

# DESGASTE ABRASIVO: MECANISMOS, CLASSIFICAÇÕES E ENSAIOS

Eduardo Albertin

Laboratório de Processos Metalúrgicos

CENTRO DE TECNOLOGIA EM  
METALURGIA E MATERIAIS - IPT

# Tópicos de discussão

- Desgaste abrasivo
- Classificações versus mecanismos
- Ensaaios de desgaste: para quê?

# Desgaste abrasivo nos processos produtivos

- Mineração e movimentação de terra
- Transporte e processamento de particulados e lamas: BRITAGEM, MOAGEM, BOMBEAMENTO.



# Desgaste abrasivo nos processos produtivos

- Processamento mecânico de materiais metálicos : laminação;forjamento;extrusão



Cilindro laminação

- Processamento de materiais não-metálicos: cerâmica, polímeros, biomassas



maromba

# Desgaste abrasivo nos processos produtivos

- Sistemas envolvendo gás+partículas (turbinas, exaustão)



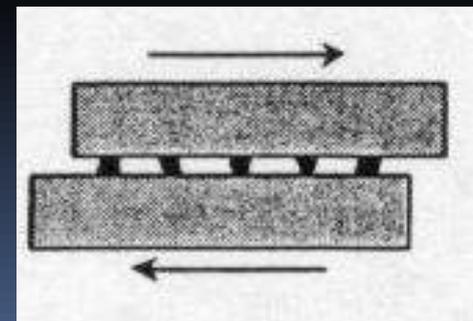
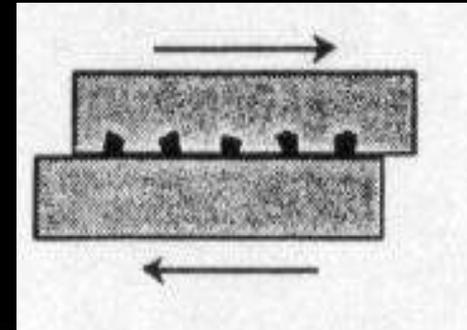
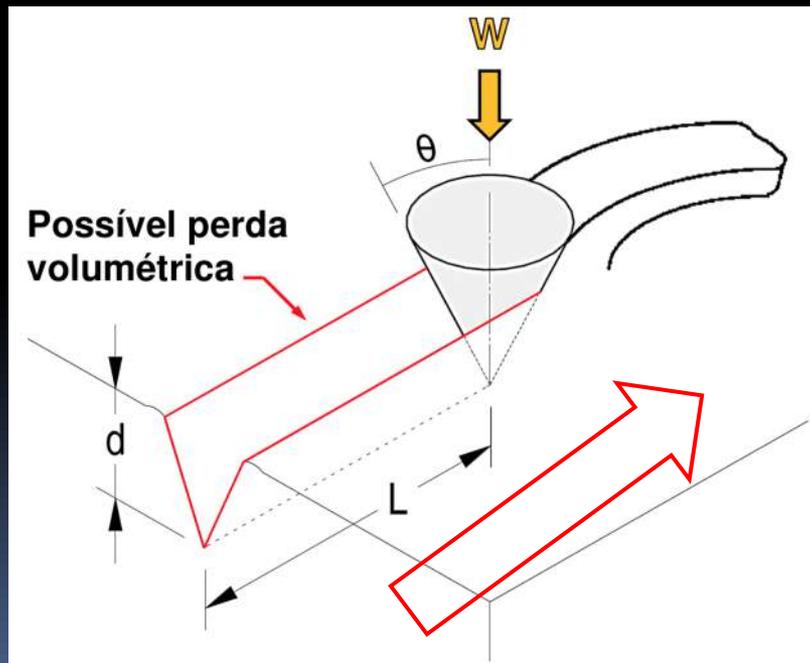
- Contaminação por partículas abrasivas em equipamentos mecânicos



Desgaste de  
camisa de bloco  
de motor por  
CAT

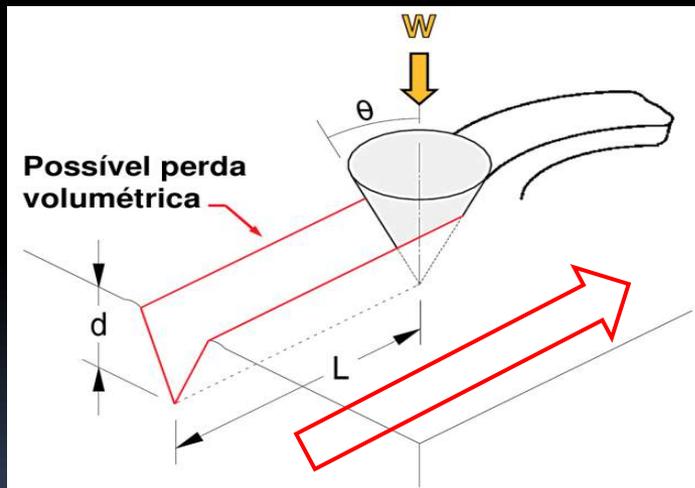
# Definições (ASTM G40)

**Desgaste abrasivo:** desgaste devido a partículas ou protuberâncias duras forçadas contra e movendo-se ao longo de uma superfície sólida.



# Definições (ASTM G40)

**Desgaste abrasivo:** desgaste devido a partículas ou protuberâncias duras forçadas contra e movendo-se ao longo de uma superfície sólida.



Fatores principais:

**FORÇA E MOVIMENTO**

Outros fatores:

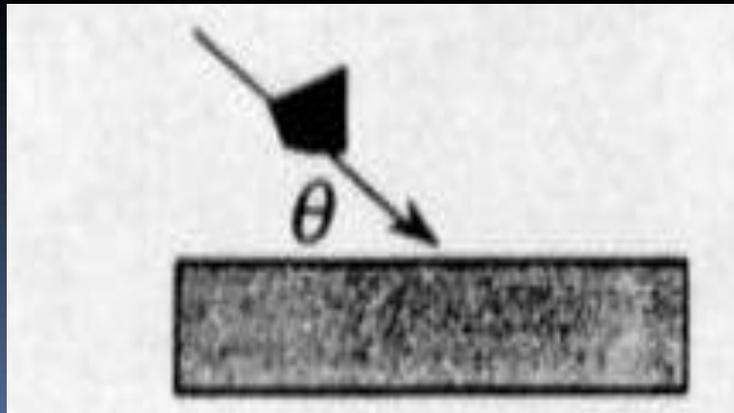
- Forma do abrasivo
- Dureza relativa
- Abrasivo solto/preso

# Definições (ASTM G40)

**Desgaste erosivo:** perda progressiva de material de uma superfície sólida devido a interação mecânica com um fluido, um fluido multi-componente ou impacto (“impingement”) de líquido ou partículas sólidas.

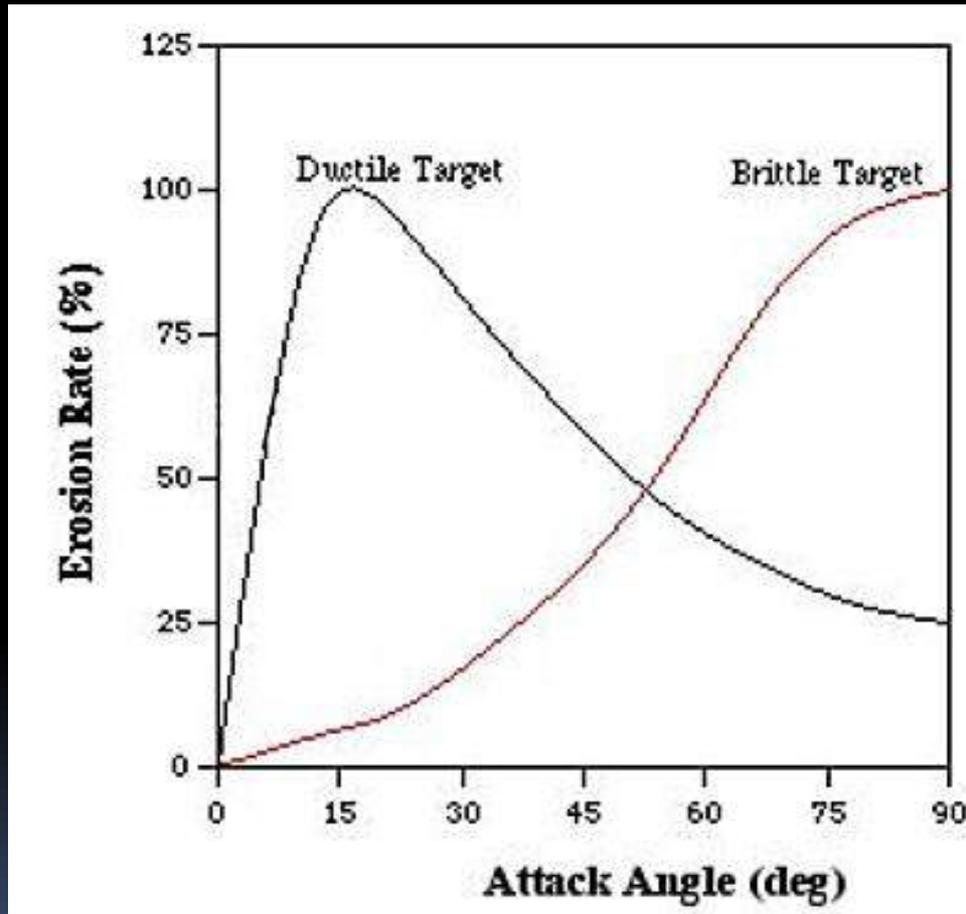
- Fatores: **VELOCIDADE** e ÂNGULO de incidência

$$E = k V^n f(\theta)$$



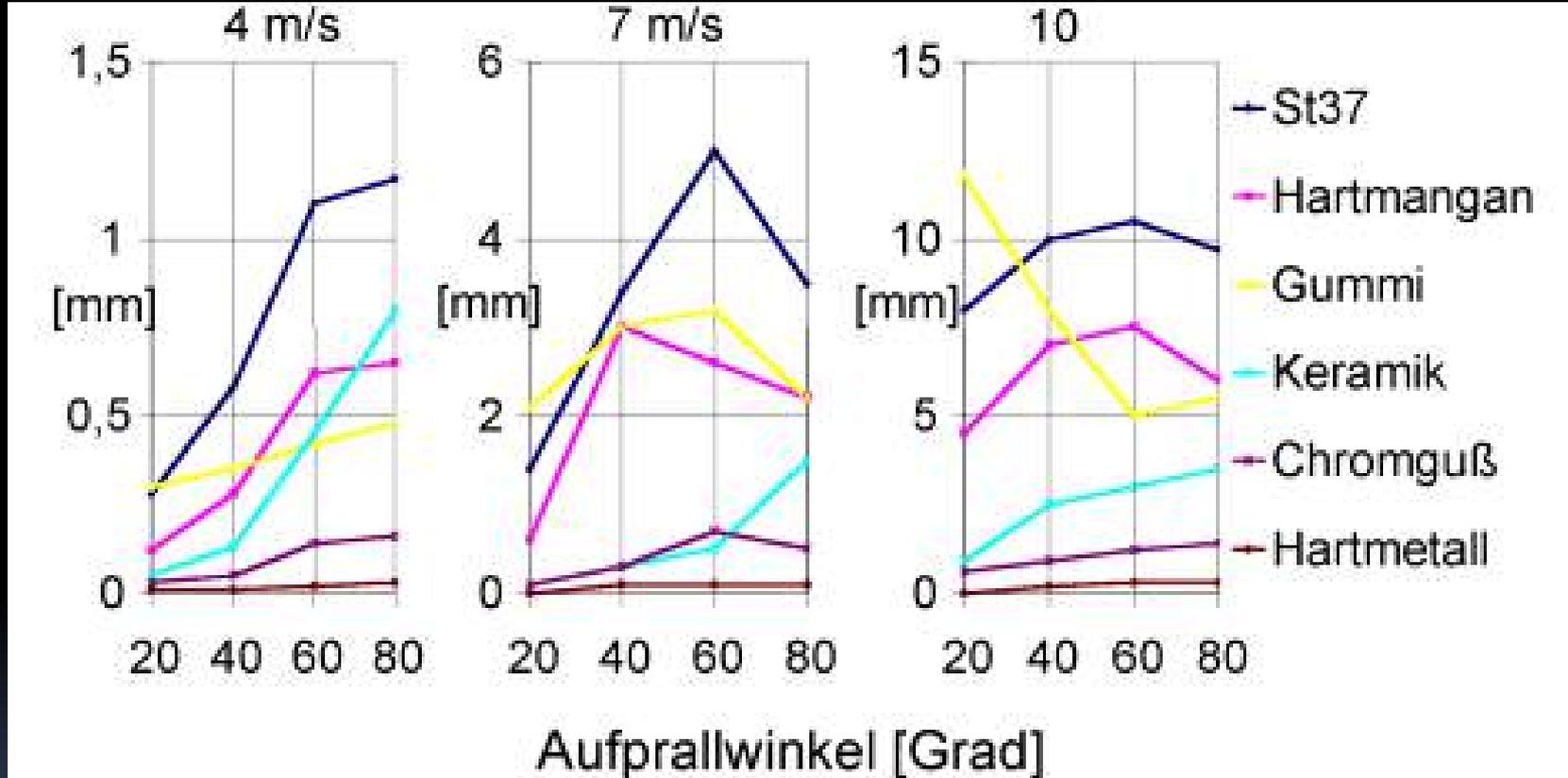
# Erosão

- VELOCIDADE e ÂNGULO de incidência



# Erosão

- VELOCIDADE e ÂNGULO de incidência



Ensaio de “impacto-erosão - vários materiais contra sinter.  
Efeitos de velocidade e ângulo de impacto

