

AValiação EXPERIMENTAL DAS CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA CRISTALINA DE GRÃOS DIAMANTADOS

Eduardo Carlos Bianchi

Eraldo Jannone da Silva

Fábio Andreassa Guedes Cezar

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

César Antunes de Freitas

Ana Rita Rodrigues Bianchi

Universidade de São Paulo, Departamento de Dentística, Endodontia e Materiais Dentários, 17043-101, Bauru, SP, Brasil.

Resumo

Através de um trabalho multidisciplinar entre Engenheiros e Dentistas, foram estudados oito diferentes tipos de grãos abrasivos de diamantes para a fabricação de pontas diamantadas, e/ou rebolos, de pequeno diâmetro, a fim de se verificar qual o mais adequado para ser utilizado em equipamentos que possuam um pequeno torque disponível. Nos ensaios, o vidro foi desgastado, enquanto a força tangencial de corte era monitorada em tempo real, via computador. O melhor tipo de diamante, dentre os pesquisados, foi aquele que pode remover mais material até que, uma determinada força tangencial de corte máxima fosse alcançada. Desta forma o melhor tipo de diamante foi aquele que apresentou, ao mesmo tempo, as melhores condições de remoção de material e o menor preço.

Palavras-chave: Diamantes, retificação, grãos abrasivos

1. INTRODUÇÃO

Pontas diamantadas, e/ou rebolos de pequeno diâmetro, são ferramentas abrasivas normalmente utilizadas em equipamentos que possuem elevadas rotações, baixo torque e pouca rigidez, se comparados a rebolos com diâmetros maiores. O acionamento destes instrumentos pode ser feito por turbina movida a ar comprimido ou motor elétrico. O acionamento a ar comprimido, em geral, proporciona menor valor de torque disponível e maior rotação. Para acionamento com motor elétrico, o torque disponível é maior; porém a rotação é inferior. Em ambos os casos o tipo de grão abrasivo utilizado para a fabricação das pontas é fundamental, devido a capacidade de corte destes durante o processo produtivo.

Com a evolução dos materiais e dos processos de fabricação, os grãos de diamante das pontas começaram a ser fixados à ferramenta através do processo de eletrodeposição ou

metalização elétrica com material de união à base de níquel, cromo, ou níquel-cromo. Neste processo a ferramenta (cátodo), de material metálico (geralmente aço inoxidável), é imersa numa solução contendo íons metálicos, juntamente com um eletrodo (ânodo) do material metálico que se deseja depositar (geralmente níquel). Usando-se uma membrana porosa, grãos de diamante são mantidos em contato com o que será a superfície ativa da ferramenta. Submete-se então ambos (cátodo e ânodo) a uma diferença de potencial de modo que os íons metálicos se depositem na superfície da ferramenta (cátodo). A deposição contínua destes íons vagarosamente cria uma camada que, por sua vez, envolve os grãos de diamante fixando-os à ferramenta. Isto cria uma superfície abrasiva composta de uma camada de grãos de diamante envolvidos parcialmente por um “ligante” metálico (Chattopadhyay e Hintermann, 1993). Tanto o diamante natural como o sintético podem ser empregados na fabricação destas ferramentas. Desta forma, qual o melhor tipo de diamante para a fabricação de uma ponta para esta aplicação específica? De imediato poderia se imaginar que se o diamante mais nobre fosse utilizado em todas as aplicações sempre o melhor resultado seria possível. Este raciocínio não é correto pois para cada aplicação existe um tipo de diamante que pode aliar desempenho e custo.

Neste sentido, no presente trabalho buscou-se encontrar o melhor tipo de grão de diamante, dentre oito selecionados, para a fabricação de pontas diamantadas para aplicação em equipamentos que possuam um pequeno torque disponível. Optou-se por selecionar oito tipos de grãos abrasivos com diferentes estruturas cristalinas e submetê-los a condições idênticas de ensaio. Procurou-se aliar à análise dos diamantes ao custo de aquisição destes e a respectiva manutenção da capacidade de corte ao longo dos ensaios.

2. ESCOLHA DE GRÃOS DIAMANTADOS

Segundo Davis, P.R. *et al.*(1996), a dificuldade em se avaliar o comportamento de um grão de diamante é um problema que sempre preocupou fabricantes e usuários de ferramentas diamantadas. Embora alguns atributos importantes, tais como o tamanho, resistência a fratura e a estabilidade térmica do grão, têm sido reconhecidos como regras básicas na seleção do grão para uma determinada aplicação, a seleção do diamante mais adequado torna-se complexa.

