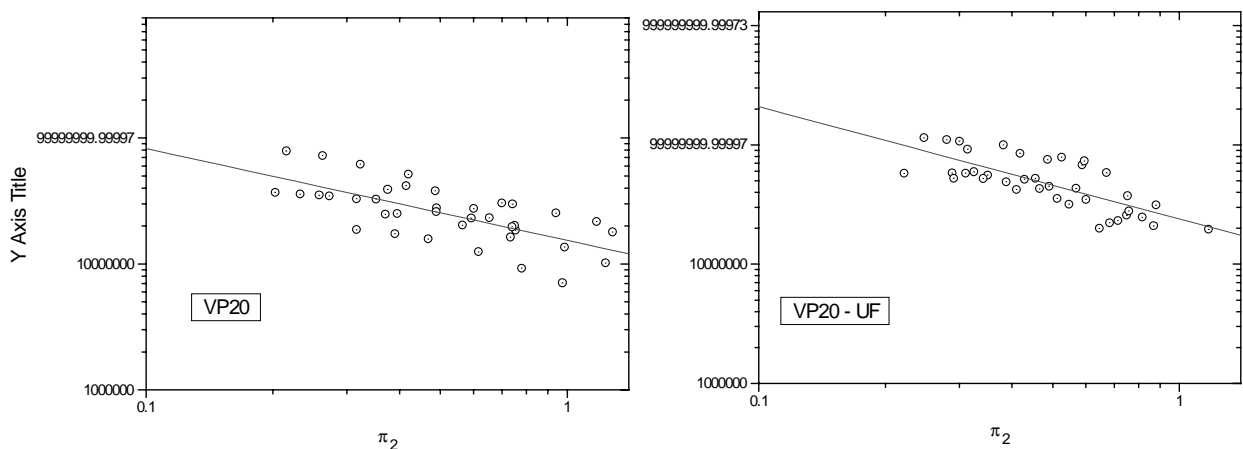


Figura 3. Curva de regressão para os π -termos referentes à vida dos aços VP20 e VP20-UF

As equações referentes à vida das ferramentas, obtidas pela análise dimensional são apresentadas abaixo:

Para o aço VP20:

$$T = 15,374 \cdot 10^6 \cdot v_c^{-1} \cdot f_z^{0,27103} \cdot VB_B^{0,72897} \quad (2)$$

Para o aço VP20-UF

$$T = 23,912 \cdot 10^6 \cdot v_c^{-1} \cdot f_z^{0,05907} \cdot VB_B^{0,94093} \quad (3)$$

As equações fornecidas pelo método de otimização de ensaios são:

Para o aço VP20:

$$T = 6,72 \cdot 10^6 \cdot v_c^{-2,3746} \cdot f_z^{-0,3723} \cdot VB_B^{0,99887} \quad (4)$$

Para o aço VP20-UF

$$T = 3,974 \cdot 10^6 \cdot v_c^{-1,3639} \cdot f_z^{0,7991} \cdot VB_B^{1,8865} \quad (5)$$

Os gráficos das figuras 4 e 5 mostram a comparação entre as curvas de desgaste obtidas a partir das duas técnicas com o valor real medido durante os ensaios.

