

PROJETO DE UM PROTÓTIPO DE UM BANCO DE ENSAIO DE DESGASTE DO TIPO “PIN-ON-DISC”

D.T.L Ramos; E.M.J.A. Pallone, B. M. Purquerio; C. A. Fortulan.
Av. Trabalhador São-carlense, 400 – 13566-590 – São Carlos - SP
cfortula@sc.usp.br
Escola de Engenharia de São Carlos – USP

RESUMO

O estudo trata do re projeto, fabricação e validação de um banco de ensaio de desgaste do tipo pin-on-disc. Estudos de atrito e desgaste de deslizamento de cerâmicas geralmente tem utilizado equipamentos do tipo pin-on-disc. Este tipo de equipamento tem sido referenciado como o que melhor reproduz os resultados dos ensaios em diversos laboratórios. O presente trabalho no cumprimento da normalização vigente e no atendimento de interesses a usuários entrevistados objetiva a atualização de um equipamento projetado e fabricado no Laboratório de Tribologia e Compósitos da Escola de Engenharia de São Carlos-USP em 1994. Atualizações mais significativas foram feitas na garantia de manutenção de torque e velocidade de deslizamento ao longo do experimento, no projeto do disco e suporte de disco, nas medições de força de atrito ao longo do ensaio, na instalação de sistema de aquisição e tratamento de dados e na redução dimensional, de peso e custo do protótipo. Um protótipo compacto foi construído e validado no desgaste do par tribológico de alumina. Foi obtido um equipamento com baixo custo de fabricação, amortecimento de vibração baseado em mesa de granito sintético e suspensão por coxins de elastômeros e medição de força de atrito durante o experimento. Para análise de validação usou-se carga de 30N e velocidade de 0,5m/s obtendo taxa de desgaste média de $15 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ e volume de desgaste de $1,2 \text{ mm}^3$ após 4000m de deslizamento gerando força de atrito média de 23N.

Palavras-chave: projeto mecânico, desgaste, desgaste de cerâmica, *pin on disc*.

INTRODUÇÃO

O desgaste é um dos três problemas industriais mais freqüentes que conduz a substituição de componentes e ou manutenção de equipamentos, os outros dois são a fadiga e a corrosão. O desgaste é raramente catastrófico, mas reduz a eficiência de operação através do aumento da perda de potência, consumo de lubrificantes e substituição de componentes. Há vários mecanismos de desgaste ocorrendo simultaneamente em um par em contato deslizante: desgaste abrasivo;

desgaste adesivo; desgaste corrosivo; desgaste devido ao fluxo; devido à fadiga e devido à fusão e difusão. Atrito e desgaste não são propriedades intrínsecas do material, mas sim características do sistema de aplicação. As análises das condições que causam o desgaste e dos muitos mecanismos que contribuem para a causa de danos sinalizam para a solução de um problema particular que depende, sobretudo, da identificação precisa da natureza das variáveis envolvidas.

O mecanismo de desgaste pode ser observado em três regimes distintos de severidade de contato, ou seja, o regime de desgaste brando (I), o regime de transição de desgaste brando para desgaste severo (II) e o regime de desgaste severo (III) [1]. No regime de desgaste brando (I) as superfícies são pouco afetadas pelo desgaste, ocorre um desgaste microabrasivo nos cantos dos poros, nos defeitos superficiais, nos finos riscos superficiais que pode ser responsável pela nucleação de trincas e iniciação do desgaste [2]. O regime de transição (II) ocorre quando o nível de tensão dinâmica na superfície excede o limite crítico para iniciação da propagação incontrolável das trincas, com resultado de ruptura da superfície. Os mecanismos de deterioração dominantes são deformação plástica e fratura da superfície. Já no regime severo de desgaste (III) a superfície é coberta pelos debris desgastados. Debris consistem em finos fragmentos moídos que localmente são compactados termo-mecanicamente para formar camadas de tribo debris que controlam o desgaste e a resposta ao atrito.

O desgaste abrasivo tem sido definido como o deslocamento de material causado por partículas ou protuberâncias de elevada dureza [3,4]. Quando uma ou mais partículas duras, sujeitas à aplicação de força normal contra uma superfície são deslizadas (atrato) é gerado um sulco ou uma escavação tendo o desgaste abrasivo dos dois corpos. Por outro lado, quando partículas duras são aprisionadas entre duas superfícies que deslizam entre si, pode ocorrer o chamado desgaste abrasivo de três corpos. Dentro da estrutura desta definição geral, uma variedade de diferentes processos pode estar envolvida na produção de danos superficiais e fragmentos [4,5].

