

INFLUÊNCIA DO ABRASIVO NOS RESULTADOS DE DESGASTE
OBTIDOS PELO ENSAIO DO PINO EM AÇOS INOXIDÁVEIS
COM MICROESTRUTURA DUPLEX (1)

Wolfgang Reick (2)

Michael Pohl (3)

Angelo Fernando Padilha (4)

RESUMO

Este trabalho discute a influência do tamanho e da forma das partículas abrasivas nos resultados de testes de desgaste a seco. Variando-se o tipo de abrasivo utilizado no ensaio do pino obteve-se comportamentos diferentes em aços inoxidáveis com microestrutura duplex. Para facilitar a interpretação dos resultados do ensaio do pino foram realizados ensaios de risco simulando-se os efeitos de cada abrasivo. Os resultados puderam ser explicados em função do tipo de interação entre as partículas abrasivas e a superfície do material.

ABSTRACT

This paper reports the influence of the size and shape of abrasive particles on the results of dry abrasive wear tests. Using a pin-test with variation of abrasive type, different wear behavior in duplex stainless steels were obtained. For the interpretation of the pin-test results a wear measurement via a metallographic scratching method was carried out to simulate the scratch of each abrasive particle. Thereby the results can be referred to the physical interactions between the abrasive particles and the surface of the materials which occur during the wear process.

-
- (1) Trabalho submetido ao I Seminário Sobre Materiais Resistentes ao Desgaste.
 - (2) Dipl.-Ing., candidato ao doutorado, participa atualmente do programa de doutorado "sandwich" entre a Ruhr-Universität Bochum e a EPUSP.
 - (3) Professor Titular do Instituto de Materiais da Universidade do Ruhr de Bochum, RFA.
 - (4) Professor Livre-Docente do Departamento de Engenharia Metalúrgica da EPUSP.

1. INTRODUÇÃO

Um número grande de artigos de consumo e de componentes de máquinas estão sujeitos a solicitações deslizantes ou abrasivas e a vida útil destes objetos é então limitada pelo desgaste proveniente destas solicitações/1,2/. Um país industrializado tem enormes prejuízos com perdas térmicas, perdas sonoras, vibrações, luminescência, perdas nas mudanças de forma e microestrutura dos materiais e perdas de massa que podem ocorrer durante o processo de desgaste.

Por exemplo, os prejuízos causados por desgaste (e suas consequências) na RFA em 1984 foram de aproximadamente 8,5 bilhões de dólares /3/, isto é, mais de 1% do produto interno bruto daquele país. Em outras palavras, os prejuízos causados por desgaste são da mesma ordem de grandeza dos prejuízos causados por corrosão.

A área do conhecimento que trata dos complexos problemas envolvidos em atrito e desgaste é a tribologia (do grego tribos ; ação de esfregar, atrito). Para facilitar o entendimento da grande multiplicidade de eventos que ocorrem em um tribosistema - um tribosistema é composto de 4 elementos: objeto, contra-objeto, elemento interfacial (por exemplo, lubrificante) e meio - é conveniente classificá-los em um número não muito grande de tipos de desgaste.

Os quatro tipos de desgaste mais frequentemente mencionados na literatura são: desgaste abrasivo, desgaste por fadiga superficial, adesão e triboreação /4/. O mais importante deles é o desgaste abrasivo.

1.2 - Desgaste Abrasivo

Um critério importante para que desgaste abrasivo ocorra ou não é a relação de durezas entre o objeto e o contra-objeto. O desgaste abrasivo ocorre quando um objeto mais duro penetra ou risca um corpo mais mole.

Definindo-se dureza como o quociente da força normal pela área da impressão tem-se no caso de abrasão que a área de contato entre objeto e partícula abrasiva é inversamente proporcional à dureza do objeto /5/. Assumindo-se que o desgaste é proporcio-

nal à área de contacto conclui-se que a resistência ao desgaste é proporcional à dureza do material. Esta lei simples é obedecida por muitos metais puros recozidos /6/. Uma exceção é o aumento de dureza causado por encruamento, o qual não leva a um aumento da resistência ao desgaste, uma vez que o objeto sofre normalmente - grande encruamento antes que ocorra perda de massa (desgaste).

Na prática a taxa de desgaste é influenciada por vários outros fatores, conforme ilustra a figura 1.