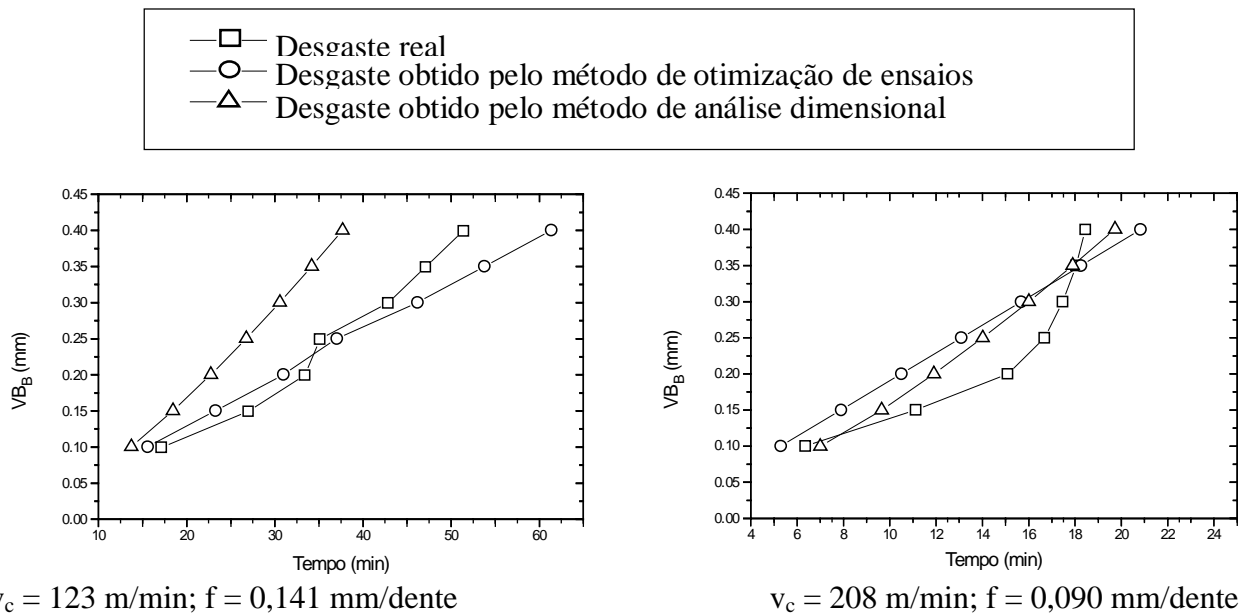


Figura 4. curvas de evolução do desgaste obtidas para o aço VP20

As curvas mostradas nas figuras 4 e 5 mostram que os valores de desgaste calculados apresentam menores desvios em relação aos obtidos experimentalmente no início da vida das ferramentas. Nota-se que os desvios tornam-se maiores com o desenvolvimento do desgaste. Isto ocorre devido ao fato de que à medida que o desgaste torna-se maior, a camada de revestimento é

removida e com isso o substrato da ferramenta passa a entrar em contato direto com a peça. O aumento da taxa de desgaste observado na curva de desgaste real a partir do momento em que a ferramenta atinge um desgaste de aproximadamente 0,2 mm evidencia a perda do revestimento. Pode-se definir então duas regiões distintas, com taxas de desgaste diferentes.

Os resultados obtidos a partir do método de otimização de ensaios foram mais próximos dos valores experimentais para a menor velocidade de corte adotada. Para a velocidade de corte de 208 m/min e avanço de 0,090 mm/dente os resultados obtidos através das duas técnicas apresentaram valores de desvios próximos.

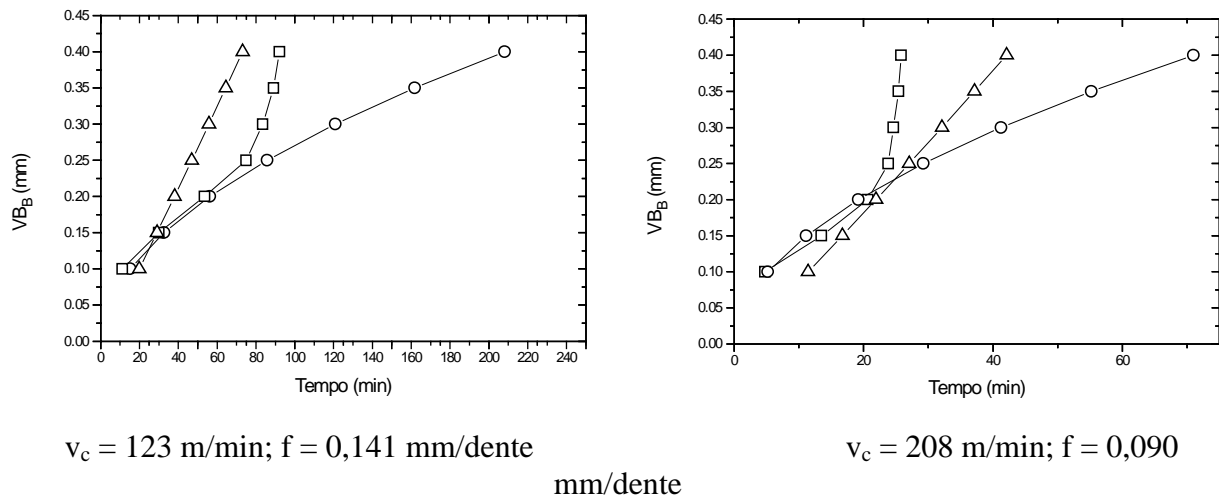


Figura 5. Curvas de evolução do desgaste obtidas para o aço VP20- UF

A figura 6 mostra o aspecto das superfícies de folga desgastadas, obtidas através de um microscópio eletrônico de varredura.