# Classificações & mecanismos

---

# Classificações utilizadas em estudos sobre desgaste abrasivo

2 corpos / 3 corpos

“ low-stress ”

“ high-stress ”

“ gouging ”

Severo/moderado

- Rolamento
- Deslizamento com sulcamento
- erosão

# Mecanismos de desgaste

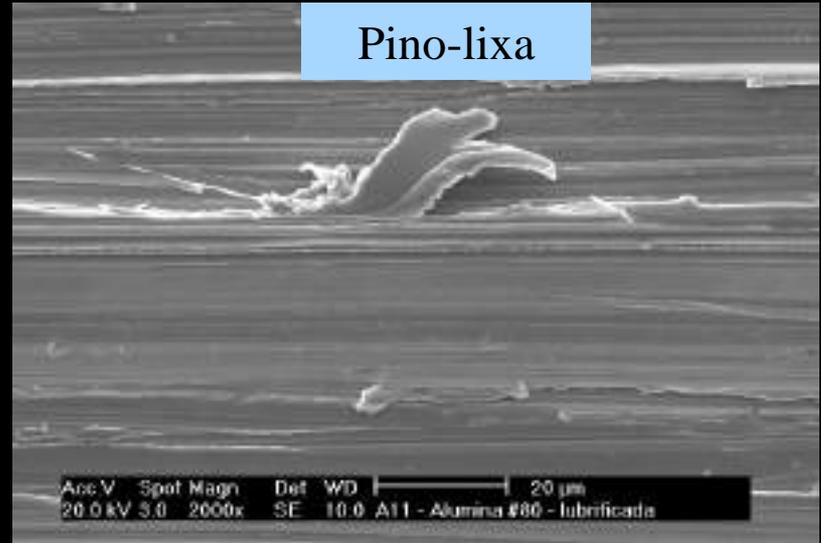
- Microcorte
- Impressões ( “indentation”)
- Microtrincamento
- Sulcamento “sem corte”
- Erosão

# Sulcamento/riscamento/corte em vários sistemas

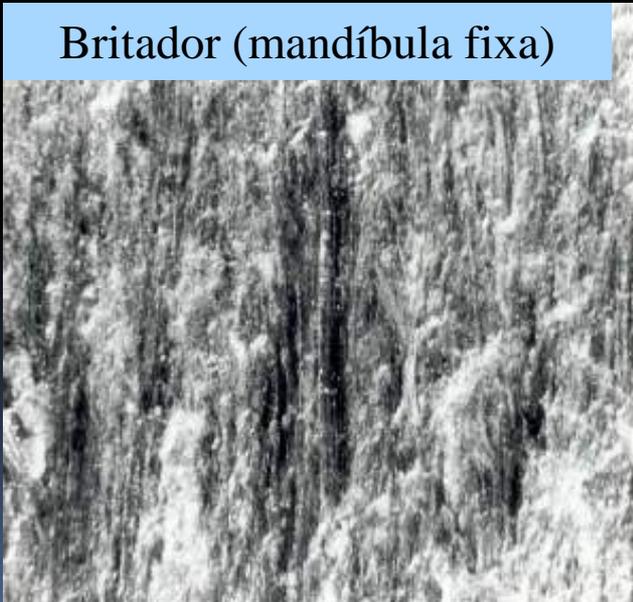
Roda de borracha



Pino-lixia



Britador (mandíbula fixa)



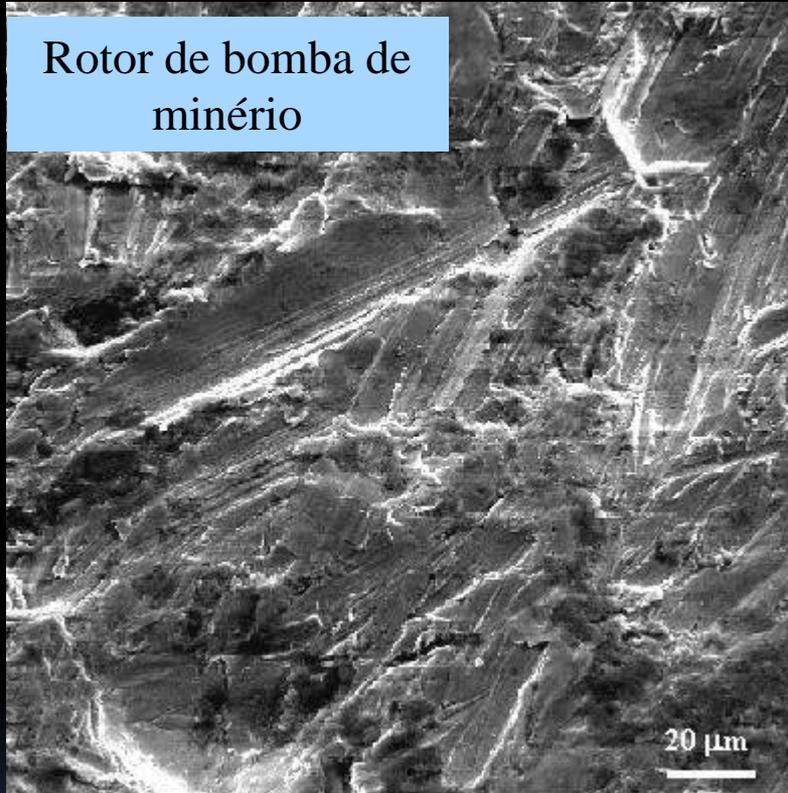
Moinho de bolas



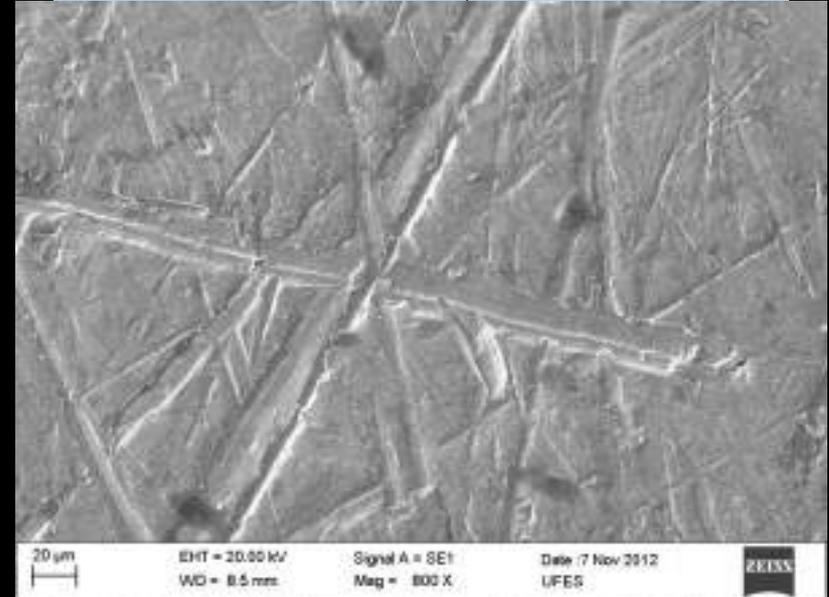
# Sulcamento/riscamento/corte em vários sistemas

Pino-lixas de sílica (Karla Tozetti)

Rotor de bomba de minério



Mascia e Franco, 2001

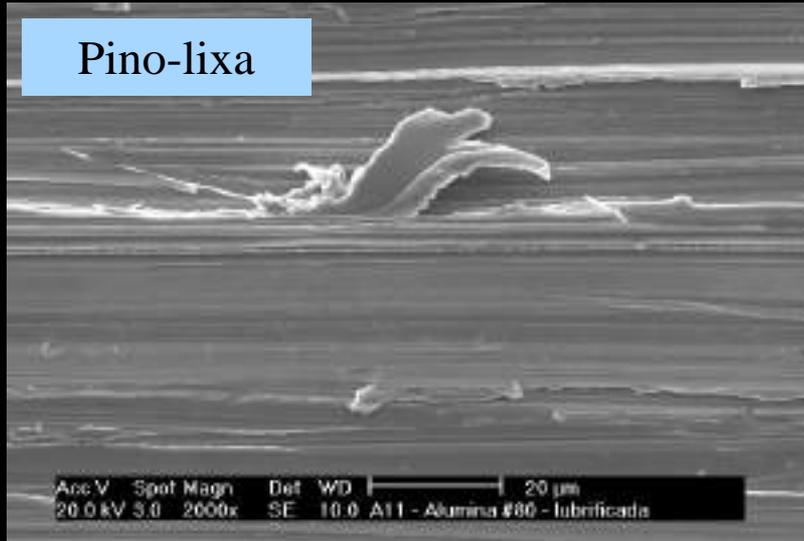


Ensaio microabrasão  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> x aço ferramenta  
(Trezona, 1999)



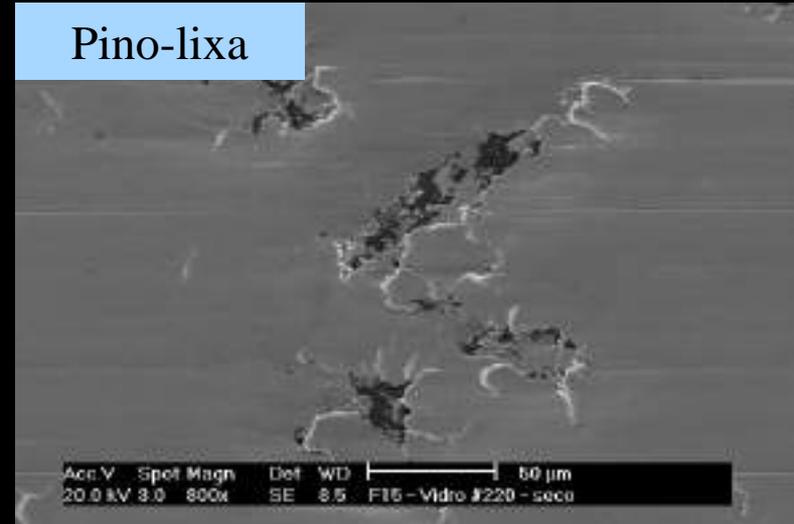
# Sulcamento/riscamento

Pino-lix



Com corte (abrasivo mais duro; alumina)

Pino-lix



Sem corte (abrasivo menos duro; vidro)

# Rolamento/impressões em vários sistemas

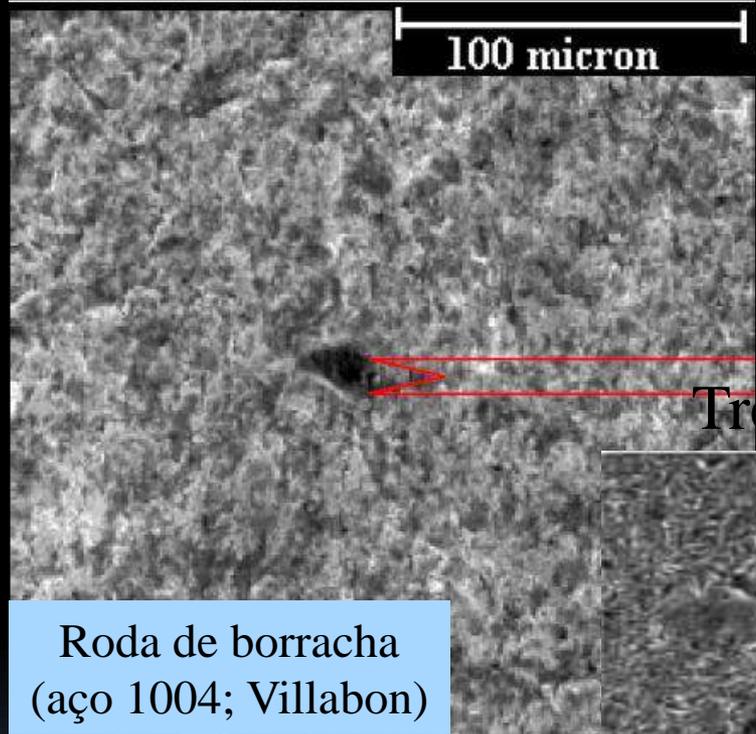
Britador (mandíbula móvel)



