

## **AVALIAÇÃO DO DESGASTE ABRASIVO DE RESINAS INDUSTRIAIS**

**Eduardo Carlos Bianchi**

**Eraldo Jannone da Silva**

**Alexandre Pegoraro Xavier**

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

**Marcos Vilela**

CIEL - Comércio e Indústria de equipamentos Leves Fibra de Vidro Ltda., 17028-060, Bauru, SP, Brasil. E-mail: [ciel@starnet.com.br](mailto:ciel@starnet.com.br).

### **Resumo**

Este trabalho apresenta um estudo sobre a capacidade de resistência ao desgaste de resinas industriais, denominada por agressividade. O banco de ensaios utilizado forneceu resultados confiáveis. Da análise dos resultados pôde-se verificar que a não observância de sensível diferença estatística dos valores de agressividade deve-se ao fato de que as resinas industriais apresentaram-se bastante homogêneas, em todo o perímetro dos discos, e pelo fato do cabeçote de testes possibilitar um elevado grau de repetibilidade.

**Palavras-chave:** Resina industrial, desgaste abrasivo, tribologia

### **1. INTRODUÇÃO**

A designação “Plásticos” origina-se do grego e exprime a característica dos materiais quanto à moldabilidade (mudança de forma física). Adota-se este termo para identificar materiais que podem ser moldados por intermédio de pressão e calor, ou por reações químicas.

No passado, estes materiais não possuíam grandes aplicações práticas, devido às baixas propriedades mecânicas e químicas e, nas últimas cinco décadas, observa-se um notável avanço na área de química orgânica, permitindo a sintetização de novas estruturas ou, ainda, composições conhecidas como “Blendas”, concorrendo, muitas vezes com vantagens sobre materiais metálicos de alto desempenho, tanto química quanto mecânica e em condições extremamente agressivas.

Faz-se então necessário analisar as propriedades deste materiais de modo a determinar a possibilidade de sua utilização. Uma destas propriedades a ser avaliada é a agressividade

(capacidade de um material desgastar outro), responsável pela resistência ao desgaste abrasivo do material e de fundamental importância para peças de grande responsabilidade.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desgaste abrasivo das resinas industriais mais utilizadas no mercado nacional, de modo a fornecer informações aos interessados neste tipo de análise, como indústrias, grandes consumidores destas resinas e pesquisadores em geral, tendo como variável de saída a agressividade de cada resina estudada.

## **2. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE AS RESINAS INDUSTRIAIS**

Segundo Xavier (1999), o emprego das resinas industriais, bem como dos materiais “Plásticos” vem crescendo dia a dia com novos desenvolvimentos, destacando que nos EUA entre 1950 e 1980 o consumo em peso aumentou em 400 vezes. De um modo geral, os materiais plásticos apresentam as seguintes vantagens sobre os materiais convencionais: baixo peso (densidades variam entre 0,9 e 2,5 g/cm<sup>3</sup>); elevada resistência à corrosão (superior algumas vezes às ligas metálicas como aço Inox, Titânio, Hastelloys etc.); baixa condutividade térmica, tornando estes materiais auto isolantes; baixo coeficiente de atrito, devido a superfícies bastante lisas e de elevada resistência à abrasão e bom isolamento elétrico. Por este motivo, estes materiais possuem vastas aplicações em eletro-eletrônica; ciclos rápidos de produção. Se comparado aos materiais metálicos, normalmente, os tempos de conformações são inferiores, além de envolver menor quantidade de energia em seu processamento; absorção de choques, ruídos e vibrações; grande trabalhabilidade permitindo compor, em uma única peça; características geométricas complexas; insertos metálicos localizados; pigmentação prévia, dentre outras, apenas com um ferramental. Alguns plásticos apresentam características ópticas, como transparência ou translucidez controláveis, substituindo os vidros, com vantagens mecânicas e, ainda, alguns plásticos podem ser reprocessados várias vezes sem perderem suas propriedades (termoplásticos).

