

# COMPORTAMENTO EM DESGASTE POR DESLIZAMENTO DE MATERIAIS UTILIZADOS EM APLICAÇÕES OFFSHORE<sup>1</sup>

Cristian Camilo Viáfara<sup>2</sup>  
Amilton Sinatora<sup>3</sup>  
Fabio Feresin<sup>4</sup>

## Resumo

Neste trabalho é realizada uma caracterização do comportamento tribológico de materiais utilizados em aplicações *offshore*. Os pares estudados foram aço duplex contra aço duplex, o polietileno de alta densidade (PEAD) contra aço duplex (AD) e contra aço galvanizado (AG). Os ensaios de desgaste foram do tipo deslizamento alternativo, com as condições de ensaio envolvendo cargas normais entre 60 e 240 N, velocidade de deslizamento de 0,02 m/s e distância deslizada de 10 mm. Os resultados de perda de massa, coeficiente de atrito e taxa de desgaste são apresentados. Estes resultados foram confrontados com as análises das superfícies de desgaste, visando explicar o comportamento tribológico de cada par estudado. Nos pares polímero-metal o desgaste esteve altamente influenciado pela fluência do pino de PEAD, apresentando uma maior taxa de desgaste que o par metal-metal em alguns níveis de carga normal aplicada.

**Palavras-chave:** Desgaste por deslizamento; Polietileno de alta densidade; Aços; Aplicações *offshore*.

## SLIDING WEAR BEHAVIOR OF MATERIALS USED IN OFFSHORE APPLICATIONS

### Abstract

In this work a characterization of the tribological behavior of materials used in offshore applications is made. Duplex steel (AD) against duplex steel, high density polyethylene (PEAD) against duplex steel and galvanized steel (AG) were the studied pairs. Reciprocating sliding was the used as the wear testing, with normal loads between 60 and 240 N, sliding velocity of 0,02 m/s and sliding distance of 10 mm. Mass loss, friction coefficient and wear rate results are presented. The results were discussed with the worn surfaces analysis, trying to explain the tribological behavior of sliding pairs. In the polymer-metal pairs the wear was considerably influenced by the fluency of PEAD pin, exhibiting higher wear rates than the metal-metal pair in some conditions of normal load.

**Key words:** Sliding wea; High density polyethylene; Steels; Offshore applications.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Doutorando, Laboratório de Fenômenos de Superfície, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, Brasil. cristian.arango@poli.usp.br*

<sup>3</sup> *Professor titular, Laboratório de Fenômenos de Superfície, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, Brasil. sinatora@usp.br*

<sup>4</sup> *Gerente da Área de Materiais, Prysmian Cables and Systems, Brasil. fabio.feresin@prysmian.com*

## 1 INTRODUÇÃO

O atrito e o desgaste presentes no deslizamento entre superfícies são as causas principais de falha e indisponibilidade de muitos componentes de máquinas, como consequência das perdas de massa e de dimensões.<sup>(1)</sup>

A indústria petrolífera *offshore* possui várias aplicações envolvendo o movimento relativo entre superfícies que cabe dentro do panorama do desgaste por deslizamento. Os componentes operando em deslizamento estão usualmente submetidos a diversos fenômenos como fadiga, impacto, corrosão, entre outros.<sup>(2)</sup> Uma destas aplicações a constituem os cabos umbilicais, os quais transmitem os sinais e a alimentação entre a plataforma marítima e os equipamentos submersos no fundo do mar. Estes cabos estão compostos por camadas cilíndricas de materiais metálicos e poliméricos, as quais apresentam deslocamentos relativos entre si pela ação das ondas, o vento e as correntezas oceânicas.<sup>(3)</sup>

Nos últimos anos o esgotamento das reservas do petróleo no mundo tem promovido um avanço crescente na exploração em águas de grande profundidade. Aliás, as jazidas de petróleo estão sendo descobertas em águas cada vez mais profundas. Estes aspectos levam a que um desempenho adequado dos componentes comece a ser mais crítico. Por esta razão é indispensável melhorar a seleção dos materiais utilizados na fabricação destes elementos, junto com sua predição de vida útil. Para isto é preciso realizar uma análise dos níveis críticos de falha em atrito e desgaste destes materiais.