Os fenômenos que ocorrem durante o desgaste podem ser descritos qualitativamente com auxílio de 4 mecanismos /7/, conforme ilustra a figura 2:

- Microsulcamento (figura 2a): É causado por contra-objetos pouco agudos em contacto deslizante. Ocorre intensa deformação plástica da matriz. As bordas abauladas são retiradas subsequentemente.
- Microcorte (figura 2b): Aparas são retiradas por contra-objetos agudos.
- Microfadiga (figura 2c): Uma região é sucessivamente formada plasticamente. O processo repete-se (fadiga de baixo ciclo) até a retirada de material.
- Microtrincamento (figura 2d): Ocorre normalmente em objetos duros por meio de fratura frágil. Frequentemente são arrancadas partículas mióres que o próprio sulco, causando do grande perda de massa.

Mais de um mecanismo pode atuar de forma simultânea ou não em um tribosistema.

Para se poder fazer afirmações quantitativas sobre desgaste é necessária experimentação. Experiências de campo em componentes são geralmente caras, demoradas e não permitem uma variação - ampla dos parâmetros. Por estas razões procura-se simulá-las em laboratório com auxílio de ensaios simplificados. A figura 3 apresenta de forma esquemática vários tipos de ensaios de desgaste.

As grandezas mais utilizadas para medir o desgaste são : desgaste linear absoluto (em mm), desgaste volumétrico absoluto (em mm³) e a perda de massa (em g).

Para um sistema tribológico definido, a taxa de desgaste (W), ou simplesmente desgaste, é dada pela fórmula:

$$W = \frac{\Delta m}{\rho \cdot A \cdot L} \quad \text{equação 1}$$

onde: Δm = perda de massa, ρ = densidade do objeto, A = área aparente de desgaste e L = comprimento do contacto. A resistência ao desgaste é dada por $(W)^{-1}$.

Devido ao número enorme de tribosistemas não existem ainda normas internacionais disponíveis. Existe, no entanto, um esforço grande para padronizar os ensaios e as normas DIN e ASTM/ANSI já apresentam instruções gerais para ensaios e normas específicas para alguns ensaios mais comuns.

1.3 - O teste do pino e suas limitações

O teste do pino ("Pin-Abrasion Test") é, dentre mais de uma centena de ensaios, um dos mais utilizados para avaliar o desgaste abrasivo. Trata-se de um tribosistema aberto, onde só o desgaste do objeto (e não do contra-objeto) é normalmente pesquisado. Outra característica deste ensaio é a ausência de elemento interfacial, por exemplo, lubrificante. O corpo de prova desliza sobre papel abrasivo contendo partículas de SiC, Al₂O₃ ou FLINT, evitando-se a passagem do corpo de prova pela mesma região do abrasivo por mais de uma vez. O corpo de prova sofre rotação durante o ensaio. Antes do ensaio propriamente dito, faz-se um pré-ensaio, de modo a "acostumar" a superfície do corpo de prova.

Os resultados do ensaio do pino devem sofrer uma correção, pois o papel abrasivo pode apresentar heterogeneidades provenientes da sua fabricação. Para isto é utilizado um corpo de prova padrão, cujo desgaste em um abrasivo similar, também padronizado, é conhecido. A diferença entre o valor do desgaste do corpo de prova padrão nos dois abrasivos (o padronizado e o atual) é o fator de correção que deve ser aplicado ao corpo de prova que está sendo ensaiado. Os corpos de prova para o ensaio do pino são bastante simples. São corpos de prova cilíndricos com diâmetro entre 4 e 7 mm e um comprimento mínimo de 13 mm. O material perdido (desgaste) em cada ensaio é mínimo.

O teste do pino é muito adequado para comparações qualitativas entre materiais não muito diferentes do mesmo grupo. A utilização ampla dos resultados do ensaio do pino para a previsão do comportamento de materiais em tribosistemas reais é normalmente - problemática, devido as habituais especificidades dos tribosistemas reais.

Outro problema do ensaio do pino é a escolha do papel abrasivo mais adequado para comparar materiais. Mudanças apenas no tamanho e na forma das partículas abrasivas podem alterar sensivelmente o desempenho relativo de dois materiais, conforme será evidenciado neste trabalho. A interação de partículas abrasivas de tamanhos e formas diferentes com fases ou inclusões de tamanhos diferentes pode levar a mecanismos de desgaste e desempenhos diferentes.