A primeira grande complexidade reside na dificuldade em se identificar a condição exata de carregamento sobre um grão individual durante uma determinada aplicação. A natureza do processo de corte é influenciada por uma infinidade de grãos, a qual resulta em uma distribuição randômica das forças de corte operantes na interface grão-peça (Davis, P.R. *et al.*,1996).

O advento do diamante sintético possibilitou a obtenção de grãos de diamante, com diferentes propriedades mecânicas e físicas modificando-se apenas o processo de síntese. Atualmente, é possível a produção de diamantes sintéticos na escala que abrange desde grãos menores que 3 µm a grãos maiores que 3 mm, possibilitando ainda uma imensa variedade de formas, resistência e estabilidade térmica. Essa diversidade de características permite que o diamante sintético seja utilizado em uma larga variedade de aplicações abrasivas, como o polimento de cerâmicas ou o corte das pedras de granito de alta dureza (Davis, P.R. *et al.*,1996).

A seguir são apresentadas algumas características dos diamantes utilizados no presente trabalho, bem como sugestões de aplicação e uso, segundo Bailey, M.W. *et al.*1994).

Com a finalidade de auxiliar os fabricantes de ferramentas diamantadas, a empresa De Beers Industrial Diamond Division desenvolveu a tabela 1, onde são encontradas indicações comparativas entre os 12 tipos de diamantes da série PremaDia (Diamantes de Primeira Linha). Para cada tipo, 3 diferentes propriedades são apresentadas, cada uma delas

proporcionalmente quantificada dentro de uma série de 9 quadrículas, através de cores. Na primeira coluna é indicada a resistência do grão ao impacto, à temperatura ambiente, na segunda, esta mesma resistência, após tratamento térmico controlado, e na última, à esquerda da tabela, a estrutura do grão, quanto à sua aparência cristalina. Um número qualquer (que expressa os níveis das 3 citadas propriedades, na ordem descrita), se maior que um outro, não indica que um determinado tipo seja sempre o que possibilita as melhores condições de trabalho. O tipo mais adequado à uma determinada condição de trabalho será aquele que apresentar características de friabilidade (facilidade para fraturar o grão em pedaços, sob uma determinada força ou impacto) tais que possibilitem a existência permanente de arestas cortantes sobre a superfície da ferramenta e que não apresente desgaste demasiadamente acelerado.

Tabela 1 - Algumas características dos diamantes da série PremaDia segundo o catálogo (traduzido) da empresa De Beers Industrial Diamond Division.

Série PremaDia de abrasivos de diamante de primeira linha para a indústria mecânica

	Resistência das partículas à temperatura ambiente		Resistência das partículas à temperatura elevada		Estrutura das partículas		
	Friável	Forte	Friável	Forte	Mosaico	Arestas vivas	Cristalina
PremaDia PDA 999							
PremaDia PDA 989							
PremaDia PDA 878							
PremaDia PDA 768							
PremaDia PDA 657							
PremaDia PDA 656							
PremaDia PDA 446							
PremaDia PDA 665							
PremaDia PDA 555							
PremaDia PDA 545							
PremaDia PDA 433							
PremaDia PDA 321							

Dentre os vários tipos de diamantes produzidos pela De Beers Industrial Diamond Division, listados na tabela 1, foram escolhidos para serem avaliados apenas os identificados pelas siglas PDA 433, PDA 555, PDA 665, PDA 768 e PDA 878 visto que estes são representativos dos vários tipos básicos do conjunto.

Os diamantes da série PremaDia, segundo a empresa De Beers do Brasil LTDA., são apresentados, a seguir em ordem decrescente de friabilidade.

PDA 433: apesar de ser um produto eminentemente adequado para uso com ligantes resinóides, rotineiramente é fixado com níquel; constitui uma solução econômica para uma grande variedade de aplicações de uso geral. Trata-se de um diamante sintético, sendo o mais friável dentre todos os testados, segundo catálogo PremaDia NC1000793, da empresa De Beers Industrial Diamond Division.

PDA 555: projetado para aplicações em que se necessite de uma partícula (grão) mais friável, é um abrasivo de diamante natural, de partículas compactas e com formas irregulares; tem alta resistência térmica e as características do poder cortante dos diamantes naturais.

