

# DESENVOLVIMENTO DE UM TRIBÓMETRO PARA ENSAIOS DE *FRETTING*

Marcelo Gaspar <sup>(1)</sup>, A. Ramalho <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Escola Superior de Tecnologia; Instituto Politécnico de Castelo Branco

<sup>(2)</sup> Departamento de Engenharia Mecânica; Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra



## RESUMO

*O fretting é um fenómeno presente em grande parte dos equipamentos industriais sujeitos a vibrações. Sendo um mecanismo de desgaste bastante nefasto torna-se premente a definição de regras de projecto que permitam minimizar ou eliminar as suas consequências. O objectivo do presente trabalho consiste em apresentar um equipamento protótipo de ensaios de fretting desenvolvido e construído no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra. Este equipamento tem em conta os principais parâmetros que afectam este fenómeno e permite medir e/ou controlar os valores das suas principais variáveis. Este tribómetro possibilita a realização de um vasto conjunto de ensaios de fretting, considerando o efeito isolado de diversos parâmetros e permite ainda o estudo do comportamento ao fretting de materiais usando diferentes geometrias e dimensões de provetes.*

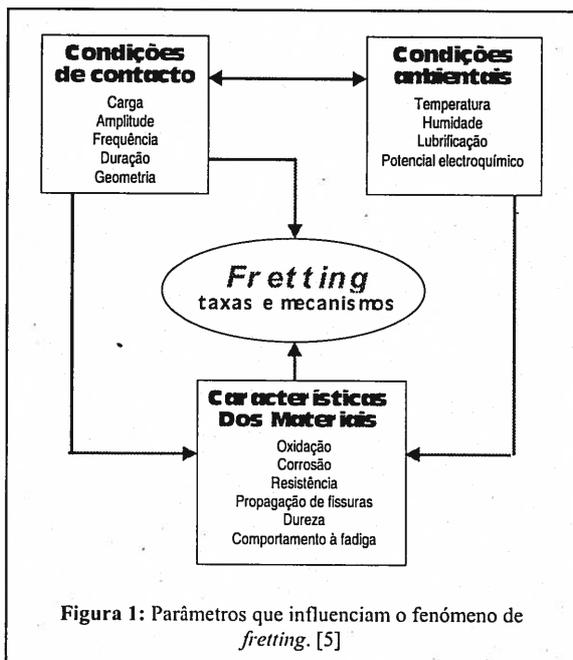
## 1. INTRODUÇÃO

O *fretting*, mesmo actuando isoladamente, é um mecanismo de desgaste com um efeito bastante nefasto que resulta, na maioria dos casos, do movimento oscilatório de pequena amplitude entre superfícies em contacto. Este fenómeno pode ocorrer não só em componentes mecânicos de equipamentos industriais [1], mas também em contactos eléctricos [2] e electrónicos [3]. Sendo então este fenómeno de degradação bastante frequente em inúmeras aplicações industriais urge a realização de estudos que permitam a criação de regras de projecto que prevejam

e minimizem este fenómeno de degradação e que permitam a definição de paliativos que atenuem os seus efeitos.

Desta forma, apesar de o estudo dos fenómenos relacionados com o *fretting* não se encontrarem normalizados, os investigadores que se dedicam ao seu estudo procuram criar bases de trabalho comuns que permitam uma mais efectiva caracterização deste fenómeno.

É nesta óptica que se desenvolveu o presente tribómetro, que permitirá então ao Grupo de Construções Mecânicas da Universidade de Coimbra a realização de ensaios de *fretting* com vista à



caracterização deste fenómeno para um vasto conjunto de materiais e de aplicações.

## 2. FACTORES QUE INFLUENCIAM O FRETTING

Numerosos trabalhos experimentais suportados por modelos de análise teórica mostraram que a danificação por *fretting* é afectada por um vasto conjunto de factores, tendo Beard [4] sugerido que mais de cinquenta parâmetros apresentam um papel importante neste fenómeno. Bill [5], por seu turno, classificou estes parâmetros em três classes principais: condições de contacto, condições ambientais e características dos materiais. Uma síntese desta classificação, bem como dos seus modos de interacção, encontra-se ilustrada na figura 1.

No que respeita às variáveis de *fretting* classificadas como pertencentes às condições de contacto, destacam-se as que dizem respeito à geometria de contacto e às tensões nele geradas, por serem determinantes nos diversos regimes de *fretting*. Pelo facto de o *fretting* ser um fenómeno de dano cumulativo, são de referir ainda como parâmetros de especial relevância, os que estão relacionados com a duração, a frequência e a amplitude do

movimento relativo entre as superfícies em contacto.

As condições do ambiente influenciam as taxas e os mecanismos de *fretting*, interagindo de forma combinada com as restantes condições que afectam este fenómeno. A interferência com os mecanismos de *fretting* não se faz de forma directa, todavia as condições ambientais influem de sobremaneira nas propriedades dos materiais e nas condições de contacto que afectam o *fretting*.

A forma como o par de materiais em contacto responde em situações de *fretting* é, *a priori*, difícil de prever, da mesma forma que o é para qualquer contacto tribológico. Todavia, aqui o problema põe-se com maior evidência pois, em função das condições de interacção, o dano pode ocorrer por fissuração, por desgaste ou por oxidação. Para cada um destes mecanismos haverá, então, propriedades dos materiais que sejam agentes propiciadores ou atenuadores.

