

# DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO EM ALTAS TEMPERATURAS POR MEIO DE ENSAIO DE DESLIZAMENTO

## Mariana Casarini

Universidade de São Paulo. Av. Melo Moraes, 2231 Cidade Universitária 05508-900, São Paulo, (SP), Brasil. Tel: 30919865, Fax: 38142424.

E-mail: [mariana.casarini@poli.usp.br](mailto:mariana.casarini@poli.usp.br)

## Leonardo Villabón Ramos

Universidade de São Paulo. Av. Melo Moraes, 2231 Cidade Universitária 05508-900, São Paulo, (SP), Brasil. Tel: 30919865, Fax: 38142424.

E-mail: [villabon@usp.br](mailto:villabon@usp.br)

## Amilton Sinatora

Universidade de São Paulo. Av. Melo Moraes, 2231 Cidade Universitária 05508-900, São Paulo, (SP), Brasil. tel: 30919855, fax: 38142424.

E-mail: [sinatora@usp.br](mailto:sinatora@usp.br)

**Resumo.** *O coeficiente de atrito tem grande influência sobre o processo de conformação mecânica de forjamento e até o presente momento há poucos ensaios que foram realizados em altas temperaturas. Este trabalho teve o intuito de desenvolver um ensaio e determinar o coeficiente de atrito estático entre duas superfícies metálicas mediante ensaios de deslizamento. O estudo destes aspectos básicos ainda sem considerar a deformação plástica do material é a parte inicial de uma abordagem sistemática da tribologia no processo de forjamento a quente. Ele foi realizado devido a grande lacuna de dados e análises sobre atrito em alta temperatura, especialmente sobre atrito estático.*

*Os ensaios foram realizados nas temperaturas ambiente, 750 °C e 1100 °C, com aço AISI 1045 e aço AISI H13. Verificou-se que o coeficiente de atrito nas temperaturas ambiente, 750 °C e 1100 °C foi de:  $0,25 \pm 0,01$ ;  $0,84 \pm 0,16$  e  $0,77 \pm 0,09$ , respectivamente. Associou-se a elevação do coeficiente de atrito estático ao aumento da espessura de carepa. Nos ensaios a temperatura ambiente variou-se a carga entre 7,6 e 14,6 N (ainda dentro do regime elástico macroscópico) não se verificando variação significativa no coeficiente de atrito. A análise estatística dos dados mostrou que o emprego de um equipamento simples permite a obtenção de dados reprodutíveis sofrendo, entretanto de limitações que requerem seu aperfeiçoamento.*

**Palavras chaves:** *Forjamento, atrito estático, tribologia, carepa, altas temperaturas.*

## Nomenclatura

$F_T$ : força tangencial;

N: força normal;

$\mu_{estático}$ : coeficiente de atrito estático;

$\mu_{cinético}$ : coeficiente de atrito cinético

## 1. Introdução

O forjamento é um importante processo de fabricação industrial<sup>[1]</sup> que pode ser classificado de acordo com a temperatura em que é realizado. Segundo esta classificação o processo pode ser feito

“a frio”, ou seja, a temperatura ambiente ou “a quente”. O trabalho a quente resulta na diminuição da energia necessária para deformar o metal resulta no aumento da tenacidade e da ductilidade do material<sup>[2]</sup>.

A máxima temperatura de forjamento deve ser menor que aquela em que pode ocorrer fusão incipiente ou aceleração da oxidação e a mínima corresponde a aquela cuja taxa de recristalização é rápida o suficiente para remover o efeito de encruamento devido à deformação plástica<sup>[1]</sup>. Este processo de deformação é composto basicamente por duas etapas de conformação mecânica: o recalque seguido do estiramento. A primeira etapa destaca-se pelo alto grau de deformação do material, preparando-o para o estiramento.

No forjamento parcela da energia mecânica que não é empregada na deformação do material serve para compensar os efeitos do atrito entre a peça e a ferramenta de trabalho. Este atrito se relaciona com o desgaste da ferramenta que altera as condições de fabricação devido às modificações dimensionais da ferramenta e conseqüentemente da peça fabricada, relaciona-se ainda com o surgimento e propagação de defeitos no material ou com o gasto excessivo de energia. O processo de forjamento a quente ocasiona alterações das propriedades mecânicas, aumento da taxa de oxidação, e eventuais transformações de fase do material, influenciando, desta forma, o comportamento do atrito<sup>[1]</sup>.

