

ESTUDO DO ATRITO LIMITE ENTRE MATERIAIS EM SITUAÇÃO DE RODAGEM

I.Nogueira*, A. Morão Dias**, R. Gras***, R. Progni***

* Professora Adjunta do Dep. Engenharia Química Industrial, IPT, Tomar - Portugal

** Professor Associado do Dep. Engenharia Mecânica, FCTUC, Coimbra - Portugal

*** Professeurs des Universités, ISMCM-CESTI, ? - França

RESUMO

Verifica-se que, em grande número de componentes mecânicos de guiamento ou de transmissão, a maior parte do desgaste produz-se no decorrer de fases transitórias (rodagem, arranque e paragem e sobrecargas ocasionais) durante as quais as superfícies fortemente solicitadas funcionam em regime de lubrificação mista ou mesmo limite.

Os ensaios, ao simularem um período de rodagem mostraram, por um lado, alteração significativa na topografia das superfícies e, por outro que o valor do coeficiente de atrito para um par de materiais em contacto era função dum parâmetro hidrodinâmico (S_E) que inclui a contribuição do estado da superfície.

1. INTRODUÇÃO

A rodagem é o período inicial de funcionamento de componentes mecânicos móveis em contacto pela primeira vez. As novas superfícies vão sofrer mais acentuadamente o efeito do atrito e do desgaste até se atingir uma fase de estabilidade onde o coeficiente de atrito e a rugosidade da superfície são menores.

Pawlus (1994) defende que o desgaste durante a rodagem depende tanto da altura da rugosidade como da forma do perfil da distribuição da rugosidade. Roy Chowdhury et al. (1979) afirma que, do ponto de vista dos parâmetros topográficos, é útil examinar o processo de rodagem em termos de remoção gradual dos picos pelo processo de desgaste e preenchimento de vales da superfície pelas partículas originárias do desgaste dos picos. Estas alterações trazem

um aumento aparente da área de contacto e melhor conformidade das superfícies. O polimento da superfície durante a rodagem é devido à deformação plástica local e pela abrasão, sendo esta última a principal responsável pela perda do material. Kragelsky et al. (1982) afirmam que em situação de rodagem, o fenómeno predominante nas superfícies em contacto é o da alteração da sua rugosidade, através duma rápida deformação plástica, até se obter um perfil que confira maior estabilidade ao filme de óleo, sendo este fenómeno mais acentuado do que a perda de massa do material.

Nos estudos aplicados aos diversos regimes de lubrificação Ghasripor (1996) afirma que a rugosidade da superfície e a espessura mínima do filme lubrificante são factores determinantes na descontinuidade

deste último. Andersson et al. (1996) observou que as superfícies testadas em meio lubrificado, durante a rodagem se tornavam polidas e que o regime de lubrificação passava para um regime totalmente hidrodinâmico após um pequeno período de tempo.

A curva resultante da variação do coeficiente de atrito em função das variáveis operacionais e que mostra os regimes de lubrificação: limite, misto e hidrodinâmico é a chamada curva de Stribeck, figura 1, que segundo Bozet (1994) descreve perfeitamente um ensaio de atrito. Na curva de Stribeck, o coeficiente de atrito é controlado por um só parâmetro que se traduz no produto da velocidade pela viscosidade do lubrificante a dividir pela pressão na superfície.

Parâmetro hidrodinâmico de Stribeck, $S = \eta \frac{v}{p}$ (1)

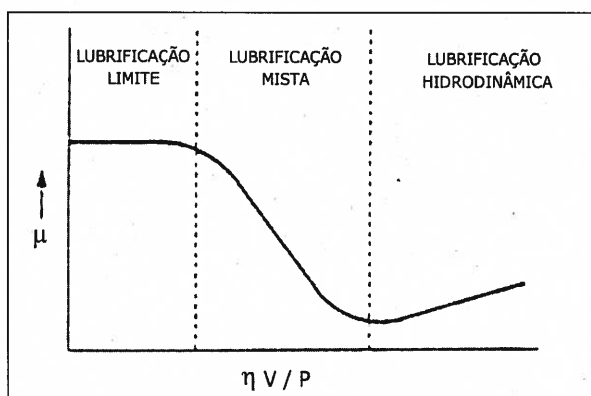


Fig. 1. A curva de Stribeck

O regime de lubrificação da parte mais à esquerda da curva de Stribeck é chamado lubrificação limite, aí as superfícies sólidas estão muito próximas verificando-se um contacto apreciável entre as asperezas, sendo insignificantes os efeitos hidrodinâmicos e as influências das propriedades reológicas dos lubrificantes.