O objetivo do presente trabalho é caracterizar o comportamento em desgaste por deslizamento de materiais utilizados em aplicações *offshore*. Para isto foram executados ensaios de desgaste do tipo pino-sobre-placa, comparando as taxas de desgaste e os coeficientes de atrito entre os pares estudados. Adicionalmente, procurou-se conhecer quais os mecanismos de desgaste operantes nos sistemas tribológicos testados. Por último, busca-se abrir uma discussão em relação ao comportamento em desgaste dos materiais utilizados na indústria *offshore*, já que são poucos os trabalhos publicados tratando este assunto.<sup>(4,5)</sup>

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais Testados

Os materiais usados nos ensaios de laboratório foram o polietileno de alta densidade (PEAD), o aço inoxidável duplex (AD) e o aço galvanizado (AG). As propriedades físicas e mecânicas do PEAD são apresentadas na Tabela 1, enquanto na Tabela 2 são exibidos os valores de dureza Vickers obtidos para os aços. A caracterização das superfícies foi realizada através de medições do parâmetro  $R_a$ , o qual foi selecionado como parâmetro de comparação de acabamento superficial. Os valores de  $R_a$  são mostrados na Tabela 3 para os três materiais estudados. As superfícies do PEAD e do AD foram polidas com lixa # 600 antes de cada ensaio, enquanto as superfícies do AG foram utilizadas na condição usinada (retifica). Os diâmetros dos pinos de PEAD e AD foram de 5 mm e 3 mm, respectivamente. A mudança na geometria dos pinos poliméricos, em relação aos pinos metálicos, foi realizada para dar uma maior rigidez ao material e evitar a flambagem durante a aplicação da carga no ensaio de desgaste.

**Tabela 1.** Propriedades físicas e mecânicas do PEAD<sup>(6)</sup>

Propriedades do pead	Unidade	Valor
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	0,95
Condutividade térmica	W/Km	0,35
Tensão de escoamento à tração	MPa	29
Tensão de ruptura à tração	MPa	35

**Tabela 2.** Dureza Vickers dos aços ensaiados

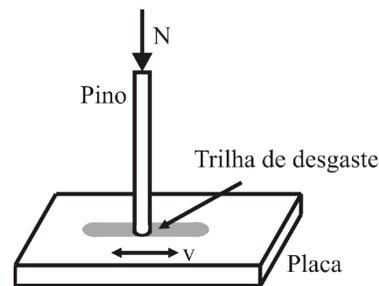
Material	Dureza [HV]
AD	257,8 ± 6,7
AG	312 ± 5,1

**Tabela 3.** Rugosidades das superfícies dos materiais ensaiados

Material	Ra [µm]
AD	0,087 +/- 0,05
AG	0,56 +/- 0,22
PEAD	0,57 +/- 0,20

## 2.2 Ensaio de Desgaste

Para determinar o comportamento em desgaste dos materiais foi executado um ensaio de desgaste por deslizamento com movimento alternativo. A máquina de desgaste usada foi do tipo pino-sobre-placa. A medição da altura do pino é uma representação indireta do desgaste sofrido pelos materiais, sendo o pino ou a placa o corpo desgastado. Este aspecto foi conferido para cada par por meio das medições de perda de massa. Uma vez obtidas as curvas de deslocamento contra o tempo (ou número de ciclos), aonde aparece o regime permanente (região linear) logo após do período do *running-in*, é possível calcular o valor da taxa de desgaste. Obteve-se posteriormente uma curva de variação da taxa de desgaste com a carga normal aplicada. A medição da força de atrito dá um indicativo de que as repetições<sup>(3)</sup> realizadas tenham sido executadas sob as mesmas condições, além de proporcionar os valores dos coeficientes de atrito. Na figura 1 apresenta-se um esquema da configuração pino-sobre-placa, com os parâmetros estabelecidos como condições de ensaio. A temperatura do ambiente esteve entre 27°C e 31°C e umidade relativa entre 40% e 46%. Os materiais correspondentes a cada par junto com o tipo de corpo associado, sendo pino ou placa, são mostrados na Tabela 4. Nas Tabelas 5 e 6 se apresentam os valores de cargas normais aplicadas para cada tipo de par testado, junto com as correspondentes tensões nominais de contato.

**Figura 1.** Configuração e condições do ensaio pino-sobre-placa.

A velocidade tangencial de deslizamento foi escolhida visando-se obter frequências aproximadas às existentes no caso real dos cabos umbilicais (0,07-0,3 Hz).<sup>(2)</sup> Deste modo, utilizou-se a menor velocidade possível do equipamento de desgaste, o que resultou numa frequência de 1,2 Hz. A velocidade média obtida foi de 0,02 m/s. O tempo de ensaio foi selecionado procurando a operação de um regime permanente, característico dos sistemas em deslizamento.<sup>(7)</sup> Este tempo foi de 1 hora, o que foi equivalente a um ensaio de 4.200 ciclos.

