

# INFLUÊNCIA DO ESTADO SUPERFICIAL NO ATRITO DO POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE

**Carlos Henrique da Silva**  
**Marcelo Silva Guimarães**  
**Deniol Katsuki Tanaka**  
**Amilton Sinatora**

Laboratório de Fenômenos de Superfície - LFS. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP. Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - Cidade Universitária - São Paulo / SP E-mail: [carloshs@usp.br](mailto:carloshs@usp.br), [marcsg@usp.br](mailto:marcsg@usp.br), [dktanaka@usp.br](mailto:dktanaka@usp.br), [sinatora@usp.br](mailto:sinatora@usp.br)

## Resumo

Neste trabalho apresenta-se a influência do acabamento superficial no coeficiente de atrito cinético do polietileno de alta densidade; deslizando contra aço carbono comum.

Os ensaios foram realizados em um tribômetro do tipo pino-contra-disco, na configuração de pinos de polímero e discos de aço. As condições de ensaio utilizadas foram cargas de 20 N e velocidade de deslizamento 0,5 m/s.

As superfícies dos discos foram preparadas por torneamento e retificação, apresentando quatro níveis distintos de rugosidade. O parâmetro de rugosidade Ra das superfícies dos discos são:  $4,74 \pm 0,09$ ;  $1,27 \pm 0,08$ ;  $0,99 \pm 0,10$  e  $0,19 \pm 0,01$   $\mu\text{m}$ . Além disto, procurou-se relacionar as propriedades tribológicas do PEAD com as dimensões fractais das superfícies.

A observação microscópica da superfície dos pinos revelaram a atuação de pelo menos três mecanismos de desgaste distintos durante os ensaios: abrasão, transferência de filme e deformação plásticas ou micro *stick-slip*.

**Palavras-chave:** rugosidade; atrito; desgaste; polietileno de alta densidade; geometria fractal.

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização cada vez mais acentuada, nos mais diversos ramos da indústria, de materiais poliméricos em aplicações onde o componente deste material possui um movimento de deslizamento sobre metais ou cerâmicas, justifica um melhor entendimento do comportamento tribológico dos polímeros. A influência da carga, da velocidade de deslizamento (Barret *et al.*, 1992) e do acabamento superficial possui papel fundamental na ocorrência de diferentes mecanismos de desgaste nos polímeros, os quais estão intrinsecamente ligados com os valores de coeficiente de atrito cinético.

Tanaka e Nagai (1985) mostram que o mecanismo de desgaste predominante, durante o deslizamento de polímeros sobre uma superfície muito lisa, é a transferência de filme, o qual é originado pela adesão entre as superfícies. Por outro lado, acabamentos superficiais extremamente grosseiros, indicam a ocorrência de mecanismos de fadiga, devido as pequenas deformações repetidas provocadas pelas asperezas; além disto, estas mesmas asperezas são

responsáveis por mecanismos de abrasão a dois corpos. Mecanismos de desgaste por degradação térmica (Eiss & Smith, 1981) também podem ocorrer, entretanto, estão mais ligados à velocidade de deslizamento e a temperatura atingida na região de contato.

A literatura tem mostrado (Tanaka & Nagai - 1985, Hutchings - 1992) que tanto o coeficiente de atrito quanto a taxa de desgaste de um material polimérico decaem com a diminuição da rugosidade do contra-corpo. Porém existe um ponto de inflexão onde este comportamento se inverte. Tal fato ocorre devido a maior adesão entre os corpos. Este fenômeno é caracterizado pela atuação de mecanismos de transferência – lamelar ou normal (Silva, C. H. *et al.* – 1998).

Eiss e Milloy (1985) mostram que informações sobre distribuição de altura de asperezas e curvatura dos picos (caracterização da superfície) são de grande importância quanto aos mecanismos de desgaste de polímeros.

A caracterização do acabamento ou da rugosidade de uma superfície está vinculada aos seguintes fatores : o processo de fabricação, o instrumento de medida e os métodos de análise empregados

Ramachandra e Ovaert (1997) verificaram que os sulcos provocados por um processo de usinagem, podem influenciar a ocorrência de desgaste em polímeros, dependendo da direção de deslizamento entre os corpos.

