

Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica



*Defesa de Dissertação de Mestrado*

---

# TRIBOLOGIA DE CERÂMICOS DISSIMILARES NO DESLIZAMENTO EM ÁGUA

Estudos de Caso:  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-ZTA}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$ ,  
 $\text{ZrO}_2\text{-SiC}$ ,  $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{ZrO}_2\text{-ZTA}$

---

**Mestrando:**

*Nathan Fantecelle Strey*

**Comissão Examinadora:**

*Prof. Dr. Cherlio Scandian – UFES - Orientador*

*Prof. Dr. Antônio César Bozzi – UFES*

*Prof. Dr. Amilton Sinatora – USP*

*Prof. Dr. Deniol Katsuki Tanaka - USP*



UFES

PPGEM



# SUMÁRIO

---

---

1. INTRODUÇÃO
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
3. MATERIAIS E MÉTODOS
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES
5. CONCLUSÃO
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS
7. REFERÊNCIAS
8. AGRADECIMENTOS



**PPGEM**

Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica



# INTRODUÇÃO

---

---

# A IMPORTÂNCIA DA TRIBOLOGIA

---

---

- Redução do consumo energético e impacto ambiental
- 20% de toda energia produzida pelo homem é dissipada com atrito (HOLMBERG e ERDEMIR, 2014)
- 1,3 a 1,6% do PNB de um país poderia ser economizado com investimento adequado em tribologia (JOST, 1990)

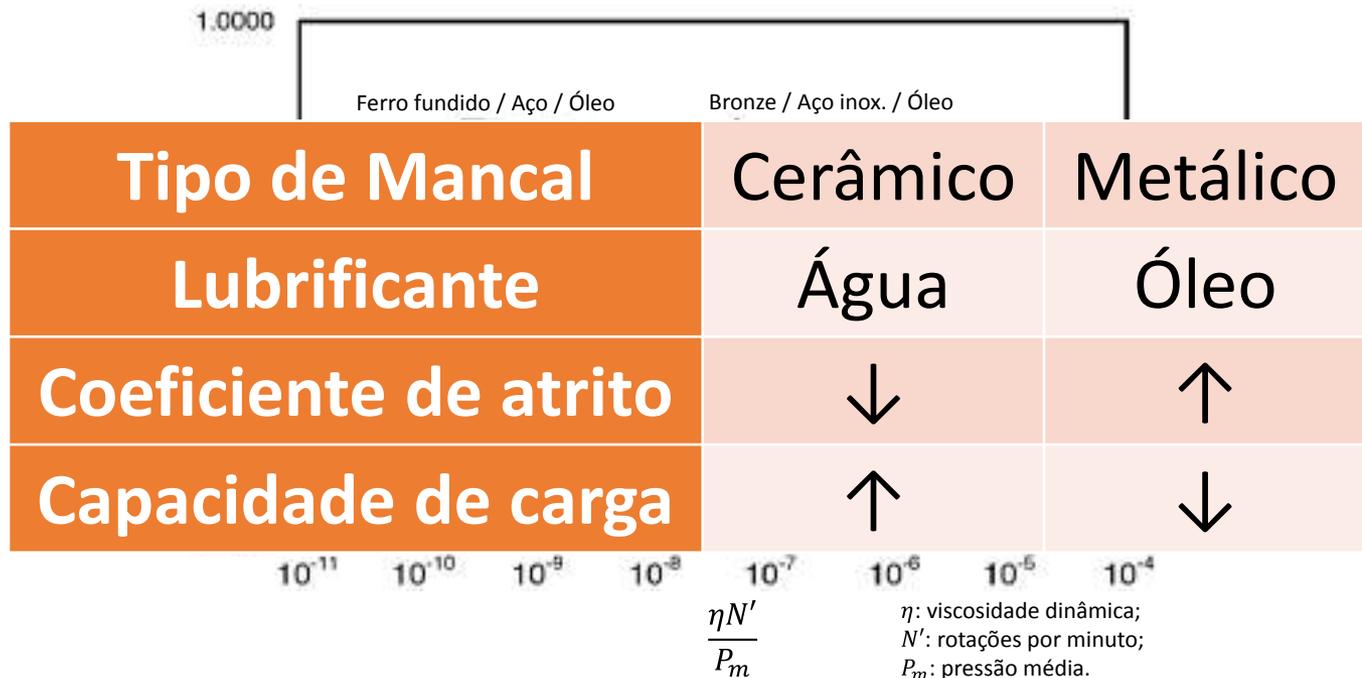
- Cerâmicos de engenharia



**Fig. 1** - Componentes mecânicos de material cerâmico. Fonte: Macéa.

# SUPERLUBRICIDADE

- Superlubricidade no deslizamento de cerâmicos em água ( $\mu < 0,01$ )



**Fig. 2** - Curvas de Stribeck. Fonte: Wang, Kato e Adachi (2004).

# APLICAÇÕES

- Compressores de ar lubrificados e refrigerados à água
  - 30% mais eficientes
- Importância econômica e ambiental
  - 10% do consumo de energia elétrica industrial na Europa
  - 5% do consumo nacional de energia elétrica do Japão



**Fig. 3** - Compressor Z-screw.  
Fonte: Mitsui Seiki (2012).



# LACUNAS DO CONHECIMENTO

---

---

PPGEM



Introdução

Revisão

Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

- Atrito
  - Superlubricidade: origens
- Desgaste
  - Propriedades de tribofilmes
  - Mapas de desgaste
- Lubrificação
  - Filmes finos

# OBJETIVOS

---

---

- Identificar condições e pares de materiais que apresentam superlubricidade
- Estabelecer relações entre comportamento do atrito, mecanismos de desgaste e regimes de lubrificação
- Verificar parâmetros relevantes no estabelecimento do filme hidrodinâmico de lubrificação (topografia superficial e forças de dupla camada elétrica)



**PPGEM**

Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica



# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

---



UFES

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# CERÂMICOS

---

---

- Definição  
“[...] *cerâmico é um sólido inorgânico, não metálico*” (KINGERY, 1976 apud CARTER e NORTON, 2013)
- Ligações químicas
- Cerâmicos de engenharia
  - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ , ZTA,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  e SiC
- Propriedades