**Tabela 4.** Materiais e tipos de corpo nos pares de contato ensaiados

Par	Pino	Placa
Polímero-metal	PEAD	AG
Polímero-metal	PEAD	AD
Metal-metal	AD	AD

**Tabela 5.** Carga normal e tensão nominal de contato no par AD-AD

Carga [N]	Tensão [MPa]
60	8,5
90	12,7
120	17

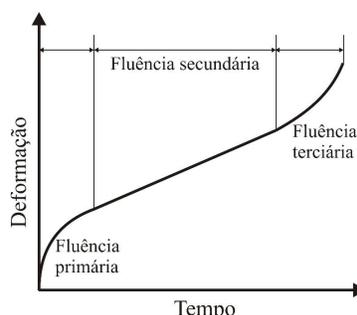
**Tabela 6.** Carga normal e tensão nominal de contato nos pares PEAD-AD e PEAD-AG

Carga [N]	Tensão [MPa]
120	8,5
180	12,7
240	17

### 2.3 Ensaio de Fluência

Como resultado do carregamento realizado sobre os pinos poliméricos durante o ensaio de desgaste, estes deformam por fluência. Assim sendo, a medição do desgaste por meio da variação na altura do pino está inerentemente influenciada pela fluência dos pinos. Por esta razão foram executados ensaios de fluência estáticos e deste modo conhecer o comportamento em fluência dos pinos de PEAD. Este procedimento já foi feito por alguns autores, procurando separar os efeitos associados a ambos fenômenos.<sup>(8-9)</sup>

Na Figura 2 mostra-se uma curva esquemática da fluência num ensaio a temperatura constante.<sup>(10)</sup> Sabendo que a região de fluência primária corresponde aproximadamente ao período do *running-in*, uma taxa de deformação de fluência foi obtida da região da fluência secundária, onde o comportamento entre a deformação e o tempo é linear. Deste modo, a taxa de desgaste real do sistema tribológico foi estimada pela diferença entre a taxa de desgaste medida, incluindo a fluência, e a taxa de deformação plástica dos ensaios estáticos.



**Figura 2.** Curva esquemática de fluência em ensaio a temperatura constante.<sup>(10)</sup>

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Fluência

Os ensaios de fluência realizados nos pinos de PEAD apresentaram um comportamento similar ao mostrado na Figura 2, mas exibindo unicamente as regiões de fluência primária e secundária. Isto devido ao pouco tempo de ensaio, que não permitiu chegar até a zona de fratura do material. Este tempo foi equivalente ao tempo dos ensaios de desgaste, sendo de aproximadamente de uma hora. Os ensaios mostraram que para todas as condições a taxa inicial de fluência diminuiu a um valor de estado estável logo após de 7 minutos a 8 minutos de carregamento. Este resultado sugere que o regime permanente em fluência pode ser considerado como ocorrendo simultaneamente a tal regime em desgaste.

Como foi dito antes, na região secundária ou estado estável de fluência foi calculada uma taxa de deformação. Na Tabela 7 apresentam-se as equações e os coeficientes de correlação encontrados nos ajustes lineares realizados para as condições estudadas. Por cada condição foram executadas duas replicas. Como era de se esperar, a taxa de deformação do PEAD aumento conforme a carga normal aplicada, o que já tinha sido encontrado em pesquisas previas com polietileno de ultra-alto peso molecular (PEUAPM).<sup>(8)</sup> No entanto, a menor resistência mecânica do PEAD em relação ao PEUAPM resultou em maiores deslocamentos e taxas de deformação.

**Tabela 7.** Equações e coeficientes de regressão linear para a fluência do PEAD

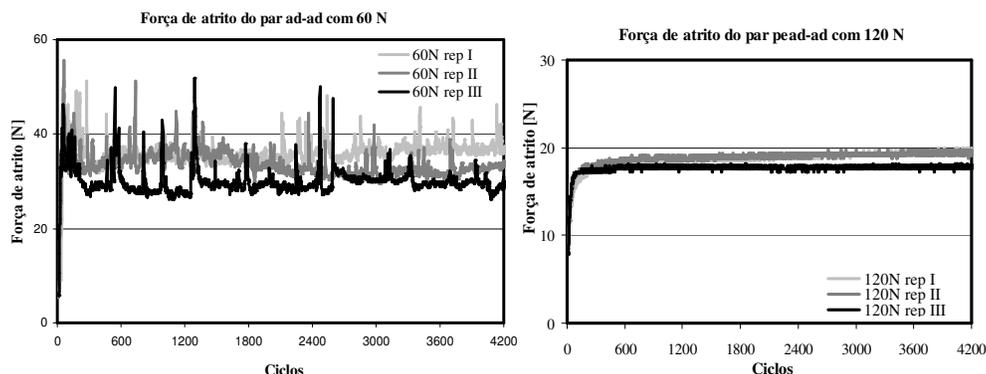
Carga normal [N]	Equação	R <sup>2</sup>	Taxa de deformação [ $\mu$ m/ciclo]
120 I	$y = 0,0067x + 98,1$	0,83	0,00725
120 II	$y = 0,0078x + 89,5$	0,84	
180 I	$y = 0,0125x + 172,2$	0,93	0,01215
180 II	$y = 0,0118x + 138,6$	0,93	
240 I	$y = 0,014x + 231,3$	0,94	0,0144
240 II	$y = 0,0148x + 208,1$	0,94	