A taxa de desgaste abrasivo e os mecanismos de desgaste podem ser influenciados por vários fatores como: material (tamanho do grão, módulo de elasticidade, condutividade térmica, dureza); ensaio (forma, carregamento, tipo de movimento, aspereza, vibração, número de ciclos); meio ambiente (temperatura,

contaminação, umidade, atmosfera) e lubrificação (tipo de lubrificante, estabilidade de lubrificante, tipo de fluido).^[3,6]

Desgaste em Cerâmica

Podem ser identificadas diferenças no estudo de desgaste entre os metais (deformação) e as cerâmicas (fratura). A mais importante está relacionada com configuração de contato. Para os metais normalmente emprega-se seções planas de contato onde é aplicada pressão constante de contato. Já para as cerâmicas utiliza-se uma configuração de contato não conforme como: *ball-on-flat*, *ball-on-ball*, ou *cylinder-on-flat*, onde é fixada uma determinada carga e ocorre mudanças de pressão de contato nominais (mais justamente diminuições) com o deslizamento e desgaste do corpo em contato ocorre um aumento na área de contato.^[7]

Devido a fragilidade das cerâmicas, vários tipos de trincas são introduzidos pelo atrito ao redor da zona de contato, como trincas hertzianas, laterais, medianas e radiais. Estas trincas são mostradas esquematicamente na Figura 1a. Dependendo do valor da pressão de contato no ponto de contato, o desgaste predominante ocorre através das partículas formadas por propagação de algumas destas trincas^[9]. Na Figura 1b é mostrado esquematicamente por Andersson et al (1993)^[9] a superfície de um mancal de alumina devido ao regime severo de desgaste.

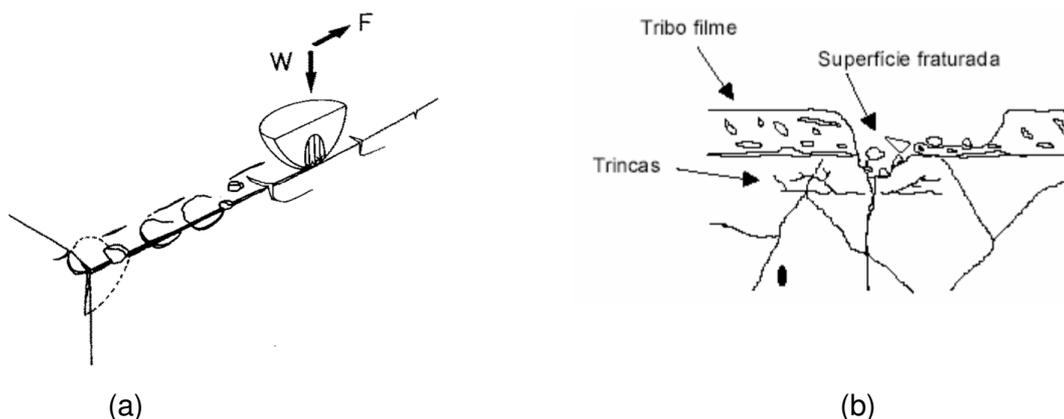


Figura 1. Atrito em cerâmica, ilustrações esquemáticas: a) Tipos de trincas introduzidas por atrito, onde W é a carga normal no ponto de contato e F a força de atrito na zona de contato;^[8] b) superfície desgastada de mancais de alumina sujeitos ao desgaste severo.^[9]

Se partículas semelhantes a escamas são supostamente formadas pela propagação de trincas laterais, iniciada na zona plástica na superfície, então o

volume desgastado pode ser dado qualitativamente pela equação 1 e pode ser utilizado para avaliar o desgaste. Esta equação superestima o desgaste, tal que o modelo para a teoria assume propagação de uma trinca lateral na superfície em uma simples passagem de atrito abrasivo. [10]

$$V = \alpha \frac{W^{9/8}}{K_c^{1/2} H^{5/8}} \left(\frac{E}{H}\right)^{4/5} l \quad (1)$$

onde, V=volume desgastado, W=carga normal, H=dureza, Kc=tenacidade, E=módulo elástico, l =distância percorrida e α =constante independente do material.

