

CARACTERIZAÇÃO ESTATÍSTICA DA TOPOGRAFIA
DE SUPERFÍCIES APLICADA AO ESTUDO DO PROCESSO
ABRASIVO DE LIGAS POLIFÁSICAS

José D.B. de Mello
Depto. Ciências Físicas, Universidade Federal
de Uberlândia, Uberlândia, MG-Brasil

Edouard Lopez
Thomaz Mathia
Laboratoire de Technologie de Surfaces
Ecole Centrale de Lyon-Ecully-França

RESUMO

Utilizando-se um dispositivo metrológico comandado por micro-computador determinou-se a rugosidade de superfícies que sofreram abrasão. O sinal obtido é digitalizado e armazenado na memória do micro-computador. Aplicando-se a estes dados programa específico pode-se determinar a distribuição estatística das alturas das irregularidades da superfície. Os diferentes parâmetros estatísticos desta distribuição, especialmente os coeficientes de Fisher e Pearson são características de cada superfície. Os resultados obtidos permitem propor uma abordagem original ligando à resistência à abrasão à morfologia da superfície sujeita ao processo abrasivo.

ABSTRACT

Using a metrological device controlled by a micro-computer it was determined the roughness of abraded surfaces. The analogical signal is digitalized and stored in the memory of the micro-computer. Using the experimental data and a specific program it was possible characterize the surface morphology by means of Fisher's and Pearson's parameters. A new approach relating the topographical state of the abraded surface and the abrasion resistance is proposed.

INTRODUÇÃO

A resistência à abrasão não é uma propriedade intrínseca do material mas sim do sistema tribológico [1]. Em consequência, esta característica é função do material, do abrasivo e da configuração mecânica imposta.

A natureza interfacial deste fenômeno faz com que as condições a tuantes nos casos reais sejam bastante complexas. Assim, tanto a reprodução integral destas condições em laboratório, como a modelização do fenômeno são impossíveis. No caso das ligas polifásicas, cada fase pode apresentar um comportamento reológico específico aumentando a complexidade do fenômeno. No estado atual do conhecimento, e, na ausência de leis gerais estabelecidas cientificamente, a análise experimental é ainda uma ferramenta importante no estudo do processo abrasivo [2].

O processo abrasivo é classicamente estudado segundo duas abordagens distintas: Global, utilizando técnicas abrasométricas e Local cuja técnica experimental essencial é a esclerometria.

O presente trabalho apresenta uma nova metodologia para o estudo da abrasão: complementa-se o estudo abrasométrico pela caracterização estatística da topografia de superfície (C.E.T.S.). Nesta abordagem original procura-se correlacionar a resistência à abrasão aos parâmetros que caracterizam a morfologia da superfície. Adicionalmente, esta técnica permite a descrição da evolução do mecanismo de desgaste.

A topografia de uma superfície é definida pela altura $Z(x,y)$ de suas irregularidades. A medida da rugosidade, pelo método tátil, permite o acesso às alturas das irregularidades $Z(x,y)$ em todo ponto $P(x,y)$ da superfície. Esta por sua vez é composta de motivos fundamentais. O arranjo tridimensional destes motivos formam a estrutura da superfície. Assim, a caracterização completa da topografia da superfície necessita: 1 - análise da distribuição estatística da altura das irregularidades no sentido vertical. 2 - Determinação da inter-relação entre dois pontos qualquer da superfície, no sentido horizontal. Esta interdependência é em geral determinada pela função de auto correlação [3].

Considerando a altura das irregularidades $Z(x,y)$ como uma variável aleatória, pode-se caracterizar a distribuição vertical de um perfil pela repartição desta altura em relação a uma linha de referência. Esta linha é definida como uma paralela a linha dos mínimos quadrados que passa pela menor altura das irregularidades ($Z=0$), figura 1.

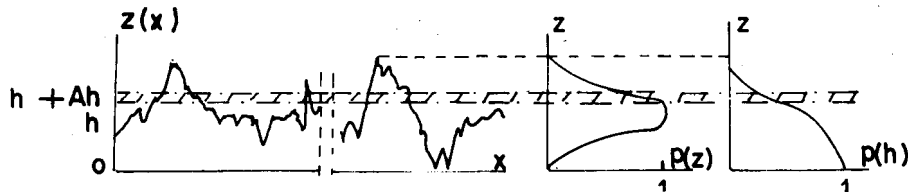


Fig. 1: Perfil da rugosidade, curva da densidade de probabilidade e curva de distribuição da probabilidade

Para uma amostragem suficientemente grande pode-se tratar estatisticamente os dados determinando-se assim a função densidade de probabilidade $p(Z)$. Pode-se ainda calcular a probabilidade de encontrar-se um ponto com altura superior ou igual à h ou seja a função de distribuição da probabilidade $p(h)$.