Em compensação, estes materiais apresentam as seguintes desvantagens: baixa resistência à temperatura; baixa estabilidade dimensional; alto coeficiente de dilatação térmica; risco de combustão e baixo módulo de elasticidade (para aplicações estruturais deve ser combinado com fibras de alto módulo).

Os materiais plásticos podem conter, além do polímero base, diversos aditivos para facilitar o processamento e propriedades finais. Os aditivos são: plastificantes; antioxidantes; lubrificantes; antiestáticos; absorvedores de ultravioleta; corantes; pigmentos; cargas minerais; reforços de fibras; retardadores de chama; supressores de fumaça; branqueador óptico e aditivos “Low Profile”.

Evidentemente o emprego destes materiais são precedidos de estudos aprofundados, onde são definidos todos os parâmetros, quanto à propriedades mecânicas e químicas.

A busca por novos materiais e formas de avaliar suas características é constante em todos os ramos da pesquisa. Para as resinas industriais isto não é diferente, sendo que uma dificuldade adicional é a de que estas pesquisas são realizadas pelas próprias indústrias que, em alguns casos, não se importam em publicar seus resultados. Deste modo, encontra-se certa dificuldade em se levantar um acervo suficiente de informações de modo a embasar a metodologia e os resultados propostos.

## **3. METODOLOGIA**

No banco de ensaios utilizado para a realização dos ensaios, as principais partes que o compõem são: cabeçote de testes, discos dinâmico e estático, dispositivo de deslocamento vertical e programa para a aquisição de dados, como será apresentado mais adiante.

Na figura 1, é ilustrada a vista geral do banco de ensaios desenvolvido, correspondendo ao seu posicionamento em vista frontal da máquina retificadora utilizada para apoiar o banco de ensaios e retificar os discos.

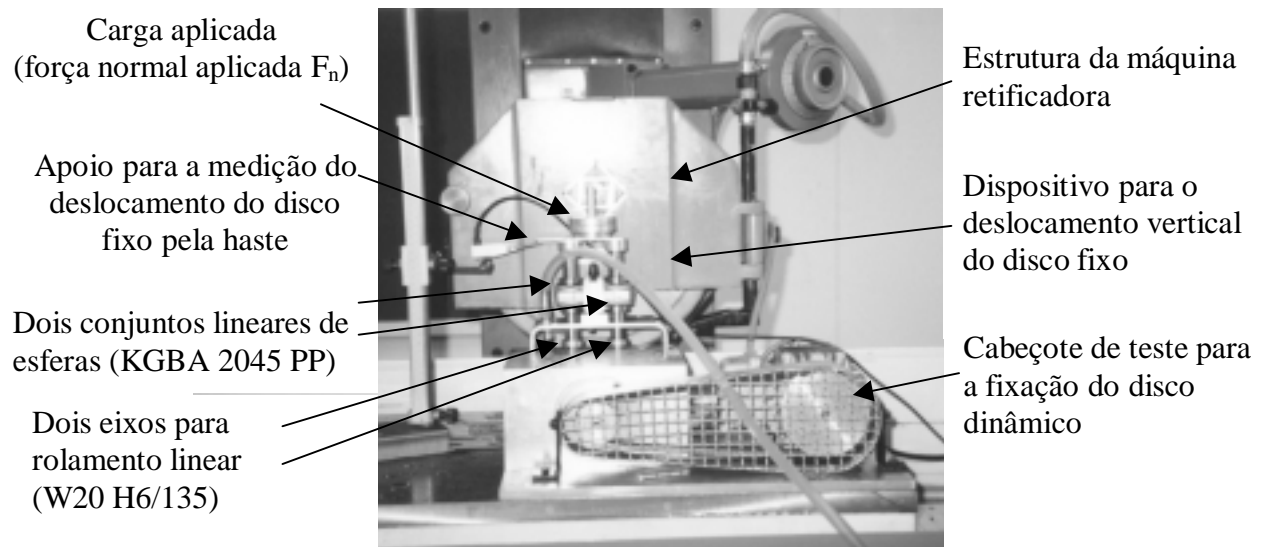


Figura 1. Fotografia da vista frontal do banco de ensaios sobre a máquina retificadora

Na figura 2 é ilustrada a vista geral do banco de ensaios desenvolvido, correspondendo ao seu posicionamento em vista frontal e traseira da máquina retificadora.

