

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS LIGANTES (RESINÓIDE E VITRIFICADO) E DOS GRÃOS ABRASIVOS (CBN E ÓXIDO DE ALUMÍNIO) NA AGRESSIVIDADE DA SUPERFÍCIE DE CORTE

Eduardo Carlos Bianchi
Rodrigo Daun Monici
Eraldo Jannone da Silva
Paulo Roberto de Aguiar

Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica, 17033-360, Bauru, SP, Brasil. E-mail: bianchi@bauru.unesp.br.

Resumo

Neste trabalho foi desenvolvido um estudo sobre a capacidade de remoção de material ocasionado no processo de retificação. A retificação é um dos processos utilizados para se obter um elevado grau de acabamento superficial, pequenos erros dimensionais e de forma. Assim, tal processo utiliza como ferramenta o rebolo, que é o responsável pela remoção de material, sendo que tais ferramentas são compostas basicamente por um núcleo, ligante e grãos abrasivos. Dessa forma, nesse trabalho efetuou-se um estudo sobre a capacidade de remoção de material dos rebolos, sendo tal propriedade expressa pela agressividade. As ferramentas testadas nesse trabalho foram basicamente rebolos convencionais de Óxido de Alumínio (Al_2O_3) e rebolos superabrasivos de CBN (Nitreto de Boro Cúbico), sendo que entre os rebolos superabrasivos, testou-se os rebolos de CBN com ligante resinóide, vitrificado e resinóide de alto desempenho, buscando-se assim analisar o desempenho de tais ferramentas quanto à agressividade apresentada pelas mesmas.

Palavras-chave: Rebolos, Superabrasivos, Agressividade, Ligantes

1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, a operação de retificação é utilizada em processos de acabamento onde a qualidade superficial do material retificado, erros dimensionais e erros de forma são fatores de extrema importância e, conseqüentemente, devem ser controlados.

Trata-se de um processo de usinagem onde há um grande número de arestas de corte (sem geometria definida) agindo simultaneamente. O desgaste destas arestas, e da superfície de corte do rebolo, é causada por fatores mecânicos e físico-químico. Este desgaste está diretamente relacionado à usinabilidade do material, que reflete a vida útil do rebolo.

A escolha adequada das condições de usinagem e das especificações do rebolo podem otimizar a vida útil da superfície de corte do rebolo, de modo a proporcionar uma maior capacidade de remoção de material. A quantificação da capacidade de um rebolo em remover material é usualmente denominada agressividade da superfície de corte.

Este trabalho tem como objetivo o estudo da agressividade da superfície de corte de rebolos convencionais (óxido de alumínio) e superabrasivos de CBN (nitreto cúbico de boro), fabricados com ligantes resinóide, resinóide de alto desempenho e vitrificado, em função dos parâmetros de entrada: velocidade de corte, afiação do rebolo (dressagem ou perfilamento/avivamento) e tipo de ligante. Assim, através de tais parâmetros procurou-se estabelecer a correlação existente entre tais ferramentas e o parâmetro analisado.

2 - CONCEITOS GERAIS SOBRE REBOLOS

A retificação é um dos processos de acabamento mais utilizados na fabricação de peças de precisão, e que exige um excelente grau de acabamento superficial; mesmo sendo este um dos processos de usinagem ainda menos dominado tecnologicamente, se comparado aos processos convencionais de usinagem (torneamento, furação, fresamento etc.). A retificação consiste basicamente na usinagem de uma peça através de uma ferramenta chamada rebolo, cuja forma é semelhante à de um disco, constituído de um núcleo, ligante e os grãos abrasivos. Os grãos abrasivos podem ter como constituição o Óxido de Alumínio Al_2O_3 (rebolo convencional) ou de grãos de CBN - Nitreto de Boro Cúbico (rebolos superabrasivos), unidos por meio de um ligante, sendo os mais encontrados no mercado o ligante resinóide, vitrificado, convencional e resinóide de alto desempenho.

Nailor, em 1989, já afirmava que a usinagem com rebolos superabrasivos deve proporcionar um custo de produção inferior, por peça, em média 30 a 50% em relação a usinagem com rebolos convencionais, utilizando-se condições de usinagem que promovam o menor desgaste possível da sua superfície de corte (superfície do rebolo responsável pela remoção de metal da peça retificada). Entretanto, a redução de custo somente será viável se o rebolo, utilizado sob determinadas condições de usinagem e afiação, proporcionar peças com qualidade aceitável, ou seja, com erros de forma e geométricos aceitáveis, rugosidade superficial adequada e sem danos metalúrgicos significativos (modificações na microestrutura do material como encruamento, tensões residuais etc.).