A utilização de parâmetros de rugosidade do tipo Ra, Rq ou Ry, para se caracterizar uma superfície, não tem apresentado bons resultados no estudo das propriedades tribológicas de materiais poliméricos, pois superfícies com valores idênticos de Ra, por exemplo, apresentam tanto coeficiente de atrito como mecanismos de desgaste diferentes. Talvez a utilização de parâmetros combinados de rugosidade, ou a determinação da dimensão fractal desta superfícies possa apresentar melhores resultados (Stupak *et al.*, 1990).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nos ensaios para a determinação da taxa de desgaste e do coeficiente de atrito, seguindo as recomendações da Norma ASTM G-99 (1992), foram utilizados pinos de polietileno de alta densidade (PEAD) com 2,5% de negro-de-fumo, 3 mm de diâmetro e 23 mm de comprimento, e discos de aço carbono comum com 100 mm de diâmetro, como corpo e contra-corpo, respectivamente.

Na preparação da superfície de desgaste dos discos de aço carbono foram utilizados dois processos de usinagem: torneamento (discos 1 e 2) e retificação (discos 3 e 4). Os dados sobre os equipamentos e as condições de usinagem estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Condições de usinagem dos discos de aço carbono.**

<b>TORNEAMENTO</b>	<b>RETIFICAÇÃO</b>
Torno TRAUB TND 360	Retífica plana rotativa HEALD mod. 261
Velocidade de corte constante de 150m/min	Velocidade de corte: 32 m/s
Avanço: 0,46 (disco 1) e 0,18 mm/rotação (disco 2)	Avanço: 0,005 (disco 3) e 0,003 mm/golpe (disco 4)
Ferramenta: PCLNR SANDVICK, raio da ponta de 0,8mm	Rotação: rebole 1750 rpm / peça 220 rpm
Usinagem com refrigeração - fluido de corte RATAK MEP 15 com, concentração de 6 a 8%	Rebole: AA46 H6 V15 (Abrasivo Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) - fabricação SIVAT
	Usinagem com refrigeração - fluido de corte solúvel DMS 340 SHELL - conc. de 6 a 8%

Para a caracterização da superfície dos discos, foi utilizado um rugosímetro SURTRONIC 3+, de fabricação RANK TAYLOR ROBSON com filtro RC.

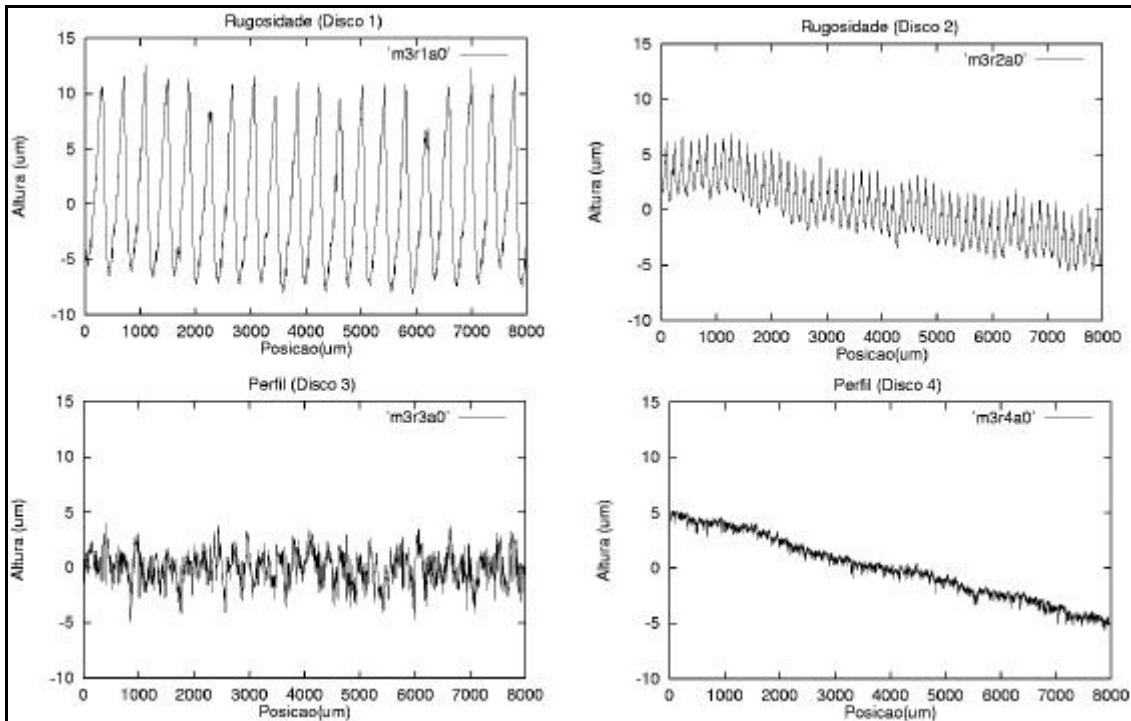
Foram obtidos 20 perfis de rugosidade para cada disco, utilizando os seguintes parâmetros de medição:

- ◆ direção de medição = radial;
- ◆ comprimento de medição ( $L_m$ ) = 4 mm;
- ◆ comprimento de corte ( $L_c$ ) = 0,8 mm.

Com o objetivo de ter acesso aos dados dos perfis obtidos pelo rugosímetro, foi desenvolvido um programa de aquisição de dados, desta forma foi possível uma melhor manipulação dos mesmos, facilitando a visualização dos perfis e possibilitando o cálculo de parâmetros representativos da superfície estudada, como a dimensão fractal.

Para o cálculo da dimensão fractal das superfícies dos discos, foi utilizado o método das caixas (ver Apêndice), com algoritmo segundo o trabalho de Hou *et al.* (1990).

A Figura 1 mostra os perfis de rugosidade dos discos e a Tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros de rugosidade, além dos valores de dimensão fractal de cada superfície.



**Figura 1** – Perfis de rugosidade dos discos.

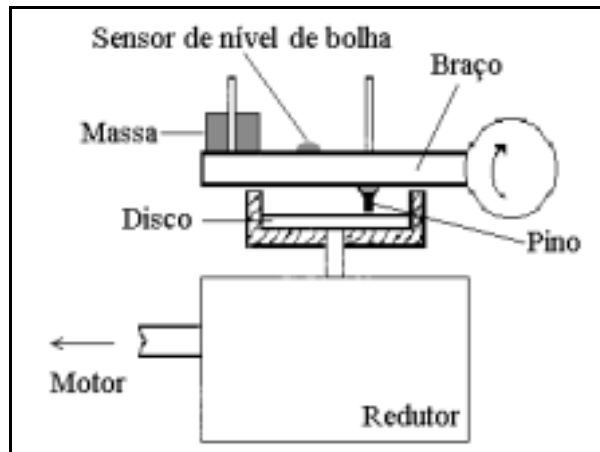
**Tabela 2** – Parâmetros de rugosidade e dimensão fractal das superfícies dos discos.

		<b>Ra</b>	<b>Rq</b>	<b>RzDIN</b>	<b>Ry</b>	<b>Sm</b>	<b>D<sub>fractal</sub></b>
<b>Disco 1</b>	Média	<b>4,74</b>	5,39	17,3	18,4	372	<b>1,54</b>
	Desvio Padrão	<b>0,09</b>	0,09	0,5	1,3	30	<b>0,02</b>
	Coef. de Variação	<b>0,02</b>	0,02	0,03	0,07	0,08	<b>0,01</b>
<b>Disco 2</b>	Média	<b>1,27</b>	1,48	5,7	6,7	146	<b>1,77</b>
	Desvio Padrão	<b>0,08</b>	0,10	0,6	1,8	4	<b>0,06</b>
	Coef. de Variação	<b>0,07</b>	0,07	0,10	0,26	0,03	<b>0,03</b>
<b>Disco 3</b>	Média	<b>0,99</b>	1,23	6,5	7,5	37	<b>1,65</b>
	Desvio Padrão	<b>0,11</b>	0,08	0,4	0,6	3	<b>0,04</b>
	Coef. de Variação	<b>0,11</b>	0,07	0,06	0,09	0,09	<b>0,02</b>
<b>Disco 4</b>	Média	<b>0,19</b>	0,26	1,8	2,1	18	<b>1,59</b>
	Desvio Padrão	<b>0,01</b>	0,02	0,2	0,2	1	<b>0,03</b>
	Coef. de Variação	<b>0,06</b>	0,07	0,11	0,09	0,05	<b>0,02</b>

