

EFEITO DA CARGA NORMAL NO COMPORTAMENTO EM FRETTING DO AÇO EN S355 MC

Helena Serrano ⁽¹⁾, A. Ramalho ⁽²⁾

⁽¹⁾ Escola Superior de Tecnologia; Instituto Politécnico de Castelo Branco

⁽²⁾ Departamento de Engenharia Mecânica; Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra



RESUMO

Existem fundamentalmente três razões que conduzem à não conformidade de componentes mecânicos: a obsolescência da solução técnica, a rotura e o desgaste. No domínio da tribologia, a investigação científica procura minimizar os efeitos maléficos decorrentes do desgaste de componentes mecânicos. O fretting é um fenómeno presente em grande parte dos equipamentos industriais sujeitos a vibrações e assume grande importância como mecanismo de desgaste entre corpos em contacto. Assim, é importante o conhecimento deste mecanismo acelerador de danos através dos parâmetros que o influenciam pelo que o objectivo do presente trabalho consiste em analisar o efeito da carga normal em contactos cilindro/plano sujeitos a solicitações de fretting.

1. INTRODUÇÃO

O fretting é uma forma particular de dano que ocorre em superfícies de contacto sujeitas a movimentos relativos de pequena amplitude, sendo por isso muito comum em diversas aplicações. Em função dos materiais e das condições de contacto a ruína por fretting pode manifestar-se por três mecanismos distintos, que podem ocorrer isoladamente ou concomitantemente: iniciação e propagação de fissuras, desgaste e corrosão. Vários estudos permitiram o desenvolvimento de modelos que descrevem de forma razoável o comportamento dos materiais de engenharia sujeitos a solicitações de fretting, sendo de realçar os modelos de Cattaneo, de Mindlin e de Hamilton & Goodman [1-4]. Estes modelos permitem classificar a ocorrência do fenómeno de

fretting segundo três regimes: regime de colagem, regime misto e regime de grande escorregamento.

Com base nestes modelos a investigação experimental neste domínio, tem actualmente como um dos seus principais vectores o traçado de mapas de fretting [5,6]. Os mapas de fretting são uma representação bidimensional, habitualmente no espaço força tangencial-amplitude de deslocamento, dos domínios em que predomina cada um dos diferentes regimes de fretting.

O objectivo deste trabalho foi estudar para o aço EN S355 MC, predominantemente utilizado na estrutura de veículos automóveis, o efeito da carga normal nos limites de transição entre os regimes misto e de grande escorregamento para contactos cilindro/plano.

2. MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Os provetes que permitiram estabelecer o contacto contraconformado cilindro/plano foram obtidos a partir de uma chapa com 3 mm de espessura, cujas propriedades mecânicas são correspondentes ao aço EN S355 MC (norma 10149), tabela 1.

Tabela 1– Principais propriedades mecânicas do aço EN S355MC.

E [MPa]	ν	Resistência à Tracção [MPa]	Tensão de Cedência [MPa]	Alongamento à Ruptura [%]
2.07E5	0.3	530	403	29

Foram usados em cada ensaio três provetes, um plano e dois patins de extremidade cilíndrica com raio de curvatura de 10 mm, cuja geometria é definida na figura 1, sendo ensaiados simultaneamente dois contactos cilindro/plano.

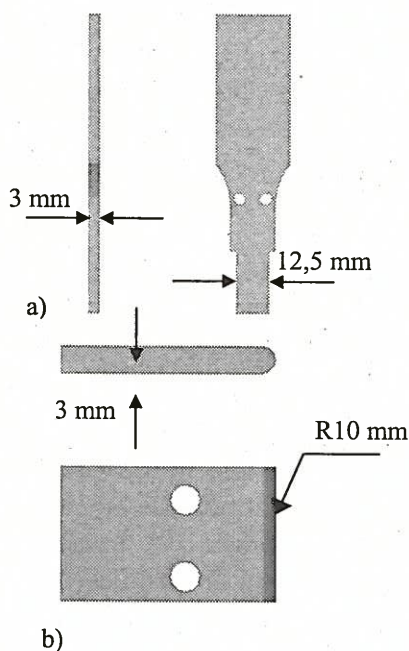


Fig 1- Provetes de fretting: a) provete plano; b) patim.