1.4 - Aços inoxidáveis ferríticos-austeníticos como microestrutura duplex

Neste trabalho são comparados os comportamentos em desgaste de três composições de aços inoxidáveis ferríticos-austeníticos. Estes aços duplex são especificados para aplicações onde alta resistência à corrosão e alta resistência mecânica são necessárias /8-11/. Eles são utilizados em componentes de equipamentos expostos a água do mar e em trocadores de calor, bombas, hastes, eixos, centrífugadores e tubos para equipamentos das indústrias química, petroquímica, de alimentos, assim como em equipamentos para desulfuração (controle de poluição) de gases. Estes aços são também utilizados nas indústrias fotográficas, de papel e de tintas.

Os aços inoxidáveis ferríticos-austeníticos com microestrutura duplex podem ser classificados em dois sub-grupos:

- i) ligas de baixo teor de carbono ($0,01 \leq C \leq 0,08$), as quais são frequentemente conformadas mecanicamente e
- ii) ligas de alto teor de carbono ($0,3 \leq C \leq 0,5$), utilizadas no estado bruto de fundição.

A grande vantagem dos aços inoxidáveis duplex em relação aos aços austeníticos ou ferríticos é sua combinação favorável de

propriedades. A figura 4 compara estes três grupos de aços inoxidáveis. Os aços duplex apresentam limite de escoamento e limite de resistência, principalmente limite de escoamento, mais altos que os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos tradicionais e maior tenacidade que os inoxidáveis martensíticos e que os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação. Os aços duplex com alto teor de carbono apresentam excelente resistência ao desgaste. Os aços duplex com baixo teor de carbono apresentam melhores trabalhabilidade e soldabilidade que os inoxidáveis ferríticos. Os aços duplex unem a excelente resistência à corrosão sob tensão em meios contendo íons cloreto dos aços inoxidáveis ferríticos com a alta resistência a fragilização por hidrogênio dos inoxidáveis austeníticos. Os aços duplex apresentam também boa resistência à corrosão uniforme, à corrosão em frestas e à corrosão sob fadiga. As figuras 5 e 6 mostram as microestruturas típicas de um aço duplex com baixo teor de carbono (fig.5) e de um aço com alto teor de carbono (fig.6).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas três ligas diferentes neste trabalho (vide Tabela 1). A liga número 1 é uma liga comercial (DIN-W.-Nr: - 1.4462), com carbono baixo, laminada a quente, apresentando uma microestrutura consistindo de lamelas de austenita e de ferrita e praticamente isenta de carbonetos.

A liga número 2 (W.-Nr: 1.4464), bruta de fundição, apresentava cerca de 8% de carbonetos de cromo (% em peso, valor obtido por extração de precipitados), concentrados principalmente nas regiões austeníticas.

A liga número 3, também bruta de fundição, contendo 1,55% de Nb, apresentava cerca de 11% de carbonetos de cromo e de nióbio distribuídos igualmente na austenita e na ferrita, respectivamente.

2.1 - Ensaio do pino

O ensaio do pino utilizado neste trabalho é mostrado esquematicamente na figura 7. O corpo de prova cilíndrico tinha diâmetro $d = 6$ mm, era submetido a movimento de rotação, estava pres-

sionado por uma força $F_n = 37,21$ N e deslizava em pistas paralelas com velocidade $v = 4,35$ mm/s. Dois tipos de papel abrasivo foram utilizados:

- 1) papel abrasivo de SiC, grana 220, com partículas abrasivas de tamanho médio $70 \mu\text{m}$ e
- 2) papel abrasivo de Al_2O_3 , grana 1000, com partículas abrasivas de tamanho médio $7 \mu\text{m}$.

Com auxílio da equação 1 foram determinadas as taxas de desgaste, W , para as três ligas.

2.2 - Ensaio de riscamento

O equipamento utilizado no ensaio de riscamento foi construído no Instituto de Materiais da Universidade do Ruhr em Bochum, RFA /12/ e é mostrado esquematicamente na figura 8. Variando-se a carga aplicada, obtêm-se sulcos de diferentes dimensões. A superfície desgastada era posteriormente analisada e fotografada em um microscópio eletrônico de varredura modelo JSM 840 da firma JEOL. Foram produzidos dois tipos de sulcos com uma ponta de diamante:

- 1) sulcos produzidos com auxílio de uma força $F_n = 0,98$ N, que simulava os efeitos do papel de SiC e
- 2) sulcos produzidos com auxílio de uma força $F_n = 0,196$ N, que simulava os efeitos do papel de Al_2O_3 .

A velocidade de deslizamento da ponta de diamante era de $1,8 \mu\text{m/s}$.

A maioria dos ensaios foi realizada na liga número 3.