Pode-se assim, através da estatística descritiva, caracterizar quantitativamente a topografia da superfície a partir das ordenadas do perfil medido $|4|$. Quando se dispõe de um número suficientemente grande de resultados pertencentes à mesma população a lei de distribuição da variável aleatória $Z(x,y)$ pode ser estudada utilizando-se os momentos centrados de ordem 3 e 4. Os diferentes tipos de distribuição estatística podem ser classificadas em função destes momentos ou mais precisamente pelos parâmetros dimensionais definidos a seguir:

. Coeficiente de simetria de Fisher (γ_1), definido como o momento centrado de ordem 3 normalizado pelo desvio padrão.

. Coeficiente de achatamento de Pearson (β_2), definido como sendo o momento centrado de ordem 4 normalizado pelo desvio padrão.

Na prática, as leis de distribuição estatísticas mais frequentemente encontradas na caracterização da topografia de superfícies são: a distribuição normal e suas derivadas. A figura 2 mostra os perfis típicos e os parâmetros característicos da distribuição correspondente.

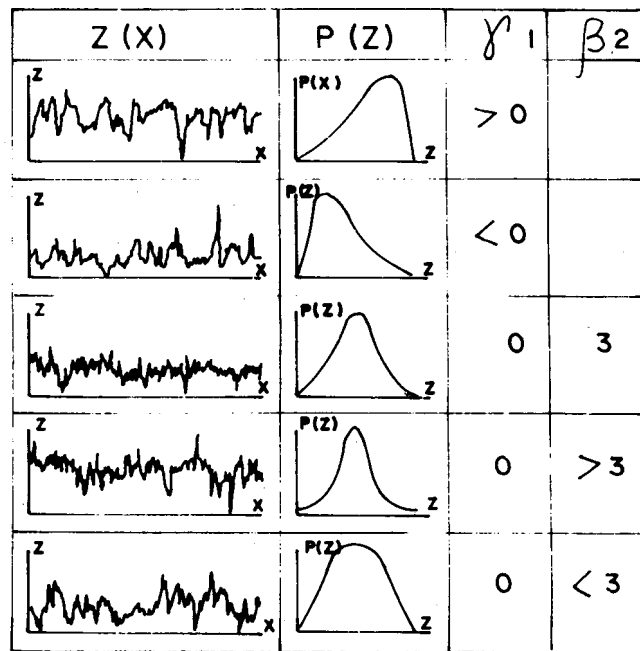


Fig.2: Correlação entre a topografia da superfície e os parâmetros estatísticos característicos.

Para uma curva não simétrica ($\gamma_1 \neq 0$) o coeficiente de Fisher terá o sinal de $(\bar{Z} - Z_m)$ onde Z_m é a ordenada máxima. Para os valores de γ_1 negativos, o perfil correspondente é do tipo platô - vales ao passo que para valores positivos os perfis correspondentes são de tipo platô - picos. Da mesma forma, valores do coeficiente de Pearson diferentes ao correspondente à distribuição normal ($\beta_2 = 3$) correspondem a distribuições estatísticas mais ou menos afinadas do que a distribuição normal. apre

sentando a mesma média e variância.

A forma da distribuição estatística pode ser apreciada pelos coeficientes de Fisher e Pearson, permitindo assim considerar de uma maneira global as irregularidades presentes em uma superfície que sofreu abrasão. Uma maneira cômoda para esta análise é a utilização do plano morfológico, definido pela coordenadas γ_1 e β_2 . A cada ponto possível no plano morfológico corresponde uma distribuição específica das alturas do perfil e portanto uma morfologia específica, figura 3.