# DUPLA CAMADA ELÉTRICA

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

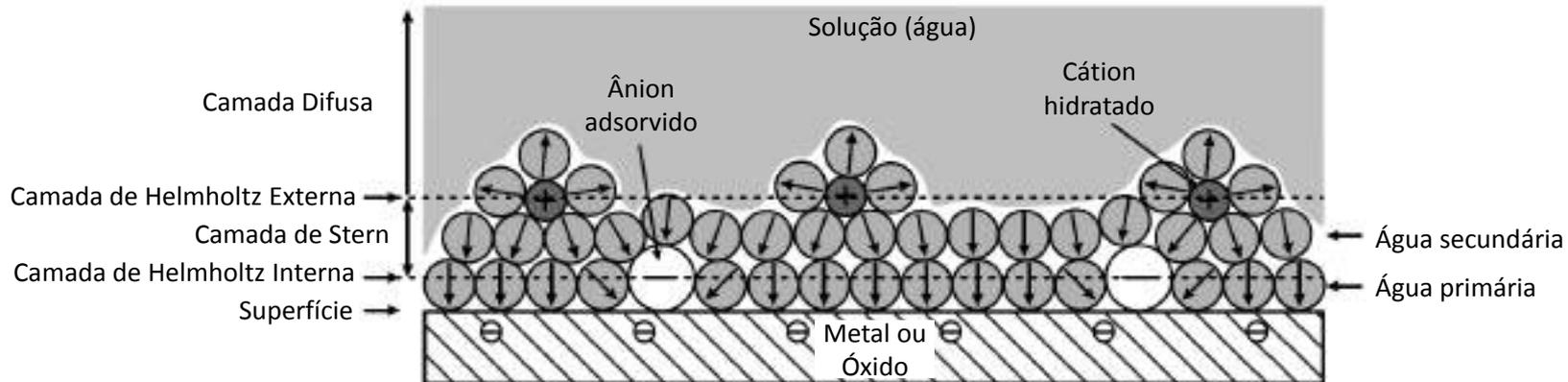
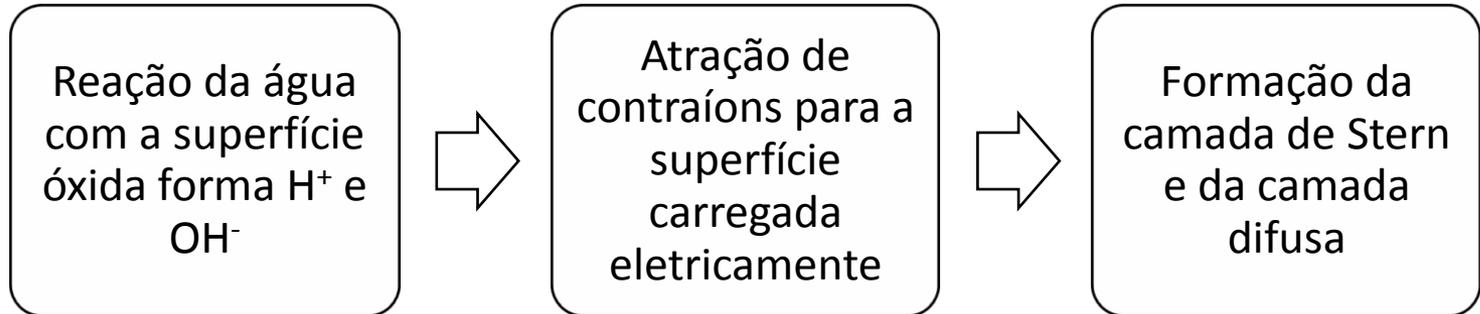
Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 4** – Modelo de dupla camada elétrica. Fonte: Butt e Kappl (2010).

# TRIBOLOGIA

---

- Definição  
*“[...] ciência e tecnologia de superfícies que interagem em movimento relativo e de temas e práticas relacionadas” (JOST, 2006)*
- Atrito, Desgaste e Lubrificação



UFES

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# ATRITO

---

---

- Definição:  
*“Em escala macroscópica, é a resistência ao movimento relativo entre dois corpos sólidos em contato.”* (HUTCHINGS, 1992)
- Coeficiente de atrito:  $\mu = \frac{F}{W}$
- Natureza dissipativa do atrito
  - Geração de calor
  - Deformação elástica e/ou plástica
  - Fratura
  - Geração de vibrações e ondas sonoras
  - Reações triboquímicas, etc.



UFES

PPGEM



Introdução

**Revisão  
Bibliográfica**

Materiais e  
Métodos

Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# ATRITO DE CERÂMICOS

---

---

- Mecanismos de dissipação
  - Deformação elástica
  - Camadas superficiais hidratadas
  - Microtrincamento

# DESGASTE

---

- Definição:

*“Desgaste é a alteração causada a uma superfície sólida pela perda ou deslocamento de material devido ao movimento relativo entre esta superfície e uma substância ou substâncias.” (ASTM G40, 2013)*

- Classificação

- Desgaste por partículas duras
- Desgaste por deslizamento

# MECANISMOS DE DESGASTE

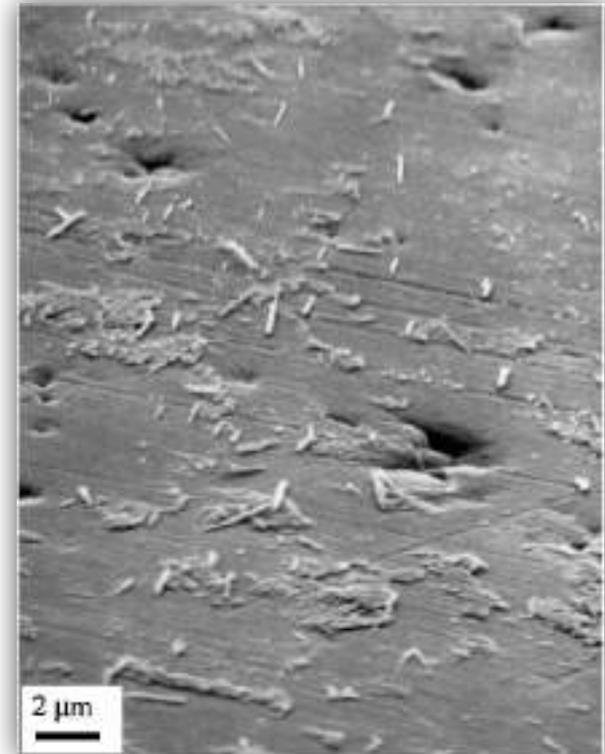
---

---

- Desgaste mecânico
  - Dominado por plasticidade
  - Dominado por fratura frágil
  - Dominado por fadiga superficial
- Desgaste triboquímico.

# DESGASTE MECÂNICO DOMINADO POR PLASTICIDADE EM CERÂMICOS

- Microrriscamento
  - Taxa de desgaste específica menor que  $10^3 \mu\text{m}^3/\text{N.m}$
  - Partículas de desgaste pequenas (*powder-like*) e/ou cilíndricas
  - Redução da rugosidade

