

ANAIS/PROCEEDINGS

XI CONGRESSO BRASILEIRO

DE ENGENHARIA MECÂNICA

11th ABCM MECHANICAL ENGINEERING CONFERENCE

11, 12 e 13 de Dezembro de 1991 - São Paulo, SP, Brasil

Edição Especial da Revista Brasileira de Ciências Mecânicas - ISSN 0100-7386

FAPESP

Código USP 3.04.00.00.0



AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA PROFUNDIDADE
LIMITE DE DRESSAGEM NA RETIFICAÇÃO DE PRECISÃO.

REGINALDO TEIXEIRA COELHO e JOÃO FERNANDO G. OLIVEIRA
Escola de Engenharia de São Carlos – USP
São Carlos – SP

RESUMO

Sabe-se, através de estudos teórico-experimentais, que o aumento da profundidade de dressagem melhora a agressividade do rebolo. Este aumento de agressividade, no entanto, não é indefinido. Há uma profundidade limite, $ad\ lim$, a partir da qual a agressividade se estabiliza. Propõe-se uma metodologia para determinar $ad\ lim$ e esta é aplicada a dois rebolos com granulometrias diferentes. O Método do Disco Retificado é desenvolvido para avaliar a face do rebolo.

1 – INTRODUÇÃO

Todas as novas tecnologias de automação da manufatura (CIM, FMS, CAPP, etc) baseiam-se no fato de que os processos de fabricação são dominados. É necessário, portanto, o completo conhecimento dos processos de fabricação, estes são a base dos sistemas produtivos e, portanto, são fundamentais para que os benefícios proporcionados por estas novas filosofias sejam atingidos.

Devido à sua utilização como processos de fabricação ser ainda recente, os processos abrasivos são pouco conhecidos do ponto de vista tecnológico. Entre eles a retificação é sem dúvida o mais conhecido. O interesse no seu estudo tem crescido muito nos últimos anos [2], principalmente pela necessidade de automatizá-lo, o que não é possível sem o seu total domínio. O conhecimento e domínio do processo de retificação se mostra, portanto, um ponto muito importante, em certos casos até decisivo, para o sucesso na implantação da automação industrial nos modernos conceitos de flexibilidade e Integração.

Os tempos de montagem e ajustagem da máquina, na retificação, são normalmente elevados. A ajustagem da máquina para produção de um lote, algumas vezes gasta mais tempo que a fabricação do lote todo [2]. Outro ponto é a carência de métodos de avaliação de desempenho do processo. Necessitam-se dispositivos e técnicas de medição práticas que possibilitem o estudo do processo em laboratório para posterior aplicação no ambiente industrial com maior velocidade e garantia de sucesso.

Embora tenha havido muito estudo sobre dressagem e sua influência nas variáveis de saída do processo de retificação, a maioria dos trabalhos analisa este ponto de forma qualitativa. Desta forma estes resultados não são aplicáveis diretamente na especificação de ad e Sd para uma determinada operação. Sua grande aplicação é como orientação na busca dos melhores valores para ad e Sd . Sendo assim com base nestes estudos, as condições de dressagem para uma operação de retificação são determinadas adotando-se o grau de recobrimento de dressagem $Ud=1$ que proporciona a máxima vida ao rebolo e uma rugosidade uniforme [3]. A rugosidade desejada (em acabamento ou desbaste) está ligada à granulometria do rebolo.

Este valor de Ud também proporciona a máxima agressividade para uma dada profundidade de dressagem ad [2]. Na otimização da operação procura-se aumentar a agressividade, através do aumento da profundidade de dressagem ad [2].

Este aumento na agressividade, porém, não é indefinido. Há um valor de ad a partir do qual a porção do grão abrasivo arrancada pelo dressador não melhora significativamente a capacidade de remoção do rebolo (agressividade). Este valor de profundidade de dressagem pode ser chamado "profundidade limite de dressagem ad lim". A profundidade limite de dressagem é, portanto, o ponto fundamental para a determinação das condições de dressagem.

Visando contribuir para uma melhor compreensão do processo de retificação, estudando particularmente a dressagem e sua influência no processo de retificação, este trabalho objetiva:

- Desenvolver um método para avaliação de agressividade de rebolos chamado "Método do Disco Retificado";
- Propor uma metodologia para determinação da profundidade limite de dressagem, $ad\ lim$, utilizando como avaliador de desempenho do rebolo o Método do Disco Retificado;
- Aplicar a metodologia proposta para determinação de $ad\ lim$ em dois rebolos com granulometrias diferentes.

