

TRIBOLOGIA

Profa. Dra. María Cristina Moré Farias

Universidade de Caxias do Sul
Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias
mcmfarias@ucs.br



Sumário

Definição e breve histórico e de Tribologia

Abrangência da Tribologia

Fundamentos de Tribologia

- Sistema tribológico
- Escalas em Tribologia
- Atrito
- Desgaste
- Ensaios tribológicos

Tribologia de materiais cerâmicos

O que é Tribologia ?



A palavra **Tribologia** é relativamente nova e seu significado é ainda obscuro para a maior parte da comunidade e, ainda hoje, assim que atinge os nossos ouvidos, surgem humorosas comparações com tribos ...



Qual é a origem do termo **Tribologia** ?

Qual é a importância da Tribologia ?

Tribologia é uma área nova ?

Quais áreas abrange a Tribologia ?



Qual é a origem do termo Tribologia ?

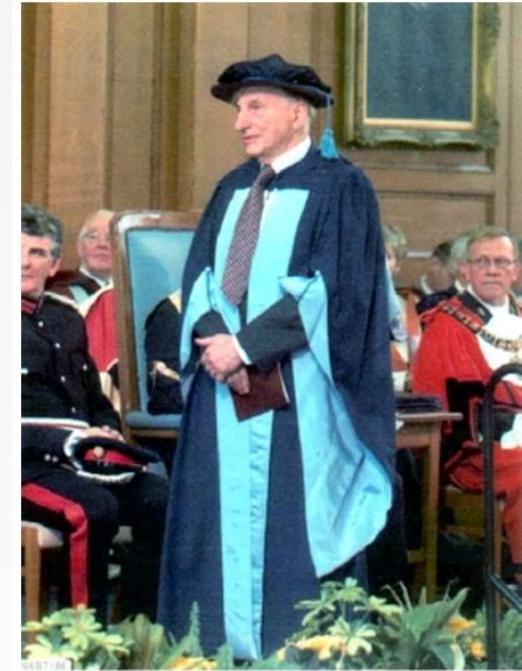
📄 Tribologia: do grego

“**tribos**” : roçar; esfregar e

“**logos**” : estudo

📄 A palavra e o conceito de Tribologia surgiram em 9 de março de 1966

- “The Jost Report”- Committee of the British Department of Education and Science: “The science and technology of interacting surfaces in relative motion -and of associated subjects and practices”
- **Tribologia** é a ciência e tecnologia das superfícies que interagem entre si mediante um movimento relativo”, e abrange o **estudo de atrito, desgaste e lubrificação**



UMIST honours Peter Jost
Tribology International 38 (2005) 449
UMIST has conferred the degree of Doutor of Engineering, honoris causa on Dr H Peter Jost CBE, Hon. FIEE and Past President of I.Prod.E.

H.P. Jost, *Wear* 136, 1-17, 1990.

Tribol. Int. 38, 449, 2005.

I.M. Hutchings, *Tribology - friction and wear of engineering materials*, 1992.

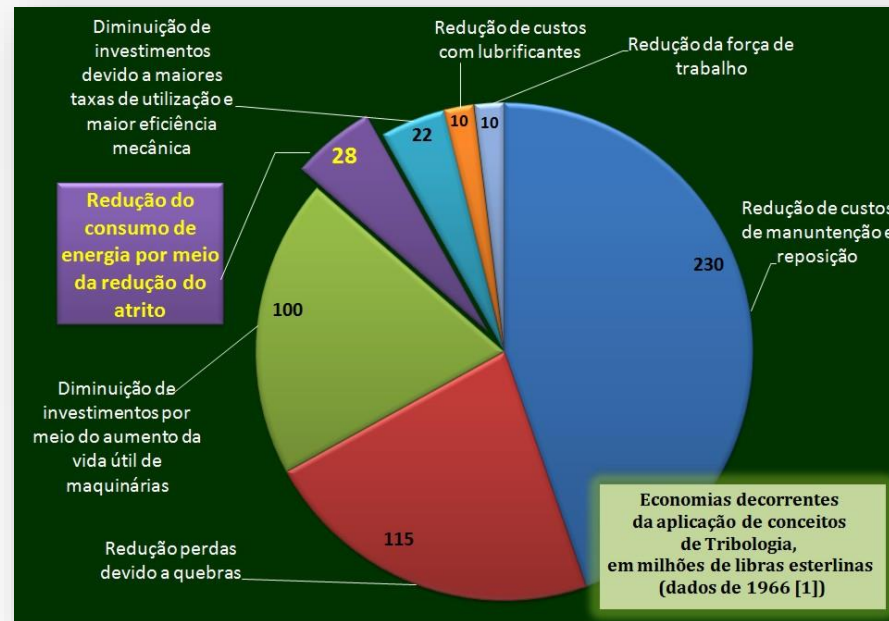


UMIST honours Peter Jost
Tribology International 38 (2005) 449
UMIST has conferred the degree of Doctor of Engineering
honoris causa on Dr H Peter Jost CBE, Hon. FIEE and
Past President of IProd.E.

Por que estudar Tribologia ?

Investimentos em ensino, pesquisa e aplicação de conceitos de Tribologia trazem vários benefícios

- Diminuição de custos e perdas nas indústrias
- Aumento do retorno sobre investimento
- Aumento do produto interno bruto (PIB)



H.P. Jost, *Wear* 136, 1-17, 1990.

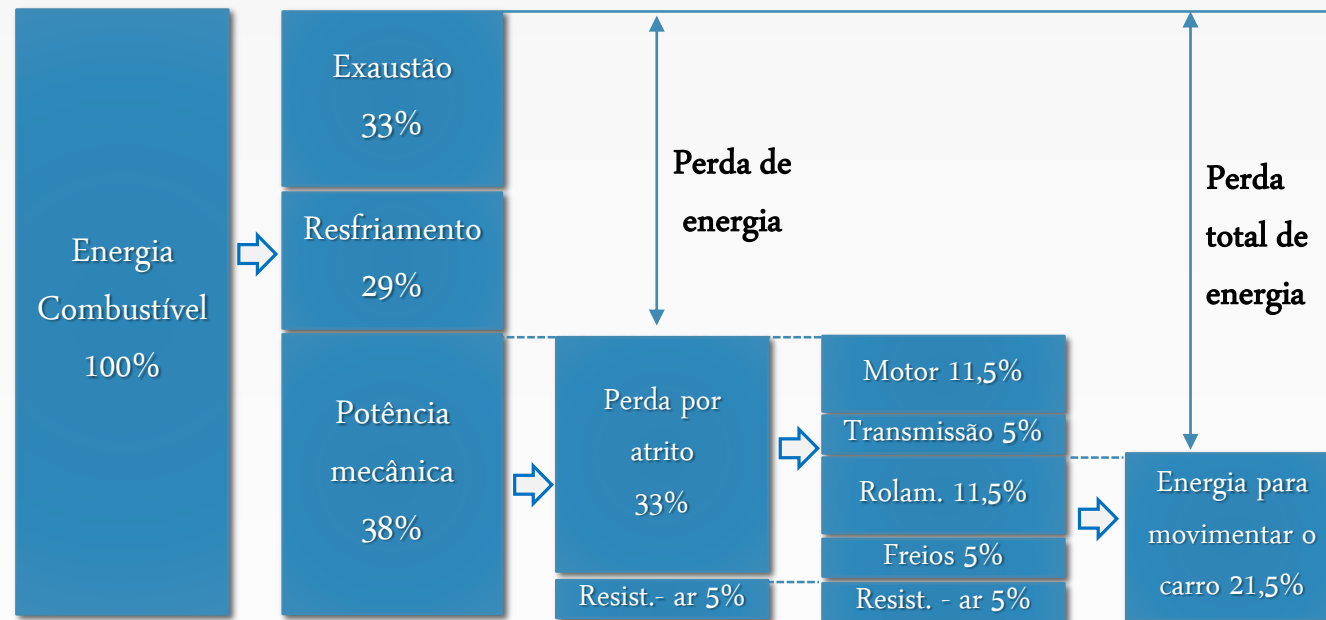


UMIST honours Peter Jost
Tribology International 38 (2005) 449
UMIST has conferred the degree of Doctor of Engineering
honoris causa on Dr. H. Peter Jost CBE, Hon. F.R.S.E. and
Past President of I.Prod.E.

Por que estudar Tribologia ?

Investimentos em ensino, pesquisa e aplicação de conceitos de Tribologia trazem vários benefícios

- Diminuição de custos e perdas nas indústrias
- Aumento do retorno sobre investimento
- Aumento do produto interno bruto (PIB)

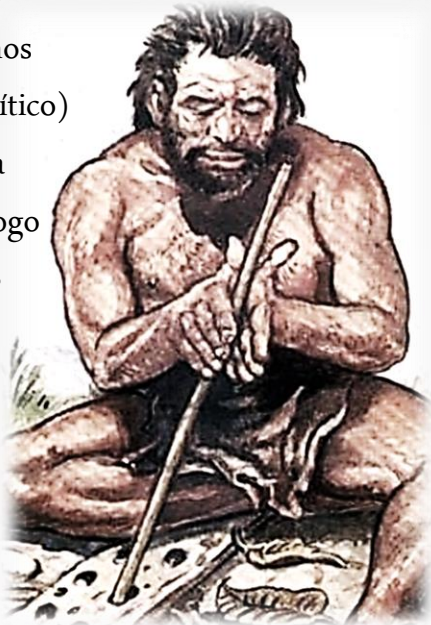


K. Holmberg, et al., *Tribol. Int.* 47, 221-234, 2012.

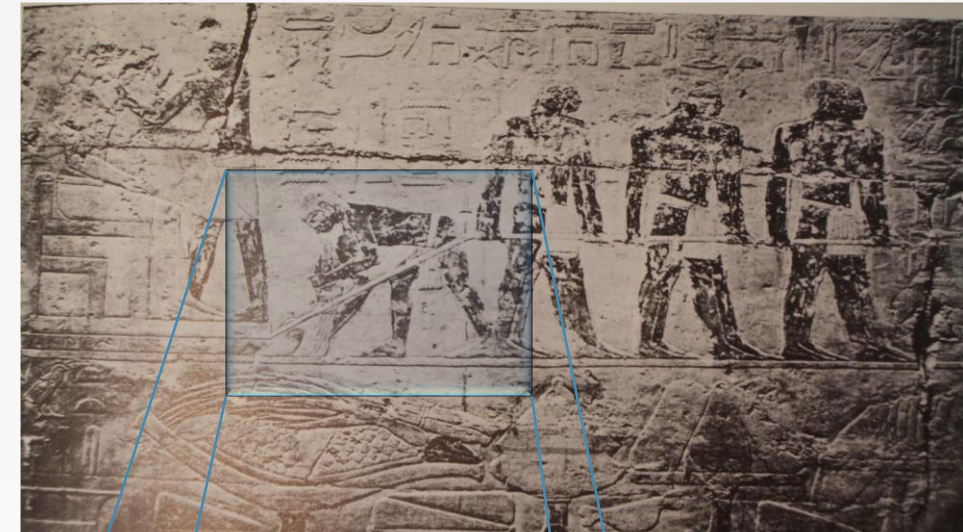
A Tribologia não é uma área da ciência nova

Os fenômenos de atrito, desgaste e lubrificação estão presentes na vida do homem há mais de 4000 anos

O Homo erectus (~2 milhões anos a.c.; Paleolítico) aprendeu a produzir fogo por **fricção**



Ainda hoje o homem produz fogo por **fricção**



Um dos primeiros tribologistas (2400 a.c) – lubrificando o trenó de uma estátua. Saqqara, Egypt

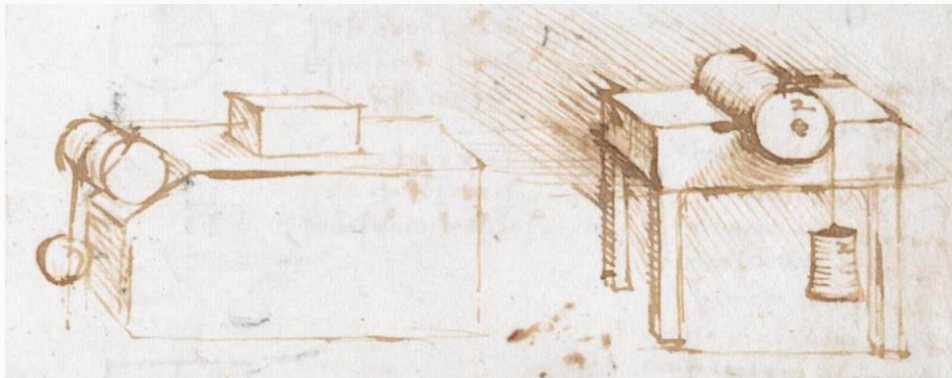
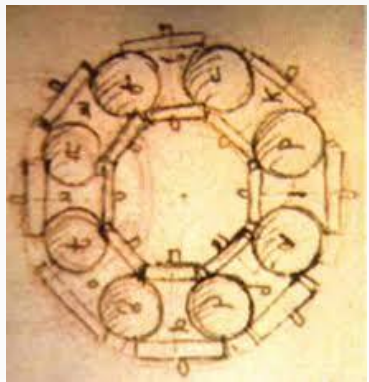
D. Dowson.
History of Tribology.



O termo “Tribologia” foi cunhado quase 450 anos após a morte do Leonardo da Vinci, o mais famoso “tribologista”

Leonardo da Vinci (1452 -1519)

- Embora muito conhecido pela suas obras de arte, tinha amplo conhecimento pelos conceitos básicos de atrito e desgaste
- **Rolamentos** e equipamentos para a **medição da força de atrito** são as suas contribuições mais significativas a Tribologia



- Formulou alguns dos princípios de atrito (200 anos antes, em 1699, de serem anunciadas por Guillaume Amontons)
- A força de atrito depende da natureza dos **materiais** em contato
- A força de atrito depende do grau de **acabamento** das superfícies em contato
- A força de atrito depende da presença de um **fluido** ou outro material interposto entre as superfícies
- A força de atrito aumenta com a **pressão** de um corpo contra o outro
- A força de atrito é independente da **área aparente** de contato entre duas superfícies

I.M. Hutchings, *Wear* 360-361, 51-66, 2016.

Fenômenos de corrosão e desgaste na natureza e na vida humana



Erosão Marina
Antiga "Playa de los Rusos"
Alamar, Havana, 18/01/2012



Corrosão marina
"Puerto de La Havana"
Havana Velha, 28/01/2012



Desgaste (contato com as mãos)
"El Caballero de Paris"
Havana Velha, 28/01/2012

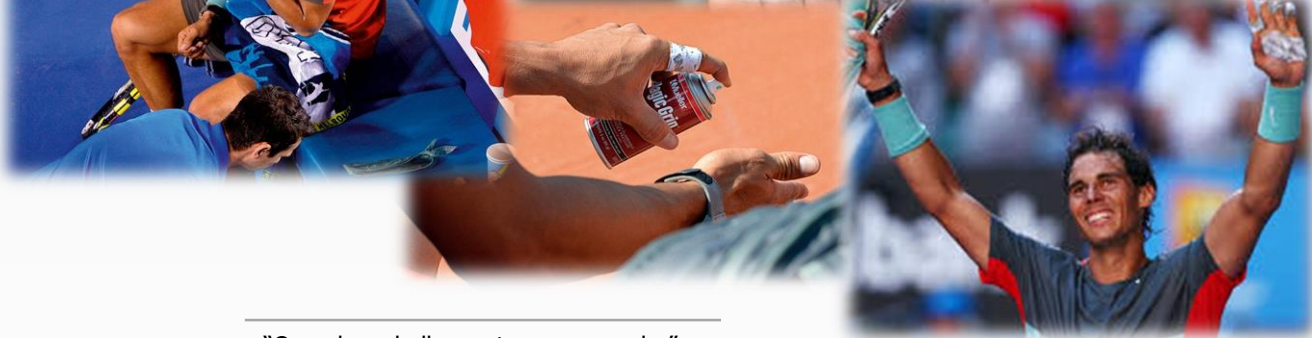
Fenômenos Tribológicos na Natureza e Vida Humana



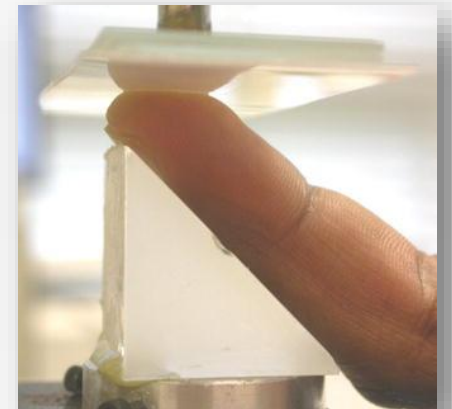
A Tribologia está presente em nossas vidas mais do que imaginamos



Bolhas: ocorrem em decorrência da fricção constante pelo contato da pele com a roupa, calçado ou objeto (equipamento esportivo, celular ...)



“Quando as bolhas entram em quadra”
Revista TÊNIS 125 · Março/2014
<http://revistatenis.uol.com.br/revista/125>



Tribologistas investigam efeitos do **suor humano**, sob condições de **stress** e **medo**, no **atrito** pelo contato da palma da mão com superfícies sólidas, papel, etc.

S.M. Pasumarty, Tribol. Lett. 44, 117-137, 2011.

Os fenômenos tribológicos estão presentes em muitas aplicações

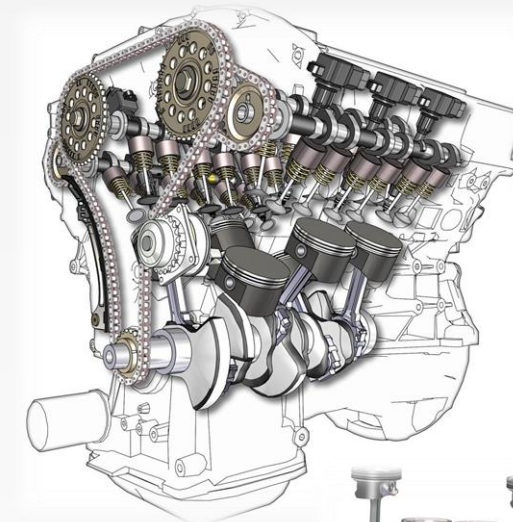
Elementos de máquina

Produtos

Processos de manufatura

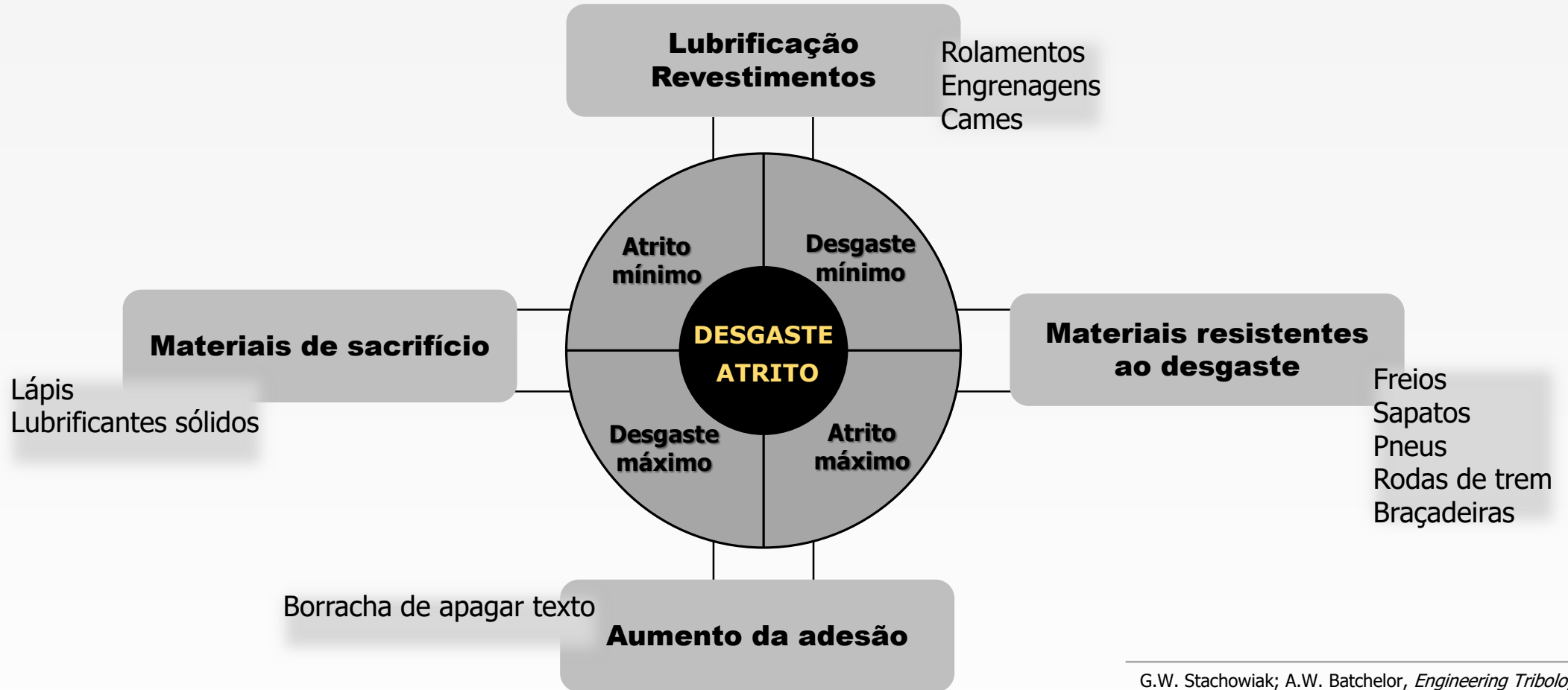
Construção civil

Exploração de recursos naturais



Qual é objetivo prático da Tribologia ?

Diminuir o atrito e/ou desgaste ? Em quais situações ?



G.W. Stachowiak; A.W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 2005.

Tribologia está presente em diversas áreas e indústrias

 **Automotiva**

 **Transporte**

 **Aeroespacial**

 **Agricultura**

 **Militar**

 **Calçados**

 **Cosméticos**

 **Farmacêutica**

 **Revestimentos**

 **Implantes ortopédicos**

 **Processamento de alimentos**

 **Fabricação de roupas e
equipamentos esportivos**

O que essas aplicações e áreas têm em comum ?



Como engenheiros ou cientistas, o que pensamos frente a problemas de falhas, projetos de melhoria e desenvolvimento de produtos ou experimentos envolvendo atrito, desgaste ou lubrificação ?

Qual é a aplicação ?

Entendendo a aplicação nos auxilia na seleção dos elementos do **sistema tribológico** mais importantes na análise/experimentos

Quais são as condições de operação ?

Lembrar que: desgaste e atrito não são propriedades do material; são propriedade do sistema

Quais são os materiais ?

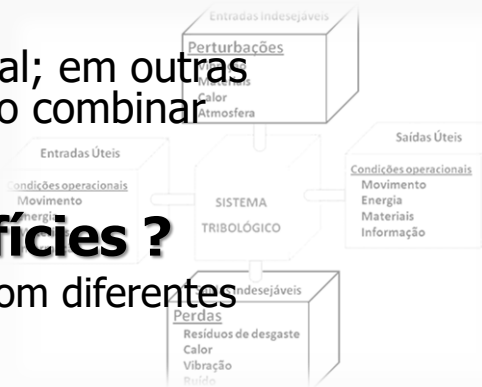
Na resolução de problemas de desgaste é necessário considerar outros fatores além do material;

Algumas soluções não envolvem mudança do material; em outras situações é necessário; em muitos casos é necessário combinar mudanças de material e de outros fatores;

Quais são as características das superfícies ?

Uma aplicação tem superfícies em movimento relativo com diferentes características

... ?

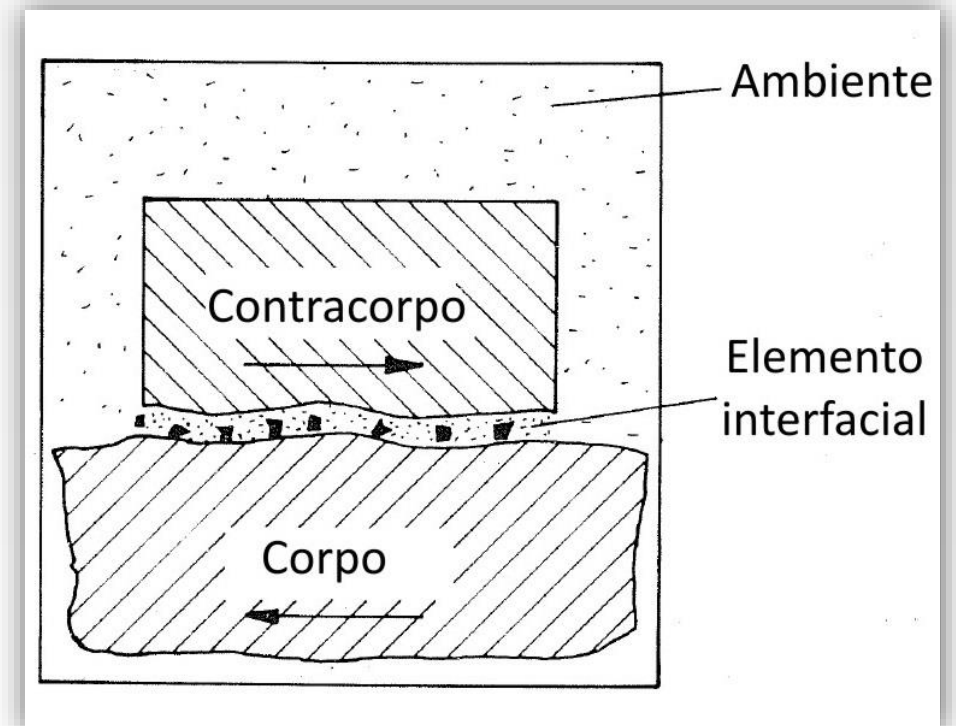


Tribologia - Fundamentos

O que é sistema tribológico ?

☞ **A dependência do atrito de outras variáveis foi formalmente reconhecida ao ser introduzido o conceito de Sistema Tribológico**

- De forma simplificada, um **Sistema Tribológico** ou Tribossistema consiste de todos aqueles elementos que podem afetar o comportamento tribológico.
- É constituído por dois corpos que interagem entre si (chamados de **corpo** e **contracorpo**), a **interface** entre estes os dois corpos (lubrificante, óxido, etc.) e o **ambiente**



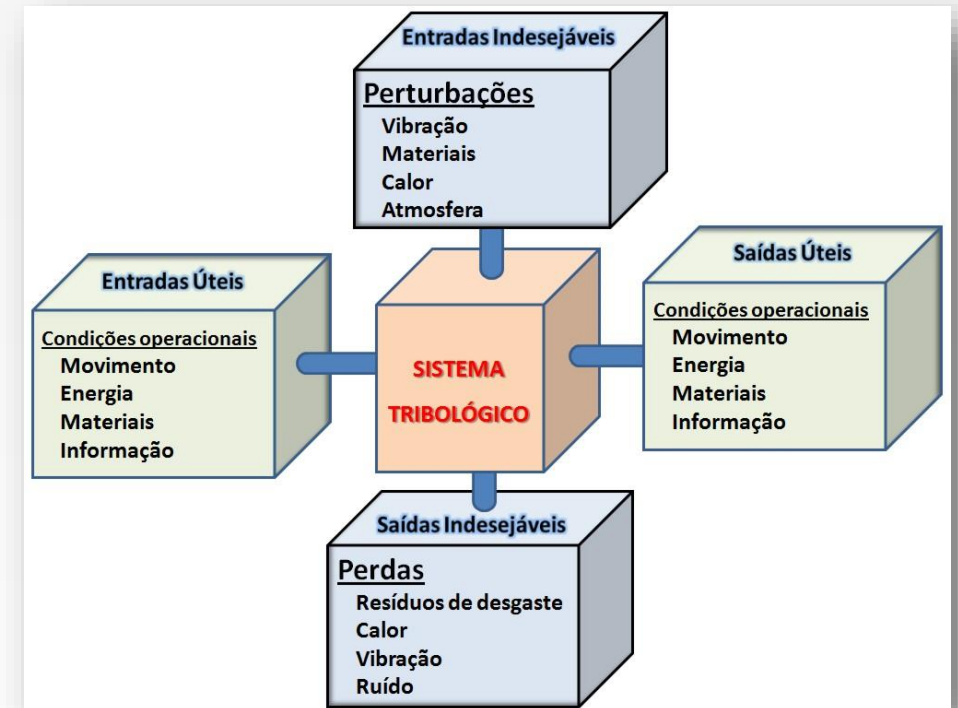
K. H. Zum-Gahr. *Microstructure and wear of materials*, 1987.