Há casos em que esta camada de óxido, comumente designada como carepa é vista como um bom lubrificante<sup>[3]</sup>, diminuindo o atrito na interface metal-metal, mas em outros casos esta camada pode aumentar o atrito entre as superfícies. Porém sabe-se devido às experiências do cotidiano, que a carepa é prejudicial à vida da ferramenta. O desgaste da ferramenta ocorre basicamente quando esta entra em contato com a peça quente e pedaços de carepa encontrados na superfície estilhaçam-se e atingem a ferramenta, onde resfriam e endurecem ao aumento do atrito entre as superfícies<sup>[4]</sup>. Sendo assim se faz necessário um trabalho sistemático para a determinação do coeficiente de atrito entre a peça e a ferramenta em condições que permitam a análise do papel da carepa. Neste artigo apresentam-se os primeiros resultados sobre o estudo do atrito estático entre um aço para matriz de forjamento e um aço carbono.

## 2. Objetivos

Determinar o coeficiente de atrito entre a peça de aço ao carbono e a ferramenta de aço para matriz de forjamento em condições que permitam a análise do papel da carepa.

## 3. Materiais e métodos

### 3.1. Materiais

Foram usinados 24 corpos-de-prova de aço ferramenta AISI H13 e aço carbono AISI 1045 com 100 mm de comprimento e largura e 10 mm de espessura. Nos corpos-de-prova de aço H13 foram usinados furos para a colocação de ganchos de modo a permitir que estas placas pudessem ser deslocadas em relação às de aço 1045 como mostrado na Figura 1. A massa média dos corpos-de-prova era de 783,34 g e 789,19 g para o aço H13 e o aço 1045 respectivamente.



Figura 1- Corpos-de-prova

A superfície dos corpos-de-prova foi retificada determinando-se suas rugosidades, composições química, durezas e microestrutura. Para a determinação de rugosidade empregou-se o rugosímetro Surfscorder SE 1700α. As medições foram feitas no sentido longitudinal dos corpos-de-prova, ou seja, no mesmo sentido do deslizamento relativo das peças.

Os parâmetros empregados nas medidas foram: filtro Gauss (ASME), com longitude de 4 mm e Cutoff Lc de 0.8 mm, obtendo-se os valores  $0,764 \pm 0,104$  para o Aço 1045 e  $0,343 \pm 0,142$  para o H13, média de três determinações.

A composição química dos materiais foi determinada por fluorescência de raios X como segue na Tabela 1:

Tabela 1- Composição química, em porcentagem de peso.

Material	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Fe
1045	0,508	0,245	0,757	nd	nd	nd	nd	nd	98,26
H13	0,402	1,032	0,320	5,708	0,294	0,114	1,310	0,8262	89,74

A dureza Vickers 30Kg foi média de 7 determinações obtendo-se para o AISI H13  $208 \pm 6$  e para o AISI 1045;  $169 \pm 7$  HV. Nesta etapa inicial o aço AISI H13 foi empregado recozido pois os esforços que serão empregados são muito baixos e para se levantar os dados que permitam comparação com outras microestruturas que serão estudadas em outras etapas.

Para análise metalográfica as amostras sofreram preparação metalográfica convencional. O aço AISI 1045 apresentou estrutura perlítico ferrítica enquanto o aço AISI H13 apresentou carbonetos esferoidizados sobre um fundo de ferrita.

### 3.2. Aparato e metodologia experimental

Na Figura 2, mostra-se o dispositivo que foi construído e permitia a inserção das amostras em um forno. A montagem do equipamento foi feita da seguinte forma:

- Um furo passante foi usinado na porta do forno.
- Um arame foi preso ao corpo-de-prova usinado através de um pino fixado por rosca no mesmo.
- Um rolamento foi acoplado a um eixo usinado sobre o qual corre o arame.
- Um suporte foi fixado na outra extremidade do arame com o intuito de armazenar areia.

Realizaram-se ensaios a temperatura ambiente para aferição do equipamento e análise das dificuldades experimentais. As demais temperaturas de ensaio foram de  $750^{\circ}\text{C}$  e  $1100^{\circ}\text{C}$ , de modo a se estimar o coeficiente de atrito estático entre temperaturas usuais de forjamento. Para a obtenção destas temperaturas utilizou-se um forno da Brasimet K-1300 tipo mufla com atmosfera ambiente, permitindo a formação de carepa e taxa de aquecimento igual a  $8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

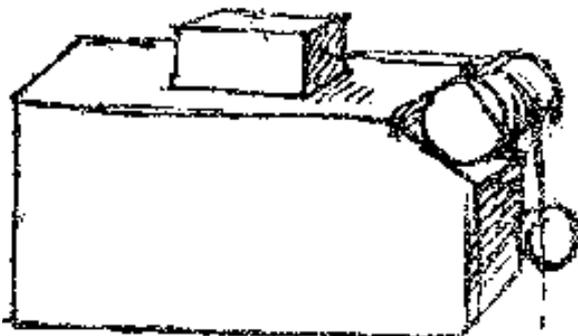


Figura 2- Modelo de Leonardo da Vinci e aparato experimental

Os ensaios foram feitos no Laboratório de Fenômenos de Superfície do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP.