2 – CONCEITUAÇÃO DE PROFUNDIDADE LIMITE DE DRESSAGEM
(ad lim)

Numa operação de dressagem corretamente efetuada a ação da ferramenta sobre a face de trabalho do rebolo a torna mais agressiva gerando dois efeitos: o macro e o micro efeito de dressagem. O macro efeito é causado pela transferência do perfil de atuação do dressador para a face de trabalho do rebolo, devido aos movimentos relativos entre rebolo e dressador. O macro efeito provoca alta agressividade na face de trabalho levando a uma maior capacidade de remoção de material. O micro efeito é causado pela ação do dressador sobre os grãos abrasivos, fraturando ou arrancando-os. O aumento da agressividade, neste caso, se deve à friabilidade do material abrasivo e à capacidade de

0825762

SYSNO	07.25762
PROD	001816
345	
ACERVO EESC	

retenção dos grãos na estrutura do rebolo. Estes efeitos são particularmente interessantes na explicação de alguns fenômenos que ocorrem no processo de retificação.

O estudo dos microfenômenos que ocorrem nos processos de usinagem por remoção de cavaco é indispensável para aumentar seu rendimento e qualidade, principalmente no caso dos processos de fabricação que utilizam ferramentas com geometria de corte indefinida, que possuem poucos estudos e dados para a compreensão dos microfenômenos de remoção de cavaco. Embora ocorram semelhanças entre os processos de remoção com ferramenta de geometria definida e indefinida, os microfenômenos são totalmente diferentes, pois nestes a geometria e o número de arestas cortantes não são realmente conhecidos. Devido ainda, ao fato da retificação ser utilizada para acabamentos, as profundidades de corte são pequenas dificultando o estudo da exata interação entre as arestas cortantes e o material.

Devido à natureza frágil dos materiais abrasivos, estes formam arestas de formas e tamanhos aleatórios quando são fraturados durante a dressagem. Em geral apenas partes mais salientes dos grãos formam arestas de corte. Através de levantamentos topográficos realizados por perfilômetros e teoria estatística chega-se a duas formas médias de aresta de corte encontradas nas superfícies de rebolos [1]. Para ambas pode-se fazer analogia com as ferramentas de geometria definida e identificar-se os ângulos de saída, de folga e de incidência conforme mostrado na figura 2.1.



Figura 2.1 - Arestas de Corte em Retificação

Baseado nestas formas pode-se estabelecer uma forma hipotética de aresta de corte que possibilite o desenvolvimento de diversas teorias sobre a remoção de cavacos na retificação. O fato de que há uma superfície plana na face de folga das arestas da figura 2.1, a qual tem área variável, é compensado pelo raio de ponta r_s que aparece na aresta hipotética. Esta forma hipotética de aresta de corte é mostrada na figura 2.2.

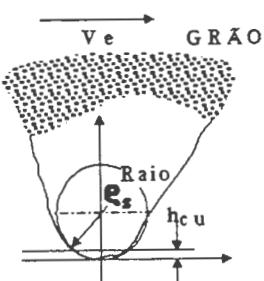


Figura 2.2 - Aresta de Corte hipotética

Esta grandeza é definida e já utilizada em outros processos como torneamento, com a diferença de que em retificação o raio de ponta da ferramenta é estimado estatisticamente. Para se ter idéia de comparação o grau de afiação de torneamento é cerca de 100 vezes maior que o da retificação que está em torno de 0.2. Isto, como é mostrado à frente, é que diferencia os dois processos mostrando as dificuldades encontradas na remoção através do processo de retificação. Quando uma aresta interage com o material da peça seguindo a trajetória do movimento do rebolo, três regiões podem ser definidas, conforme mostra a figura 2.3.

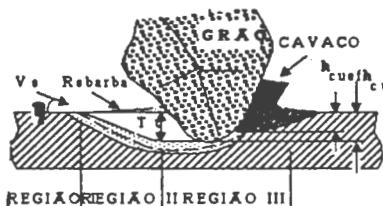


Figura 2.3- Regiões do Fenômeno de Remoção

A energia é gasta em deformações e atrito da face de folga da aresta com o material da peça.