MATERAIS E MÉTODOS

Foi proposta uma metodologia para projeto adaptativo como base uma equipamento existente projetado e construída em 1994 no próprio LTC EESC – USP. O projeto executado numa metodologia estendida por tarefas, conforme apresentado na Figura 2, as principais tarefas são descritas.

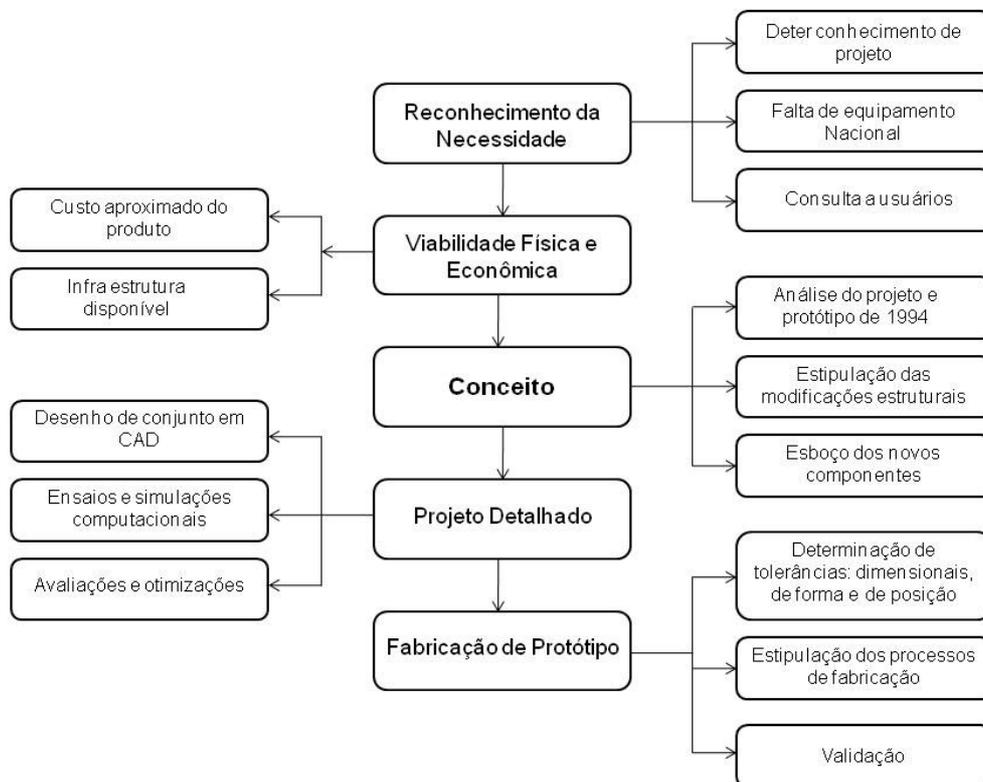


Figura 2– Metodologia empregada para o projeto.

Reconhecimento da necessidade

Os materiais cerâmicos têm sido amplamente usados em aplicações onde a resistência ao desgaste e a dureza são fundamentais. Iniciativas de padronização do equipamento “pin-on-disc” foram muito discutidas nas décadas de 80 e 90 [11,12] e que culminou na elaboração da norma ASTM G99, publicada em 1999. Aspectos conceituais do equipamento permitem uma liberdade no desenvolvimento do produto, sendo estes relacionados com a capacidade do usuário obter corpos de prova nas condições que o fabricante estipulou.

É comum em nosso País que equipamentos analíticos de laboratório sejam importados. Geralmente estes equipamentos têm alto valor agregado no referente à eletrônica embarcada e é imprescindível iniciativas de projeto para desenvolver a capacidade de projeto em nossos centros de excelência.

Pesquisa feita com usuários de equipamentos *pin-on-disc* apontou pela dificuldade de fabricação de discos do par tribológico. O furo nos disco para fixação é sempre um complicador para diversos laboratórios. Outros equipamentos importados trabalham com disco, mas com furo descentralizado para arraste, que também é uma característica negativa para os usuários. Neste sentido foi solicitado à necessidade de se trabalhar com discos sem furos (bolachas) e que mais trilhas pudessem ser utilizadas para minimizar a necessidade de retificação dos discos.

Análise da viabilidade física e econômica

Houve a necessidade de se projetar um equipamento que pudesse ser fabricado com orçamento máximo de R\$ 20.000,00. Os principais custeios e capitais foram definidos e apresentados na Tabela 01 satisfazendo o requisitado.