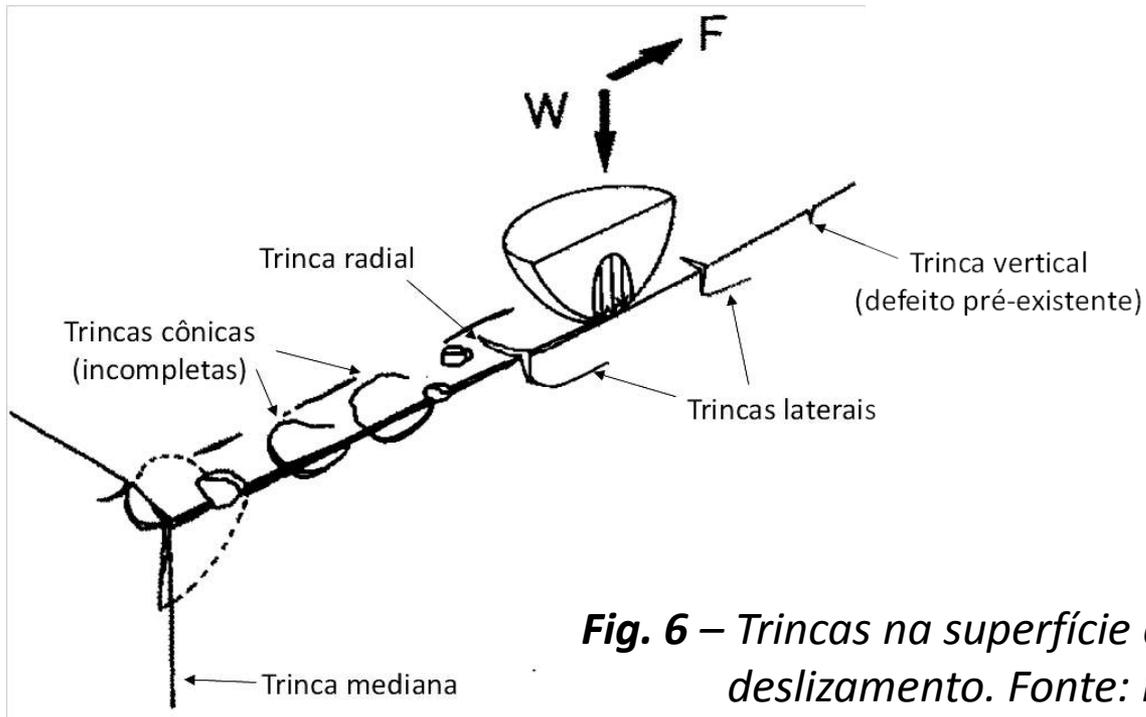


**Fig. 5** – Superfície de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  quando deslizada contra  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ar ambiente).  
Fonte: Fischer et al. (2000)

# DESGASTE MECÂNICO DOMINADO POR FRATURA FRÁGIL EM CERÂMICOS

- Microtrincamento

- Taxa de desgaste específica maior que  $10^3 \mu\text{m}^3/\text{N.m}$



**Fig. 6** – Trincas na superfície de um cerâmico em deslizamento. Fonte: Kato (1990).

# DESGASTE TRIBOQUÍMICO DE CERÂMICOS EM ÁGUA

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

Resultados e  
Discussões

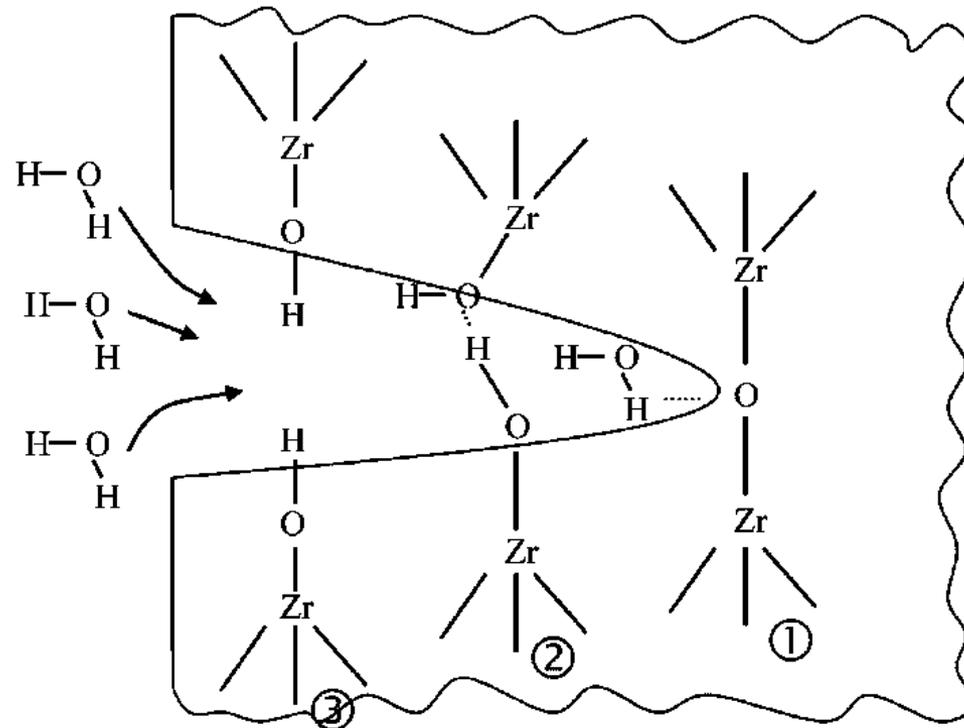
Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

- Fragilização por quimissorção



**Fig. 7** – Fragilização por quimissorção na zircônia. Fonte: De Aza et al. (2002).

# DESGASTE TRIBOQUÍMICO DE CERÂMICOS EM ÁGUA: REAÇÕES

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

Resultados e  
Discussões

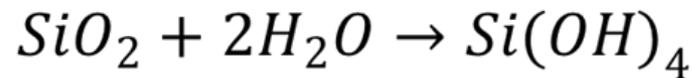
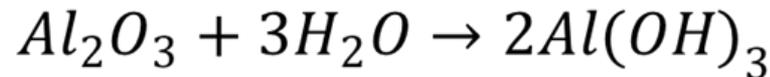
Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

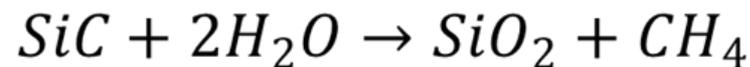
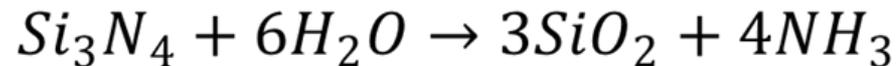
Referências

Agradecimentos

- Formação de hidróxidos estáveis (óxidos)



- Oxidação (não óxidos)