Região II- seguindo a trajetória, a aresta do grão aumenta a interação com a peça e a deformação aumenta atingindo o limite plástico do material. Nesta etapa, embora ocorram deformações elasto-plásticas, ainda não há formação de cavacos. Apenas o material é deformado elástico-plasticamente formando rebarbas lateralmente ou simplesmente perdendo a parcela de deformação elástica e escoando de volta à posição normal, atritando com a superfície de folga da aresta do grão abrasivo. Uma parcela a mais de energia é dispensada na deformação plástica e em atrito nas superfícies laterais e de folga da aresta.

Região III- conforme a aresta do grão abrasivo prossegue na trajetória, aumenta a deformação do material até um valor T_u e a pressão atinge o valor P_c , chamado pressão crítica de corte. Esta pressão é a mínima necessária para que ocorra ruptura do material no processo de corte. A partir deste ponto, então, é que se inicia o corte e consequentemente a formação de cavacos. Devido à parcela de deformação elasto-plástica resultante das primeiras fases, apenas parte da profundidade de corte h_{cu} é aproveitada, sendo esta parte chamada $h_{cu,ef}$. Nesta região é que verdadeiramente a energia é gasta na formação de cavacos.

Através da dressagem pode-se alterar o grau de afiação e consequentemente a distribuição de energia entre as três regiões que compõem a remoção de cavacos na retificação. A utilização de altos valores de S_d e ad produz alta agressividade na face do rebolo, pois neste caso, o macroefeito está presente e o microefeito tem caráter bastante agressivo. Há baixa densidade de arestas cortantes fazendo com que a Pressão crítica de corte P_c seja atingida mais cedo aumentando a região III e também a parcela de energia gasta na formação de cavacos. O aumento de ad provoca aumento na área de choque entre a ponta do dressador e o grão abrasivo aumentando a possibilidade de ocorrerem arestas mais pontiagudas (com menor raio r_s) com maior grau de afiação e agressividade do microefeito.

O aumento da profundidade ad pode, assim, ser utilizado para melhorar a eficiência do processo até o limite em que não mais diminui o raio de ponta da aresta r_s , não havendo significativo aumento na agressividade do microefeito. A partir deste ponto a camada de rebolo removida pelo dressador continua crescendo sem que haja correspondente aumento na agressividade K . Este valor de ad é chamado "PROFOUNDIDADE LIMITE DE DRESSAGEM". Valores de ad maiores que ad limite não devem, portanto, ser utilizados para que o volume de rebolo removido durante a dressagem seja minimizado com relação ao volume de material removido por ele.

3 - METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE ad lim

A agressividade do microefeito é predominantemente determinada pela profundidade ad , assim como a agressividade do macroefeito está ligada à forma da ponta do dressador e ao passo de dressagem S_d [2]. Como a forma do dressador praticamente não varia durante os ensaios para um rebolo, basta manter S_d constante e não há modificações na agressividade do

macroefeito. Isto permite isolar o ação do microefeito na agressividade. Desta forma adota-se um valor de S_d , que é mantido constante para a faixa de variação de ad , e mede-se a agressividade para cada conjunto de valores (S_d, ad). Com isto consegue-se uma curva de agressividade $K \times$ profundidade ad na qual o passo S_d é constante e o crescimento da agressividade é atribuído principalmente ao microefeito através da variação da profundidade ad . Para que toda a faixa de valores usuais de S_d seja verificada (entre 0.1 e 0.4mm/volta), escolhe-se valores de S_d conforme o número de ensaios a serem realizados. A combinação dos valores de ad e S_d que resulta em grau de recobrimento $U_d=bd/S_d$ menor que um não deve ser utilizada [2]. A relação dos valores utilizados nos ensaios estão na tabela I, juntamente com os correspondentes valores de U_d e bd (largura de atuação do dressador) para cada valor de profundidade ad .

0.6mm, a diferença não ultrapassa 0.8%. Substituindo estes valores na equação (1):

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{KFn}{b\sqrt{8r\delta}} \quad (2)$$

Resolvendo a equação diferencial (2) pode-se encontrar a forma e os parâmetros da curva $\delta \times t$ obtida no ensaio com o Método do Disco Retificado. O principal parâmetro da curva é a agressividade K . A equação (2) é da forma conhecida como problema de Cauchy [7] cuja solução é dada definindo-se a função $F(\delta, t)$ da seguinte forma:

$$F(\delta, t) = \int \frac{dx}{f(t, x)} \quad e \quad F'(\delta, t) = \frac{1}{f(\delta, t)} \quad \text{tal que } f(\delta, t) \neq 0 \quad \text{e } \delta(t_0) = \delta_0$$

desta forma (2) pode ser escrita a como:

$$\frac{\delta'(t)}{f(\delta, t)} = 1 \quad \text{ou seja} \quad \frac{\delta'(t)}{f(\delta, t)} F'(\delta, t) = 1 \quad (F\delta)'(t) = 1$$