A experiência foi concebida de forma a verificar um conjunto de requisitos: realizar ensaios com amplitude de movimento extremamente reduzida; possibilitar comprimentos de contacto significativos por forma a minimizar os efeitos de

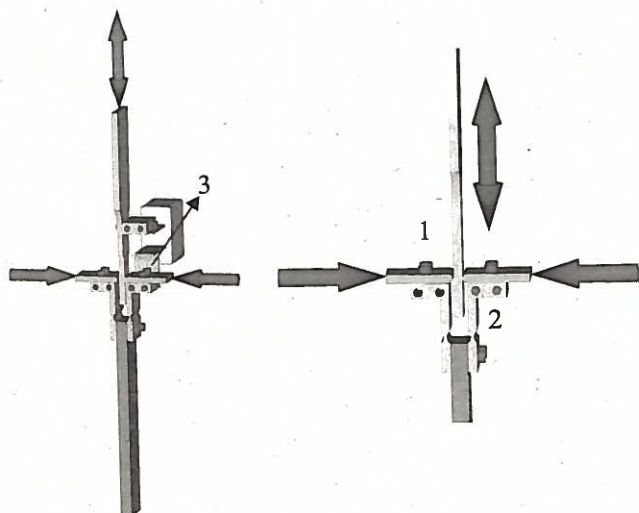
extremidade; medir em tempo real o deslocamento e a força tangencial e por último possibilitar a aplicação de forças normais que conduzissem a deformações dos contactos cilindro/plano nos domínios elástico e elastoplástico.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Construções Mecânicas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra. Foi utilizada uma Máquina de Fadiga Universal do tipo servo-hidráulica, marca *Dartec*, de 10 toneladas, previamente adaptada com um dispositivo de aplicação de força normal. A força normal era aplicada por um mecanismo de molas guiadas em hastes cilíndricas e com suportes de geometria adequada. O contacto entre o mecanismo de aplicação da carga normal e os patins é um contacto do tipo pontual esfera/plano. A magnitude da força normal é controlada por aperto de parafusos que promovem o tensionamento das molas e é determinada medindo a deformação das molas, sabendo previamente a sua constante de rigidez (figura 2).

O deslocamento relativo resulta da aplicação de uma onda sinusoidal aos pontos de amarração dos provetes à máquina servo-hidráulica. Para o efeito, a máquina é operada em controlo de deslocamento. Como o deslocamento é medido através do transdutor tipo LVDT, “Linearly Variable Differential Transformar”, é impossível controlar deslocamentos tão pequenos quanto os pretendidos no presente trabalho. Para ultrapassar este problema procurou-se tirar partido da deformação quer do provete plano quer das peças de ligação dos patins à amarra da máquina servo-hidráulica, assim o deslocamento imposto pelas amarras δ_t será igual à soma de três componentes conforme a expressão 1:

$$\delta_t = \delta + \delta_c + \delta_m \quad (1)$$

A componente δ representa a amplitude de deslocamento relativo no contacto de fretting, a componente δ_c corresponde ao deslocamento devido à deformação elástica



a)

b)

Fig 2 – Dispositivo de fretting: a) representação esquemática; b) fotografia; (1- provete plano; 2- porta patins; 3- suporte de fixação do extensómetro; 4- mecanismo de aplicação da força normal).

do contacto e a parcela δ_m corresponde à deformação elástica de todos os componentes mecânicos existentes entre os pontos onde o LVDT controla o deslocamento e o contacto cilindro/plano dos provetes. Assim, enquanto o controlo da onda de deslocamento imposto pela máquina, com amplitude δ_i , era controlado pelo LVDT, o deslocamento nas proximidades de contacto era medido com um extensómetro de lâminas. O deslocamento assim medido com o extensómetro de lâminas inclui fundamentalmente o somatório das componentes δ e δ_c , figura 3.