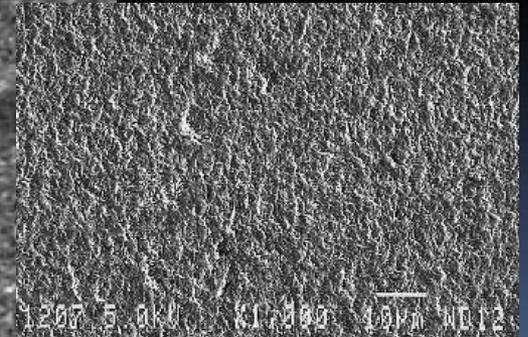
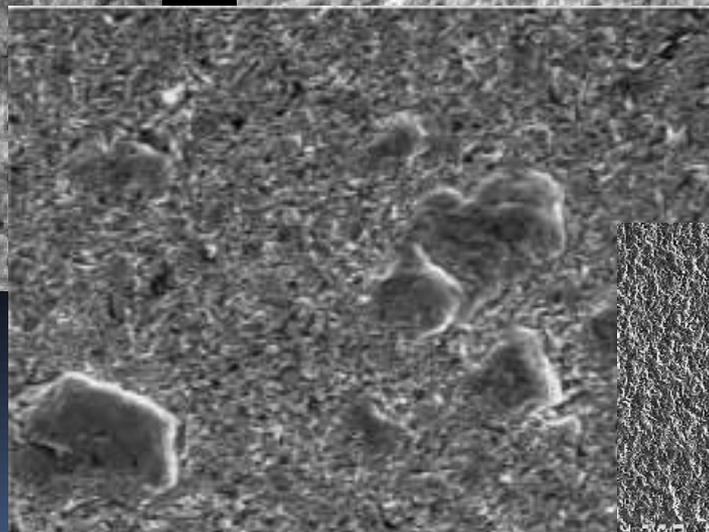
Trezona, 1999

100 micron

Roda de borracha  
(aço 1004; Villabon)



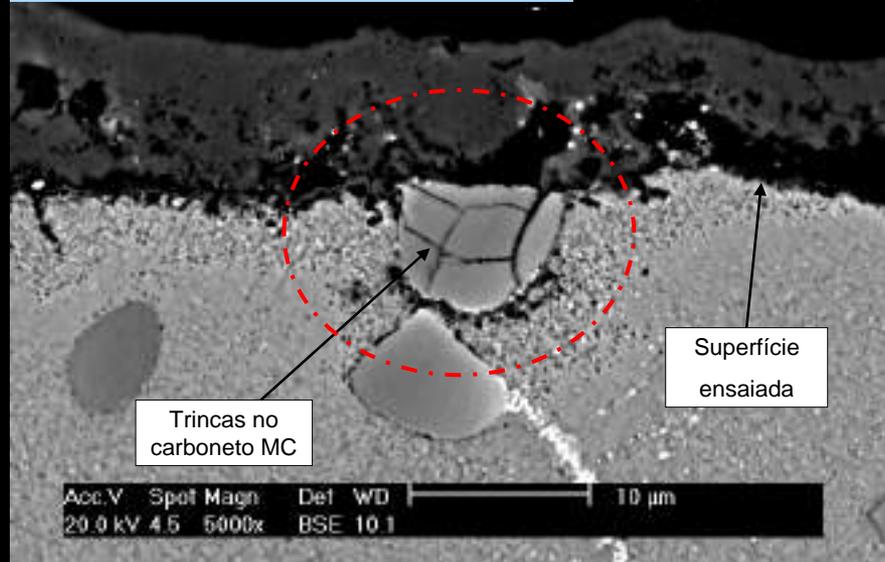
Ensaio microabrasão SiC 4,5µm  
aço ferramenta (Trezona)



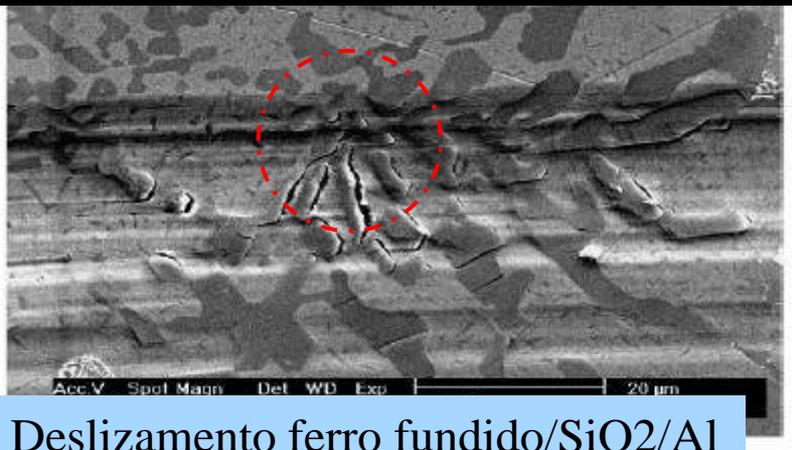
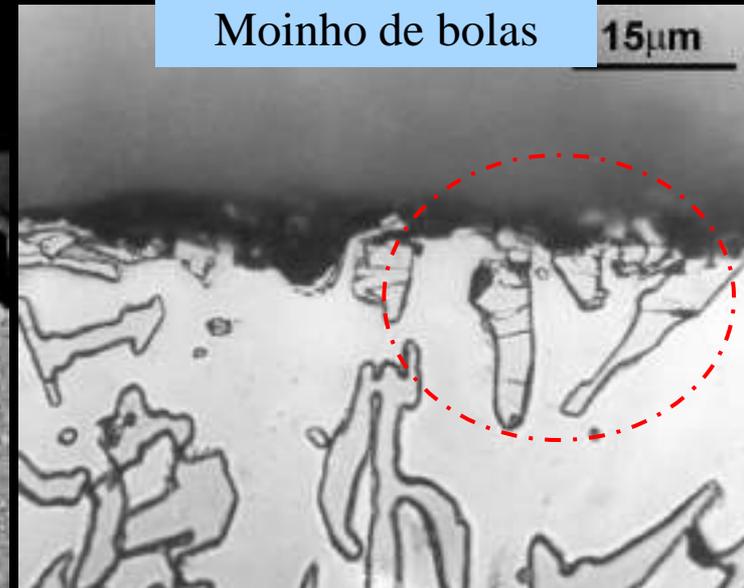
10 µm

# microtrincamento em vários sistemas

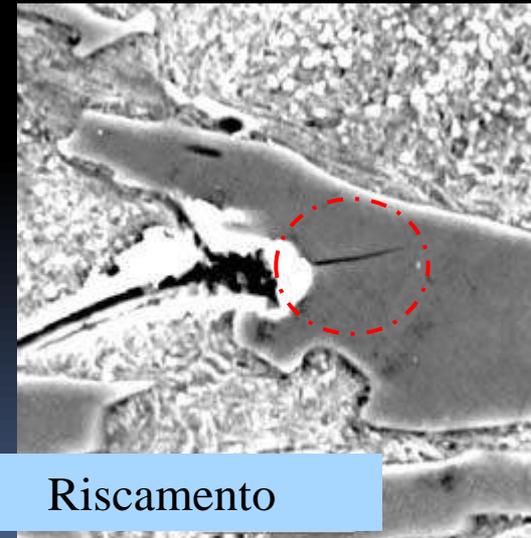
Pino contra lixa



Moinho de bolas



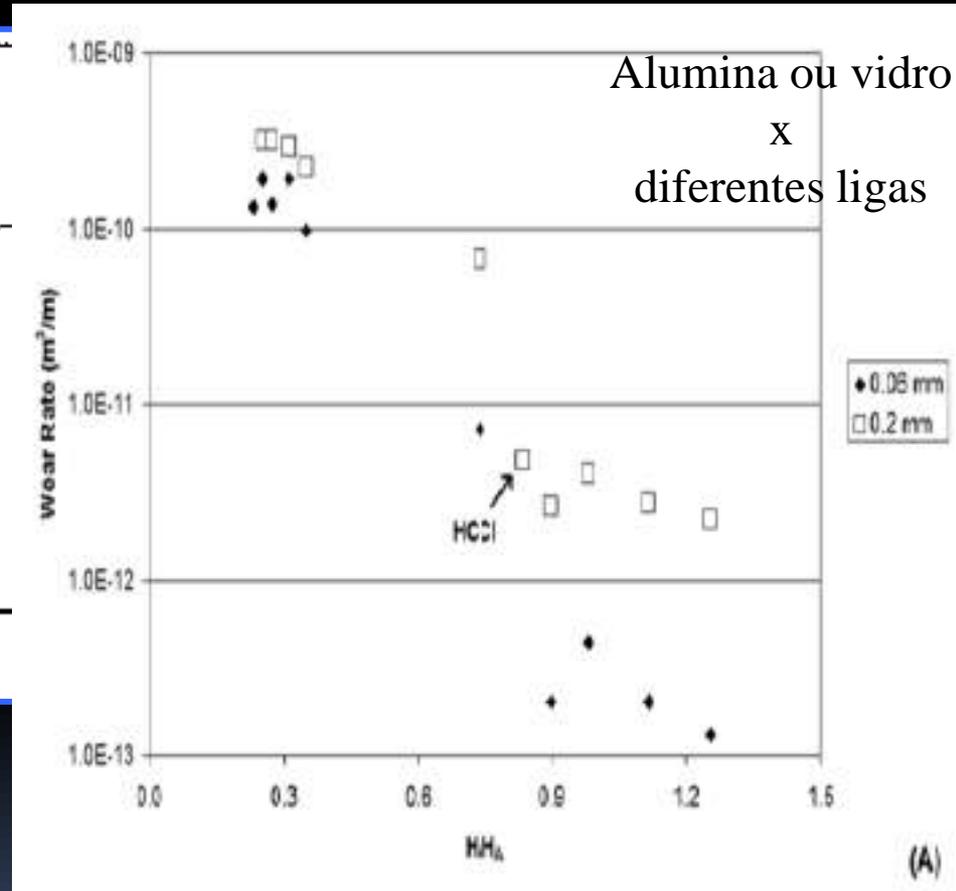
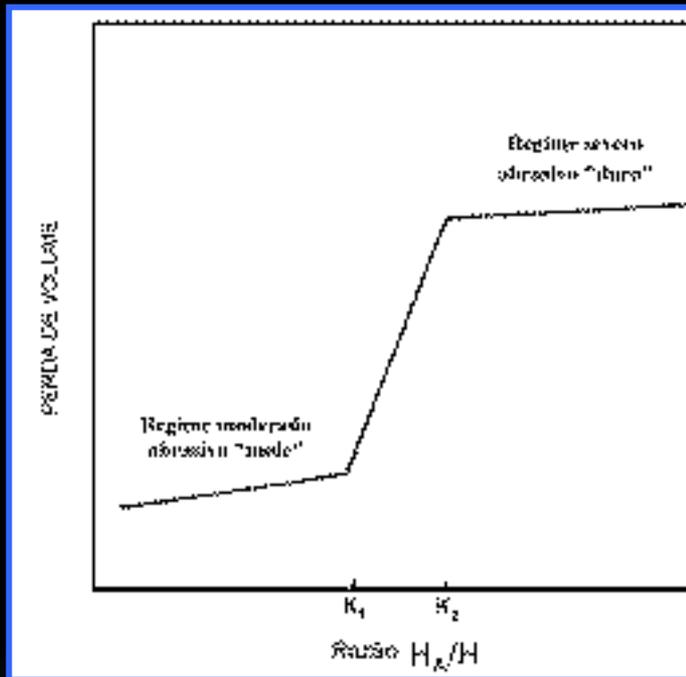
Deslizamento ferro fundido/SiO<sub>2</sub>/Al



Riscamento

# Severo/moderado

Taxa de desgaste: diferenças de ordens de grandeza



OUTROS PARÂMETROS DE SEVERIDADE:

- Aspecto da superfície: lisa x rugosa x sulcos macroscópicos
- Aspecto das partículas desgastadas: finas x grosseiras

# Discussão “filosófica”: Por que classificar?

- Classificar significa agrupar casos em conjuntos, admitindo-se que os elementos de cada conjunto tenham características comuns que levam a um desenvolvimento semelhante ou permitem um tratamento similar.
  - ✓ Desgaste correspondente a uma determinada classificação seria avaliado por um correspondente tipo de ensaio.
  - ✓ Espera-se alguma correspondência entre “tipo de desgaste” e seleção de materiais para resistir ao desgaste.

# Por que classificar?

As conseqüências práticas de classificar os tipos de desgaste seriam:

- Associar testes padronizados com situações práticas.
- Orientar a seleção e o desenvolvimento de materiais resistentes ao desgaste.

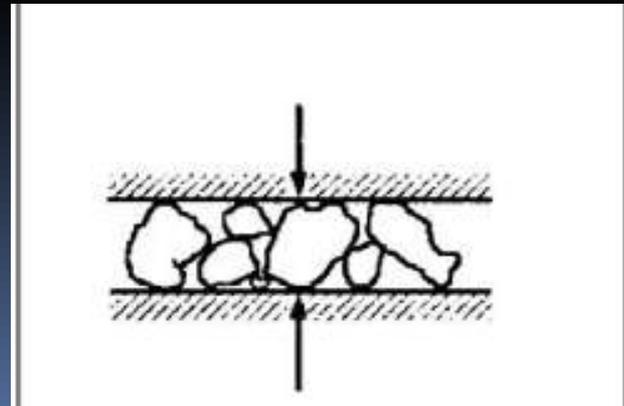
# Algumas palavras sobre a classificação

“Low stress / high  
stress / gouging  
abrasion”

Esta classificação vem diretamente  
da prática na indústria de  
mineração

# high stress (grinding)

- Caso prático de moinhos – ocorre quebra dos grãos de minério (“high stress”)
- Portanto geralmente os grãos do abrasivo exercem força suficiente para causar penetração na superfície desgastada e eventualmente fratura de partículas duras do material.