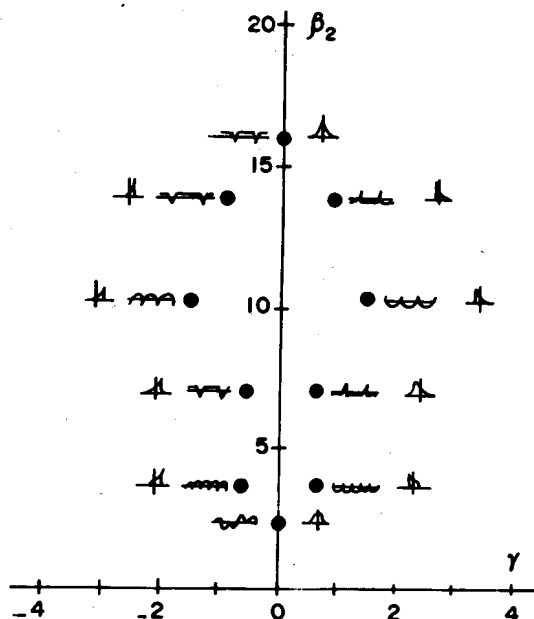


Fig.3: Plano morfológico. São mostrados alguns perfis típicos e as distribuições estatísticas correspondentes.

No entanto, a relação existente entre o perfil da rugosidade e a distribuição estatística de suas alturas não é bijetora, pois que vários perfis diferentes podem ter a mesma distribuição de alturas. Assim, neste plano, um ponto e um só, corresponde ao perfil estudado a ele é representativo da morfologia da superfície no caso em que esta for isotrópica [5].

Adicionalmente, a evolução da morfologia da superfície, qualquer que seja a causa, pode ser apreciada pela determinação do perfil da rugosidade a intervalos determinados. Plotando-se estes pontos sucessivos no plano morfológico, obtém-se a sequência da evolução da superfície e desta forma pode-se apreciar quantitativamente a evolução do mecanismo de desgaste e a contribuição de cada fase ao processo abrasivo.

Os ferros fundidos brancos são ligas polifásicas cuja principal característica é sua elevada resistência à abrasão. O presente trabalho propõe uma abordagem original procurando ligar a resistência à abrasão destas ligas polifásicas complexas à caracterização estatística da topografia de superfícies.

TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

A composição química das ligas estudadas é dada pela tabela I.

Tabela I: Composição química das ligas (Peso%)

Elemento Liga	C	Cr	Mo	V	Mn	Si	
1	1,33	6,80	2,38	-	0,74	0,23	
2	1,92	9,65	3,25	-	1,04	0,45	
Cr-Mo	4	3,26	16,10	3,14	-	1,04	0,45
	5	3,91	18,75	3,00	-	1,10	0,61
	6	0,92	11,35	2,95	-	0,74	0,33
	7	1,65	16,05	3,20	-	1,03	0,56
	8	2,36	21,40	2,98	-	1,04	0,54
	9	2,74	26,60	2,94	-	0,98	0,54
	10	3,38	32,10	3,01	-	1,07	0,55
	Cr-V	VA	2,21	5,99	-	5,61	1,04
VB		2,40	8,18	-	5,91	0,92	0,72
VC		2,44	10,34	-	6,12	0,86	0,66
VD		2,66	8,18	-	4,94	0,56	0,56
VH		3,21	8,37	-	4,89	0,59	0,71

A primeira série corresponde a uma família de ferros fundidos brancos ao cromo e molibdênio ao passo que a segunda série comporta ligas representativas de uma família de ferros fundidos ao cromo e vanádio.

As amostras, ensaiadas no estado bruto-de-fusão, foram obtidas a partir de barras fundidas em moldes de areia.

Como o estado inicial da superfície afeta o comportamento à abrasão [6], as amostras foram preparadas por processos metalográficos clássicos mas automatizados.

Os ensaios de abrasão efetuados reproduzem uma configuração à três corpos, via úmida. O aparelho utilizado já foi descrito anteriormente [7]. Os corpos de prova foram aplicados com uma pressão de $4,7 \times 10^{-3}$ h bar contra um prato em ferro fundido cinzento. O agente abrasivo era composto de alumina de granulometria média 30 microns. Foi utilizado óleo mineral (viscosidade 30 cP) como agente de transporte das partículas abrasivas.

Os ensaios foram interrompidos a intervalos determinados. Visando a eliminação das partículas abrasivas, óleo e produtos da abrasão, os corpos de provas sofreram uma dupla limpeza aos ultrasons. Em seguida os mesmos foram secos por meio de um forte jato de ar quente.

A taxa de desgaste foi determinada pelo método gravimétrico interrompido. Foi utilizada uma balança analítica de precisão 10^{-2} mg.

A cada interrupção, caracterizou-se a morfologia da superfície que sofreu abrasão utilizando-se um dispositivo metroológico mostrado esquematicamente pela figura 4.