## 3. TRIBÓMETROS PARA ENSAIOS DE FRETTING

Após a realização de uma pesquisa na literatura actual dedicada ao estudo das manifestações de *fretting*, pode concluir-se que a maioria dos dispositivos dependem essencialmente do tipo de actuador. Este actuador tem como função impor os deslocamentos alternativos de pequena amplitude característicos do *fretting*. Assim, existem essencialmente actuadores do tipo mecânico, servo-hidráulico e electrodinâmico.

Os actuadores mecânicos caracterizam-se por terem um veio acoplado a um motor eléctrico e que pode estar associado a diferentes mecanismos. O mecanismo mais usual é o sistema biela-manivela que, por acção de um excêntrico regulável, promove o movimento linear alternado de *fretting* ao par tribológico. Neste tipo de tribómetros (figura 2) a amplitude de deslocamento é regulada mecanicamente pela excentricidade imposta, enquanto que a frequência de ensaio é função da velocidade

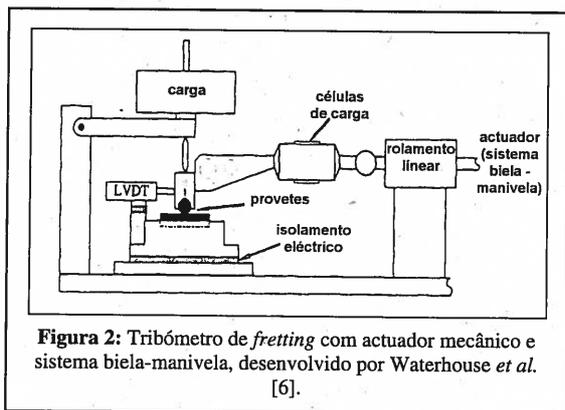


Figura 2: Tribómetro de fretting com actuator mecânico e sistema biela-manivela, desenvolvido por Waterhouse et al. [6].

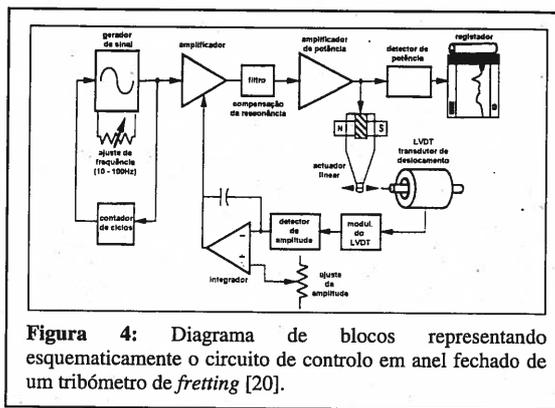


Figura 4: Diagrama de blocos representando esquematicamente o circuito de controlo em anel fechado de um tribómetro de fretting [20].

angular da árvore. Uma montagem alternativa caracteriza-se por fazer uso de um motor de passo de elevada precisão acoplado a um veio roscado com passo fino para impor o movimento alternado de fretting.

Pelo exposto, estes tribómetros são vocacionados para frequências de operação relativamente baixas e amplitudes de deslocamento definidas em função do mecanismo usado. No caso dos tribómetros com sistema biela-manivela, apesar de ainda serem usados por alguns autores [6-8], estes apresentam como principal contra-indicação a impossibilidade de aplicação de um sistema de controlo electrónico em anel fechado que garanta com precisão as condições impostas de deslocamento.

Na figura 3 encontra-se esquematizado um tribómetro desenvolvido por Mohrbacher et al. [9], que, à semelhança de

outros autores [10-13] utilizou como actuadores do movimento de fretting motores de passo com elevada precisão.

Em alguns estudos de fretting [14-19] faz-se uso de equipamentos com actuadores servo-hidráulicos. À semelhança dos tribómetros anteriormente referidos, estes são vocacionados para frequências de operação baixas. No entanto, ao contrário dos mecânicos de excêntrico, estes tribómetros permitem um controlo electrónico em anel fechado, representado esquematicamente na figura 4.

Uma das vantagens evidentes destes equipamentos consiste na possibilidade de, com o mesmo equipamento, ser possível realizar ensaios de fretting, de fadiga, de fadiga fretting e de deslizamento.

Os tribómetros de fretting mais difundidos são os que usam como actuadores excitadores electrodinâmicos (figura 5), pelo facto de estes permitirem um controlo bastante preciso do movimento imposto associado a frequências de operação elevadas. Existem numerosos estudos usando este tipo de equipamentos de ensaio de fretting em que o actuator é do tipo electromagnético [20-29] ou ainda do tipo piezoeléctrico [30].

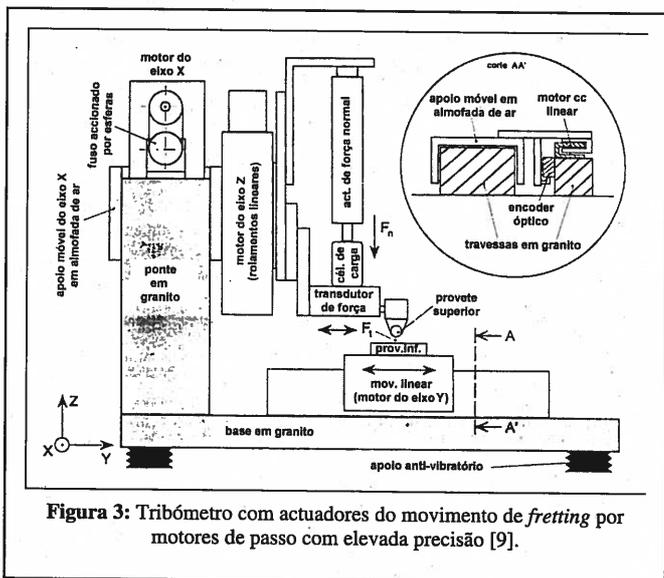


Figura 3: Tribómetro com actuadores do movimento de fretting por motores de passo com elevada precisão [9].