Os pinos foram extrudados a partir do PEAD produzido pela POLISUL sob o nome comercial de HOSTALEN R, código 5010-T2 e armazenados em dissecador.

Para que a superfície de contato do pino estivesse paralela ao plano do disco foi realizado um processo de abrasão contra lixa de alumina ( $Al_2O_3$ ), de grana 600, no equipamento de ensaio pino-contra-disco, até que fosse atingida a planicidade desejada. Outro objetivo de utilizar o próprio equipamento de ensaio na preparação da superfície do pino foi o de se obter sempre o mesmo acabamento em todos os pinos. Antes de cada ensaio os pinos foram limpos com álcool etílico absoluto.

Os ensaios de desgaste foram realizados em um equipamento do tipo pino-contra-disco, modelo TE-79 de fabricação PLINT & PARTNERS LTD, no LFS-PMC-EPUSP. A configuração da máquina mostrando os principais componentes do sistema pino-contra-disco pode ser visto na Figura 2.



**Figura 2** - Sistema pino-contra-disco.

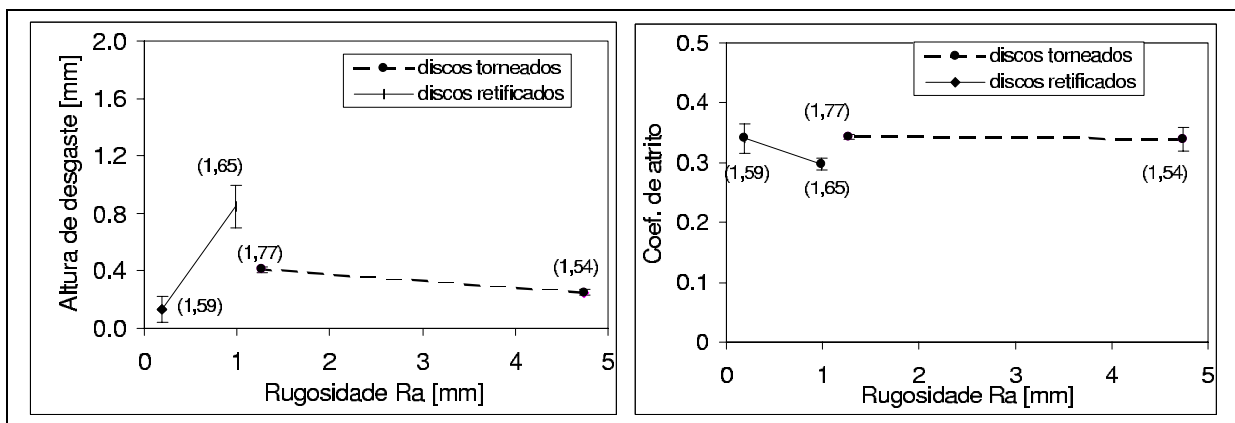
Para a determinação do comportamento tribológico do par em questão foram realizados ensaios com carga aplicada de 20 N e velocidade de deslizamento de 0,5 m/s. Cada ensaio foi repetido 3 vezes. A distância total de deslizamento foi de 5.000 metros.

A cada 1.000 metros os ensaios foram interrompidos para medição da perda de massa e inspeção micrográfica da superfície de desgaste do pino. Os valores de altura de desgaste do polietileno de alta densidade foram determinados a partir da medição de sua massa antes e após os ensaios, assumindo que o pino seja um cilindro perfeito com 3 mm de diâmetro e com densidade de  $0,96 \text{ g/cm}^3$ .