Tribologia - Fundamentos

O que é sistema tribológico ?

Principais elementos do sistema tribológico

1. Materiais
2. Geometria de contato
3. Carregamento
4. Movimento
5. Ambiente

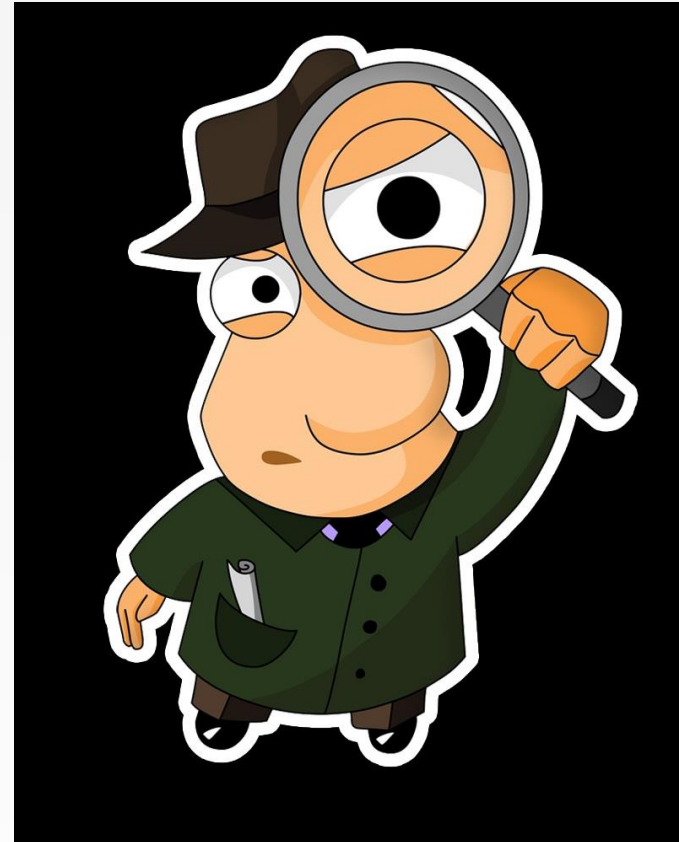


K.H. Zum-Gahr, *Microstructure and wear of materials*, 1987.

Tribologia - Fundamentos

Elementos do sistema tribológico

Quais são todos os possíveis fatores que definem um sistema tribológico?



Tribologia - Fundamentos

Elementos do sistema tribológico

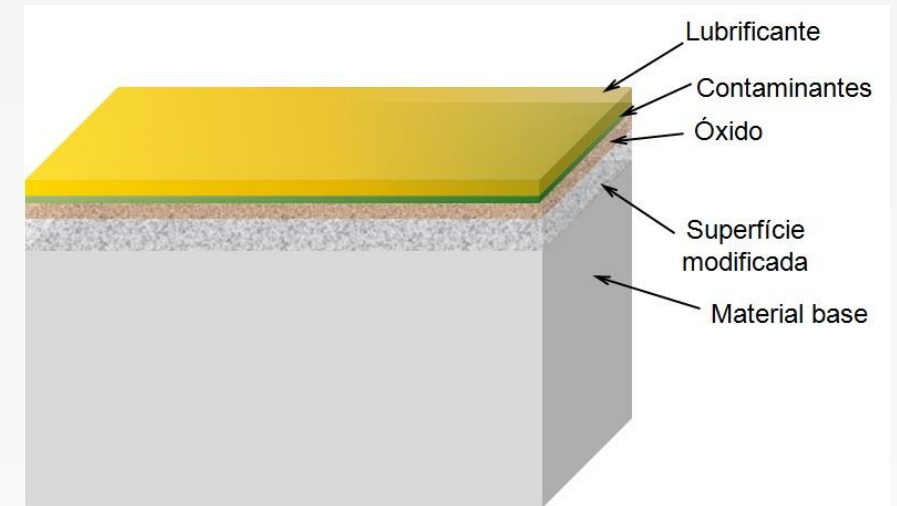
1. Material

Corpos sólidos

- Material base (composição química, tratamento térmico, propriedades elasto-plásticas)
- Óxidos (espessura, aderência)
- Revestimentos (espessura, dureza, rigidez)

Lubrificantes

- Tipo de lubrificante (óleo, graxa, emulsão, sólido)
- Aditivos (extrema pressão, antioxidantes, inibidores da corrosão)
- Características (viscosidade, composição química, oxidação, volatilidade, estabilidade térmica)



B. Bhushan, *Modern tribology handbook*, 2000.

G.W. Stachowiak, *Wear: materials, mechanisms and practice*, 2006.

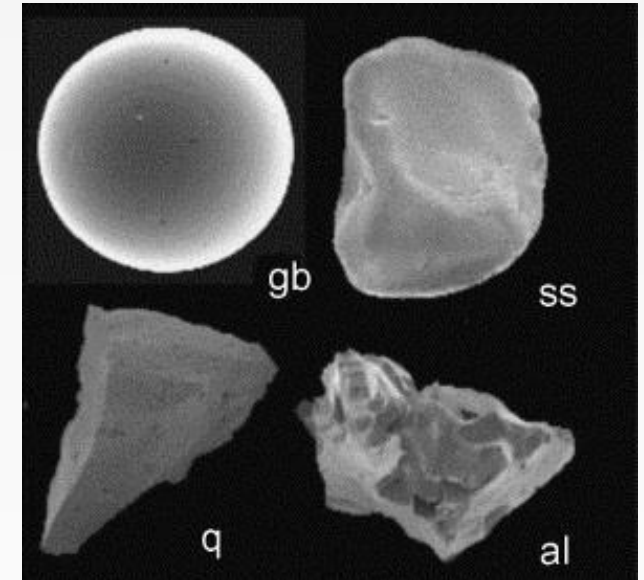
Tribologia - Fundamentos

Elementos do sistema tribológico

1. Material

Terceiro corpo

- Partículas soltas (composição química, dureza, distribuição de tamanho, forma, angulosidade, concentração, velocidade e ângulo de impacto)
- Camadas adsorvidas
- Contaminantes
- Partículas transferidas e resíduos de desgaste
- Tribocamadas
- Lama
- Fluxo de gás (concentração, velocidade, orientação)



B. Bhushan, *Modern tribology handbook*, 2000.

G.W. Stachowiak, *Wear: materials, mechanisms and practice*, 2006.

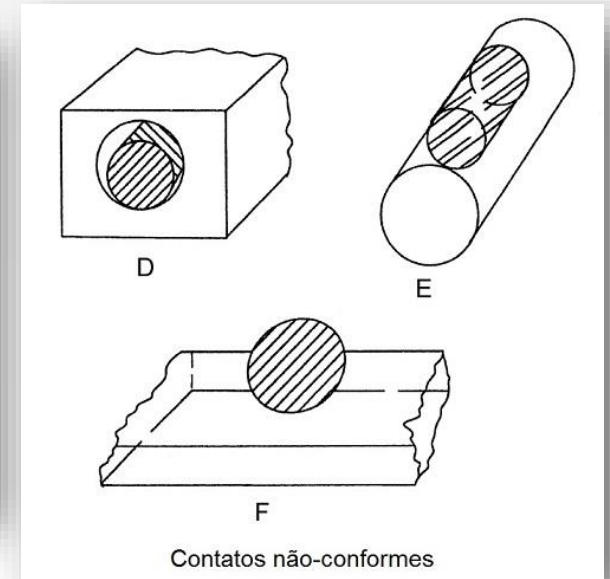
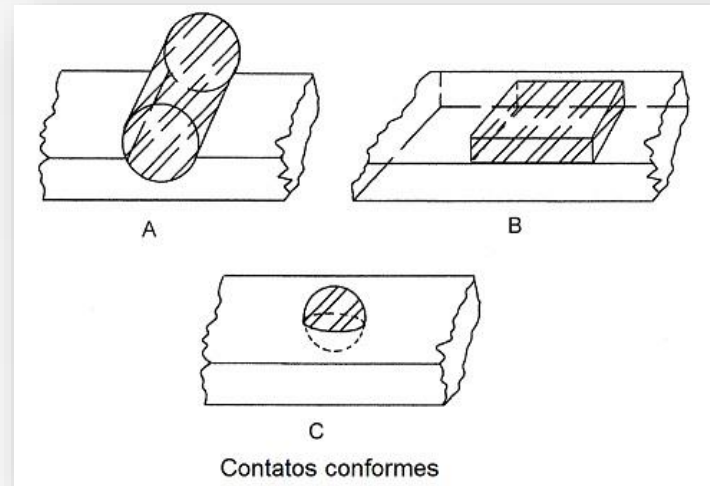
Tribologia - Fundamentos

Elementos do sistema tribológico

2. Geometria de contato

Geometria macroscópica

- Forma dos corpos em contato
- **Tipo de contato**
 - Conforme (placa-sobre-placa)
 - Não-conforme (esfera-sobre-placa, cilindro-sobre placa)



R. G. Bayer, *Mechanical Wear Fundamentals and Testing*, 2004.

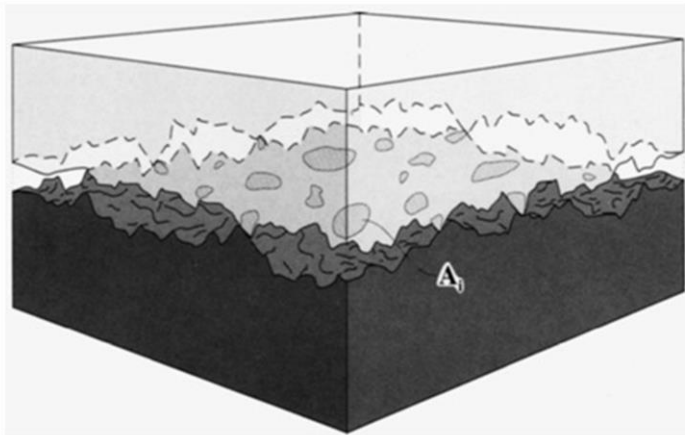
Tribologia - Fundamentos

Elementos do sistema tribológico

2. Geometria de contato

Área de contato

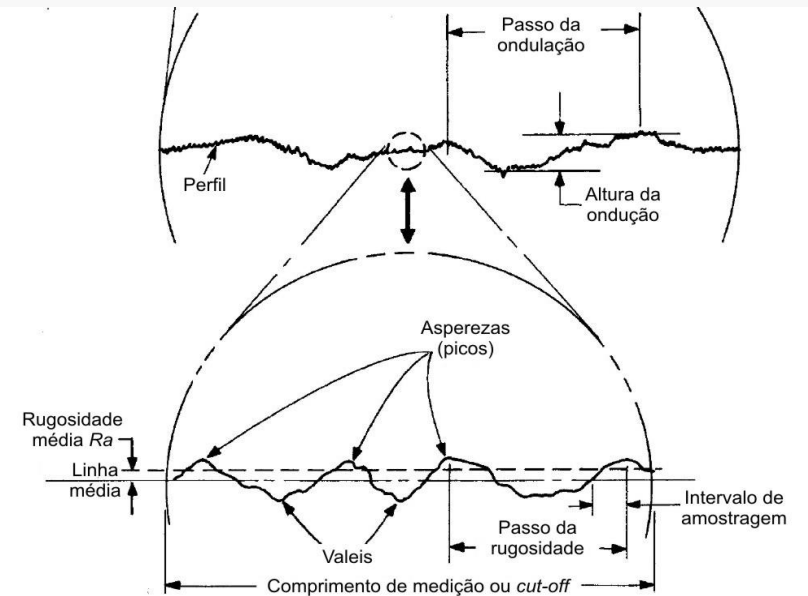
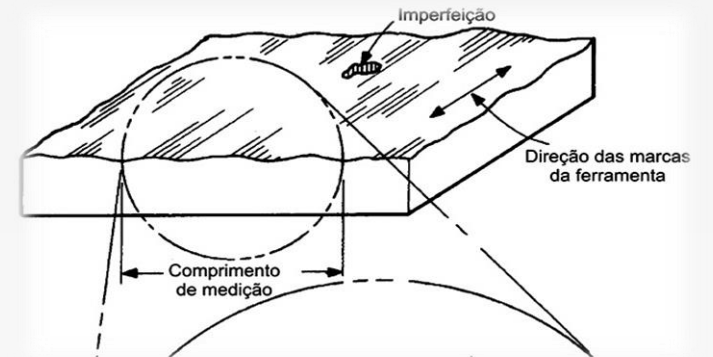
- Área nominal
- Área real



G.W. Stachowiak; A.W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 2005.
B. Bhushan, *Introduction to tribology*, 2013.

Topografia das superfícies

- Ondulação
- Rugosidade (Ra, Rq, Rz, Rt, etc.)
- Marcas de fabricação
- Imperfeições



Tribologia - Fundamentos

Elementos do sistema tribológico

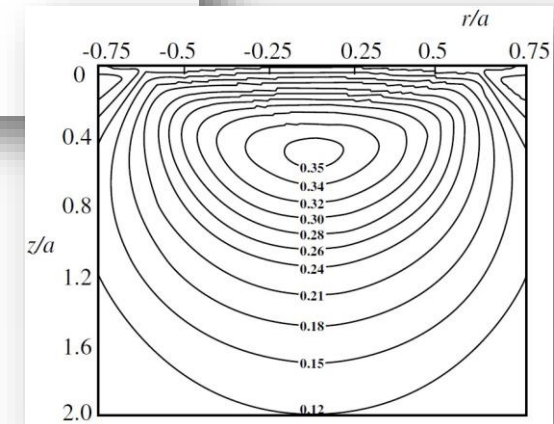
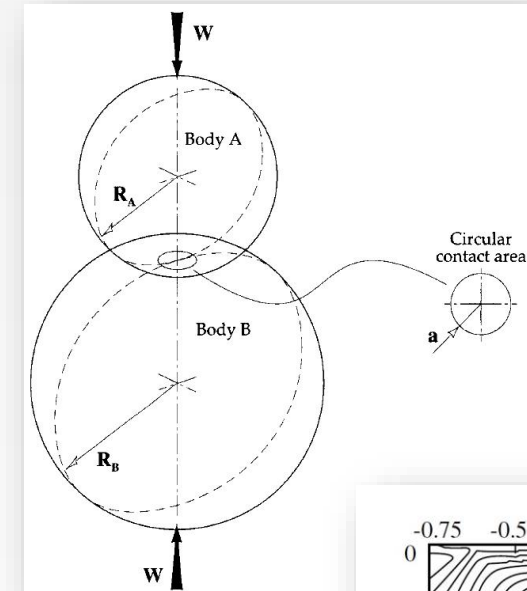
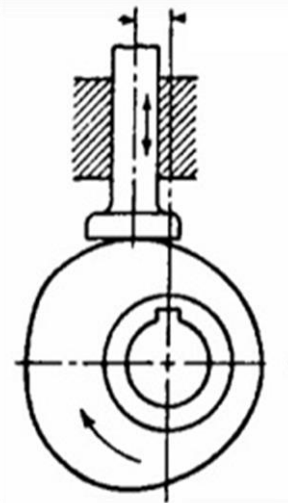
3. Condições de carregamento

Forma de aplicação da força

- Estático, dinâmico, impactado
- Constante, crescente, decrescente, variável, oscilante, etc.

Tensões de contato

- Contato elástico (tensões de Hertz; contato por rolamento)
- Contato plástico (contato por deslizamento)



G.W. Stachowiak; A.W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 2005.
B. Bhushan, *Introduction to tribology*, 2013.

Tribologia - Fundamentos

Elementos do sistema tribológico

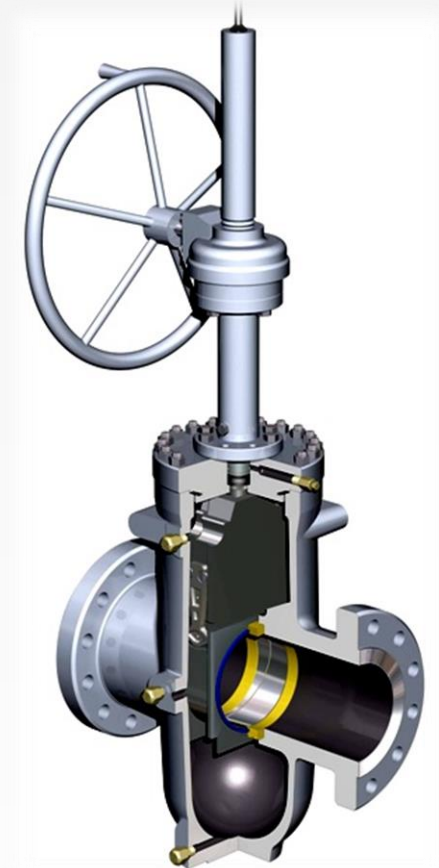
4. Tipo de movimento

📄 Tipo de carregamento

- Rolamento, deslizamento, impacto
- Unidirecional, alternado
- Contínuo, intermitente

📄 Movimentos de fluídos ou gases

- Turbulento
- Velocidade, ciclos, tempo de permanência, partículas/tempo



K. H. Zum-Gahr. *Microstructure and wear of materials*, 1987.
B. Bhushan, *Introduction to tribology*, 2013.

Tribologia - Fundamentos

Elementos do sistema tribológico

5. Condições ambientais

📄 Temperatura

📄 Umidade

📄 Pressão

📄 Meio líquido, Lama

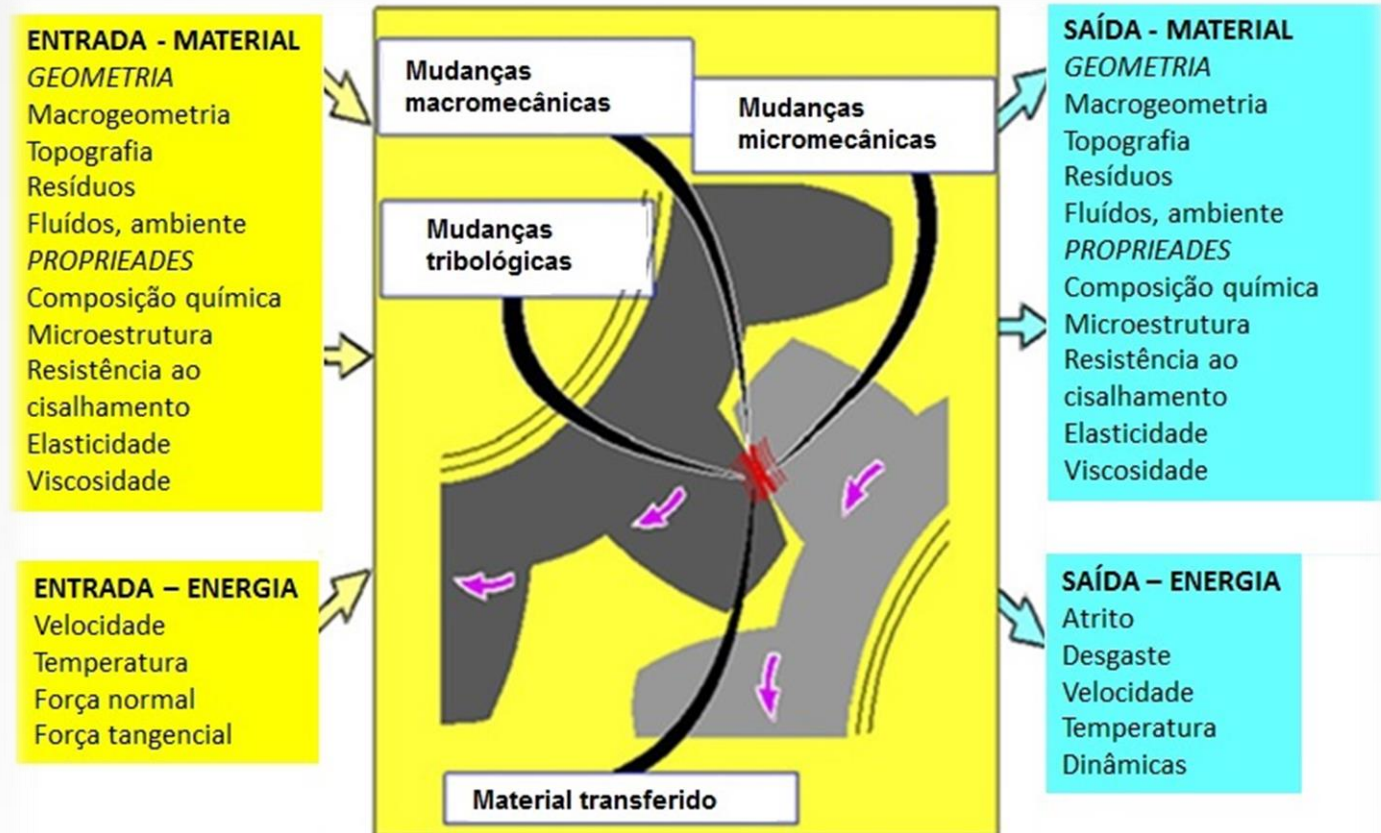


K. H. Zum-Gahr. *Microstructure and wear of materials*, 1987.
B. Bhushan, *Introduction to tribology*, 2013.

Tribologia - Fundamentos

Elementos do sistema tribológico e Escalas em Tribologia

O contato em sistemas tribológicos é determinado por variáveis operacionais e estruturais, mudanças em **níveis macro, micro e nano**, que resultam em atrito, desgaste e mudanças no contato



K. Holmberg et al., *Surface & Coatings Technology* 202, 1034–1049, 2007

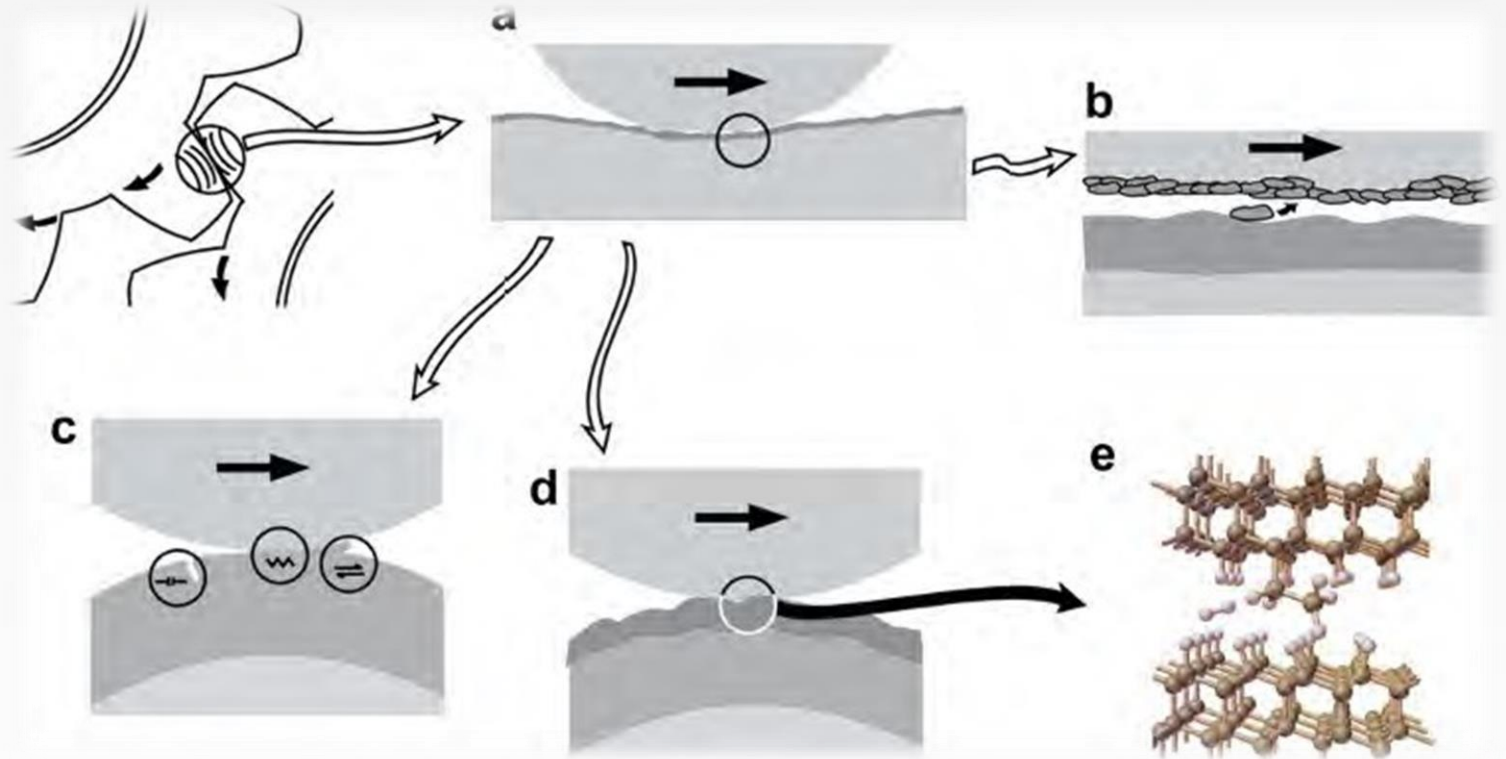
Tribologia - Fundamentos

Escalas em Tribologia

Os fenômenos que envolvem atrito e desgaste

aparecem em diferentes **escalas**

- a. mudanças macromecânicas
- b. transferência de material
- c. mudanças micromecânicas
- d. mudanças triboquímicas
- e. mudanças nanomecânicas

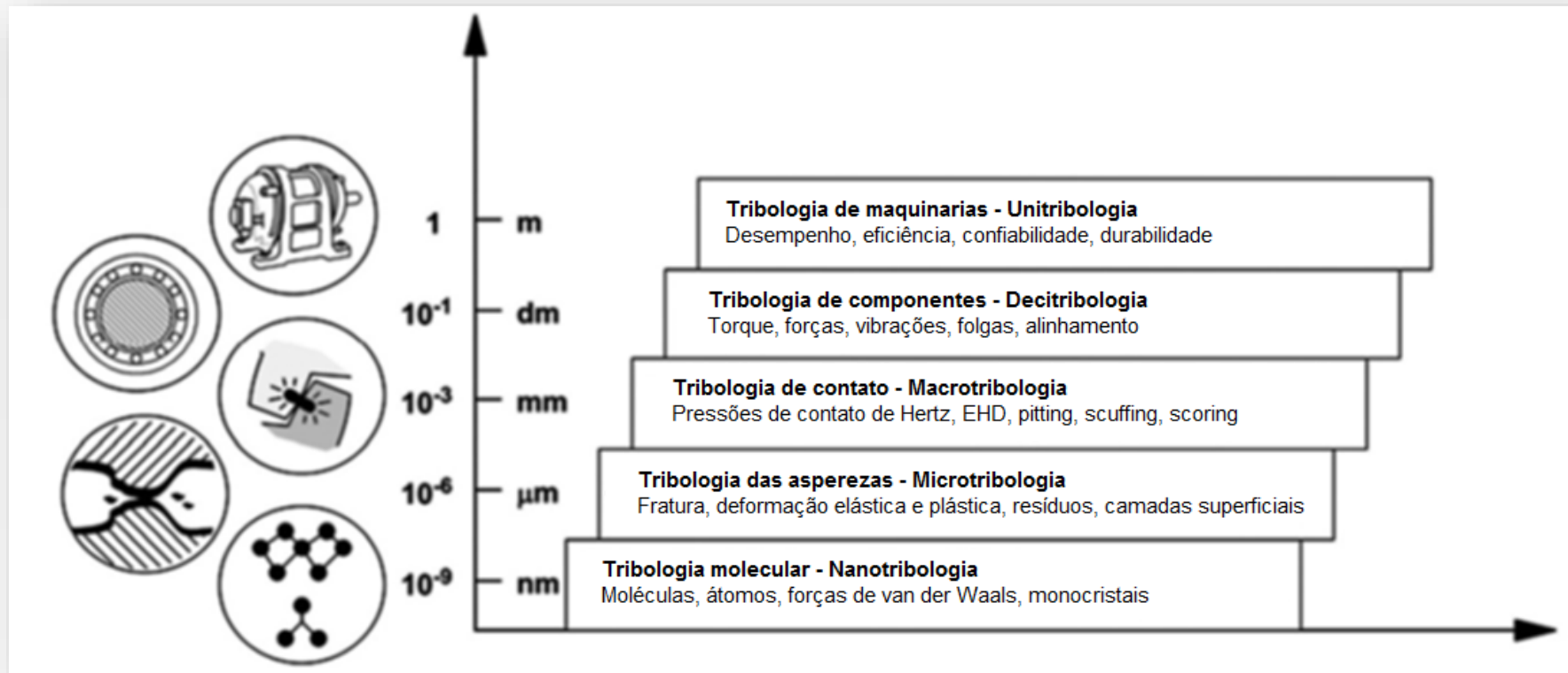


K. Holmberg, A. Matthews, *Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering*, 2009.

Tribologia - Fundamentos

Escalas em Tribologia

Na últimas décadas, os fenômenos tribológicos são analisados em escalas cada vez mais reduzidas



K. Holmberg et al., *Surface & Coatings Technology* 202, 1034–1049, 2007

Tribologia - Fundamentos

Qual é o significado correto da palavra **atrito** ? Tarefa difícil ?