Tabela 01 – Agrupamento de custeios e capitais para o protótipo

Custeiio/Capital	Descrição	Valor (R\$)
Matéria prima	Aço, resina, tinta, solvente	1.500,00
Componentes	Rolamentos, parafusos, anéis, retentores, polias, correia, coxins, painéis, cabos, chaves	2.500,00
Serviços	Usinagem, solda, pintura, ajustes e montagem	7.000,00
Acionamento	Servo motor, driver e cabos	6.150,00
Medidas	Células de carga	582,00
Aquisição de dados		1.010,00
Interface	Notebook	1.200,00
Total		19.942,00

Conceito

A realização de ensaios de desgaste do tipo “pin-on-disc” é regida pela norma ASTM G99–05, *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. O projeto classificado como projeto adaptativo previu modificações estruturais no modelo gerado em 1994, sendo os principais: o emprego de discos maciços ao contrário dos discos furados (atendimento a usuário) que requereu no novo conceito da fixação do suporte de disco pela parte inferior do eixo de rotação do disco modificando o sistema de acionamento; medições de força de atrito ao longo do ensaio; instalação de um sistema de aquisição de dados; redução do tamanho do equipamento e conseqüentemente do seu peso; aumento e manutenção do torque e melhor controle da velocidade; criação de um canal para retenção da fuga do fluido lubrificante; calibragem da carga no sistema montado e pronto para o ensaio e padronização dos rolamentos, anéis elásticos e parafusos.

Projeto Preliminar

O projeto foi criado com todas as peças em ambiente CAD cuja ilustração pode ser vista na Figura 3, em a) o equipamento montado e em b) uma ilustração em corte em desvio apresentando o cálice, suporte do braço e sistema motor. Ressalta-se que no cálice a extração do pino é feita pelo lado inferior do disco; o motor é fixado na própria mesa; e existe a liberdade para o giro do braço que permite a medição da força de atrito.

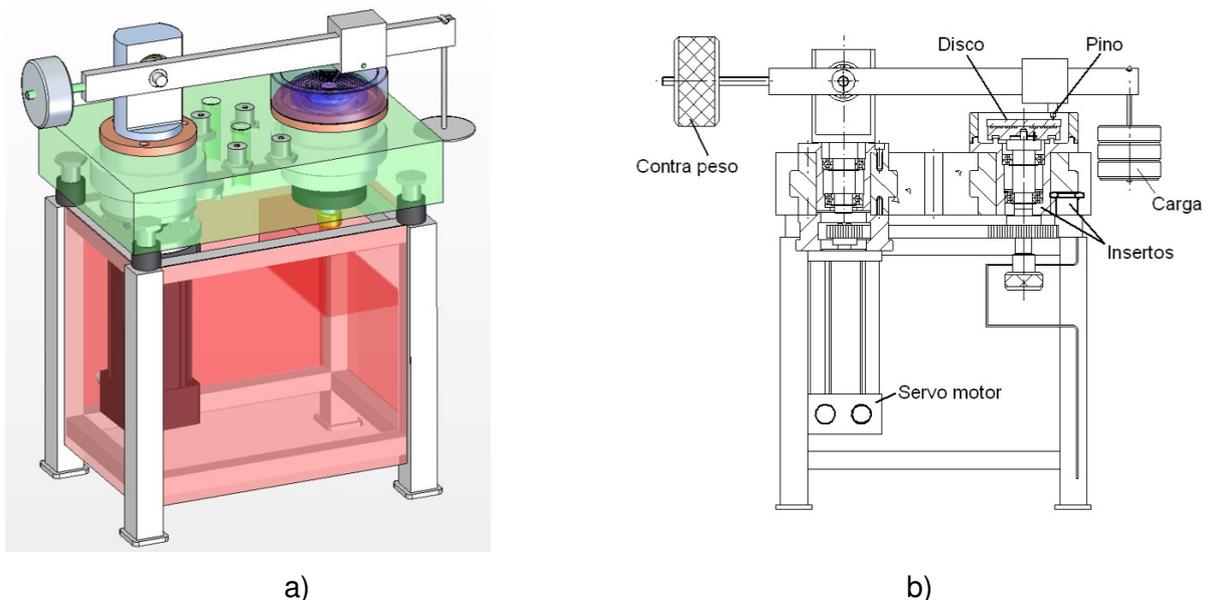


Figura 3 – Protótipo virtual do equipamento criado em *Solid Edge ST1*, com todas as peças, inclusive motor e polias.