#### 3.2 Atrito

As curvas da força de atrito em função do número de ciclos para o par AD-AD com carga normal de 60 N são mostradas na Figura 3 (a). Pode-se observar que as curvas exibem um comportamento próximo entre elas, com um período de *running-in* próximo aos 300 ciclos. Logo, atingem uma estabilidade relativa no valor da força de atrito com valores entre 30 N e 40 N, que correspondem a coeficientes de atrito entre 0,5 e 0,6. No caso das cargas normais de 90 N e 120 N os valores das forças de atrito foram de aproximadamente 60 N, mas com valores dos coeficientes de atrito de 0,6 e 0,5 respectivamente. Por outro lado, os períodos de *running-in* finalizaram antes de atingir os 400 ciclos de ensaio.

As curvas da força de atrito em função do número de ciclos do par PEAD-AD para a carga normal de 120 N é exibida na Figura 3 (b). Esta figura mostra que as réplicas neste caso apresentam uma conduta equivalente. A força de atrito teve um valor entre 18 N e 20 N aproximadamente, o que resulta num coeficiente de atrito entre 0,15 e 0,16. Apesar deste par não ter apresentado as altas variações no valor da força de atrito, o período do *running-in* teve uma duração aproximada. Já para a carga normal de 180 N os valores da força de atrito estiveram entre 27 N e 29 N,

enquanto que no caso da carga de 240 N foram de 31 N a 33 N. Estes valores correspondem a coeficientes de atrito de 0,14 a 0,16 respectivamente.

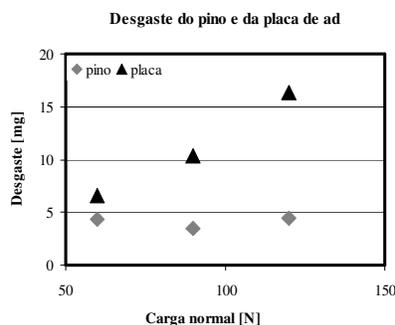


**Figura 3.** Coeficiente de atrito em função do número de ciclos do par AD-AD com 60 N (a) e PEAD-AD com 120 N (b).

Para o caso da força de atrito em função do número de ciclos do par PEAD-AG com a aplicação de uma carga normal de 180 N, as replicas exibiram um comportamento aproximadamente igual. O valor da força de atrito foi aproximadamente de 25 N, que correspondem a um coeficiente de atrito de 0,14. De novo, o período do *running-in* foi menor aos 300 ciclos. No caso da carga de 120 N foram obtidos valores da força de atrito entre 17 N e 19 N, o que resultou nos coeficientes de atrito entre 0,14 e 0,15. Já na carga de 240 N os valores foram de 29 a 31 N, com coeficientes de 0,12 a 0,13.

### 3.3 Desgaste

De forma geral seguiu-se o procedimento de pesar as amostras para conferir as medições através do deslocamento vertical do pino. No caso do par AD-AD, a Figura 4 mostra a variação da perda de massa com a carga normal aplicada, tanto para o pino como para a placa. No gráfico observa-se como a perda de massa do pino não mudou com o incremento na carga normal, enquanto a placa foi o corpo representando a variação no desgaste.



**Figura 4.** Perda de massa em função da carga normal do par AD-AD.

No entanto, diferentemente do que aconteceu com o par AD-AD, nos pares polímero-metal não foi possível obter alguma medida de perda de massa por pesagem dos corpos de prova. Isto sugere que não ocorreu a remoção total do

material do pino, sendo somente deformado plasticamente, o que poderia ser explicado pelas altas porcentagens de deformação plástica dos polímeros. Uma outra possibilidade é que o material removido da superfície seja transferido à superfície do contra-corpo, com o qual não é possível identificar o desgaste através da medição de perda de massa. Embora estes fenômenos não envolvam a perda de massa que representa o desgaste, eles constituem outros modos de degradação superficial que podem ser críticos em algumas aplicações.

Conferindo o resultado encontrado nas medidas de atrito em relação ao período de *running-in*, as curvas de perda de massa evidenciaram um valor de até 600 ciclos como o fim deste processo. Portanto, a partir deste valor foi realizada a regressão linear das curvas de deslocamento vertical no regime permanente para a determinação das taxas de desgaste. Na tabela 8 são resumidos os resultados obtidos em relação às taxas de desgaste para cada condição de carga normal do par AD-AD. Os resultados mostram que a taxa de desgaste foi proporcional à carga normal, o que tem sido encontrado na literatura para qualquer mecanismo de desgaste em operação.<sup>(11)</sup>

**Tabela 8.** Valores das taxas de desgaste do par AD-AD

Carga normal [N]	Taxa de desgaste [ $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ ]
60	0,00903
90	0,0123
120	0,01403