# Low stress (scratching)

- Caso prático de calhas – os abrasivos apenas deslizam sobre a superfície, exercendo força de pequena intensidade.



# gouging

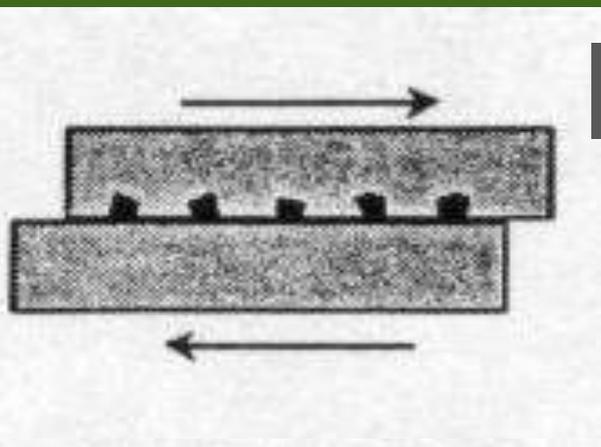
- Caso prático de britadores: deformações macroscópicas nas superfícies causadas por abrasivos de grandes dimensões (~dezenas de centímetros)



# Low stress / high stress / gouging

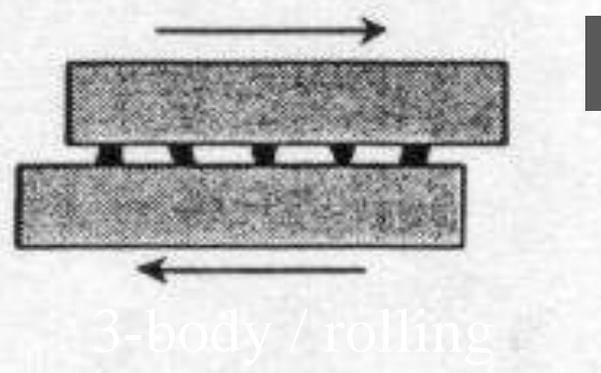
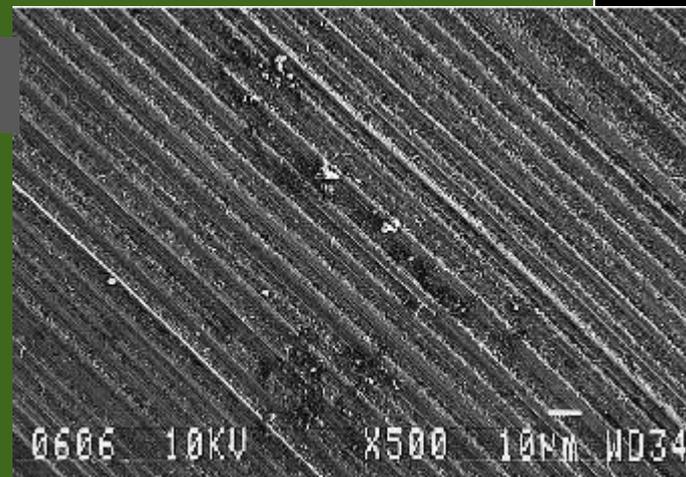
- ✓ É possível adotar critérios mais científicos e quantitativos:
  - medição / estimativa de valores de tensões.
  - análise das superfícies de desgaste
  - medição de efeitos de endurecimento superficial.
- ✓ A descrição da aplicação geralmente é suficiente para orientar a definição de ensaios e seleção de materiais, independentemente da classificação.

# Classificações: 2 corpos vs. 3 corpos



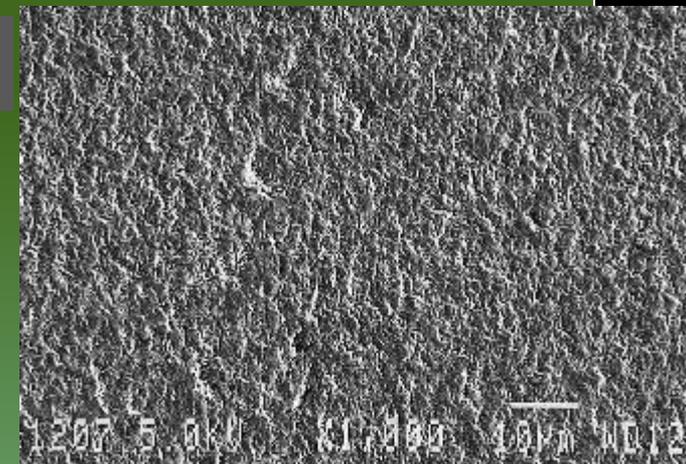
2-body

Corte



3-body

impressões



# Problemas com a classificação 2 corpos vs. 3 corpos

À medida em que se dispõe de metodologias para identificar os mecanismos atuantes nos casos práticos, parece (“é”) pouco produtiva a insistência no sistema de classificação 2 corpos vs. 3 corpos.

Ver. J. D. Gates, *Wear*, 214 (1998), 139-146

# Problemas com a classificação 2 corpos vs. 3 corpos

Ver. J. D. Gates, *Wear*, 214 (1998), 139-146

## Abstract

- Há duas interpretações, cujas implicações são mutuamente inconsistentes.
- Na interpretação dominante, o conceito refere-se à presença de abrasivos fixos (2 corpos) ou livres para rolar (3 corpos); nesse caso, a abrasão a 2 corpos seria muito mais severa.
- Outra interpretação enfatiza a existência (3 corpos) ou ausência (2 corpos) de um contracorpo rígido. Neste caso, a abrasão a 3 corpos corresponderia à “high stress abrasion”, sendo mais severa.
- “ This paper recommends that the ‘two-body/three-body’ terminology be **abandoned**, to be replaced by an alternative classification scheme based directly upon the manifest severity of wear.”

# Problemas com a classificação 2 corpos vs. 3 corpos

- Calha de minérios : 2 corpos, porém distante do mecanismo pressuposto na definição clássica.
- Bolas de moinho: 3 corpos, mas se observam riscamentos “típicos” de 2 corpos.
- Britador: mecanismos diferentes em cada mandíbula

# Problemas com a classificação 2 corpos vs. 3 corpos



# Problemas com a classificação 2 corpos vs. 3 corpos

Mandíbulas de britador

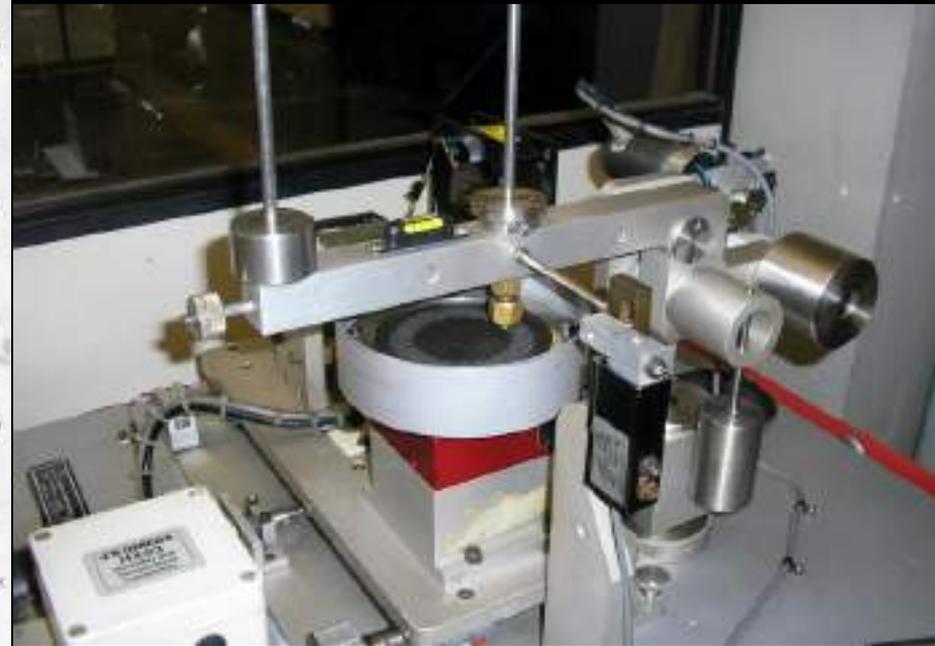
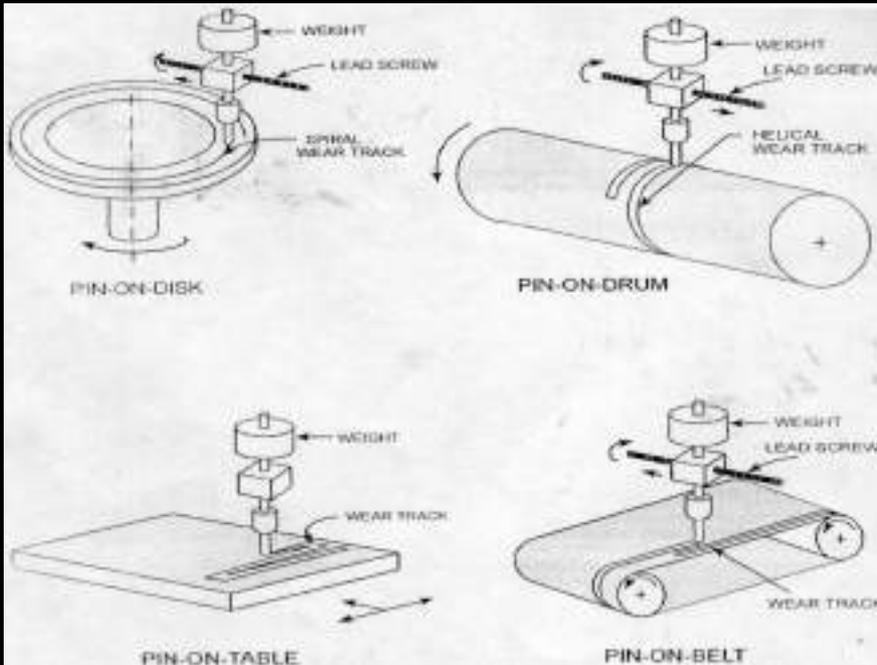


1 ensaio,  
2 mecanismos !!



**ensaios**

# ASTM G-132 (pino contra lixa)

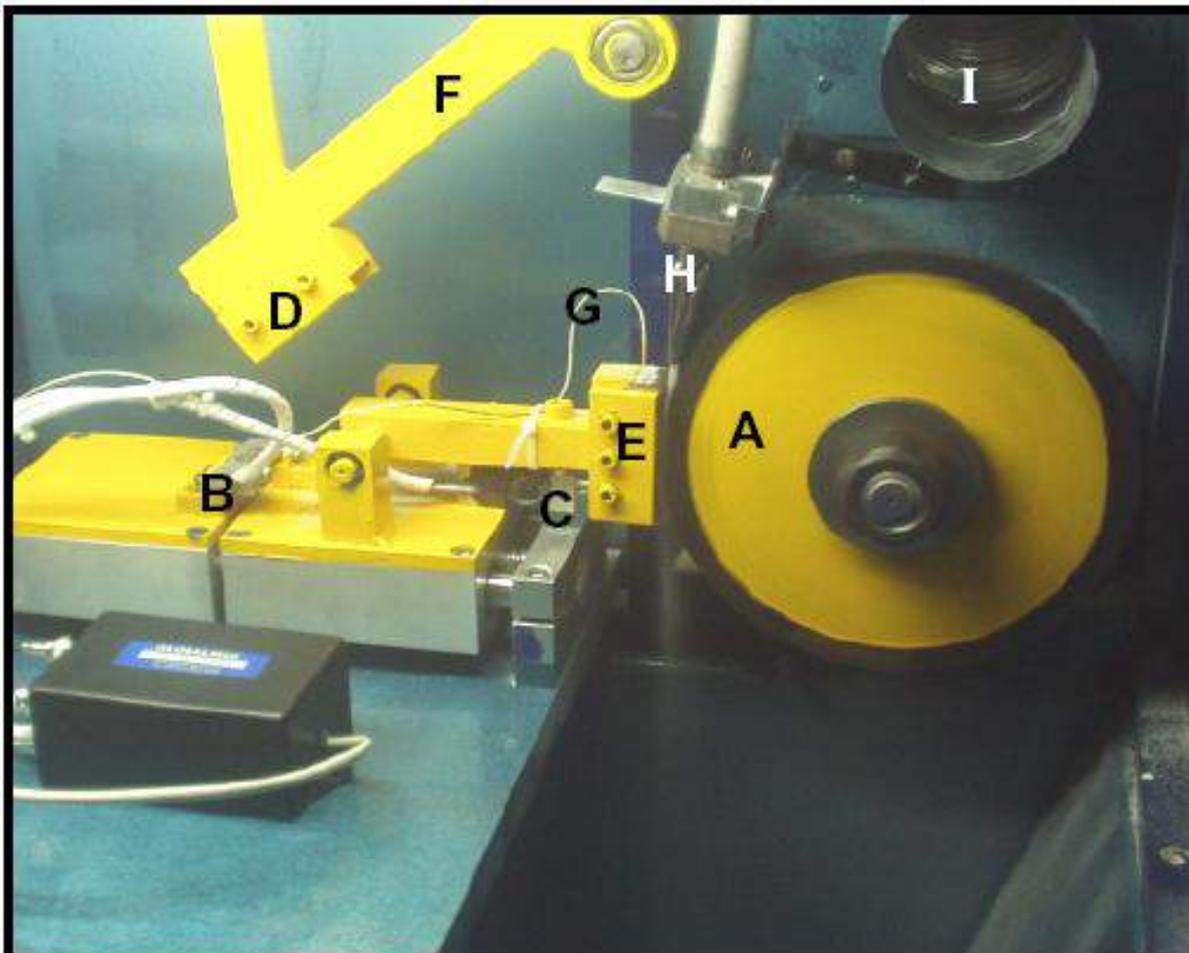


## Parâmetros:

- Dureza do abrasivo
- Tamanho
- Forma
- Carga
- Lubrificação
- Sobreposição

# testes padronizados

## ASTM G-65 ( roda de borracha)



Abrasivo = areia de sílica

Variáveis:

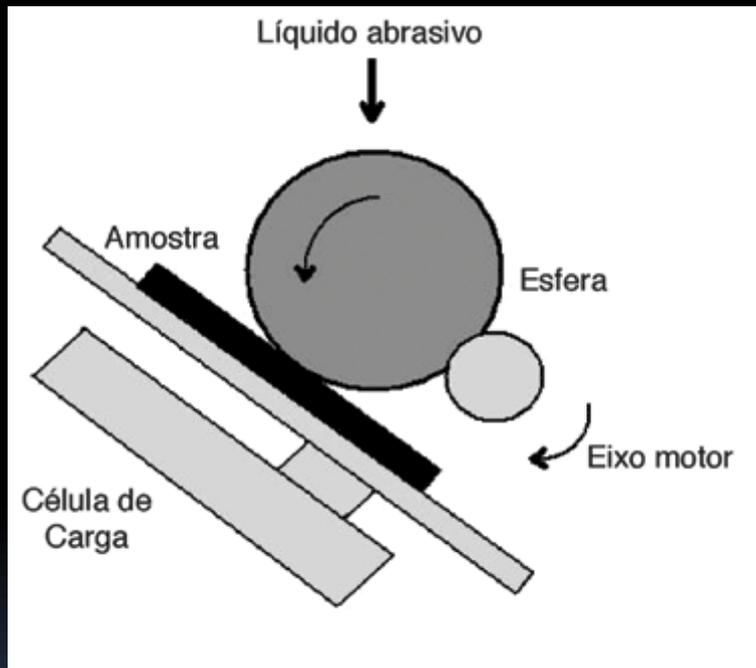
- carga
- granulometria

ASTM G-65 ??

- Borracha?
- Areia?

# Outros testes

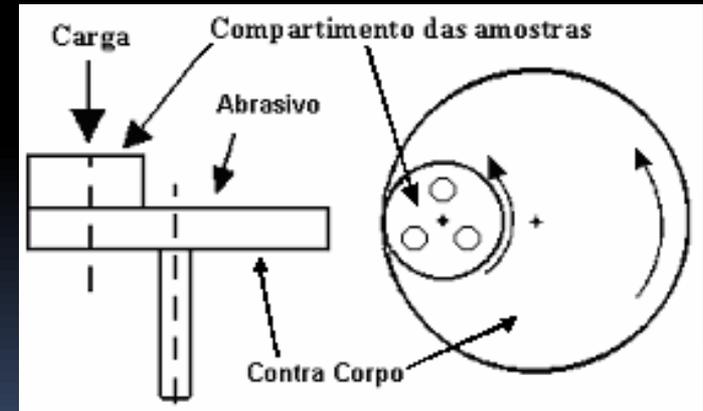
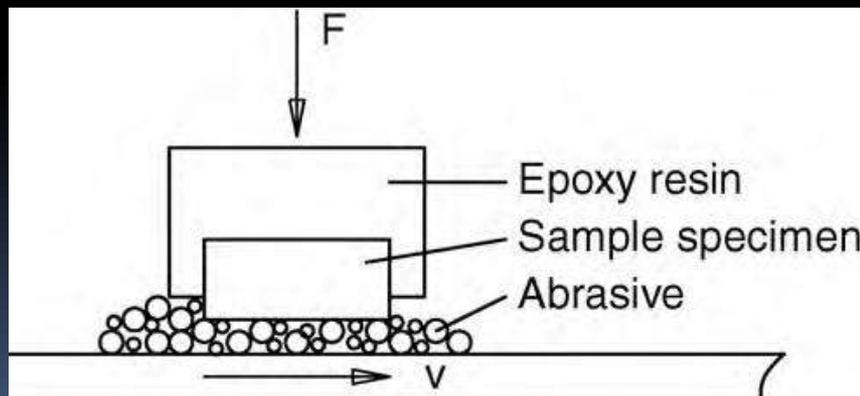
## microabrasão



# Outros testes

Technical University of Denmark

LTM (UFU)



# Mapa de abrasão

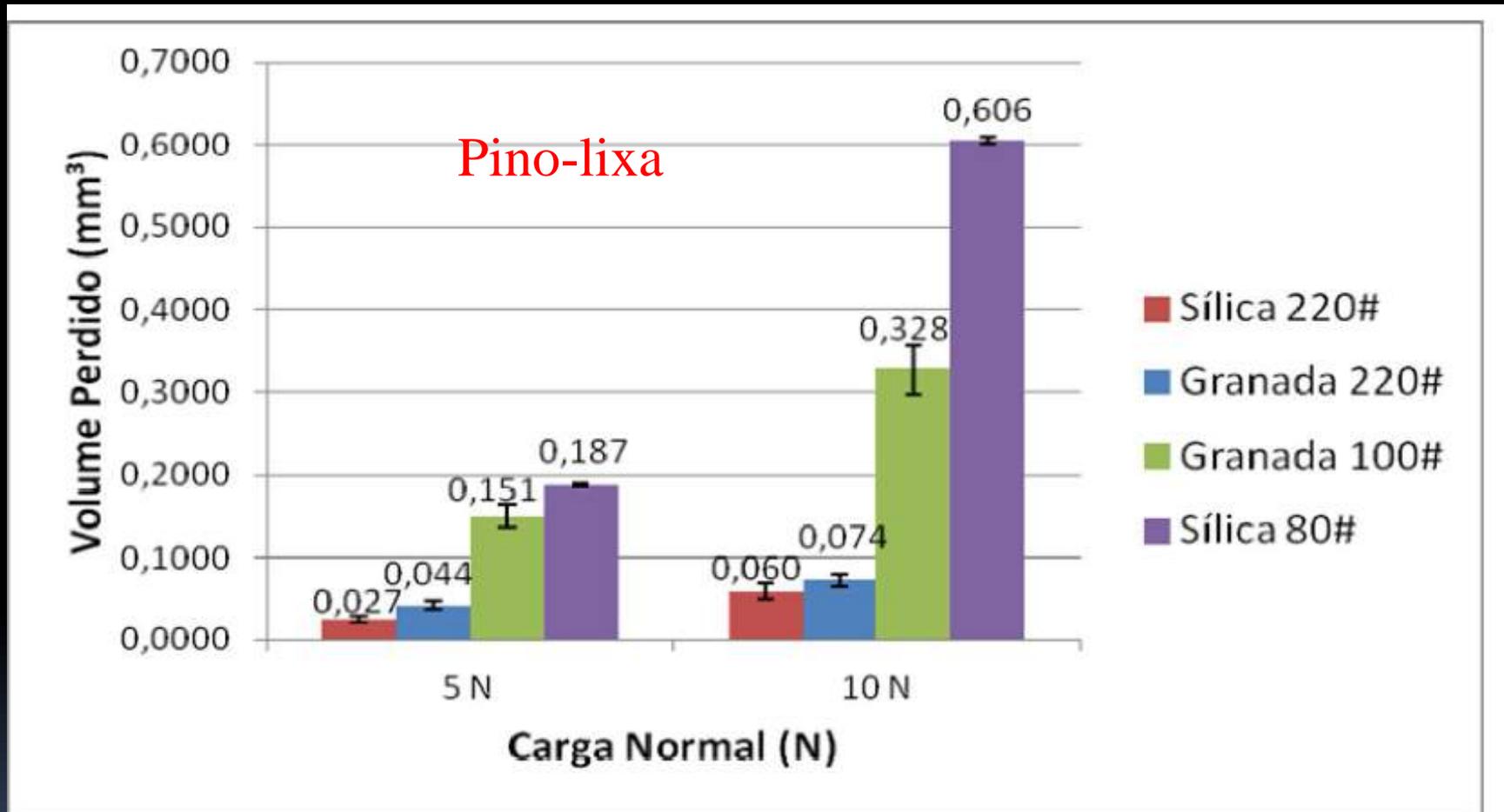


Figura 7. Gráfico do volume perdido no desgaste abrasivo no pino sobre lixa, em função da carga normal, do tamanho da partícula abrasiva e do material da lixa.