Fabricação

A fabricação do equipamento foi dividida em etapas. A primeira etapa foi relativa à fabricação da mesa em granito sintético com insertos para montagem dos componentes, a segunda etapa à confecção da estrutura e painéis em aço, a terceira etapa a usinagem e montagem dos componentes na mesa, e a quarta etapa à instalação das células de carga.

Ensaio de validação

O ensaio de validação do equipamento foi realizado para verificação e ajustes no projeto.

Preparação do disco e pino, O disco de alumina foi produzido pela Saint Gobain, em Alumina 99,8%, foi aderido sobre o suporte do disco e teve sua superfície usinada em retífica plana com rebolo diamantado e em seguida foi lapidado por 5 minutos com carga de 5N sobre mesa de ferro fundido com pó de SiC malha #500 mesh, foi obtido Ra médio de $0,81\mu\text{m}\pm 0,08$.

O pino produzido com alumina AKP-53, produzida pela Sumitomo, foi conformado uniaxialmente à 50MPa seguido de prensagem isostática a 200MPa e sinterizado a 1380 °C/2h. A fixação desse pino no suporte de aço, para colocação na máquina foi com resina epóxi.

Condições de Ensaio, juntamente com a experiência do presente grupo e com as recomendações estipuladas pela literatura, principalmente as de Andersson et al. (1993), Blomberg et. al. (1994), e Perez Unzueta et al. (1991), foi estipulado os seguintes requisitos para o equipamento:

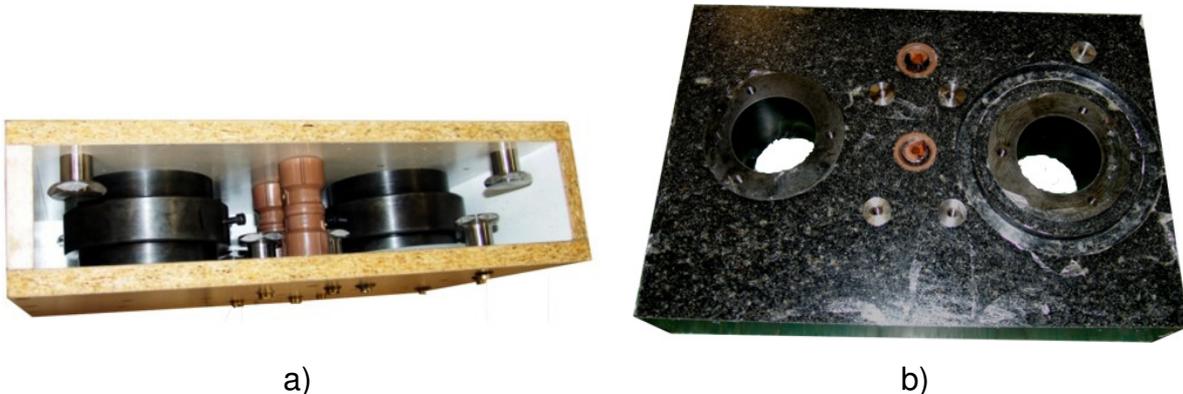
- pinos com diâmetro de 6mm, extremidade esférica com raio de 5 mm;
- disco com diâmetro de 80 mm, espessura de 8 mm;
- Preparação da amostra através da lavagem em álcool Etílico, secagem a 120 °C por 30 minutos, acondicionamento em dissecador por pelo menos durante 30 minutos antes da pesagem.

O pino foi fixado rigidamente no equipamento e deslizado à seco por etapas de 500m com carga de 30,0N, velocidade de 0,5m/s em rotações com diâmetro de 60mm e 70mm, pino 01 e pino 02 respectivamente. Após cada etapa foi feita a leitura do peso do pino com resolução de 0,01mg.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Fabricação do protótipo

A mesa em granito sintético foi moldada com em molde de madeira (Figura 4a) com os insertos, foi moída e classificada britas de granito do tipo cinza Mauá e ligadas com resina epóxi. Foram selecionados três tamanhos de britas de granito: Fino – 0,3 a 1,2 mm; Médio – 2 a 4 mm e Grosso – 7 a 12 mm. Um experimento foi realizado e foi selecionada uma composição composta por: 30% de grosso; 20% de médio e 50% de fino que resultou em uma densidade de empacotamento de $1,67 \text{ g/cm}^3$. A Figura 4b ilustra a mesa recém moldada.



a) b)
Figura 4 – Mesa, em a) molde de fechado e pronto para receber o granito e em b) mesa bruta.