Os valores das taxas de deformação e de desgaste para o par PEAD-AD e PEAD-AG são mostrados nas tabelas 9 e 10. Nestas tabelas apresenta-se adicionalmente a taxa de desgaste corrigida, a qual foi obtida fazendo a diferença entre a taxa de deformação do PEAD e a taxa de desgaste estimada da curva de deslocamento vertical dos pinos. Pode-se notar que a taxa de desgaste foi proporcional à carga normal em ambos casos, o que tem sido encontrado na literatura para polímeros deslizando contra metais.<sup>(7)</sup>

**Tabela 9.** Valores das taxas de desgaste corrigidas pela fluência do par PEAD-AD

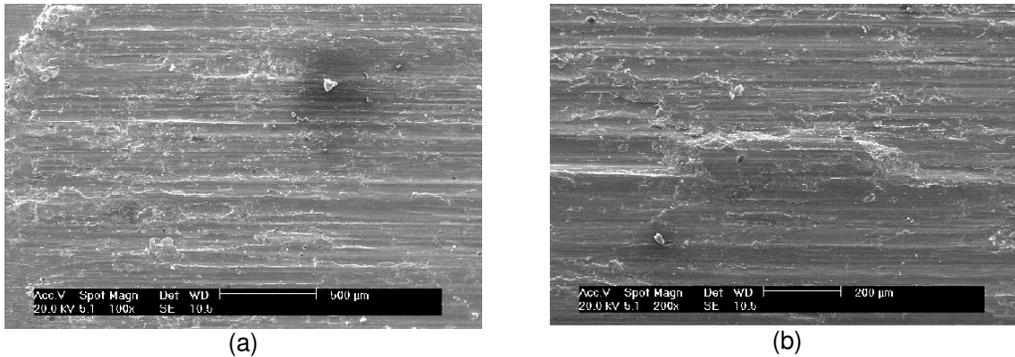
Carga normal [N]	Taxa de desgaste [ $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ ]	Taxa de fluência [ $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ ]	Taxa de desgaste corrigida [ $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ ]
120	0,00927	0,00725	0,00202
180	0,01617	0,01215	0,00402
240	0,0244	0,0144	0,01

**Tabela 10.** Valores das taxas de desgaste corrigidas pela fluência do par PEAD-AG

Carga normal [N]	Taxa de desgaste [ $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ ]	Taxa de fluência [ $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ ]	Taxa de desgaste corrigida [ $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ ]
120	0,0073	0,00725	0,00005
180	0,01487	0,01215	0,00272
240	0,0269	0,0144	0,0125

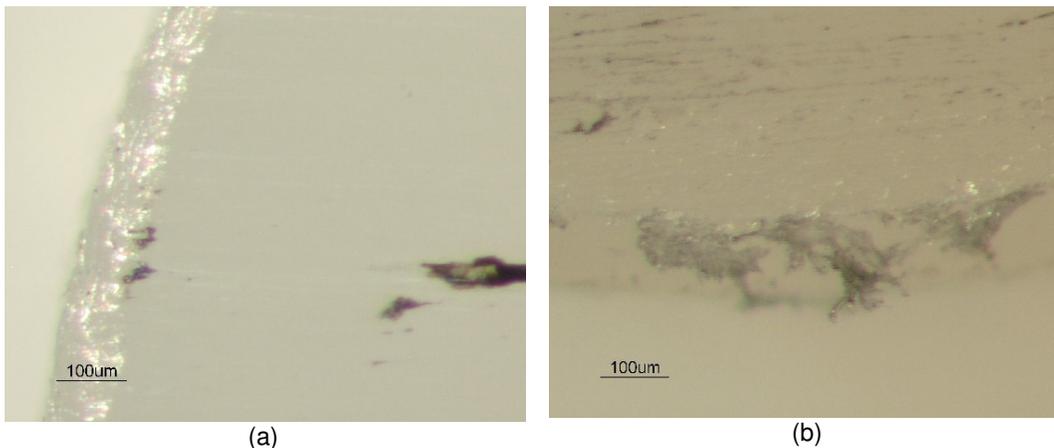
### 3.4 Superfícies de Desgaste

Na Figura 5 se exibem imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura da placa de AD na condição de 60 N (a) e (b). Na figura se observam algumas marcas típicas de adesão junto com algumas partículas de óxido formado durante o deslizamento. No entanto, para todas as condições estudadas foi percebida a tendência da oxidação nas superfícies num menor ou maior grau.



**Figura 5.** Superfície de desgaste do AD deslizado contra AD com 60 N (a) e 120N (b).

Já na Figura 6 apresentam-se as micrografias das superfícies de desgaste do pino de PEAD deslizando contra AD com carga normal de 120 N, as quais representam as superfícies obtidas nas outras condições de carga normal. Em primeiro lugar, vale notar uma forte evidência da alta deformação plástica sofrida pelos pinos poliméricos, como se vê nas Figuras 6 (a) e 6 (b). Por outro lado, foi verificada a presença de partículas do material metálico, transferidas desde as superfícies das placas, como se observa na borda do pino da figura 6 (a). Por último, há que mencionar que foram vistos alguns indícios de oxidação no centro da superfície, o que pode ser observado na Figura 6 (a). Isto foi possivelmente devido à oxidação do AD durante o contato deslizante.