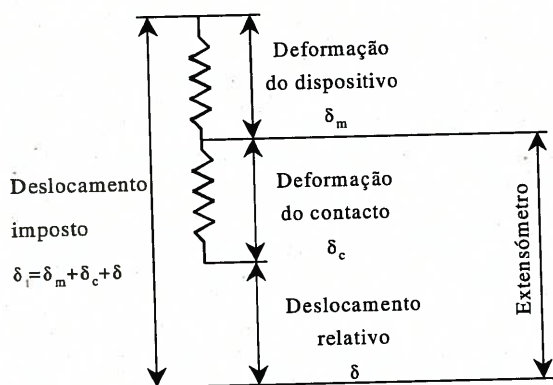


Fig 3– Representação esquemática das componentes do deslocamento imposto pela máquina de fadiga.

Devido ao atrito nas duas superfícies de contacto é transmitida, entre os patins móveis e o provete fixo, uma força igual ao somatório da força de atrito nos dois contactos. Esta força é medida pela célula de carga da máquina de ensaios.

Previamente aos testes as superfícies de contacto foram limpas com álcool etílico. A montagem dos provetes iniciava-se com a fixação dos patins por aperto nos respectivos suportes. Nesta fase, o aperto dos parafusos de fixação dos patins não se fazia na totalidade por forma a permitir ajustes entre as superfícies para que o contacto ocorresse em todo o comprimento da geratriz. Seguidamente, após o posicionamento do mecanismo de aplicação da força normal e do provete plano, iniciava-se o aperto que conduzia a afinação do valor da força normal até que a deformação resultante nas molas igualasse a correspondente ao valor da força desejada. Finalmente, eram refeitos os apertos, posicionado o extensómetro de lâminas e a montagem era fixa às amarras hidráulicas da máquina de ensaios (figura 4). No controlador digital da máquina procediam-se às regulações da amplitude de deslocamento e dava-se início ao ensaio. Os

testes foram conduzidos com uma frequência muito reduzida de forma a minimizar os efeitos térmicos, assim foram aplicadas ondas sinusoidais com frequência de 0,5 Hz. A aquisição dos valores da força de atrito e do deslocamento medido pelo extensómetro foi feita através de um programa incluído no sistema de controlo da máquina de ensaios. Para, por um lado, minimizar as variações típicas do início do ensaio e por outro reduzir os efeitos térmicos e de desgaste das superfícies de contacto, realizaram-se testes com um número reduzido de ciclos tendo sido adquiridos para posterior tratamento o 10° e o 26° ciclos.

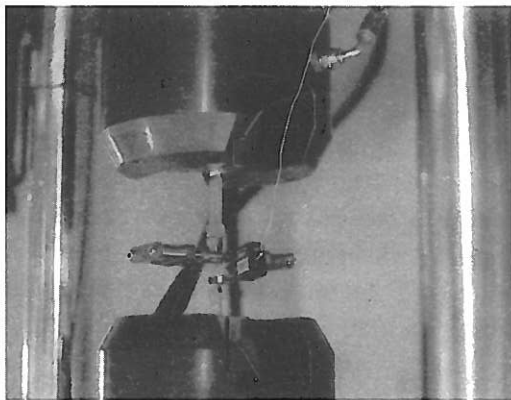


Fig 4- Fotografia do dispositivo de fretting montado na máquina.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 2 resume as condições de ensaio que foram utilizadas no estudo experimental.

Tabela 2 - Condições de ensaio utilizadas no estudo experimental.

Força Normal [N/mm]	Frequência [Hz]	Deslocamento Total Imposto δ_t [μm]
15	0,5	17
		23
		51
20	0,5	17
		23
		34
30	0,5	11
		23
		40
		63

A aquisição dos sinais do deslocamento e da força tangencial permitiu obter as curvas de evolução destas grandezas no tempo, conforme está representado na figura 5.