O procedimento empregado foi:

- limpeza das amostras com álcool e secagem em jato de ar quente
- colocação da amostra de 1045 no forno
- nivelamento das amostras com nível de bolha
- aquecimento até a temperatura desejada,
- estabilização da temperatura por uma hora
- corpo-de-prova de aço ferramenta H13 sobre o corpo de aço 1045
- grãos de areia foram despejados no recipiente até início do movimento
- pesagem da areia determinando-se  $F_T$ .
- determinação do coeficiente foi feita pela equação  $m_{estático} = \frac{F_T}{N}$  resultado de no mínimo três determinações
- recolocava-se a amostra de 1045 no forno, aguardava-se  $\pm 8$  min, para que a temperatura de ensaio fosse alcançada novamente e repetia-se o procedimento mais duas vezes.

Os óxidos formados foram observados por microscopia óptica e eletrônica de varredura. O filme de óxido teve sua espessura medida em microscópio óptico sem ataque química ou qualquer preparo da superfície, a fim de não alterar física ou quimicamente a camada de óxidos. A análise da camada de óxidos foi feita por difração de raios X.

## 4. Resultados

Efetua-se inicialmente uma análise da sensibilidade do equipamento, seguindo-se uma análise do coeficiente de atrito à temperatura ambiente, realizado com o objetivo de testar o procedimento de ensaio e por fim apresentam-se os resultados nas temperaturas de 750 °C e 1100 °C.

### 4.1. Sensibilidade do equipamento

As massas do recipiente para armazenar a areia e a do fio que une a massa ao corpo-de-prova são de 73,17 g e 2,12 g, respectivamente. A força de atrito atribuída ao rolamento é desprezível, portanto a  $F_t$  mínima é de 0,742 N. A massa do bloco é de 783,34 g, ou seja a força normal é de 7,72 N. Esta análise do equipamento indica que o menor coeficiente de atrito que pode ser determinado é de 0,096 obtido com o emprego da Equação  $m_{estático} = \frac{F_T}{N}$ .

### 4.2. Ensaios em temperatura ambiente

Para analisar a relação do coeficiente de atrito estático com a força normal aplicada, diversas massas foram postas em cima da amostra de H13 obtendo-se os dados da Figura 3.

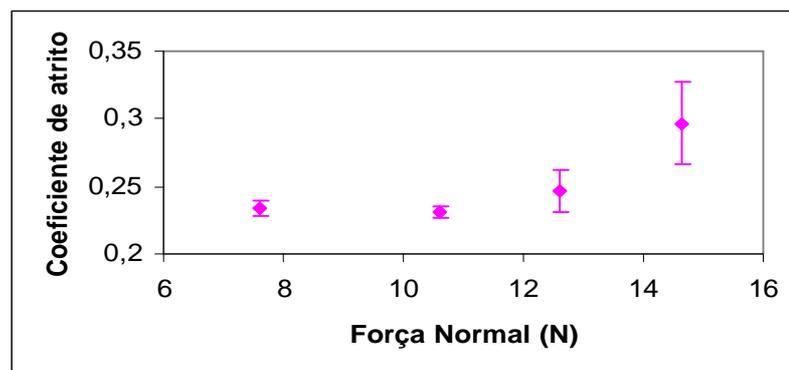


Figura 3- Coeficiente de atrito, desvio padrão, em relação à força normal em temperatura ambiente. Aço H13 contra Aço 1045

Os valores médios dos coeficientes de atrito mantiveram-se constantes para forças entre 7,59 N e 10,59 N, elevando-se progressivamente para cargas crescentes. Entretanto a comparação estatística empregando-se a análise de variância entre as médias obtidas mostrou que para um nível de significância de 1 % os valores dos coeficientes de atrito são iguais e a média é de  $0,25 \pm 0,01$ .

Nota-se ainda que a dispersão dos resultados, tanto o desvio padrão quanto o coeficiente de variação apresentaram um comportamento semelhante ao do valor médio do coeficiente de atrito ampliando-se com a elevação das cargas normais.