3. RESULTADOS

3.1 - Ensaio do pino

A figura 9 sumariza os resultados dos ensaios do pino:

- a) papel abrasivo de SiC, tamanho de partícula $70 \mu\text{m}$. A liga número 1 apresentou, surpreendentemente, o menor

valor de desgaste: $W = 3,715.10^{-5}$. A liga com 8% de carbonetos (liga 2) apresentou um desgaste pior que a liga 1: $4,014.10^{-5}$. A liga contendo 11% de carbonetos (liga 3) apresentou a menor resistência ao desgaste: $4,278.10^{-5}$.

- b) papel abrasivo de Al_2O_3 , tamanho de partícula $7 \mu m$. As relações de resistência ao desgaste se inverteram em comparação com o papel abrasivo anterior. A liga - número 1, isenta de carbonetos, apresentou o pior desempenho: $1,091.10^{-5}$. A liga 2 apresentou valor inter-mediário: $0,809.10^{-5}$. A liga 3, com maior quantidade de carbonetos, apresentou o menor desgaste: $0,729.10^{-5}$.

3.2 - Ensaio de riscamento

Os resultados dos ensaios de riscamento são apresentados - nas figuras 10-13 para a liga 3. As micrografias das figuras 10 e 11 mostram os sulcos referentes a simulação do papel abrasivo de SiC com força $F_n = 0,98 N$. Na figura 10 pode-se reconhecer facilmente um sulco de aproximadamente $25 \mu m$ de largura (aumento - 1000 x). O mecanismo de desgaste atuante é o de microcorte. Na figura 11, com aumento maior (5000 x), pode-se identificar um mecanismo de desgaste adicional: o contra-objeto e o sulco são - claramente maiores que os carbonetos da microestrutura e a ponta-de diamante arranca-os quase que totalmente. Este mecanismo é o de microtrincamento. A superposição destes dois mecanismos, micro corte e microtrincamento, pode levar a altos valores de desgaste.

As micrografias das figuras 12 e 13 mostram os sulcos refe-rentes a simulação do papel abrasivo de Al_2O_3 com força de $0,196 N$. Na figura 12 nota-se um sulco com $7-8 \mu m$ de largura (au-mento de 1000 x). Na figura 13 vê-se um sulco passando por um car-boneto de nióbio (NbC) localizado na ferrita (F). O carboneto com cerca de $10-15 \mu m$ é objeto do mesmo micromecanismo de desgaste : microcorte. O tamanho do sulco é menor que o tamanho dos carbone-tos e o mecanismo de microtrincamento não atua neste caso.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A resistência ao desgaste de uma liga contendo várias fases depende aditivamente da resistência ao desgaste de cada fase e das respectivas frações volumétricas /5/. Os aços inoxidáveis duplex com alto teor de carbono foram desenvolvidos seguindo esta diretriz: os carbonetos, mais duros que a austenita e a ferrita, devem aumentar a resistência ao desgaste do material.

Analisando-se os resultados dos ensaios com papel de SiC de 70 μm e sua simulação observa-se um comportamento totalmente oposto ao habitual: a liga isenta de carbonetos apresenta a maior resistência ao desgaste, a qual diminui com o aumento da quantidade de carbonetos. Este comportamento inverte-se para o abrasivo de Al_2O_3 de 7 μm .

Os resultados dos ensaios do pino em conjunto com os ensaios de riscamento são explicados a seguir. As partículas de SiC do papel abrasivo, com diâmetro de 70 μm e dureza na faixa 2500-3000 HV, são maiores e mais duras que os carbonetos da matriz. Isto leva à ocorrência de dois micromecanismos: microcorte e microtrincamento. O mecanismo de microtrincamento é responsável por grande perda de massa. Além disto, os carbonetos arrancados podem atritar-se com a austenita e a ferrita durante o processo de desgaste, constituindo-se em um sistema abrasivo de três objetos. A dureza das partículas de Al_2O_3 , cerca de 1800 HV, é comparável com a dureza dos carbonetos. A maioria das partículas de Al_2O_3 (7 μm) é menor que as partículas de carbonetos ($\leq 20 \mu\text{m}$). Os resultados dos ensaios de riscamento sugerem que neste caso o mecanismo de microtrincamento não ocorre, ou sua ocorrência é pouco significativa. Neste caso os carbonetos contribuem para aumentar a resistência ao desgaste do material.

5. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho permitem duas conclusões principais:

- 1) Para que precipitados duros possam aumentar a resistência ao desgaste da matriz uma pré-condição deve ser sa-

tisfeita: os precipitados duros devem ser pelo menos do mesmo tamanho do sulco causado pelo contra-objeto. Caso isto não se verifique, a resistência ao desgaste de um material pode ser piorada por precipitados duros.

- 2) O conhecimento da microestrutura, em particular do tamanho e a dureza das fases, assim como da dureza do contra-objeto são essenciais para explicar os resultados de ensaios de desgaste.

AGRADECIMENTOS

Ao Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico (DAAD-Deutscher Akademischer Austauschdienst) pelo financiamento do projeto MF-16 (Micromecanismos de Desgaste) dentro do Programa Brasil do Stifterverband fuer die Deutsche Wissenschaft.

REFERÊNCIAS

- [1] SCHATT, W. Werkstoffe des Maschinen-, Anlagen- und Apparatebaus. Dr. Alfred Huethig Verlag, Heidelberg, 3. Auflage, 1987, pag.335-377.
- [2] BLUMENAUER, H. Werkstoffprüfung, VEB Deutscher Verlag fuer Grundstoffindustrie, Leipzig, 4. Auflage, 1987, pag.153-159.
- [3] ROTONDARO, R.G. Mecanismos de desgaste abrasivo. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia, EPUSP, 1988.
- [4] MEWES, D. Einfluss der relativen Anteile von Mikrospanen zu Mikropfluegen auf den abrasiven Verschleisswiderstand duktiler Metalle. VDI-Fortschrittberichte, Reihe 5, Nr.101, VDI-Verlag, Duesseldorf, 1988, pag.108.
- [5] STOLTE, E. Verschleisswiderstand. in: Werkstoffkunde Stahl. Band 1 (Grundlagen), Verlag Stahleisen m.b.H, Duesseldorf, 1984, pag.630-642.
- [6] CHRUSCOV, M.M. In: Proceedings of the conference on lubrication and wear. London, 1.-3. Oct.1957, Publ.by the Institution of Mechanical Engineers, London, 1958, pag.655-659.
- [7] ZUM.GAHR, K.H. Microstructure and wear of Materials. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1987, pag.96.
- [8] NIROSTA 4462 - ein interessanter neuer nichtrostender Stahl. Oeffentlich zugaengliche Bildtafel der Friedrich Krupp AG, Villa Huegel, Essen, BRD, 1988.
- [9] GYSEL, W.; DYBOWSKI, G.; WOJTAS, H.J. & SCHENK, R. Hochlegierte Duplex- und vollaustenitische Legierungen fuer Qualitaets-Stahlgussstuecke. Konstruieren und Giessen, Bd.12, 1987, pag.13-27.

- [10] POHL, M. PADILHA, A.F. Aços inoxidáveis ferríticos-austeníticos com microestrutura duplex. Nickel, No.8, Inst.Brasileiro de Informação do Chumbo, Níquel e Zinco, São Paulo, Sept., 1988, pag.7.
- [11] GRUNDMANN, R.; GUEMPEL, P. & MICHEL, E. Betrachtungen ueber die Einsatzmoeglichkeiten eines ferritisch-austenitischen und eines hochfesten austenitischen Stahles im Chemikalientankerbau. Thyssen Edelstahl, Technische Berichte, Bd.14, 1988, pag.49-56.
- [12] NOECKER, H. & HORNBOGEN, E. Reibungs- und Verschleissmessungen mit Hilfe einer Metallographischen Kratzermethode. Sonderbaende der Praktischen Metallographie, Band 19, Dr.Riederer-Verlag, Stuttgart, 1988, pag.103-114.

LIGA-No	N-Nr.	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Al	Nb
1	1.4462	0,02	0,55	1,74	22,05	5,95	2,97	0,136	-	-
2	1.4464	0,32	0,97	1,31	26,68	5,93	2,06	0,085	0,039	-
3	(1.4464+Nb)	0,31	1,03	1,27	25,94	5,74	2,04	0,085	0,040	1,55

Tabela 1: Composição química (em % em peso) dos aços inoxidáveis duplex utilizados neste trabalho