Estrutura, sistema motor e demais peças

Esta fase envolveu a construção da estrutura em metalon para apoio da mesa, foi dimensionado um sistema de servo-motor nacional (SERVO-MOTOR WEG SWA56-2,5-20) e (SERVO-CONVERSOR WEG SCA050004), com um torque de 2,4 N/m através de uma transmissão em correia sincronizadora. Foram empregadas duas células de carga produzida pela MK Controle e Instrumentação Ltda (para aferir o carregamento CSA/ZL-5 e para medição da força de atrito CSA/ZL-10, com capacidade de 50N e 100N, respectivamente e resolução de 0,1N). A Figura 5a ilustra o protótipo montado e a Figura 5b detalhe mostrando as células de carga. As células com ajuste de posicionamento para a linha de atuação das cargas. O porta amostra pode ser ajustado no braço em até cinco posições correspondendo os diâmetros de deslizamento sobre o disco de $\varnothing 70$, $\varnothing 60$, $\varnothing 50$, $\varnothing 40$ e $\varnothing 30$ mm.



Figura 5 – Protótipo montado, em a) o protótipo em fase final e em detalhe das células de carga,

Automação do equipamento

A automação do equipamento foi realizada empregando placa de aquisição de dados da *National Instruments* juntamente com o software *LabVIEW Instrument* também da *National Instruments*. Foi gerado uma interface gráfica que permite a introdução de dados experimentais e acompanhamento e registro do tempo de ensaio, distância percorrida e força de atrito.

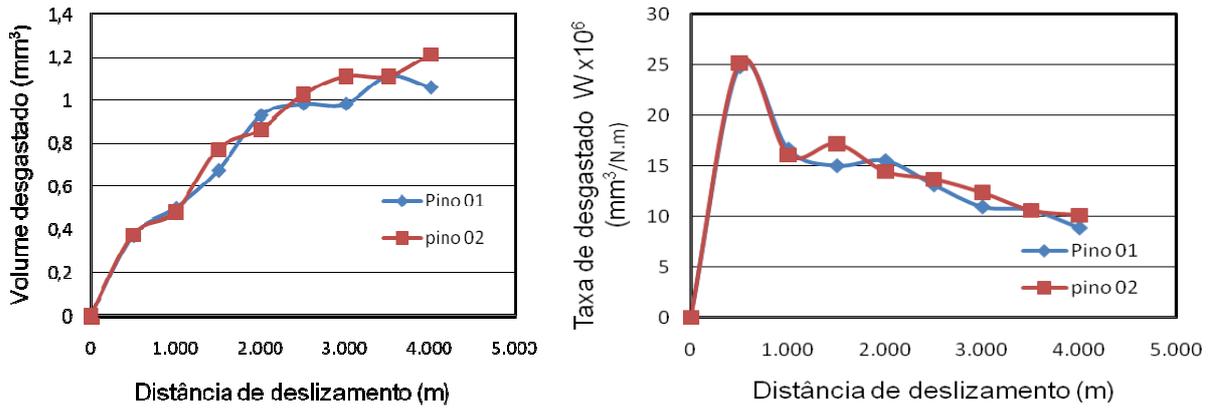
Validação

O equipamento reproduziu os experimentos realizados onde manteve a rotação durante todo ensaio, mostrando que o torque do motor foi suficiente. Através da medição das forças de atrito durante os ensaios e considerando a transmissão com redução de rotação de 2:1 e rendimento para correia sincronizadora de 95%, o experimento consumiu 1,1N.m sendo que o equipamento oferece 4,56N.m, tendo considerável reserva de torque para experimentações com maiores solicitações.

Foi medida a temperatura na ponta do pino que atingiu 90°C no período próximo aos 500m de deslizamento. É constatado que a fixação do pino cerâmico em suporte metálico quando necessário deve ser feita com adesivo que não libere massa e nem sofra amolecimento nesta faixa de temperatura.

A Figura 6 mostra as taxas de desgaste obtidas nos primeiros 500m de deslizamento foram de $25 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$, estabilizando próximo a $12 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$, após 3000m de deslizamento, valor considerado dentro da faixa esperada para alumina de alto desempenho. A Figura 7 ilustra a superfície desgastada do

pino 01 durante as fases de deslizamento e a Figura 8 a variação da força de atrito. Após 3000m o pino 01 teve início de trincas em sua superfície e aumento de massa devido à incorporação de *debris*. Os valores iniciais da força de atrito próximo a 20N aumento no decorrer dos experimentos (25N) e retorno para a força inicial no final devido ao filme tribológico de *debris* re compactados na trilha e pino.



a) b)
 Figura 6- Ensaio de desgaste de pinos de Alumina/Zircônia, em a) medidas de volume desgastado e em b) taxa de desgaste.