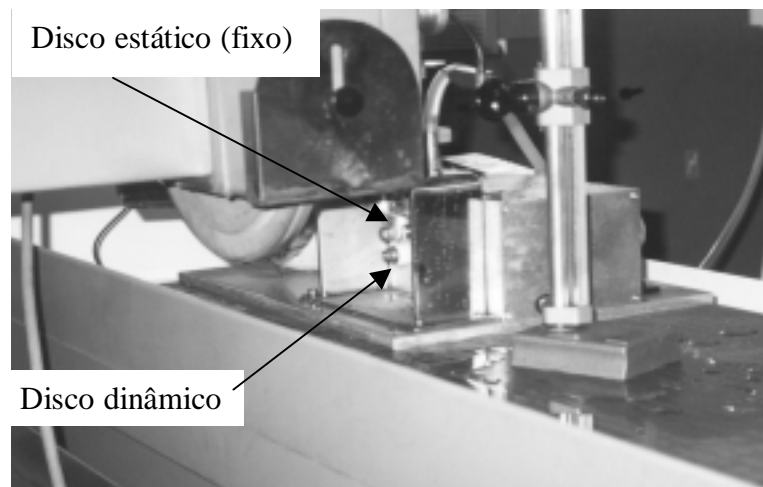


Figura 2. Fotografia da vista traseira da máquina retificadora, com detalhe para o contato entre os discos.

O banco de ensaios apresentado foi fabricado com dois conjuntos lineares de esferas (KGBA 2045 PP), composto por duas guias de esferas recirculantes e dois eixos para rolamento linear (W20 H6/135), denominados por haste, visando um melhor desempenho do mecanismo de deslocamento do disco estático.

Para a montagem das guias no suporte em forma de “U” invertido, já desenvolvido anteriormente, foi necessário fabricar algumas peças de união, de modo que as guias ficassem rigidamente presas ao suporte, evitando vibrações que permitissem um deslocamento vertical uniforme e simultâneo das duas hastes.

O mecanismo de deslocamento vertical foi montado com todas as peças, confeccionadas em alumínio para redução de peso, que promovem a união das hastes, a fixação do disco estático e a carga aplicada.

Posteriormente, deu-se início à procura das melhores condições de ensaio. Primeiramente variou-se a carga aplicada, mantendo-se os outros parâmetros de entrada constantes. O valor da carga que proporcionou o melhor resultado foi de 15 N.

Também foram realizados ensaios preliminares variando-se a rotação do eixo do cabeçote de testes. Quando a rotação era elevada, havia problemas relacionados a queima da resina. Se a rotação fosse diminuída, a taxa de desgaste da resina não era suficiente para proporcionar resultados satisfatórios. Após vários ensaios, chegou-se no valor de rotação do motor de acionamento de 30 Hz e lubrificação por água na região de corte.

O ensaio era realizado colocando-se um disco dinâmico mais largo no cabeçote de teste e um disco estático mais estreito no dispositivo vertical de deslocamento. Com o eixo do disco dinâmico parado, aproximava-se cuidadosamente o disco estático até que estes se tocassem. Para o início do ensaio liga-se o motor de acionamento e, ao mesmo tempo, os valores relativos ao deslocamento vertical eram registrados (via software) para análise. O ensaio terminava quando o deslocamento vertical máximo fosse de 450  $\mu\text{m}$ .