Na Tabela 2, mostram-se os coeficientes de atrito estático e cinético para diversos pares de materiais e condições de ensaio.

Tabela 2- Dados adaptados do ASM Metals Handbook volume 18<sup>[3]</sup>

Pares de materiais	$\mu_{\text{Estático}}$	$\mu_{\text{Cinético}}$	Referência e condições de ensaio
Fe – Co	0,41	-	Prato com prato com 50 % de umidade relativa. (5)
Fe – Fe	0,51	-	Prato com prato com 50 % de umidade relativa. (5)
Aço 1032 – Cu	0,32	0,25	Teste de stick-slip 1,96 N de carregamento, 54 % de umidade relativa, média de cinco testes. (6)
Aço 1032 – Aço 1032	0,31	0,23	Teste de stick-slip 1,96 N de carregamento, 54 % de umidade relativa, média de cinco testes. (6)
Aço 304 (baixo carbono) Cu	0,23	0,21	Teste de stick-slip 1,96 N de carregamento, 54 % de umidade relativa, média de cinco testes. (6)

Verifica-se que os dados são apresentados sem menção ou análise da camada de óxido. Embora não sejam dados para o par aço-ferramenta/aço-para-conformação os resultados determinados neste trabalho estão entre os resultados 0,32 e 0,23, obtidos com cargas semelhantes às deste trabalho.

Diante da limitação dos dados da literatura a discussão dos resultados restringe-se mais fortemente a análise crítica do experimento. As variações do coeficiente de atrito podem ser atribuídas a:

- Imprecisão na estimativa de início do movimento feita visualmente.
- Limpeza inadequada de gorduras ou óleos, feita sem o emprego de desengraxantes industriais, por exemplo.
- Limpeza inadequada de partículas de poeira.
- Controle inadequado umidade no local do experimento.
- Controle inadequado da topografia, rugosidade, erros de forma.
- Imprecisão no nivelamento das amostras.
- Deformação plástica das asperezas devido à combinação de cargas crescentes com rugosidade elevada.

Em especial sobre a umidade, experimentos com cerâmicas<sup>[4]</sup>, mostraram que a variação da umidade ambiente, de 26,8 %, 48 % e 76,3 % leva a grandes variações do coeficiente de atrito, sendo 0,5; 0,42 e 0,27 respectivamente. Além disso, em torno de 45 a 50 %, ocorriam grandes oscilações do coeficiente de atrito.

### 4.3. Ensaio em altas temperaturas

Para cada par de corpos-de-prova a serem ensaiados foram realizados 3 ensaios. Após ficar uma hora em temperatura patamar nas temperaturas de 750 °C ou 1100 °C realizava-se o primeiro ensaio. Reposicionavam-se as amostras, e logo depois que a temperatura do forno atingia novamente a temperatura desejada realizava-se o segundo experimento e com o mesmo procedimento o terceiro. Os resultados estão na Figura 4.

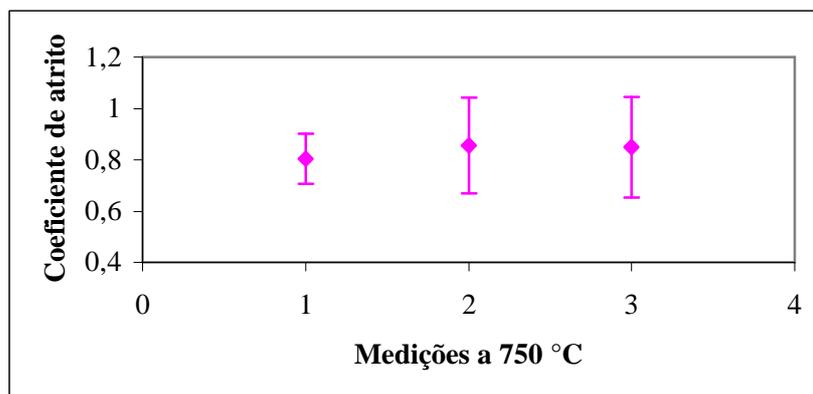


Figura 4- Variação do coeficiente de atrito de acordo com três observações feitas para cada par de corpos-de-prova a 750 °C

Observa-se que em alguns experimentos o coeficiente de atrito foi maior que a unidade, ou seja, a força tangencial foi maior que a força normal. Notou-se ainda que para a primeira medição de cada experimento o coeficiente de atrito variou de 0,70 a 0,92, ou seja, com um aumento de 31 % em relação ao menor valor. Esta variação foi de 73 % e 62 % para as segundas e terceiras medições, respectivamente.