De modo a introduzir a contribuição do estado da superfície no parâmetro hidrodinâmico Emmens (1988) estudou a influência da rugosidade das superfícies sobre o atrito em meio lubrificado. Emmens desenvolveu uma modelização geométrica para o atrito, considerando diferentes estados de superfície, onde mostra que este

é função do quadrado da rugosidade, utilizando o parâmetro R_p que é a média de cinco alturas máximas do perfil acima da linha média. O novo parâmetro hidrodinâmico é descrito por:

$$S_E = \eta \frac{v}{p} \frac{1}{R_p^2} \quad (2)$$

Emmens defende que no regime de lubrificação hidrodinâmico, ou mais correctamente micro-hidrodinâmico, o atrito é governado pelo escoamento do lubrificante através da rede de microcanais construídos pela rugosidade da superfície. O lubrificante tem a função de deformar elasticamente a rugosidade das superfícies através da pressão gerada pelo escoamento do fluido, resultando uma diminuição do coeficiente de atrito como consequência da diminuição do contacto sólido entre as duas superfícies.

No seu modelo, Emmens, não consegue mostrar nenhuma diferença fundamental entre a lubrificação limite e a mista, sendo segundo ele a lubrificação limite um caso especial em que a influência do lubrificante é desprezável, mas não é nula. No caso do regime misto de lubrificação, o atrito é uma função linear dos parâmetros externos do processo.

2. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

Os ensaios consistiram em medir a evolução do coeficiente de atrito em função da velocidade de escorregamento. As condições analisadas correspondem a situações que pretendem aproximar-se o mais possível da situação de rodagem em regime de lubrificação limite e misto.

No tribómetro pino-disco utilizado, figura 2, as duas superfícies em contacto estão completamente submersas numa cuba de lubrificante a uma temperatura controlada. O contacto é do tipo plano-plano. O disco é animado de movimento de rotação uniforme sobre o seu próprio eixo. O pino é fixo no braço do tribómetro e colocado sobre o disco em movimento. Este tribómetro permite ajustar a força normal

aplicada sobre o pino, a temperatura do lubrificante e a velocidade de lubrificação, em função das variáveis: pressão, velocidade de escorregamento, viscosidade do óleo a uma dada temperatura, estado das superfícies e materiais oponentes.

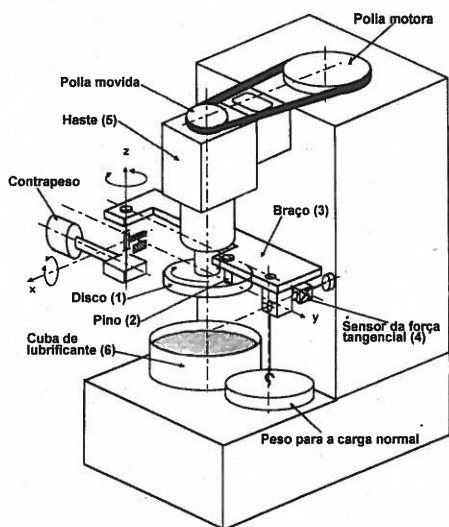


Fig.2. Tribômetro pino-disco.

Nos ensaios o material utilizado para os discos, foi o aço AFNOR 100 C6 de elevada resistência ao desgaste e à compressão, cuja dureza é de 855 Hv, os discos apresentavam bom acabamento das superfícies cuja rugosidade média, Ra, era de 0.044 μm . Devido às características apresentadas, não foi possível observar danos significativos sobre a superfície dos discos. Todo o interesse deste trabalho se concentrou sobre as superfícies do material mais macio, ou seja dos pinos de latão bifásico UZ40M3A, cuja dureza é de 155 Hv. Foram utilizados dois estados de superfície para os pinos, um mais fino e outro mais grosseiro. Estes acabamentos foram feitos no tribômetro com papel de lixa de granulometria 80 e 400. As rugosidades médias, Ra, obtidas sobre as superfícies dos pinos para os acabamentos grosseiro e fino foram respectivamente 2.047 e 0.441 μm .