**Figura 6.** Superfícies de desgaste do pino de PEAD deslizado contra AD com 120N.

A Figura 7 mostra as micrografias obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) das superfícies dos pinos de PEAD deslizados contra AG com a carga normal aplicada de 180 N. Na figura se observam algumas partículas metálicas aderidas à superfície do pino, o qual é conferido nas imagens do lado que são capturadas seguindo uma análise química da superfície no modo BSE (Beam Secondary Electrons). Deste modo, a variação na composição química entre o metal e o polímero permite diferenciá-los, aparecendo mais ressaltadas as partículas metálicas. Por outro lado, podem ser vistos alguns riscos e trincas nas superfícies desgastadas, sugerindo a existência da abrasão das partículas metálicas sobre o polímero como tem sido encontrado por alguns autores.<sup>(5)</sup>

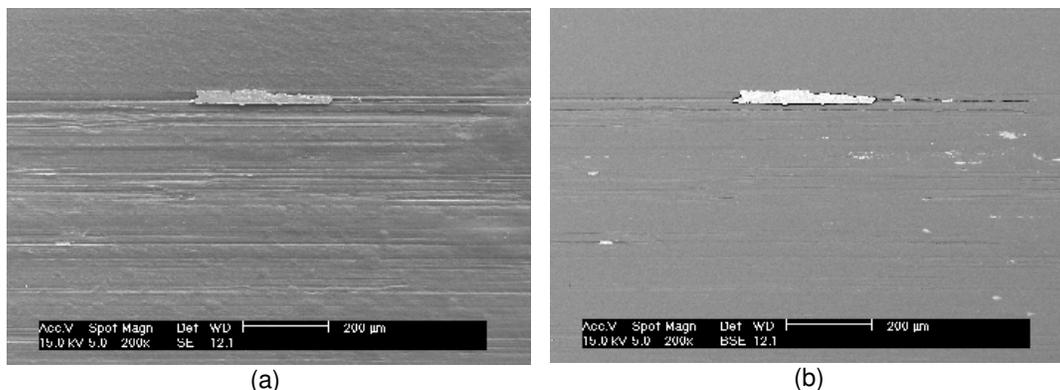


Figura 7. Superfícies de desgaste dos pinos de PEAD deslizados contra AG com 180 N.

## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 Atrito

Na Tabela 11 se exibem os valores dos coeficientes de atrito encontrados nos pares estudados para cada uma das condições de ensaio. No par AD-AD os coeficientes de atrito foram relativamente altos, de 0,5 a 0,6, que são os característicos de uma alta interação entre as superfícies e representando um regime severo de desgaste.<sup>(12)</sup> No entanto, as análises das superfícies mostraram a presença do mecanismo de oxidação, mas com uma intensidade menor à do mecanismo adesivo. Por outro lado, há que mencionar que a força de atrito aumentou com a carga normal aplicada, levando a que o valor do coeficiente de atrito seja aproximadamente igual em todas as condições estudadas. Este resultado tem sido encontrado no deslizamento de outros metais.<sup>(13)</sup>

Tabela 11. Valores dos coeficientes de atrito dos pares estudados para as cargas normais aplicadas.

Par	Coeficiente de atrito				
	60 N	90 N	120 N	180 N	240 N
AD-AD	0,55	0,6	0,5		
PEAD-AD			0,16	0,16	0,14
PEAD-AG			0,15	0,14	0,13

Nos pares polímero-metal os coeficientes de atrito tiveram valores próximos aos encontrados em trabalhos anteriores, embora estes surgirem de ensaios com configuração pino-sobre-disco.<sup>(5)</sup> Alias, foram encontrados alguns dos mecanismos citados anteriormente como abrasão, fadiga e transferência de material. Deste modo, a ocorrência dos mecanismos de oxidação e deformação plástica localizada não parecem ter influenciado significativamente no coeficiente de atrito desenvolvido no contato. Do ponto de vista da variação do coeficiente de atrito com a carga normal, vale lembrar que diferentes comportamentos têm sido encontrados por vários autores.<sup>(8)</sup> No entanto, no presente caso o coeficiente de atrito mostrou uma tendência a diminuir conforme aumentava a carga normal aplicada, o que já foi encontrado para vários polímeros.<sup>(14-16)</sup> Por outro lado, os pares do tipo polímero-metal exibiram menores valores nos coeficientes de atrito que os encontrados no par AD-AD. Adicionalmente, a variação nos valores dos coeficientes de atrito foi também menor no deslizamento do PEAD, representando a maior adesão presente no par AD-AD que causam os picos de força de atrito observados. Já quando comparados o PEAD deslizando contra AD ou AG, vale notar que o comportamento foi bem

similar apesar do último produzir valores um pouco menores no valor do coeficiente de atrito, mas que do ponto de vista estatístico não parecem ser significativamente diferentes.