Da Vinci usa a palavra esfregamento (*confregazione*) e não atrito

- **friction** (inglês) ⇨ **atrito** (português)
- **rubbing** (inglês) ⇨ **fricção**, esfregamento (português)
- **sliding friction** (inglês) ⇨ atrito no deslizamento ou no esfregamento (português)
- "Desgaste por atrito" ⇨ desgaste que ocorre devido ao esfregamento, ou deslizamento, entre corpos

O conceito de atrito abrange

- A força de atrito
- A energia dissipada na região de contato
- O coeficiente de atrito
- O fenômeno de atrito

Coeficiente de atrito

$$\mu = \frac{F_R}{F_N}$$

Força de atrito
Força normal

A. Sinatora; D.K. Tanaka, Rev ABCM Eng 01 out., 2007.

Tribologia - Fundamentos

Atrito

O atrito pode ser associado com a força ou com a energia

- Resistência encontrada por um corpo que se move sobre outro
- Atrito é a dissipação de energia entre dois corpos deslizantes

O uso do coeficiente de atrito implica em adotar a definição envolvendo a força (mecânica, gravitacional, eletromagnética, interatômica)

- É necessário que os dois corpos em contato sejam sólidos?
- Há necessidade de contato direto entre os corpos sólidos?

Stachowiak, G.W.; Batchelor, A.W. *Engineering Tribology*, 2005.
A. Sinatora; D.K. Tanaka, *Rev ABCM Eng* 01 out., 2007.

Tribologia - Fundamentos

Leis de atrito

Leis de atrito de Amontons-da Vinci e de Coulomb

- **A duas primeiras leis são atribuídas a Amontons e/ou Coulomb. Pelas contribuições de da Vinci, devem ser citadas como Leis de Atrito de Amontons-da Vinci**
- **1a Lei de Atrito:** A força de atrito é proporcional à força normal
- **2a Lei de Atrito:** A força de atrito é independente da área aparente de contato
- **A terceira lei é atribuída a Coulomb**
- **3a Lei de Atrito:** A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento

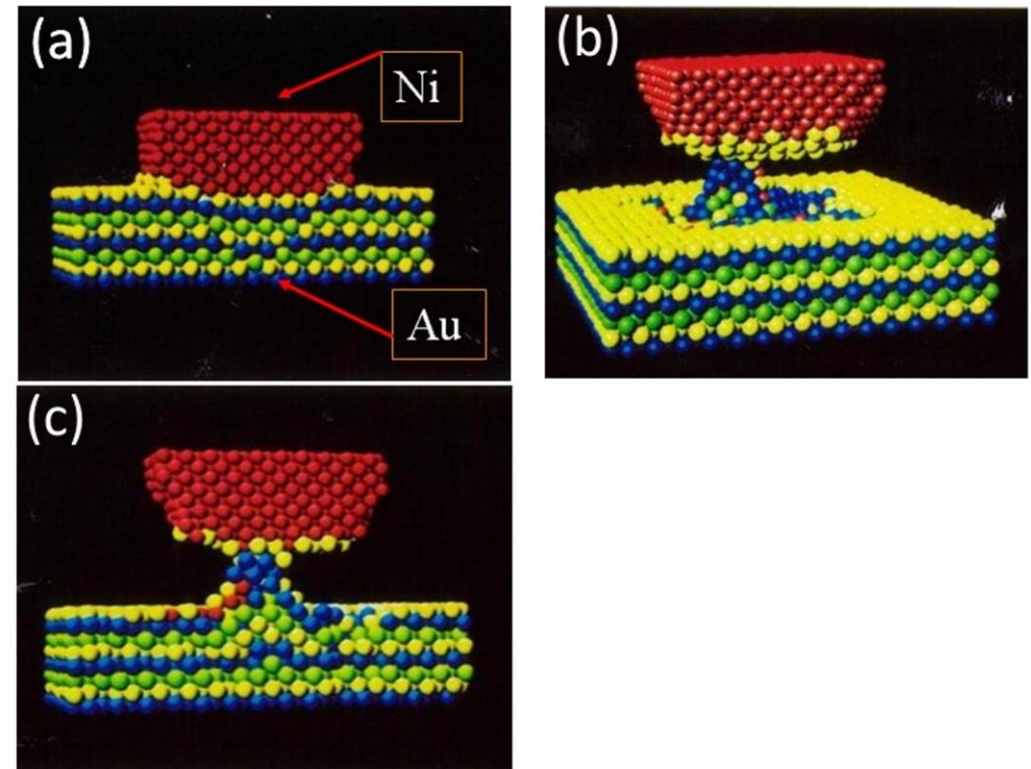
A. Sinatora; D.K. Tanaka, Rev ABCM Eng 01 out., 2007.

Tribologia - Fundamentos

Modelo de atrito de Bowden e Tabor

Modelo de atrito de Bowden e Tabor

- Considera a força de atrito devida à **força de adesão** entre as asperezas em contato e devida à **força de deformação** necessária para que uma aspereza de uma superfície mais dura "sulque" (*plough*) a aspereza da superfície mais mole
- A **adesão e transferência de material são favorecidas**:
 - superfícies **limpas** (livres de óxidos e livres de gases ou filmes adsorvidos)
 - **condições de ultra-alto vácuo**
 - **metais moles e dúcteis**



I.M. Hutchings, *Tribology - friction and wear of engineering materials*, 1992.
U. Landman, et al., *Science* 248.4954 (1990): 454.

Tribologia - Fundamentos

Modelo de atrito de Bowden e Tabor

Contato com mesmo metal, ar	Coefficiente de atrito estático
Au	2
Ag	0,8-1
Tin	1
Al	0,8-1,2
Cu	0,7-1,4
Metal contra aço (0,13%C), ar	Coefficiente de atrito estático
Ag	0,5
Al	0,5
Cu	0,8
Cu-40%Zn	0,2
Ferro fundido cinzento	0,4

O modelo de Bowden e Tabor

$$\begin{aligned}\mu &= \mu_{ades} + \mu_{def} \\ &= 0,2 + 0,1 \approx 0,3\end{aligned}$$

- As previsões do modelo diferem das **observações experimentais**

Críticas ao modelo de Bowden e Tabor

- o modelo não considera encruamento, crescimento de junção e aquecimento

I.M. Hutchings, *Tribology - friction and wear of engineering materials*, 1992.
M.J. Neale, *The tribology handbook*, 1995.

Tribologia - Fundamentos

Entender o significado de atrito não é uma tarefa fácil !

📄 O atrito (valores e fenômenos) depende de:

- Forças de adesão de origem interatômicas (eletrostáticas, Van de Waals, metálicas)
- Deformação elástica e plástica devida às forças mecânicas no contato
- Presença de lubrificantes e de terceiro corpo na interface de contato (, contaminantes, óxidos, filmes adsorvidos, partículas retidas, etc.
- Topografia das superfícies
- Química das superfícies
- Condições de contato (pressão, velocidade, temperatura)

📄 O coeficiente de atrito

- NÃO É CONSTANTE
- NÃO É UMA PROPRIEDADE DO MATERIAL
- É UMA PROPRIEDADE DO SISTEMA
- Entender é difícil, medir, afortunadamente é "relativamente fácil"

É só revisar o conceito de tribossistema e as variáveis envolvidas



I.M. Hutchings, *Tribology - friction and wear of engineering materials*, 1992.

Tribologia - Fundamentos

Desgaste

☞ O termo **desgaste** é definido como a **perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido**, devido à **ação mecânica**, ou seja, ao contato e movimento relativo **contra** um corpo **sólido, líquido ou gasoso**

☞ **Critérios de classificação do desgaste**

- Condições envolvidas na situação de desgaste (variáveis operacionais)
- Mecanismos físicos de remoção de material (mecanismos causadores do dano)
- Aparência das superfícies desgastadas (ou da trilha de desgaste)

I.M. Hutchings, *Tribology - friction and wear of engineering materials*, 1992.
K. H. Zum Gahr, *Microstructure and wear of materials*, Tribology Series, 10, 1987.



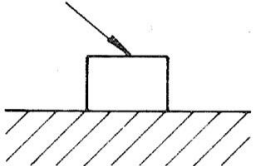
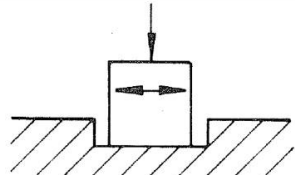
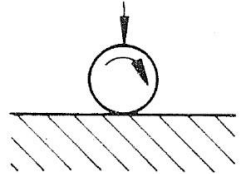
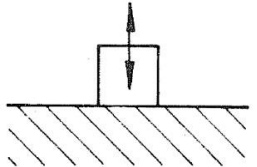
Tribologia - Fundamentos

Desgaste

Classificação do desgaste –

Variáveis operacionais

- Movimento relativo entre os corpos
- Estado físico do contracorpo
- Ângulo de ação do contracorpo
- Presença de elemento interfacial

Estado físico do contracorpo	Movimento	Termo Comum	Esquema
Corpo sólido	Deslizamento	Desgaste por deslizamento	
Corpo sólido	Deslizamento Alternado	Desgaste por deslizamento alternado	
Corpo sólido	Rolamento	Desgaste por rolamento	
Corpo sólido	Impacto	Desgaste por impacto	

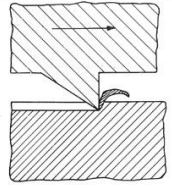
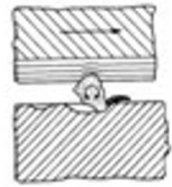
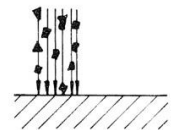
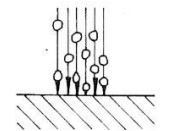
K. H. Zum Gahr, *Microstructure and wear of materials*, Tribology Series, 10, 1987.

Tribologia - Fundamentos

Desgaste

Classificação do desgaste – Variáveis operacionais

- Movimento relativo entre os corpos
- Estado físico do contracorpo
- Ângulo de ação do contracorpo
- Presença de elemento interfacial

Estado físico do contracorpo	Movimento	Termo Comum	Esquema
Corpo sólido ou partículas	Deslizamento	Desgaste abrasivo a dois corpos	
Corpo sólido ou partículas	Deslizamento e rolamento de partículas	Desgaste abrasivo a três corpos	
Líquido ou gás + partículas	Impacto	Desgaste erosivo	
Líquido ou gás + bolhas	Impacto	Desgaste por cavitação	

K. H. Zum Gahr, *Microstructure and wear of materials*, Tribology Series, 10, 1987.

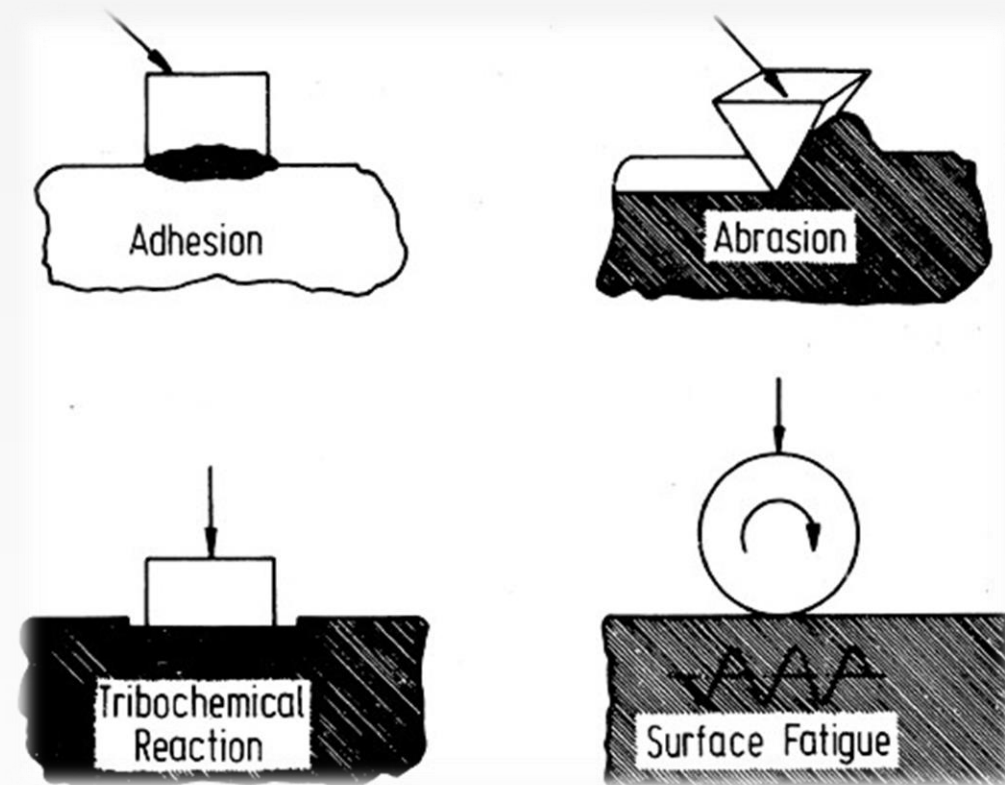
Tribologia - Fundamentos

Desgaste

📄 Classificação do desgaste –

Mecanismos de desgaste

- Aplicação em modelos de desgaste
- Identificação da dependência do desgaste com parâmetros (carga, geometria, velocidade, ambiente) incluídos nos modelos



K. H. Zum Gahr, *Microstructure and wear of materials*, Tribology Series, 10, 1987.

Tribologia - Fundamentos

Desgaste

📄 Classificação do desgaste – **Aparência da trilha de desgaste**

- Permite a comparação (e extrapolação) de uma situação de desgaste com outras
 - **Galling** ↔ *Desgaste adesivo*
 - **Scuffing** (ou *scoring*) ↔ *Desgaste adesivo*
 - **Seizure** ↔ *Desgaste adesivo (lubrificação)*
 - **Spalling** ↔ *Fadiga de contato*
 - *Fretting*
 - **Scratching** ↔ *Desgaste Abrasivo*
 - *Polishing*
 - Melting wear
 - Desgaste erosivo
 - Cavitação

K. H. Zum Gahr, *Microstructure and wear of materials*, Tribology Series, 10, 1987.
I.M. Hutchings, *Tribology - friction and wear of engineering materials*, 1992.

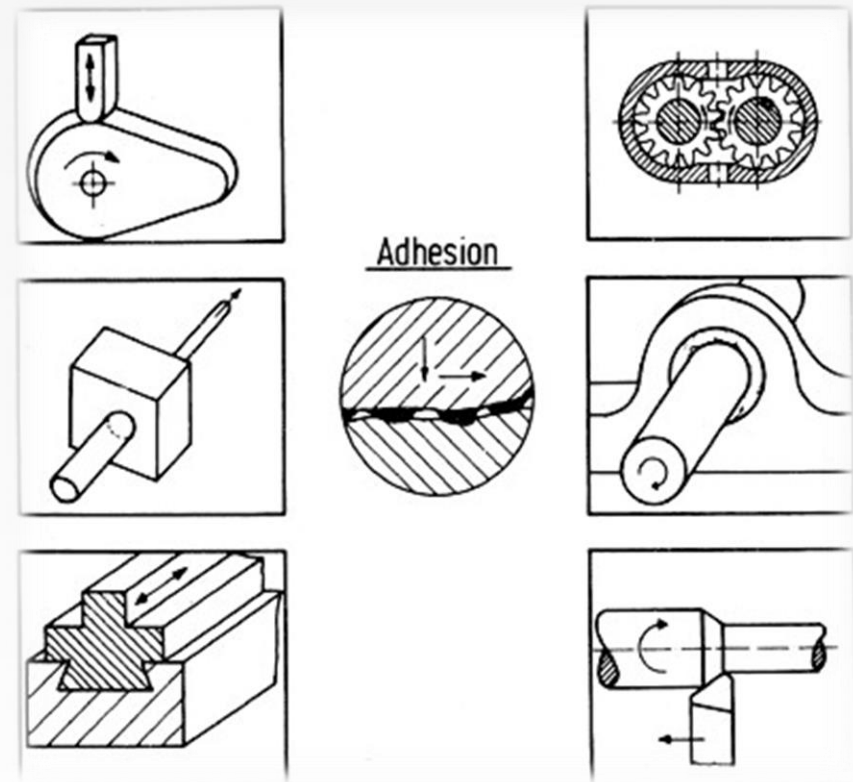


Tribologia - Fundamentos

Desgaste adesivo

Resultante das altas pressões de contato entre as asperezas de duas superfícies em deslizamento relativo, que produzem **deformação plástica, adesão,** formação e rompimento de junções e **transferência** de material entre as superfícies

Exemplos práticos: usinagem, forjamento, trefilação, engrenagens, etc.



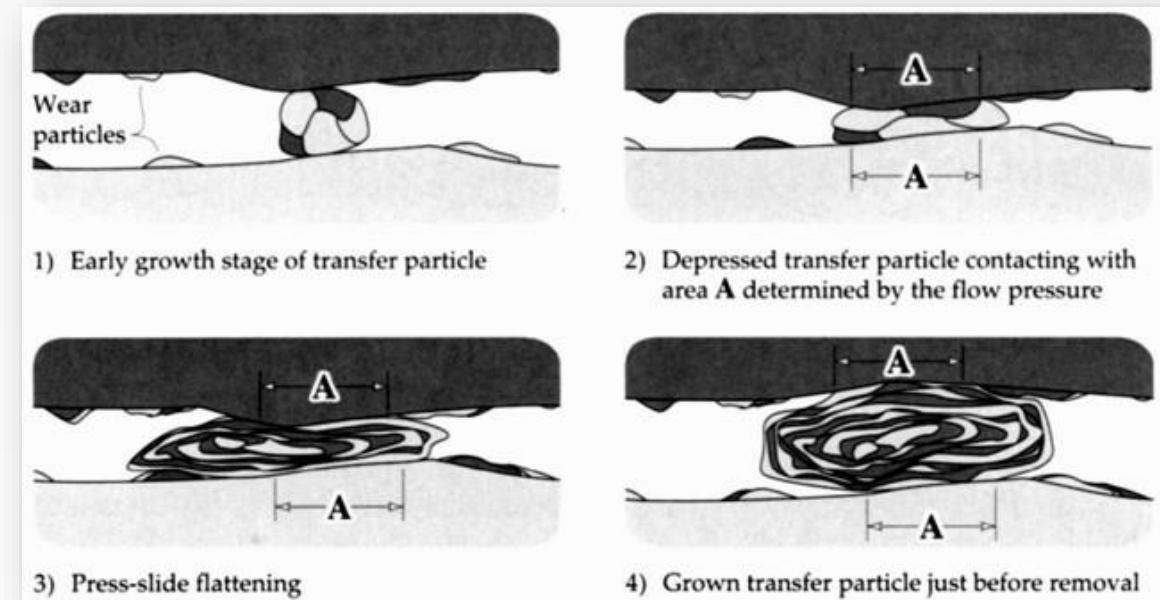
K. H. Zum Gahr, *Microstructure and wear of materials*, Tribology Series, 10, 1987.
I.M. Hutchings, *Tribology - friction and wear of engineering materials*, 1992.

Tribologia - Fundamentos

Desgaste adesivo

Resultante das altas pressões de contato entre as asperezas de duas superfícies em deslizamento relativo, que produzem **deformação plástica, adesão,** formação e rompimento de junções e **transferência** de material entre as superfícies

Fenômenos envolvidos: adesão, deformação, destacamento, transferência, encruamento, riscamento



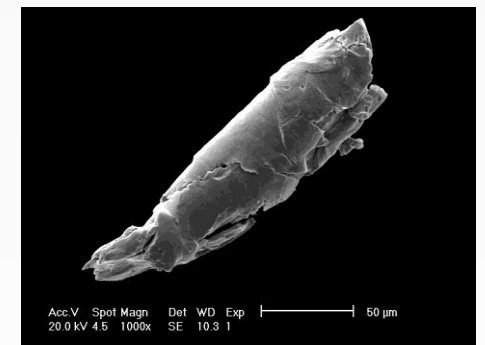
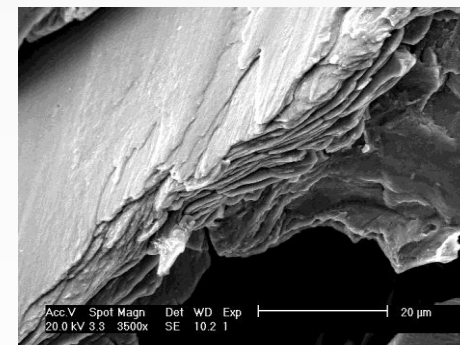
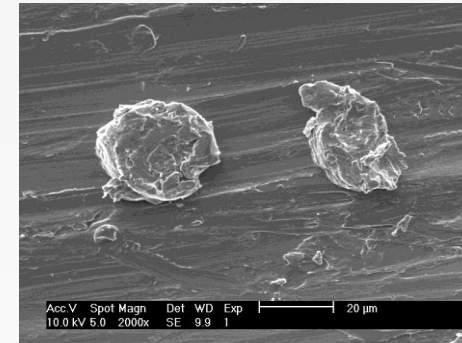
G.W. Stachowiak; A.W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 2005.

Tribologia - Fundamentos

Desgaste adesivo

Resultante das altas pressões de contato entre as asperezas de duas superfícies em deslizamento relativo, que produzem **deformação plástica, adesão,** formação e rompimento de junções e **transferência** de material entre as superfícies

Fenômenos envolvidos: adesão, deformação, destacamento, transferência, encruamento, riscamento



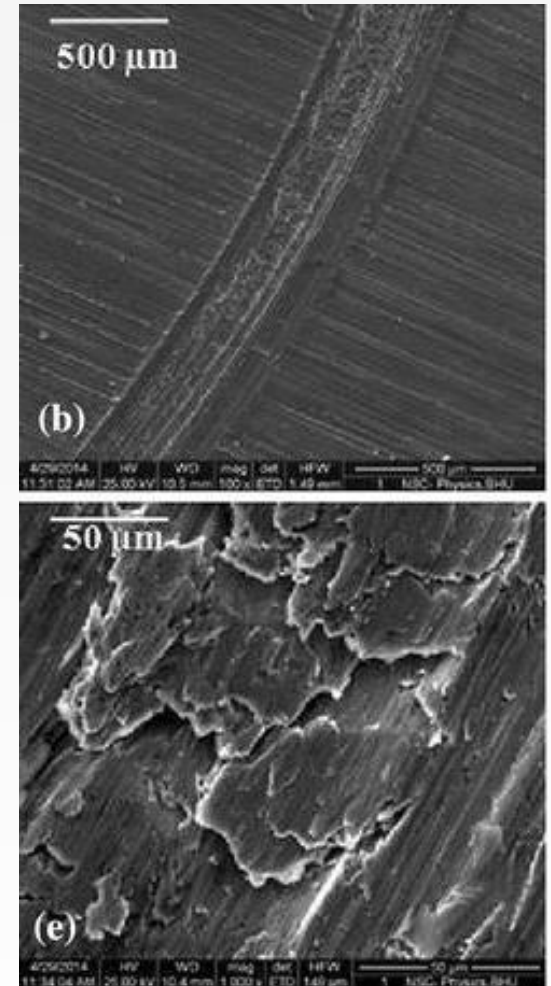
I.M. Hutchings, *Tribology - friction and wear of engineering materials*, 1992.
M.C.M. Farias et al. *Wear* 263, 773 – 781, 2007.

Tribologia - Fundamentos

Desgaste

- **Galling** ↔ *Desgaste adesivo*
- **Scuffing** (ou *scoring*) ↔ *Desgaste adesivo*
- **Seizure** ↔ *Desgaste adesivo (lubrificação)*
- **Spalling** ↔ *Fadiga de contato*
- *Fretting*
- **Scratching** ↔ *Desgaste Abrasivo*
- *Polishing*
- *Melting wear*
- *Desgaste erosivo*
- *Cavitação*

Galling



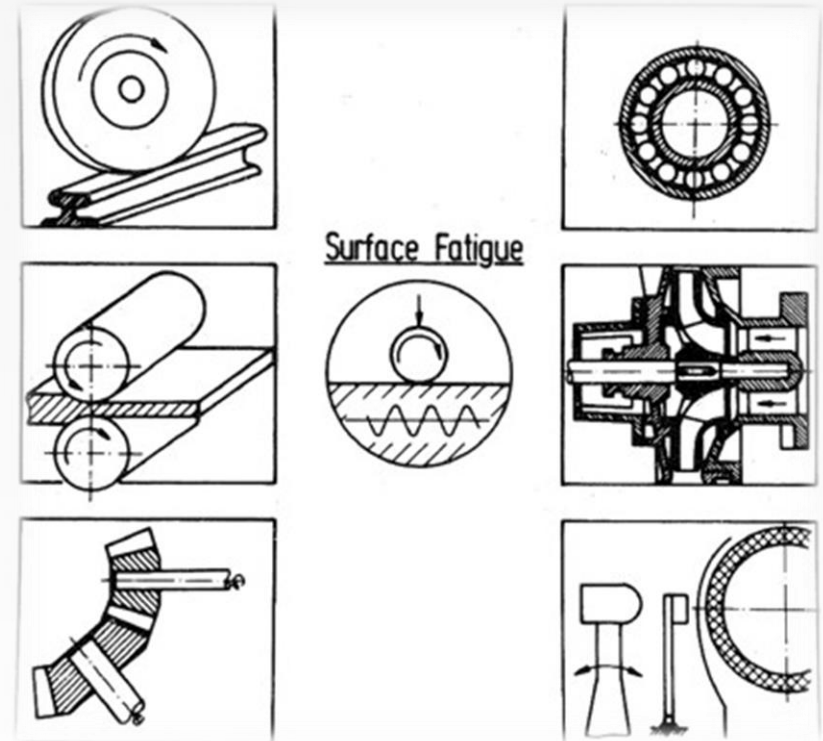
A.P. Harsha, et al., *JMEPEG* 25, 4980 – 4987, 2016.

Tribologia - Fundamentos

Desgaste por fadiga de contato

Formação de **trincas** nas **superficiais** e **subsuperfícies**, devido à ação de **tensões cíclicas** presentes nas superfícies em contato por deslizamento ou rolamento e que resultam na remoção de material

Exemplos práticos: laminação, trilhos e rodas de trem, eixos, bombas, rolamentos, etc.

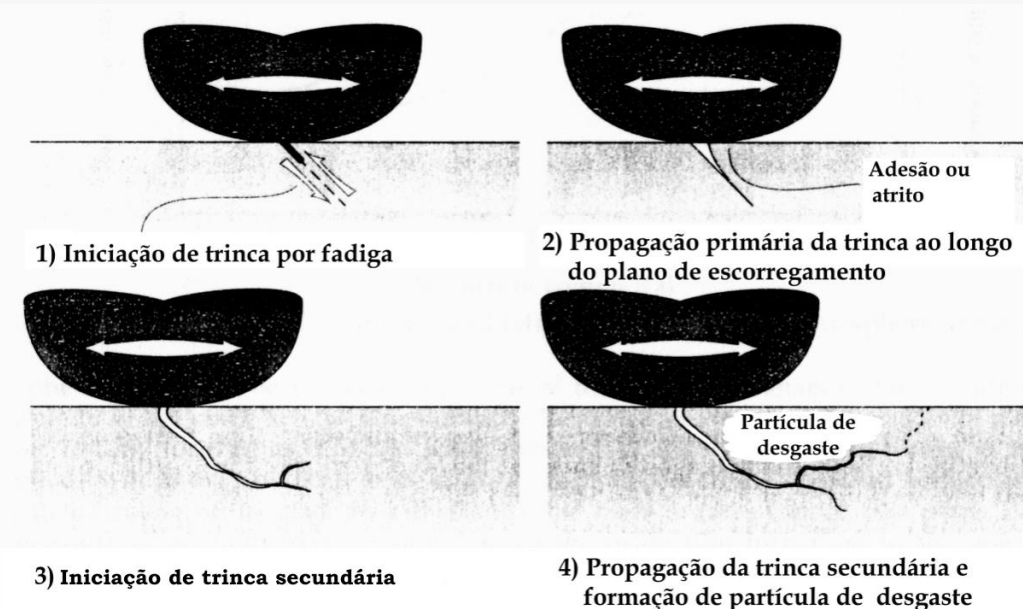


K. H. Zum Gahr, *Microstructure and wear of materials*, Tribology Series, 10, 1987.
I.M. Hutchings, *Tribology - friction and wear of engineering materials*, 1992.