O lubrificante utilizado foi o óleo de base mineral parafínica, sem aditivos de índice de viscosidade 100, sendo utilizado durante os ensaios à temperatura de 20 °C.

Desenvolveram-se dois tipos de ensaios: primeiro foram realizados ensaios a velocidade variável que permitiram registrar num fricciograma a variação do coeficiente de atrito, fixando uma determinada pressão e temperatura do óleo, quando a velocidade variava de um valor máximo para um valor mínimo e depois sem parar novamente até um valor máximo, figura 3. Com os coeficientes de atrito obtidos em cada patamar de velocidade foram construídos gráficos que permitiram, para o lubrificante considerado, analisar a influência da rugosidade da superfície dos pinos, da velocidade de escorregamento e da pressão normal sobre a evolução do coeficiente de atrito.

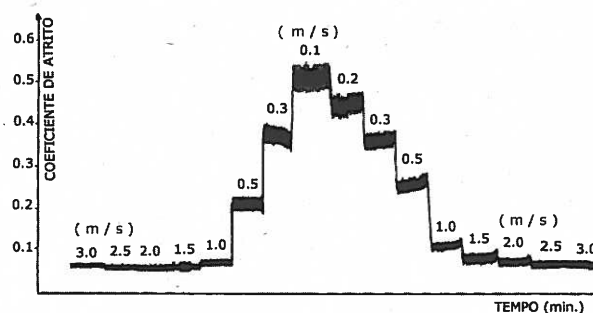


Fig.3. Fricciograma obtido durante um ensaio a velocidade variável.

O outro tipo de ensaios no tribômetro foi realizado a velocidade constante. Foram seleccionados dos ensaios a velocidade variável na região dos gráficos onde o regime de lubrificação limite e misto dominam três valores de velocidade. A distância percorrida foi a mesma em todos os ensaios para o mesmo estado inicial da superfície. A pressão, a temperatura do óleo e os materiais oponentes mantiveram-se constantes.

O interesse deste tipo de ensaio foi o de posteriormente analisar a influência do regime de lubrificação mista e limite sobre a alteração morfológica das superfícies dos pinos. Nestes ensaios também foram confirmados os valores dos coeficientes de atrito obtidos nos ensaios a velocidade variável.

Os pinos ensaiados a velocidade constante foram observados através de

diversas técnicas de análise como a microscopia óptica, MEV, perfilometria e EDAX que permitiram conhecer e aprofundar alguns aspectos relativos à alteração das superfícies ensaiadas.

Neste trabalho a ocorrência de desgaste na superfície dos pinos de latão não é predominante. A baixa gama de pressões utilizadas nos ensaios (5 e 10 MPa), a curta duração dos ensaios, bem como o facto das amostras estarem totalmente imersas em óleo e a elevada dureza associada ao bom acabamento dos discos em aço não favoreceram a quantificação expressiva do desgaste através da perda de massa do material mais macio. Deste modo apenas se pôde fazer uma apreciação visual da superfície do pino, e da pista do disco, por perfilometria e microscopia.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dos gráficos obtidos nos ensaios a velocidade variável verificou-se o seguinte:

- Grande influência da variação da velocidade de escorregamento sobre o coeficiente de atrito. A figura 4, a título de exemplo para os pinos de menor rugosidade, mostra as curvas de dois ensaios completos a partir dos valores obtidos nos fricciogramas respectivos. Esta figura mostra, tal como era previsto, que a baixas velocidades o coeficiente de atrito é mais elevado, diminuindo com o aumento da velocidade de escorregamento, ou seja

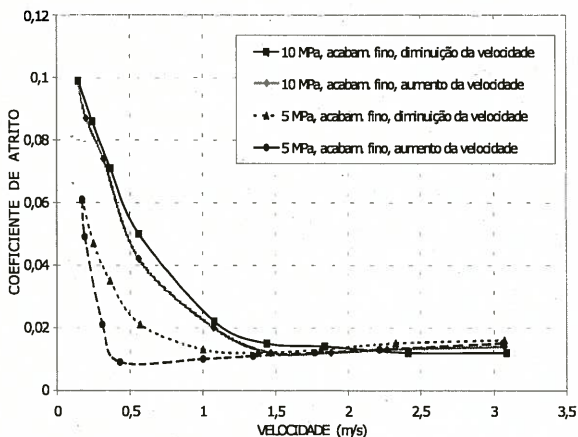


Fig. 4. Variação do coeficiente de atrito vs. velocidade de escorregamento. Ensaio completo. Pino com acabamento a papel de lixa 400.

com a entrada no regime micro-hidrodinâmico.