# Mapa de abrasão

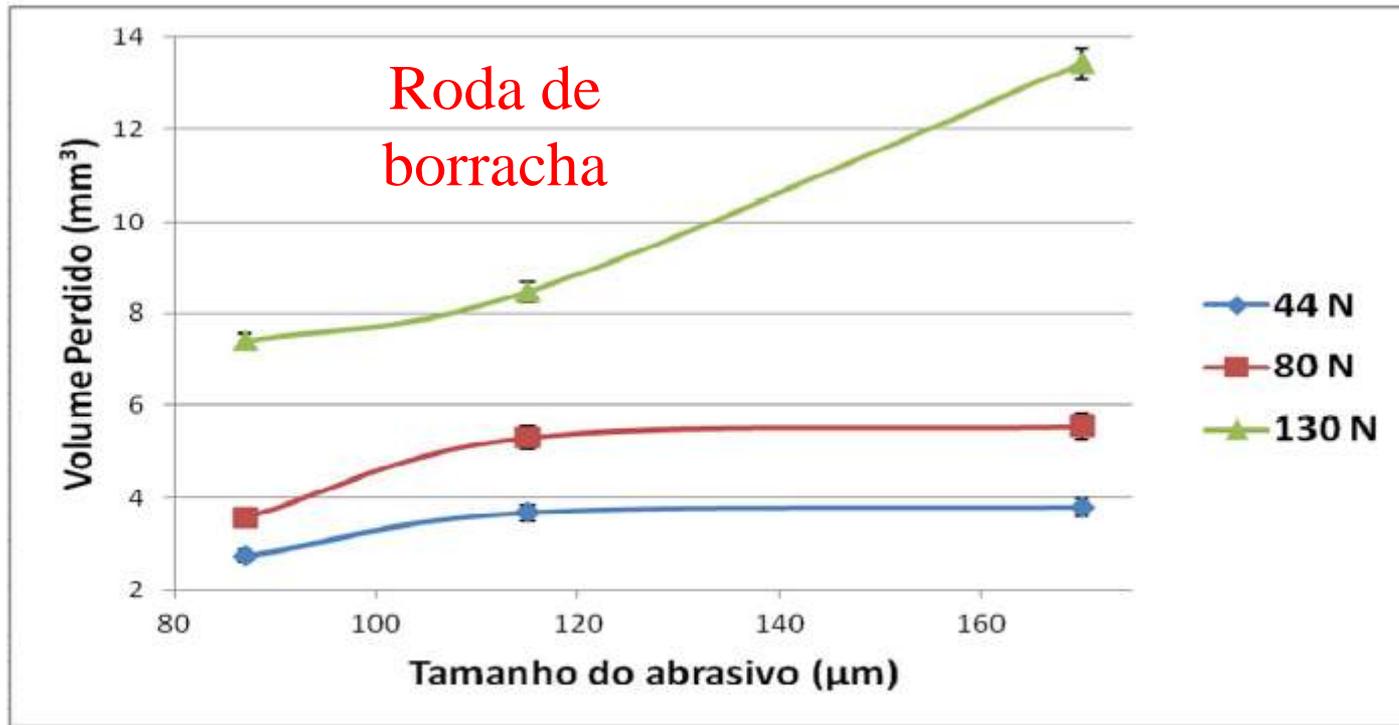


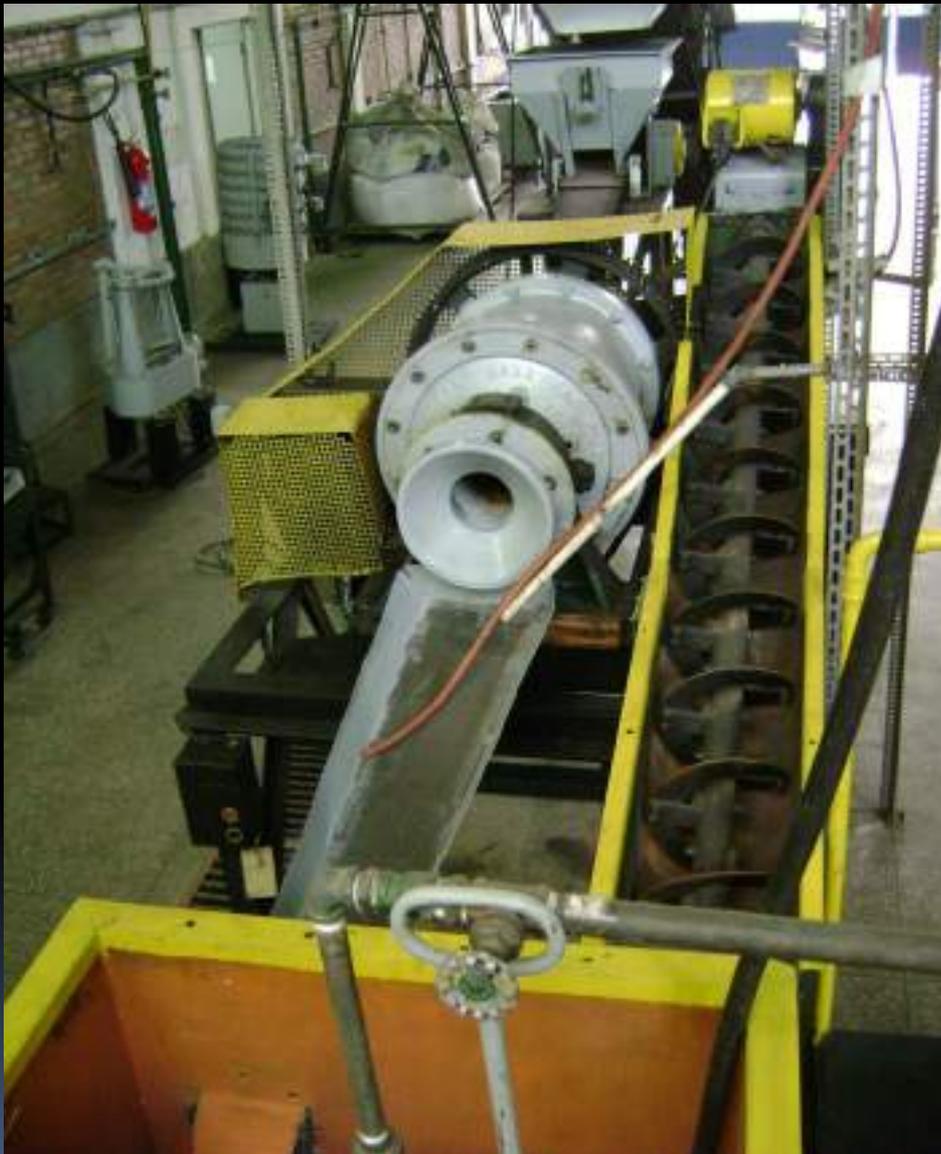
Figura 10. Gráfico do volume perdido nos ensaios de desgaste abrasivo no equipamento roda de borracha em função da carga normal e do tamanho da partícula abrasiva. Com ênfase no tamanho crítico do abrasivo (TCA) entre 100 e 120μm.

Karla Tozetti

# Simulações da aplicação

- Moinho de bolas de laboratório
- Britador de mandíbulas
- Montagens específicas simulando a situação prática

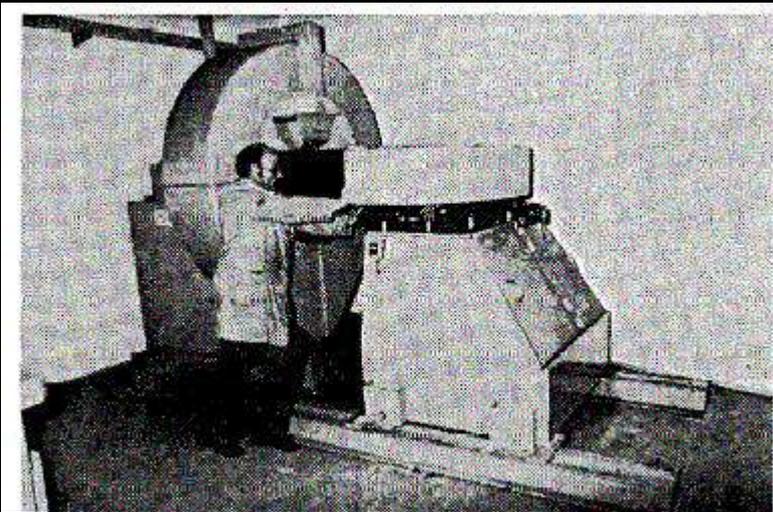
# Outros testes



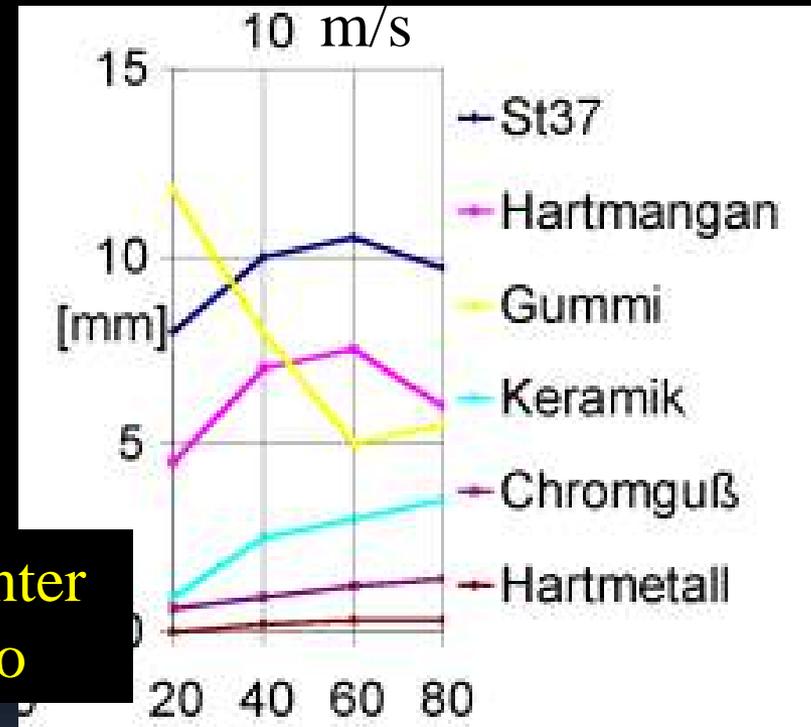
## Planta piloto de moagem (IPT):

- Abrasivo: minérios
- Moagem contínua a úmido
- Possibilidade de variar características da água. (pH, ions).

# Montagens específicas simulando a situação prática



Mq. Para simular desgaste por sinter durante transporte e alimentação



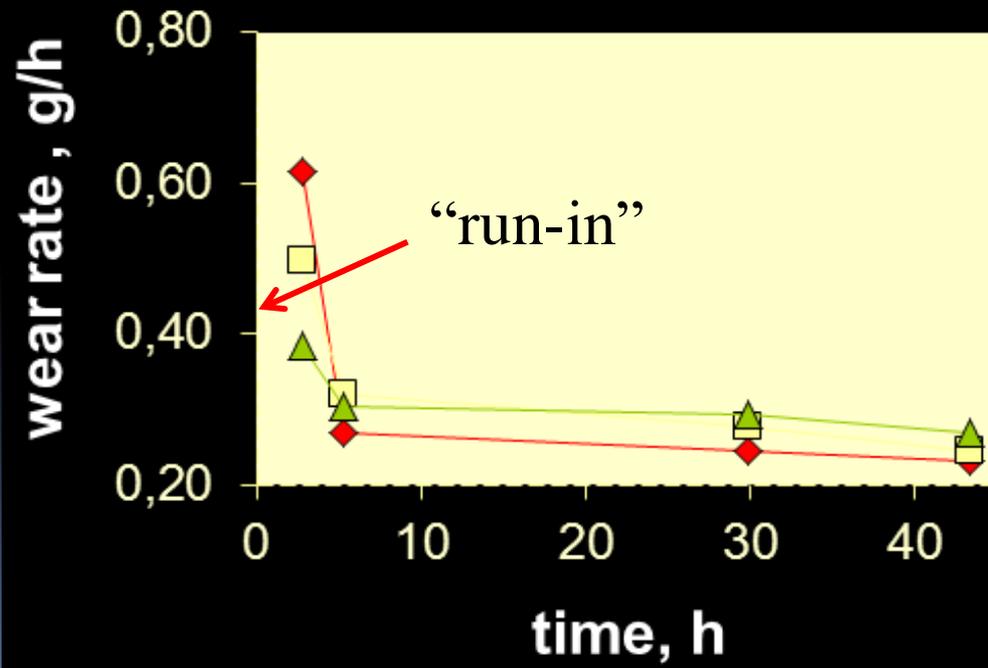
OPTIMIZATION OF WEAR-RESISTANT MATERIALS SUBJECT TO ABRASIVE-IMPACT STRESS BY IRON-ORE SINTER

Author(s): DEUTSCHER, O Source: STAHL UND EISEN Volume: 113 Issue: 4 Pages: 127-132

# Recomendações

# RECOMENDAÇÕES

- Resultados comparativos: utilizar material de referência
- Verificar se o ensaio está no regime permanente



# RECOMENDAÇÕES

- Expressar claramente os resultados (que ensaio, que carga, características do abrasivo, etc)
- Ex: Taxa de desgaste =  $10 \text{ mm}^3/\text{N}/\text{m}$  (roda de borracha, 30N, areia 300-600  $\mu\text{m}$ )

# RECOMENDAÇÕES

➤ Reproduzir o mecanismo de desgaste predominante

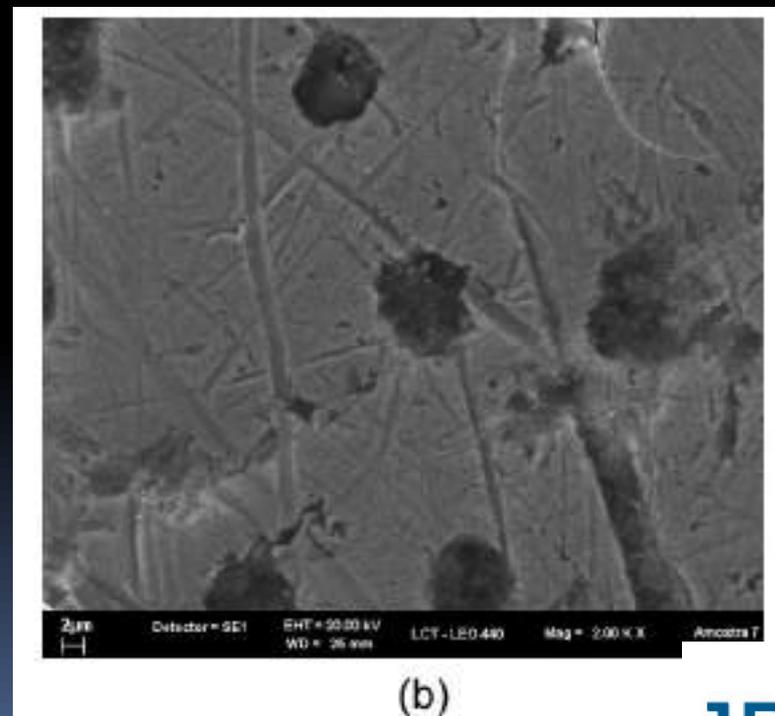
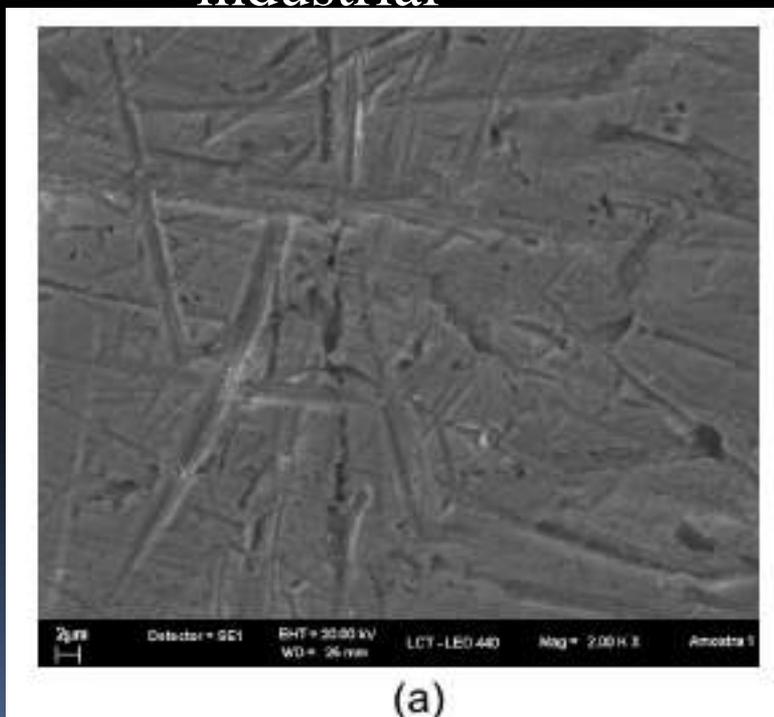