# MODELO DE DESGASTE TRIBOQUÍMICO DO $\text{Si}_3\text{N}_4$

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

Resultados e  
Discussões

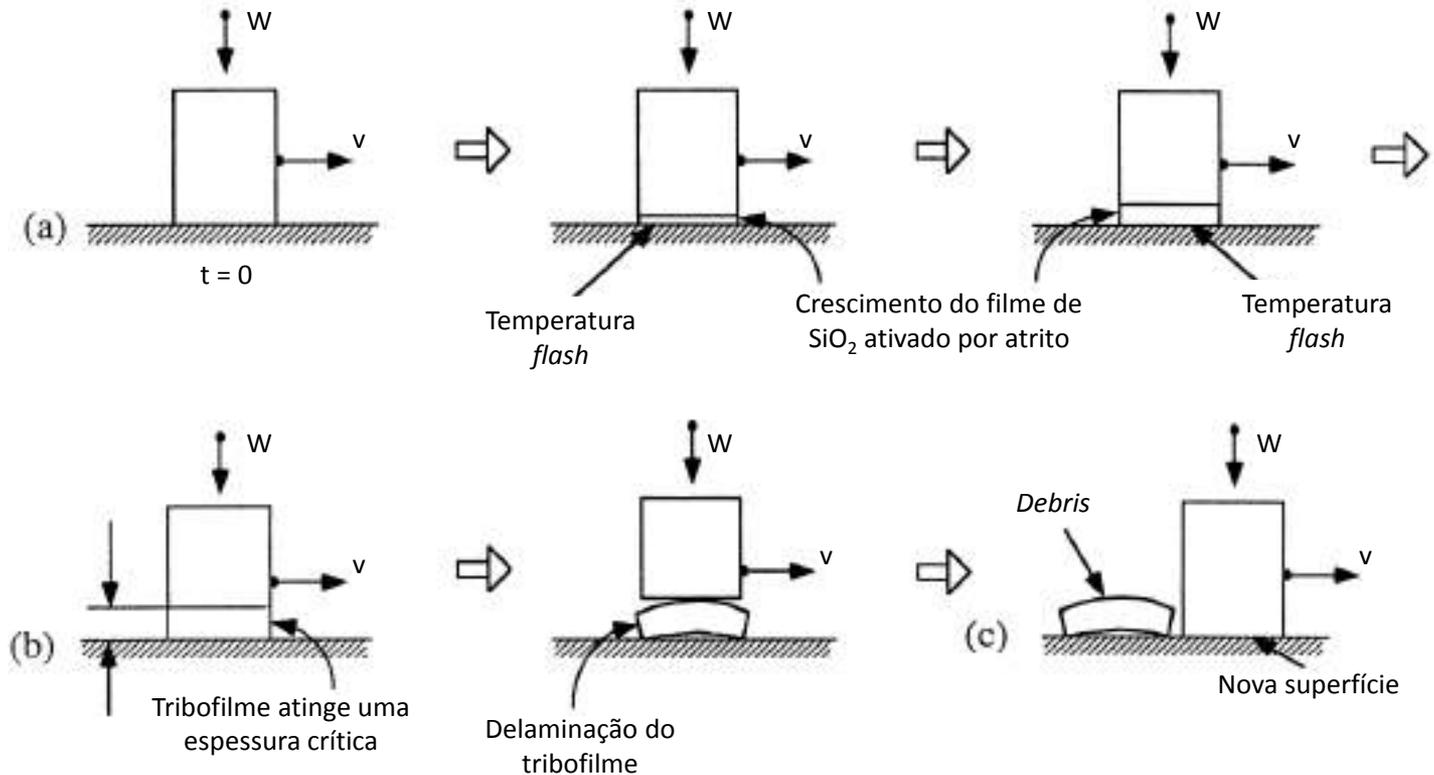
Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

- Formação e delaminação de tribofilme



**Fig. 8** – Desgaste por delaminação de tribofilme. Fonte: Xu e Kato (2000).



UFES

PPGEM



Introdução

Revisão Bibliográfica

Materiais e Métodos

Resultados e Discussões

Conclusão

Sugestões para trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# LUBRIFICAÇÃO

## • Regimes de lubrificação

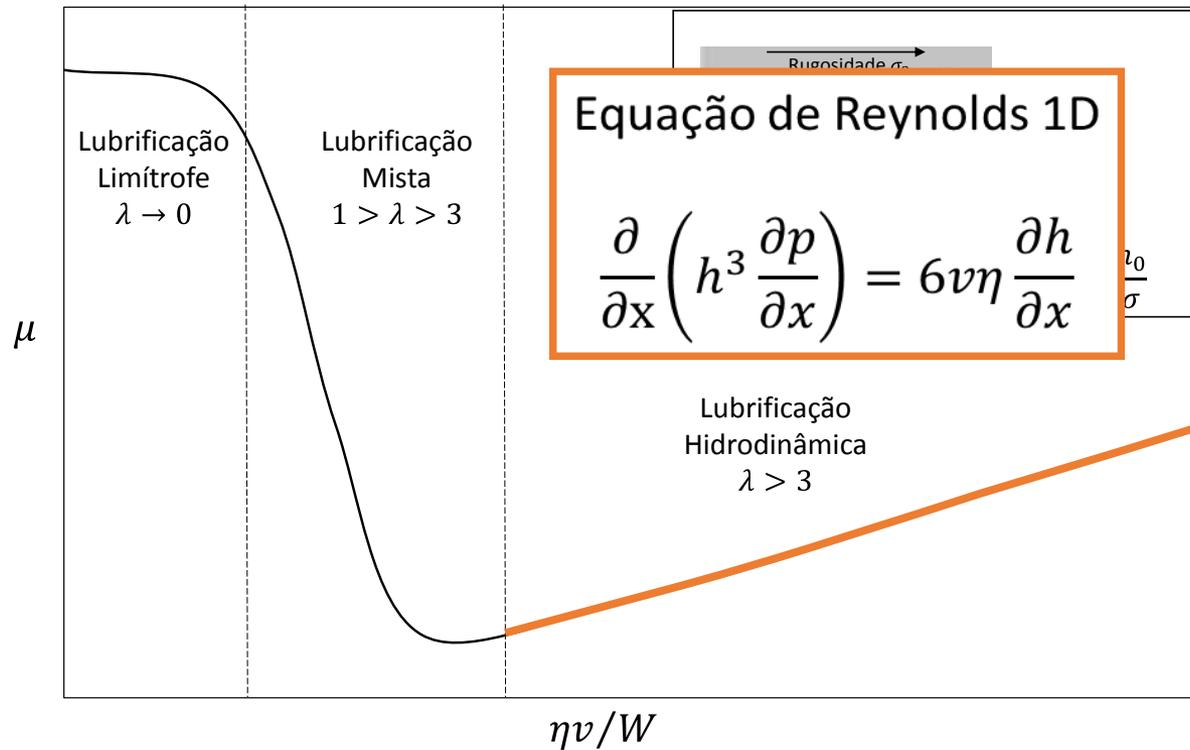
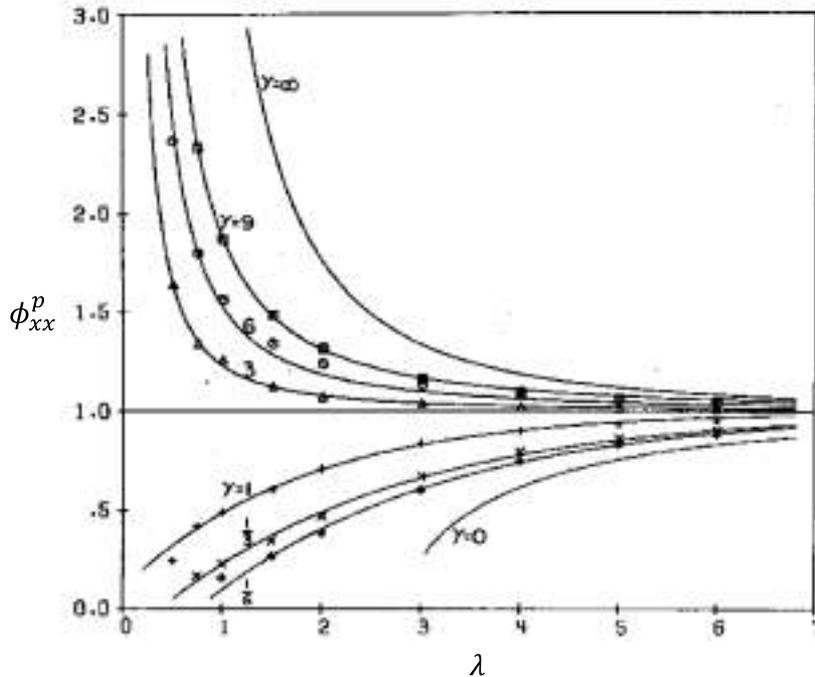