- A mesma figura mostra que tanto a 5 MPa como a 10 MPa, na primeira parte do ensaio a velocidade decrescente, o coeficiente de atrito obtido em cada patamar era ligeiramente mais elevado em relação aos obtidos na segunda parte do ensaio a velocidade crescente, isto é devido à adaptação da superfície ao contacto durante a primeira parte do ensaio, com a resultante diminuição da rugosidade.

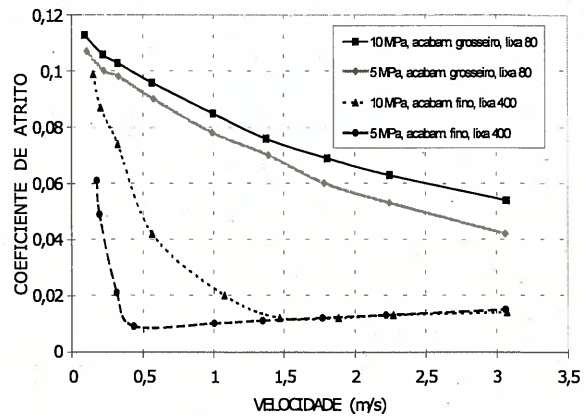


Fig. 5. Variação do coeficiente de atrito vs. velocidade de escoamento. Parte do ensaio de regresso à velocidade máxima.

- Observa-se também que à mesma velocidade mas a pressões mais elevadas obtêm-se maiores coeficientes de atrito.

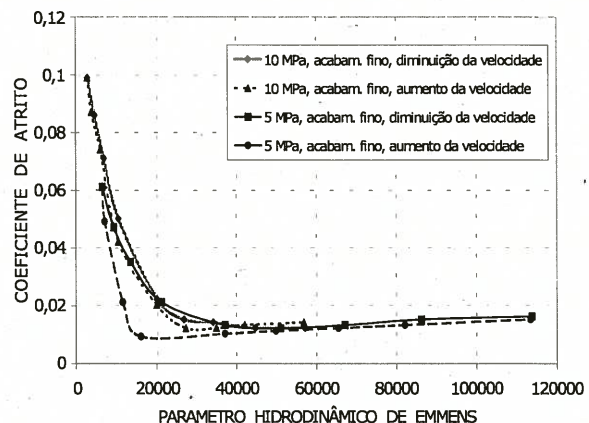


Fig. 6. Variação do coeficiente de atrito vs. S_E . Parte do ensaio de regresso à velocidade máxima.

- Para estados de superfície mais finos parece não ter significado a variação da pressão sobre a variação do coeficiente de atrito na região do gráfico onde domina o regime de lubrificação micro-hidrodinâmica, figura 5. A explicação para este

facto pode estar na pressão do fluido gerado pelo escoamento deste através dos microcanais de lubrificação. Como o lubrificante é uma fonte menor de atrito, a pressão gerada pelo escoamento irá diminuir o atrito através do alívio da carga sobre os picos de rugosidade.

- Foi possível confirmar como o acabamento superficial é importante nos resultados do coeficiente de atrito. A figura anteriormente referida constata este facto.

- Para acabamentos mais grosseiros obteve-se uma transição de regime de lubrificação misto para hidrodinâmico mais suave. Ao contrário, quando se tem superfícies com menor rugosidade essa transição é mais acentuada, figura 5. A explicação para este facto poderá dever-se à lubrificação hidrodinâmica se fazer sentir através do escoamento do lubrificante pelos microcanais existentes na superfície rugosa, sendo a contribuição do contacto sólido no coeficiente de atrito misto no caso das superfícies que apresentam maior valor de rugosidade mais influente, deste modo têm-se uma maior extensão da região mista de lubrificação, resultando uma transição mista-hidrodinâmica mais suave.