#### 4. DESENVOLVIMENTO DO TRIBÓMETRO

Pelo facto de o número de parâmetros que afectam o fenómeno de fretting ser bastante elevado e das consequências da sua combinação serem muito difíceis de prever, torna-se útil que um tribómetro de

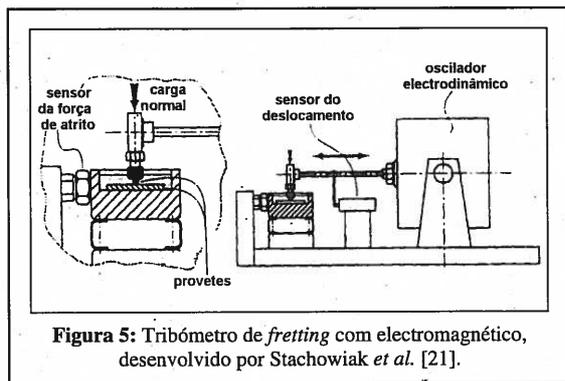


Figura 5: Tribómetro de *fretting* com electromagnético, desenvolvido por Stachowiak et al. [21].

*fretting* permita isolar cada uma das variáveis que o afectam, para assim determinar a influência, isolada e combinadamente, por forma a permitir estabelecer critérios de projecto que permitam prever e minimizar a sua acção nos componentes em serviço.

Com base na classificação dos parâmetros de *fretting* realizada por Bill [5] e explicitada no parágrafo 2 procurou-se sistematizar a acção destes quanto à definição das características do tribómetro (figura 6). Assim, no que respeita às condições de contacto dos ensaios de *fretting*, o tribómetro a desenvolver deveria simular com exactidão as condições de ensaio impostas mediante a afinação destas variáveis através de soluções tecnológicas adequadas, permitindo uma vasta gama de formas de espécimes a ensaiar, como ainda diversas geometrias de contacto resultantes.

Para a definição da duração do contacto, sendo esta uma variável de ensaio, deveria existir um controlador que permitisse ao utilizador regular diferentes valores para este parâmetro. Quanto à amplitude e frequência do movimento, assim como a carga máxima aplicada, estas dependem essencialmente das especificações de um gerador de impulsos a seleccionar. Como este gerador já estava imposto à partida, por estar disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da F.C.T.U.C., o objectivo consistiu em otimizar as suas características de forma a permitir uma gama mais vasta de condições de ensaio.

Com o intuito de avaliar as condições ambientais dos ensaios, o tribómetro de

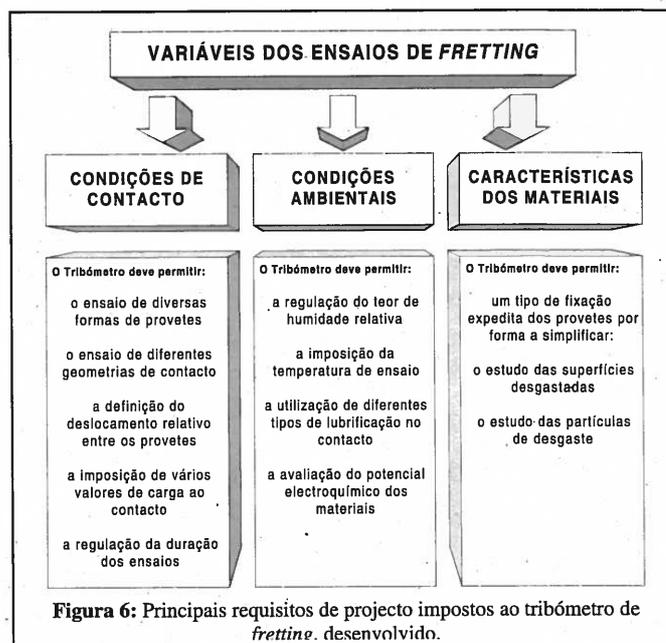


Figura 6: Principais requisitos de projecto impostos ao tribómetro de *fretting*, desenvolvido.

*fretting* deveria permitir, no mínimo, a possibilidade de leitura dos valores das variáveis correspondentes às condições de ambiente. O dispositivo deveria ainda garantir a estabilidade dos valores dos parâmetros ao longo dos ensaios, sendo desejável a possibilidade de imposição por parte do utilizador do maior número de condições de ensaio. Deste modo, tornava-se relevante que o tribómetro a desenvolver permitisse a imposição de diversas temperaturas e atmosferas de ensaio. No respeitante à resistência de contacto, era importante que o equipamento permitisse a sua medição durante a realização dos ensaios. Por fim, o utilizador do equipamento deveria ainda poder aplicar lubrificação no contacto. No que toca às características dos materiais, tais como as propriedades que lhes são intrínsecas e a sua resposta a certos tipos de solicitações, estes factores são alheios ao tribómetro que se pretendia desenvolver. Sendo o objectivo dos ensaios de *fretting* a caracterização do comportamento dos materiais quando sujeitos a determinadas acções, o tribómetro deveria ter um mecanismo simples de mudança dos espécimes a ensaiar por forma a facilitar a sua fixação e remoção, evitando assim o seu dano, ou a perda das partículas de desgaste geradas durante os ensaios.