Tabela I - Condições de Dressagem ensaiadas

REBOLO	SEA 60V	S_d	0.15						0.20						0.30						0.35						ad	U_d	bd	ad	U_d	bd			
		mm/v	.02	.03	.04	.05	.06	.02	.03	.04	.05	.06	.08	.03	.04	.05	.06	.08	.04	.05	.06	.08	.09	.05	.06	.02	.03	.04	.05	.06	.20	.35	.40	.47	.58
		mm	.02	.03	.04	.05	.06	.02	.03	.04	.05	.06	.08	.03	.04	.05	.06	.08	.04	.05	.06	.08	.09	.05	.06	.02	.03	.04	.05	.06	.20	.35	.40	.47	.58
REBOLO	SEA 40V	S_d	0.15						0.25						0.35						0.40						ad	U_d	bd	ad	U_d	bd			
		mm/v	.02	.03	.04	.05	.06	.02	.03	.04	.05	.06	.08	.03	.04	.05	.06	.08	.04	.05	.06	.08	.09	.05	.06	.02	.03	.04	.05	.06	.35	.45	.55	.68	.70
		mm	.02	.03	.04	.05	.06	.02	.03	.04	.05	.06	.08	.03	.04	.05	.06	.08	.04	.05	.06	.08	.09	.05	.06	.02	.03	.04	.05	.06	.35	.45	.55	.68	.70

O método utilizado para medição da agressividade é chamado "Método do Disco Retificado". Trata-se de um método bastante prático, baseado no Método da Esfera Retificada proposto por Nakayama [8] em 1979, cujo fundamento está em se retificar um corpo de prova em operação de mergulho com força constante. No método Nakayama o corpo de prova é uma esfera de aço enquanto no outro é um pequeno disco. Durante a retificação a profundidade retificada no disco (δ) é registrada com uma base de tempo (t). A forma desta curva $\delta \times t$ fornece dados suficientes para a determinação precisa da agressividade K do rebolo. Com o auxílio de um microcomputador este método torna-se extremamente rápido e prático para a medição da agressividade. Uma ilustração do sistema está na figura 3.1.



Figura 3.1 - Método

O volume de cavaco removido no tempo por unidade de largura retificada, Zw' , é dado pela fórmula de Hahn e Lindsay [6,7,8] para a força normal de retificação, Fn' :

$$Zw' = K(Fn' - Fno') \quad (\text{mm}^3/\text{mm}s) \quad (1)$$

Considerando-se que para a retificação de aços temperados (materiais ETG, "Easy To Grinding") com rebolo bem dressado, apenas uma pequena parcela da energia é gasta em atrito e riscamento, ou seja, as regiões I e II da figura 2.3 são muito pequenas [6] a força normal crítica Fno' é aproximadamente zero. A área retificada e o volume de cavaco removido durante o ensaio, podem ser escritos como:

$$Zw' = \frac{d\delta}{dt} A \quad A = b\sqrt{8r\delta}$$

onde b é a largura do disco e r o seu raio. A aproximação na área é permitida devido à grande diferença de diâmetros entre disco e rebolo (cerca de 10 vezes). Para os valores de profundidade δ no ensaio, entre 0 e

que integrando em ambos os lados entre t_0 e t e aplicando o teorema fundamental do cálculo resulta em:

$$F(\delta(t)) = t - t_0$$

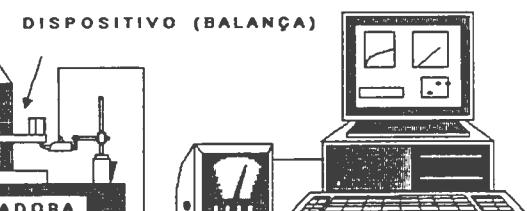
cuja função inversa é:

$$\delta(t) = F(t - t_0) \quad (3)$$

Resolver a equação (2) significa, portanto, resolver a integral definida pela função $F(\delta, t)$ e achar a sua inversa. Aplicando-se, então, o método à equação (2) tem-se:

$$\delta(t) = \left(\frac{3}{2} \frac{KFn}{b\sqrt{8r}} \right)^{2/3} t^{2/3} + \delta_0 \quad (4)$$