A análise de variância mostra que para um nível de significância de 5 % as médias entre os experimentos são consideradas diferentes, porém as médias entre as medições podem ser consideradas iguais. Este resultado mostra que os experimentos apresentaram diferenças mais significativas entre si do que entre medições. Isto pode se dever às imprecisões listadas anteriormente, devido à dificuldade de posicionar e nivelar as amostras em alta temperatura. Pode-se ainda afirmar que as diferenças entre experimentos cresceram a medida em que as repetições se sucederam devido ao aumento de espessura da camada de óxido.

O valor médio do coeficiente de atrito encontrado foi de  $0,84 \pm 0,16$ , com tendência a aumento na média dos coeficientes de atrito do primeiro para o terceiro ensaio.

A Figura 5 mostra os valores do coeficiente de atrito medido a 1100 °C. Observa-se que diferentemente das determinações efetuadas a 750 °C nenhum dos valores medidos superou a unidade. Para a primeira medição de cada experimento o coeficiente de atrito variou de 0,69 a 0,88, ou seja, com um aumento de 28 % em relação ao menor valor. Esta variação foi de 29 % e 44 % para as segundas e terceiras medições, respectivamente, valores expressivamente menores do que para os experimentos realizados a 750 °C. Em ambos os casos as menores variações notaram-se nos ensaios á temperatura ambiente.

A análise de variância mostra que para um nível de significância de 5 % as médias entre os experimentos são consideradas diferentes, porém as médias entre as medições podem ser consideradas iguais. Desta maneira, a média total das medições a melhor estimativa do coeficiente de atrito em estudo.

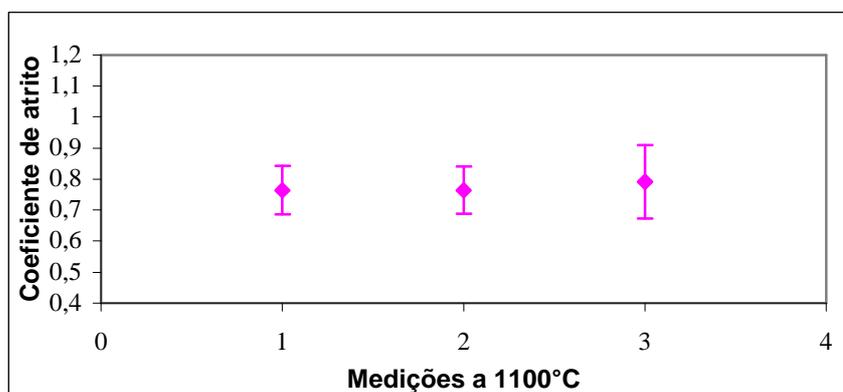


Figura 5- Variação do coeficiente de atrito com três observações para cada par de corpos-de-prova.

O valor médio do coeficiente de atrito encontrado foi de  $0,77 \pm 0,09$ , também com tendência de aumento na média dos coeficientes de atrito do primeiro para o terceiro ensaio como a  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Comparando-se os três resultados obtidos ( $\mu = 0,25 \pm 0,01$ ,  $\mu = 0,83 \pm 0,16$  e  $\mu = 0,77 \pm 0,09$ ), verifica-se que o coeficiente de atrito é significativamente menor na temperatura ambiente do que nas demais. A comparação de médias mostrou que o coeficiente de atrito não varia significativamente nos experimentos realizados a  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pode-se conjecturar que com maior número de repetições ou com as melhorias sugeridas no arranjo experimental, seria possível mostrar que atrito a  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  é maior  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

A busca bibliográfica de coeficientes de atrito estático em temperaturas elevadas não resultou em nenhuma informação semelhante a da tabela 2 revelando a escassez de resultados.

#### 4.4. Análise dos óxidos

Para análise da carepa formada durante o ensaio, algumas fotos dos corpos-de-prova foram feitas na lupa, microscópio ótico e MEV, portanto foram preparadas amostras de aço 1045 e de aço H13, embutidas a vácuo em resina para que a camada de óxido não quebrasse. Estas foram recobertas com carbono e outras com ouro, a fim de se tornarem condutoras de elétrons e possibilitarem a visualização pelo microscópio eletrônico de varredura.