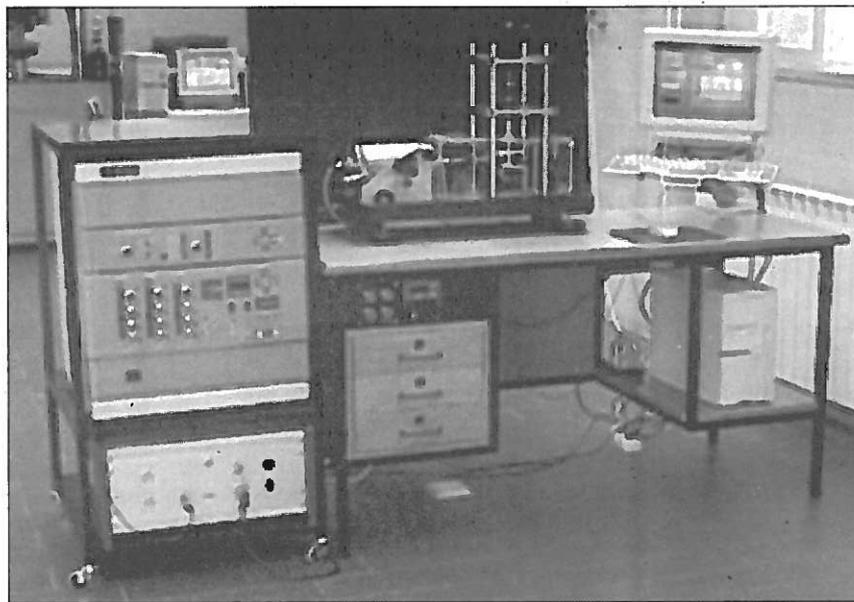


Figura 7: Tribómetro de *fretting* desenvolvido e executado no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

## 5. SOLUÇÕES ADOPTADAS

O tribómetro para ensaios de *fretting* desenvolvido (figura 7) é constituído por três partes fundamentais: uma unidade de controlo, uma unidade de ensaios e uma unidade de aquisição e processamento de dados.

A unidade de controlo tem como objectivo a definição e o controlo dos diversos parâmetros de ensaio. A unidade de ensaios tem como função permitir a realização dos ensaios para as condições impostas, minimizando a influência de factores externos e permitindo o máximo de precisão e repetibilidade. Por fim, com a unidade de aquisição e processamento de dados pretende adquirir-se todos os valores relevantes durante a realização dos ensaios e permitir o seu processamento.

Este equipamento foi projectado pelos autores deste trabalho, tendo sido construído nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.

A unidade de controlo tem como função permitir a definição das principais variáveis impostas à unidade de ensaios. Assim, a amplitude do movimento

alternativo entre os espécimes a testar é definido por um controlador INSTRON MODEL Nº 1342 que realiza um controlo PID do deslocamento, sendo realimentado por um transdutor linear (LVDT) SANGAMO TYPE SM1, com deslocamento admissível de  $\pm 1\text{mm}$ , que tem como função realizar a leitura do movimento realizado pelo actuador.

O controlo do início e do final dos ensaios é realizado pelo *software* de aquisição e processamento de dados. É possível ainda com esta unidade efectuar o controlo da frequência de ensaio, da força normal aplicada ao contacto, da temperatura de ensaio e da humidade do ambiente de ensaio.

A unidade de ensaios do tribómetro de *fretting* (figura 8) foi dividida em três grupos distintos: o sistema de aplicação do movimento, o sistema de aplicação da carga normal e o sistema de medição da força de atrito.

Para projectar a unidade de ensaios partiu-se do gerador do movimento já existente. Trata-se de um oscilador electrodinâmico da marca PHILLIPS, e do correspondente amplificador de sinal. Este