## 4.2 Desgaste

Na Figura 8 se mostra a taxa de desgaste em função da tensão nominal de contato aplicada nos pares de desgaste estudados. Neste gráfico se observa que em todos os pares deslizantes a taxa de desgaste aumenta conforme acontece com a tensão nominal aplicada, o que é esperado se não existe uma tendência de transição no regime de desgaste.<sup>(17)</sup> Vale notar que houve um incremento significativo na taxa de desgaste entre as tensões correspondentes às cargas de 180 N e 240 N.

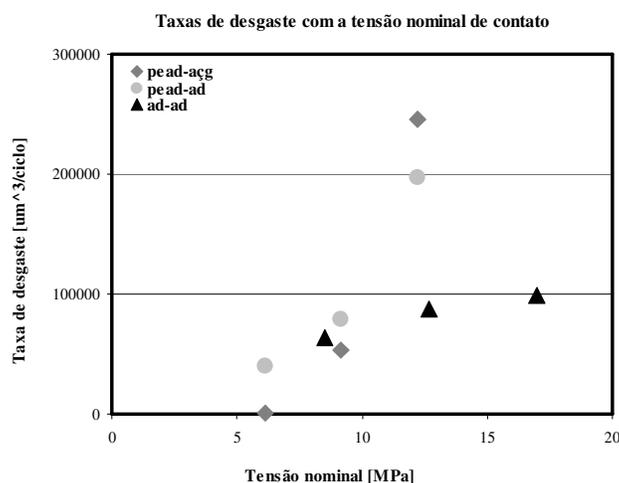


Figura 8. Taxa de desgaste em  $\mu\text{m}^3/\text{ciclo}$  como função da tensão aplicada.

Há que comentar que os pares polímero-metal apresentam valores da taxa de desgaste similares para cada condição de tensão. Isto foi verificado com testes estatísticos que mostraram não ter diferenças significativas em cada caso. Este comportamento era o esperado a partir dos valores dos coeficientes de atrito e da análise das superfícies desgastadas, que foram bem similares em ambos casos. O fato de que o comportamento seja similar nos dois pares, tanto em atrito como desgaste, pode-se concluir que o contra-corpo, ser de um aço ou outro, não influenciou de forma significativa no desgaste dos pinos de PEAD. Isto apesar das diferenças que exibiram no valor da rugosidade superficial dos aços.

Na mesma figura se observa como o par AD-AD exibiu uma menor taxa de desgaste que os pares do tipo polímero-metal, a partir de uns níveis de tensão nominal entre 12 Mpa e 13 MPa. Já para níveis menores de tensão aplicada não parece haver diferenças apreciáveis entre o comportamento em desgaste dos pares. Este aspecto é interessante devido a que os valores de coeficientes de atrito nos dois tipos de pares foram bem diferentes. No entanto, esse alto desgaste do PEAD pode estar fortemente influenciado pela alta deformação localizada por fluência do polímero, sugerindo a operação de um sinergismo entre ambos fenômenos. Vale lembrar que os mecanismos de desgaste foram diferentes como decorrência da natureza do material, o que resultou na remoção total de material no caso do par

metal-metal, enquanto que no par polímero-metal não houve tal remoção, como foi encontrado nas análises das superfícies desgastadas. Esta diferença nos comportamentos tribológicos dos pares, sendo polímero-metal ou metal-metal, deve ser analisada visando avaliar qual dos tipos de degradação superficial é mais crítico na aplicação onde serão utilizados estes materiais.

Por outro lado, quando se analisa a taxa de desgaste expressa em termos de miligramas por ciclo, o que pode ser calculado conhecendo as densidades dos materiais, o comportamento é bem diferente. Esses cálculos foram realizados e mostraram que o par AD-AD exibe uma maior taxa de desgaste que a dos pares do tipo polímero-metal para todas as condições estudadas. Isto decorre da maior densidade do AD em relação à do PEAD, ou seja, na maior remoção da massa do primeiro. Assim, sabendo que massa por aceleração constitui uma força, pode ser concluído que para o par AD-AD foi realizado um maior trabalho na remoção de material, o que é expresso no maior valor encontrado no coeficiente de atrito. Por isto, apesar de que geralmente a taxa de desgaste é dada em termos de volume removido, é válido considerar qual das duas análises é mais adequada para avaliar a conduta tribológica dos materiais. Isto já que a perda de material, sendo considerado como massa ou volume, pode ser mais crítica dependendo da solicitação ao material.