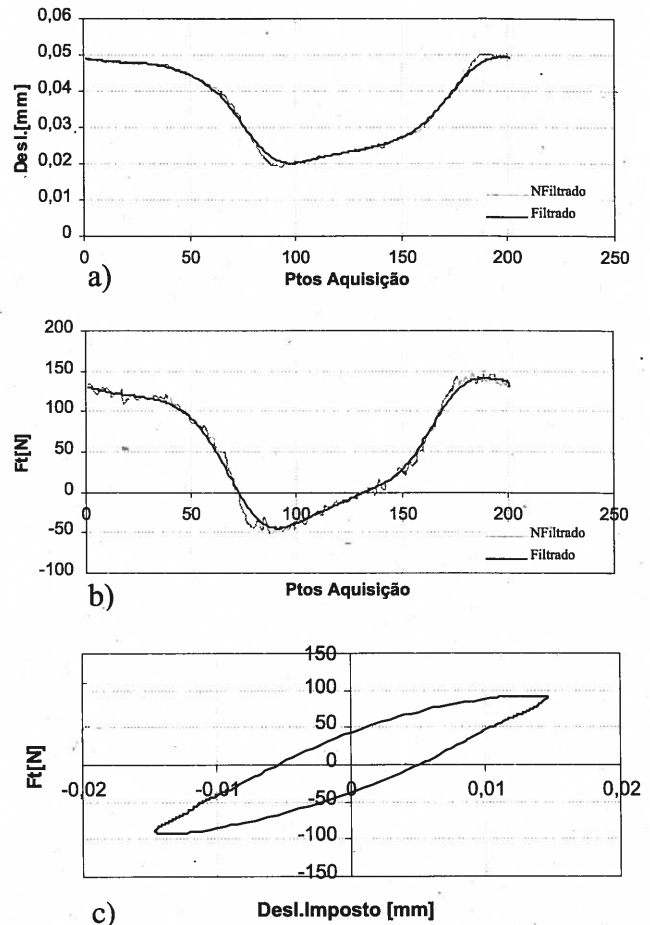


Fig 5- Evolução dos sinais no tempo para a amplitude de deslizamento de 51 μm e força normal de 15 N/mm: a) deslocamento; b) força tangencial; c) ciclo de histerese.

A representação da variação da força tangencial com o deslocamento permite obter os ciclos de histerese. Na figura 5c) apresenta-se um exemplo de um ciclo de fretting.

Na figura 6 representam-se ao ciclos de histerese para as condições referidas na tabela 2.

Para todos os ensaios constatou-se que os ciclos de fretting obtidos para o 10° e 26° ciclo de carga não apresentavam diferenças apreciáveis. Tal facto era já esperado atendendo ao reduzido efeito térmico.