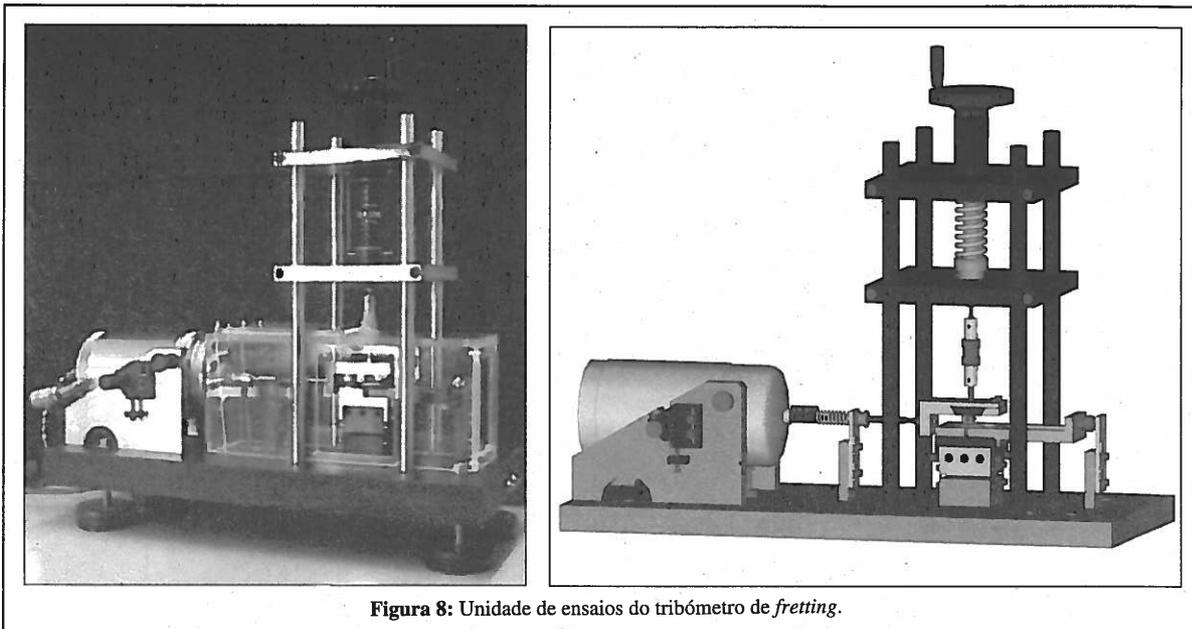


Figura 8: Unidade de ensaios do tribómetro de *fretting*.

actuador, tem como características principais permitir movimentos numa gama de 0 até 10kHz numa amplitude de  $\pm 4$ mm. A força máxima que este conjunto permite aplicar é de 23.7N, com uma distorção da força mínima de 0,5%.

Um outro aspecto, de especial relevância na definição das características do equipamento desenvolvido, diz respeito à forma e às dimensões dos espécimes a testar. Neste equipamento são ensaiados dois provetes, de materiais semelhantes ou distintos, com movimento relativo de translação alternada e sujeitos a uma força normal de compressão. De modo a conferir

maior versatilidade a este equipamento, procurou-se que fosse possível ensaiar uma vasta gama de formas de provetes, como ainda diferentes geometrias de contacto. Isto conseguiu-se graças ao tipo de porta-amostras usado, que permite uma vasta gama de soluções de fixação de provetes das mais diversas geometrias e dimensões

Na figura 9 estão ilustradas algumas soluções implementadas para provetes de contacto pontual, respectivamente, do tipo esfera-plano e do tipo cilindros cruzados, sendo possível ensaiar ainda diversas geometrias distintas das apresentadas. É de referir também que nestas soluções o porta-provetes superior permite, geralmente, a

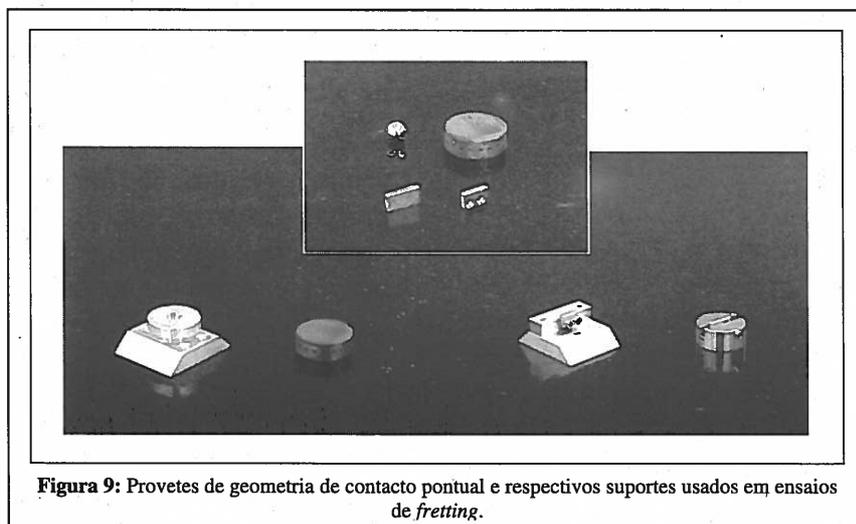


Figura 9: Provetes de geometria de contacto pontual e respectivos suportes usados em ensaios de *fretting*.

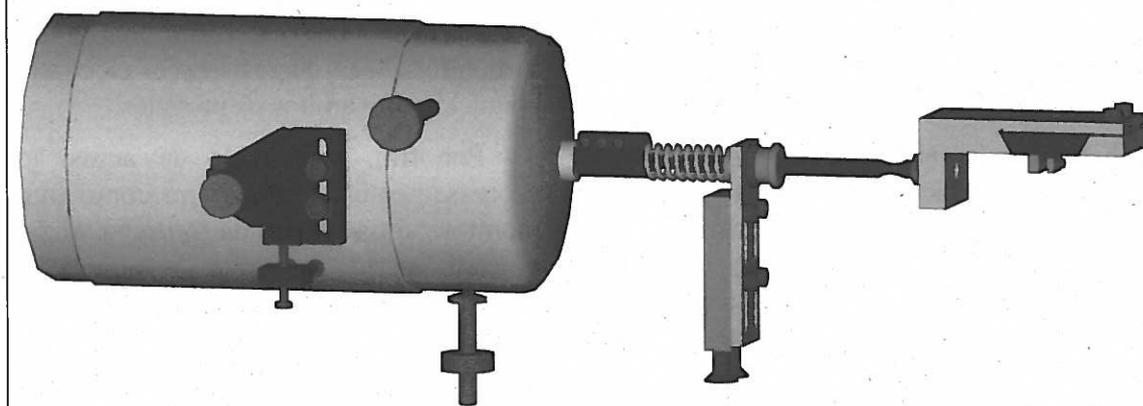


Figura 10: Sistema de aplicação de movimento da unidade de ensaios do tribómetro desenvolvido.

realização de um único ensaio por provete, enquanto que o porta-provetes inferior pode permitir a realização de múltiplos ensaios com um mesmo provete.