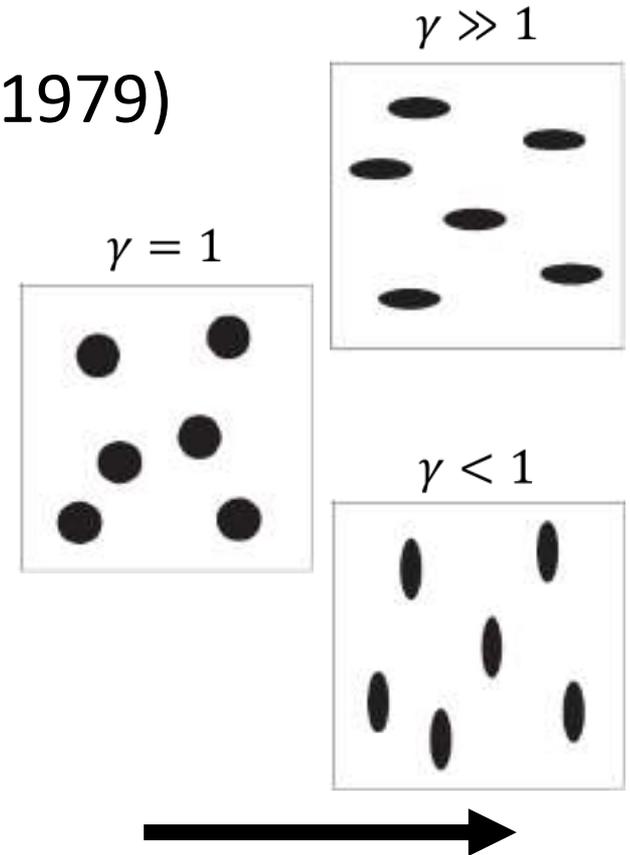
Fig. 9 – Curva de Stribeck. Fonte: autor.

# EFEITOS DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NA TEORIA DE LUBRIFICAÇÃO

- *Flow factors* (Patir e Cheng, 1979)



**Fig. 10** – Gráfico do flow factor de pressão em função de  $\lambda$  e  $\gamma$ . Fonte: Patir e Cheng (1979).



**Fig. 11** – Superfícies com diferentes texturas. Fonte: Persson (2010).

# EFEITOS DA DUPLA CAMADA ELÉTRICA NA TEORIA DE LUBRIFICAÇÃO

*“O movimento relativo entre duas superfícies carregadas eletricamente e separadas por um filme fino de eletrólito causa a convecção das cargas dentro da nuvem de contraíons que circunda cada superfície. O potencial eletrocinético induzido gera uma força eletrocinética repulsiva nos corpos”.*

Li (2005)

# EQUAÇÃO DE REYNOLDS MODIFICADA



- Li (2005):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \phi_{xx}^p \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6\nu\eta_a \frac{\partial}{\partial x} (h + \sigma\phi_{xx}^s)$$

$$\Rightarrow \phi_{xx}^p = 1 + g_x \left( \frac{\sigma}{h} \right)^2 - f_x^2 \left( \frac{\sigma}{h} \right)^2 \left[ \left( \frac{\sigma_2}{h} \right)^2 \Phi_2 + \left( \frac{\sigma_1}{h} \right)^2 \Phi_1 \right]$$

$$\Rightarrow \phi_{xx}^s = -f_x \left( \frac{\sigma}{h} \right) \left[ \left( \frac{\sigma_2}{h} \right)^2 \Phi_2 - \left( \frac{\sigma_1}{h} \right)^2 \Phi_1 \right]$$

$$\Rightarrow \eta_a = \eta + \frac{12\varepsilon^2 \varepsilon_0^2 \zeta^2}{\lambda_c h^2} \left[ -\frac{2 \cosh(\kappa h) - 1}{\kappa h \sinh(\kappa h)} \right]$$

# SUPERLUBRICIDADE EM CERÂMICAS LUBRIFICADAS COM ÁGUA

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

Materiais	$\mu$	Ensaio	Autores (ano)	Lubrificação
$\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Si}_3\text{N}_4$	$<0,002$	Pino-Disco	Tomizawa e Fischer (1987)	Hidrodinâmica
SiC-SiC SiALON-SiALON SiALON-ZrO <sub>2</sub>	$<0,01$	Pino-Disco	Anderson (1992)	Hidrodinâmica
$\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Si}_3\text{N}_4$ SiC-SiC Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ZrO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub>	$<0,03$	Anel-Disco	Wong et al. (1998)	Mista Hidrodinâmica
$\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$	$<0,004$	Esfera-Disco	Ferreira et al. (2012)	Mista



**PPGEM**

Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica



# MATERIAIS E MÉTODOS

---

---



UFES

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

**Materiais e  
Métodos**

Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# MATERIAIS

- Esferas
  - Fabricante: Coorstek®



**Fig. 12** - Esferas de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (à esquerda), esferas de  $\text{ZrO}_2$  (centro) e esfera de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (à direita). Fonte: autor.

# MATERIAIS

- Discos
  - Fabricante: Macéa Cerâmica Técnica



**Fig. 13** - Aspecto macroscópico de discos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (à esquerda), ZTA (centro) e SiC (à direita). Fonte: autor.



PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

**Materiais e  
Métodos**

Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

---

---

- Laboratório TRICORRMAT - UFES
  - Densidade - ASTM B311 (2013)
  - Curva de dureza Vickers - ASTM C1327 (2008)
  - Difração de Raios-X: fases cristalinas
  - Microscopia óptica (MO)
  - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)
  - Espectroscopia por dispersão de energia de raios-X (EDS)
  - Topografia superficial e caracterização tribológica



- Perfilometria de contato 3D
- Filtragem dos dados: ISO 25178 (2012)
- Parâmetros quantitativos
  - Amplitude:  $S_q, S_{sk}, S_{ku}$
  - Espaciais:  $ACF(\tau_i, \tau_j)$  e número de Peklenik ( $\gamma$ )



UFES

PPGEM



Introdução

Revisão Bibliográfica

**Materiais e Métodos**

Resultados e Discussões

Conclusão

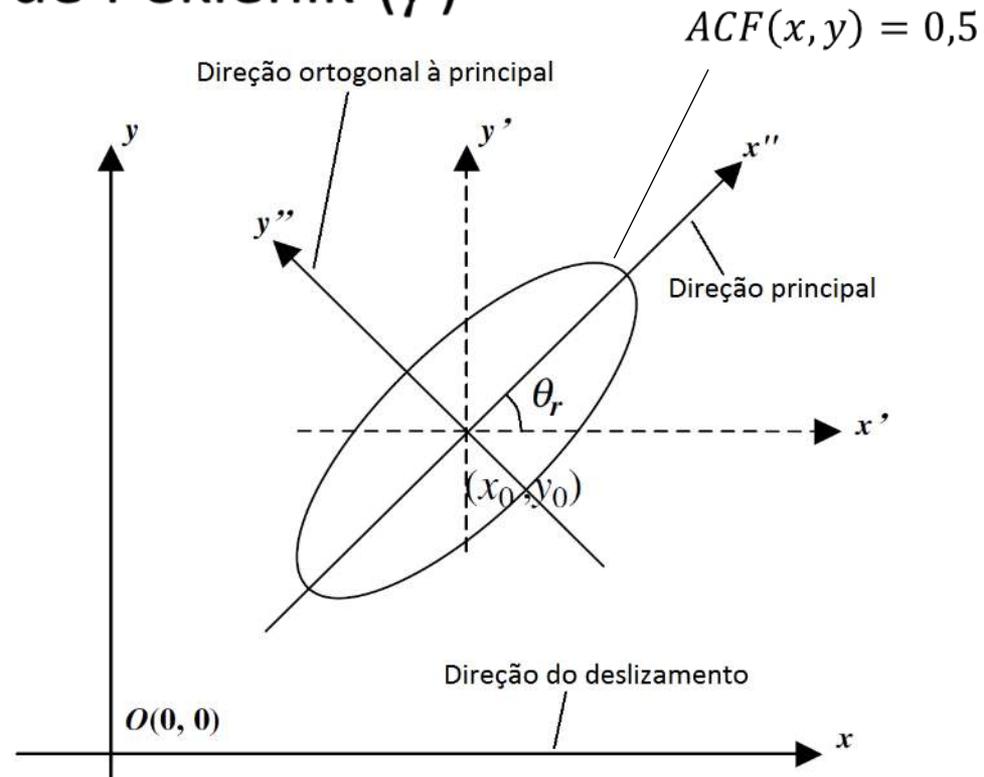
Sugestões para trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# TOPOGRAFIA SUPERFICIAL

