

DESGASTE DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE EMPREGADOS NA FABRICAÇÃO DE TUBOS PARA EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO

Carlos Henrique da Silva

Celso Pupo Pesce

Deniol Katsuki Tanaka

Amilton Sinatora

Laboratório de Fenômenos de Superfície - LFS

Departamento de Engenharia Mecânica

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Av. Prof. Mello Moraes, 2231 Cid. Universitária

05080-900 – São Paulo, SP, Brasil

carlos@usp.br – cpesce@engin.umich.edu – dktanaka@usp.br – sinatora@usp.br

Resumo. Neste trabalho apresenta-se a influência da carga aplicada e da velocidade de deslizamento nos mecanismos de desgaste do polietileno de alta densidade (PEAD) contra aço carbono galvanizado.

Os ensaios foram realizados em um tribômetro do tipo pino-contra-disco, na configuração de pino de PEAD e disco de aço galvanizado. As cargas e as velocidades de deslizamento utilizadas foram de 0,5; 2 e 20 N e 0,03; 0,1 e 1 m/s respectivamente, determinando-se para cada condição de ensaio o coeficiente de atrito e a perda de massa do pino.

Os resultados experimentais mostraram que com o aumento da carga e da velocidade, tanto o coeficiente de atrito, como a perda de massa, aumentam, atribuindo-se este comportamento à mudanças nos mecanismos de desgaste.

A observação microscópica da superfície dos pinos revelaram que atuam três mecanismos de desgaste distintos durante os ensaios: abrasão a dois e três corpos e a deformação plástica superficial, resultando na morfologia ondulada da superfície do pino.

A análise conjunta dos valores de coeficiente de atrito e perda de massa, indicaram uma relação entre os mecanismos de desgaste e os valores de coeficiente de atrito, além da influência direta destes mecanismos na intensidade do desgaste.

Palavras-chave: Tubos *risers* – Mecanismos de desgaste – Coeficiente de atrito - PEAD - Polímeros

1. INTRODUÇÃO

“A Engenharia *Offshore* abrange todos os aspectos atinentes à prospecção e exploração de petróleo no mar, tendo-se constituído em área de desenvolvimento onde muito freqüentemente os empreendimentos adiantam-se à fronteira do conhecimento e da tecnologia. Com a descoberta de gigantescas jazidas de petróleo em águas de grande profundidade (2.000 a 3.000 metros abaixo da linha d’água), conceitos e técnicas tidos como seguros e convencionais, no desenvolvimento de tubos flexíveis e cabos umbilicais, tiveram que ser reavaliados e adaptados e até mesmo inovados integralmente”.

Com a utilização de unidades flutuantes, “a parcela do carregamento dinâmico, associado aos movimentos por elas impostos à extremidade suspensa, passou a ser mais relevante no dimensionamento mecânico de cabos umbilicais e tubos de produção”.

“Linhas em catenária, sejam tubos flexíveis ou cabos umbilicais, podem vir a falhar devido à diversos fatores, dentre eles: sobrecarga, fadiga, dano localizado (impacto), colapso das carcaças internas, corrosão, falhas nos pontos ou cordões de solda, envelhecimento dos materiais poliméricos”, além de desgaste devido ao movimento relativo entre partes constitutivas dos tubos e cabos ou abrasão e erosão na superfície externa.

Na seleção de materiais e no desenvolvimento de modelos matemáticos do comportamento dinâmico destes elementos, informações sobre o comportamento tribológicos destes materiais são cada vez mais importantes. O objetivo deste trabalho é determinar a relação entre parâmetros de ensaio, mecanismos e taxas de desgaste de materiais constitutivos dos cabos e *risers*.

2. ELEMENTOS UTILIZADOS NA PROSPECÇÃO DE PETRÓLEO

“Cabos umbilicais e tubos de escoamento de óleo e gás são os elementos fundamentais na produção de petróleo no mar. Os primeiros tem a função de transmitir sinais de controle e alimentação aos sistemas de válvulas instalados no fundo do oceano, juntos às cabeças dos poços. Os tubos tanto podem servir à condução do petróleo desde o poço até a unidade de separação instalada nas plataformas, como ao transporte de óleo e gás já separados”.