A curva registrada no ensaio do disco tem a



do Disco Retificado

forma da equação (4) e para calcular o valor de K basta uma regressão dos pontos coletados. O coeficiente de correlação desta regressão mostra o grau de ajuste do modelo ao ensaio realizado. Estes cálculos são realizados para cada combinação de S_d e ad a fim de se montar as curvas $K \times ad$. Os ensaios são efetuados em uma retificadora tangencial plana equipada com sistema de medição de passo e profundidade de dressagem, S_d e ad , e agressividade pelo método do disco retificado. Todos os sistemas são gerenciados por um microcomputador PC-AT equipado com interface A/D para medição do passo S_d e do deslocamento δ . O passo de dressagem é medido através de um transdutor indutivo de posição cujo sinal é recebido pela interface A/D do microcomputador.

4 - DETERMINAÇÃO DE ad lim PARA DOIS REBOLOS

Cada ensaio se inicia com uma dressagem de preparação da face do rebolo antes da dressagem com as condições a serem ensaiadas. Esta dressagem é realizada com passo $S_d=0.05\text{mm/volta}$ e profundidade $ad=0.01\text{mm}$.

Para maior uniformidade da face é efetuado "spark-out" em três passadas. Após esta operação efetua-se a dressagem com os valores de S_d e ad a serem ensaiados e em seguida a agressividade é medida com o Método do Disco Retificado. Os pontos da curva de deslocamento $\delta \times t$ são coletados pelo microcomputador que também faz a regressão dos pontos calculando os valores de K e do coeficiente de correlação. Após os ensaios do primeiro rebolo o dressador é girado em 90 graus, para melhor aproveitamento do diamante. Antes dos ensaios de cada rebolo, o dressador é medido por um projetor de perfis levantando-se o valor da largura de atuação, bd , para cada valor de ad a ser ensaiado. Tal operação é realizada a fim de que se possa sempre trabalhar na faixa de valores de grau de recobrimento de dressagem Ud entre 1 e 3.5, que é a faixa mais interessante para a agressividade, vida e rugosidade [3,4]. São ensaiados dois rebolos com granulometrias diferentes e os resultados estão na figura 4.1.

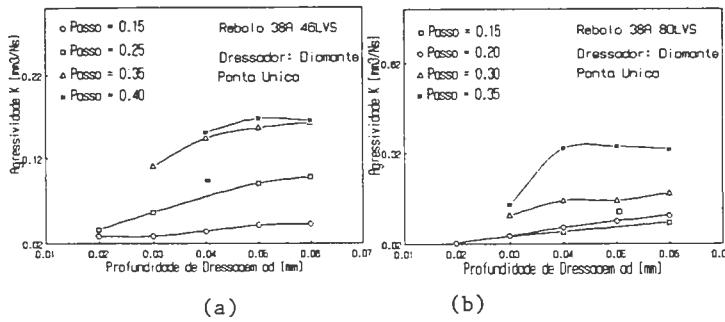


Figura 4.1 - Resultados para ad lim

4.1 - Discussão

Cada curva da figura 4.1 representa um valor constante do passo de dressagem S_d . Desta forma pode-se dizer que ao longo de cada uma só varia a parcela de agressividade atribuída ao macroefeto, já que o perfil do dressador e o passo de dressagem são mantidos constantes. A medida que se aumenta o valor de ad , dentro de uma única curva, a área de choque entre o grão abrasivo e a ponta do dressador também cresce de modo a aumentar a possibilidade de formação de arestas mais pontiagudas que levam a um menor raio de aresta δ_s . Com a diminuição de δ_s o grau de afiação aumenta fazendo com que a pressão crítica de corte seja atingida mais cedo, ou seja, o tamanho da região III do fenômeno de remoção de cavacos aumenta. Este aumento da região III é que causa, por sua vez, o crescimento da agressividade K . Para valores pequenos de S_d e ad este efeito é menos acentuado muito embora o grau de recobrimento seja próximo de um. Como se nota na observação das curvas da figura 4.1 o aumento da profundidade ad faz com que a agressividade também cresça. Este crescimento, no entanto, é limitado, praticamente se estabilizando a partir de um certo valor de ad . Para o rebolo 38A 46LVS o valor de estabilização é 0.05mm, enquanto para o 38A 80LVS este valor está em torno de 0.04mm. Estes são, portanto, os valores da profundidade limite de dressagem (ad lim) para o respectivos rebolos.