- Número de Peklenik ( $\gamma$ )



**Fig. 14** – Determinação do número de Peklenik. Fonte: Li e Chien (2004).

# CARACTERIZAÇÃO TRIBOLÓGICA

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

**Materiais e  
Métodos**

Resultados e  
Discussões

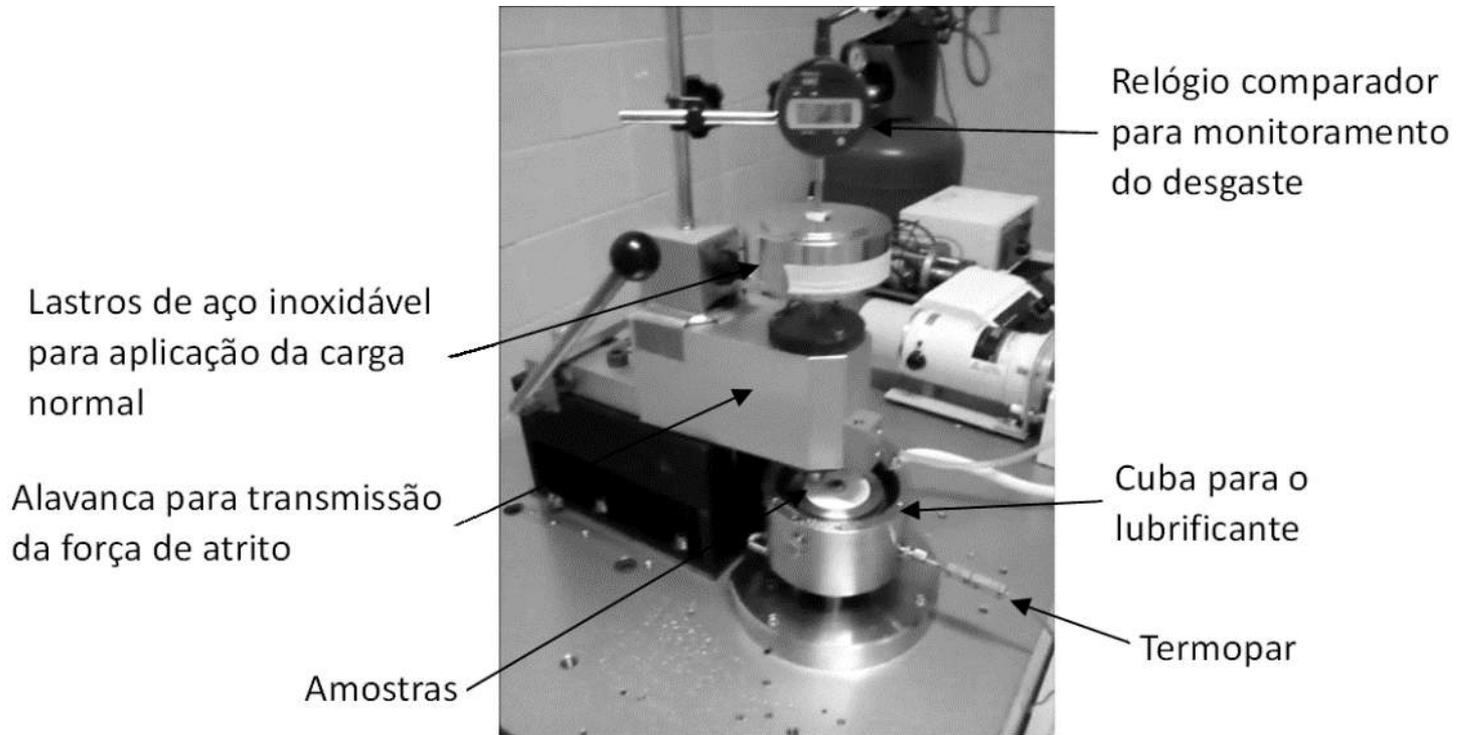
Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

- Tribômetro Plint TE67 (esfera sobre disco)



**Fig. 15** – Montagem experimental no tribômetro PLINT TE67. Fonte: autor.

# CIRCUITO DE LUBRIFICAÇÃO

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

**Materiais e  
Métodos**

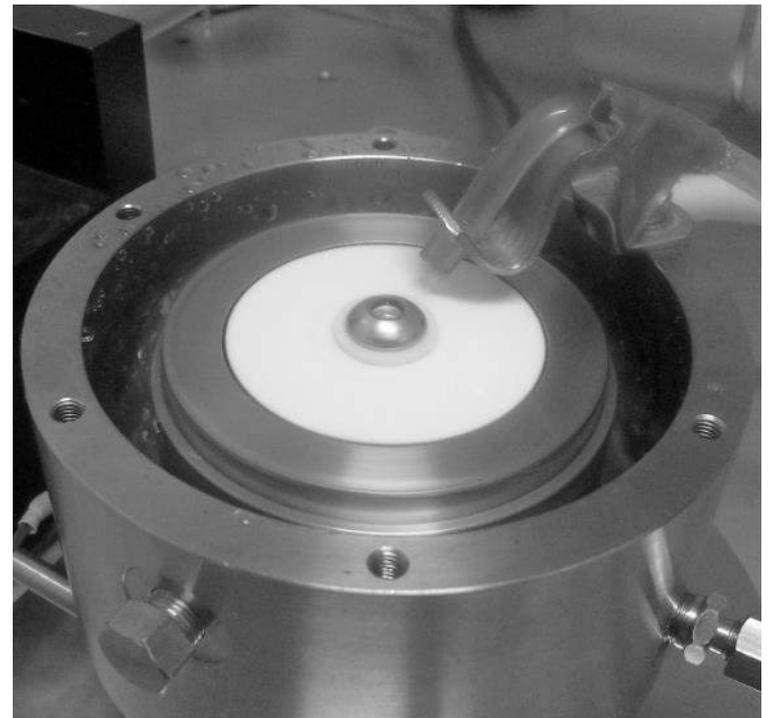
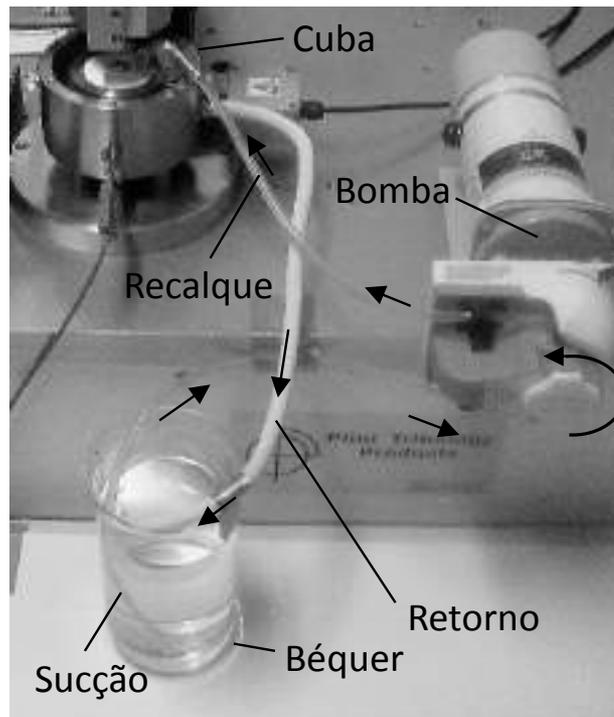
Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 16** – Circuito de lubrificação. Fonte: autor.