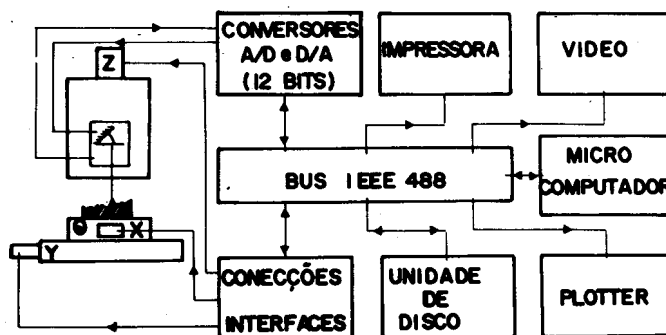


Fig.4: Diagrama esquemático do dispositivo metrológico.

Este dispositivo é composto essencialmente de três módulos: um módulo de medida, um módulo de posicionamento e translação da amostra e um módulo de comando e tratamento estatístico dos dados. O módulo de medida é constituído de um rugosímetro clássico de alta precisão Taylor Robson modelo Talystep. O transdutor é de tipo indutivo com palpador de diamante. O raio de curvatura da ponta é de $1,2 \mu\text{m}$. O módulo de posicionamento e translação é constituído de 3 mesas metrológicas (x,y,z ou θ) de alta precisão, comandadas por motores passo, marca J.L.B. O módulo de comando é composto de um minicomputador, 96 K bytes de memória. Os dados são armazenados em duas unidades de disco de 1 M byte de capacidade. Completam o sistema um bus, interface, conversores A/D e D/A assim como diversos periféricos. Este dispositivo permite ainda a representação tridimensional da superfície analisada.

No caso particular deste trabalho, a força de palpagem foi de 1 mN. A distância total de palpagem foi de $1500 \mu\text{m}$. O sinal obtido é então digitalizado e armazenado pelo microcomputador. Programas específicos asseguram o tratamento estatístico dos dados, a figura 5 mostra um exemplo dos resultados obtidos.

A caracterização das superfícies que sofreram abrasão foi completa da por observação ao microscópio eletrônico de varredura (M.E.V.).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A taxa de desgaste, após 60 minutos de ensaio, das diversas ligas é indicada pela tabela II. Esta tabela apresenta ainda as principais características metalúrgicas destas ligas.

A estrutura metalúrgica destas ligas foi estudada recentemente por um dos presentes autores. Os ferros fundidos brancos ao cromo e molibdênio comportam essencialmente uma matriz austenítica metaestável e carbonetos de solidificação de tipo M_7C_3 [9]. Eles apresentam ainda, como fases minoritárias, carbonetos ricos em molibdênio e produtos resultantes da decomposição da austenita [9,10]. A micro estrutura dos ferros fundidos ao cromo-vanádio apresentam dois tipos de carbonetos de solidificação: carbonetos ricos em vanádio de tipo M_6C_5 e carbonetos ricos em cromo de tipo M_7C_3 [11]. Durante o resfriamento, aparecem precipitados secundários de tipo M_6C_5 . Em consequência, a austenita se transforma em seus produtos normais: Martensita, Bainita e Perlita [11].

Tabela II: Taxa de desgaste e principais características metalúrgicas das ligas estudadas. γ =austenita, M=martensita, B=baixita, P=perlita.

	Quant. de Carbonetos (%)		Estado da matriz	HV (MPa)	ΔU mg.h ⁻¹ .cm ⁻²
	M ₇ C ₃	M ₆ C ₅			
1	4,0	-	-	2740	64,5
2	11,0	-	γ	3520	51,2
4	32,8	-	γ	6060	46,1
5	42,5	-	γ -M	6130	50,6
6	3,3	-	γ -M-B	3610	69,5
7	13,6	-	γ	3570	47,7
8	24,2	-	γ	4780	42,3
9	30,1	-	γ	6040	37,0
10	39,9	-	γ -M	6130	42,7
VA	6,3	5,8	γ -B-M	5340	17,7
VB	10,9	5,7	γ -M	6050	36,4
VC	12,1	4,2	γ -M	6500	30,0
VD	11,2	4,7	γ -M	5500	25,7
VH	22,6	2,8	P	5200	29,3

Para os ferros fundidos brancos ao cromo e vanádio, no entanto, não se pode estabelecer uma correlação simples entre a taxa de desgaste e a quantidade total de carbonetos. Neste caso, a contribuição mais importante é oriunda dos carbonetos M₆C₅, cuja quantidade e morfologia condicionam o comportamento à abrasão destas ligas [7].