Segundo Krar e Ratterman (1990), como consequência dos esforços contínuos para melhorar a qualidade dos produtos e os métodos de fabricação, têm sido desenvolvidas novas máquinas-ferramenta e materiais para as ferramentas de corte. Alguns tipos de materiais composto, comprovadamente, provocam grandes dificuldades de usinagem, ou até mesmo impossibilidade, quando torna-se necessário que sejam submetidos ao processo de retificação com rebolos convencionais.

Os rebolos superabrasivos, quando comparados com os rebolos convencionais, têm-se mostrado superiores sob vários aspectos. Porém os rebolos superabrasivos não se adaptam a todos os tipos de materiais, cabendo ressaltar que tais rebolos possuem grande eficiência na retificação de metais ferrosos, endurecidos superligas de cobalto e níquel. Os rebolos superabrasivos apresentam também grande resistência aos esforços de corte, sendo que os mesmos suportam grandes esforços físicos, quando comparados com o rebolo convencional. O rebolo superabrasivo apresenta também como característica a ocorrência de uma rugosidade média menor se comprado com o rebolo convencional, além de suportar e dissipar grandes solicitações térmicas mais facilmente diminuindo a temperatura na região de corte, impedindo assim que ocorra a queima da peça durante a retificação.

Segundo Bianchi et al. (1998), a operação de retificação é promovida através de uma ferramenta a qual é responsável pela transferência da energia da máquina à peça e dessa forma, a mesma deve apresentar grande resistência ao desgaste, característica fundamental dos rebolos superabrasivos. Assim, os rebolos superabrasivos apresentam grande resistência ao desgaste, principalmente quando utilizados na retificação de aços de difícil retificação, ou seja, DTG (Difficult To Grinding). Na retificação de aços DTG, os rebolos convencionais

perdem seus grãos abrasivos mais facilmente, gerando elevadas forças de corte, temperatura pelo desgaste excessivo, elevada rugosidade média e temperatura na região de corte. Na retificação com rebolos superabrasivos, os Grãos de CBN - Nitreto de Boro Cúbico, apresentam grande resistência ao desgaste, gerando dessa forma forças menores de corte, temperaturas inferiores pela melhor dissipação de calor ocasionada pelo rebolo superabrasivo, valores inferiores de rugosidade média e temperatura.

Segundo Klocke e König (1995) a melhoria do processo de retificação somente pode ser conseguida com a utilização de grãos superabrasivos como o CBN. O potencial de alto desempenho deste material abrasivo resulta da sua extrema dureza e resistência ao desgaste, aliadas às suas altas resistências à temperatura e condutibilidade térmica. No campo dos rebolos de CBN é observado um rápido crescimento do uso dos ligantes vitrificados na indústria. Este tipo de ligante é frágil e extremamente resistente ao desgaste e possui uma boa estabilidade térmica. Uma outra vantagem significativa da utilização de ligante vitrificado em rebolos de CBN, resulta do fato do mesmo proporcionar boa porosidade e boas propriedades de auto afiação dos rebolos, o que, usualmente, simplifica o método de condicionamento destes.

Os rebolos utilizados na operação de retificação podem apresentar dois tipos de efeitos ocasionados pelo processo de dressagem, que são o macroefeito e microefeito. O microefeito é ocasionado pela fragmentação do ligante através dos esforços mecânicos de retificação atribuídos ao mesmo e ao estado de afiação de cada grão abrasivo. O macroefeito corresponde à rosca gerada na superfície de corte do rebolo. Quando um rebolo é dressado com grau de recobrimento de dressagem próximo à unidade, os fenômenos do macro e micro efeito de dressagem são máximos. Assim, o microefeito é principalmente ocasionado pelo desprendimento do grão abrasivo do ligante devido aos esforços mecânicos pelo aumento contínuo da área de corte do topo do grão abrasivo, promovendo mais tarde seu desprendimento do ligante.

A agressividade de um determinado rebolo é diretamente relacionada com o tipo de ligante que constitui a ferramenta, sendo que os principais ligantes disponíveis no mercado são o resinóide e o vitrificado. Dessa forma tais ligantes apresentam características próprias que influem nos resultados de agressividade. As principais características de rebolos com ligante vitrificados são: Boa resistência à abrasão; boa capacidade de manutenção da forma geométrica; vida longa; geralmente mais fácil de avivar e afiar do que outros ligantes; podem gerar melhores acabamentos superficiais - concentrações de 150 a 200 podem produzir os melhores acabamentos; renovam mais facilmente o grão abrasivo; apresentam um ligante mais frágil ao impacto; possuem a menor resistência devido a má utilização.