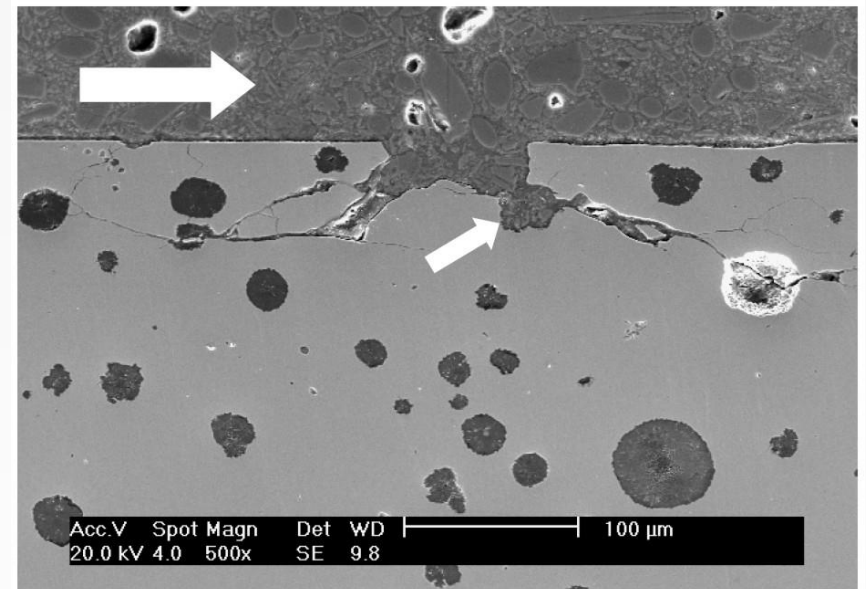
Tribologia - Fundamentos

Desgaste por fadiga de contato

Formação de **trincas** nas **superficiais** e **subsuperfícies**, devido à ação de **tensões cíclicas** presentes nas superfícies em contato por deslizamento ou rolamento e que resultam na remoção de material



G.W. Stachowiak; A.W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 2005.



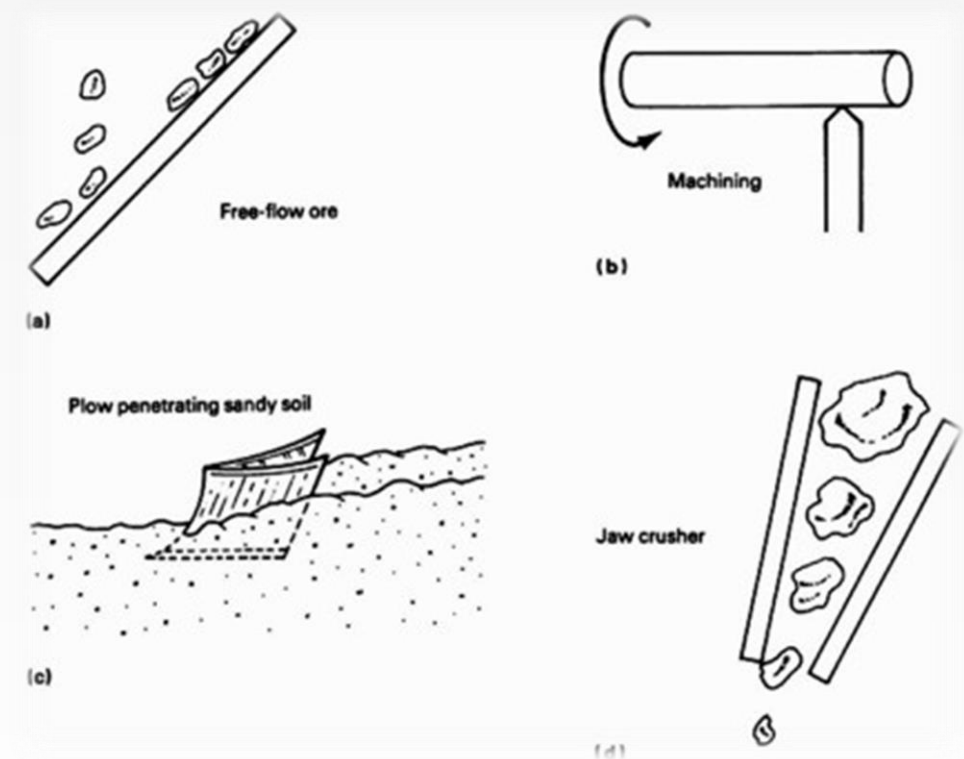
Neves, J.C.K. *Desenvolvimento de um Equipamento para Ensaio de Fadiga de Contato Esfera sobre Plano e sua Aplicação na Caracterização de Ferros Fundidos com Matrizes de Elevada Dureza*. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 2006.

Tribologia - Fundamentos

Desgaste abrasivo

Remoção de material por **riscamento**, produzido por **partículas duras** ou **protuberâncias duras** que são forçadas e se movimentam contra uma superfície sólida

Exemplos práticos: moinhos, britadores, ferramentas de usinagem, matrizes de compactação de pó, etc.



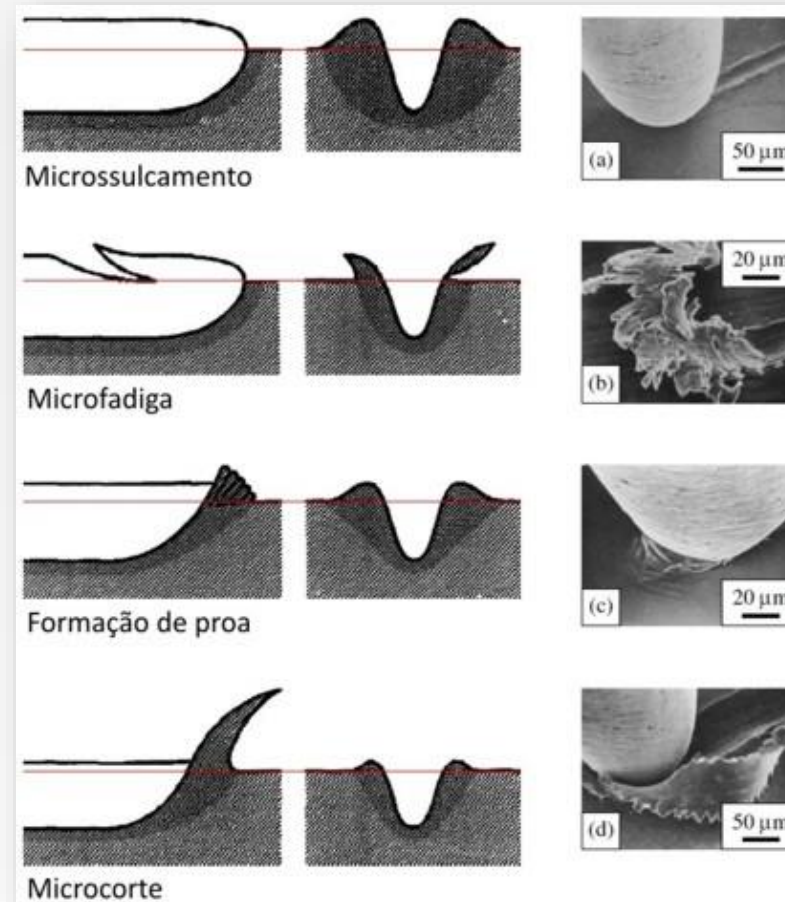
K. H. Zum Gahr, *Microstructure and wear of materials*, Tribology Series, 10, 1987.

I.M. Hutchings, *Tribology - friction and wear of engineering materials*, 1992.

Tribologia - Fundamentos

Desgaste abrasivo

Mecanismos de desgaste abrasivo



K. Hokkirigawa; K. Kato, Tribology International 21, 51 – 57, 1988.

Tribologia - Fundamentos

Desgaste por reação triboquímica

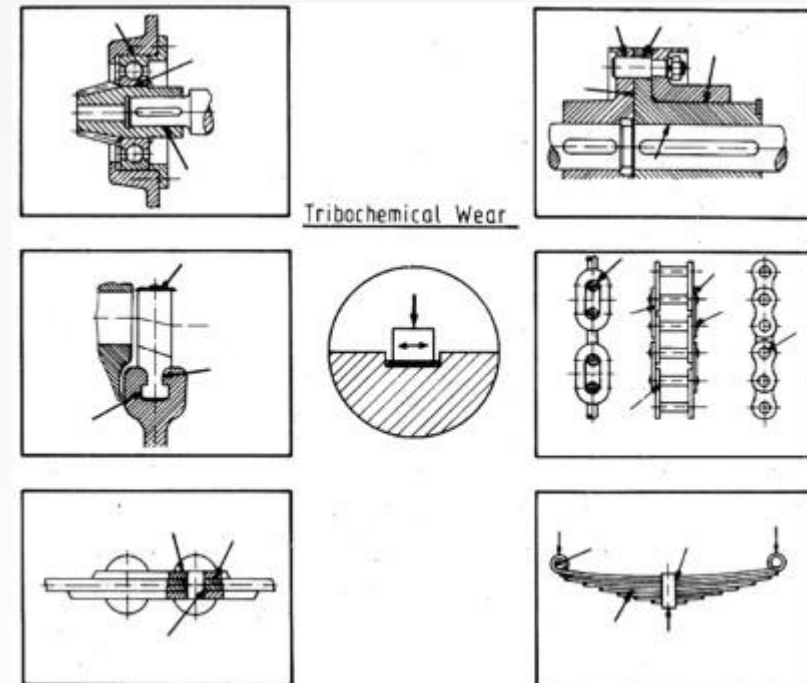
Formação de **produtos de reação**

química como resultado da **interação**

química da superfície com um **ambiente**

corrosivo ou oxidativo

Exemplos práticos: elementos de fixação ou selagem, molas, juntas rebitadas, etc.



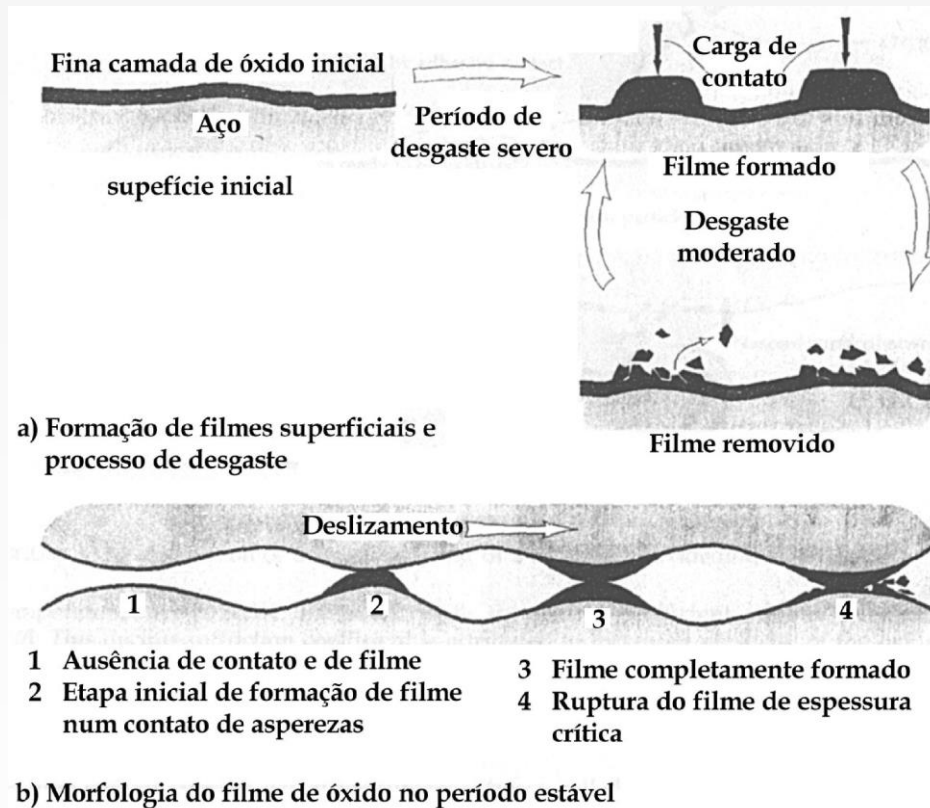
K. H. Zum Gahr, *Microstructure and wear of materials*, Tribology Series, 10, 1987.

I.M. Hutchings, *Tribology - friction and wear of engineering materials*, 1992.

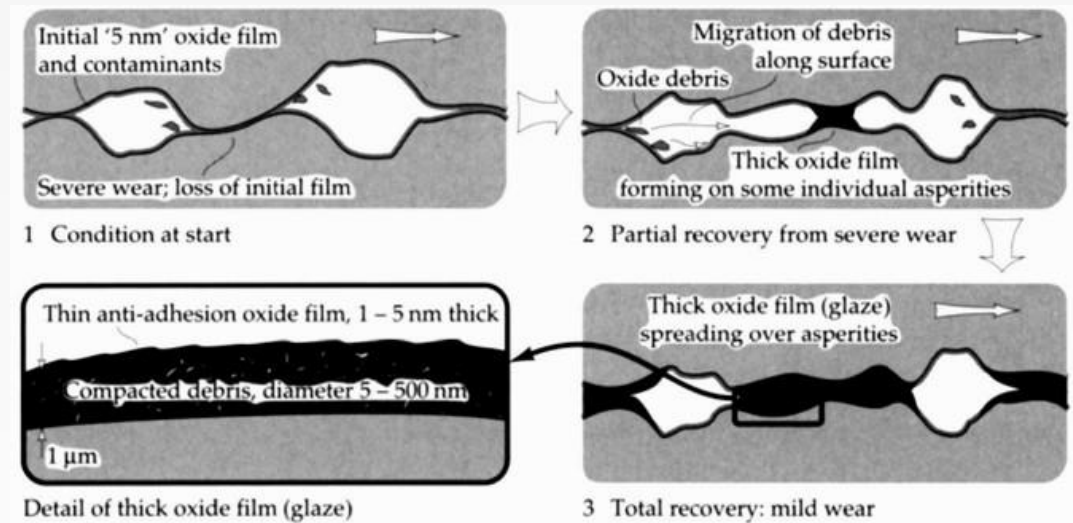
Tribologia - Fundamentos

Desgaste por reação triboquímica

📄 Mecanismos de desgaste oxidativo – velocidades elevadas



📄 Mecanismos de desgaste oxidativo – baixas velocidades

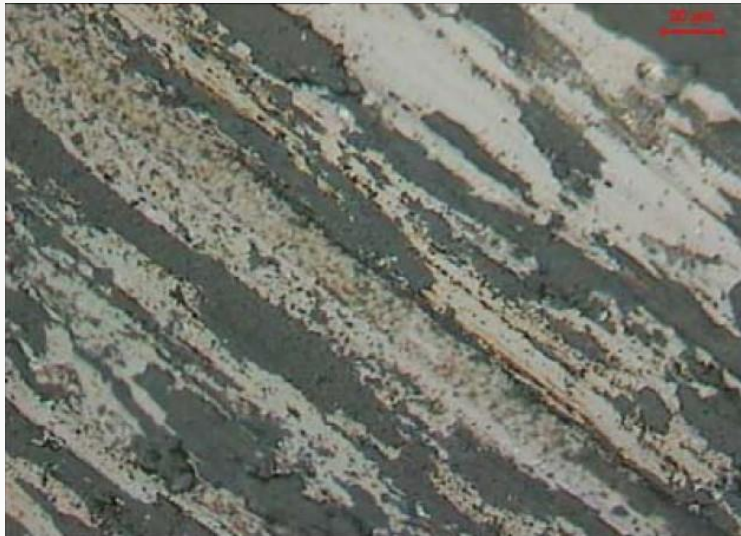


G.W. Stachowiak; A.W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 2005.

Tribologia - Fundamentos

Desgaste por reação triboquímica

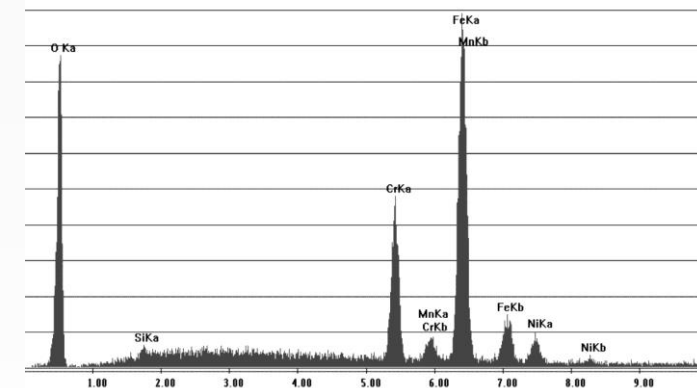
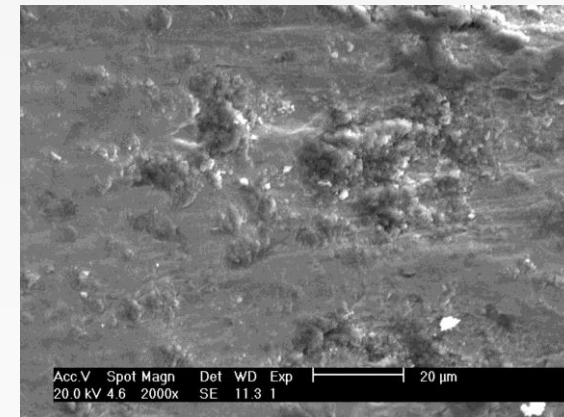
- 📄 **Mecanismos de desgaste oxidativo –** altas velocidades – *Nucleação e crescimento de camada de óxido*



E.P. Matamoros, *Modelo de desgaste oxidativo baseado em parâmetros termodinâmicos*. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 2004.

M.C.M. Farias et al. *Wear* 263, 773 – 781, 2007.

- 📄 **Mecanismos de desgaste oxidativo –** baixas velocidades – *Oxidação de partículas metálicas*



Tribologia - Fundamentos

Modelo de Archard para o desgaste por deslizamento

- É um modelo muito utilizado, pela sua simplicidade analítica
- Considera as principais variáveis que afetam o desgaste por deslizamento
- Descreve a severidade do desgaste
- Pode ser aplicado em outros mecanismos de desgaste
- O **volume de desgaste por unidade de distância** de deslizamento depende da **carga normal** (W) e da **dureza** (H) do material mais mole

$$\frac{V}{S} = K \frac{W}{H} = kW$$

- K : coeficiente de desgaste**
 - É adimensional; < 1 .
 - Indica a severidade do desgaste em diferentes tribossistemas
- k : coeficiente dimensional de desgaste ou coeficiente de desgaste específico**
 - em $\text{mm}^3(\text{N.m})^{-1}$
 - Representa o volume de material removido pelo desgaste por unidade de distância de deslizamento (em m), por unidade de carga normal de contato (em N)
 - Permite comparar as taxas de desgaste de diferentes materiais

I.M. Hutchings, *Tribology - friction and wear of engineering materials*, 1992.
J.F. Archard; W. Hirst. *Proceedings of the Royal Society of London A* 236, 397 – 410, 1956.

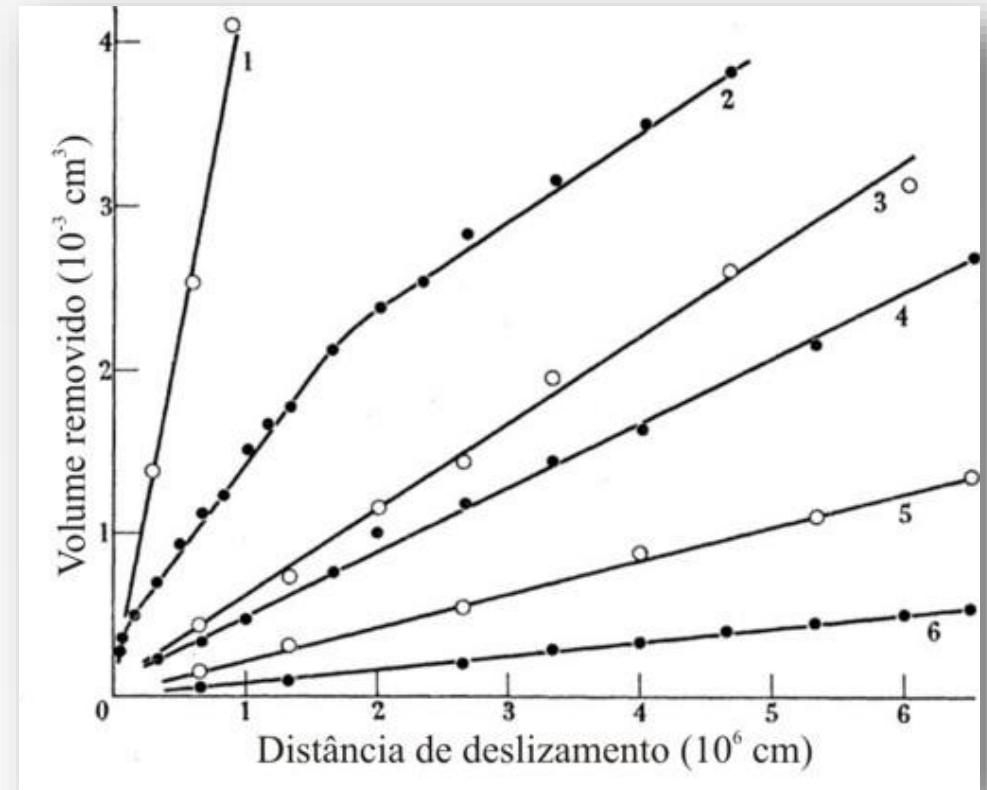
Tribologia - Fundamentos

Modelo de Archard para o desgaste por deslizamento

Interpretação de K da equação de Archard

- **Probabilidade** de que cada contato de aspereza resulte na **formação de uma partícula de desgaste**
- **Número de ciclos de deformação** antes de que um fragmento de material seja removido por um processo de fadiga
- **Tamanho de uma partícula de desgaste** produzida por cada contato de asperezas
- A **razão** entre a "**área de desgaste**"(V/s) e a **área de contato** (W/H)

$$\frac{V}{S} = K \frac{W}{H} = kW$$



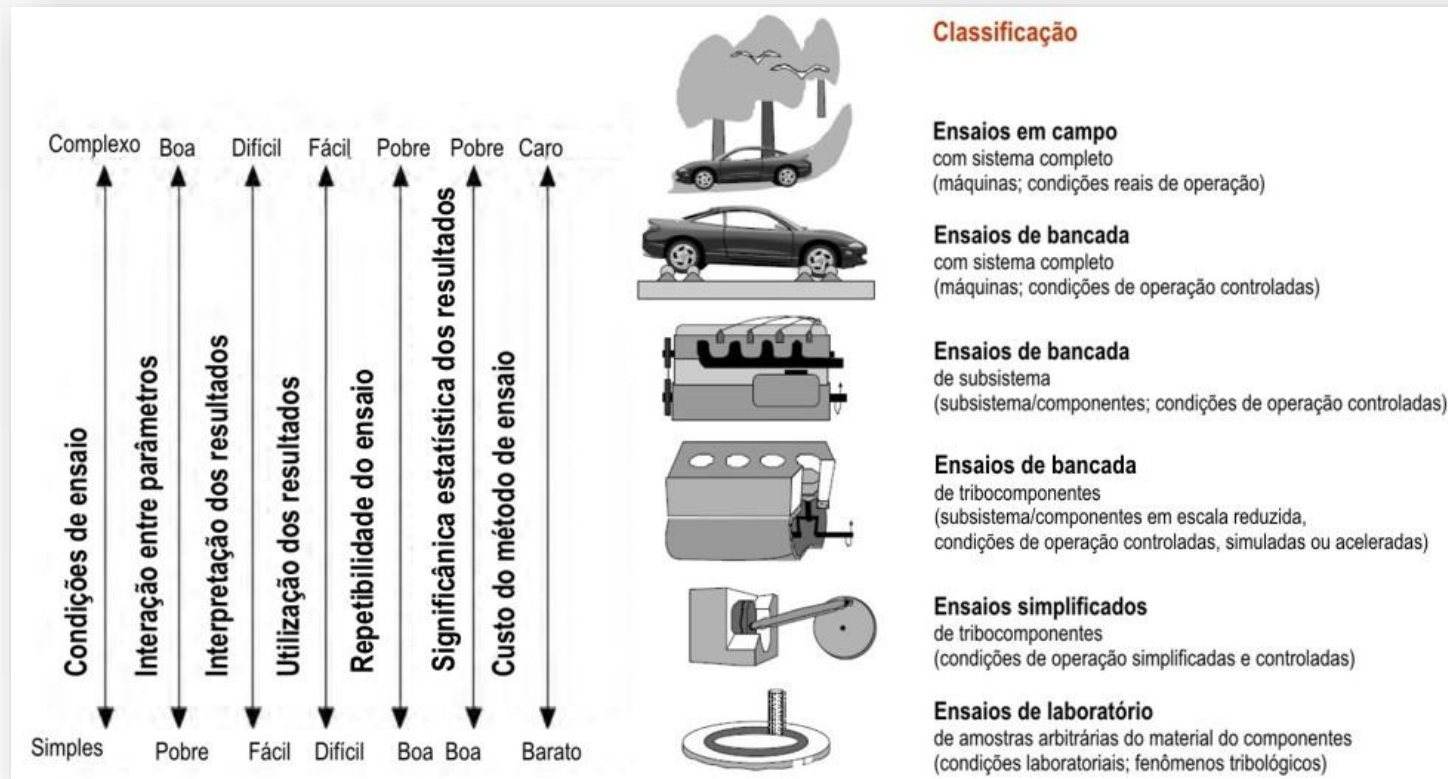
I.M. Hutchings, *Tribology - friction and wear of engineering materials*, 1992.

J.F. Archard; W. Hirst. *Proceedings of the Royal Society of London A* 236, 397 – 410, 1956.