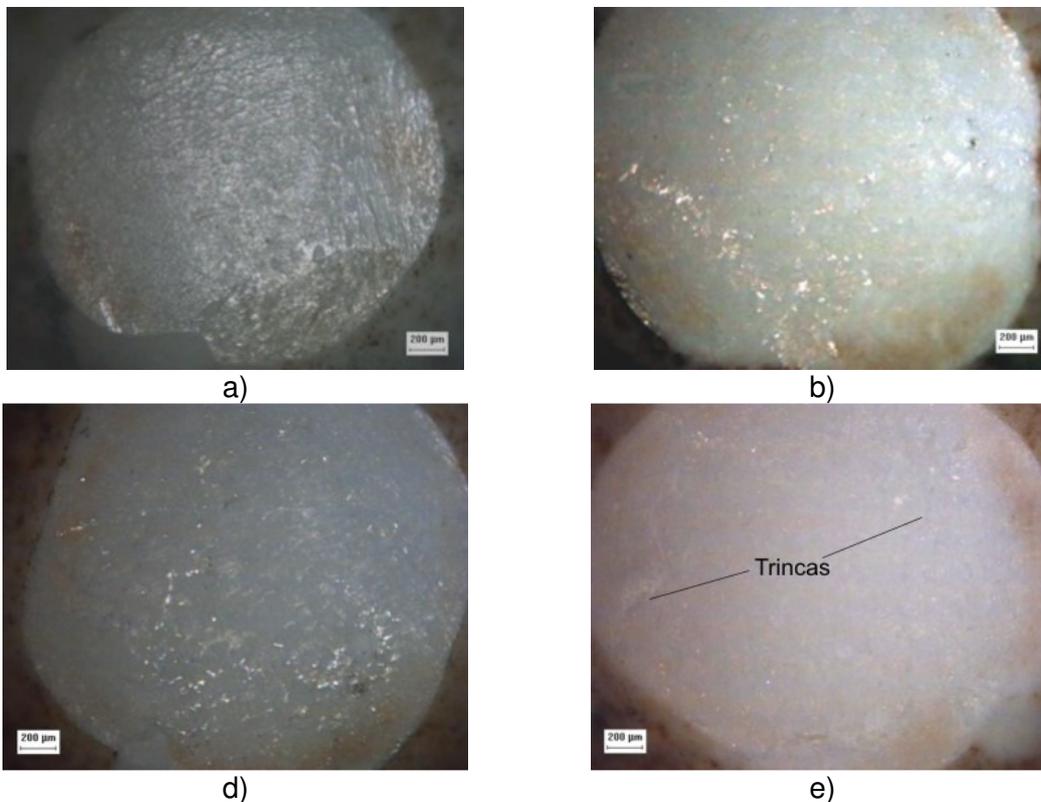


Figura 7- Ilustração das superfícies desgastadas do pino 01 em função do deslizamento, em a) 1000m, em b) 2000m, em c) 3000m e em d) 4000m

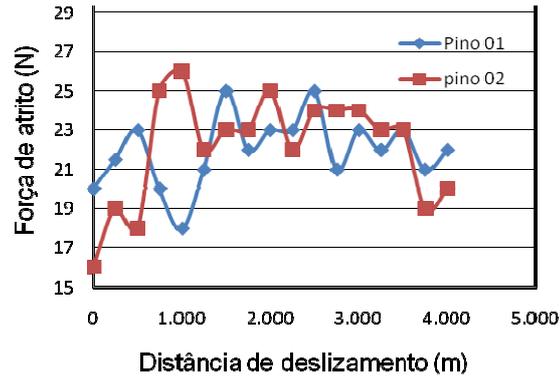


Figura 8- Variação da força de atrito durante o deslizamento

CONCLUSÕES

O protótipo de ensaio de desgaste tipo *pin-on-disc* projetado e fabricado apresentou excelente desempenho, relativamente às taxas de desgaste realizadas.

Apresentou torque suficiente com reserva para manutenção da velocidade nas condições empregadas.