O rebolo com ligante resinóide apresenta as seguintes características: Podem ser utilizados em um grande número de aplicações; Estão disponíveis em um grande número de formas e tamanhos; Podem ser utilizados tanto em retificação refrigerada como a seco; Apresentam um ligante mais dúctil; Boa qualidade de corte; Apresentam uma melhor retenção do grão abrasivo.

A ferramenta que apresenta o ligante convencional possui as seguintes características: Não apresenta uma retenção do grão abrasivo; Apresenta um ligante razoavelmente flexivo; São utilizados num campo mais restrito de aplicações; Vida relativamente curta.

A empresa GE Company USA (1998) recentemente divulgou os resultados de levantamento sobre a utilização dos principais tipos de ligantes, utilizados para a fabricação de rebolos superabrasivos nos anos de 1980 e 1997. De acordo com a pesquisa realizada pela empresa, pôde-se notar uma grande queda na utilização do ligante resinóide (de 76% para 31%) e um acentuado crescimento (de 4% para 32%) na utilização do ligante vitrificado. Assim, estes dois tipos de rebolos são, atualmente, os mais utilizados e em quantidades praticamente iguais.

A agressividade dos rebolos está diretamente ligada a um outro fator de muita importância, que é a porosidade apresentada pela ferramenta que expressa a quantidade de núcleos vazios (poros), ou seja a porosidade está intimamente ligada à granulometria. Assim, a granulometria expressa a quantidade de grãos abrasivos encontrados numa determinada área de superfície do rebolo, onde a ferramenta que apresentar uma maior granulometria e consequentemente uma menor porosidade irá apresentar uma agressividade menor quando comparada à uma ferramenta de características contrárias.

4 - METODOLOGIA

4.1 – Equacionamento Matemático

Segundo Coelho (1991), através de um modelamento matemático, a regressão dos pontos de deslocamento em função do tempo elevado a 2/3 resultam numa boa aproximação da curva gerada pelos mesmos; assim a forma da curva de desempenho será uma reta. Após realizada a regressão, obtém-se o valor da agressividade expressa pela equação abaixo:

$$k = \frac{2b\sqrt{8r}}{3F_n} (a_1)^{2/3} \quad [\text{mm}^3/\text{N.s}] \quad (1)$$

onde: k = Agressividade da ferramenta [$\text{mm}^3/\text{N.s}$];
 b = Largura do disco [mm];
 r = Raio do disco [mm];
 F_n = Força normal aplicada [N]
 a_1 = Coeficiente Angular Médio [--].

Assim através do Coeficiente Angular a_1 obtido por meio de regressão linear, para cada ensaio realizado foi possível a obtenção da agressividade para cada tipo de ferramenta ensaiada, através da equação 1 apresentada anteriormente.

4.2 – Desenvolvimento da balança

A obtenção dos dados quanto ao deslocamento ocasionado pelo desgaste do corpo de prova, ocorreu através da confecção de uma balança, como ilustrada na figura 1. A balança foi confeccionada de modo que a posição do corpo de prova (disco fixo), permanecesse na horizontal, podendo-se assim posicionar o apalpador eletrônico de maneira fácil e sem desvios. No braço da balança foi aplicada uma carga cujo massa foi de 620g, gerando uma força de 6,08N, aplicada diretamente no corpo de prova.

Os ensaios foram elaborados com o corpo de prova permanecendo fixo, sendo que a cada ensaio rotacionou-se o mesmo de 90°.

Os ensaios foram elaborados, de forma a se obterem dados com o maior grau de confiança e precisão possíveis, assim a cada rebolo ensaiado o processo foi repetido individualmente 6 vezes, gerando assim um conjunto de dados que permitiram a construção de gráficos, os quais foram elaborados e analisados separadamente num intervalo de tempo para cada ferramenta testada. Dos gráficos, fixou-se um intervalo de medida e a partir desse intervalo estabeleceu-se a regressão linear.