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

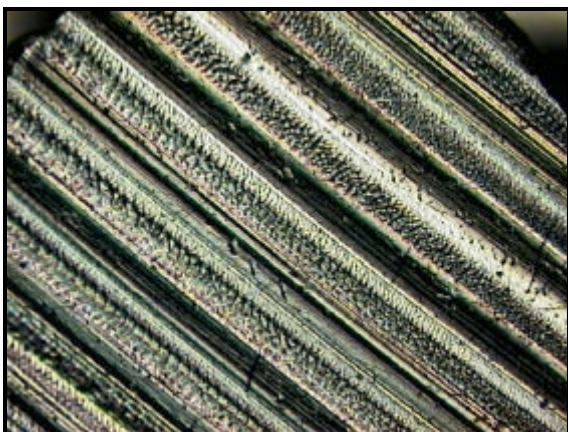
A Figura 3 apresenta os resultados de coeficiente de atrito cinético e altura de desgaste obtidos nos ensaios de desgaste, em função do parâmetro de rugosidade  $R_a$ , além dos valores da dimensão fractal de cada disco.

Dos ensaios realizados com superfícies torneadas pode-se dizer que o coeficiente de atrito não apresentou mudanças significativas para a faixa de rugosidade estudadas. Entretanto, quanto o desgaste, foi observado um crescimento deste para a superfície com acabamento mais fino. Contrariamente ao ocorrido com o parâmetro  $R_a$ , o desgaste acompanhou o crescimento da dimensão fractal.

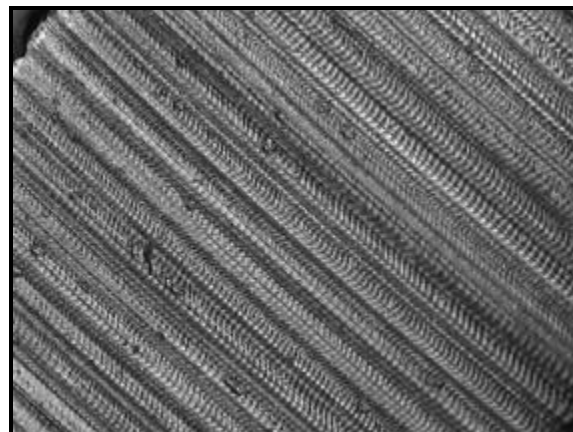


**Figura 3**– Coeficiente de atrito cinético e altura de desgaste do HDPE em função da Rugosidade Ra. A dimensão fractal de cada disco está apresentada entre parênteses.

As Figuras 4 e 5, apresentam a superfície característica dos pinos ensaiados nos discos 1 e 2, respectivamente. Pode ser observado a presença de riscos de abrasão (sulcos), além de um mecanismo de desgaste com morfologia do tipo onda, característico de deformação plástica ou micro *stick-slip*. Além dos mecanismos citados, a literatura defende a ocorrência de mecanismos de fadiga, na faixa de rugosidade estudada, porém não se conseguiu evidências deste mecanismo.



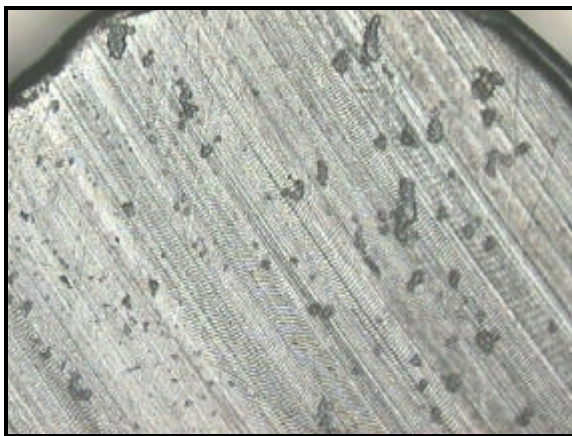
**Figura 4**- Superfície de desgaste de pinos ensaiados contra o disco 1.