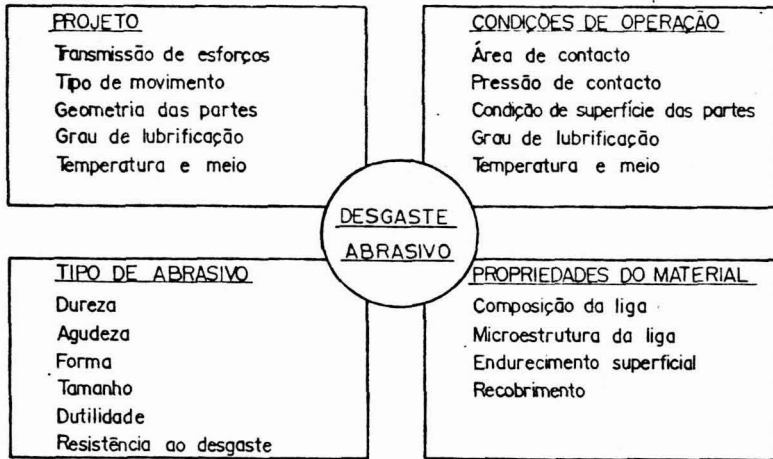


Figura 1: Fatores que influenciam o desgaste abrasivo

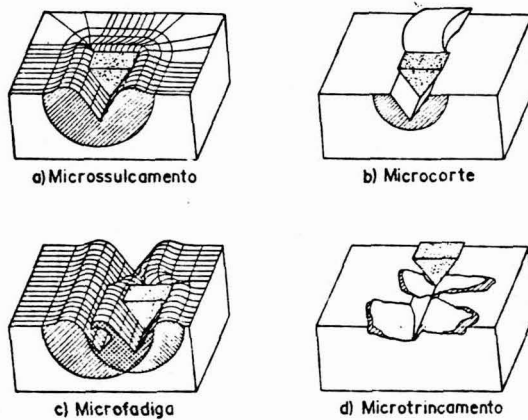


Figura 2: Interação física entre partículas abrasivas e a superfície dos materiais (Micromecanismos de desgaste)

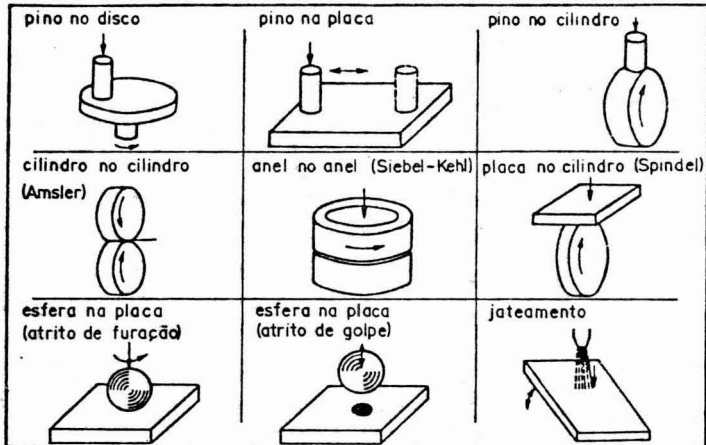


Figura 3: Alguns tipos de ensaios de desgaste (esquemático)

Material	FERRÍTICOS (18-28% Cr, ~1,5%Mo)	FERRÍTICOS- AUSTENÍTICOS (Duplex)	AUSTENÍTICOS (~18% Cr, 8-14% Ni, 15%Mo)
Características			
Limite de escoamento/L. de resistência	+	+ +	+
Tenacidade a temperatura ambiente	-	+	+
Tenacidade em baixas temperaturas	-	(+)	+
Processamento:			
conformação mecânica	-	+	+ +
soldabilidade	-	(+)	+
usinabilidade	+	+ +	+
Resistência à corrosão:			
uniforme	+	+	+
por pites	+	+	+
corrosão sob tensão transgranular	+	+	-
corrosão sob tensão intergranular	-	+	+
corrosão sob fadiga	+	+ +	+

Figura 4: Características dos aços inoxidáveis duplex em comparação com aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos.

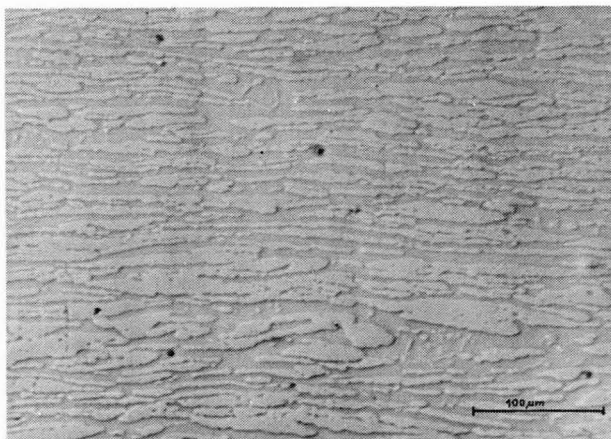


Figura 5: Microestrutura de um aço inoxidável duplex (DIN W.- Nr.1.4462) de baixo teor de carbono (0,02%). Aumento 250X.