O disco dinâmico é o responsável pelo desgaste da resina depositada na superfície externa do disco estático. O material selecionado para a confecção do revestimento do disco dinâmico foi a porcelana, por apresentar excelente resistência ao desgaste abrasivo. Porém, esta deve ser fixada num material de forma geométrica cilíndrica e compatível. Para tanto utilizou-se uma liga de NiCr, que permite a boa aderência da porcelana.

Um anel de NiCr foi torneado, de modo que este tivesse as seguintes dimensões: espessura de 16 mm, diâmetro interno de 8,0 mm e diâmetro externo de 18 mm. Na sua superfície externa foi realizada uma operação de recartilamento para a facilitar a fixação da porcelana a ser aplicada.

Foi utilizada a porcelana DUCERAM (Degussa - Sociedade Industrial de Metais Preciosos da Amazônia Ltda., Manaus - AM), de matiz B4, com temperaturas de queima inicial de 557°C e final 940°C, aplicada em toda periferia do anel, com dimensões também maiores que o necessário para uma posterior usinagem (retificação).

O anel com a porcelana foi retificado na sua parte externa (somente da porção cerâmica), ficando finalmente com diâmetro externo igual a 25,000 mm, o que era verificado através de um micrômetro Mitutoyo no. 103-129 (Mitutoyo do Brasil Ind. Com. Ltda., Suzano - SP), com acuidade de 1 micrometro (de forma semelhante ao que ocorria na retificação do disco estático).

Para a realização desta operação foi utilizado um rebolo diamantado fabricado com ligante resinóide, tipo ND15 C100 N111 B (fabricado pela empresa Master Diamond Ferramentas Ltda., São Paulo - SP), com 350 mm de diâmetro externo, 127 mm de diâmetro interno e 10 mm de largura, com velocidade de corte igual a 33 m/s, para desgastar da porcelana aplicada ao anel de NiCr que encontrava-se preso no eixo horizontal do cabeçote de testes, girando em sentido discordante ao do rebolo.

Para a confecção dos discos estáticos, foram obtidos, por torneamento, diversos anéis fabricados de aço com baixo teor de carbono (ABNT 1020, fabricado por COSIPA, Cubatão - SP), todos com espessura de cerca de 2,0 mm, diâmetro interno de 8,0 mm e diâmetro externo de 18 mm. A superfície externa destes anéis foram recartiladas para garantir uma melhor fixação da resina industrial aplicada. Pela necessidade destes discos ficarem com suas faces planas, exatamente paralelas entre si e com a melhor qualidade superficial possível, estes foram retificados de ambos os lados, apoiados por suas superfícies planas na mesa de uma retificadora tangencial plana. Para isso, foi utilizado um rebolo de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) branco (fabricado pela empresa Carborundum Abrasivos Ltda., Vinhedo - SP), com diâmetro

externo de 350 mm, diâmetro interno de 127 mm, espessura de 50 mm com granulometria 46 mesh, com velocidade de corte de 33 m/s. Para evitar oxidação, os discos sofreram diferentes processos de eletro-deposição, propositadamente para ficarem com diferentes colorações; isto facilitou a sua identificação, após a aplicação da resina industrial pela empresa CIEL - Comércio e Indústria de equipamentos Leves Fibra de Vidro Ltda., localizada na cidade de Bauru - SP. Os discos revestidos com as resinas industriais ficaram com o diâmetro externo semelhante ao do disco com a porcelana, sem a necessidade de uma retificação para acertar os diâmetros dos discos estáticos. Isto é possível, pois a resina industrial é mais fácil de se depositar sobre os discos de aço, deixando-as já na dimensão final desejada por meio de moldes. Os procedimentos aqui apresentados são idênticos aos utilizados por Salgado et al., (1997).