Tribologia - Fundamentos

Ensaio Tribológicos

Os ensaios tribológicos podem ser classificados de acordo com a estrutura e função da tribomáquina, do tribossistema, do tribocomponente ou da amostra em estudo (grau de proximidade com a realidade)



B. Bhushan, *Modern Tribology Handbook*, 2000.

Tribologia - Fundamentos

Ensaio Tribológicos

ensaio de campo



a) prensa hidráulica industrial. Força máxima de 140 MN (MURAI et al. 2008)

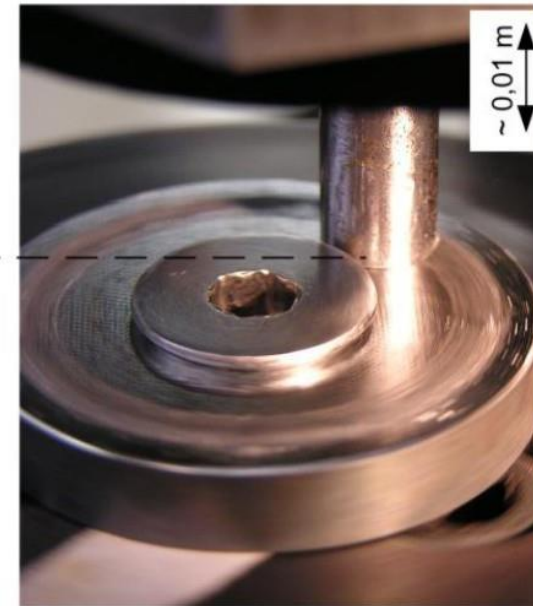
ensaio em escala reduzida



b) prensa hidráulica laboratorial. Força máxima de 1,47 MN

Tribômetro

ensaio de laboratório

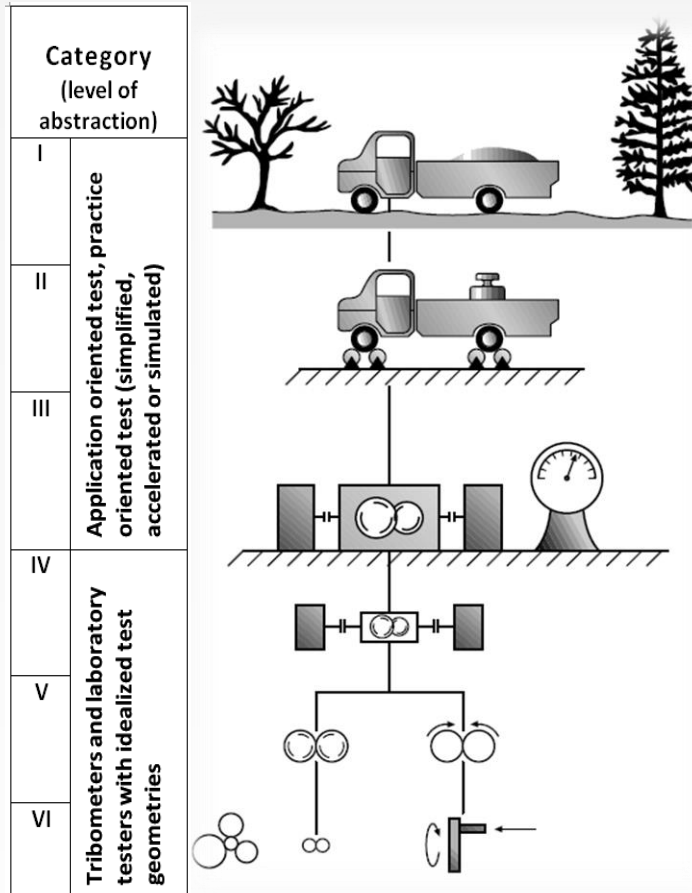


c) ensaio pino sobre disco. Força máxima de 0,00015 MN

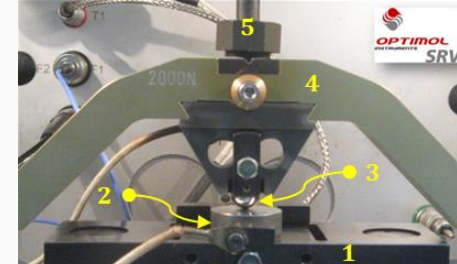
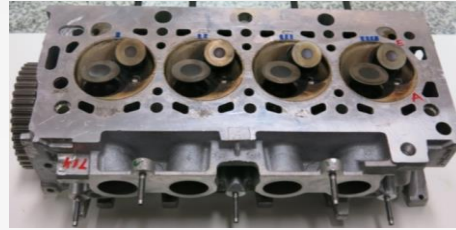
M.V. Leite, *Conformação mecânica: efeito da topografia na transferência de material e no atrito* Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 2010.

Tribologia - Fundamentos

Ensaio Tribológicos



D. H. Zum Gahr, *Microstructure and wear of materials*, Tribology Series, 10, 1987.



Estudo tribológico de válvulas e sedes de válvulas de motores flex-fuel



Tribômetro

D. A. Z. Durango, *Influência da temperatura, velocidade e força no desgaste e no coeficiente de atrito de materiais para válvulas e sedes de válvulas de motores flex-fuel*. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 2016.

Tribologia - Fundamentos

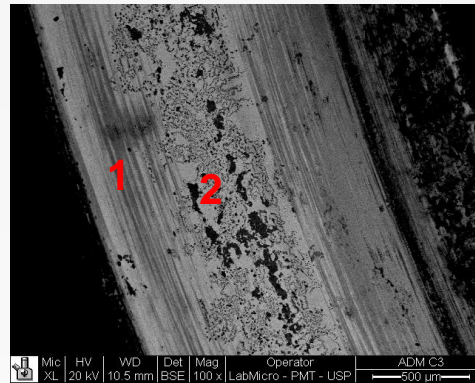
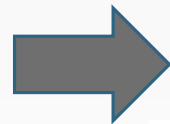
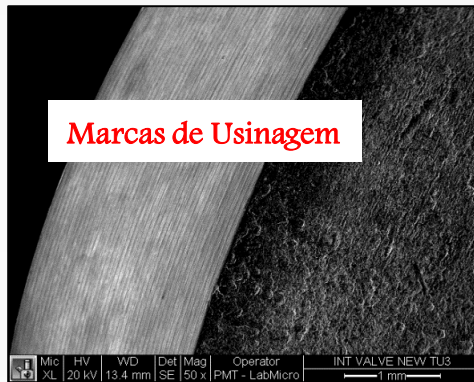
Ensaio Tribológicos

Estudo tribológico de válvulas e sedes de válvulas de motores flex-fuel



MT1-Admissão

Válvulas novas



Válvulas desgastadas



MT1-Escape

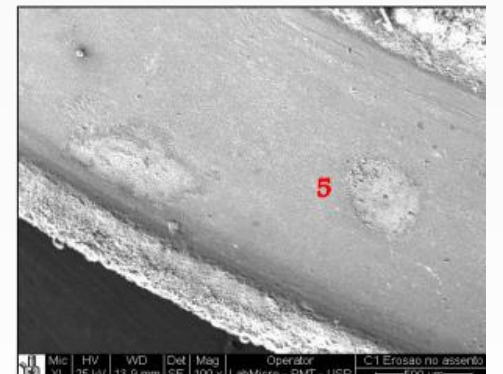
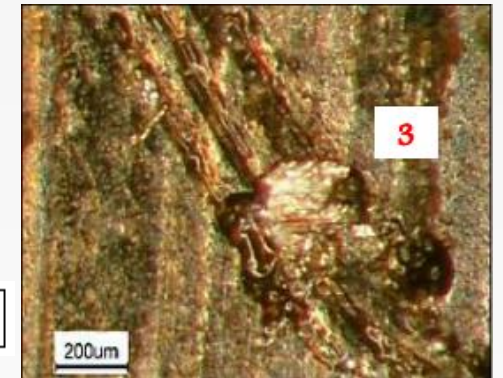
1 - Riscos de Usinagem

2 - Faixa central desgastada

3 - Endentação

4 - Oxidação

5 - Depósito



D. A. Z. Durango, *Influência da temperatura, velocidade e força no desgaste e no coeficiente de atrito de materiais para válvulas e sedes de válvulas de motores flex-fuel*. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 2016.

Tribologia - Fundamentos

Ensaio Tribológicos

Estudo tribológico de válvulas e sedes de válvulas de motores flex-fuel

✓ Controle de:

Carga: até 2000 N

Temperatura: até 900° C

Frequência: 1- 511 Hz

Amplitude: até 5 mm

✓ Resultados:

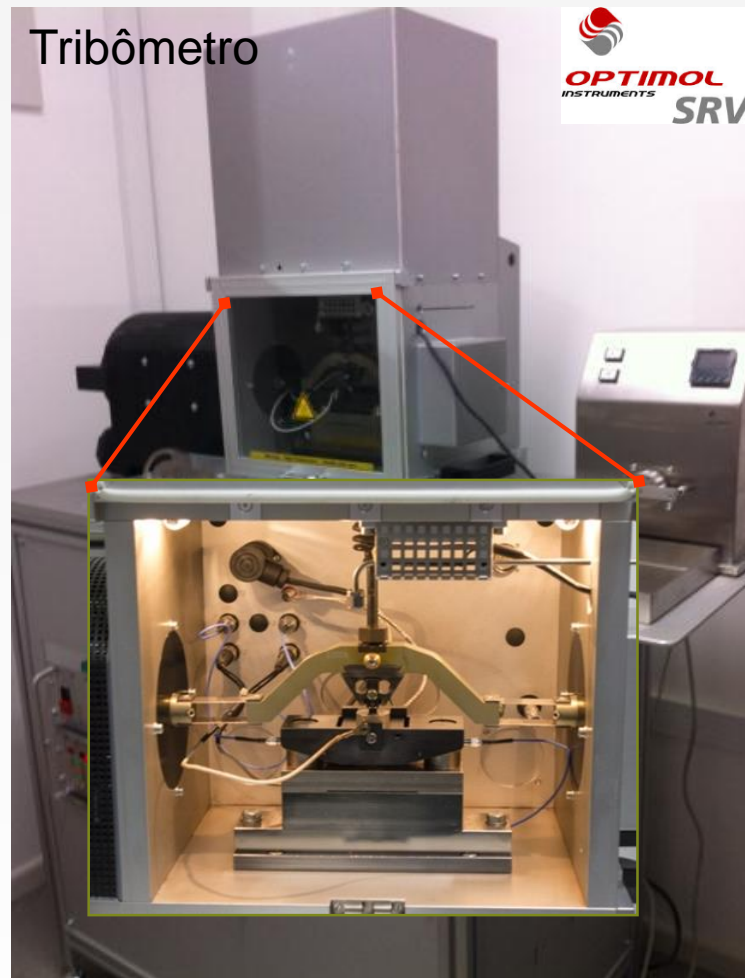
Atrito

Desgaste

Condições Ambientais:

Umidade Relativa

Temperatura Câmara

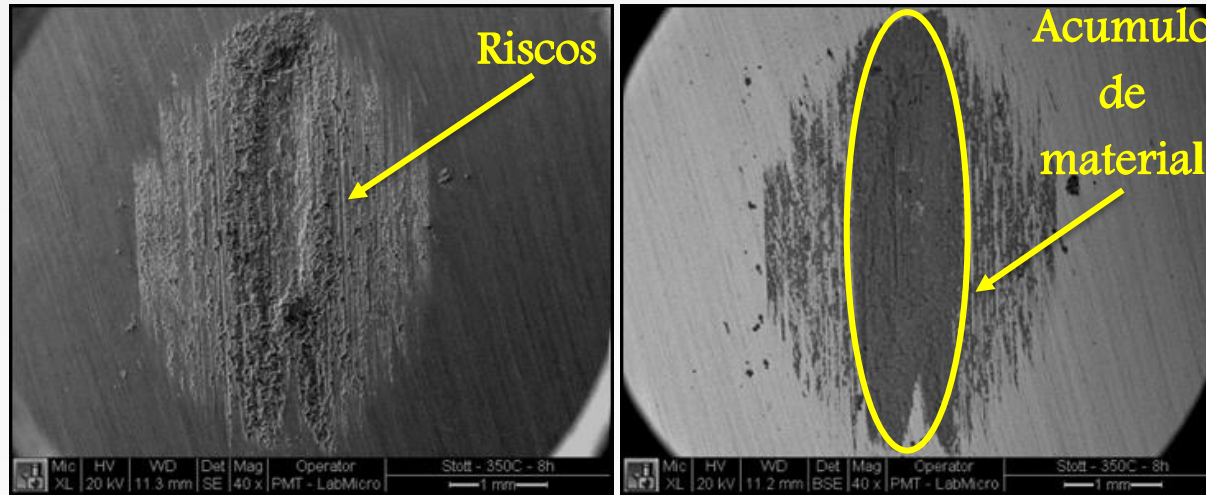


D. A. Z. Durango, *Influência da temperatura, velocidade e força no desgaste e no coeficiente de atrito de materiais para válvulas e sedes de válvulas de motores flex-fuel*. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 2016.

Tribologia - Fundamentos

Ensaio Tribológicos

Disco

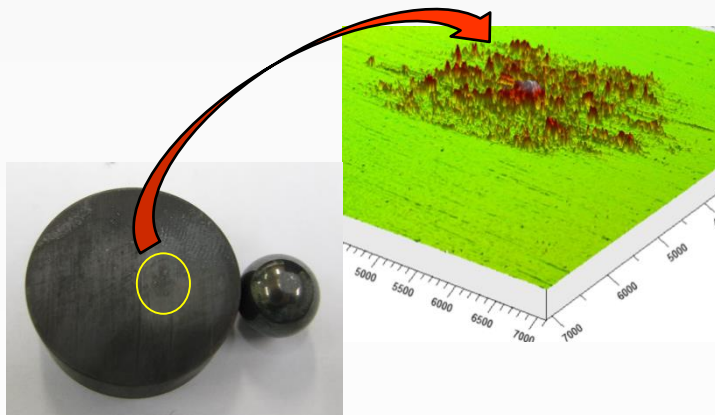


Estudo tribológico de válvulas e sedes de válvulas de motores flex-fuel

350°C

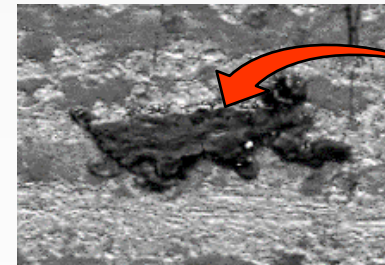
Abrasão

Oxidação



Óxidos identificados
Hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)

Magnetita (Fe_3O_4)



D. A. Z. Durango, *Influência da temperatura, velocidade e força no desgaste e no coeficiente de atrito de materiais para válvulas e sedes de válvulas de motores flex-fuel*. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 2016.

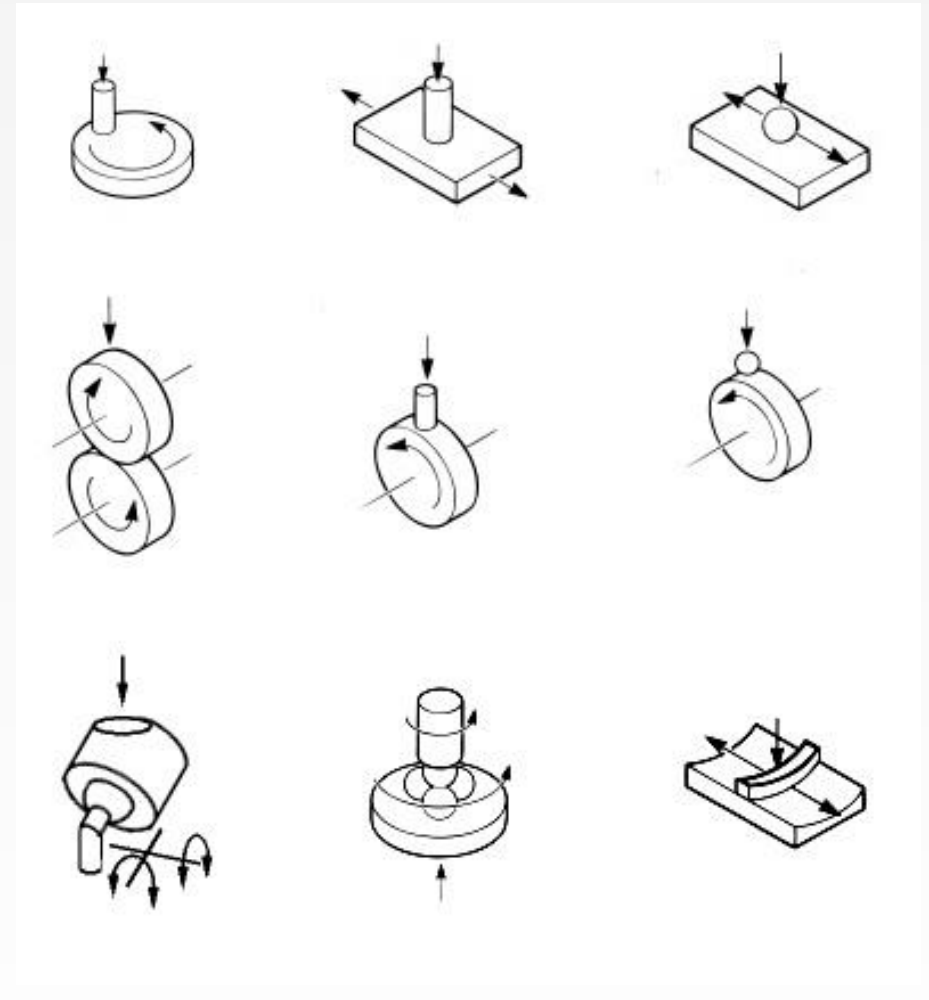
Tribologia - Fundamentos

Ensaio Tribológicos

Algumas Configurações de Ensaio Tribológicos Laboratoriais

– Ensaio de desgaste por deslizamento e por rolamento

- Permitem estudo de condições de contato por deslizamento e rolamento
- Não são usados para estudo de algum mecanismo de desgaste específico
- É possível o aparecimento de variados mecanismos de remoção de material (ex. adesão, fadiga superficial, abrasão, reação triboquímica, etc.)

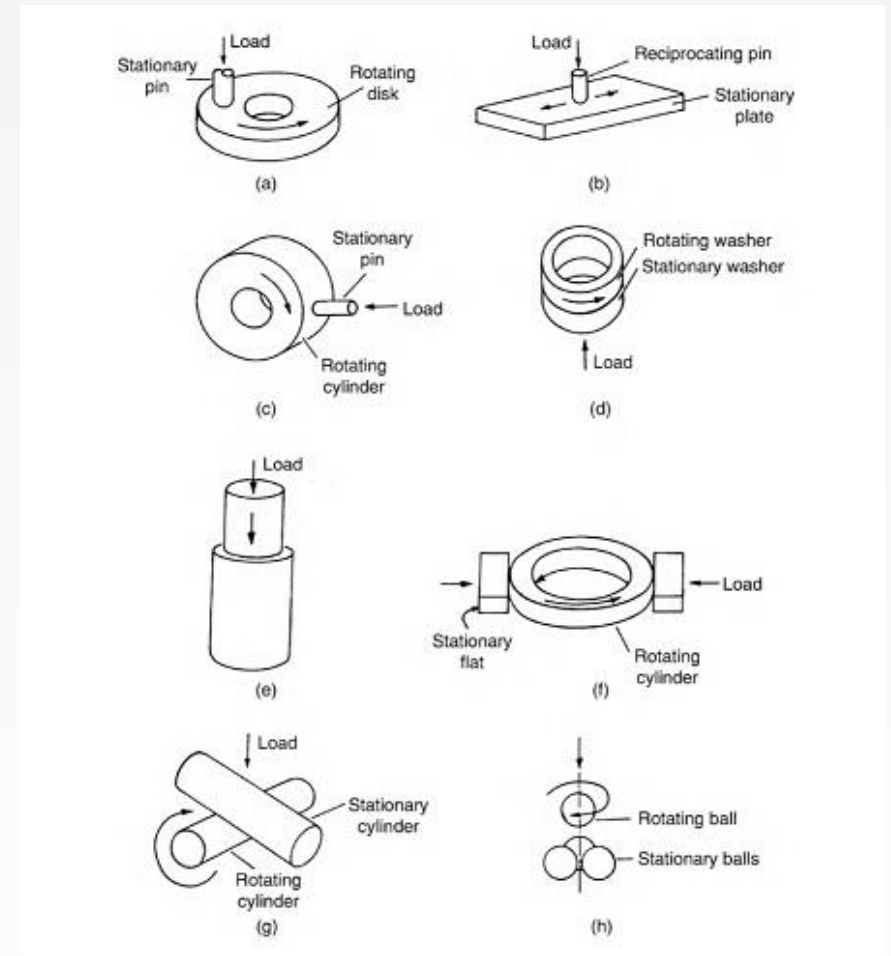


Tribologia - Fundamentos

Ensaio Tribológicos

Algumas Configurações de Ensaio Tribológicos Laboratoriais

- Ensaio de desgaste por deslizamento e por rolamento
 - Permitem estudo de condições de contato por deslizamento e rolamento
 - Não são usados para estudo de algum mecanismo de desgaste específico
 - É possível o aparecimento de variados mecanismos de remoção de material (ex. adesão, fadiga superficial, abrasão, reação triboquímica, etc.)



B. Bhushan, *Introduction to tribology*, 2013.

Tribologia - Fundamentos

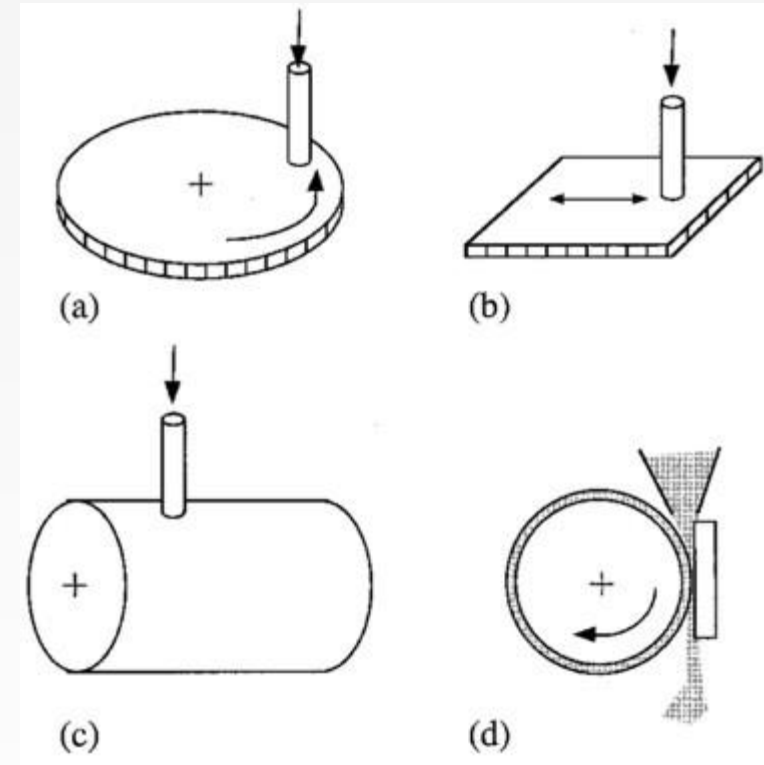
Ensaio Tribológicos

Algumas Configurações de Ensaio

Tribológicos Laboratoriais

– Ensaio de desgaste abrasivo

- A evolução do desgaste abrasivo depende fortemente das propriedades (dureza, tamanho, forma, grau de liberdade) das partículas abrasivas a serem utilizadas no ensaio
- O tipo de abrasivo é um fator importante na seleção da configuração do ensaio de abrasão



B. Bhushan, *Introduction to tribology*, 2013.

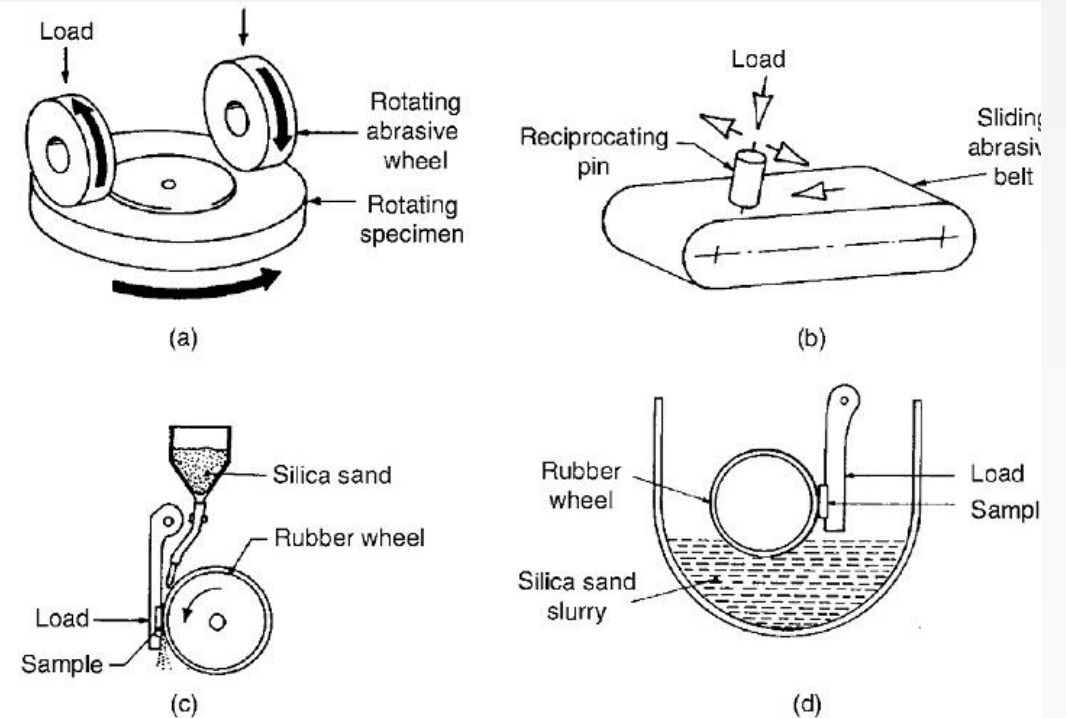
Tribologia - Fundamentos

Ensaaios Tribológicos

Algunas Configurações de Ensaaios Tribológicos Laboratoriais

– Ensaaios de desgaste abrasivo

- A evolução do desgaste abrasivo depende fortemente das propriedades (dureza, tamanho, forma, grau de liberdade) das partículas abrasivas a serem utilizadas no ensaio
- O tipo de abrasivo é um fator importante na seleção da configuração do ensaio de abrasão



Schematic illustrations of abrasion test apparatuses: (a) two abrader wheels weighted on test specimen driven in opposite directions in the Taber abrasion test apparatus, (b) abrasive belt test apparatus, (c) dry-sand abrasion test apparatus, (d) wet-sand abrasion test apparatus

B. Bhushan, *Introduction to tribology*, 2013.

Tribologia - Fundamentos

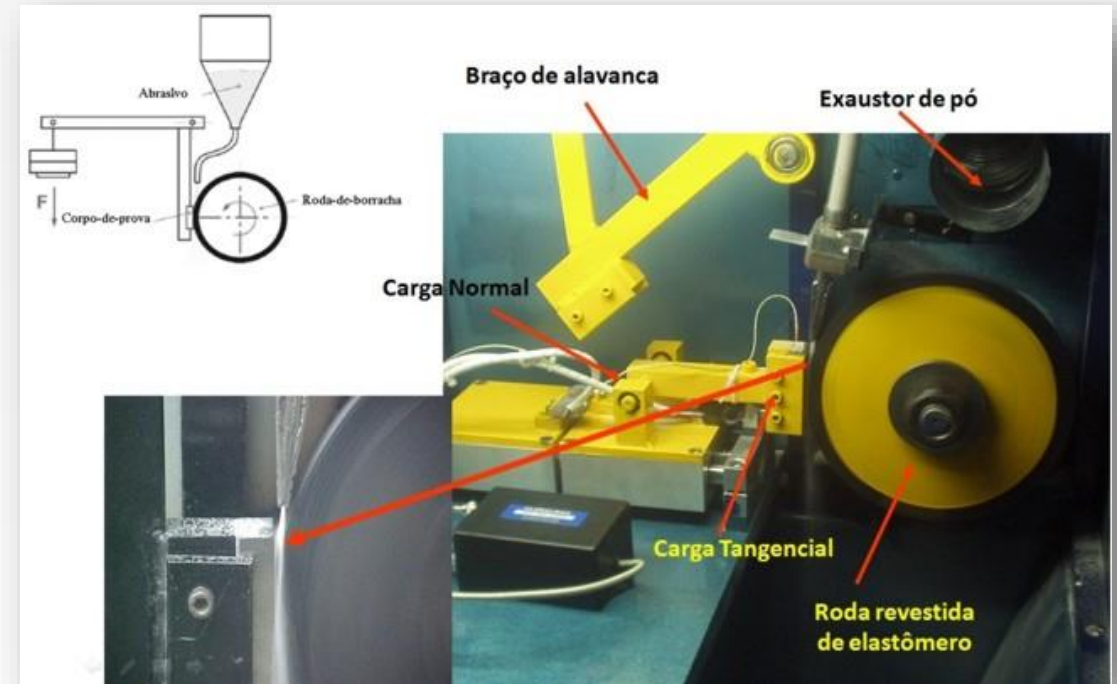
Ensaio Tribológicos

Ensaio de desgaste abrasivo



Tribômetro

Esfera rotativa livre – Calotest (CSM Instruments)



Tribômetro

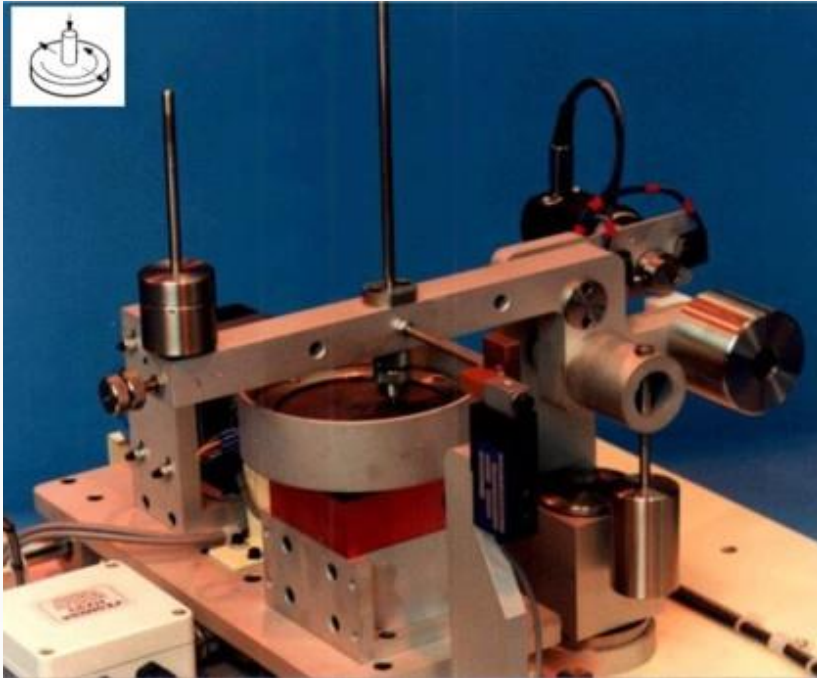
Roda de borracha (Villabón, 2006)