##### 4.4.1. Óxidos formados no aço 1045 e aço H13

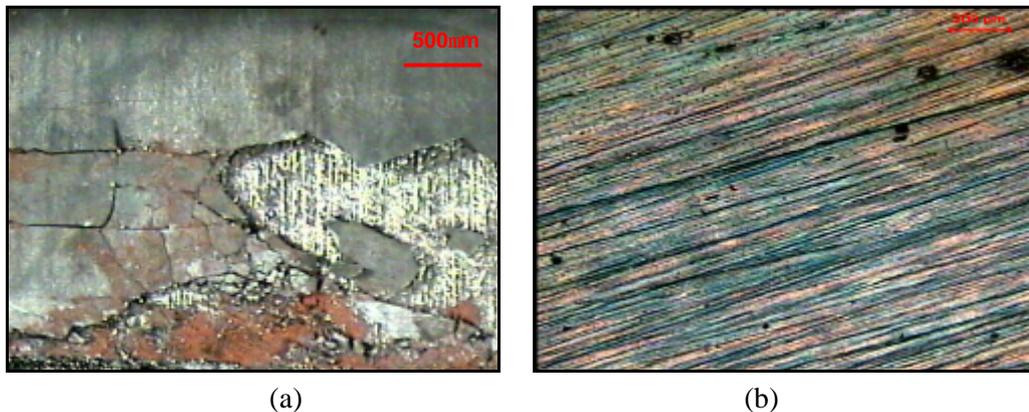


Figura 6- Carepa do aço 1045 a  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ . lupa (a); carepa do aço H13 a  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ . microscopia ótica (b)

Na Figura 6, apresenta-se o estado das superfícies após o ensaio a  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Observando-se que a superfície do aço 1045 é irregular apresentando quebra da carepa que pode ser devida à diferença entre o coeficiente de contração da carepa e do substrato ou à diferença de densidade entre carepa e substrato. A  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  o aspecto em vista superior foi semelhante. No entanto o aço H13 não se observa a mesma intensidade de oxidação, uma vez que este material ficou por pouco tempo dentro do forno e por possuir aproximadamente 5,7 % de Cr retarda a oxidação, o mesmo se observando na temperatura mais elevada.

As observações em seção transversal permitiram avaliar as espessuras das camadas de óxido. A  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$   $24,3\mu\text{m}$ ; e a  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$   $418\mu\text{m}$  Estas foram medidas em microscópio eletrônico de varredura como se vê na Figura 7.

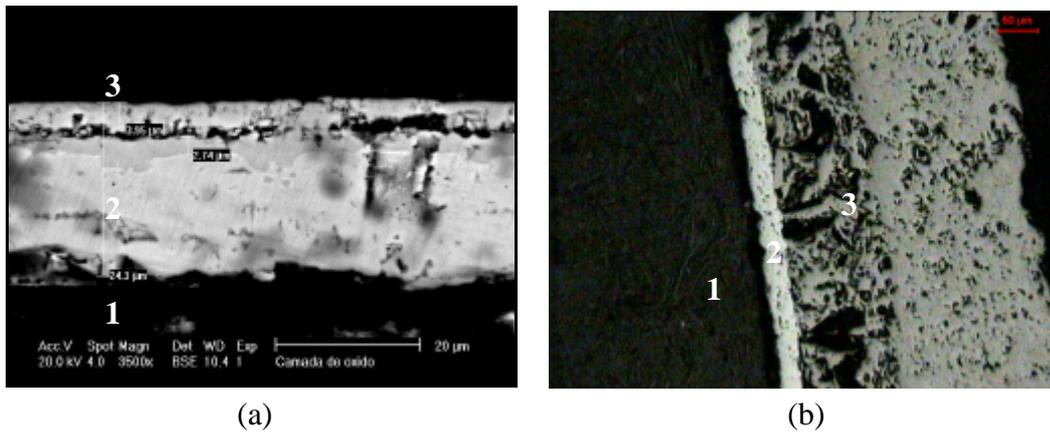


Figura 7- Amostra ensaiada a 750 °C observada em MEV – 1) Resina; 2) Óxidos; 3) Resina (a) e amostra ensaiada a 1100 °C observada em MEV – 1) FeO 2)Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; 3)Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (b)

Os distintos óxidos formados foram identificados mediante a análise de difratogramas feitos a partir das camadas de óxidos dos corpos-de-prova. Foi possível constatar que na camada de óxido formada a 1100 °C a presença de hematita é 27,02 % maior do que a apresentada a 750 °C e a magnetita e a wustita aumentam 15,68 % e 4,65 %, conforme cotado na Figura 7.