UFES

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

**Materiais e  
Métodos**

Resultados e  
Discussões

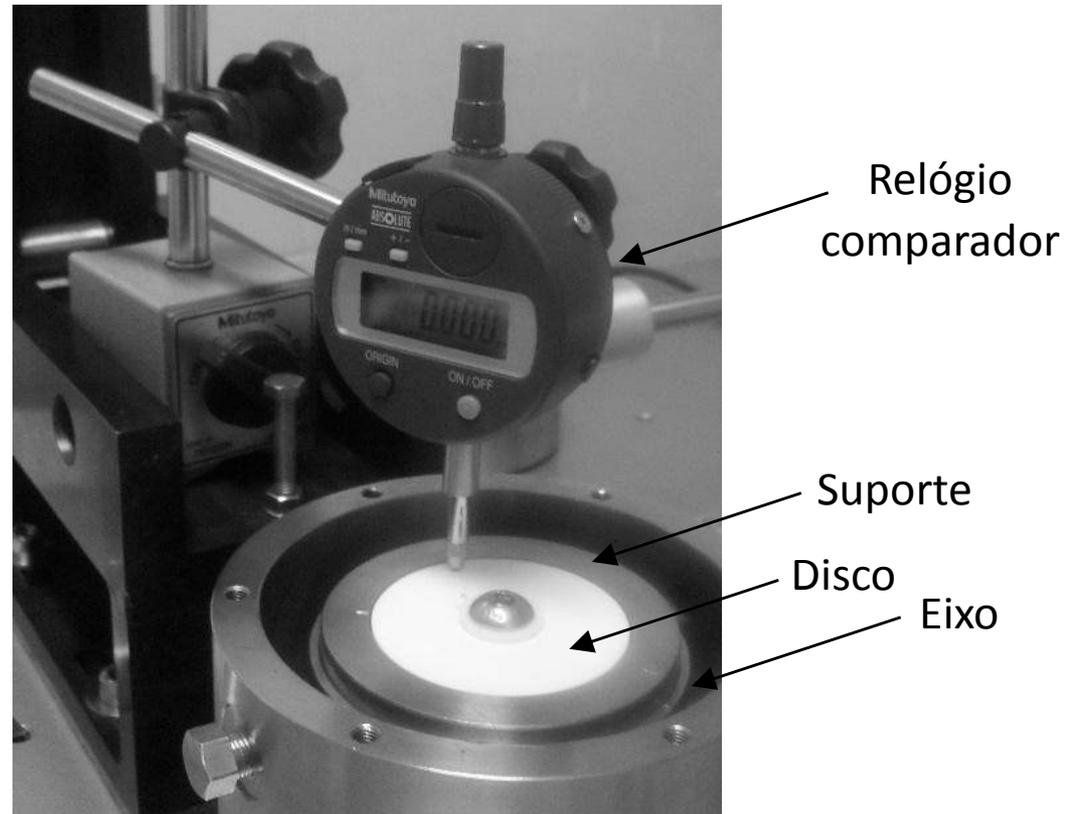
Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# ALINHAMENTO DO DISCO



**Fig. 17** – Medição do batimento circular axial do disco. Fonte: autor.

# CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

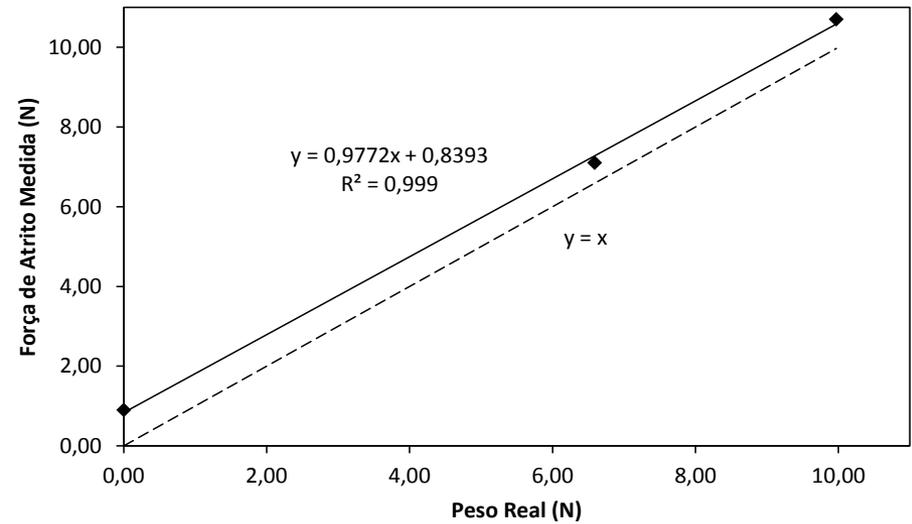
Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 18** – Aparato e curva de calibração da célula de carga. Fonte: autor.

# LIMPEZA DAS AMOSTRAS

---

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

**Materiais e  
Métodos**

Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

- Água e sabão neutro
- Banho ultrassônico em acetona (15 min)
- Banho ultrassônico em álcool etílico (15 min)
- Enxágue em água destilada