O método proposto para a determinação do desgaste de resinas industriais, é baseado no estudo do comportamento da agressividade. Este método consiste em pressionar o disco estático contra o disco dinâmico. Com o desgaste da resina industrial há o deslocamento vertical do disco estático ( $\delta$ ) que é registrado em tempo real, com auxílio de um relógio comparador eletrônico.

O deslocamento do disco estático é medido com um apalpador eletrônico, modelo 32.10801 (Tesa S.A., Suíça), conectado a um registrador Tesatronic TT60, da mesma procedência do primeiro. O pequeno braço do apalpador eletrônico termina numa esfera, a qual era posicionada de modo a contatar a face inferior dos pesos. O apalpador eletrônico é conectado a uma haste vertical, cuja base estava posicionada de forma estável, convenientemente próximo do eixo responsável pelo deslocamento vertical do disco estático.

O sistema conector instalado na citada haste possui um parafuso micrométrico que permite a movimentação do apalpador eletrônico no sentido vertical. Este era movido para cima e para baixo, até uma altura que permitisse ter-se certeza que o ponteiro do respectivo registrador estivesse apontando um valor numérico qualquer, indicando haver seu contato com a haste que posiciona o disco estático, com o cuidado para que o braço pequeno do apalpador eletrônico ficasse na posição mais horizontal possível.

Nesta situação, ajustava-se o registrador na marca zero (ou o mais próximo deste valor). Assim, o eixo vertical era deslocado por gravidade, de modo a pressionar o contato entre os discos. O programa do microcomputador era acessado, e numa tela específica eram registradas as condições do ensaio: material do disco dinâmico e seu diâmetro; material do disco estático, com seu diâmetro e espessura e valor da carga utilizada. Com esses dados é construída uma primeira curva de deslocamento, em função do tempo. Posteriormente, uma outra curva de deslocamento é construída, onde no eixo horizontal o tempo gasto para a aquisição dos dados é elevado a  $3/2$ . Isto é feito para a obtenção de uma reta onde sua tangente representa o coeficiente angular da reta de regressão linear. Na figura 3 é apresentado de forma esquemática um resultado típico obtido em ensaios, sendo  $\delta$  o deslocamento do disco estático e  $t$  o tempo necessário para o desgaste deste.

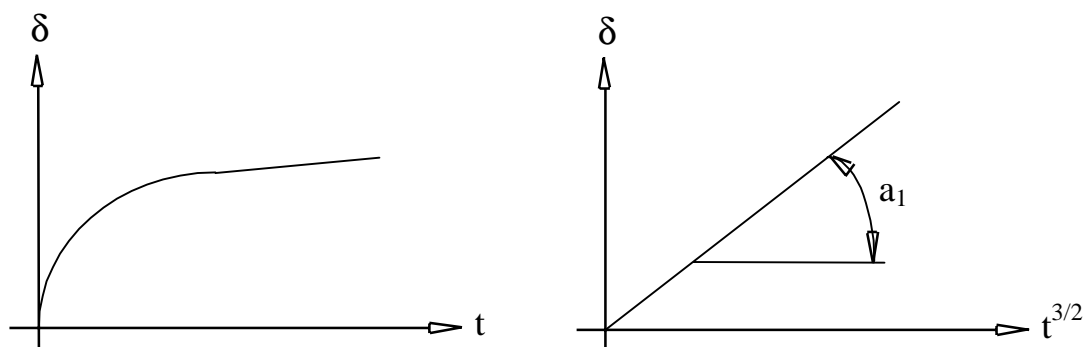


Figura 3 - Apresentação esquemática um resultado típico obtido em ensaios.

Com o disco estático posicionado sobre o disco dinâmico o motor de acionamento do cabeçote é ligado, iniciando o desgaste do disco estático.

A refrigeração do processo era feita com água, proveniente de um frasco colocado num suporte apropriado através de uma mangueira de borracha numa vazão fixa, por cima e de um lado tal que, quando o disco girasse, a água conseguisse refrigerá-los.