L. Villabón; A. Sinatora. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões ISSN 122, 922, 2006.

Tribologia - Fundamentos

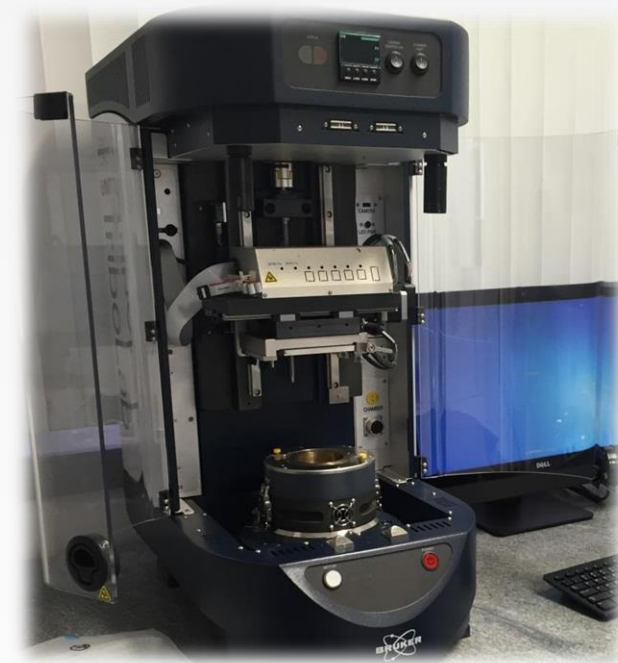
Ensaio Tribológicos

Ensaio de desgaste por deslizamento



Tribômetros

PLINT – Phoenix Tribology Ltd

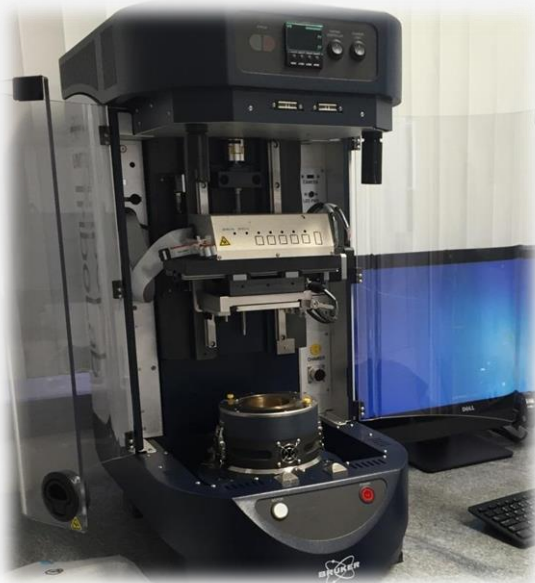


Tribômetro BRUKER

Projeto Pavimentos Tribológicos - SCIT 52/2013

Tribologia - Fundamentos

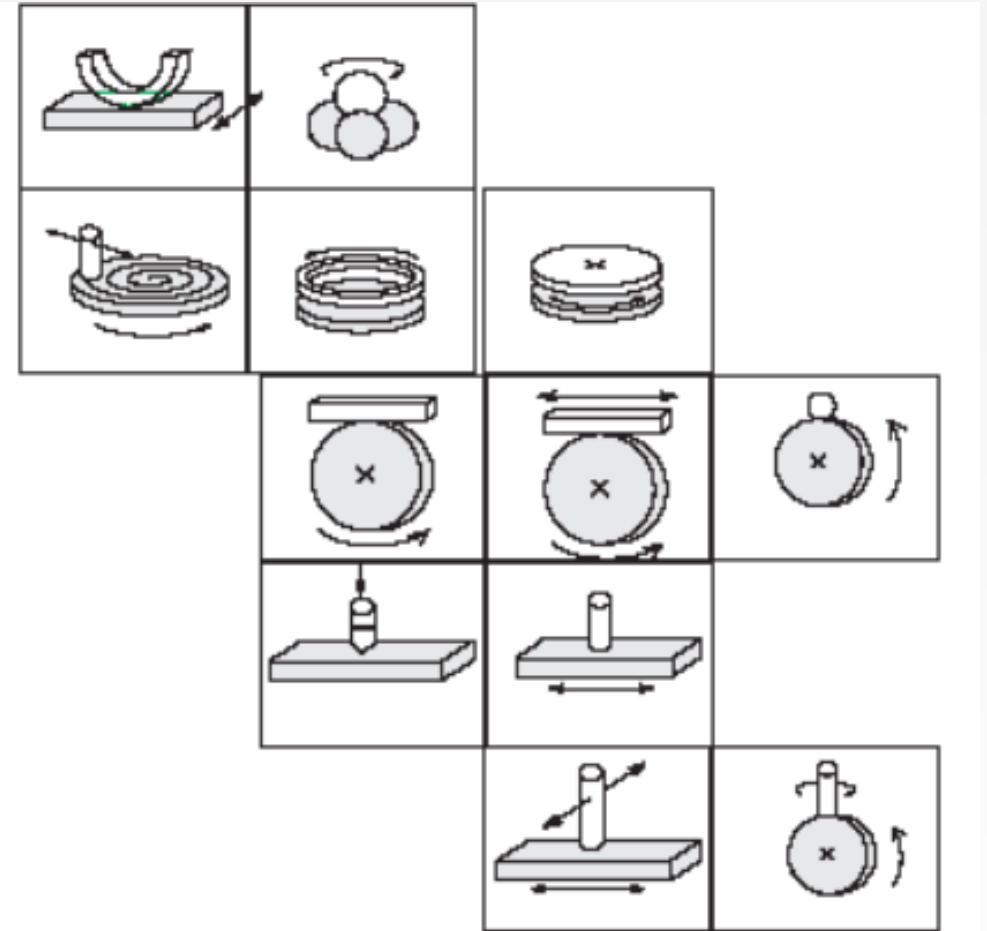
Ensaio Tribológicos



**Tribômetro
UMT Tribolab
Bruker**

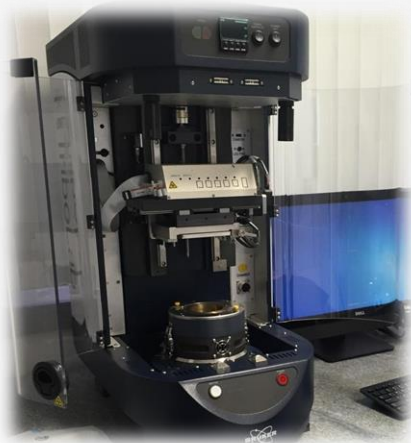
Plataforma universal para estudos tribológicos

- Ampla faixa de carga
- Diversidade de ambientes de ensaios (corrosão, temperatura elevada, meio líquido)
- Diversidade de configurações de ensaio (movimento rotação, translação)



Tribologia - Fundamentos

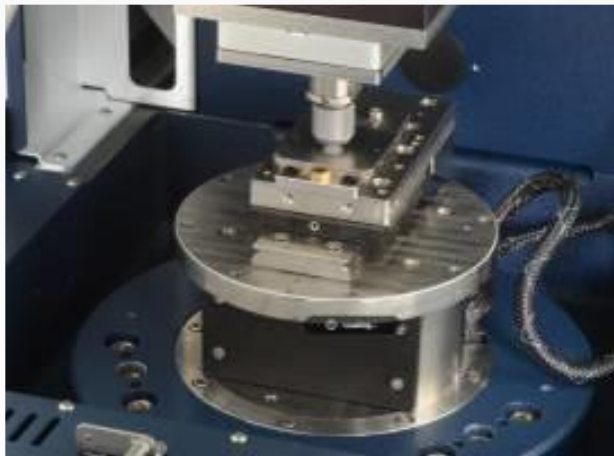
Ensaio Tribológicos



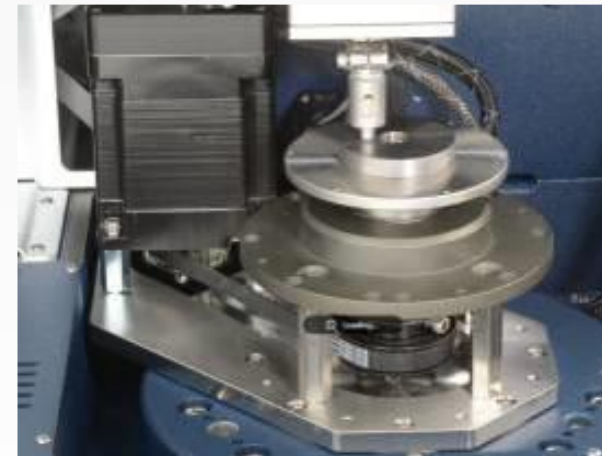
**Tribômetro
UMT Tribolab
Bruker**



Block-on-Ring Drive



Reciprocating Drive



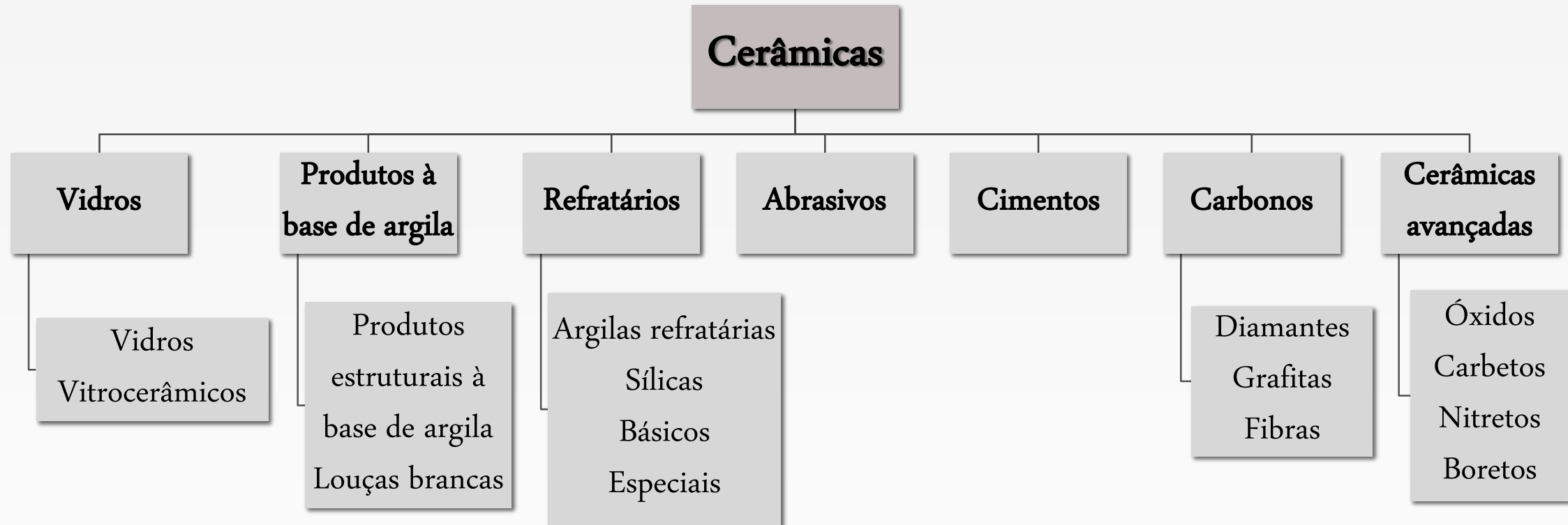
Rotary Drive

Tribologia - Fundamentos

Alguns comentários importantes

- O coeficiente de atrito não é uma propriedade do material, é um propriedade dos sistema.
- A taxa de desgaste ou resistência ao desgaste depende do modo de desgaste, que é uma função do sistema tribológico.
- Uma adequada caracterização e entendimento do sistema tribológicos, favorecerá a escolha correta do materiais e condições de contato e a realização adequada das medições, de acordo com os objetivos traçados.

Classificação dos materiais cerâmicos - Aplicação final



Propriedades de materiais cerâmicos

- 📄 **Bons isolantes elétricos e térmicos**
- 📄 **Resistência ao ataque químico**
- 📄 **Elevada dureza e rigidez**
- 📄 **Dureza e resistência mecânica a elevadas temperaturas**
- 📄 **Elevada resistência ao desgaste**
- 📄 **Baixa tenacidade**
- 📄 **Baixa ductilidade**
- 📄 **Baixa densidade**

A principal **desvantagens** dos materiais cerâmicos é a sua **baixa tenacidade**.

Algumas alternativas:

Materiais compósitos

Cerâmicas reforçadas (metal, cerâmicas / whiskers, fibras, partículas)

Propriedades de materiais cerâmicos

Comparação com os materiais metálicos e poliméricos

Material	Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tenacidade à fratura (MPa.m ^{1/2})	Dureza Vickers (GPa)	Condutividade térmica (W/mK)
Aço	7,8 – 7,9	210	50 – 214	1 – 9	30 – 60
Ferro fundido	7,1 – 7,4	64 – 181	6 – 20	1 – 8,5	30 – 60
Liga Al	2,6 – 2,9	60 – 80	23 – 45	0,25 – 1,40	121 – 237
Al ₂ O ₃	3,9	210 – 390	3 – 5	14 – 19	25 – 35
ZrO ₂	5,6 – 6,25	140 – 210	8 – 10	12	2
Si ₃ N ₄	3,2	170	4 – 7	16 – 22	25 – 50
SiC	2,4 - 3,1	450	4,5	24 - 35	90 – 125
PA	1,1 – 1,14	2 – 4	3	0,8 – 1	0,25 – 0,35
PTFE	2,1 – 2,3	0,4	-	0,12	0,25
HDPE	0,92	0,2	1 – 2	0,13	0,33 – 0,57

G.W. Stachowiak; A.W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 2005.



Propriedades tribológicas de materiais cerâmicos

Propriedades dos materiais cerâmicos que favorecem seu uso em aplicações tribológicas

Alta dureza

- Resistência à abrasão
- Resistência ao desgaste por adesão

Alto módulo de elasticidade

- Resistência à tensões de contato hertzianas

Alto ponto de fusão

Boa condutividade térmica

- Resistência a elevadas temperaturas de contato
- Aplicação em processos de manufatura em elevadas temperatura (usinagem)

Baixa densidade

- Aplicações tribológicas que requerem uso de componentes leves

Resistência à corrosão

Biocompatibilidade

- Aplicações tribológicas envolvendo meios corrosivos; aplicações biomédicas

H. Czichos et al.; *Wear* 190, 155-161, 1995.

Basu, B.; Kalin, M. *Tribology of ceramics and composites materials*, 2011

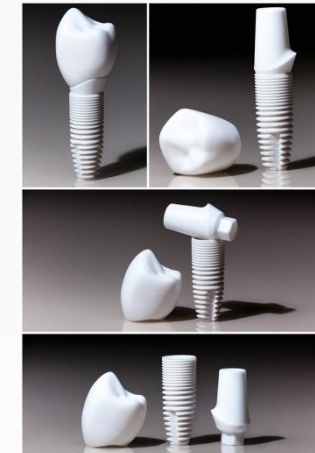
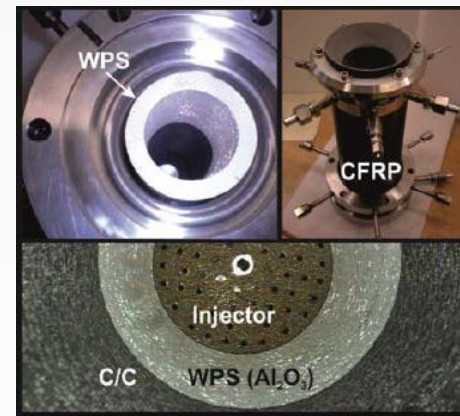
T. Rodriguez-Suarez et al.; *J. Eur. Cer. Soc.* 32, 3887-3898, 2012.

Propriedades tribológicas de materiais cerâmicos

Propriedades dos materiais cerâmicos que favorecem seu uso em aplicações tribológicas



- Partes de motores
- Partes de foguetes
- Implantes ortopédicos, dentários
- Insertos de ferramentas de usinagem



H. Czichos et al.; *Wear* 190, 155-161, 1995.

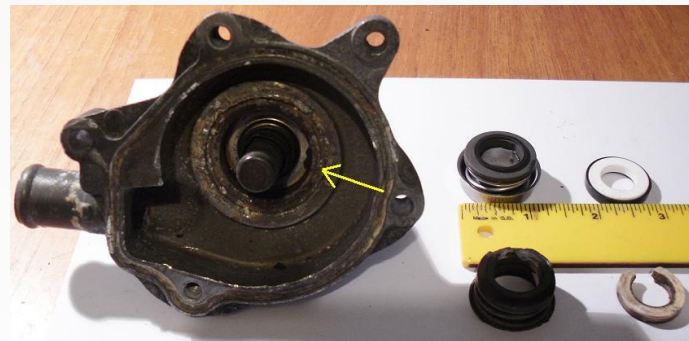
Basu, B.; Kalin, M. *Tribology of ceramics and composites materials*, 2011

T. Rodriguez-Suarez et al.; *J. Eur. Cer. Soc.* 32, 3887-3898, 2012.

Propriedades tribológicas de materiais cerâmicos

Propriedades dos materiais cerâmicos que favorecem seu uso em aplicações tribológicas

- Esferas de rolamentos
- Selos mecânicos



H. Czichos et al.; *Wear* 190, 155-161, 1995.

Basu, B.; Kalin, M. *Tribology of ceramics and composites materials*, 2011

T. Rodriguez-Suarez et al.; *J. Eur. Cer. Soc.* 32, 3887-3898, 2012.

Propriedades tribológicas de materiais cerâmicos

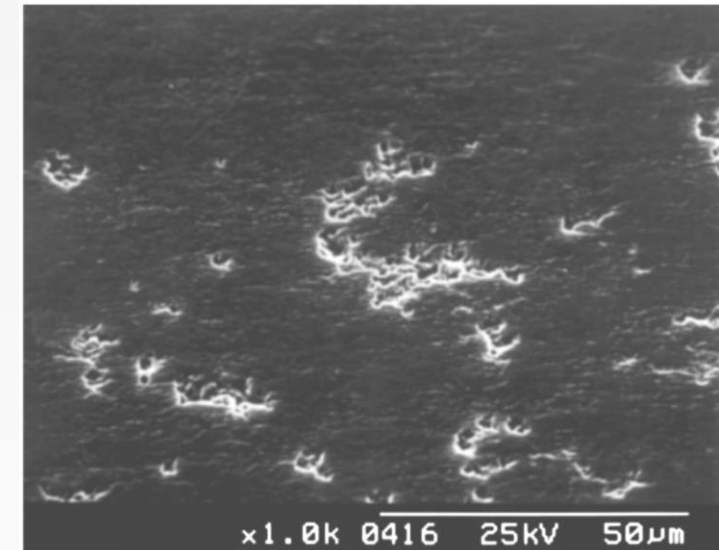
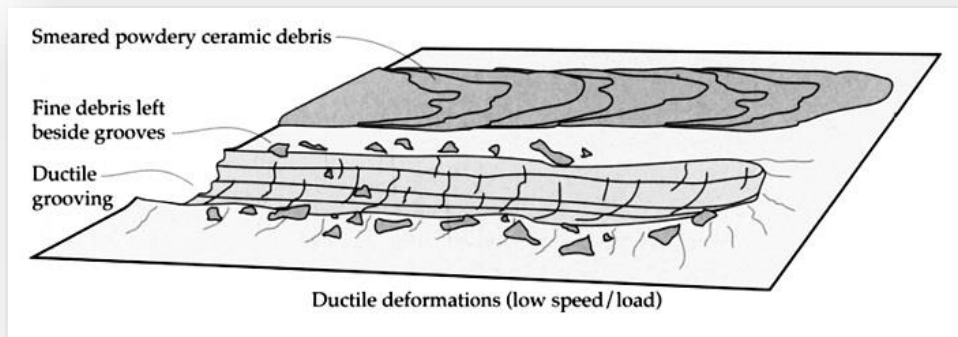
Comparativo de algumas propriedades tribológicas dos materiais cerâmicos (cer), metálicos (met) e poliméricos (pol)	
Tensões Hertzianas (p)	$p_{pol} < p_{met} < p_{cer}$
Aumento de temperatura de contato devido ao atrito (T)	$T_{met} < T_{pol} < T_{cer}$
Abrasão (Ab)	$Ab_{cer} < Ab_{met} < Ab_{pol}$
Reatividade triboquímica (R)	$R_{pol}, R_{cer} < R_{met}$
Energia de adesão (Ad)	$Ad_{pol} < Ad_{met} < Ad_{cer}$

H. Czichos et al.; *Wear* 190, 155-161, 1995.

Desgaste em cerâmicas avançadas

Desgaste moderado

- Baixas cargas/velocidades
- Pouca remoção de material
- Atrito relativamente baixo
- Formação de filmes superfícies por adesão e compactação de resíduos de desgaste ("debris")



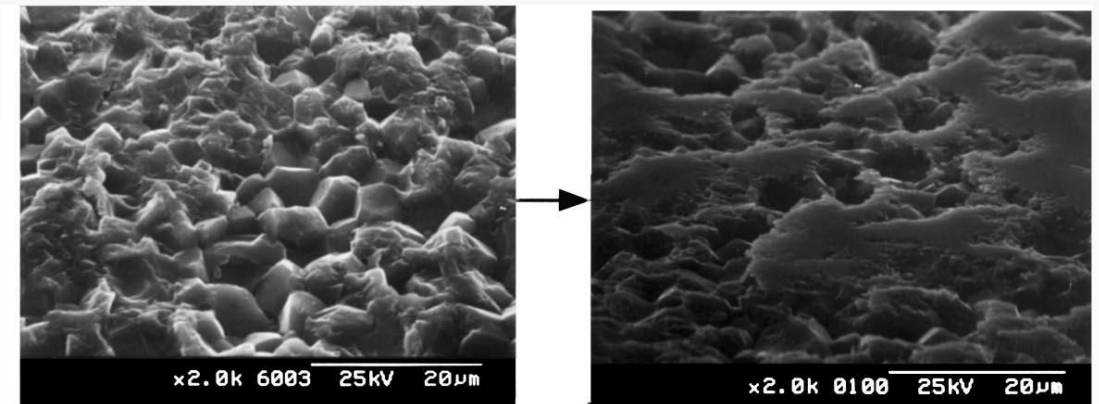
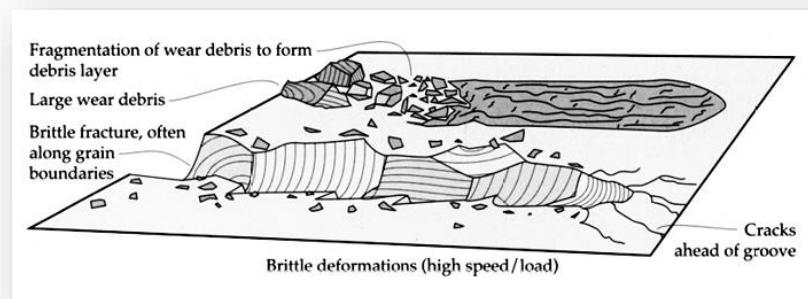
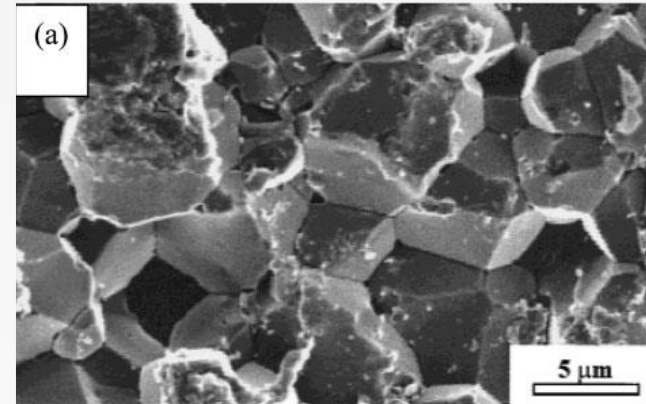
(b) 3N, 0.2m/s, 20°C

G.W. Stachowiak; A.W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 2005.
K. Adachi; K. Kato, *Wear* 245, 84 – 91, 2000.

Desgaste em cerâmicas avançadas

Desgaste severo

- Altas cargas/velocidades
- Remoção de material significativa
- Atrito relativamente alto
- Desgaste por
 - Abrasão
 - Adesão
 - Fratura intergranular
 - Corrosão

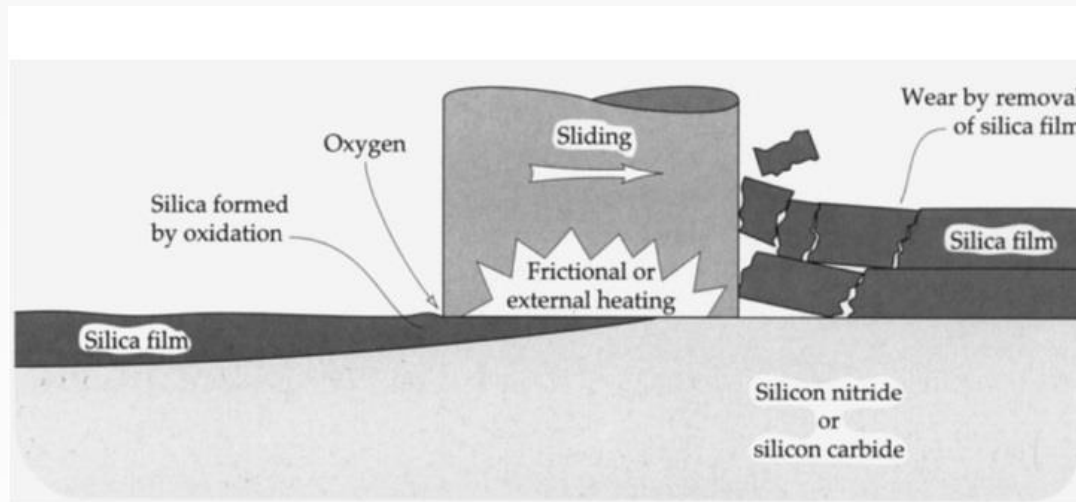


G.W. Stachowiak; A.W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 2005.
K. Adachi; K. Kato, *Wear* 245, 84 – 91, 2000.

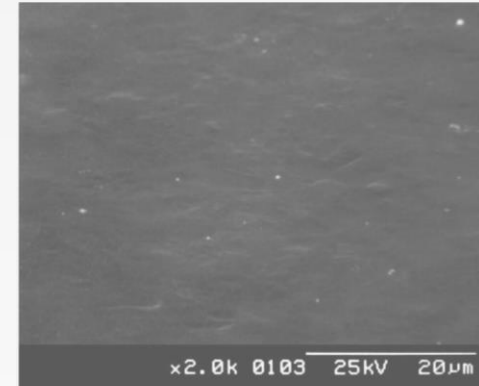
Desgaste em cerâmicas avançadas

Desgaste a elevadas temperaturas

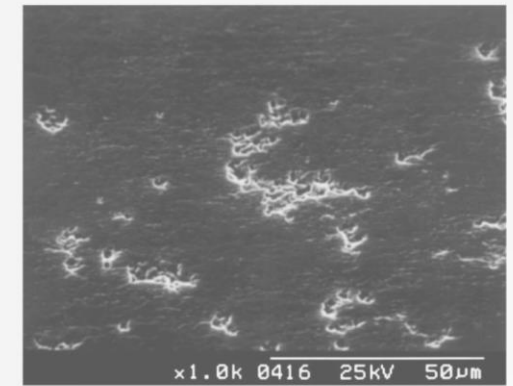
- Aquecimento por atrito ou externo
- Oxidação do material (carbeto, nitreto)
- Desgaste por reação triboquímica (tribo-oxidação)



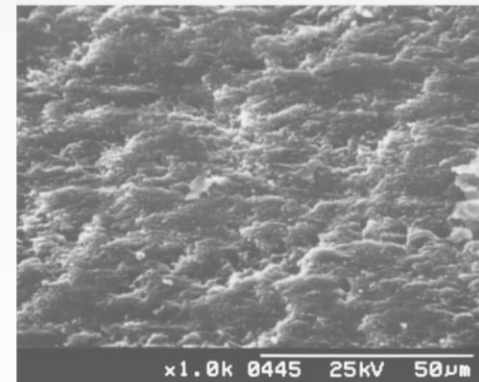
G.W. Stachowiak; A.W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 2005.