# Mecanismo de desgaste ensaio x aplicação

Superfície de bolas de aço  
após moagem de carvão

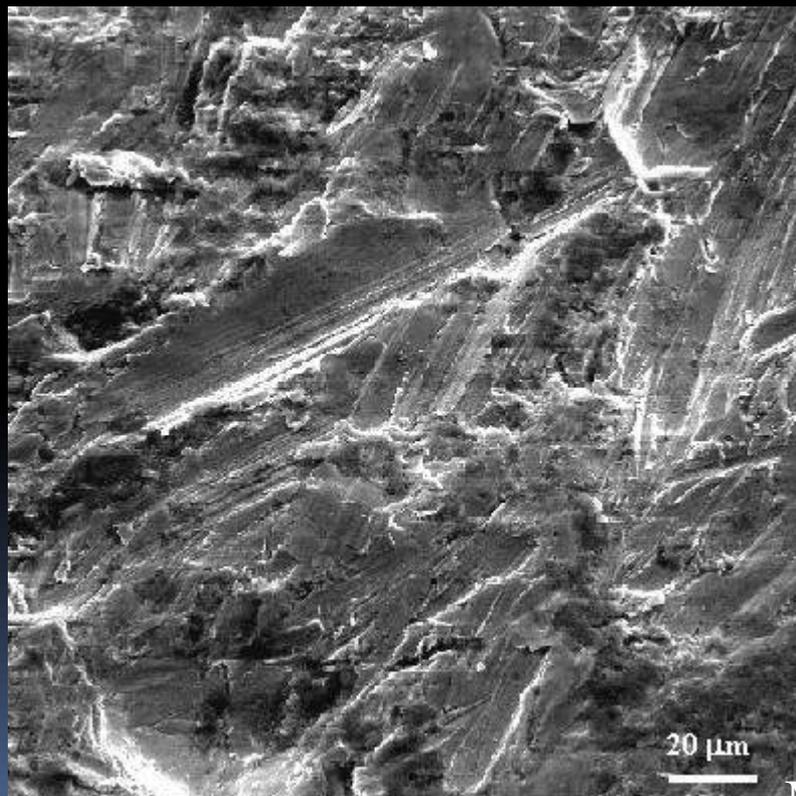
Moinho  
industrial

Ensaio

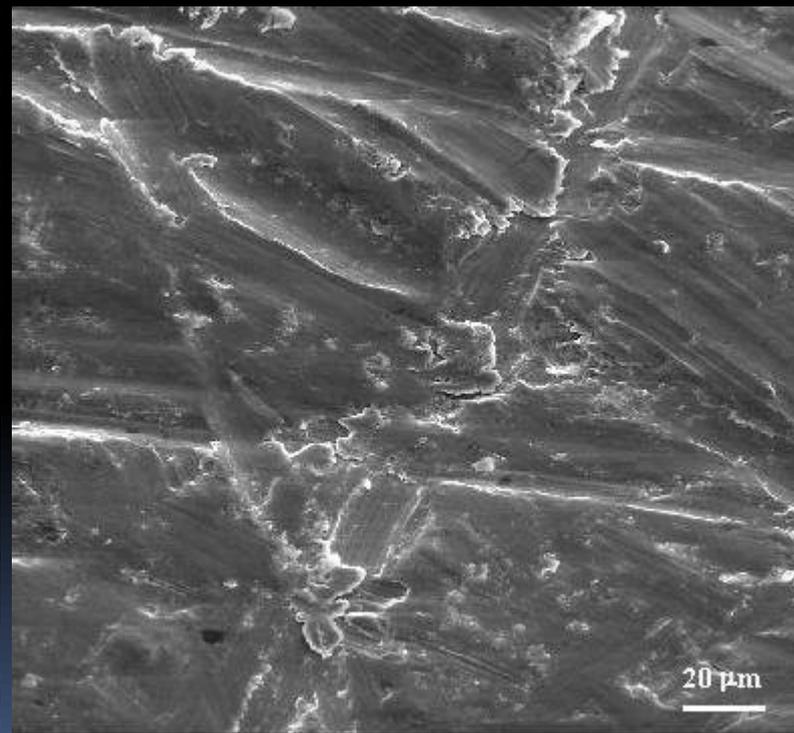


# Mecanismo de desgaste ensaio x aplicação

Superfície de bomba  
de minério



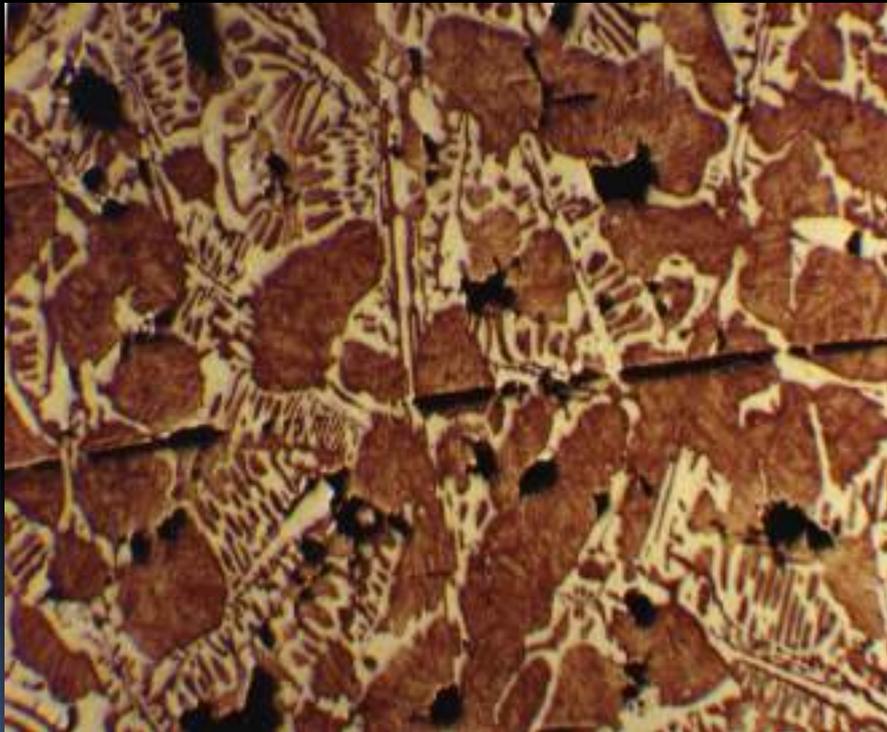
Ensaio pino x lixa  
de sílica



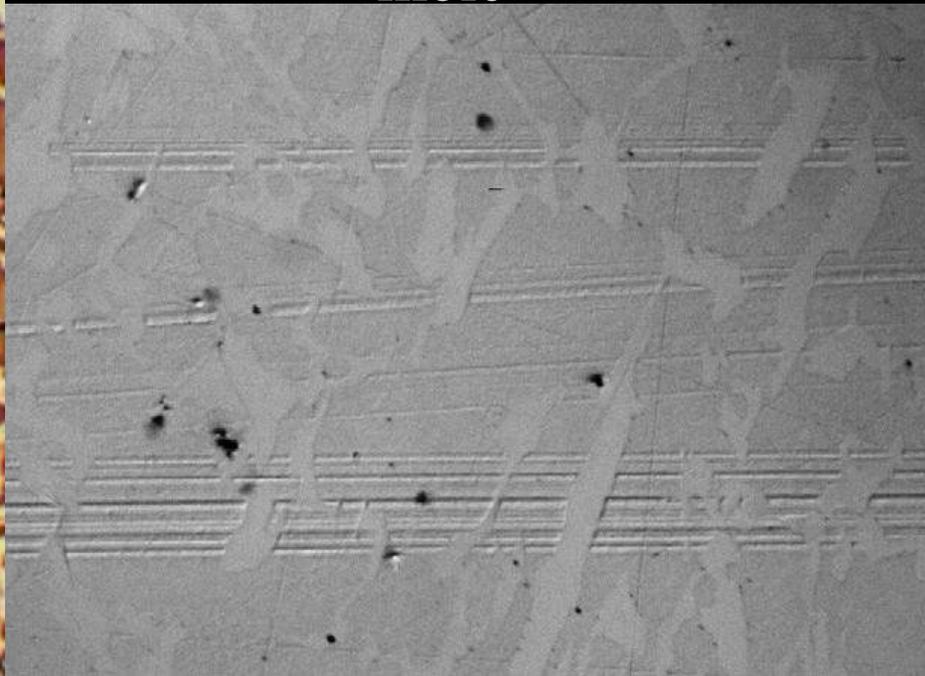
Mascia e Franco

# Mecanismo de desgaste ensaio x aplicação

Superfície cilindro de  
laminação



Ensaio c/ abrasivo  
“mole”



O abrasivo corta a matriz, mas não os carbonetos

Para que fazer ensaios de desgaste ?

# Para que fazer ensaios de desgaste ?

- Resolução de problemas
- Seleção de materiais / Desenvolvimento de materiais
- Pesquisa básica sobre desgaste

# Resolução de problemas

Caso típico: aumento inesperado das taxas de desgaste (diminuição de vida útil):

- Situação ideal: os materiais utilizados são ensaiados regularmente, utilizando-se um dos ensaios padronizados. Ensaios na situação de “crise” revelam possíveis desvios.
- Ensaios podem evidenciar mudanças na agressividade do sistema ( p. ex. materiais processados tornam-se mais abrasivos).



# Seleção ou desenvolvimento de materiais

- Estudos com vistas a redução de custos / aumento de vida útil
- Adequação a mudança de condições de operação de equipamentos
- Novos processos / equipamentos
- Mudança dos materiais processados
- Competição entre empresas fornecedoras de materiais e peças; desenvolvimento de novos fornecedores.

# Seleção ou desenvolvimento de materiais

- Analisar o tipo predominante de desgaste .
- Custo, custo/benefício (“\$/t processada”; custo de parada).
- Outras propriedades: corrosão, temperatura
- Disponibilidade comercial.
- Utilizar os materiais tradicionais como referência (“baseline”).
- Testes padronizados versus simulação.



# Seleção ou desenvolvimento de materiais

## Testes padronizados

### vantagens

- Facilitam comparação com dados anteriores e de terceiros.
- Há disponibilidade em várias empresas e centros de pesquisa.
- Existem normas e informações sobre reprodutibilidade, precisão, n° mínimo de ensaios, etc.

### desvantagens

- As interações abrasivo/material nos ensaios podem ser muito diferentes da situação real.
- São obtidos “rankings” mas não dados para projeto ou previsão de vida.

# Seleção ou desenvolvimento de materiais

## Simulações

### vantagens

- Possibilidade de reproduzir interações abrasivo-material esperadas no caso prático.
- Possibilidade de obter taxas de desgaste da mesma natureza que no caso prático.
- Casos de sucesso: britador ; moinho de bolas; ensaio com lamas abrasivas.
- “Credibilidade” /transferibilidade.

### desvantagens

- Falta de padronização: cada um faz o “seu” ensaio. Risco de procedimentos variarem muito.
- Não há garantia de que modelos em escala reduzida produzam as mesmas solicitações que o caso real.
- Dificuldade para validar.

# Seleção ou desenvolvimento de materiais

## Simulações: Caso de bolas de moinho

### Laboratório

Diam moinho = 0,4 m

Bolas : 50 mm ( 10 por material)

Abrasivo: minério de fosfato

Tempo : 100 a 200 h

### Campo

Diam moinho = 4,8 m

Bolas : 50 mm ( 1.000 a 2.000 por material)

Abrasivo: minério de fosfato

Tempo : 1.000 a 2.000 h

simulação das variáveis de moagem: moagem contínua ,  
% sólidos, rotação do moinho, recirculação

# Seleção ou desenvolvimento de materiais

| Material das bolas                 | Taxa de desgaste Laboratório (Moinho 0,4m) | Taxa de desgaste Campo (moinho 4,8 m) |
|------------------------------------|--|---------------------------------------|
| Fofo alto Cr-<br>Fornecedor A      | 1,87                                       | 4,10                                  |
| Aço forjado, T & R<br>Fornecedor B | 3,55                                       | 7,97                                  |
| Fator de desgaste B/A              | 1,90                                       | 1,94                                  |



# Pesquisa básica sobre desgaste

- Evento único
  - ensaios de riscamento
- Transições
  - mapas de desgaste
- Medições em escala micro e nano
  - técnicas de micro e nano dureza