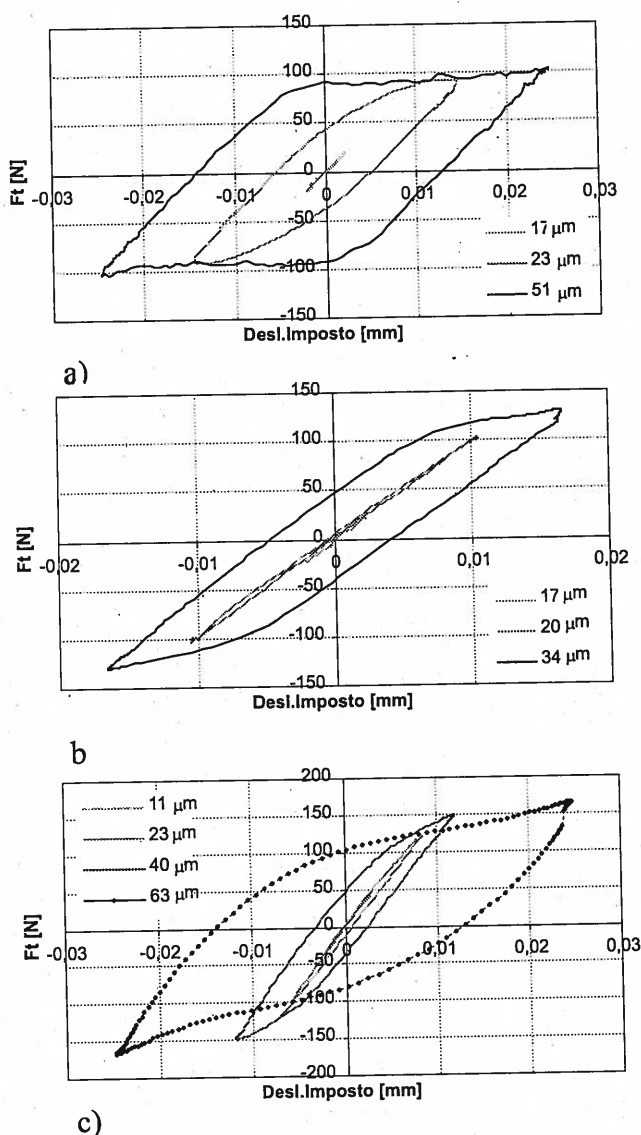


Figura 6- Evolução da força tangencial com o deslocamento para vários valores de amplitude de deslocamento δ : a) $F_n=15$ N/mm; b) $F_n=20$ N/mm; c) $F_n= 30$ N/mm.

Assim, os resultados apresentados referem-se indiscriminadamente a um dos ciclos.

Analisando os resultados da figura 6 verifica-se que qualquer que seja a força normal aplicada a forma dos ciclos de fretting varia significativamente com a amplitude de deslocamento. Efectivamente, para os valores de amplitude mais reduzidos os ciclos apresentam uma evolução linear apenas a duas fases correspondentes ao deslocamento em cada um dos sentidos. Verifica-se ainda que a área dos ciclos é muito reduzida e que os valores máximos da força tangencial são baixos, muito inferiores ao que seria de esperar por

aplicação do modelo de Coulomb, considerando um coeficiente de atrito plausível para o material em estudo. Contrariamente, quando foram aplicados os valores mais elevados de deslocamento a forma dos ciclos é bastante distinta, a evolução passa a ocorrer em quatro fases sendo duas de crescimento quase linear da força com o deslocamento seguidas de uma fase de aumento de deslocamento a força constante. Também os valores máximos da força tangencial cresceram significativamente, correspondendo-lhes coeficientes de atrito de Coulomb com valor médio de 0,5, este valor é já compatível com o que era esperado.

Para valores intermédios de amplitude de deslocamento e para todos os casos de força normal estudados, verificou-se uma transição entre estas duas formas. A análise dos resultados experimentais permite ainda constatar que para valores mais reduzidos de força normal, 15 e 20 N/mm, as fases de escorregamento dos ciclos de fretting são caracterizados por uma evolução de deslocamento mantendo-se constante a força tangencial, figura 6a) e b) (ciclos de grande escorregamento). Por sua vez os ciclos correspondentes aos ensaios realizados com força normal de 30 N/mm apresentam uma forma algo distinta. Efectivamente, neste caso e para valores mais elevados de amplitude de deslocamento, o escorregamento não ocorre a força tangencial constante, verificando-se um aumento da força com o deslocamento, figura 6c).

Para cada um dos valores de força normal calculou-se o coeficiente de atrito a partir do valor máximo da força tangencial que se registou nos ciclos correspondentes ao regime de escorregamento total. Obtiveram-se assim os valores de 0,49, 0,52 e 0,62, respectivamente para os valores de força normal de 15, 20 e 30 N/mm. Com valores de força normal e do coeficiente de atrito é possível por utilização das expressões 2 calcular a distribuição das diferentes componentes de tensão e a partir destas obter as correspondentes tensões de Von-Mises. Nestas expressões p

corresponde à distribuição da pressão normal a uma distância s da origem de referencial (x,z) , q é a distribuição da força tangencial no contacto, x a coordenada na direcção da linha de contacto, z a coordenada em profundidade no referencial (x,z) e a corresponde a meia largura de contacto.