#### 4.4.2. Espessura da espessura dos óxidos nos valores do coeficiente de atrito estático a quente

Não se encontrou na revisão bibliográfica referência ao efeito da espessura da camada de óxido no atrito por deslizamento a quente. Por outro lado mostrou-se que, na laminação a quente de aços,<sup>[9]</sup> o aumento da espessura da camada de óxido na chapa de 0,015mm para 1,59mm levou a diminuição significativa do coeficiente de atrito cinemático. Embora este resultado contradiga as determinações do presente estudo a Figura 8 mostra que, para determinações de atrito em ensaios por rolamento, há uma espessura da camada de lubrificante sólido (sobre um substrato mais duro que esta camada) para a qual o coeficiente de atrito é mínimo. Isto se deve ao compromisso entre a interação por adesão do corpo que rola contra o material da camada quando esta é espessa e a interação por deformação plástica com o substrato quando o filme é muito fino.<sup>[8]</sup> Estes diferentes resultados indicam que não há pelo momento dados ou fundamentação que refutem os resultados experimentais do presente trabalho.

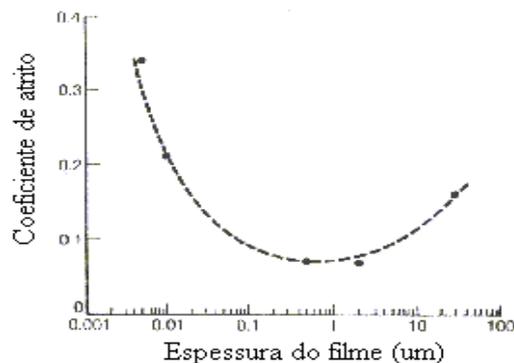


Figura 8- Variação do coeficiente de atrito para aço contra aço ferramenta com um filme lubrificante sólido<sup>[8]</sup>.

De acordo com os dados coletados o coeficiente de atrito a 750 °C é  $0,84 \pm 0,16$  e a espessura da camada de óxido encontrada é de 24,3 μm, já a 1100 °C o coeficiente de atrito é  $0,77 \pm 0,09$  e a espessura da camada é de 418 μm, portanto, assim como visto na literatura, para finas camadas de óxidos o coeficiente de atrito é maior se comparado com ao valor obtido quando a camada é mais espessa, no caso, 418 μm.

#### 4.4.3. Efeito do tipo de óxidos nos valores do coeficiente de atrito estático a quente

Não se encontrou na busca bibliográfica, referências sobre o efeito do tipo de óxido no valor do coeficiente de atrito estático a quente. Em ensaios de deslizamento de (aço 1045 contra aço H13) verificou-se que o atrito diminuiu com o aumento da carga e esta diminuição foi atribuída a ruptura do filme de hematita e ao deslizamento prosseguir contra o filme de magnetita como se vê na Figura 9.

Comparando a composição da carepa formada nas duas temperaturas de trabalho, verifica-se que o aumento da quantidade de wustita na camada de óxido diminuiu o atrito interfacial, como encontrado por Luong e Heijkoop [10].

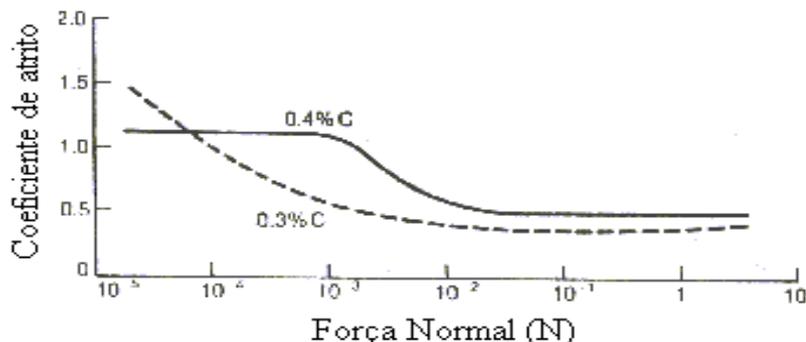


Figura 9- Variação do coeficiente de atrito com a força normal para aços contra aços, em ar, sem lubrificação<sup>[8]</sup>

#### 4.4.4. Efeito da umidade

De acordo com Hung-Kuk et al.<sup>[11]</sup>, a baixa umidade (55 %) faz com que o coeficiente de atrito aumente e assim também o desgaste, já a alta umidade faz com que o atrito diminua e o desgaste também. A umidade relativa do ambiente onde os ensaios em temperatura ambiente foram realizados encontrava-se na faixa de 68 a 70 %, medidos com HIGRÔMETRO, e de acordo com os gráficos apresentados por Hung, a variação do coeficiente de atrito nesta faixa é muito pequena, portanto o efeito da umidade não foi considerado diante os desvios encontrados no experimento realizado em temperatura ambiente.