Após a liberação do fluxo de água, ligava-se então o conversor de frequência, através de seu botão interruptor, e dava-se início ao ensaio medindo-se constantemente o deslocamento do disco estático detectado pelo apalpador e transferido para o respectivo registrador.

Foram realizados ensaios dos cinco tipos de resinas industriais mais utilizados no mercado nacional. Para tanto foram confeccionados um disco de prova de cada resina industrial, totalizando 5 discos de prova, onde puderam ser realizados um total de 40 ensaios (8 em cada disco de prova).

Os valores referentes a carga aplicada (ou força normal aplicada  $F_n$ ) e dimensões dos discos foram:

- $b$  = largura dos discos = 2 mm
- $r$  = raio dos discos = 10 mm
- $F_n$  = força normal aplicada = 15 N

Visando uma maior precisão dos resultados, o rebolo permaneceu no mesmo nível ao término de sua utilização para acertar a superfície do disco revestido de cerâmica. Isto foi realizado simples recuando este, de modo a possibilitar a realização dos ensaios. Deste modo, ao terminar-se os ensaios com um tipo de resina industrial, o rebolo era deslocado de modo a ocupar a mesma posição, em relação ao disco de cerâmica que ocupava anteriormente, possibilitando e facilitando a “renovação” da superfície do disco dinâmico com sua retificação para o ensaio com a próxima resina.

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 linear, obtém-se o valor do coeficiente angular da reta.

Para a determinação da agressividade foi realizada uma adequação, por Bianchi et al. (1997), baseado no modelamento matemático apresentado por Coelho (1991), onde o valor da agressividade é dado por:

$$k = \frac{2b\sqrt{4r}}{3F_n} (a_1)^{2/3} \quad [\text{mm}^3/\text{N.s}] \quad (1)$$

onde:  $k$ : agressividade [ $\text{mm}^3/\text{N.s}$ ]

$b$ : largura do disco estático [mm]

$r$ : raio dos discos [mm]

$F_n$ : força normal aplicada [N]

$a_1$ : coeficiente angular da reta gerada pelo gráfico registrado entre o deslocamento vertical do disco estático (eixo  $y$ ) com o tempo elevado a  $2/3$  (eixo  $x$ ), conforme descrito no modelamento matemático desenvolvido por Coelho (1991)

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios foram realizados com a observação de se manter um mesmo padrão de ações durante todos os experimentos com todas as cinco resinas industriais que são:

1. Resina Cristal (Ramires 5061)
2. Resina Isoftálica (Ramires 8000)
3. Resina Ortoftálica (Ramires 4004)
4. Resina Epóxi (Araldite MY750)
5. Resina Orto com 30% de fibra de vidro (Ramires 4004)

Após o final dos ensaios com cada tipo de resina industrial a cerâmica era retificada de modo a manter a sua superfície sempre avivada (sem empastamento e com capacidade de desgastar a resina industrial) para os ensaios com um novo tipo de resina.

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 1.

TABELA 1 - Resultados de agressividade obtidos com as resinas Cristal (Ramires 5061), Isoftálica (Ramires 8000), Ortoftálica (Ramires 4004), Epóxi (Araldite MY750) e Orto com 30% de fibra de vidro (Ramires 4004)

Valores obtidos de agressividade [mm <sup>3</sup> /N.s]					
Ensaio	Ramires 5061	Ramires 8000	Ramires 4004	Araldite MY750	Ramires 4004
1	0,53	0,51	0,51	0,00	0,00
2	0,51	0,45	0,50	0,49	0,00
3	0,49	0,00	0,53	0,52	0,00
4	0,50	0,52	0,00	0,00	0,00
5	0,49	0,54	0,55	0,00	0,41
6	0,53	0,50	0,51	0,00	0,00
7	0,54	0,54	0,00	0,00	0,49
8	0,53	0,50	0,00	0,55	0,00
Média	5,15E-01	5,07E-01	5,21E-01	5,16E-01	4,49E-01
Desvio Padrão	2,04E-02	3,23E-02	1,68E-02	3,03E-02	5,78E-02
Variância	4,17E-04	1,04E-03	2,84E-04	9,18E-04	3,34E-03