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{2z}{\pi} \frac{a}{\{(x-s)^2 + z^2\}^2} \int_{-a}^a p(s)(x-s)^2 ds - \frac{2}{\pi} \frac{a}{\{(x-s)^2 + z^2\}^2} \int_{-a}^a q(s)(x-s)^3 ds \\ \sigma_z = \frac{2z^3}{\pi} \frac{a}{\{(x-s)^2 + z^2\}^2} \int_{-a}^a p(s) ds - \frac{2z^2}{\pi} \frac{a}{\{(x-s)^2 + z^2\}^2} \int_{-a}^a q(s)(x-s)^2 ds \\ \tau_{xz} = -\frac{2z^2}{\pi} \frac{a}{\{(x-s)^2 + z^2\}^2} \int_{-a}^a p(s)(x-s) ds - \frac{2z}{\pi} \frac{a}{\{(x-s)^2 + z^2\}^2} \int_{-a}^a q(s)(x-s)^2 ds \end{cases} \quad (2)$$

Verificou-se que os valores máximos da tensão de Von-Mises eram de 360, 425 e 580 MPa. Atendendo à tensão limite elástico do aço, 403 MPa, constata-se que para o caso de carga normal de 30 N/mm o limite elástico é ultrapassado em áreas significativas do contacto, enquanto que para valores inferiores da carga normal o contacto é predominantemente elástico. Assim, a forma atípica dos ciclos de escorregamento total, observada para a carga de 30 N/mm, deve-se ao facto do escorregamento ocorrer no domínio elastoplástico. Analisando a forma dos ciclos de fretting publicados por J.D.Costa *et al* [7] a mesma conclusão poderia ser extraída.

Uma das maiores dificuldades na experimentação em fretting é a medição rigorosa do deslocamento relativo dos corpos em contacto. Diversas razões de ordem experimental, fundamentalmente decorrentes da geometria dos corpos de prova, dificultam a medição dos deslocamentos na vizinhança imediata do contacto. Assim, pelo facto da medição do deslocamento relativo ser feita a uma distância significativa do ponto de contacto, a rigidez de todas as peças situadas entre os pontos de referência entre os quais é efectuada a medição do deslocamento pode ser determinante nos resultados. Dada a importância deste assunto têm sido publicados vários trabalhos que incluem

uma discussão detalhada da sua influência [8].

O facto das medições de deslocamento realizadas durante os ensaios incluírem uma parte significativa de deformação das peças existentes entre os dois pontos de medida, apesar de se usar um extensómetro de lâminas com comprimento de medida nominal bastante reduzido, tratando-se de deslocamentos da ordem do micrómetro qualquer deformação é relevante para a medida efectuada. Para efectuar a correcção dos valores de deslocamento por forma a suprimir a componente devida à rigidez dos componentes, Fouvry *et al* e Ramalho e Celis [8] propõem uma metodologia baseada no cálculo da rigidez elástica a partir da zona de colagem de cada ciclo e posteriormente aplicar o valor de rigidez obtido para subtrair aos deslocamentos medidos na componente devida à deformação.

A transição entre o regime parcial e o regime de grande escorregamento verifica-se quando a força tangencial iguala o limite de atrito. Então, uma forma de estudar a transição de regime é analisar a evolução do valor máximo da força tangencial verificado durante uma oscilação completa. Na figura 7 representa-se a evolução do valor máximo da força tangencial com a amplitude de deslocamento.

Existe actualmente uma tendência crescente de utilizar o valor da energia dissipada por atrito em cada ciclo de fretting para inferir da quantidade de mate-

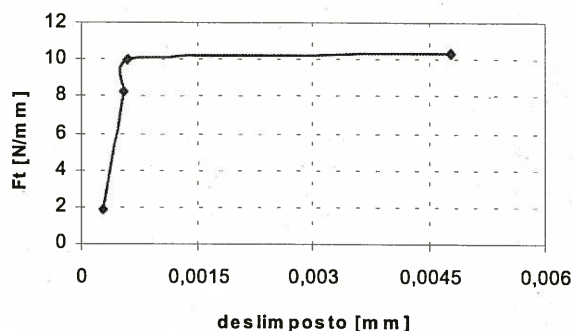


Figura 7- Evolução da carga tangencial com a amplitude de deslocamento, para resultados obtidos nos ensaios para uma carga normal de 20 N/mm e coeficiente de atrito 0,5.