Tendo-se verificado ser essencial que o dispositivo permitisse um movimento linear alternativo entre os provetes, optou-se por manter um provete estático impondo o movimento somente ao provete superior. O movimento alternativo é obtido por meio do actuador electrodinâmico que está ligado rigidamente ao porta-provetes superior. Este sistema de aplicação do movimento pode visualizar-se na figura 10. A amplitude do movimento é medida através de um transdutor linear (LVDT) directamente acoplado à parte móvel do actuador electrodinâmico.

O sistema de aplicação da carga normal (figura 11) permite impor uma força de compressão aos provetes e é aplicada por um sistema de fuso vertical. Este sistema está apoiado em duas bases suportadas por quatro colunas e utiliza uma mola helicoidal de compressão actuada por um fuso de rosca fina por forma a garantir a manutenção do valor da força.

Uma célula de carga com uma gama de leitura de 1000N, rigidamente intercalada neste sistema, permite a leitura da força de compressão aplicada ao contacto.

A terceira parte da unidade de ensaios, a que se chamou sistema de medição da força de atrito (figura 12), engloba o sistema de fixação do porta-provetes

inferior, o dispositivo de aquecimento da zona de ensaios e ainda o sistema de alinhamento da célula de leitura da força tangencial de atrito, resultante do

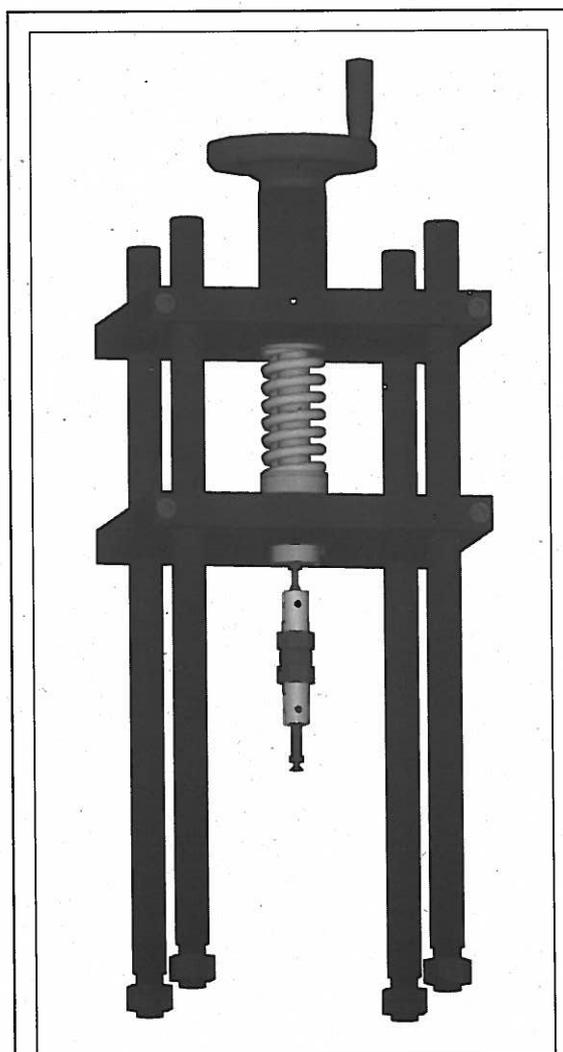


Figura 11: Sistema de aplicação da carga normal da unidade de ensaios do tribómetro desenvolvido.

deslocamento. A força tangencial é medida através da força equilibrante do provete fixo com o auxílio de uma célula de carga de tracção/compressão piezoeléctrica com uma gama de leitura de 250N.

Esta célula encontra-se rigidamente fixa entre o dispositivo porta-provetes inferior e um apoio rígido solidário com a base do equipamento. O apoio permite ainda a sua regulação em altura para diferentes posições de contacto entre provetes, por forma a garantir o alinhamento entre a força de atrito e a reacção equilibrante. O sistema de fixação dos provetes inferiores está unido com a base do equipamento por intermédio de um conjunto de lâminas que têm como função restringir todos os graus de liberdade, com excepção do deslocamento horizontal, na direcção do movimento imposto.

Em relação às condições ambientais, o dispositivo de ensaio permite impor aos provetes diferentes temperaturas, assim como a realização de ensaios com diversas atmosferas de ambiente. Aquecedores resistivos, alimentados por um controlador, permitem o aquecimento do provete inferior até temperaturas de aproximadamente 600°C. Uma câmara envolvente em material acrílico permite o condicionamento dos testes para diversos ambientes de ensaio, tais como a imposição de atmosferas com diferentes teores de

existente no sistema porta-provetes inferior realiza não só o isolamento térmico do porta provetes inferior, como permite ainda a monitorização da resistência eléctrica do contacto entre ambos os provetes.

Por fim, a unidade de aquisição e processamento de dados tem como função monitorizar os ensaios de *fretting* realizados no tribómetro mediante a aquisição e armazenamento de todos os valores que se considerem relevantes para a sua caracterização. Esta unidade ainda permite o envio de instruções de arranque e de paragem de ensaios.