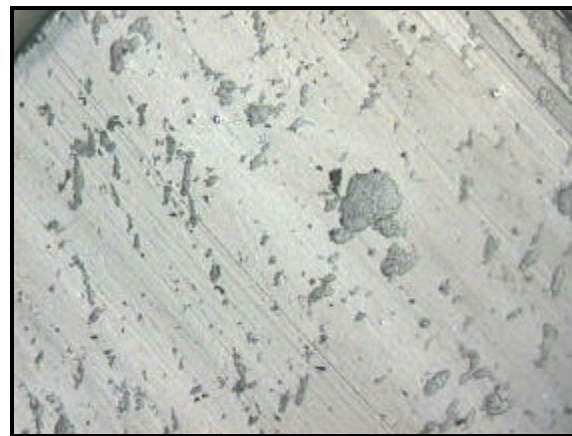
**Figura 5**- Superfície de desgaste de pinos ensaiados contra o disco 2.

Na Figura 4, a quantidade de ondas formadas na superfície do pino é muito menor que na Figura 5, pois a superfície com torneamento grosseiro (disco 1) provoca o aparecimento de sulcos na superfície do pino ( $\approx 15 \mu\text{m}$  de profundidade) característico de processos de abrasão. Admitindo que o mecanismo de desgaste tipo ondas seja mais severo que o de abrasão, espera-se que o volume de material removido nos ensaios com o disco 1 seja maior em comparação com o disco 1. Esta hipótese pode ser verificada na Figura 3.

Nos ensaios realizados com superfícies retificadas o coeficiente de atrito apresentou um aumento dentro da faixa de rugosidade estudadas. Entretanto, quanto ao desgaste, foi observado um decréscimo deste para a superfície com acabamento mais fino. De maneira semelhante ao ocorrido com os discos torneados, o desgaste acompanhou a redução do valor da dimensão fractal da superfície.

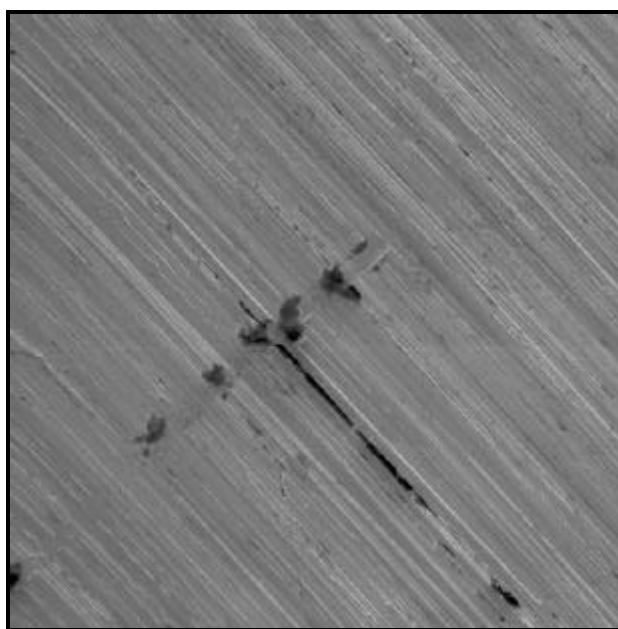


**Figura 6** - Superfície de desgaste de pinos ensaiados contra o disco 3.



**Figura 7** - Superfície de desgaste de pinos ensaiados contra o disco 4.

As Figuras 6 e 7, apresentam a superfície característica dos pinos ensaiados nos discos 3 e 4, respectivamente. Na Figura 6, observa-se que o mecanismo de formação de ondas é menos intenso que na figura 5, entretanto pode-se notar a presença de outros mecanismos como riscos de micro-abrasão e transferência de filme (Figura 8). A Figura 7 não apresenta o mecanismo de desgaste tipo formação de ondas, o que pode ser responsável pelo menor nível de desgaste apresentado na Figura 3.



**Figura 8** - Superfície de desgaste do disco 3.

Nas Figuras 6 e 7 pode-se observar também a presença de resíduos de desgaste aderido na superfície do pino, fato este que mascara o valor do volume de desgaste total, principalmente nos pinos ensaiados em disco com retífica fina.