PDA 665: é afetado apenas a temperaturas extremamente elevadas, como todo o diamante natural; é considerado de primeira classe, por apresentar partículas compactas e bem formadas, presta-se a muitas aplicações de retificação, e suas características o fazem eminentemente adequado para a fabricação de ferramentas por eletrodeposição.

PDA 768: apresenta partículas de arestas vivas, selecionados especialmente, assim como algumas partículas cristalinas compactas, combinação particular de formas que faz com que esse produto seja adequado para uma grande diversidade de aplicações que não requerem um material de resistência muito elevada como o PDA 878.

PDA 878: é um abrasivo de uso geral, destinado a ser utilizado com ligante metálico, é um material cristalino com alta resistência ao impacto a temperaturas ambiente ou elevadas; foi concebido para apresentar um bom comportamento em uma grande variedade de aplicações, com ligante metálico; suas propriedades estão compreendidas entre as do PDA 768 e as do PDA 989.

Além dos diamantes da série PremaDia, foram testados os seguintes diamantes:

TED-II: é um abrasivo com friabilidade e características apropriadas para fabricação de ferramentas por eletrodeposição, onde máquinas de torque razoavelmente elevado são utilizadas.

DMB-G: aplica-se a ferramentas de torque não muito elevado, apresentando friabilidade pouco mais elevada que o diamante PDA-555.

DMB-T: apresenta propriedades semelhantes ao diamante DMB-G, porém é pouco mais friável.

6 - MATERIAL E MÉTODO

Para o estudo comparativo do desempenho de diferentes tipos de grãos de diamante empregados na fabricação de pontas diamantadas foram fabricadas pontas recobertas com grãos superabrasivos de diamantes naturais e sintéticos (granulometria D120/140). Utilizou-se o processo de eletrodeposição de níquel para a fixação dos grãos de diamante na parte ativa da haste metálica, cujo comprimento útil de utilização é de 12mm. O controle da distribuição dos grãos de diamante ao longo deste comprimento útil depende das variáveis do processo produtivo, tais como: tamanho médio dos grãos, intensidade de corrente galvânica, dentre outros. Estas pontas foram ensaiadas em um banco de ensaio composto por três partes básicas: mecânica, eletrônica e computacional.

A parte mecânica do banco de ensaios é constituída de uma máquina retificadora plana, marca *Reti Lite*, com 600 mm de curso longitudinal, 400 mm de curso transversal e com 400 mm de altura entre o rebolo e a mesa. O movimento transversal da mesa é controlado por um motor de corrente contínua com velocidade mínima de 20 mm/min e máxima de 500 mm/min. O movimento longitudinal da mesa é feito por meio de um sistema hidráulico.

No cabeçote da retificadora foi fixado um micromotor de corrente contínua de 31 V de tensão de alimentação, marca DENTEC, apresentando rotação máxima de 24.000 rpm. A

fixação da peça ao cabeçote foi feita com o auxílio de uma peça de nylon, elaborada para que a caneta não se danifique durante o processo de usinagem. Sobre a mesa da máquina retificadora, utilizou-se uma morsa para a fixação dos corpos-de-prova.

A parte eletrônica do banco de ensaios é responsável pela aquisição dos valores de tensão e corrente elétrica que agem sobre o micromotor e conversão desses valores em intensidades compatíveis com a placa de aquisição A/D, da marca NOVUS, com tempo de conversão de 17 ms.

A conversão de valores pela parte eletrônica da montagem consistiu na conversão do valor de corrente consumida pelo micromotor em tensão compatível com a placa de aquisição A/D, conversão do valor de tensão aplicada sobre o micromotor em valores compatíveis com a placa de aquisição A/D e conversão da frequência de rotação do eixo do micromotor em tensão compatível com a placa de aquisição A/D.

Na placa de aquisição A/D os valores de tensão foram transformados em sinais digitais, possíveis de serem interpretados pelo computador e processados por um software desenvolvido para a realização desse trabalho.

O objetivo do software é tratar matematicamente e armazenar em arquivos os valores enviados pela placa de aquisição A/D, a fim de se obter em tempo real a intensidade da força tangencial de corte. Ao final da realização de cada cálculo, o software está habilitado a identificar um ponto, que representa a intensidade da força de corte, em um gráfico Força Tangencial de Corte x Número de Passadas, apresentado diretamente no monitor de vídeo do computador.