Tubos flexíveis e cabos umbilicais são elementos estruturais de construção composta, constituídos de materiais metálicos e poliméricos (Fig. 1). De um modo geral, estes componentes podem ser classificados em:

- estruturas metálicas, que suportam cargas de pressão, axiais, flexionais, e de torção. Os materiais mais empregados na sua fabricação são os aços inoxidáveis AISI 316L e 304 e o aço carbono galvanizado.
- tubos e camisas poliméricas, com o fim de conferir estanqueidade (prevenir vazamento e/ou entrada da água do mar) e alguma rigidez flexional à seção, no caso de tubos flexíveis, sendo empregados o PEBD, o PEAD e Nylon 11.
- mangueiras e condutores elétricos, no caso de cabos umbilicais.

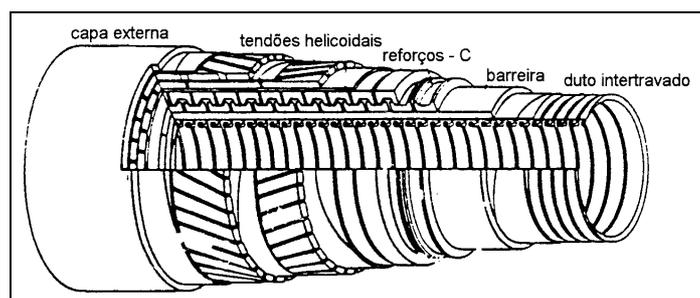


Figura 1 – Tubo flexível típico (Pesce, 1997).

“Tanto os cabos umbilicais quanto tubos de produção e escoamento apresentam dois trechos bastante distintos. O primeiro trecho, fica assentado permanentemente sobre o leito do oceano e o segundo trecho, usualmente conhecido como “*riser*”, que se caracteriza por apresentar um longo vão, suspenso desde a unidade de produção até o fundo” (Fig. 2).

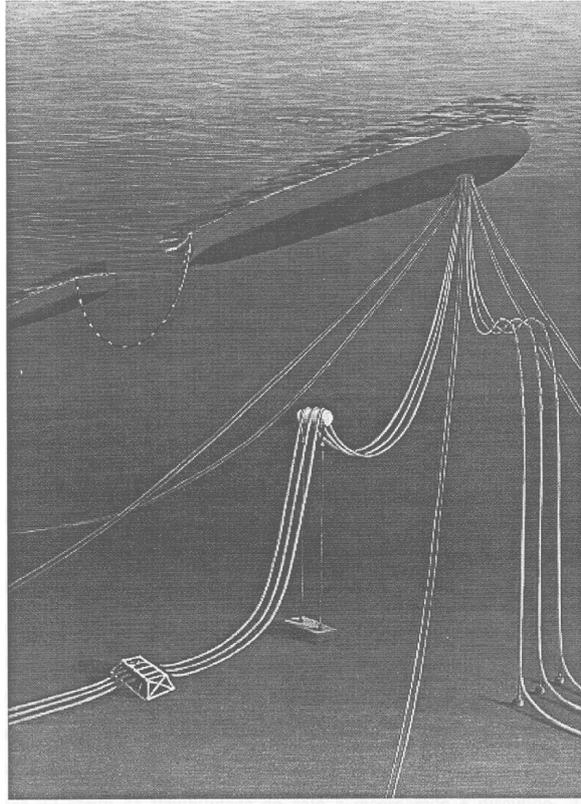


Figura 2 – Configurações típicas de linhas flexíveis na função de *risers* (Pesce, 1997).

“O ambiente marítimo é, em geral, modelado como constituído por ondas de superfície (ou de gravidade), pela correnteza oceânica e pelo vento. As ondas agem sobre o sistema dinamicamente de duas maneiras distintas: uma diretamente, ao longo do comprimento do *riser* e outra indiretamente, através da alteração na posição da plataforma flutuante ou do navio. A correnteza, além de agir sobre a unidade flutuante, aciona a linha ao longo de todo o seu comprimento, determinando a configuração de equilíbrio estático. A ação do vento se dá de forma indireta, através do movimento proporcionado sobre a unidade flutuante”.