A evolução dos parâmetros característicos da topografia da superfície é mostrada pela figura 6. Como as superfícies são aleatórias, apenas a determinação da distribuição no sentido vertical é suficiente para caracterizá-la. Esta figura apresenta além dos parâmetros de forma de distribuição estatística (γ_1 e β_2), o desvio padrão do perfil em relação a reta dos mínimos quadrados (σ) que é a rugosidade RMS da amostra. São indicados apenas os valores para três ligas cujo comportamento caracterizam as duas famílias de ligas. Os resultados correspondentes às outras ligas são sumarizados em outro trabalho [7].

Para as ligas ao Cr-Mo, nota-se que a etapa inicial do processo abrasivo se caracteriza por flutuações importantes destes parâmetros. Em seguida, estes restam mais estáveis. Os perfis respectivos variam de uma maneira aleatória entre o tipo platô-pico e platô-vale. Para as ligas ao Cr-V, no entanto nota-se que estes parâmetros flutuam consideravelmente durante todo o intervalo considerado. Em ambos os casos, o coeficiente de Pearson é predominantemente superior a 3, o que indica que as distribuições estatísticas respectivas são leptocúrticas. Nota-se também que as maiores flutuações correspondem às maiores taxas de desgaste (tab.II). Ressalta-se ainda que a liga VH, rica em carbonetos de tipo M₇C₃ apresenta um comportamento similar ao das ligas ao Cr-Mo, ou seja flutuações importantes dos parâmetros característicos no estágio inicial do processo.

Szuder [6] descreve e modeliza a abrasão 3 corpos de ligas monofásicas como sendo um processo envolvendo essencialmente deformações plásticas repetidas. Como resultado do fluxo plástico, temos acumulação de matéria ao lado dos sulcos e entalhes produzidos. Este mesmo autor mos

VH 60MN

LONGUEUR DE PALPAGE: 1500 MICRONS

PROFIL

ABSCISSES: 1 CM = 100 MICRONS
ORDONNEES: 1 CM = .033333333 MICRONS

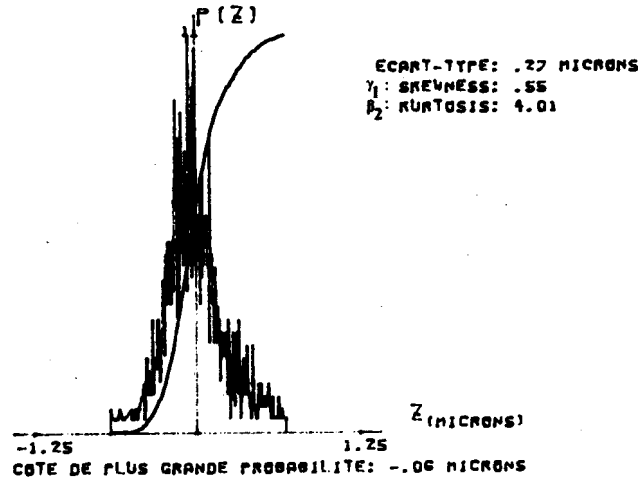


-a-

COTE MAXIMALE: .03 MICRONS
COTE MINIMALE: -.8 MICRONS

RUGOSITE TOTALE:
1.63 MICRONS

DENSITE DE PROBABILITE DES ORDONNEES



-b-

Fig. 5: Resultados típicos

Os resultados apresentados pela tabela II indicam que estas ligas não obedecem a clássica relação de Khrushov [12]. Assim procurou-se estabelecer correlações entre a taxa de desgaste e outros parâmetros metalúrgicos que não a dureza. Dentre estes, a porcentagem de carbonetos apresente relevante importância.

Para o caso dos ferros fundidos brancos ao cromo e molibdênio a taxa de desgaste diminui para quantidades crescentes de carbonetos M_7C_3 , atinge um mínimo à cerca de 30% de carbonetos e em seguida aumenta. Adicionalmente, as superfícies que sofreram abrasão foram observadas por MEV. Pode-se constatar a existência de um efeito "protetor" dos carbonetos em relação à matriz austenítica [7]. Estudos recentes, [13], utilizando esclerometria retilínea à baixa velocidade, comprovam a existência deste efeito "protetor".