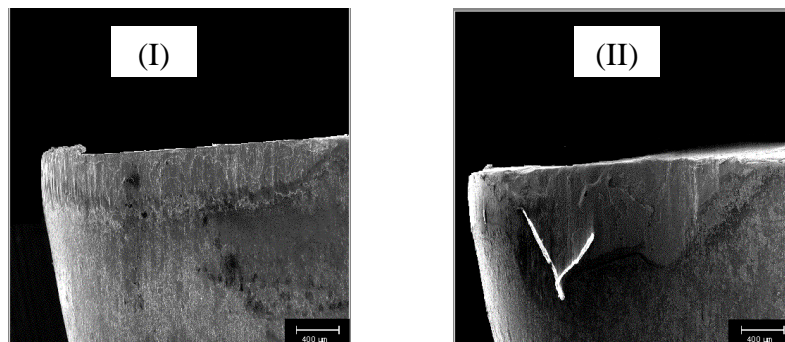


Figura 6. Desgaste de flanco na usinagem do VP20 (I) e VP20-UF (II) ($v_c = 123 \text{ m/min}$, $f_z = 0,141 \text{ mm/dente}$, $a_p = 1,7 \text{ mm}$).

O aspecto irregular da superfície desgastada em ferramentas utilizadas na usinagem de dos dois tipos de aço dificulta o estabelecimento de uma medida exata para o desgaste de flanco médio, o que contribui para que os valores dos erros encontrados no equacionamento sejam elevados. A tabela 3 mostra os valores dos tempos de vida para as ferramentas para os dois materiais usinados, tendo como critério de fim de vida o desgaste de flanco médio de 0,4 mm.

Os valores de vida das ferramentas, para a usinagem de um mesmo material nas mesmas condições de corte apresentam diferenças, por motivos já discutidos. Os resultados encontrados para a usinagem dos diferentes materiais em condições de corte idênticas, mostram que a vida das ferramentas é consideravelmente maior quando se usina o aço VP20-UF, independente do método utilizado para se obter estes valores. Isto qualifica a equação de Taylor expandida como uma ferramenta eficiente no “ranqueamento” da usinabilidade de diferentes materiais, independente da técnica utilizada para a sua obtenção.

Tabela 3. Tempo de vida das ferramentas – critério de fim de vida $VB_B = 0,4$ mm

Material	Condição de corte	Vida da ferramenta (min)		
		Real	Técnica de otimização de ensaios	Técnica de análise dimensional
VP20	$v_c = 123$ m/min, $f_z = 0,141$ mm/dente	51,39	61,37	37,69
	$v_c = 208$ m/min; $f_z = 0,090$ mm/dente	18,45	20,83	19,73
VP20 - UF	$v_c = 123$ m/min $f_z = 0,141$ mm/dente	92,07	208,08	73,12
	$v_c = 208$ m/min $f_z = 0,090$ mm/dente	25,81	70,99	42,11

4. – Conclusões

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- A análise dimensional, apesar de ser uma técnica relativamente simples, permite a estimação da equação de Taylor, sem apresentar erros significativamente maiores que o apresentado pela técnica de otimização de ensaios.
- Valores elevados de erro relativo são verificados para ambas as técnicas analisadas, principalmente em valores elevados de desgaste, que ocorre devido às características próprias do fenômeno, como a remoção da camada de revestimento e geometria irregular do desgaste.
- Os resultados mostram a dificuldade de obter um modelo matemático associado à vida da ferramenta e justificam a tentativa de se obter equações que correspondam melhor aos valores experimentais.
- As equações obtidas não apresentaram bons resultados no que se refere à predição do fim de vida da ferramenta, porém se mostraram eficientes na classificação de usinabilidade dos diferentes materiais.

5. – Referências Bibliográficas

- dos Santos, A. L. B. 1996, “Otimização de Ensaios Utilizados na Determinação dos Coeficientes da Equação de Taylor Expandida”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- Carneiro, F. L. 1996, “Análise Dimensional e Teoria da Semelhança de Modelos” 2ª edição Ed. UFRJ Rio de Janeiro.
- Lourenço, C. J., 1996, “A Usinabilidade do Aço Inoxidável Austenítico ABNT 304, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

- Machado, A. R., da Silva, M. B., 1998, “Usinagem dos Metais” Ed. UFU Uberlândia.
- Milan, J. C. G., 1999 “Usinabilidade de Aços para Matrizes de Injeção de Plásticos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- Murphy, G., 1984 “Similitude in Engineering” The Ronald Press Company New York.