Para a aquisição de valores dos ensaios foi desenvolvida uma aplicação usando o *software* de programação TestPoint [Keythley Instruments, Inc.], que permite, em conjugação com uma placa de aquisição de dado, a leitura do movimento do provete superior e do valor da força de atrito ao longo do ensaio. É possível definir as condições de aquisição e de armazenamento de dados, como ainda estabelecer o arranque e paragem dos ensaios. Para auxiliar o processo de monitorização e estudo dos ensaios realizados utiliza-se um osciloscópio digital com memória. Todos os dados adquiridos são armazenados num formato compatível com a maioria dos *softwares* comerciais de processamento de dados, de maneira a simplificar a tarefa de processamento e análise de valores resultantes dos ensaios.

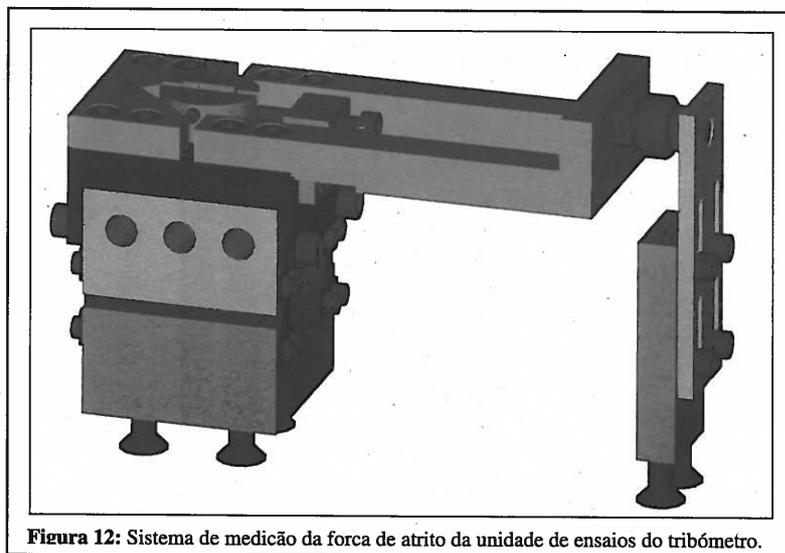


Figura 12: Sistema de medição da força de atrito da unidade de ensaios do tribómetro.

## 6. POTENCIALIDADES DO TRIBÓMETRO

O tribómetro atrás descrito, pelo facto de apresentar bastante versatilidade na realização de diferentes ensaios de *fretting*, permite um grande número de variantes de condições de ensaio.

No tribómetro desenvolvido, para além dos materiais seleccionados para os espécimes a estudar, é possível definir e regular as seguintes variáveis de ensaio:

- a força aplicada sobre o contacto;
- a amplitude de deslocamento;
- a frequência do movimento;
- a humidade do ambiente de ensaio;
- a temperatura de ensaio;
- a duração dos ensaios.

Os dados que se podem adquirir durante os ensaios são aqueles que procuram caracterizar da melhor forma possível o comportamento ao *fretting* dos pares tribológicos seleccionados. Desta forma, é possível adquirir e armazenar durante os ensaios os seguintes valores de variáveis tribológicas:

- a força de atrito no contacto;
- o deslocamento imposto ao provete superior;
- a força normal aplicada ao contacto;
- a temperatura do contacto;
- o teor em humidade na câmara de ensaio;
- a variação da resistência eléctrica do contacto.

O estudo do comportamento ao *fretting* de diversos pares tribológicos deve ser complementado com um estudo de caracterização dos materiais antes e após os ensaios, sendo de destacar:

- o estudo das tensões e das dimensões dos contactos;
- o estudo por perfilometria das superfícies;
- a análise por microscopia óptica e por microscopia electrónica de varrimento da morfologia das superfícies de contacto;

- o estudo das partículas de desgaste resultantes dos ensaios.

Com base nestes valores, bem como na análise das superfícies de desgaste e das partículas geradas, é possível realizar uma caracterização mais completa do seu comportamento ao *fretting*.

## 7. CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu desenvolver um equipamento adequado à realização de ensaios de *fretting* e criar os procedimentos de tratamento dos resultados. Assim, quanto ao equipamento desenvolvido e às ferramentas de tratamento de resultados, conclui-se que o equipamento desenvolvido revelou-se adequado à realização de estudos de *fretting*, apresentando, contudo, algumas limitações inerentes ao actuador electrodinâmico que circunscreveu a gama de trabalho a forças normais até  $\approx 50\text{N}$  com amplitudes de deslocamento até  $\approx 120\mu\text{m}$ , valores de referência para aços macios.

## REFERÊNCIAS

- [1] Guzowski, S., *Fretting Wear Expansion in Axle-Wheel Forced-In Joint of a Wheel Set*, Proceedings 6<sup>th</sup> International Congress on Tribology, (1993) 192-197.
- [2] Rudolphi, A. K., Jacobson, S., *Gross Plastic Fretting Mechanical Deterioration of Silver Coated Electrical Contacts*, Wear, 201 (1996) 244-254.
- [3] Murata, H., Imada, Y., Honda, F., Nakajima, K., *Effect of Electroplated Pd-Ni Contacts*, Wear, 162-164 (1993) 339-346.
- [4] Beard, J., *The Rational Selection of Palliatives for Avoidance of Fretting*, Tribology-Friction, Lubrication and Wear, Fifty Years On, Conference Proceedings, 1-3 July 1987 (London), Institute of Mechanical Engineers, Vol. 1, (1987) 311-319.
- [5] Bill, R. C., *Review of Factors That Influence Fretting Wear*, ASTM STP 780, American Society for Testing and Materials, (1982) 165-182.
- [6] Waterhouse, R. B., McColl, I. R., Tsujikawa, M., *Fretting Wear of Heavily*