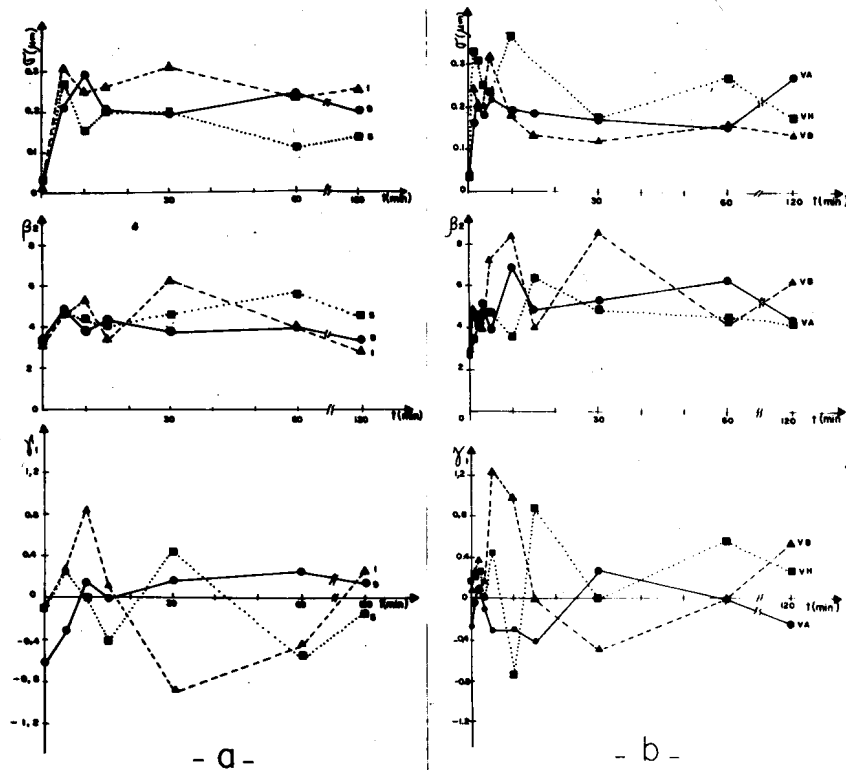


Fig.6: Parâmetros característicos da topografia de superfície em função do tempo de abrasão. a-Ferros fundidos brancos ao cromo-molibdênio, b-Ferros fundidos brancos ao cromo-vanádio.

tra que os grãos abrasivos rolam na interface. Devido ao caráter angular das partículas abrasivas seu movimento produz um entalhamento múltiplo na superfície. Estes entalhes são análogos às impressões produzidas por um teste de dureza. As partículas abrasivas podem ainda alojarse ocasionalmente nos defeitos do disco em ferro fundido [6]. Este ancoamento ocasional faz com que a partícula risque a superfície da amostra produzindo sulcos. Este último processo implica em uma maior taxa de desgaste [14].

Aparentemente, como ilustra a figura 7, o mesmo mecanismo atua nas condições impostas no presente trabalho.

O estágio inicial do processo abrasivo, figura 7b, corresponde à formação de entalhamento múltiplo e a taxa de desgaste será pequena. No entanto, a rugosidade aumenta consideravelmente favorecendo o alojamento ocasional das partículas com conseqüente sulcamento e aumento da taxa de desgaste. Tais fatos podem explicar a importante flutuação dos parâmetros característicos da topografia da superfície no estágio inicial do processo. Após esta etapa, o processo atinge um regime estacionário.

Plotando-se todos os resultados de todos os testes para cada família de ligas, obtém-se um domínio bem definido e característico desta família no plano morfológico γ_1 , β_2 , figura 8.

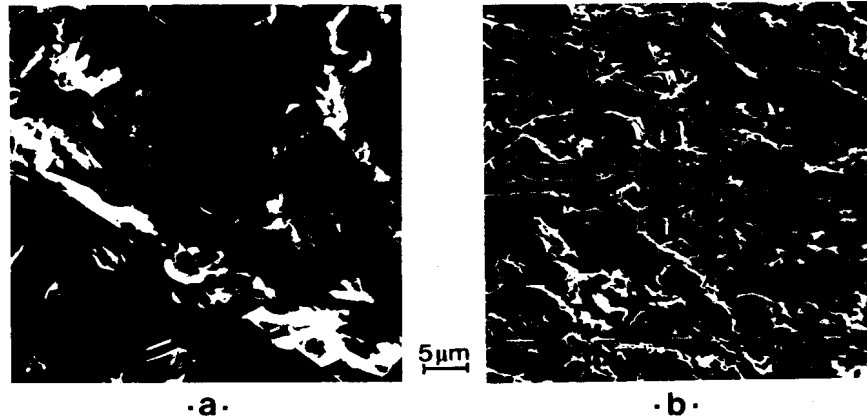


Fig.7: Morfologia do fluxo plástico em estágios diferentes do processo abrasivo a-liga 1,60 minutos, b-liga 7, 2 minutos, MEV.