Ao aplicar-se o parâmetro hidrodinâmico modificado por Emmens, foi utilizada nesta primeira fase a rugosidade média da superfície R_a . Neste trabalho foi possível confirmar algumas conclusões citadas por Emmens, no seu estudo sobre a influência da rugosidade da superfície sobre o atrito, para os sistemas lubrificados, tais como:

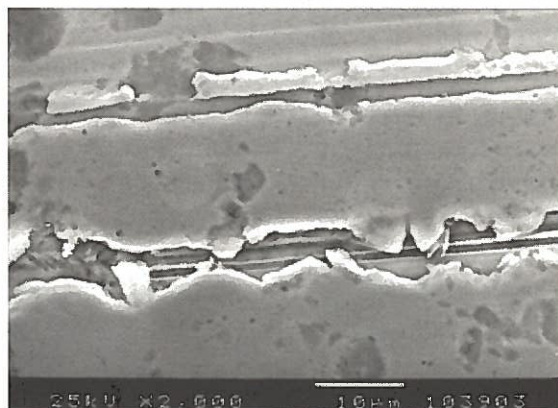
- Confirmou-se pelos gráficos obtidos que para a região onde domina os regimes de lubrificação limite e mista, o coeficiente de atrito é função linear do parâmetro hidrodinâmico.

- As curvas da variação do coeficiente de atrito em função do parâmetro hidrodinâmico verificaram para cada estado de superfície dos pinos a tendência para uma curva única, como é mostrado na figura 5, a título exemplificativo, para o caso da superfície com acabamento mais fino. Esta convergência das curvas,

utilizando o parâmetro S_E para um mesmo estado de superfície, permite por um lado caracterizar o sistema tribológico e por outro lado confirmar a equivalência dos fenómenos tribológicos subjacentes, ou seja os fenómenos ocorridos sobre as superfícies são os mesmos qualquer que seja a pressão média de contacto.

Das diversas técnicas de análise da superfície dos pinos utilizados nos ensaios realizados a velocidade constante obteve-se a seguinte informação:

- A microscopia óptica permitiu analisar globalmente e em termos comparativos as superfícies ensaiadas. Os esforços normal e tangencial que actuam na superfície do pino produziram em todas as amostras uma região polida e esta é tanto maior quanto mais baixa for a velocidade de escorregamento ou seja quanto maior for o coeficiente de atrito, isto para a mesma distância percorrida para cada acabamento superficial do pino.



velocidade de escorregamento

Fig. 7. Deformação plástica sobre o acabamento superficial.

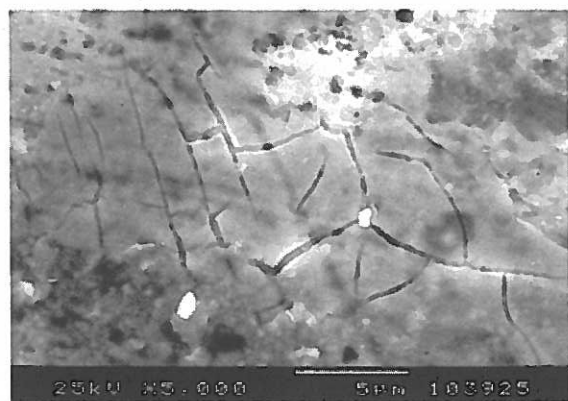
- Da topografia da superfície de cada pino obtida por perfilometria verificou-se que a zona polida da superfície do pino apresentava-se comprimida estando por isso as cristas das riscas de acabamento ligeiramente mais baixas na zona polida. A topografia das superfícies também permitiu garantir que estes ensaios foram realizados no domínio do regime de lubrificação limite e mista, pois foi observado que a zona

polida ainda apresentava riscas de acabamento.

- A microscopia electrónica de varrimento, MEV, permitiu observar a deformação plástica que ocorreu na zona polida da superfície dos pinos. Nesta zona foram detectadas descontinuidades que normalmente ocorrem nas superfícies sujeitas a processos de contacto, tais como:

- o achatamento das riscas, a figura 7 mostra uma microfotografia da superfície do pino na região polida, simulando esta zona deformada um filme descontínuo muito fino.

- o fissuramento da superfície de contacto do pino, a figura 8 mostra uma microfotografia da superfície polida do pino observando-se um fissuramento tipo "faiançage", resultante do forte gradiente de temperatura local na superfície do pino, e posterior arrefecimento, resultando a criação dum estado biaxial de tensões. O fissuramento é mais facilmente encontrado nos pinos ensaiados a velocidade mais lenta, onde o coeficiente de atrito é mais elevado, pois a componente sólida do regime de lubrificação mista é maior. No caso dos pinos de acabamento fino as fissuras são muito mais pequenas e subtis.