A Figura 8 mostra a presença de filme polimérico aderido à superfície do disco 3. A morfologia do filme sugere que o mecanismo de desgaste ocorrido foi o de transferência normal, porém somente com a determinação da espessura deste filme será possível diferenciar entre transferência normal ou lamelar.

## 4. CONCLUSÕES

Dos experimentos descritos acima pode-se concluir:

- ◆ O valor da dimensão fractal calculada para os diversos discos demonstrou ser um bom parâmetro para caracterizar a superfície, quanto aos resultados de desgaste. Pois a dimensão fractal é diretamente proporcional ao volume de desgaste em cada processo de fabricação utilizado nos discos. Entretanto um estudo mais aprofundado das relações entre geometrias fractal e mecanismos de desgaste, ainda é necessário.
- ◆ Os mecanismos de desgaste observados foram abrasão, transferência de filme e deformação plástica ou micro *stick-slip* (ondas).
- ◆ O mecanismo de desgaste com morfologia tipo ondas, mostrou-se ser de grande importância tanto para superfícies torneadas como para as retificadas, pois a intensidade da atuação deste mecanismo está relacionado com o volume de desgaste sofrido pela superfície.
- ◆ Apesar dos discos apresentarem valores do parâmetro de rugosidade Ra decrescente, não foi possível realizar uma análise conjunta dos dados, pois o processo de fabricação, torneamento e retífica, possuem característica próprias que influenciam em demasia as características tribológicas dos materiais e a topografia dos discos estudados.

## 5. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelas bolsas de estudos concedida nos processos 97/12620-9 e 00/01068-8, a Companhia Fabricadora de Peças - COFAP, em nome do Engenheiro Marcos Galvano pela colaboração com os processos de usinagem dos discos de aço carbono e doação dos mesmos ao Laboratório de Fenômenos de Superfície - LFS.

## 6. REFERÊNCIAS

- Annual book of ASTM Standards. ASTM G 99-90, 1992, Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus. Metals test methods and analytical procedure. Vol. 03.02 – Wear and erosion; metal corrosion. section 3, pp. 387-391
- Barret, T. S., Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W., 1992, "Effect of roughness and sliding speed on the wear and friction of ultra-high molecular weight polyethylene", *Wear*, vol. 153, pp. 331-350
- Eiss, Jr. N. S. and Milloy, S. C., 1981, "The effect os asperity curvature on polymer wear.", *Conference of Wear of materials 1985*, ASME, New York, pp. 650-656
- Eiss, Jr. N. S. and Smyth, K. A., 1981, "The wear of polymers sliding on polymeric films deposited on rough surfaces", *Journal of lubrication Technology*, vol. 103, pp.266-273
- Hou, X. J., Gilmore, R., Mindlin, G. B. and Solari, H. G., (1990) "An efficiently algorithm for fast  $O(N * \ln(N))$  box counting", *Physics Letters A*, vol. 151, number 1,2 pp.43-46
- Hutchings, I. M., 1992, *Tribology: Friction And Wear Of Engineering Materials*. Edward Arnold / London, Chapter 3: Friction of polymers, pp. 51-57
- Ramachandra, S. and Ovaert, T. C. ,1997, "The effect of controlled surface topographical features on the unlubricated transfer and wear of PEEK", *Wear*, vol. 206, pp.94-99
- Silva, C. H., Tanaka, D. K. and Sinatora, A., 1998, "Mecanismos de desgaste do polietileno de alta densidade", 53º Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte - MG, 13 à 17 de Setembro, CD-ROM

- Stupak, P. R. , Kang, J. H. and Donovan, J. A., 1990, "Fractal characteristics of rubber wear surfaces as a function of load and velocity", Wear, vol 141, pp. 73-84
- Tanaka, K. and Nagai, t., 1985, "Effect of counterface on the friction and wear of polytetrafluoroethylene and polyethylene" Conference of Wear of materials 1985, ASME, New York, pp. 397-404