### 5. Resumo e Conclusões

- Desenvolveu-se um equipamento capaz de medir força e coeficiente de atrito estático à temperatura ambiente e em temperaturas elevadas até 1100 °C;
- O menor coeficiente de atrito foi determinado a temperatura ambiente. Conjectura-se que os valores de coeficiente de atrito dependam da topografia, resistência e natureza da camada de óxido.

### 6. Agradecimentos

À empresa de cilindros Villares – Sidenor pelo apoio e financiamento a este projeto de pesquisa na forma de uma bolsa de iniciação científica.

### 7. Bibliografia

- [1] CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. Mc Graw-Hill, 1977.
- [2] DIETER, G.E. **Mechanical metallurgy**. Mc Graw-Hill, 1988.
- [3] ASM Handbook. **Friction, lubrication and Wear technology**. ASM, 1992. v.18,

- [4] FERREIRA, V. **Processamento, caracterização mecânica e tribológica do compósito  $Al_2O_3-NbC$** . Tese (Mestrado) – IPEN, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.
- [5] Rabinowicz, E. ASLE Transactions. 1971. v.14, 198 p.
- [6] Friction Data Guide, General Magnaplate Corporation. 1988; TMI Modelo 98-5
- [7] M.J. Manjoine, **Bearing and Seal Design in Nuclear Power Machinery**, American Society of Mechanical Engineers, 1967.
- [8] HUTCHINGS, J.M. **Tribology: Friction and Wear of engineering materials**. Metallurgy & Materilas Science Series, 1992.
- [9] MUNTHER,P.A; LENARD,J.G. **The effect of scaling on interfacial friction in hot rolling of steels**. Journal of Materials Processing Technology, 1999. v88, p.105-113.
- [10] LUONG,L.H.S; HEIJKOOP,T. **The influence of scale on friction in hot metal working**. Wear 198. v.71, p. 93-102.
- [11] HUNG-KUK, O; KYU-HYUN, Y; HAK YUN, K. **The influence of atmospheric humidity on the friction and wear of carbon steels**. Journal of Materials Processing Technology, 1999. v.95, p. 10-16.

## **EXPERIMENTAL DETERMINATION OF FRICTION COEFFICIENT AT HIGH TEMPERATURES USING SLIDING TEST**

### **Mariana Casarini**

Universidade de São Paulo. Av. Melo Moraes, 2231 Cidade Universitária 05508-900, São Paulo, (SP), Brasil. Tel: 30919865, Fax: 38142424.

E-mail: [mariana.casarini@poli.usp.br](mailto:mariana.casarini@poli.usp.br)

### **Leonardo Villabón Ramos**

Universidade de São Paulo. Av. Melo Moraes, 2231 Cidade Universitária 05508-900, São Paulo, (SP), Brasil. Tel: 30919865, Fax: 38142424.

E-mail: [villabon@usp.br](mailto:villabon@usp.br)

### **Amilton Sinatora**

Universidade de São Paulo. Av. Melo Moraes, 2231 Cidade Universitária 05508-900, São Paulo, (SP), Brasil. tel: 30919855, fax: 38142424.

E-mail: [sinatora@usp.br](mailto:sinatora@usp.br)

### **Abstract**

*Friction coefficient has a great influence on the forging process and until now too few experiments were conducted at high temperatures. This work was concerned to determinate the static friction coefficient between two metal surfaces by means of sliding tests. The study of basic aspects, without concerning about plastic deformation, is the first part of a systematic approach of tribology studies on high temperature forging. This work was conducted due to the high gap of data about friction coefficients at high temperature, specially about static friction coefficients.*

*Tests were conducted at room temperature (25 °C), 750 °C and 1100 °C, with AISI 1045 and AISI H13 steels and they were found friction coefficients of  $0,25 \pm 0,01$ ;  $0,84 \pm 0,16$  e  $0,77 \pm 0,09$ . The increase of static friction coefficient was associated to increase of scale thickness. In room temperature tests were applied loads of 7,6 and 14,6 N,(which means that material was loaded on conditions of macroscopic elastic behavior) and no significant variation was observed friction coefficient. Statistic analysis of results showed that the use of a simple equipment permitted to obtain reproducibility of results, however with limitations that point to its enhancement.*

**Key words:** *forging, static friction, tribology, high temperature, scale.*