- Work-Hardened Eutectoid Steel*, Wear, 175 (1994) 51-57.
- [7] Goto, H., Ashida, M., *Effects of Oxygen and Water Vapour Adsorption on Friction of Pure Copper During Fretting*, Proceedings 6<sup>th</sup> International Congress on Tribology, (1993) 181-186.
- [8] Attia, M. H., *A Thermally Controlled Fretting Wear Tribometer – A Step Towards Standardization of Test Equipment and Methods*, Wear, 135 (1990) 423-440.
- [9] Mohrbacher, H., Celis, J.-P., Roos, J. R., *Laboratory Testing of Displacement and Load Induced Fretting*, Tribology International, Vol. 28, 5 (1995) 269-278.
- [10] Mohrbacher, H., Blanpain, B., Celis, J.-P., Roos, J. R., *The Influence of Humidity on the Fretting Behaviour of PVD TiN Coatings*, Wear, 180 (1995) 43-52.
- [11] Huq, M.Z., Celis, J.P., *Fretting wear of multilayered (Ti,Al)N/TiN coatings in air of different relative humidity*, Wear 225-229 (1999) 53-64.
- [12] Koenen, A., Virmoux, Ph., Gras, R., Blouet, J., Dewulf, J. M., Monicault, J. M. De, *A Machine for Fretting Fatigue and Fretting Wear Testing in Cryotechnical and Normal Environment*, Wear, 197 (1996) 192-196.
- [13] Wu, P.-Q., Mohrbacher, H., Celis, J.-P., *The Fretting Behaviour of PVD TiN Coatings in Aqueous Solutions*, Wear, 201 (1996) 171-177.
- [14] Zhou, Z. R., Fayeulle, S., Vincent, L., *Cracking Behaviour of Various Aluminium Alloys During Fretting Wear*, Wear
- [15] Chandrasekaran, V., Sauer, W.L., Taylor, A.M., Hoepfner, D.W., *Evaluation of the fretting corrosion behaviour of the proximal pad taper of a modular hip design*, Wear 231 (1999) 54-64.
- [16] Leheup, E. R., Zhang, D., Moon, J. R., *The Effect of Density on Fretting Wear of Sintered Iron*, Wear, 176 (1994) 111-119.
- [17] Fouvry, S., Kapsa, Ph., Zahouani, H., Vincent, L., *Wear Analysis in Fretting of Hard Coatings Through a Dissipated Energy Concept*, Wear, 203-204 (1997) 393-403.
- [18] Carton, J.-F., Vannes, A.-B., Zambelli, G., Vincent, L., *An Investigation of the Fretting Behaviour of Low Friction Coatings on Steel*, Tribology International, Vol. 29, 6 (1996) 445-455.
- [19] Witt, E de, Blanpain, B., Froyen, L., Celis, J.-P., *The Tribochemical Behaviour of TiN-Coatings During Fretting Wear*, Wear, 217 (1998) 215-224.
- [20] Sandstrom, P. W., Sridharan, K., Conrad, J. R., *A Machine for Fretting Wear Testing of Plasma Surface Modified Materials*, Wear, 166 (1993) 163-168.
- [21] Stachowiak, G. B., Stachowiak, G. W., *Fretting Wear and Friction of Engineering Ceramics*, Wear, 190 (1995) 212-218.
- [22] Campbell, P. Q., Celis, J. P., Roos, J. R., Van Der Biest, O., *Fretting Wear of Selected Ceramics and Cermets*, Wear, 174 (1994) 47-56.
- [23] Okado, J., Shima, M., McColl, I.R., Waterhouse, R.B., Hasegawa, T., Kasaya, M., *Ni-P and Mo: an excellent fretting wear resistant combination*, Wear 225-229, (1999) 749-756.
- [24] Vizintin, J., Ives, L. K., Vodopivec, F., *The Effect of Slip Amplitude on Fretting in Metal-Metal Contact*, Proceedings 6<sup>th</sup> International Congress on Tribology, (1993) 198-203.
- [25] Benham, T. J., Leheup, E. R., Moon, J. R., *The Effect of Debris Chemistry on the Debris Formation and Fretting Behaviour of Mild Steel in CO<sub>2</sub> Coating Oxygen and Water Vapour*, Wear, 177 (1994) 195-202.
- [26] Vingsbo, O., Schön, J., *Gross Slip Criteria in Fretting*, 162-164 (1993) 347-356.
- [27] Yan, P., *The Effect of Number of Cycles on the Critical Transition Boundary Between Fretting Fatigue and Fretting Wear*, Wear, 160 (1993) 279-289.
- [28] Rudolphi, A. K., Jacobson, S., *Gross Plastic Fretting – Examination of the Gross Weld Regime*, Wear, 201 (1996) 255-264.
- [29] Neyman, A., Olzewski, O., *Research on Fretting Wear Dependence of Hardness Ratio and Friction Coefficient of Fretted Couple*, Wear, 162-164 (1993) 939-943.
- [30] Vingsbo, O., Söderberg, S., *On Fretting Maps*, Wear, 126 (1988) 131-147.