O movimento imposto ao *riser* pelo ambiente marinho, faz com que ocorra movimento relativo entre os componentes coaxiais do elemento, provocando desta maneira, desgaste o que eventualmente pode vir a modificar o comportamento dinâmico de todo o conjunto.

Sabe-se que coeficiente de atrito e taxa de desgaste são propriedades, não dos materiais em contato, mas do sistema em que estes estão inseridos. Portanto, fatores como velocidade de deslizamento, carga aplicada, umidade, temperatura no contato e acabamento superficial, são extremamente importantes, principalmente no contato de materiais poliméricos.

3. MECANISMOS DE DESGASTE DE POLÍMEROS

No deslizamento de materiais poliméricos contra um contra-corpo rígido, muitas vezes ocorre um mecanismo de desgaste que tem como característica a deposição de um filme sobre o contra-corpo (Tanaka, 1982). As condições de deslizamentos, como carga aplicada e velocidade, além das características da superfície do contra-corpo, como rugosidade e energia de superfície, são fatores de grande importância para a ocorrência de mecanismos de transferência, abrasão e fadiga.

3.1 Transferência “normal”

Quando a junção entre polímero e contra-corpo for mais forte que a energia de coesão entre as moléculas do próprio polímero, a falha do material polimérico ocorre por transferência de fragmentos. Repetidos deslizamentos conduzem a uma progressiva transferência de camadas de filmes irregulares da ordem de 0,1 a 1,0 $\mu\text{m.}$, os quais eventualmente se destacam do contra-corpo.

Neste mecanismo, que é conhecido como “transferência normal” ou “regime de alto atrito” (Briscoe, 1990), o polímero é transferido para o contra-corpo sem significativo rompimento da cadeia principal ou degradação química.

3.2 Transferência lamelar

Este tipo de mecanismo também é conhecido como: “regime de baixo atrito”, “mecanismo de cisalhamento lamelar” (Briscoe, 1990) ou *microscopic asperit wear* (Tanaka, 1982). Na Fig. 3, este mecanismo é chamado de processo “a frio” e “não degradante” (Tipo B). Este mecanismo refere-se a um comportamento “especial” de polímeros como o PTFE, HDPE e o UHMWPE.

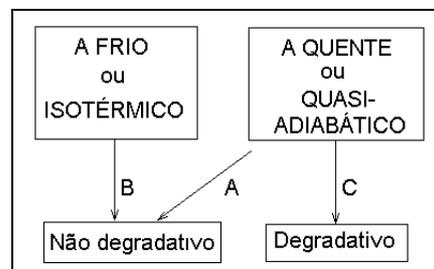


Figura 3 - Três modos genéricos de transferência de filme : A, B e C (Briscoe, 1990).

Estes polímeros são chamados de “polímero de perfil molecular plano ou liso” (Hutchings, 1992), pois possuem cadeias lineares com estrutura molecular apolar e sem grupos volumétricos. Estas características conduzem a um alto grau de cristalinidade e ligações intermoleculares fracas. Os filmes de transferência são mais uniformes do que nos outros mecanismos e apresentam espessura entre 1 e 40 nm.

3.3 Transferência por Fusão

Polímeros termoplásticos, geralmente tem baixa condutividade térmica, baixa temperatura de amolecimento e de fusão. A utilização destes materiais sob condições de carregamento, pressão e velocidade muito severas, conduzem à fusão do polímero na região do contato. Na Fig. 3, este mecanismo pode ser classificado como transferência “a quente” e “não degradativa” (Tipo A). Com a elevação da temperatura, este processo pode tornar-se “degradativo”, atuando assim, o mecanismo do tipo C.

3.4 Abrasão

O mecanismo de desgaste abrasivo tem sido definido como o desgaste que ocorre pelo destacamento de material da superfície em movimento relativo, causado pela presença de protuberâncias (asperezas do contra-corpo) ou partículas duras entre as superfícies ou embebidas em uma delas (Lancaster, 1969).

Ratner *et al. apud* Lancaster (1990) sugerem que três estágios consecutivos envolvem o destacamento de uma partícula: a deformação pela indentação de uma aspereza de maior dureza, a resistência ao movimento relativo (força de atrito) e, finalmente, o destacamento que envolve trabalho de fratura e mecanismos de microcorte.