rial removido por desgaste. A energia dissipada por atrito pode ser calculada pelo integral da força tangencial ao longo de uma reversão completa, corresponde assim à área de um ciclo de fretting num diagrama F- δ . Os valores da energia dissipada na interface, permitem concluir que esta é bastante mais baixa em condições de regime parcial, evidenciando uma evolução curva, enquanto que em condições de escorregamento total apresenta um comportamento linear crescente.

Na figura 8 apresentam-se os resultados os valores de energia para o caso da carga normal aplicada ao contacto de 20 N/mm e 30 N/mm.

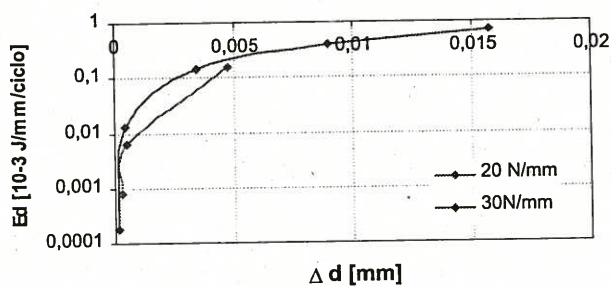


Figura 8- Energia dissipada por atrito obtida experimentalmente para a força normal de 20 N/mm e 30 N/mm.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu avaliar experimentalmente o efeito da carga normal no comportamento em fretting do aço S355 MC. Verificou-se que:

- cargas normais mais elevadas conduzem ao aumento do valor de deslocamento de transição entre as formas características de cada regime de escorregamento, o que é perfeitamente justificável se se tiver em conta que a área e as tensões de contacto são directamente proporcionais à carga normal, pelo que o deslocamento imposto terá que ser logicamente superior para promover o escorregamento total;
- se o valor da carga normal conduz a deformações no domínio elastoplástico, os ciclos de histerese correspondentes ao regime de escorregamento total apresentam uma forma atípica: mais arredondados

deixando de evidenciar o aumento do deslocamento a força tangencial constante, passando a constatar-se um aumento da força tangencial com o deslocamento;

- valores mais baixos de carga normal aplicada ao contacto cilindro/plano conduzem a valores menores de energia dissipada por atrito.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo suporte financeiro do presente trabalho através do projecto POCTI/33710/EME/ 2000.

REFERÊNCIAS

- [1] Cattaneo, C., *Sul Contatto di Due Corpi Elastici: Distribuzione Locale Degli Sforzi*, Rendiconti dell'Accademia Nazionale dei Lincei, 27, Ser. 6, 342, 434, 474, [214], (1938).
- [2] Mindlin, R.D., Deresiewicz, H., *Elastic Spheres in Contact Under Varying Oblique Forces*, New York, (1949).
- [3] Hamilton, G.M., Goodman, L.E., *The Stress Field Created by a circular Sliding Contact*, Journal of Applied Mechanics, (1966).
- [4] Hamilton, J. *Explicit Equations for the Stresses Beneath a Sliding Spherical Contact*, Engineering Sciences Division, 197, 53-59, (1983).
- [5] Vingsbo, O., Sderberg, S., *On The Fretting Maps*, Wear, 126, 131-147, (1988).
- [6] Fouvry, S., Kapsa, Ph., Vincent, L., *Analysis of Sliding Behaviour for Fretting Loadings: Determination of Transition Criteria*, Wear, 185, 35-46, (1995).
- [7] Costa, J.D., Ferreira, J.M., Ramalho, A.L., *Fatigue and Fretting of Ion-Nitried 34CrNiMo6 Steel*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 35, 69-79, (2001).
- [8] Ramalho, A. L., Celis, J.P., *Fretting Laboratory Tests :Analasys of the Mechanical Response of Tests Rigs*, a publicar, (2002).