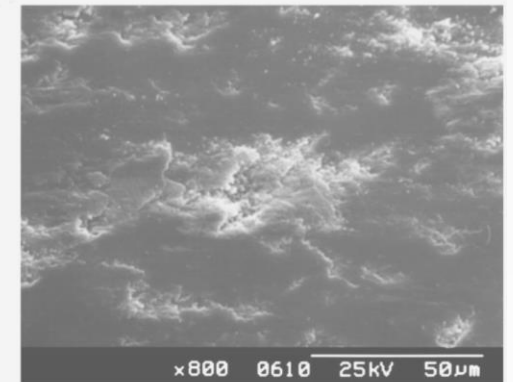
(a) 30N, 0.2m/s, 1000°C



(b) 3N, 0.2m/s, 20°C



(c) 10N, 0.2m/s, 500°C



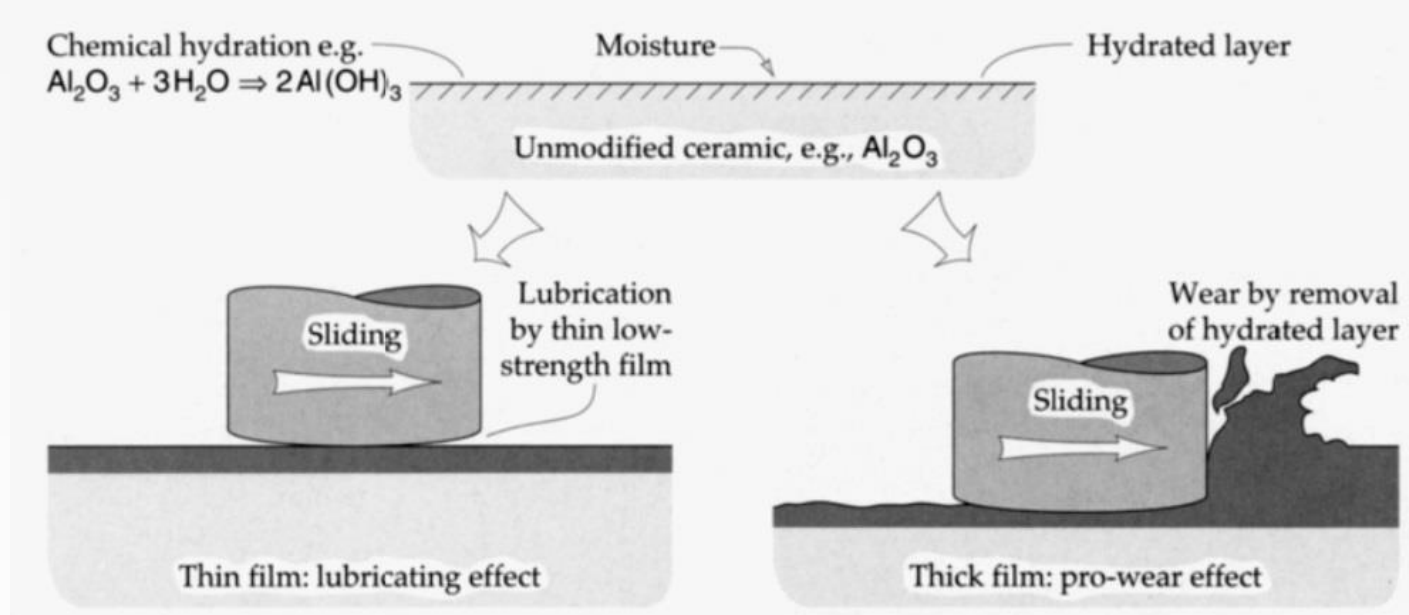
(d) 10N, 0.2m/s, 800°C

G.W. Stachowiak; A.W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 2005.
K. Adachi; K. Kato, *Wear* 245, 84 – 91, 2000.

Desgaste em cerâmicas avançadas

Desgaste em meio líquido ou umidade

- Diminuição do atrito devido à formação de tribofilme, em ambientes com alta umidade
- Aumento do desgaste por tribocorrosão devido à formação de um filme grosso, em contato com meio líquidos (água)



G.W. Stachowiak; A.W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 2005.

Desgaste em cerâmicas estruturais

Estudos tribológicos escassos

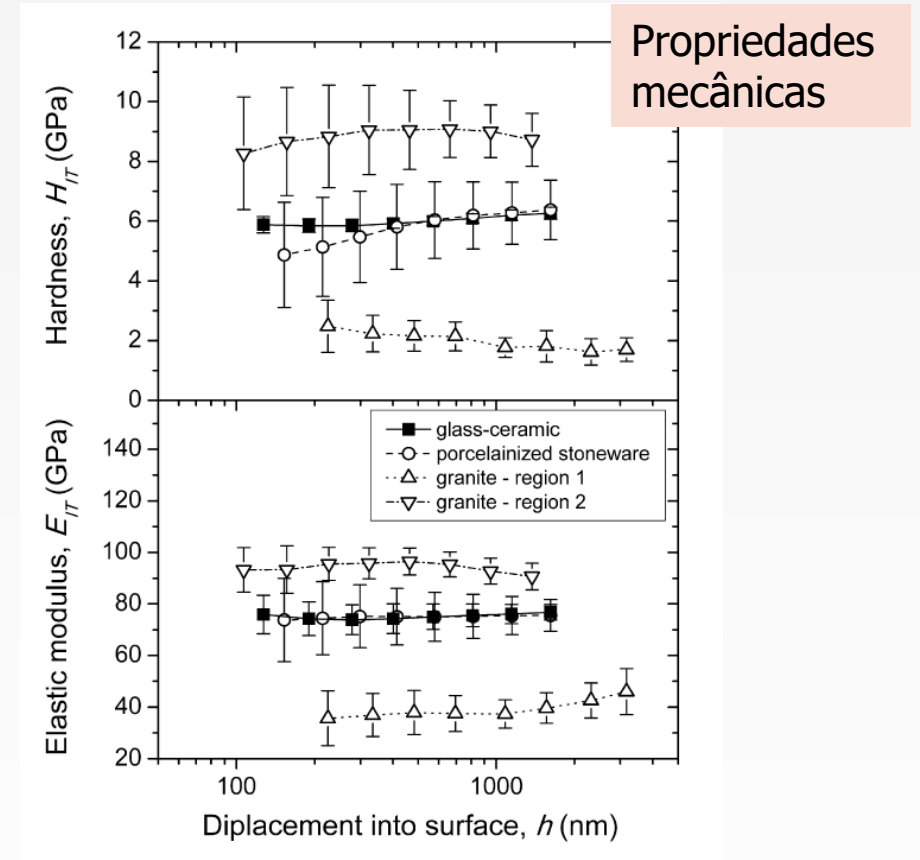
- Desgaste por deslizamento
- Desgaste por abrasão
- Granitos
- Vitrocerâmicos
- Correlação entre o comportamento tribológico e composição mineralógica, dureza, tamanho de grão

Desgaste em cerâmicas estruturais

Estudos tribológicos escassos

- **Desgaste por deslizamento**
- Desgaste por abrasão
- Granitos
- Vitrocerâmicos
- Correlação entre o comportamento tribológico e composição mineralógica, dureza, tamanho de grão

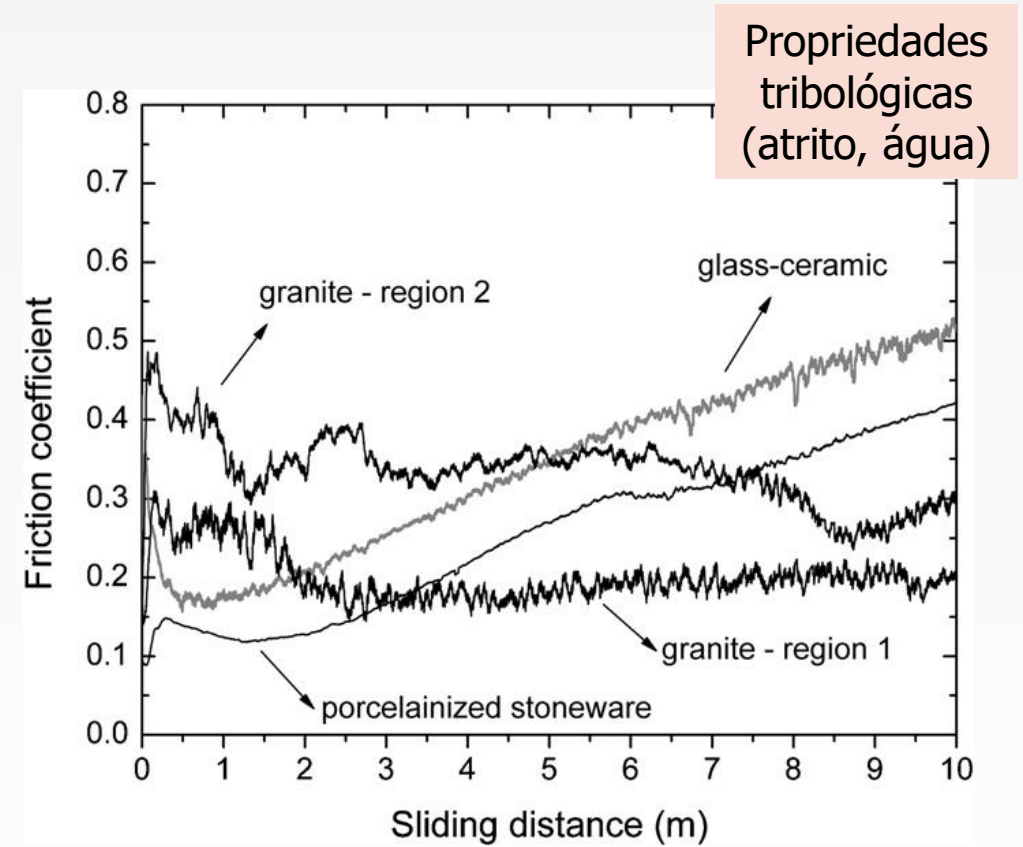
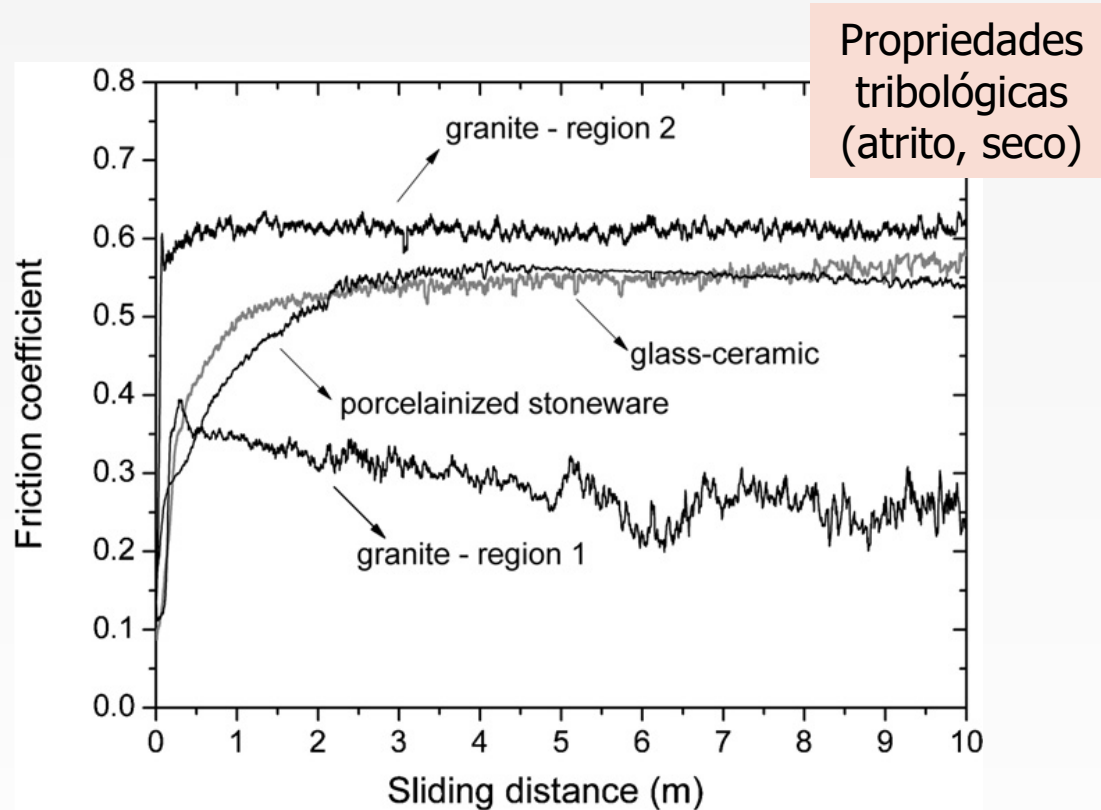
Desgaste por deslizamento – Vitrocerâmicos



S. Buchnera et. al, *Wear* 271, 875- 880, 2011.

Desgaste em cerâmicas estruturais

Desgaste por deslizamento – Vitrocerâmicos



S. Buchnera et. al, *Wear* 271, 875- 880, 2011.

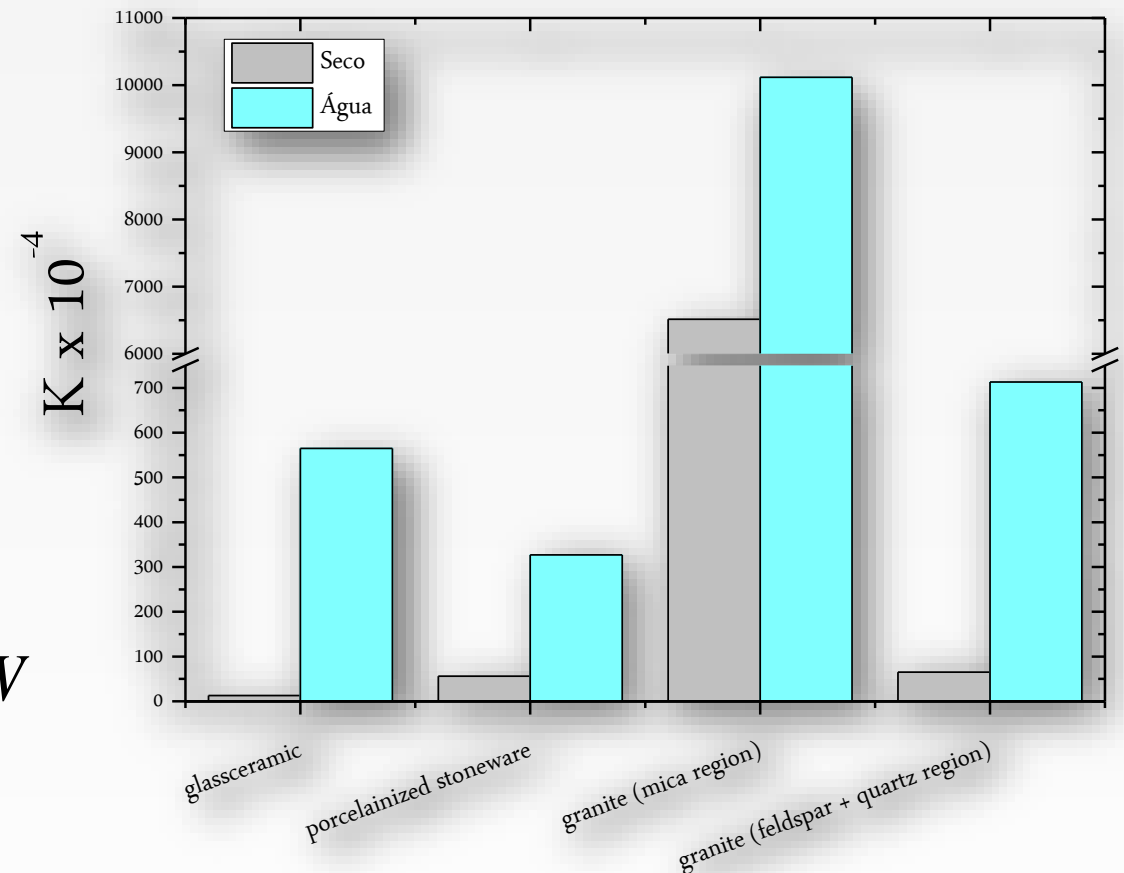
Desgaste em cerâmicas estruturais

Estudos tribológicos escassos

- **Desgaste por deslizamento**
- Desgaste por abrasão
- Granitos
- Vitrocerâmicos
- Correlação entre o comportamento tribológico e composição mineralógica, dureza, tamanho de grão

$$\frac{V}{S} = K \frac{W}{H} = kW$$

Desgaste por deslizamento – Vitrocerâmicos



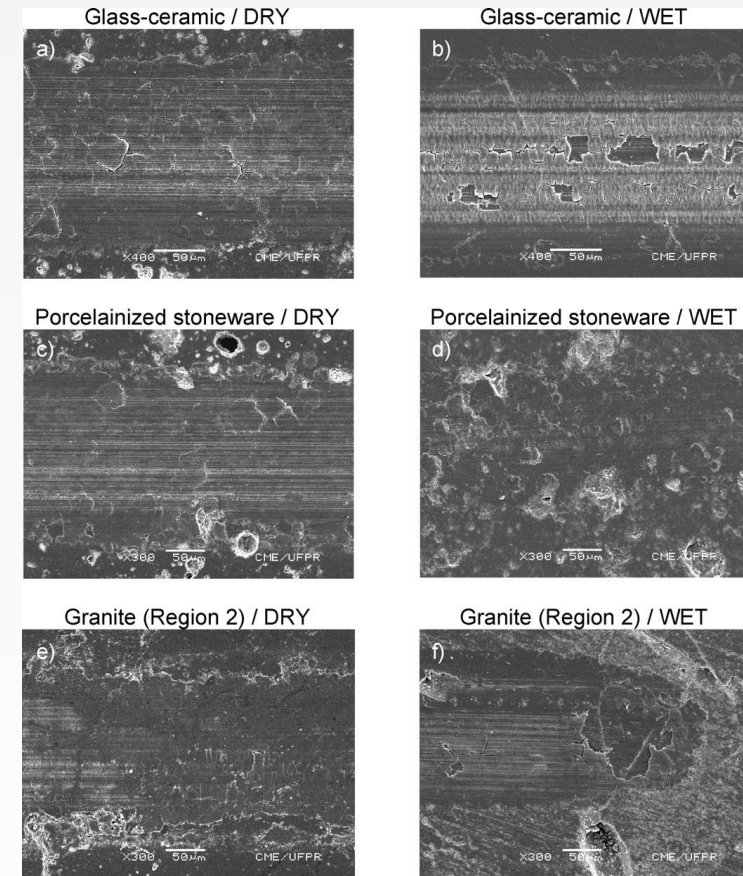
S. Buchnera et. al, *Wear* 271, 875- 880, 2011.

Desgaste em cerâmicas estruturais

Estudos tribológicos escassos

- **Desgaste por deslizamento**
- Desgaste por abrasão
- Granitos
- Vitrocerâmicos
- Correlação entre o comportamento tribológico e composição mineralógica, dureza, tamanho de grão

Desgaste por deslizamento – Vitrocerâmicos



S. Buchnera et. al, *Wear* 271, 875- 880, 2011.

Pavimentos cerâmicos / Adoquins cerâmicos

Exigências técnicas (podem variar, de acordo com o país)

- absorção de água
- Densidade aparente
- resistência à ruptura transversal
- resistência à compressão
- resistência à abrasão
- resistência ao escorregamento/derrapagem
- resistência a ácidos
- condutividade térmica
- resistência ao fogo
- emissão de asbesto e formaldeído
- resistência ao gelo

Pavimentos cerâmicos / Adoquins cerâmicos

☞ Pouco difundidos no Brasil

- Mato Grosso do Sul (Rondonópolis)
- Rio de Janeiro (Campos dos Goytacazes)
- Aditivos: argilito, chamo-te, resíduo de rocha ornamental
- Caracterização dos pavimentos cerâmicos
 - Mineralógica, distribuição de tamanho e morfológica de partículas das matérias-primas
 - Massa específica
 - Retração linear
 - Absorção de água
 - Plasticidade
 - Resistência à compressão
 - Resistência à abrasão
 - Microestrutura

☞ Não existe norma específica no Brasil

- São utilizadas normas internacionais, e nacionais de outros produtos para efeitos comparativos
 - UNE-EN 1344 (Espanha)
 - ASTM C902, C1272 (Estados Unidos)
 - DIM 18503 (Alemanha)
 - NTC 5282, 3829 (Colômbia)
 - ABNT 9781, 13818 (Brasil, pavimentos intertravados de concreto, placas cerâmicas não esmaltadas)

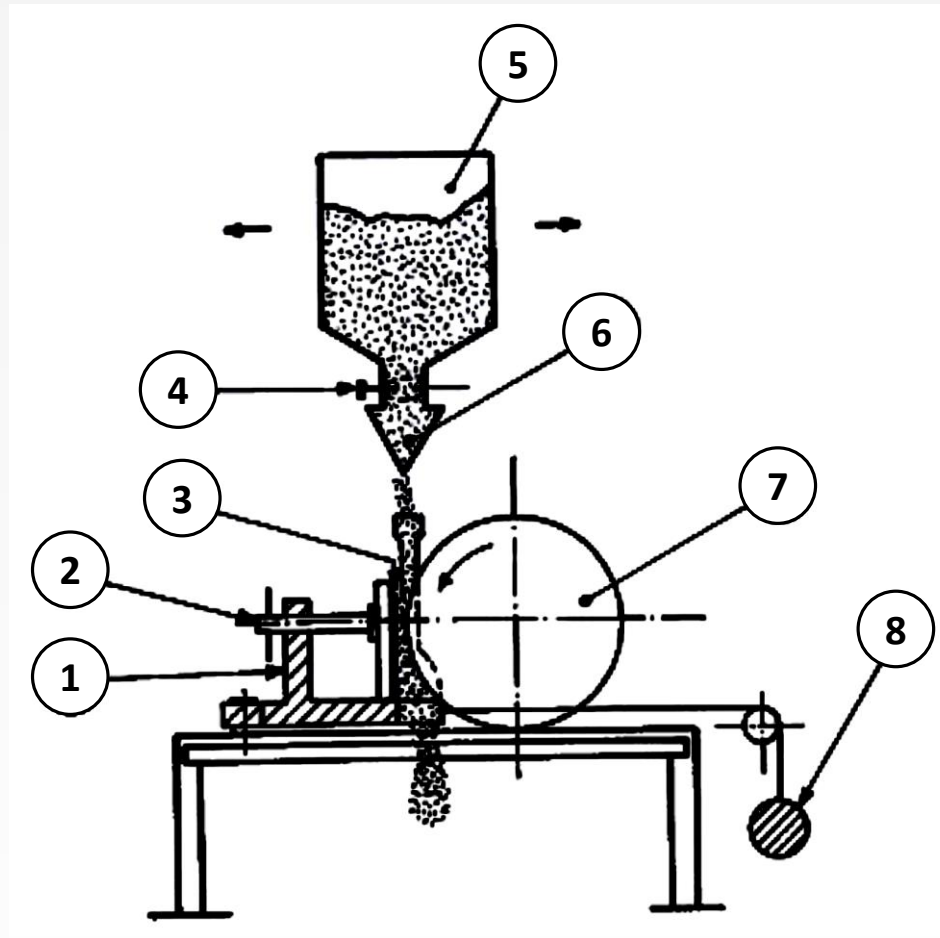


Adoquim sendo utilizado como pavimento flexível na Cerâmica Arte Sardinha, em Campos dos Goytacazes-RJ.

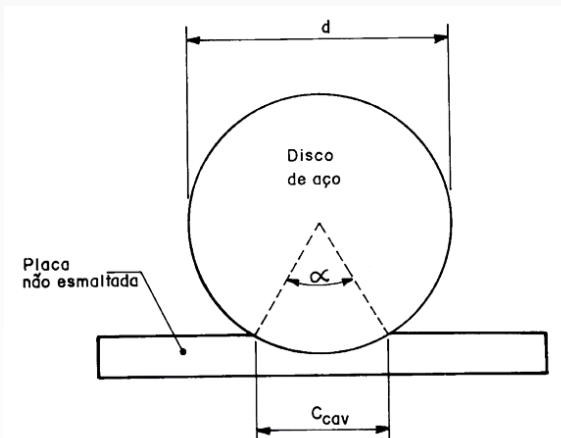
J.P.R.G. de Carvalho, UENF, RJ, 2015.