Os ensaios tribológicos foram realizados com cargas aplicadas de: 0,5; 2 e 20 N e as velocidades de 0,03; 0,1 e 1 m/s. Cada ensaio foi repetido 3 vezes. Na escolha das faixas de velocidade e carga, procurou-se abranger condição de carregamento que ocorrem nos tubos *risers* em campo. Além disto, foram assumidas algumas simplificações, com a utilização de movimento de deslizamento contínuo ao invés de movimento alternado.

Os valores de perda de massa foram obtidos após a estabilização do coeficiente de atrito em função da distância percorrida, com uma distância total de deslizamento de 5.000 metros.

Assumindo que o pino permanece como um cilindro perfeito com 3 mm de diâmetro e com densidade de $0,96 \text{ g/cm}^3$, foi determinada a altura de desgaste do PEAD a partir da medição da massa do pino antes e após os ensaios.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os resultados de perda de massa nas diversas condições de ensaio, calculou-se os valores de altura de desgaste, os quais estão apresentados na Fig. 5. Nesta figura, pode-se notar que a altura de desgaste aumenta com a severidade do contato, ou seja, quanto maiores as velocidades e cargas aplicadas maiores os efeitos danosos do desgaste.

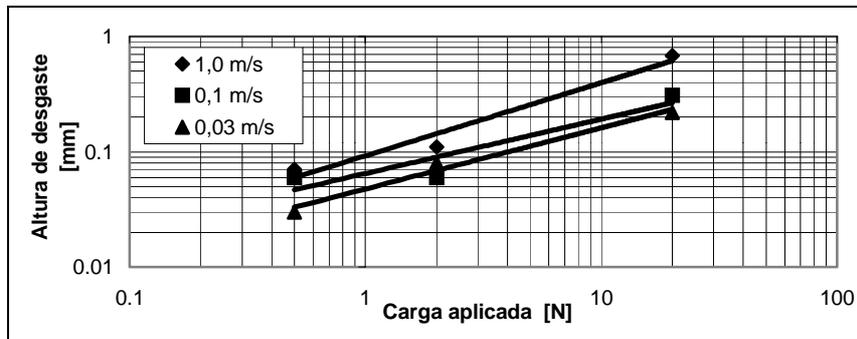


Figura 5– Altura de desgaste em função da carga aplicada para três níveis de velocidade.

Na Fig. 6 estão apresentados os aspectos das superfícies de desgaste dos pinos de PEAD após diversas condições de ensaio. Pode-se notar dois tipos de morfologia de desgaste que se sobressaem, uma na forma de ondulação e outra como riscos de abrasão (micro-corte).

Há divergências quanto aos mecanismos de desgaste que provocam o efeito de ondulação na superfície do polímero, atribuindo-se de um lado, a formação de ondas por fenômeno conhecido como ‘stick-slip’, onde o material sofreria deformação devido à adesão ao contra-corpo e posterior deslizamento, ou através do mecanismo de deformação plástica propriamente dito, do material polimérico. Lloyd e Noël (1988) caracterizam estas ondulações como sendo do tipo “marcas de sargento” (*chevron marks*), indicando com isto a ocorrência de um processo de ‘stick-slip’ em micro escala entre a superfície do polímero e as asperezas do contra-corpo. Briscoe *et al.* (1996) acreditam ainda que, devido aos altos esforços da superfície de contato, mesmo para baixas cargas macroscópicas, pode ocorrer intensa deformação plástica localizada, a ponto de esmagar/escoar o material e provocar este aspecto de ondas. Pleskachevsky *et al.* (1995) argumentam que, com a repetição contínua dos esforços, pedaços deste material desprendem-se devido a mecanismos de fadiga.