O valor da força tangencial de corte (F_t) da ponta pode ser obtida pela equação:

$$T = F_t \cdot (d_s / 2) \quad (1)$$

onde d_s é o diâmetro externo da ponta e T é o torque aplicado pelo micromotor que é obtido pela equação:

$$T = (I \cdot V \cdot 60) / (2 \cdot \pi \cdot n) \quad (2)$$

sendo I e V são os valores de corrente e tensão elétrica aplicados no micromotor da caneta odontológica, e n o número de rotações no eixo do micromotor.

Logo, dois dos valores para a determinação da intensidade do torque instantâneo (T) são variáveis diretamente conhecidas, pois os valores de corrente elétrica instantânea (I) e tensão elétrica instantânea (V) são transformados pela placa A/D em sinais digitais e enviados ao software.

O número de rotações na unidade de tempo (n) no eixo não é obtido diretamente pela montagem eletrônica, devido as dificuldades físicas para a instalação de um medidor de rotação como, por exemplo, um “encoder” no eixo árvore da caneta. Com a utilização dos valores de tensão e corrente elétrica instantâneos é possível determinar a rotação instantânea do eixo árvore do micromotor com a utilização de um modelo matemático, desenvolvido por Aguiar e Rotta (1990), que simula o funcionamento do micromotor de corrente contínua da caneta odontológica.

Escolheu-se o vidro (temperado plano, tipo cristal) como material para a confecção dos corpos-de-prova, pois esse apresenta características mais uniforme, fazendo com que se preste para o estudo da eficiência de corte de grãos de diamante (Vaz, J.C. *et al.*, 1981). Por gentileza da empresa Norton Indústria e Comércio Ltda. (São Paulo - SP), tal material foi caracterizado como apresentando dureza média SPB de 3,98, após jateamento com quartzo de granulação

20/30 e pressão de 19,1 psi (1,34 kgf/cm²), por 30 segundos, em uma área cilíndrica delimitada de 0,785 cm². As dimensões dos corpos-de-prova são 155 mm x 90 mm x 8 mm. O corte foi realizado na comprimento de corte foi de 90 mm.

As pontas diamantadas foram submetidas a ensaios de retificação do tipo tangencial plana de mergulho. Nesses ensaios a velocidade de deslocamento transversal da mesa da máquina retificadora (que coincide corpo a velocidade do corpo-de-provas) foi 0,0055 m/s, a velocidade de corte da ponta diamantada 7,1 m/s e a penetração da ponta diamantada no corpo-de-provas foi de 400 µm por passada. Estes valores foram mantidos constantes para a realização de todos os ensaios experimentais.

As pontas diamantadas foram solicitadas até o momento em que, por elevação excessiva do torque, ocorria o travamento do eixo do micromotor (fim de ensaio). Consequentemente, como o comportamento de cada ponta diamantada foi distinto, o volume de material removido (determinado pelo produto entre o número de passadas da ponta sobre o corpo-de-prova e a área superficial deste) diferenciou para cada ensaio realizado.

6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pôde-se notar em todos os ensaios uma grande dispersão dos resultados num mesmo lotes de pontas. Esse fato já era esperado, pois sabe-se que as melhores pontas são aquelas onde há espaçamentos maiores e homogêneos entre os grãos de diamantes. As dificuldades em se assegurar a homogeneidade no processo de fabricação, por se tratar de uma eletrodeposição, não confere as mesmas qualidades para todas as pontas diamantadas, mesmo que essas pertençam a um mesmo lote de fabricação. Sempre ocorre diferenças relacionadas ao espaçamento médio entre os grãos, a densidade de grãos abrasivos de diamante, qualidade de Ni depositado, dentre outros.

Assim, em pontas com maiores espaçamentos o número de grãos ativos é menor e, conseqüentemente, os cavacos arrancados apresentam maiores espessuras. Dessa forma, os grãos abrasivos são submetidos a maiores esforços de corte, tendendo a desgastarem-se mais rapidamente e desprenderem-se antecipadamente da superfície de corte da ponta. Ressalta-se, todavia, que espaçamentos excessivos são prejudiciais a eficiência de corte da ponta.