Propriedades tribológicas de pavimentos cerâmicos

Resistência à abrasão profunda - ABNT NBR 13818



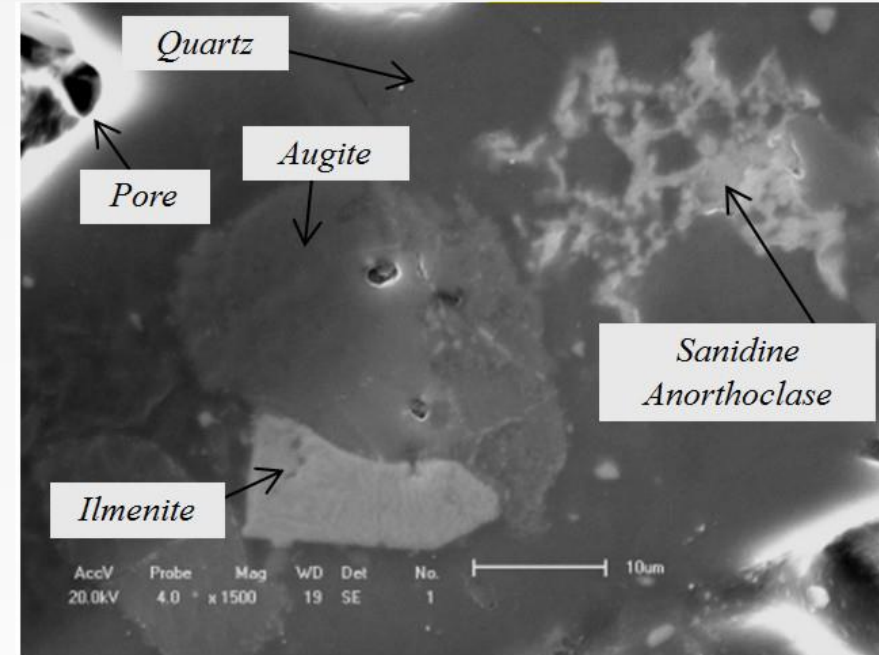
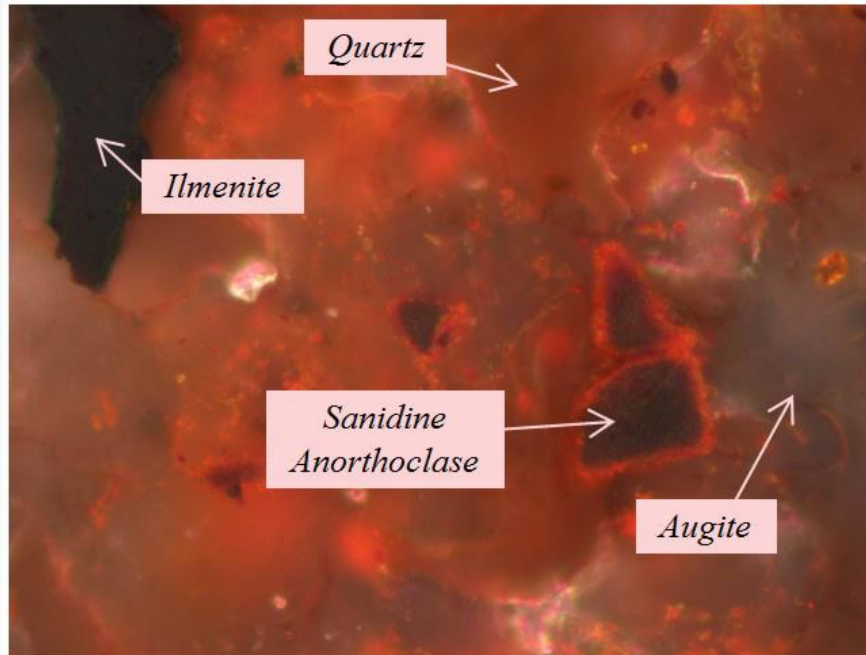
- (1) suporte do corpo de prova
- (2) parafuso de fixação
- (3) corpo de prova
- (4) válvula
- (5) caixa de armazenamento de material abrasivo
- (6) funil de escoamento
- (7) disco de aço
- (8) contrapeso



Resultados

- Volume de material removido (mm^3)
- Comprimento da cavidade de desgaste (mm)

Pavimentos cerâmicos / Adoquins cerâmicos

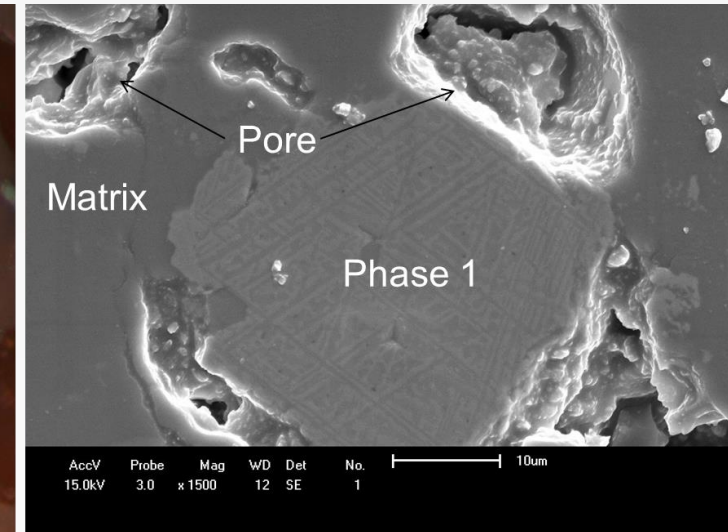
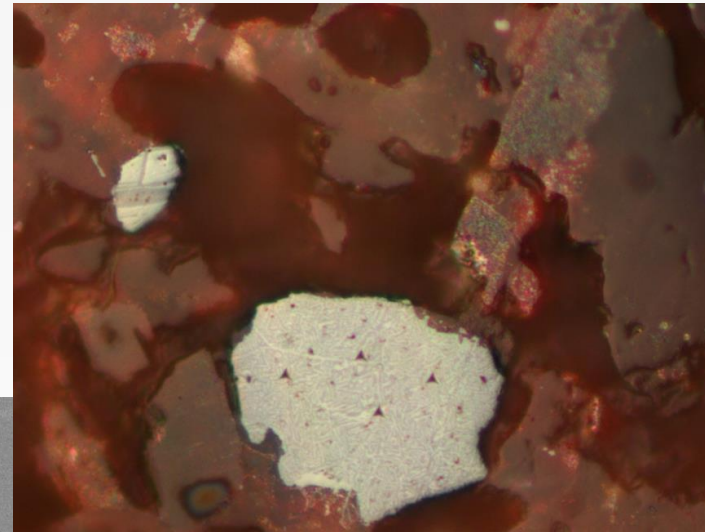
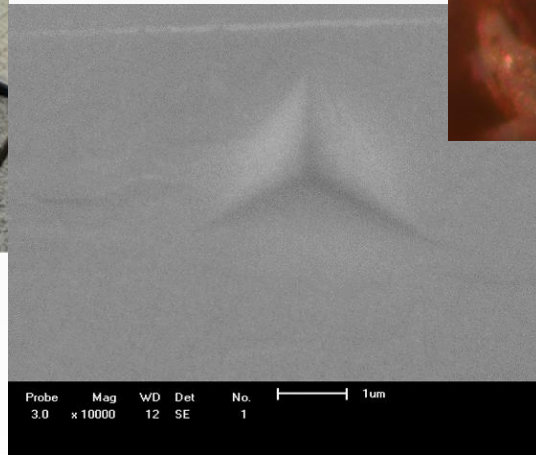


Phase	Symbol	Formula
1 - Ilmenite	#	FeTiO_3
2 - Sanidine - Anorthoclase	● ○	KAlSi_3O_8 $\text{AlK}_{0.15}\text{Na}_{0.85}\text{Si}_3\text{O}_8$
3 - Augite	□	$\text{CaFe}_{0.25}\text{Mg}_{0.74}\text{Si}_2\text{O}_6$
4 - Quartz	◆	SiO_2

Rocha – aditivo para pavimentos cerâmicos
 J. Catafesta; M. C. M. Farias; R. C. D. Cruz
 World Tribology Congress 2013, Torino, Italy, September 8 – 13, 2013

Pavimentos cerâmicos / Adoquins cerâmicos

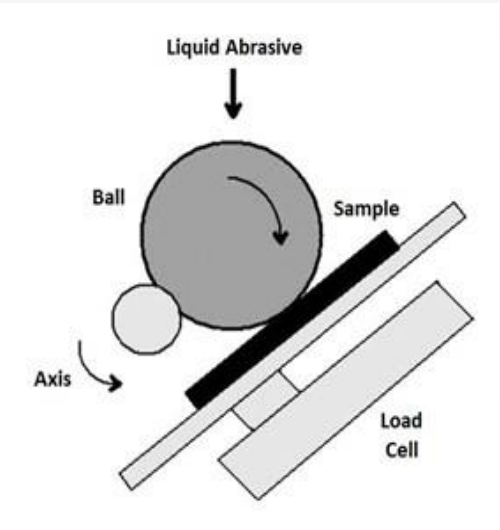
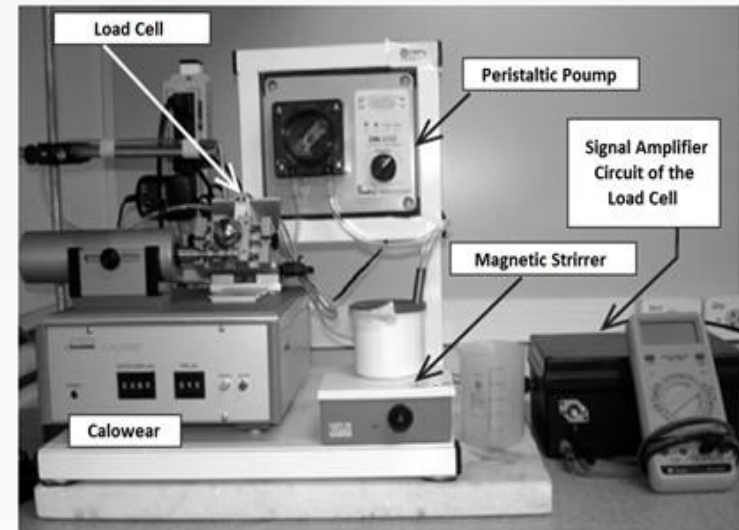
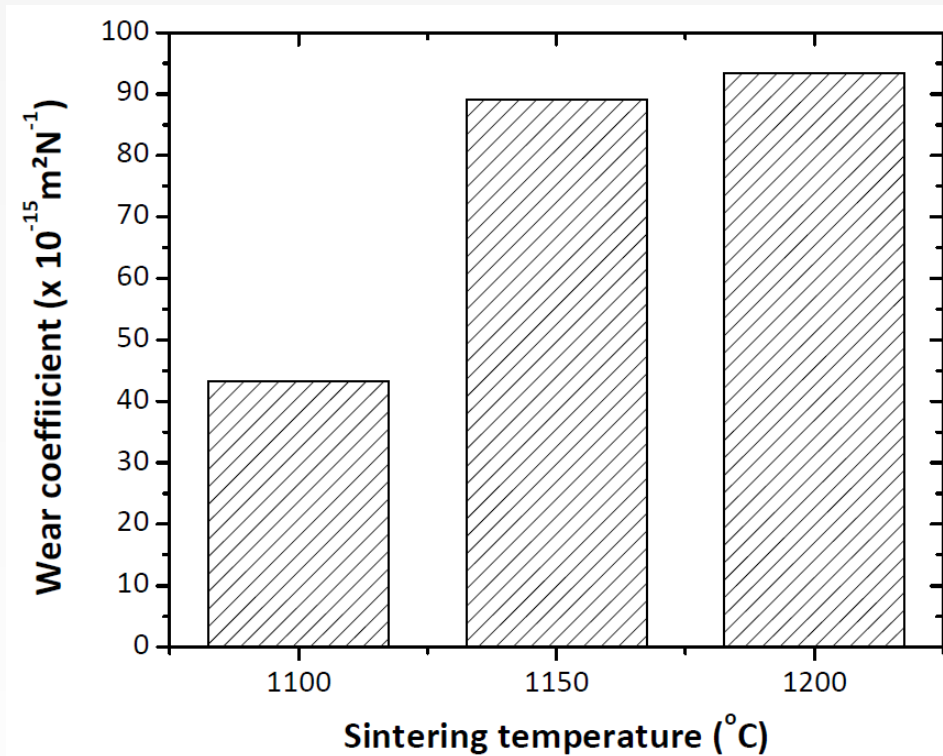
Indentação instrumentada (escala micro)



Rocha – aditivo para pavimentos cerâmicos
J. Catafesta; M. C. M. Farias; R. C. D. Cruz
World Tribology Congress 2013, Torino, Italy, September 8 – 13, 2013

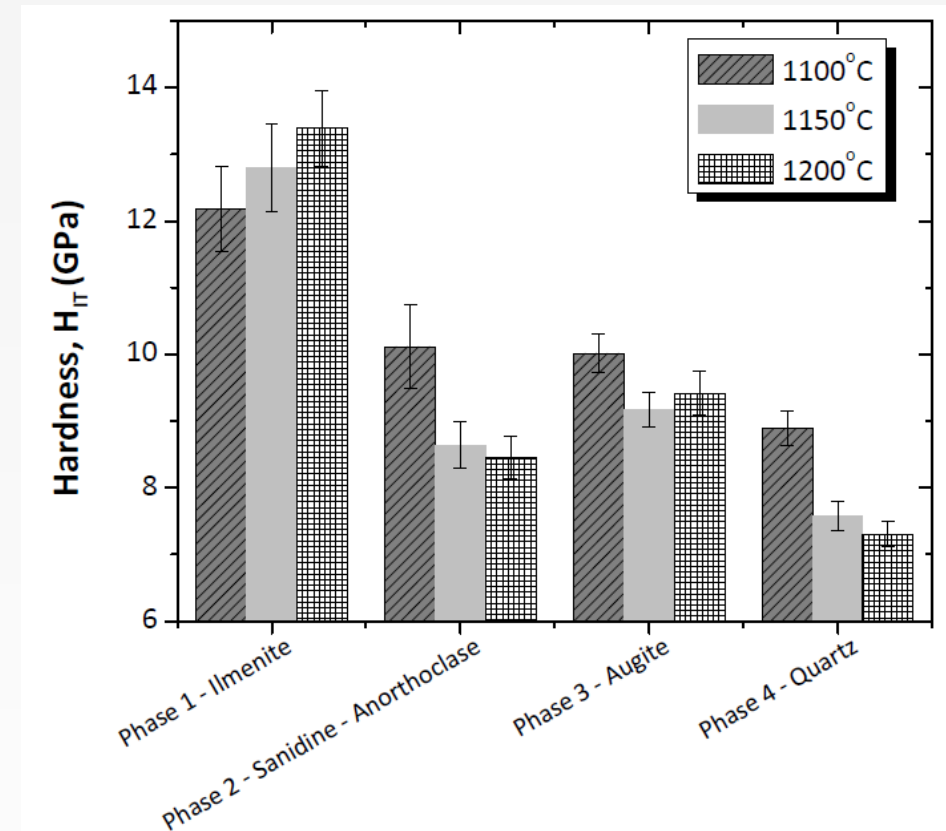
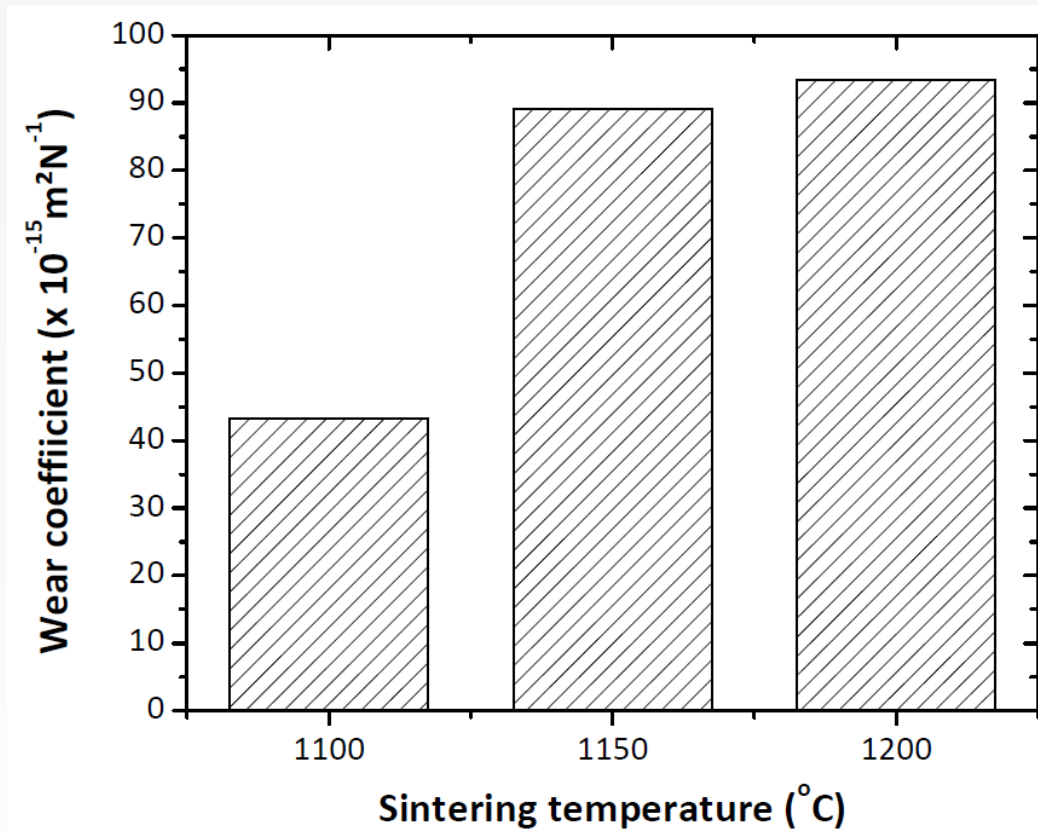
Pavimentos cerâmicos / Adoquins cerâmicos

Desgaste microabrsivo



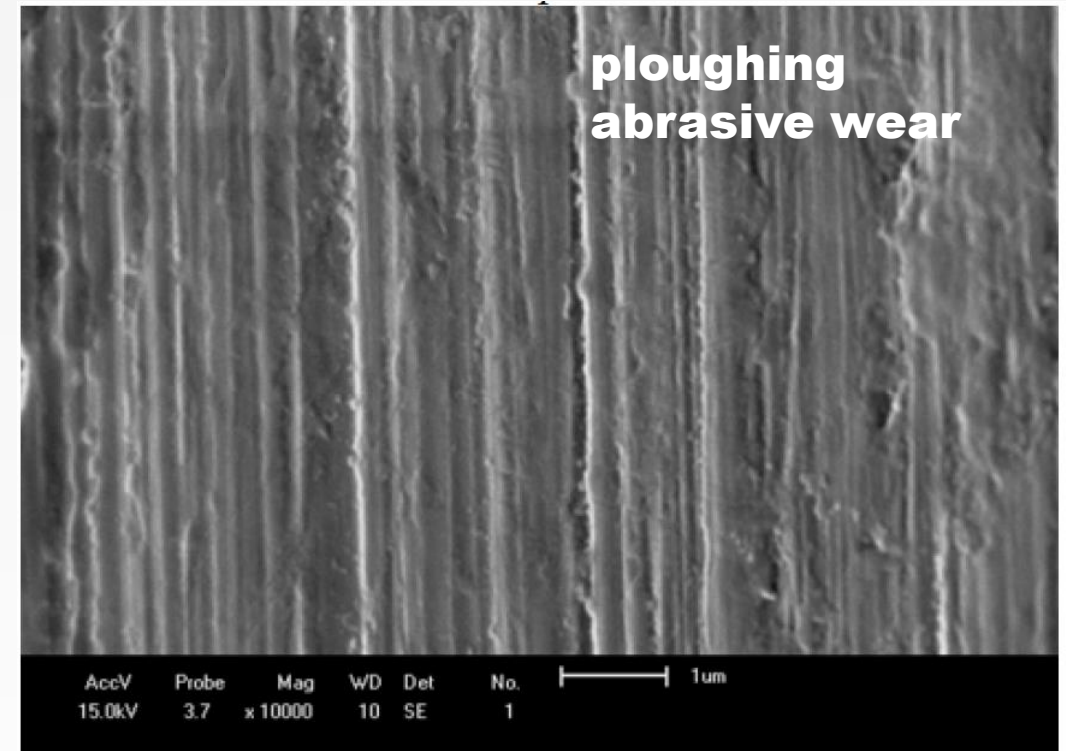
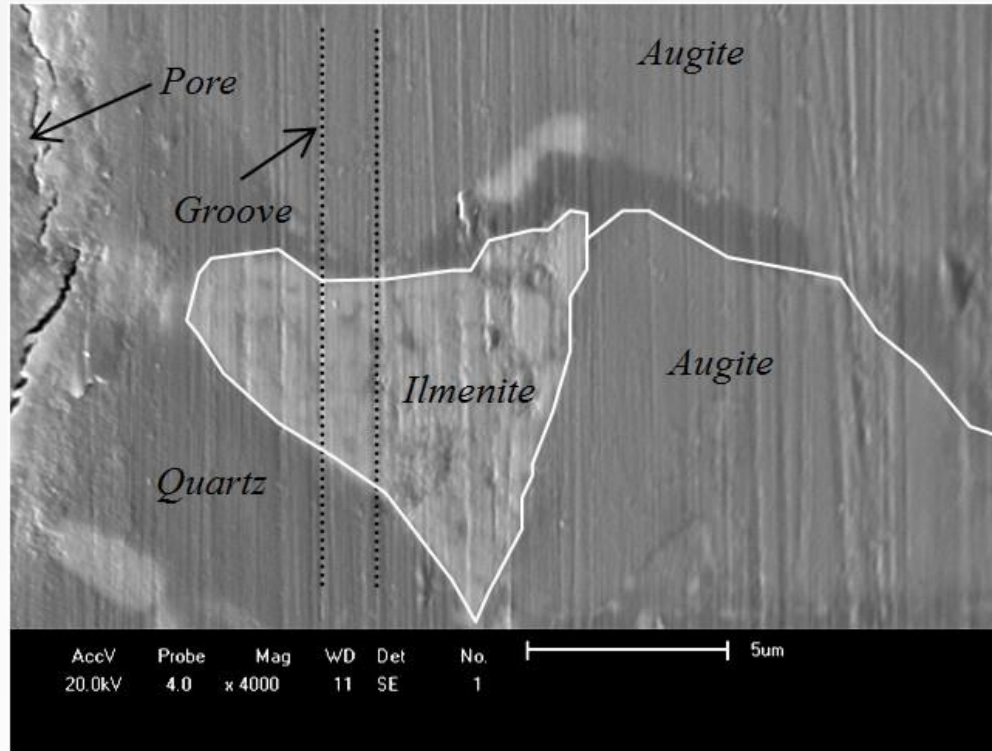
Rocha – aditivo para pavimentos cerâmicos
J. Catafesta; M. C. M. Farias; R. C. D. Cruz
World Tribology Congress 2013, Torino, Italy, September 8 – 13, 2013

Pavimentos cerâmicos / Adoquins cerâmicos



Rocha – aditivo para pavimentos cerâmicos
 J. Catafesta; M. C. M. Farias; R. C. D. Cruz
 World Tribology Congress 2013, Torino, Italy, September 8 – 13, 2013

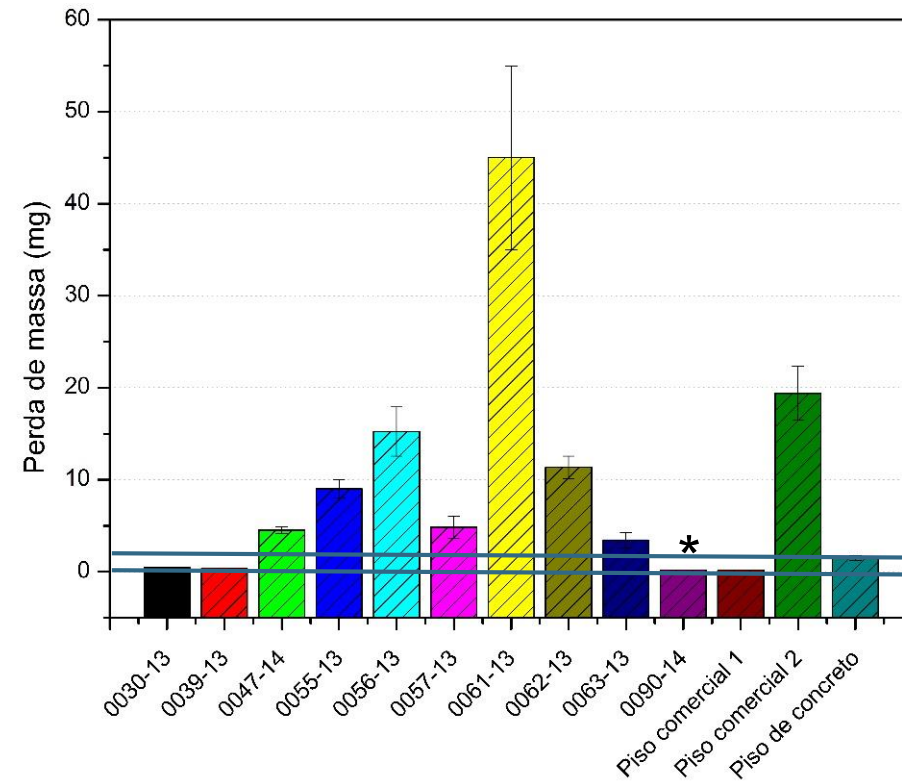
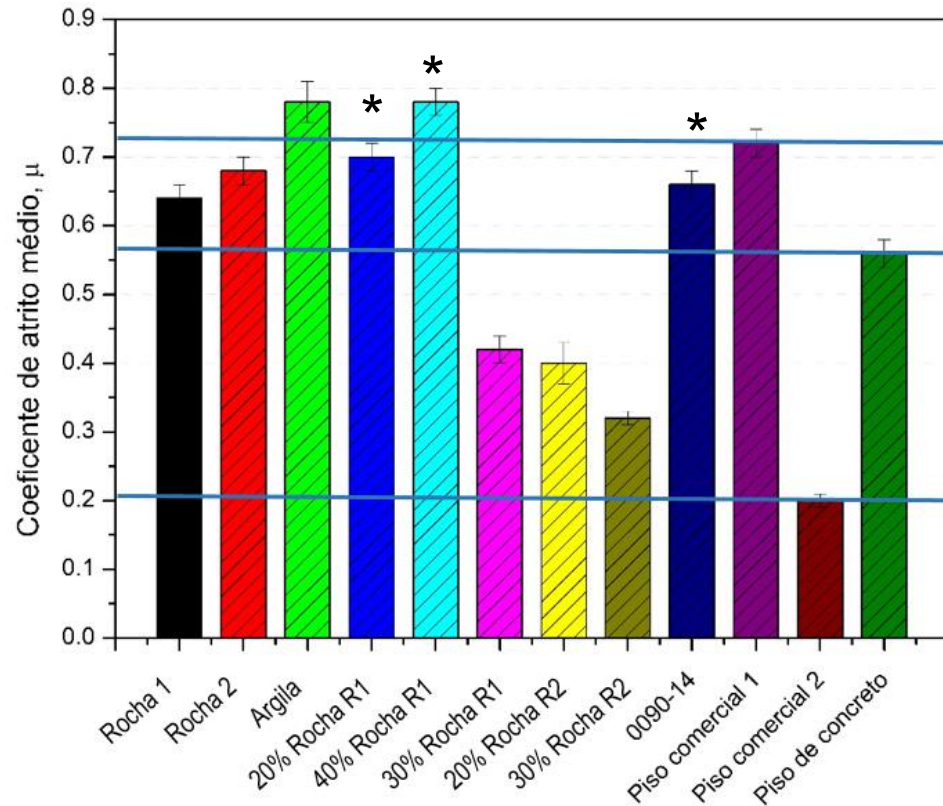
Pavimentos cerâmicos / Adoquins cerâmicos



Rocha – aditivo para pavimentos cerâmicos
J. Catafesta; M. C. M. Farias; R. C. D. Cruz
World Tribology Congress 2013, Torino, Italy, September 8 – 13, 2013

Pavimentos cerâmicos / Adoquins cerâmicos

Coeficiente de atrito e Resistência ao desgaste



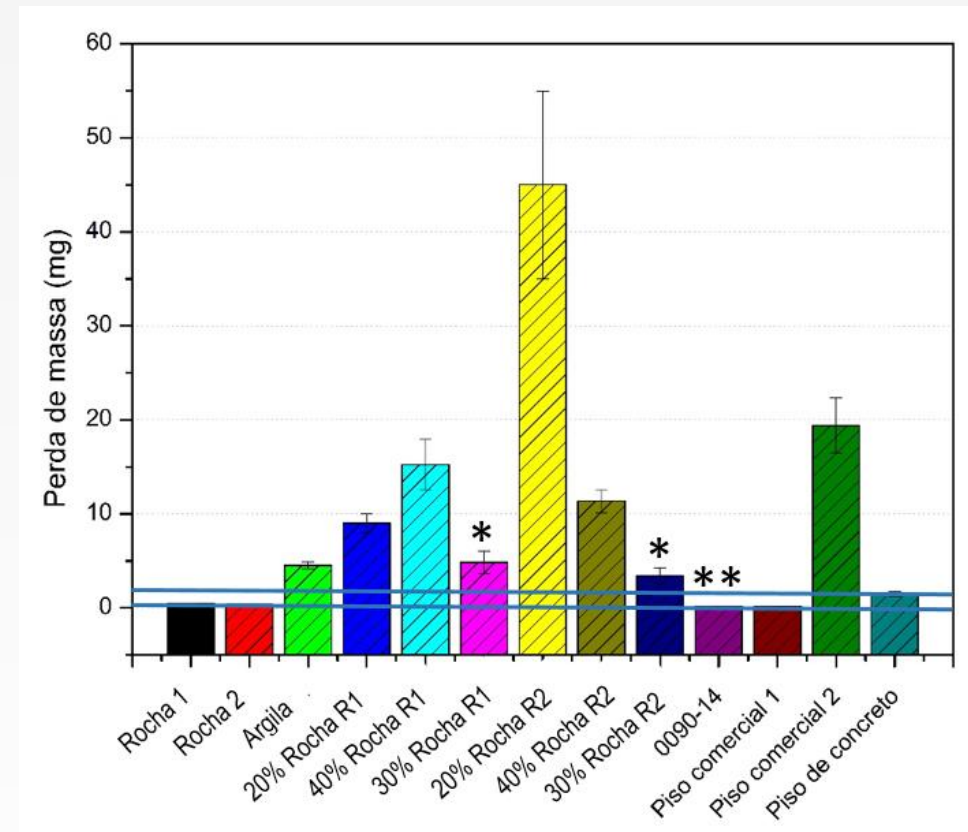
M. C. M. Farias; et al., *Boletim Técnico*, Projeto Pavimentos Tribológicos, Abril 2017.

Pavimentos cerâmicos / Adoquins cerâmicos

Resistência ao desgaste (abrasão e deslizamento)

Requisito Técnico	Pavimento intertravado de cimento (ABNT NBR 9781)	Pavimento intertravado tipo adoquim cerâmico (NE 1344)	Resultados do IMC-UCS		
			P1 (30% R1)	P2 (30% R2)	P3 (40% R2)
Resistência à compressão (MPa)	$\geq 35,0$ (tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha) $\geq 50,0$ (tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados)	-	48,8	33,7	25,4
Resistência à abrasão, mm (mm ³)	≤ 23 (tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha) ≤ 20 (tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados)	Classe A1: (≤ 450) Classe A2 : (≤ 1100) Classe A3 : (≤ 2100)	57,1 (1593,3)	57,4 (1622,8)	67,5 (2658,9)
Absorção de água (%)	≤ 6	-	15,1	15,3	14,6

Desgaste por deslizamento



M. C. M. Farias; et al., *Boletim Técnico*, Projeto Pavimentos Tribológicos, Abril 2017.



PROJETO PAVIMENTOS TRIBOLÓGICOS