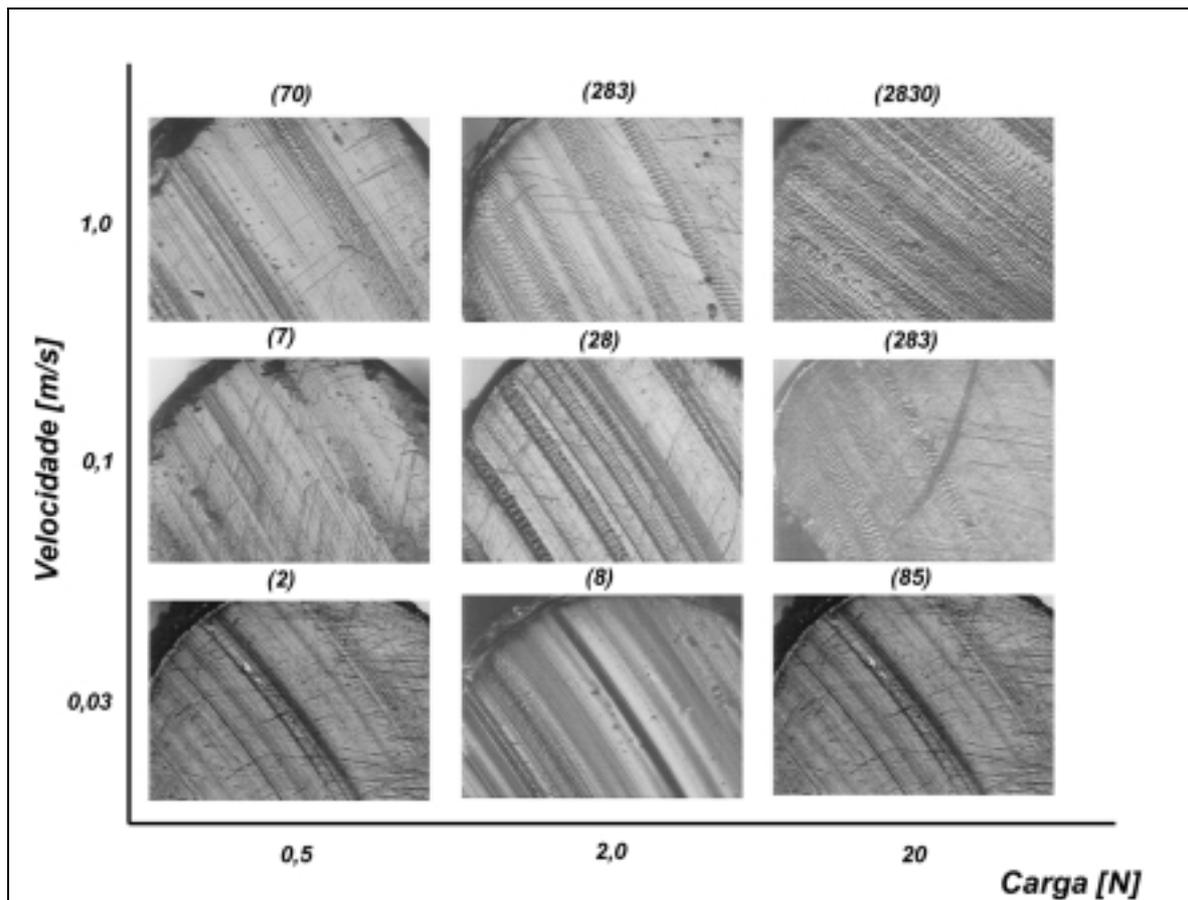


Figura 6 – Quadro esquemático das superfícies de desgaste dos pinos. Os valores entre parênteses, referem-se às condições PV (pressão x velocidade) de cada ensaio em $[\text{kW}/\text{m}^2]$.

A Fig. 6 mostra também que para condições de ensaio mais severas, a morfologia de ondas ocupa quase toda a superfície de contato no ensaio com $PV = 2830$, sendo este, o mecanismo de desgaste predominante.

A não remoção dos riscos de abrasão, formada durante a fase de preparação das superfícies dos corpos-de-prova, principalmente para os ensaios com baixas cargas, indicam que houve contato parcial entre as duas superfícies, uma vez que não ocorreu remoção total dos riscos de lixamento. Desta forma, o efeito combinado de rugosidade ‘alta’ para o tipo de contato (polímero-metal) com baixa severidade de ensaio, proporciona a atuação mais intensa de abrasão, provocado pela ação das asperezas do disco, em relação à deformação plástica sofrida pelo polímero.