Verificou-se que a tendência de remoção de material conferida as pontas confeccionadas com o diamante PDA-878e foi a menor entre todas. Este tipo de diamante é o que apresenta estrutura mais cristalina dentre os diamantes estudados. Portanto, é o menos friável. Assim, necessita de grandes esforços de corte para a geração de novas arestas no topo dos grãos abrasivos.

Considerando-se o pequeno torque disponível no eixo do micromotor utilizado neste trabalho, os valores de força tangencial de corte foram insuficientes para fraturar os grãos abrasivos. Desta forma ocorreu a elevação da área de contato entre os grãos abrasivos e o material, elevando rapidamente os valores de força tangencial de corte, o que causou o travamento do eixo do micromotor.

Em seqüência, as pontas confeccionadas com os diamantes TED-II, PDA-768e, PDA-665e, PDA-555, DMB-G, DMB-T e PDA-433, apresentaram progressivamente maior capacidade de remoção de material, devido as estruturas dos grãos serem cada vez menos cristalinas; ou seja, são respectivamente mais friáveis. Desta forma, há uma maior geração de novas arestas de corte no topo dos grãos abrasivos, fazendo com que as pontas permaneçam agressivas (com capacidade da ponta em remover material) por mais tempo. Na tabela 2 são apresentados os valores de volume de material removido em todos os ensaios de passagem realizados, com os quais foi desenvolvida uma análise estatística para 95% de confiança .

Tabela 2: Valores de volume de material removido em todos os ensaios e análise estatística.

Material Removido (mm ³) - valores em ordem crescente						
DMB-T	1488	3472	16864	19344	19344	
PDA-878e	1984	1984	2480	5952	5952	
PDA-555	992	992	2976	17460	23808	31744
PDA-433	2976	26784	40176	44144		
PDA-665e	998	1984	1984	8928	10416	34224
PDA-768e	992	992	1488	3472	16368	28768
DMB-G	6448	13392	13392	18352	21824	
TED-II	1488	1984	3472	16368		
Em destaque os valores que se enquadram dentro dos limites de confiança, são os mesmos valores utilizados para o cálculo da média (μ)						
Limites						
	Média(x)	Variância	Erro	Inferior	Superior	Média(μ)
DMB-T	12102,4	8869,9	7774,8	4327,6	19877,2	18517
PDA-878e	3670,4	2092,6	1834,3	1836,1	5504,7	2149
PDA-555	12995,3	13243,2	10596,7	2398,6	23592	6812
PDA-433	28520	18578,5	18206,9	10313,1	46726,9	37034
PDA-665e	9755,7	12627,9	10104,4	0	19860,1	4862
PDA-768e	8680	11486,4	9191,1	0	17871,1	4662
DMB-G	14681,6	5822,5	5103,6	9578	19785,2	15045
TED-II	5828	7077,1	6935,3	0	12763,3	2315
Média (x) = média de toda a população						
Média (μ) = média dos valores que se enquadram dentro dos limites de confiança						
Erro calculado para 95% de confiança						

Posteriormente, foi elaborada a figura 1, relacionando o tipo de diamante utilizado com o volume médio de material removido, média (μ). Para o cálculo desta média, utilizou-se somente os valores que se enquadraram dentro dos limites de confiança inferior e superior (tabela 2).