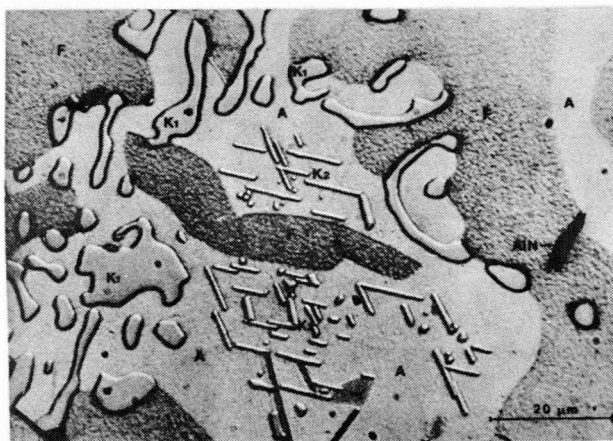


Figura 6: Microestrutura de um aço inoxidável duplex (DIN W.-Nr. 1.4464) de alto teor de carbono (0,32%). Aumento 1000X.

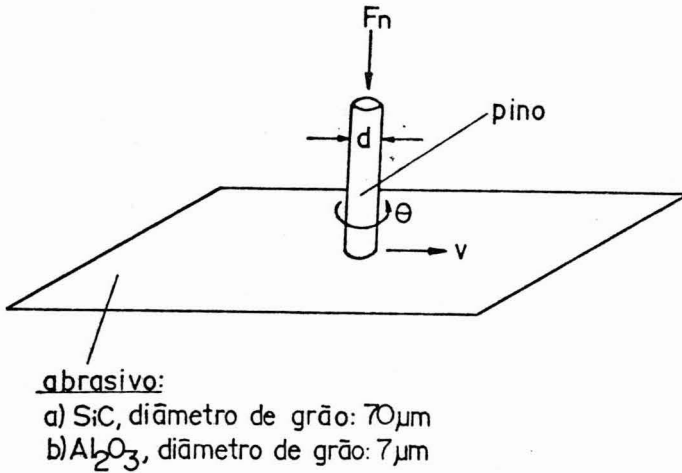


Figura 7: Ensaio do pino (Pin-Test), esquemático

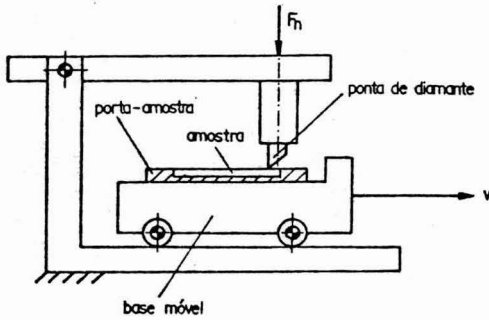


Figura 8: Representação esquemática do ensaio do risco

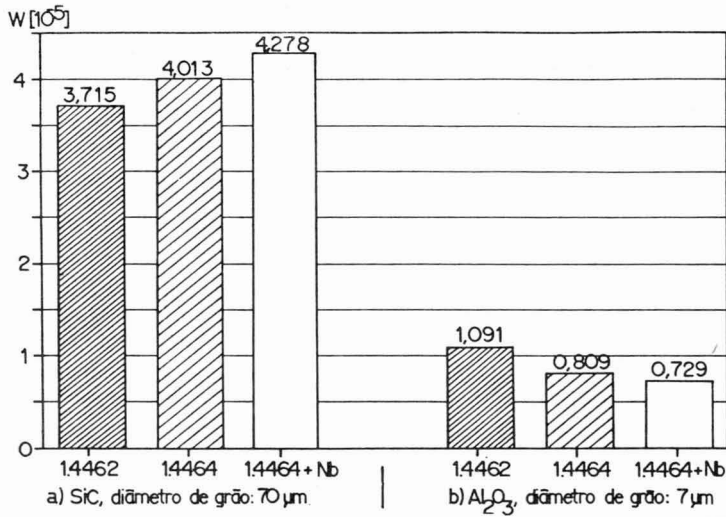


Figura 9: Influência do tipo de abrasivo no desgaste (W) de aços inoxidáveis duplex.