A regressão exponencial dos pontos coletados mostra valores de coeficiente de correlação muito próximos de um indicando o bom ajuste do modelo matemático proposto. Na figura 4.2 mostra-se uma curva calculada através da fórmula (4) (linha contínua) e os pontos coletados durante um ensaio.

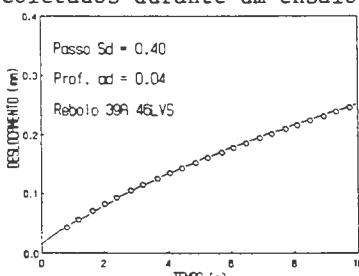


Figura 4.2 - Curvas Teórica e Prática

torna mais rápido e confiável. A duração do ensaio é curta, sendo o tempo médio de cada um aproximadamente 60 segundos. Pode ser aplicado para todas as condições de dressagem utilizadas neste trabalho, o que pode ser notado pelos valores do coeficiente de correlação encontrados.

Ligeira melhora é observada, no coeficiente de correlação, para as condições de maior do Disco agressividade, altos valores de S_d e ad .

Através das curvas da figura 4.1 constata-se a existência de uma profundidade limite de dressagem e sua independência do passo de dressagem para os dois rebolos ensaiados. Observa-se também que há uma certa relação entre o valor ad lim e o tamanho do grão abrasivo, pois para o rebolo 38A 46LVS ad lim é igual a 0.05mm e para o 38A 80LVS é igual a 0.04mm. Para uma afirmação mais precisa a respeito desta relação é necessário um trabalho envolvendo uma maior número e diversidade de rebolos, o que não se mostra difícil uma vez que o Método do Disco Retificado é muito prático e rápido para a medição da agressividade K .

Como exemplo, pode-se determinar as condições de dressagem para uma operação qualquer de retificação partindo-se da profundidade limite de dressagem. Para o rebolo 38A 80LVS, cuja profundidade limite é 0.04mm, deve-se medir bd para este valor de ad , no perfil do dressador, e adotar tal valor para S_d , de modo que $Ud=bd/S_d$ seja igual a um, o que proporciona máxima agressividade, rugosidade uniforme e máxima vida. Se o valor ad limite for determinado para diversos rebolos, pode-se montar um banco de dados para escolha das condições de dressagem quando da elaboração de folhas de processos, quer para sistemas manuais ou automatizados.

ABSTRACT

It is known, through theoretical and experimental works, that the rise of the dressing depth of cut improves the grinding wheel face sharpness until a limit. There is a limit dressing depth of cut, ad lim, on which the sharpness stabilizes itself. It is suggested a method to determine the limit dressing depth of cut and it is used for two different grain sized grinding wheel. The Grinding Disc Method is developed to evaluate the grinding wheel performance.

6 - BIBLIOGRAFIA

- [1]- KONIG,W. Schleifen mit schleifscheiben. In: Fertigungsverfahren. Verlag GmH, VDI, 1980. v2, cap. 1 317p. p1-20.
- [2]- OLIVEIRA,J.F.G. de. Analise da Ação do Macroefeto de Dressagem de Rebolos no Desempenho do Processo de Retificação. Doutorado EESC-USP 1988
- [3]- BIANCHI,E.C. Ação das Condições de Dressagem de Rebolos na Retificação de Precisão. Mestrado EESC-USP, 1989.
- [4]- HANH,R.S. & LINDSAY,R.P.. Basic Relationship in Precision Grinding. In: Principles of Grinding. Machinery: 55-62 July 1971 Parte I,II, III
- [5]- LI CHUN,L. & JIZAI,F. A Study of Grinding Forces Mathematical Model. In: Annals of CIRP, 29/1, 1980. p245-249.
- [6]- PACITTI,V. & RUBENSTEIN,C.. The Influence of Dressing Depth of Cut on the Performance of a Single Point Diamond Dressed Alumina Grinding Wheel. Inter Jour of Mach Tool Des and Res 1972, Vol 12.p267-279.
- [7]- SOTOMAYOR,J.. Lições de Equações Diferenciais Ordinárias. Inst de Matem Pura e Apl CNPq, RJ 1972
- [8]- NAKAYAMA, K. et alii. Sharpness Evaluation of Grinding Wheel Face by the Grinding of Steel Ball. In: Annals of the CIRP, 29/1, 1980 p. 227-231.