Pode-se notar que para alguns tipos de resinas industriais o banco de ensaios foi capaz de avaliar o desgaste abrasivo das resinas industriais. Em particular para o caso de resinas industriais mais “duras”; ou seja, as que possuem cargas de outros materiais para alterar as suas propriedades mecânicas, a capacidade de remoção de material da porcelana não apresentou-se suficiente para promover o desgaste da resina e, conseqüentemente, a sua avaliação. Estes casos são representados nas tabelas pelo número zero (0).

Provavelmente, com a escolha de um material diferente para desempenhar a função do disco dinâmico, ou o aumento da carga aplicada, ou o aumento da velocidade periférica do disco dinâmico, ou com a redução da largura do disco estático, seja possível a avaliação de uma gama maior de resinas industriais.

A análise estatística nos possibilita uma forma ainda mais segura e precisa de avaliar os padrões propostos e também de verificar a sua precisão de medidas.

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

O quadro de Análise de Variância é apresentado na tabela 2.

As diferenças nos valores médios de agressividade encontrados entre as diferentes resinas não são suficientemente grandes para excluir-se a possibilidade destas diferenças serem resultado do acaso. Sendo assim para ( $p < 0,05$ ) não existe diferença estatística significativa.

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	0,00821	4	0,002053	2,72	<0,0587
Resíduo	0,01509	20	0,000754		
Total	0,02330	24			

## 5. CONCLUSÃO

Com base na análise estatística pode-se afirmar que o banco de ensaios aqui proposto pode avaliar a propriedade de resistência ao desgaste abrasivo de algumas resinas industriais de modo rápido e preciso.

A não observância de sensível diferença estatística deve-se ao fato de que as resinas industriais apresentaram-se bastante homogêneas em todo o perímetro dos discos e também pelo fato do cabeçote de testes possibilitar um elevado grau de repetibilidade.

A curiosidade científica volta-se para a modificação da metodologia para a avaliação dos demais tipos de resinas industriais existente que não foram possíveis de serem ainda avaliadas.

Para tanto deve-se observar as diferenças específicas entre as resinas industriais, pois algumas irão apresentar cargas, como fibra de vidro por exemplo, que modificam suas propriedades mecânicas.

## 6. AGRADECIMENTOS

Manifestamos os nossos agradecimentos à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio concedido para a realização deste trabalho e a empresa CIEL - Comércio e Indústria de equipamentos Leves Fibra de Vidro Ltda., pelo revestimento dos discos estáticos com resina industrial.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- BIANCHI, E.C.; DIAS, A.C.P.; BIANCHI, A.R.R.; FREITAS, C.A. Desenvolvimento de uma metodologia para a avaliação do desgaste abrasivo de resinas compostas. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 14; Bauru, de 8 a 12 de dezembro de 1997. Anais do COBEM. São Paulo: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 8 páginas (em CD - ROM).
- COELHO, R. T. Estudo experimental da propriedade de dressagem de rebolos na retificação de precisão usando o método do disco retificado. São Carlos, 1991. 122 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SALGADO, I. O., FREITAS, C. A., BIANCHI, E. C.; Aperfeiçoamento do Método do Disco Retificado, Já Adaptado para a Odontologia, e Seu Emprego na Avaliação do Desgaste Abrasivo de 3 Resinas Compostas. Revista FOB. Vol 5. P. 21 - 29. 1997.
- XAVIER, A. P. Avaliação do desgaste abrasivo de resinas industriais. Bauru: Faculdade de Engenharia - UNESP, 1999. 35p. 5<sup>o</sup> Relatório Científica de Bolsa de Iniciação Científica enviado à FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, Processo N<sup>o</sup> 97/04498-9.