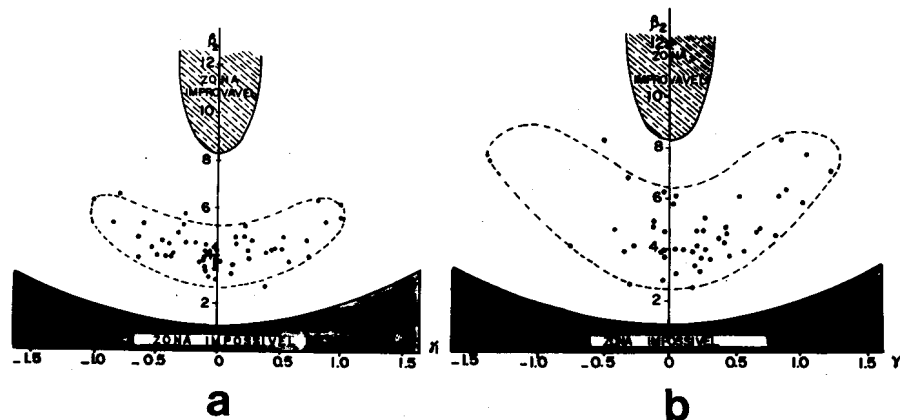


Fig.8: Domínio característico dos ferros fundidos brancos no plano morfológico γ_1, β_2 . a-Cr-Mo b-Cr-V.

A evolução dos parâmetros característicos em ambos os casos é aleatória. O coeficiente de Pearson está compreendido entre aproximadamente 2,6 e 6. Os perfis correspondentes passam aleatoriamente de uma forma platô-pico ($\gamma_1 > 0$) para platô-vale ($\gamma_1 < 0$). Para o caso das ligas ao Cr-Mo esta variação é simétrica. Para o caso das ligas ao Cr-V, no entanto, nota-se uma predominância de pontos na parte correspondente aos perfis de tipo platô-pico ($\gamma_1 > 0$). Nota-se ainda que a extensão do domínio característico dos ferros fundidos brancos ao cromo e vanádio é mais importante do que aquela correspondente aos ferros fundidos brancos ao cromo e molibdênio.

A evolução aleatória dos parâmetros γ_1 e β_2 durante o processo abrasivo indica que o mecanismo de deformação e perda de matéria é bastante complexo.

A evolução da topografia de uma superfície sujeita à abrasão à 3 corpos é descrita satisfatoriamente pela simulação numérica utilizando-se o modelo dos cortes sucessivos [15-16]. Dados experimentais confirmam estes resultados tanto para ligas monofásicas (Al-4% Cu-1% Mg) [5-6] quanto para ligas polifásicas complexas (ferro fundido cinzento) [16-17]. Nestes casos, a superfície apresenta-se sempre do tipo platô-vales ($\gamma_1 < 0$) com valores de β_2 crescentes em função do tempo de abrasão. O comportamento diferenciado apresentado no presente trabalho pode ser explicado pela heterogeneidade da estrutura metalúrgica das ligas estudadas.

Na realidade, a diferença de características das fases presentes afeta consideravelmente o mecanismo de desgaste. A matriz, mesmo no estado martensítico, é mais facilmente deformada e removida que os carbonetos duros e pouco dúteis. A seletividade na remoção de matéria faz com que a forma da superfície evolua de um tipo vale para pico. Adicionalmente, a estrutura metalúrgica afeta a mobilidade dos grãos abrasivos na interface. Quando o entalhamento múltiplo é facilitado (grande quantidade de carbonetos associado à regiões austeníticas de pequeno tamanho) a liga apresenta uma elevada resistência à abrasão. Neste caso, a evolução dos parâmetros morfológicos apresenta um intervalo de variação menos extenso (figura 6 e tabela II).