Os pinos apresentam riscos de abrasão em direções variáveis, ou seja, diferentes do sentido de deslizamento, para os ensaios com $PV = 28$ e 283 . Isto sugere a ocorrência de um terceiro mecanismo de desgaste, a abrasão a três corpos. Estas marcas, provavelmente, são provocadas por partículas de desgaste que permaneceram na interface de contato e podem ser visualizadas nas micrografias correspondentes aos pares PV anteriormente citados. Estas micrografias indicam que a atuação deste mecanismo é mais intensa em condições de ensaio com severidade média.

Além dos mecanismos de desgaste já citados, foi observado também a ocorrência de transferência lamelar pela presença de filme poliméricos na superfície dos discos, porém em pequena intensidade. As condições PV dos ensaios, não foram suficientemente elevadas para provocar o mecanismo de transferência por fusão. Não observou-se evidências, quanto a atuação do mecanismo de fadiga, entretanto, acredita-se que o mesmo possa ocorrer em todas as condições de ensaio, com maior intensidade em condições PV mais intensas.

A Fig. 8 apresenta os valores de coeficiente de atrito entre PEAD e aço galvanizado. Pode-se notar que, assim como no caso do desgaste, o coeficiente de atrito é maior para cargas mais elevadas. Resultados semelhantes foram observados por Vinogradov *et al.* (1965) e Yamaguchi (1990), cuja discussão já foi feita em outro trabalho (Silva *et al.*, 1998).

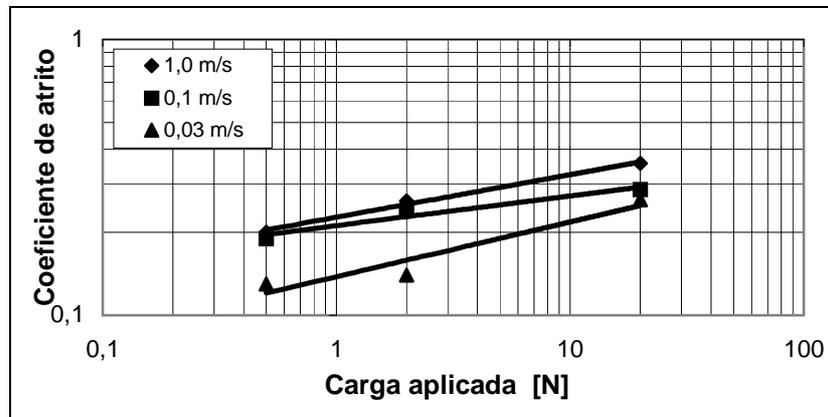


Figura 7 – Coeficiente de atrito em função da carga aplicada para três níveis de velocidade.

À semelhança do desgaste, o aumento do coeficiente de atrito entre os materiais pode também ser explicado pela mudança gradativa de mecanismo de desgaste. Para condições PV cada vez mais severas, o aumento na temperatura no contato (energia de atrito dissipado na forma de calor) provoca a deformação plástica (na forma de ondas) devido à diminuição da viscosidade, produzindo elevação nos valores de coeficiente de atrito.

A análise conjunta da variação do coeficiente de atrito com a evolução da perda de massa sugere que os dois fenômenos podem estar interrelacionados. A Fig. 8 apresenta o desgaste em função do coeficiente de atrito.