## 5 CONCLUSÕES

A seguir apresentam-se as conclusões relacionadas com os resultados encontrados nos ensaios experimentais efetuados neste trabalho:

- A taxa de desgaste aumentou conforme carga normal aplicada foi incrementada para todos os pares ensaiados. A taxa de desgaste em termos de volume removido por ciclo foi menor no par metal-metal (AD-AD) que nos pares polímero-metal (PEAD-AD e PEAD-AG) a partir de tensões aplicadas entre 12 e 13 MPa. Para tensões menores não houve diferenças apreciáveis entre os pares estudados.
- No par metal-metal a força de atrito foi diretamente proporcional à carga normal, enquanto o coeficiente de atrito foi aproximadamente independente para todos os casos estudados. O valor do coeficiente de atrito em todas as cargas foi de 0,55 aproximadamente. Para os pares do tipo polímero-metal percebeu-se uma tendência a diminuir o coeficiente de atrito enquanto a carga normal foi aumentada. Em todos os ensaios se observou um coeficiente de atrito de 0,15 aproximadamente.
- No par AD-AD o desgaste foi representado pela remoção total do material, através de mecanismos de desgaste por adesão e por oxidação, os quais sempre estiveram presentes em todas as condições estudadas, mas o primeiro sendo o dominante.
- Nos pares do tipo polímero-metal a deformação plástica significativa do PEAD e a transferência de material inibiram a perda de massa dos corpos. Estes mecanismos foram acompanhados pela oxidação do metal, a abrasão e fadiga dos polímeros. Devido a que o anterior aconteceu sem importar o contra-corpo, sendo AD ou AG, este último não influenciou de maneira importante no comportamento ao desgaste dos pinos de PEAD.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à empresa Prysmian Cables and Systems e à Financiadora de Estudos e Pesquisas - FINEP pelo apoio financeiro através do projeto do convênio Ref. 2882/0, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pela bolsa de estudos concedida no processo 05/59131-0.

## REFERÊNCIAS

- 1 HOLMBERG, K. Reliability aspects of tribology; *Tribology International*, v. 34, p. 801-808, 2001.
- 2 PESCE, C.P. Mecânica de cabos e tubos submersos lançados em catenária: uma abordagem analítica e experimental, Tese de Livre Docência, EPUSP, 1997.
- 3 RAMOS, R. Modelos analíticos no estudo do comportamento estrutural de tubos flexíveis e cabos umbilicais, Tese de Doutorado, EPUSP, 2001.
- 4 SILVA, C.H. TANAKA, D.K. SINATORA, A. The effect of load and relative humidity on friction coefficient between high density polyethylene and galvanized steel: Preliminary results, *Wear*, v. 229, p. 339-342, 1999.
- 5 SILVA, C.H. PESCE, C.P. TANAKA, D.K. SINATORA, A. Desgaste en polietileno de alta densidad, utilizado en la fabricación de tubos para la extracción de petróleo. *Información Tecnológica*, v. 12, p. 139-145, 2001.
- 6 [www.mgs-fgm.com.br](http://www.mgs-fgm.com.br)
- 7 ZUM GAHR, K.H. *Microstructure and wear of materials*, Elsevier, p. 80-86, 1987.
- 8 SILVA, C.H. Degradação de UHMWPE e de POM devido à ação tribológica contra aço inoxidável e alumina, Tese de Doutorado, EPUSP, 2003.
- 9 LEE, K. Y. PIENKOWSKI, D. Reduction in the initial wear of ultrahigh molecular weight polyethylene after compressive creep deformation, *Wear*, v. 203-204, p. 375-379, 1997.
- 10 WETTON, R.E. *Development in polymer characterization*, Elsevier Applied Science Publishers, p. 179-221, 1986.
- 11 SILVA, C.H. GIRALDO, D.H. SOUZA, R.M. SINATORA, A. Estudo da influência das características do contra-corpo na taxa de desgaste do POM em ensaios pino-contradisco, *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, v. 18, p. 87-94, 2006.
- 12 HUTCHINGS, I.M. *Tribology: Friction and wear of engineering materials*, Edward Arnold, London, p. 77-132, 1992.
- 13 BOWDEN, F.P. TABOR, D. *The friction and lubrication of solids*, At the Clarendon Press, Oxford, p. 5-32, 1950.
- 14 BRETNALL, A.B. LANCASTER, J.K. The friction and wear behavior of a composite, dry-bearing linear sliding against itself, *Wear of Materials*, v. 2, p. 596-603, 1989.
- 15 CLERICO, M. A study of the friction and wear of polyamide against metal, *Wear*, v. 13, p. 183-197, 1969.
- 16 SANTNER, E. CZICHOS, H. *Tribology of polymers*, *Tribology International*, v. 22, p. 103-109, 1989.
- 17 WELSH, N.C. The dry wear of steels: Parts I and II, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. A257, p. 31-72, 1965.