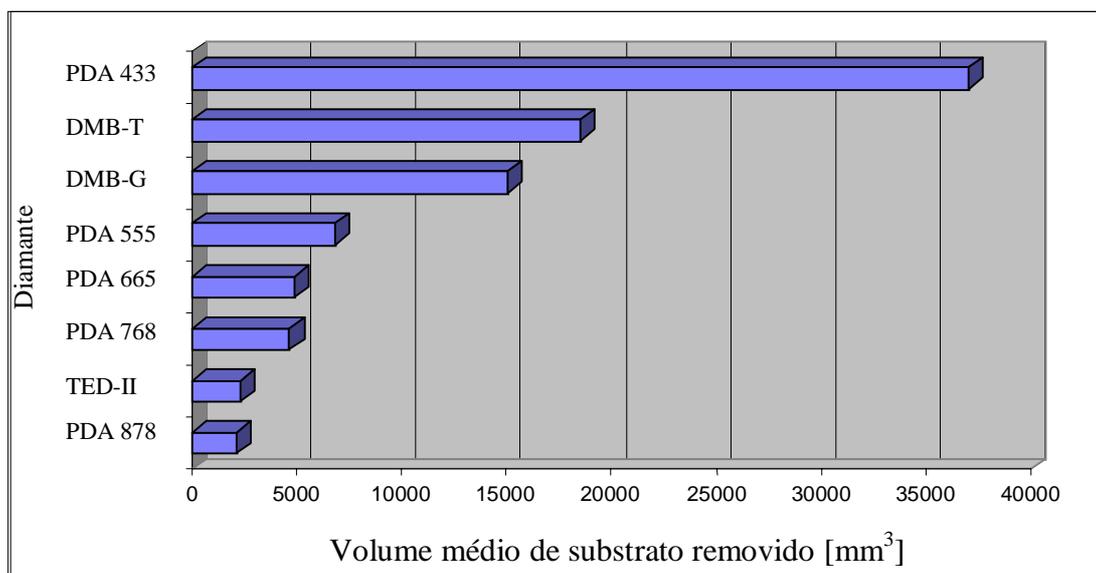


Figura 1 - Volume médio de material removido em função do tipo de diamante utilizado.

Nota-se claramente que as pontas confeccionadas com o diamante PDA-433 apresentaram maior vida útil pelo melhor aproveitamento dos grãos. Isso somente foi possível pela excelente capacidade deste grão em gerar novas arestas de corte, fazendo com que a força tangencial de corte permanecesse num patamar inferior por mais tempo, com relação aos outros diamantes utilizados, removendo mais material antes que o valor limite de torque suportado pelo eixo do micromotor da caneta odontológica fosse atingido.

Pode-se verificar que as pontas confeccionadas com o diamante PDA-433 apresentaram uma capacidade significativamente superior na remoção de material, em relação aos outros diamantes. Ressalta-se que essa capacidade foi substancialmente maior se comparada a dos diamantes naturais PDA-555 e PDA-665e, os quais são utilizados atualmente pela maioria das empresas na confecção de pontas odontológicas.

7 - CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir que:

Utilizando-se equipamentos de baixo torque, a estrutura cristalina do diamante e, conseqüentemente, de sua friabilidade exercem grande influência no comportamento das pontas diamantadas. Com a progressiva melhoria da estrutura cristalina (maior homogeneidade da estrutura do grão) o grão torna-se menos friável, assim, as forças de corte desenvolvidas não são suficientes para a geração de novas arestas no topo dos grãos abrasivos. Desta forma, há a elevação da área no topo dos grãos abrasivos, elevando a força tangencial de corte, o que limita a vida útil da ponta odontológica, pelo travamento do eixo do micromotor.

O diamante PDA-433 apresentou maior capacidade de remoção de material, em relação aos outros tipos de diamantes devido a sua maior friabilidade, a qual está associada à sua menor resistência ao impacto, resultado de sua baixa dureza e pureza. Seu menor custo em relação aos demais diamantes testados torna-o mais adequado para a fabricação de pontas utilizadas em instrumentos que possuem baixo torque, além da menor relação custo/benefício.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, P.R.& ROTTA, I. - *A simulação da máquina de corrente contínua a partir da determinação dos parâmetros método não convencional*. IV Congresso Latino Americano de Controle Automático - Puebla, México, pp. 946-950, novembro de 1990.
- BAILEY, M.W. & JUCHEM, H.O. - *Selection and use of PremaDia* - Industrial Diamond Review - p.8 a 11 - janeiro 1994
- CHATTOPADHYAY, A.K.; HINTERMANN, H.E. *On Improved Bonding of TiC-Coated CBN Grits in Nickel-Based Matrix*, In Annals of the CIRP, vol 42/1, p413-415, 1993.
- DAVIS, P. R.; FISH, M. L.; PEACOCK, S.; WRIGHT, D. N. *An indicator system for saw grit*. Industrial Diamond Review. v.56, n.570, p.78-87, Mar. 1996.
- DE BEERS INDUSTRIAL DIAMOND DIVISION. Catálogo PremaDia. NC1000793. Berkshire, Inglaterra.
- VAZ, J.C.; STEAGALL, L.; ISSAO, M. - *Eficiência de instrumentos de diamante no desgaste do esmalte de dentes humanos e vidro. Ensaio preliminar com instrumentos nacionais e estrangeiros*. - Rev. Ass. Paul. Cirurg. Dent. - Vol. 35 - n. 1 - p.82 a 91 - jan/fev 1981.