→
velocidade de escorregamento

Fig. 8. Fissuras na região polida da superfície do pino.

Não foi detectado por difracção de raios X nenhum elemento de ferro sobre a superfície do pino de latão.

Relativamente ao desgaste pelas razões anteriormente referidas, este não é predominante em relação à deformação plástica ocorrida.

4. CONCLUSÕES

Sendo o interesse deste trabalho por um lado localizar e quantificar o regime de atrito limite em situação de rodagem para os diferentes casos analisados e, por outro lado, analisar as alterações na topografia das superfícies sujeitas a processos de contacto após uma situação de rodagem foram retidas as seguintes conclusões:

- Verificou-se como as variáveis operacionais velocidade de escorregamento, pressão normal, viscosidade do lubrificante e rugosidade da superfície influenciam o valor do coeficiente de atrito, no entanto quando agrupadas num só parâmetro, S_E , o coeficiente de atrito é então, apenas, função do parâmetro hidrodinâmico de Emmens. Esta curva única permite confirmar a equivalência dos fenómenos tribológicos ocorridos para um par de materiais.

- Identificou-se nos nossos resultados a existência de três regiões de lubrificação distintas, indicadas na curva de Stribeck: limite, mista e hidrodinâmica.

- Confirmou-se como durante a fase inicial do escorregamento entre duas superfícies o coeficiente de atrito é do tipo misto cuja expressão matemática é o somatório de dois termos um ligado ao atrito viscoso e outro ligado ao atrito sólido.

- Mesmo numa fase inicial as superfícies alteram significativamente os seus perfis dando origem a um polimento das asperezas por deformação plástica. Existindo uma forte contribuição no contacto sólido entre as asperezas da superfície rugosa do latão e a superfície plana do disco de aço. Quando predomina o atrito governado pelo escoamento do lubrificante através dos microcanais da superfície rugosa, então a componente viscosa do atrito é dominante, existindo uma diminuição do valor do coeficiente de

atrito e a tendência para um regime de lubrificação micro-hidrodinâmica.

-Não se verificou experimentalmente nenhuma diferença fundamental entre a lubrificação limite e a mista, sendo a lubrificação limite um caso em que a influência do lubrificante é negligenciada, mas não é zero.

-As curvas da variação do coeficiente de atrito em função do parâmetro hidrodinâmico de Emmens permitiram confirmar a equivalência dos fenômenos tribológicos ocorridos durante os ensaios para um par de materiais, independentemente da variação das outras variáveis operacionais.

-As microfotografias efectuadas sobre as superfícies dos pinos evidenciaram a deformação plástica sobre as asperezas bem como o aparecimento de algum fissuramento para as condições de lubrificação ensaiadas.

5. REFERÊNCIAS

Pawlus, P., "A Study on the Functional Properties of Honed Cylinders Surface During Running-in", *Wear*, 176, pp. 247-254, 1994.

Roy Chowdhury, S. K., Kaliszer, H., Rowe, G. W., "An Analysis of Changes in Surface Topography During Running-in of Plain Bearings", *Wear*, 57, pp. 331-343, 1979.

Kragelsky, I.V., Dobychin, M. N., Kombatov, V.S., *Friction & Wear, Calculation Methods*, Oxford, Pergamon Press Ltd, 1982.

Ghasripoor, F., "Friction controlled materials wear testing and selection under starved lubrication", *Wear*, 196, pp. 207-213, 1996.

Andersson, P., Juhanko J., Nikkilä, A.-P., Lintula, P., "Influence of topography on the running-in of water-lubricated silicon carbide journal bearings", *Wear*, 201, pp. 1-9, 1996.

Bozet, J., "Fonctionnement limite de coussinets de paliers lisses, courbe de Stribeck et variable de Leloup", *Journée 1994 de la société tribologique de France, Liège*, pp. 3-4, 1994.

Emmens, W.C., "The influence of surface roughness on friction", *Controlling sheet metal forming processes, Michigan*, pp. 63-70, 1988.

Rowe, G. W., Kaliszer, H., Trmal G., and Cotter, A., "Running-in of plain bearings", *Wear*, 34, pp. 1-14, 1975.