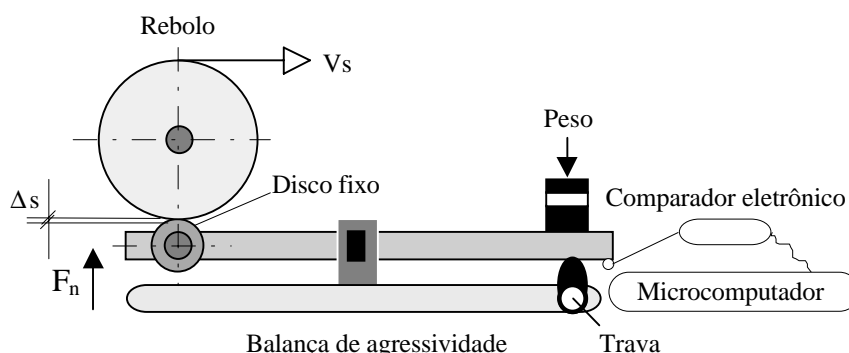


Figura 1: Apresentação esquemática um resultado típico obtido em ensaios.

4.3 – Confeção dos corpos de prova

A construção dos corpos de prova foram elaborados baseado na técnica desenvolvida por COELHO (1991) (conforme figura 1 - disco fixo), onde tais corpos de prova apresentavam diâmetro de 24mm e largura de 1,4mm

Os corpos de prova foram confeccionados com aço VC131, e dureza de 60 HRc com tratamento térmico de têmpera. Durante os ensaios o corpos de prova foram submetidos à uma carga de 6,08 N, como citado anteriormente, parâmetro necessário ao cálculo da agressividade que será apresentado adiante.

4.4 – Aquisição dos dados de deslocamento

A aquisição dos dados foi realizada utilizando-se uma seqüência de equipamentos que podem ser identificados conforme a figura 2. O comparador eletrônico continha um sensor que era posicionado no final do braço da balança, como indicado na figura 1.

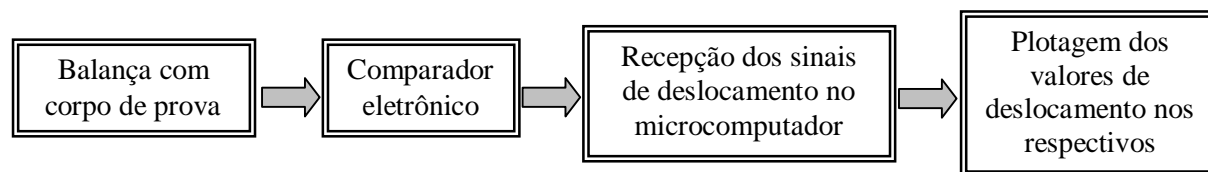


Figura 2 - Ordem de plotagem dos valores do deslocamento.

Os dados referentes ao deslocamento da balança foram monitorados através de um comparador eletrônico, que transmitia o sinal do deslocamento para um codificador próprio do comparador. Realizada a conversão o sinal era enviado para uma placa de aquisição de dados A/D, que enviava o sinal para o software desenvolvido, e por fim os valores foram plotados num arquivo específico. Para a realização do software desenvolvido para a aquisição utilizando-se o Labview 4.1 como linguagem de programação.

O comparador eletrônico foi posicionado a cada ensaio realizado, para garantir que o corpo de prova estava realmente sendo desgastado pela ferramenta. O comparador era posicionado de forma que seu indicador na tela de leitura do comparador eletrônico, indicasse um valor inferior a 50µm. Dessa forma assegurou-se que a partir desse valor o corpo de prova estaria sendo realmente desgastado, sem a interferência de possíveis diferenças entre a posição do apalpador e do corpo de prova devido à sua grande sensibilidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios realizados durante o período proposto, permitiram obter dados que geraram subsídios para uma discussão clara e objetiva, das principais diferenças apresentadas entre os

rebolos de CBN com ligantes resinóide convencional, resinóide de alto desempenho, vitrificado e convencional de Óxido de Alumínio (Al_2O_3). Assim os resultados obtidos quanto à agressividade média ($k_{méd}$) e os valores do coeficiente angular médio ($a_{méd}$) para os quatro tipos de ferramentas testadas, segundo modelamento matemático apresentado.

A tabela 1 contém os valores do coeficiente angular médio ($a_{méd}$), desvio padrão apresentado pelos ensaios e a agressividade média ($k_{méd}$).

Tabela 1 - Resultados globais do Coeficiente angular médio, $a_{médio}$, Desvio padrão e Agressividade média, $K_{média}$.