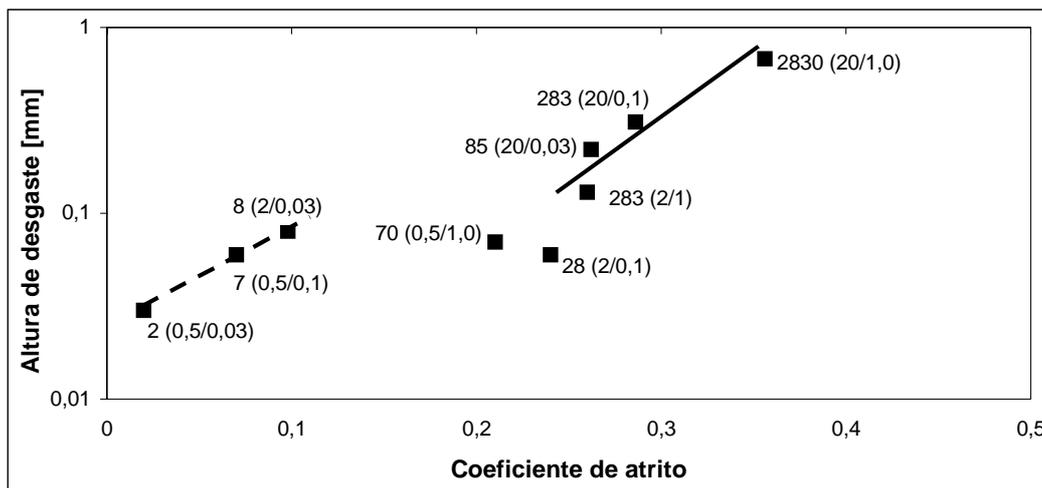


Figura 8 – Altura de desgaste em função do coeficiente de atrito.

Em trabalhos anteriores (Silva *et al.*, 1999), mostrou-se que o coeficiente de atrito nas condições PV = 2, 7 e 8, é fortemente influenciado pela umidade relativa do ambiente. Portanto, optou-se por apresentar na Fig. 8, os resultados de coeficiente de atrito em baixa umidade.

Na Fig. 8 observa-se nitidamente dois comportamentos distintos. A dependência do desgaste com o coeficiente de atrito para baixos valores de PV (reta tracejada) deve estar diretamente relacionada com o mecanismo de desgaste envolvido. Conforme mencionado anteriormente, nesta região, o desgaste predominante foi microcorte, como pode ser visto na Fig. 6 condições PV = 2, 7 e 8. No caso de elevados desgastes (reta contínua), observa-se formação de ondas intensas na superfície (PV = 85, 283 e 2830). Pode-se dizer que para os maiores valores da condição PV, nos quais esteja ocorrendo perda de material por mecanismos de ‘ondulação’ o coeficiente de atrito assume valores mais elevados. Quando passa atuar o mecanismo de abrasão a três corpos, devido a ação das partículas de desgaste presentes na região de contato, o coeficiente de atrito diminui para uma faixa de valores intermediários. Por fim, sob condições PV pouco severas, o mecanismo de abrasão a dois corpos passa a ser predominante, o coeficiente de atrito deve tomar outra faixa de valores menores.

Nos cabos *risers* estudados para o modelamento das condições dinâmicas (Pesce, 1997), as condições PV extremas, são próximas da região de condições PV deste trabalho, ou seja, coeficiente de atrito em torno de 0,25 e desgaste em torno de 0,1 mm. Não parece provável, entretanto, que em condições normais de operação as condições de ensaio acima possam reproduzir as que ocorrem nos cabos, uma vez que nestes, o movimento relativo entre as partes internas é alternado e no ensaio é rotativo e contínuo. O que se destaca é que se ocorrerem transições de mecanismos nas faixas de produtos PV que descrevem o movimento relativo entre os elementos constitutivos dos cabos ou de qualquer elemento estrutural ou de máquina, esta transição será responsável por variações nos coeficientes de atrito nestes sistemas.

6. CONCLUSÕES

Os principais mecanismos de desgaste apresentado pelo polietileno de alta densidade em contato com aço carbono galvanizado, podem ser representados por três diferentes tipos de morfologia de desgaste: riscos de abrasão a dois e três corpos e formação de ondas na superfície do pino.

Como seria esperado, a variação do mecanismo de remoção de massa da interface pino/disco altera o coeficiente de atrito.