A distribuição não simétrica do parâmetro de Fisher apresentada pelas ligas ao Cr-V parecem indicar uma contribuição específica dos carbonetos M_6C_5 ricos em vanádio. A distribuição dos resultados mostrada pela figura 9 confirma esta suposição. A maioria dos pontos correspondem à perfis de tipo platô-pico sugerindo que os carbonetos M_6C_5 , devido a sua elevada dureza e coesão com a matriz [18] inibem o processo abrasivo. Posteriormente, eles são desgastados, removidos e o processo reinicia-se.

CONCLUSÕES

Através de técnicas abrasométricas clássicas e caracterização estatística da topografia de superfície procurou-se analisar o mecanismo de desgaste abrasivo atuante em ferros fundidos brancos ao cromo sujeitos à abrasão a três corpos. Os principais resultados são sintetizados a seguir:

1 - A resistência à abrasão dos ferros fundidos ligados ao Cr-V é superior àquela apresentada pelos ferros fundidos brancos ao Cr-Mo.

2 - Para ambas as famílias não se pode estabelecer uma correlação simples entre a taxa de desgaste e a dureza. Pode-se precisar que a natureza e a quantidade de carbonetos influenciam fortemente o comportamento à abrasão destas ligas.

3 - Pode-se estabelecer uma correlação entre a resistência à abrasão e a faixa de variação dos parâmetros característicos da topografia de superfície: Quanto maior a variação destes parâmetros menor a resistência à abrasão da liga. Consequentemente, menor será a área característica da liga no plano morfológico γ_1, β_2 . No entanto esta comparação só pode ser feita para ligas de uma mesma família uma vez que o mecanismo de desgaste afeta o tamanho do domínio característico.

4 - A evolução do mecanismo de desgaste pode ser apreciada pela evolução dos parâmetros γ_1 e β_2 no interior do plano morfológico, e desta forma propor-se uma explicação para a contribuição dos carbonetos M_6C_5 ao processo abrasivo.

REFERÊNCIAS

- [1] Zum Gahr, K.H., "Metallurgical aspects of wear". Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, E.V. Bad Pyrmont, 1979, p.77-104.
- [2] Mathia,T., Journal du Frottement Industriel, nº 14, 1982,p.20-26.
- [3] White-House,D.J. e Archard,J.F., Proc.Royal Soc.,Londres,A 316,1972, p 97-121.
- [4] Suh,N. e Saka ,N.,Fundamentals of Tribology. The M.I.T.Press,1980.
- [5] Fayolle-Callens,C., Tese Dr.Engº.École Centrale de Lyon, Fyon,França, 1983.
- [6] Szuder,A., Tese Dr.Engº. École Centrale de Lyon, Lyon,França,1977.
- [7] De Mello,J.D.B., Tese Dr.Engº - Institut National Polytechnique de Grenoble,Grenoble,França, 1983.
- [8] Maratray,F., Poulalion, A. e Rabbe,P., Bulletin du Cercle D'etude des Metaux,1973, p.11-54.
- [9] De Mello, J.D.B., Durand-Charre,M. e Hamar-Thibault,S., Met Trans A, 14A, 1983, p 1793-1801.
- [10] De Mello, J.D.B., Hamar-Thibault,S. e Durand-Charre,M., "Eutectoide transformation and precipitation in high carbon steel", aceito para publicação. Journal of Materials Science.
- [11] De Mello, J.D.B. e Durand-Charre,M.,Materials Science and Engineering, 67, 1984, p. 109-117.
- [12] Khrushchov,M.M., Proceedings of Conf.on Lubrification and Wear,Londres, Inst. of Mech.Eng.1957.
- [13] De Mello, J.D.B.; Durand-Charre,M. e Mathia ,T., V International Conf on Wear of Materials, Vancouver, A.S.M.E., 1985.
- [14] Larsen-Badse, J. e Premaratne,B., Proc. of Int.Conf. on Wear of Materials, Dearborn, U.S.A., A.S.M.E., 1983, p. 161-168.
- [15] Thomas,T.R., Wear, 22, 1972, p. 83-90
- [16] Mathia,T. e colaboradores, Int.Conf. on Wear of Materials, Vancouver, A.S.M.E., 1985.
- [17] King,T.G., Watson, W. e Stout,K.J., Proc. of 4th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, 1977, p.333-343.
- [18] Popov, V.S. e Nagornyj,P.L., Russian Casting Production, 8, 1969 , p. 389-392.