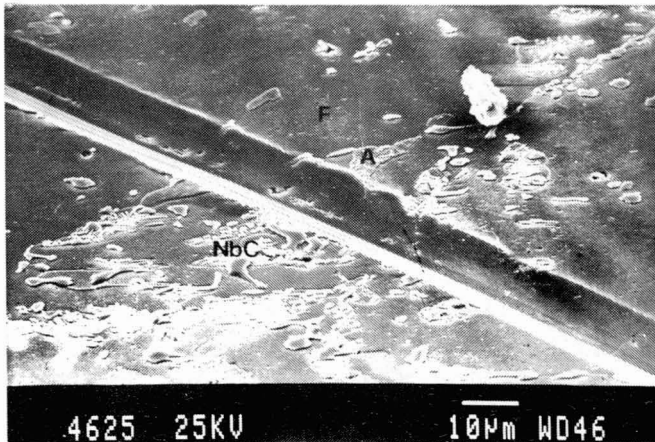


Figura 10: Ensaio do risco na microestrutura da liga 3 com força de 0,98N. Microscopia eletrônica de varredura. Aumento 1000 X. F = Ferrita; A = Austenita.

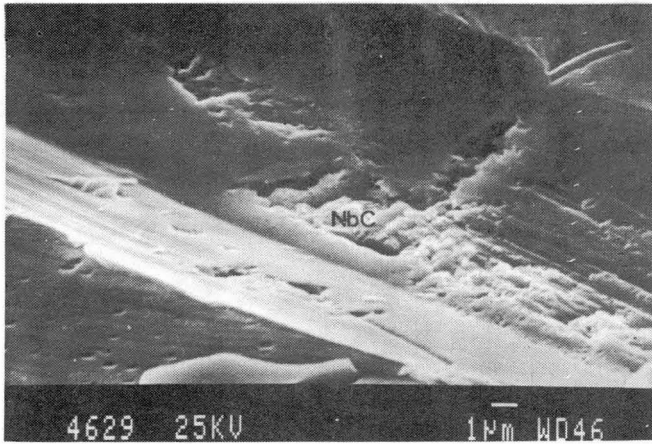


Figura 11: Detalhe da micrografia anterior mostrando a ocorrência de microtrincamento. Aumento 5000X.

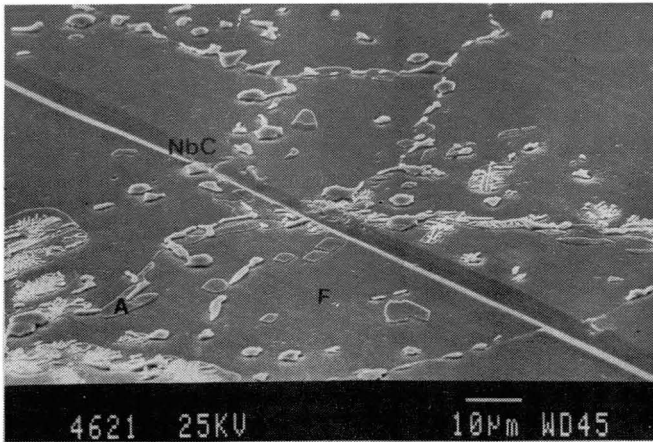


Figura 12: Ensaio do risco na microestrutura da liga 3 com força de 0,196N. Microscopia eletrônica de varredura. Aumento 1000X. F = Ferrita; A = Austenita; NbC = carboneto de nióbio.

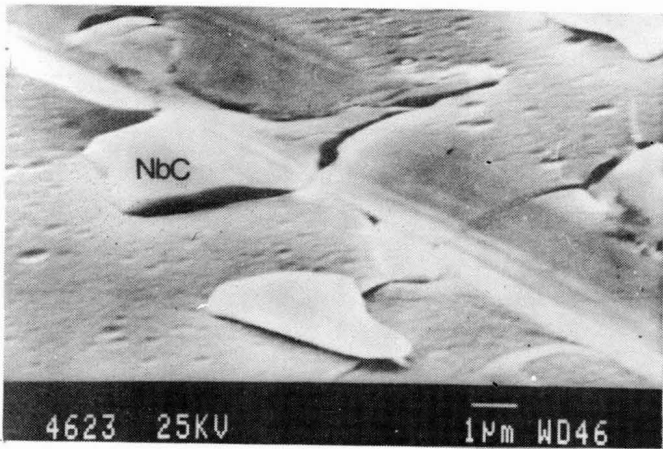


Figura 13: Detalhe da micrografia anterior mostrando apenas a ocorrência de microcorte. Aumento 8000x.