A análise conjunta dos valores de coeficiente de atrito e desgaste, indicaram uma relação entre os mecanismos de desgaste predominantes e os valores de coeficiente de atrito, além, da influência direta destes mecanismos na intensidade do desgaste.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo patrocínio no projeto temático no 94/3529-0, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de produtividade concedida no processo nº 304715/89-1 e de mestrado concedida no processo 136086/95-0 e à PIRELLI CABOS S.A. pela colaboração, dentro do projeto de desenvolvimento de métodos de previsão de vida útil de produtos da linha petróleo-*offshore*, com a doação dos corpos-de-prova empregados na pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Annual book of ASTM standards. ASTM G 99-90, 1992. Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus. Vol. 03.02, Section 3, pp. 387-391
- Belyi, V. A.; Sviridyonok, A. I.; Smurugov, V. A. & Nevzorov, V.V., 1977. Adhesive wear of polymer friction. Journal of Lubrication Technology, v 109, pp. 396-400

- Briscoe B. J., Evans, P. D., Pelillo, E. & Sinha, S. K., 1996. Scratching maps for polymers. *Wear*, 200, pp. 137-147
- Briscoe, B.J., 1990. Material aspects of polymer wear. *Scripta Metallurgica et Materialia*. Vol. 24, pp. 839-844
- Hutchings, I. M., 1992. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. Edward Arnold / London. Chapter 3: Friction of polymers, pp. 51-57
- Lancaster, J. K., 1969. Abrasive wear of polymers. *Wear*, 14, pp. 223-239
- Lancaster, J. K., 1990. Material-specific wear mechanisms: relevance to wear modelling. *Wear*, 141, pp.159-183
- Lloyd, A. I. G. & Noël, R. E. J., 1988. The effect of counterface surface roughness on the wear of UHMWPE in water and oil-in-water emulsion. *Tribology Int*, vol. 21 n° 2, pp. 83-88
- Marcus, K., Ball, A & Allen, C., 1981. The effect of the grinding direction on the nature of the transfer film formed during the sliding wear of UHMWPE against stainless steel. *Wear*, 151, pp. 323-336
- Pesce, C. P., 1997. *Mecânica de Cabos e Tubos submersos lançados em "catenária": uma abordagem analítica e experimental*. Tese de Livre Docência, Escola Politécnica da USP, 350 pp.
- Pleskachevsky, Y. M. , Zaitsev, A. L. & Smirnov, V. V., 1995. Oxidation and its influence on low pressure polyethylene wear. *Wear*, 181-183 , pp. 222-226
- Silva, C. H. & Sinatora, A., 1998. Modelo de coeficiente de atrito dinâmico para o par polietileno de alta densidade e aço carbono galvanizado. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – BT/PMC/140 – ISSN 1413-2184*, 20 pp.
- Silva, C. H., Tanaka. D. K. & Sinatora, A., 1999. The effect of load and relative humidity on friction coefficient between high density polyethylene on galvanized steel – preliminary results. *Wear*, 225-9, pp. 339 - 342
- Tanaka, K., 1982. Transfer of semycrystalline polymers sliding against a smooth steel surface. *Wear*, 75, pp. 183-199
- Vinogradov, G. V., Mustafaev, V. A. & Podolsky, YU. YA., 1965. A study of heavy metal-to-plastic friction duties and of the wear of hardened steel in the presence of polymers, *Wear*, 8, pp. 358-373
- Yamaguchi, Y., 1990. *Tribology of plastic materials. Their characteristic and applications to sliding components*. ELSEVIER -Tribology series- v. 16, p. 1-89

WEAR OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE APPLIED IN THE PRODUCTION OF TUBES FOR EXTRACTION OF PETROLEUM

Abstract. This work presented the influence of the applied load and of the sliding velocity in wear mechanisms of high density polyethylene (HDPE) against hot dip galvanized steel. The tests were made in a pin-on-disc tribometer, in the configuration of HDPE pin and galvanized steel disc. The loads and sliding velocities used were: 0,5; 2 and 20 N and 0,03; 0,1 and 1 m/s respectively, being determined for each tests the friction coefficient and the mass loss. The results showed that with the increase of the load and of the velocity, friction coefficient and mass loss, they increase too. This behavior is attributed to changes in the wear mechanisms. The microscopic observation of pin surface revealed that three different wear mechanisms act during the tests: abrasion of two and three bodies and the superficial plastic deformation, resulting in the wrinkled morphology. The combined analysis of the friction coefficient and mass loss, they indicated a relationship between the wear mechanisms and friction coefficient, besides the direct influence of these mechanisms in wear intensity.

Key-words: *Risers* – Wear mechanisms – Friction coefficient - HDPE - Polymers