Rebolo resinóide convencional		
Coeficiente angular médio, $a_{médio}$	Desvio padrão (%)	Agressividade média, $K_{média}$ [$mm^3/N.s$]
0,117	9,61	0,30
Rebolo convencional		
Coeficiente angular médio, $a_{médio}$	Desvio padrão (%)	Agressividade média, $K_{média}$ [$mm^3/N.s$]
0,506	8,99	0,95
Rebolo resinóide de alto desempenho		
Coeficiente angular médio, $a_{médio}$	Desvio padrão (%)	Agressividade média, $K_{média}$ [$mm^3/N.s$]
0,151	19,37	0,43
Rebolo vitrificado		
Coeficiente angular médio, $a_{médio}$	Desvio padrão (%)	Agressividade média, $K_{média}$ [$mm^3/N.s$]
0,125	19,42	0,38

A figura 3 apresenta os valores da agressividade média ($K_{média}$), de todos os ensaios realizados e o desvio padrão apresentados por tais ensaios.

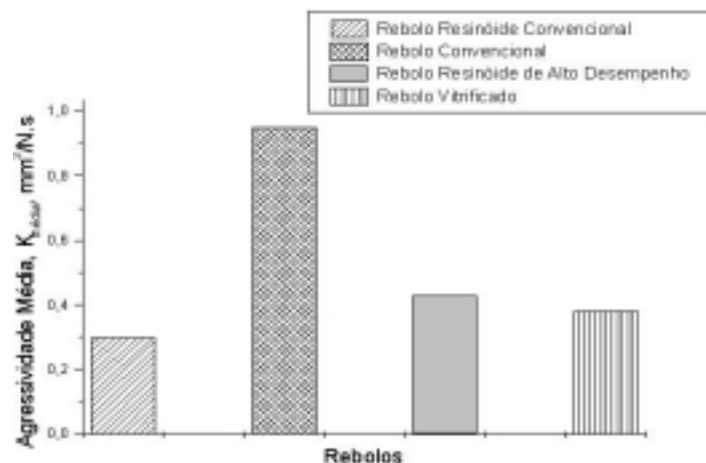


Figura 3 - Gráfico da agressividade média, $K_{média}$, em função dos rebolos.

Para a análise dos resultados de agressividade obtidos, utilizou-se o método One-Way ANOVA e o método Student-Newman-Keuls para as comparações entre os grupos de rebolos ensaiados.

Ao realizar-se o teste One-way ANOVA, com os valores originais da agressividade para cada rebolo, este conjunto de dados não apresentava uma distribuição normal, pré-requisito básico para a aplicação do teste One-way ANOVA, o qual é um teste paramétrico.

Sendo assim, visando-se obter a normalidade do conjunto de dados, os valores individuais de agressividade para cada rebolo foram transformados matematicamente, sendo-lhes extraída a raiz quadrada dos valores individuais. Utilizando-se os valores transformados de agressividade (raiz quadrada dos valores iniciais), executou-se novamente o teste One-way

ANOVA, obtendo-se então a normalidade dos dados, sendo possível a execução e a continuidade do teste.

O quadro de Análise de Variância é apresentado na tabela 2. Foi verificada diferença estatística entre os grupos ($p < 0,0001$).

Tabela 2: Análise de Variância – um critério de classificação (One-way ANOVA)

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	“F”	p
Entre grupos	2,4970	3	0,83234	221,4	<0,0001
Resíduo	0,0714	19	0,00376		
Total	2,5685	22			

Para as comparações múltiplas entre os grupos (tipos de rebolo), utilizou-se o método de Student-Newman-Keuls, com 5% de significância. O resultado obtido é apresentado na tabela 3.

Tabela 3: Comparações múltiplas entre os grupos (* - teste significativo $p < 0,05$; N.S. - Não Significante $p < 0,05$)

	Rebolo Resinóide convencional	Rebolo Convencional	Rebolo Resinóide de alto Desempenho	Rebolo Vitrificado
Rebolo Resinóide convencional		*	N.S.	N.S.
Rebolo Convencional	*		*	*
Rebolo Resinóide de alto Desempenho	N.S.	*		N.S.
Rebolo Vitrificado	N.S.	*	N.S.	