## APÊNDICE

### O MÉTODO DAS CAIXAS

Para o cálculo dos valores de dimensão fractal  $D$ , apresentatos na Tabela 2, utilizou-se o algoritmo denominado por método das caixas (Barnsley, 1988), o qual será descrito a seguir:

- Considere uma curva  $\Gamma$  em que se queira medir a dimensão fractal (Figura-A1);

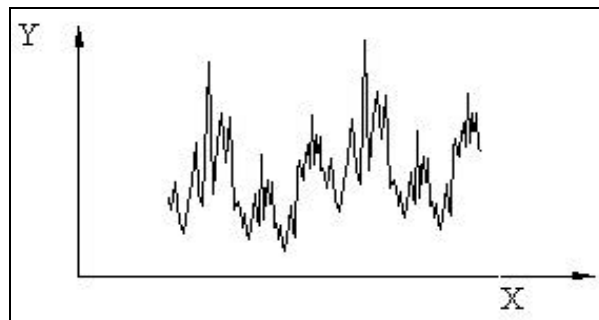


Figura-A1: Curva  $\Gamma$  em que se quer medir a dimensão fractal.

- Divida o espaço que a contém em quadrados de lado  $\epsilon$  (Figura-A2);

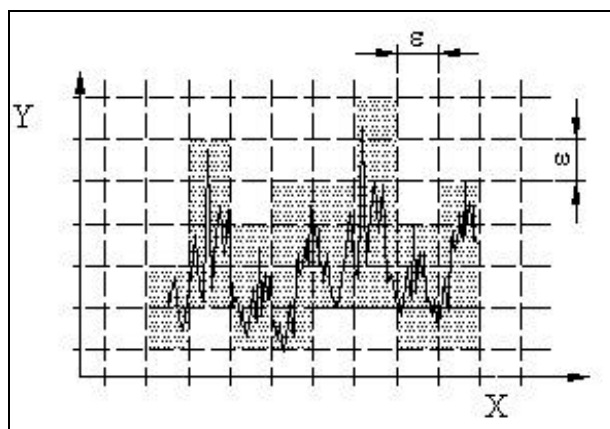
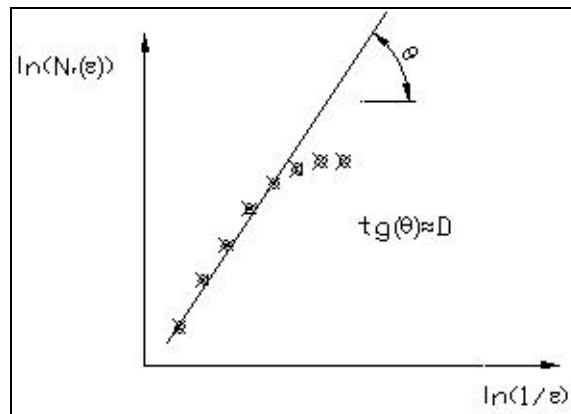


Figura-A2: Divisão do espaço em caixas

- Conte o número de quadrados  $N(\epsilon)$  necessários para cobrir todos os pontos da curva;
- Repita o processo para valores diferente de  $\epsilon$  de modo a montar uma tabela  $N(\epsilon)$  por  $\epsilon$ ;



- Construa um gráfico  $N\Gamma(\varepsilon)$  em função de  $\varepsilon$ , a dimensão fractal será dada pela tangente da região linear do gráfico, como pode ser visto na Figura-A3;



• Figura-A3: Gráfico para a determinação da dimensão fractal.

A dimensão fractal  $D$  é dada pela equação A-1:

$$D = \frac{\ln(Nr(e))}{\ln\left(\frac{1}{e}\right)} \quad (\text{A-1})$$

**Obs.:** Outros métodos para medir a dimensão fractal de um perfil de rugosidade, como o método do compasso (Brow, 1991), também podem ser utilizados.

## REFERÊNCIAS

- Barnsley, M. F., FRACTALS EVERYWHERE. Boston Academic Press, 1988c.
- Brown, C. A. and G. Savary, Describing ground surface texture using contact profilometry and fractal analysis, WEAR, 141 (1991) 211-226.