Foi constatada certa vibração intrínseca ao atrito justificando a decisão pela escolha da mesa em granito sintético, material este que amortece sobremaneira as vibrações internas do equipamento.

A calibração da carga e as medidas de força de atrito validaram a adoção das duas células de carga que facilitou o ensaio e garantiu qualidade e precisão nas condições estabelecidas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão do projeto Universal 2007 – nº 481500/2007-3 que financiou a fabricação do protótipo e pela Bolsa de Iniciação Científica PIBIC 2009.

REFERENCIAS

- (1) WANG, Y., HSU, S.M. Wear and Wear Transition Modeling of Ceramics. *Wear*. v. **195**, p. 35-46, 1995.
- (2) XIONG, F., MANORY, R.R. The Effect of Test Parameters on Alumina Wear Under Low Contact Stress. *Wear*. v. 236, p. 240-245, 1999.
- (3) MONDAL, D. P., DAS, S. JHA, A. K., YEGNESWARAN, A. H., Abrasive wear of Al alloy- Al_2O_3 particle composite: a study on the combined effect of load and size of abrasive, *Wear Abrasive*, nº 223, p. 131-138, 1998.

- (4) BRISCOE, B. J., ADAMS, M. J., *Tribology in particulate technology*, IOP Publishing Ltd, p. 319-334, ISBN 0-85274-425-0, 1987.
- (5) HAWK, J. A., WILSON, R. D., TYLGZAK, J. H., DOGAN, Ö. N., Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation, *Wear abrasive*, nº 225-229, p. 1031-1042, 1999.
- (6) AMUTHA RANI, D., YOSHIZAWA, Y., HYUGA, H., HIRAO, K., YAMAUCHI, Y. Tribological behavior of ceramic materials (Si_3N_4 , SiC and Al_2O_3) in aqueous medium. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 24, p. 3279–3284, 2004.
- (7) RAVIKIRAN, A. Influence of apparent pressure on wear behavior of self-mated alumina. *Journal American Ceramic Society*, v.83, n.5, p.1302-1304, 2000.
- (8) KATO, K. Tribology of Ceramics. *Wear*. **v.136**, p.113-117, 1990.
- (9) ANDERSSON, P., Blomberg, A. Alumina in Unlubricated Sliding Point, Line and Plane Contacts. *Wear*. v.170, p. 191-198, 1993.
- (10) KATO K., Classification of wear mechanisms/models. Proc Instn Mech Engrs Vol 216 Part J: *J Engineering Tribology*. SPECIAL ISSUE PAPER, p. 349-355, 2002.
- (11) DUFRANE, K. F. Wear performance of ceramics in ring/cylinder applications. *Journal American Ceramic Society*. 72 [4] 691-695 (1989).
- (12) ZUM GAHR, K. H. Sliding wear of ceramic-ceramic, ceramic-steel and steel-steel pairs in lubricated and unlubricated contact. *Wear*, 133 (1989) 1-22.
- (13) BLOMBERG, A., OLSSON, M., HOGMARK, S. Wear Mechanisms and Tribo Mapping of Al_2O_3 and SiC in Dry Sliding. *Wear*. **v.171**. p. 77-89, 1994.
- (14) PEREZ-UNZUETA, A. J.; BEYNON, J. H. & GEE, M. G. Effects of surrounding atmosphere on the wear of sintered alumina. *Wear*, **v.146** (1991) 179-196.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PIN-ON-DISC MACHINE PROTOTYPE FOR WEAR TESTING

ABSTRACT

This work presents re-design, construction and validation of a pin-on-disc bench test for wear experiments. Studies of ceramic sliding wear generally have been done applying pin-on-disc apparatus. This equipment has been considered the best for standard results all over the laboratories. The present work goes the adaptive project based of interview of user and the prototype produced in 1994 in Laboratory of Tribology and Composites of School Engineer of São Carlos. The mains improvements were based on toque and sliding velocity stability, disc and support disc design, load cell for friction force acquisition and loading adjust and reduction of its weight and its cost. A compact prototype was constructed and validated in a tribologic alumina samples pair. The prototype obtained had a low cost fabrication, vibration cushion based on suspension rubber and synthetic granite table. For the validation was applied alumina tribologic pair, load at 30N, and sliding velocity at 0.5m/s. The maim results was wear rate as $15 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ and wear volume as 1.2 mm^3 after 4000m of sliding, the friction force was an average 23N.

Key-words: ceramic wear; pin-on-disc; design.