A análise comparativa dos valores de agressividade entre os rebolos superabrasivos, não apresentaram diferenças estatisticamente significastes ($p < 0,05$), conforme apresentado na tabela 3. Este fato deve-se a característica similar dos grãos superabrasivos testados, já que todas as ferramentas superabrasivas ensaiadas são compostas de grãos de mesma dureza e granulometria. Em virtude da própria metodologia de ensaio adotada o ligante não foi solicitado de forma efetiva, sendo que a capacidade de retenção do grão pelo ligante não foi testada devido às pequenas solicitações de corte. Da mesma forma, a maior ou menor capacidade de alojamento de cavaco pelo ligante não foi verificada devido ao pequeno volume de material removido no corpo de prova. Basicamente, a agressividade destes rebolos deve-se ao microefeito gerado na operação de perfilamento, a qual foi similar para todos os rebolos, quanto às velocidades periféricas do rebolo, do dressador rotativo e velocidade de deslocamento transversal da mesa.

O rebolo convencional apresentou maior agressividade quando comparado com os rebolos superabrasivos ($p < 0,005$). Este fato deve-se às diferenças existentes entre as operações de afiação entre as ferramentas convencionais e superabrasivas. A dressagem em rebolos convencionais gera além do microefeito, uma rosca na superfície do rebolo conhecida como macroefeito, a qual é função do grau de recobrimento (Ud). A maior agressividade é obtida quando o rebolo é dressado com Ud=1, fato este adotado quando das dressagem do rebolo convencional utilizado nesta pesquisa. Apesar da menor dureza do grão abrasivo convencional de Óxido de Alumínio, quando comparado com o grão superabrasivo de CBN, nos ensaios realizados observou-se a predominância do macroefeito para o rebolo convencional resultando na maior agressividade deste. Além disso a operação de perfilamento realizada nos rebolos superabrasivos tende a desgastar a superfície do topo do grão superabrasivo, reduzindo sua agressividade.

Apesar da menor agressividade apresentada pelos rebolos superabrasivos, quando comparado aos convencionais, os primeiros têm como características a manutenção por um período de tempo muito superior ao rebolo convencional. Sendo assim o efeito negativo de sua menor agressividade inicial é compensado pela maior capacidade de manutenção desta agressividade, trazendo como benefícios e o comportamento mais estável da forças de corte, rugosidade superficial, menores temperaturas geradas na região de corte.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos em laboratório, através dos equipamentos e métodos propostos, forneceram subsídios para se atingir o objetivo da pesquisa, pois os resultados de agressividade mostraram-se estatisticamente iguais, entre os rebolos superabrasivos de CBN. Assim, o rebolo convencional apresentou um valor de agressividade superior, pelos motivos citados anteriormente, caracterizando tal ferramenta por apresentar um macroefeito superior às ferramentas superabrasivas, característica essa ocasionada pela dressagem do rebolo convencional.

Assim pode-se concluir que para operações de retificação com um reduzido espaço de tempo o rebolo convencional apresenta uma agressividade muito boa, como apresentado anteriormente, porém o mesmo comportamento não seria verificado caso a operação de retificação exigisse um tempo maior, fornecendo subsídios para a capacidade de resistência do grão abrasivo em resistir ao desgaste.

Os rebolos superabrasivos, apresentados nessa pesquisa, apresentaram valores de agressividade estatisticamente iguais, fato ocasionado pela pequena solicitação ocasionada sobre os ligantes, porém tal comportamento é apresentado de maneira mais expressiva em condições de usinagem mais severas, aplicando-se sobre o ligante esforços mecânicos mais elevados.

7. AGRADECIMENTOS

Manifestamos nossos agradecimentos a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio cedido para este trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- OLIVEIRA, J. F., COELHO, R. T. “Avaliação Experimental da Profundidade do Limite de Dressagem na Retificação de Precisão”, XI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - São Paulo, Dezembro 1991.
- NAILOR, B. Truling parameters for conditioning vitrified bond wheels. INTERNATIONAL CONFERENCE, 27.Illinois: GE Superabrasives, 1989. 20p.
- BIANCHI, E.C., DIAS, A. C. P., BORTOLOTO, R. G., FERNANDES, O. C., JUNIOR, C. E. S., AGUIAR, P. R., JUNIOR, M. V. “Análise do Comportamento de Rebolos Convencionais em Função dos Parâmetros de Usinagem e do tipo de Ligante.” RBCM - J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences, Vol. XX – N^o 3 – 1998 – pp. 390-399.
- KRAR, S. F., RATTERMAN, E. “Superabrasives: Grinding and Machining with CBN and Diamond”. *McGraw-Hill, Inc.*, USA. 1990, 196 p.
- KÖNIG, W. Fertigungverfahren Bände 2. Schleifen, Hohnen, Lappen. VDI Verlag GMBH Rudeldorf, 1972.