# Efeito do tamanho do abrasivo

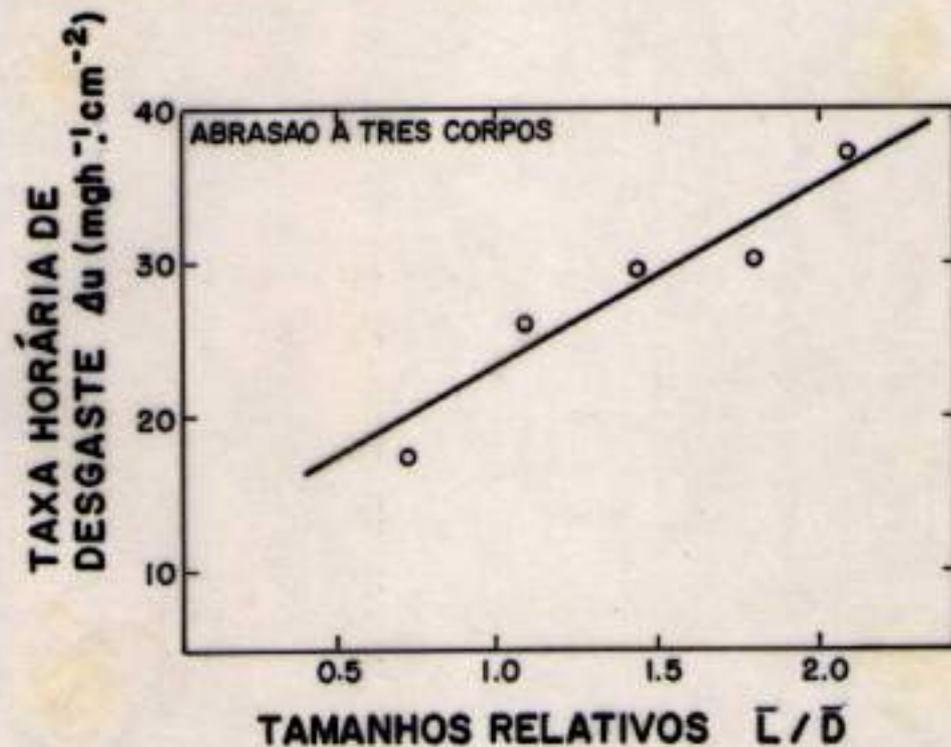
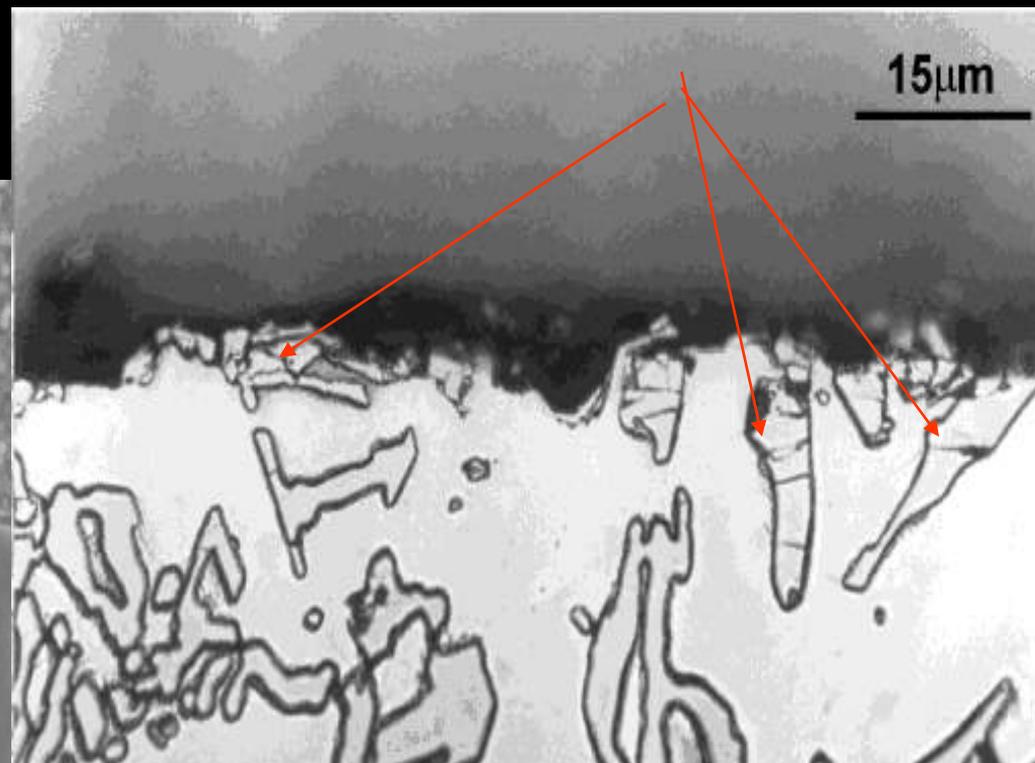
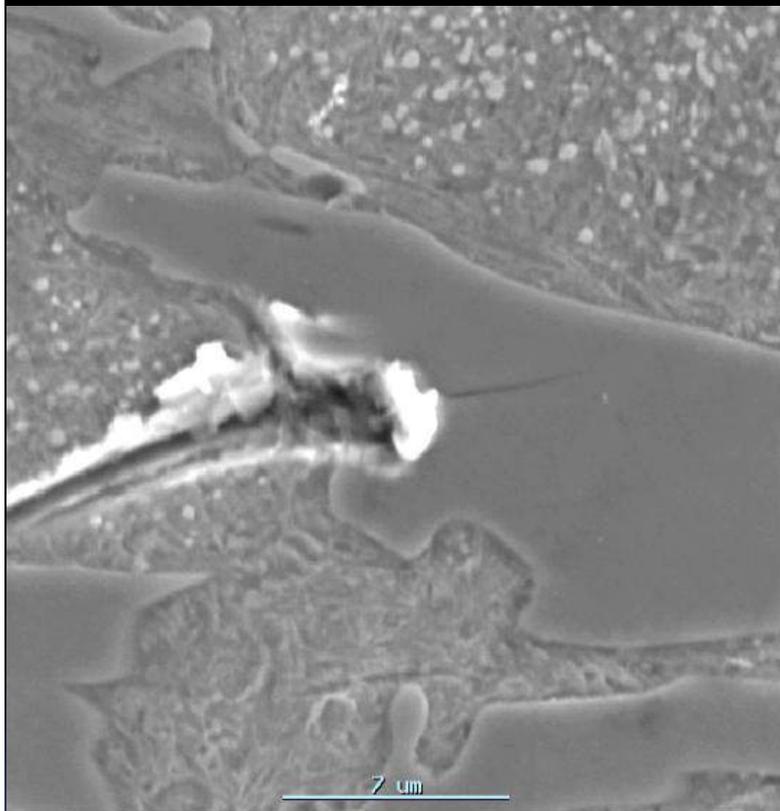


Figura 44. Variação do desgaste com a relação de tamanhos dos sulcos L e dos carbonetos D(9

A eficiência das partículas duras do material depende do tamanho em relação ao sulco produzido pelo abrasivo.



Estudo sobre condições que levam ao mecanismo de microtrincamento.

# Tamanho crítico do abrasivo

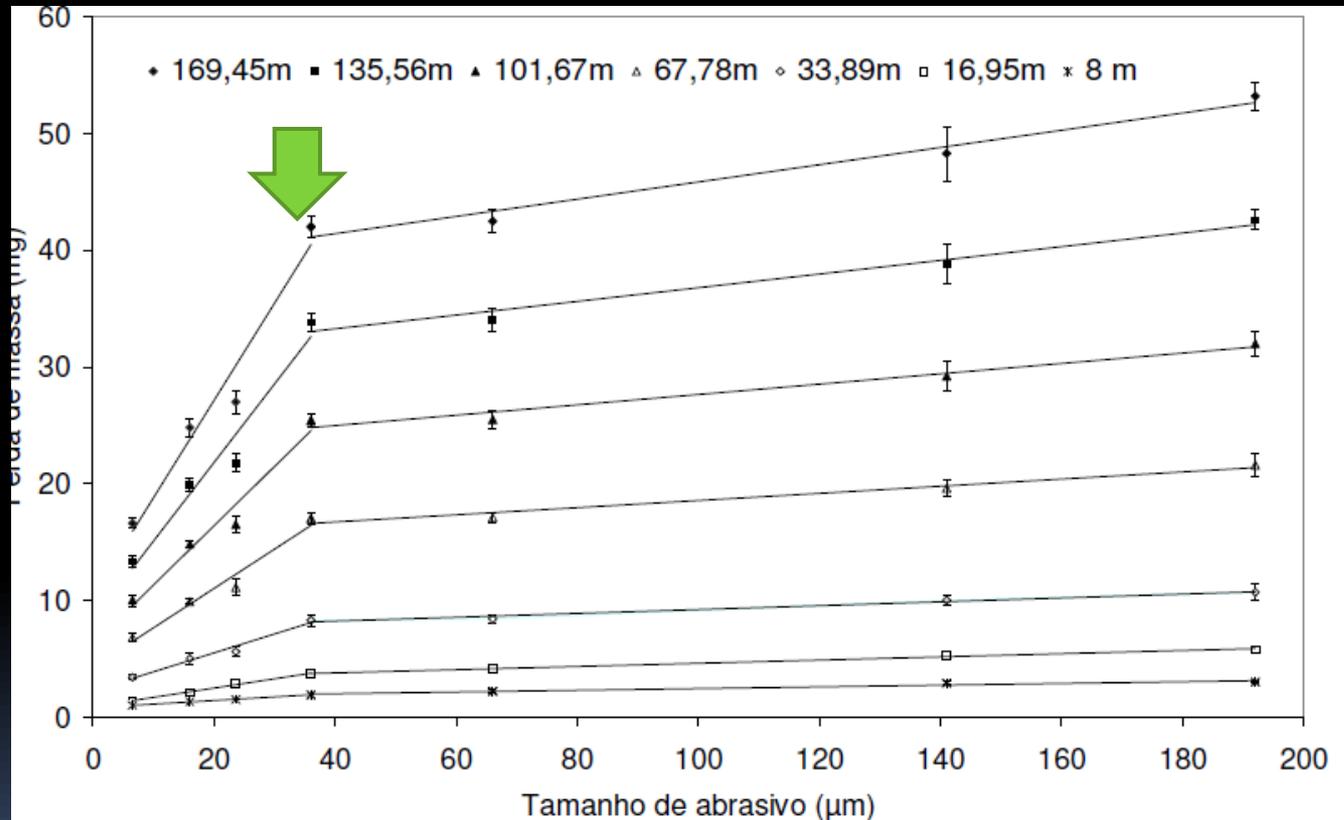
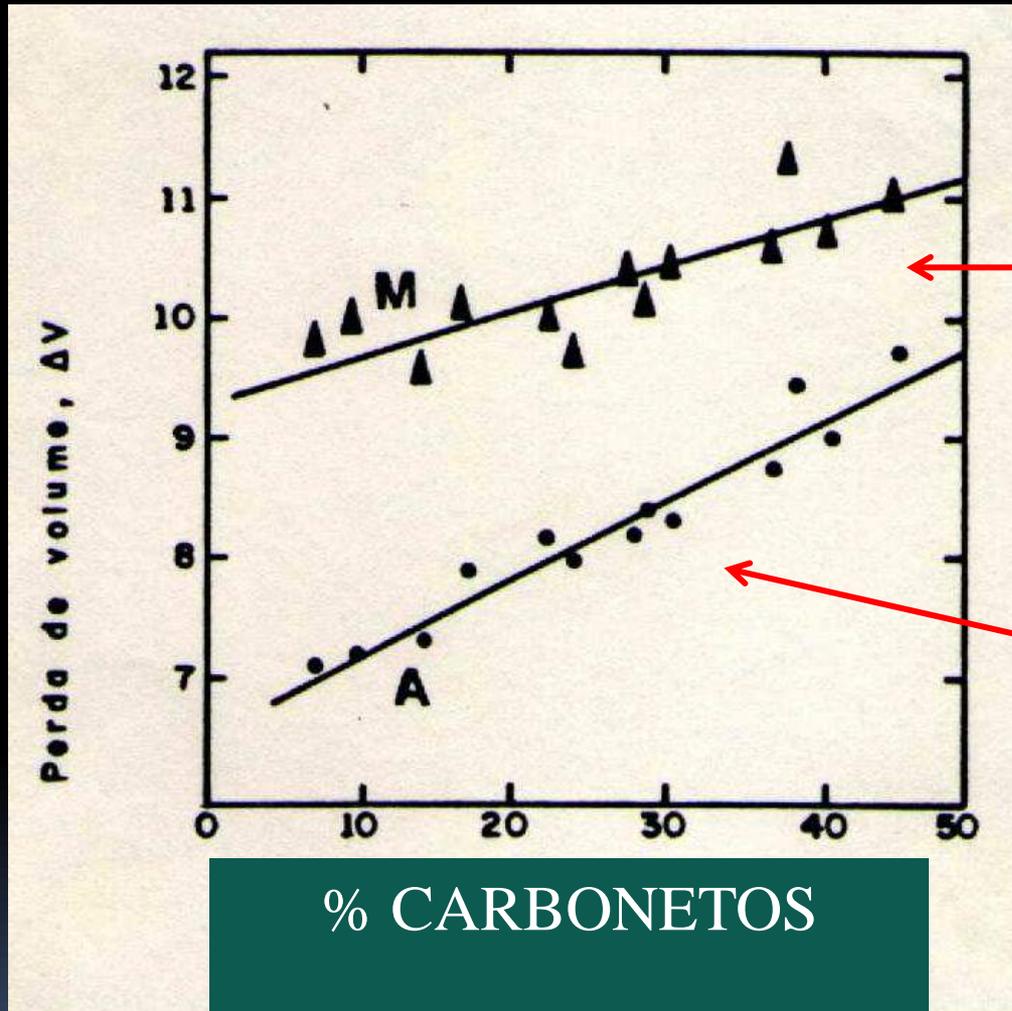


Figura 68. Relação entre a perda de massa e o tamanho de abrasivo para o FFB com matriz austenítica (CORONADO, SINATORA, 2009e)

# Um caso interessante...



Ferro fundido  
alto cromo  
martensítico

Ferro fundido  
alto cromo  
austenítico

Zum Gahr

Abrasivo “duro”: SiC

**OBRIGADO**



**CENTRO DE TECNOLOGIA EM  
METALURGIA E MATERIAIS - IPT**  
Laboratório de Processos Metalúrgicos