UFES

PPGEM



TRICORRMAT  
LABORATÓRIO DE TRILOGIA,  
CORROÇÃO E MATERIAIS  
EMERGENCIA MÉDICA - UFES

Introdução

Revisão  
Bibliográfica

**Materiais e  
Métodos**

Resultados e  
Discussões

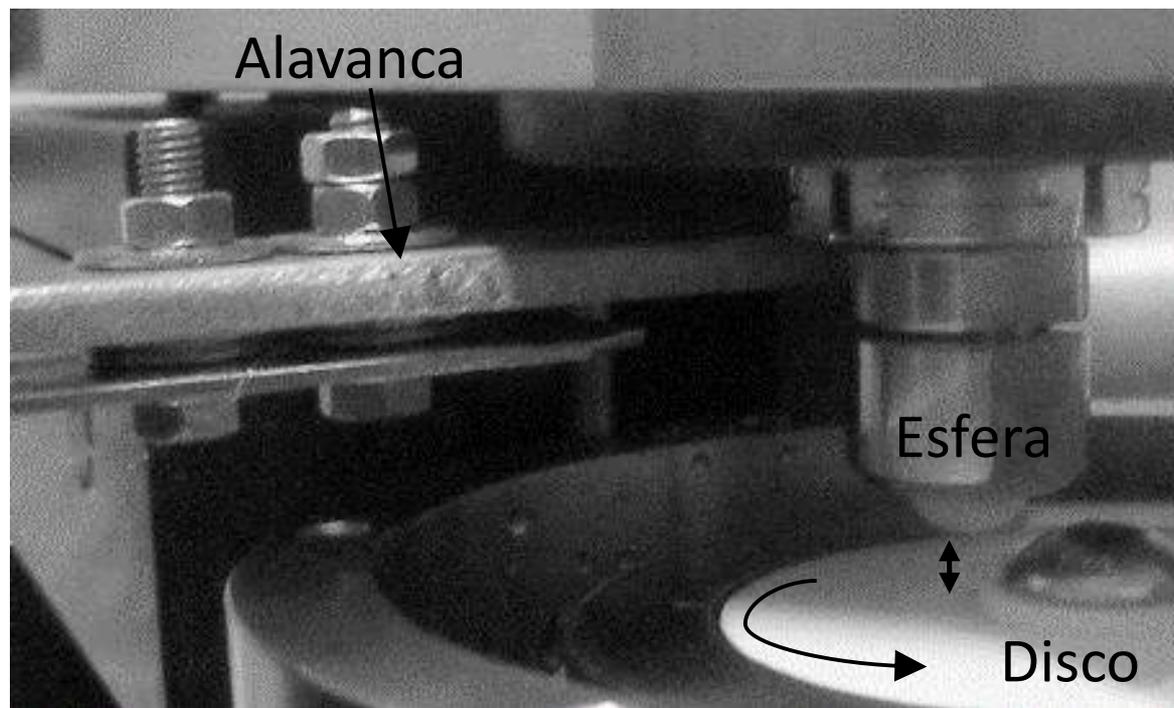
Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# EXECUÇÃO DO ENSAIO



*Fig. 19 – Início do ensaio. Fonte: autor.*

# PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

**Materiais e  
Métodos**

Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

Material da Esfera	Material do Disco	Carga Normal (N)	Velocidade de Deslizamento (m/s)	Distância Deslizada (m)	Raio da Trilha de Desgaste (mm)	Número de Réplicas
	SiC				17	4
					21	4
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,6	1,0	3500	17	5
					21	5
	ZTA				17	5
					21	5
		24,6	1,0	3500	21	1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC				17	2
		15,8	1,5	5500	21	1
					17	4
ZrO <sub>2</sub>	SiC	24,6	1,0	3500	21	4
					17	4

# PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

**Materiais e  
Métodos**

Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

- $ZrO_2-Al_2O_3$  e  $ZrO_2-ZTA$ 
  - Carga normal: 6,0 N a 24,6 N
  - Velocidade de deslizamento: 0,1 m/s a 2,0 m/s

- Lubrificante: água destilada

Temperatura	pH	$\lambda_c$	Volume	Vazão
$23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	$6,0 \pm 0,2$	$2 \text{ } \mu\text{S/cm}$	800 ml	330 ml/min

$\lambda_c$ : Condutividade elétrica específica

# VOLUME DESGASTADO

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

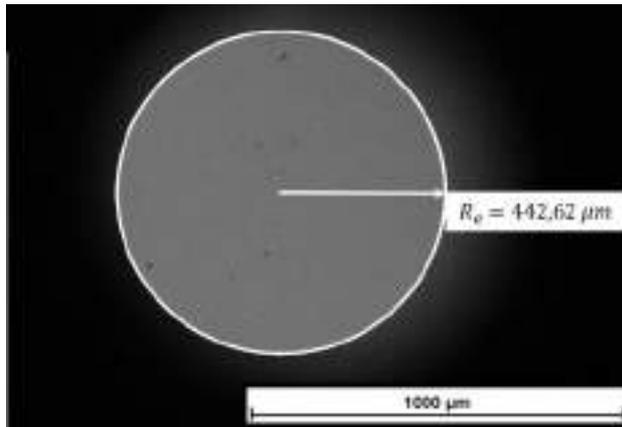
Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

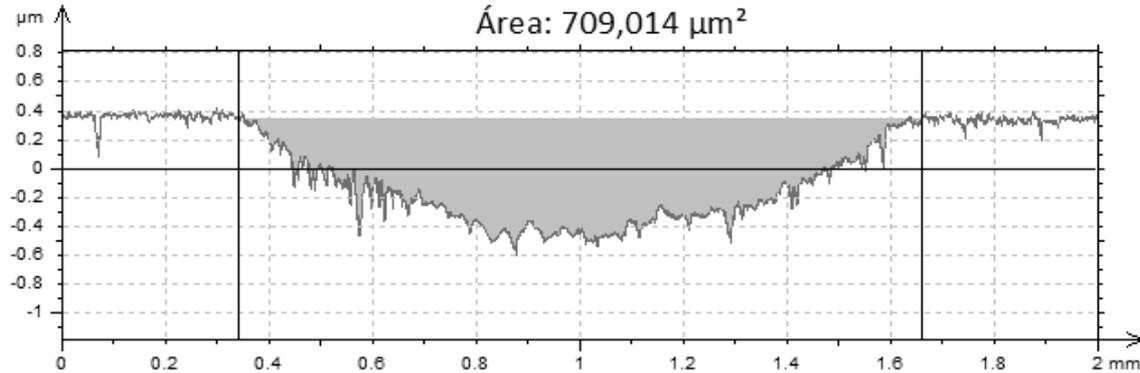


**Fig. 20** – Medição da calota de desgaste da esfera. Fonte: autor.

$$V_d = \frac{2\pi R}{30} \sum_{i=1}^{30} S_i$$

$$h_e = R_e - \sqrt{R_e^2 - r_e^2}$$

$$V_e = \frac{\pi h_e}{6} (3r_e^2 + h_e^2)$$



**Fig. 21** – Medição do desgaste do disco. Fonte: autor.

# CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA LUBRIFICANTE

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

**Materiais e  
Métodos**

Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

- Concentração de elementos químicos (ppm/ppb)
  - Espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES)
  - LabPETRO – Química - UFES
- Potencial zeta ( $\zeta$ ) da superfície de partículas coloidais
  - Eletroforese por espalhamento dinâmico de luz
  - LAMATE – Química - UFF

# ESPESSURA DO FILME LUBRIFICANTE



- Modelo de Reynolds

$$h_0 = \sqrt{\frac{\eta v d_e^3}{W} 6W_c(K)}$$

- Modelo de Li (2005)

$$h_{0,Li} = \sqrt{\frac{\eta_a v d_e^3}{\phi_{xx}^p W} 6W_c(K)}$$

$h_0$	Espessura mínima do filme
$\eta$	Viscosidade dinâmica
$v$	Velocidade de deslizamento
$d_e$	Diâmetro do mancal
$W$	Carga normal
$6W_c(K)$	Função da razão de convergência
$\eta_a$	Viscosidade aparente
$\phi_{xx}^p$	<i>Flow factor</i> de pressão



**PPGEM**

Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica



# RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

---



UFES

PPGEM



Introdução

Revisão Bibliográfica

Materiais e Métodos

**Resultados e Discussões**

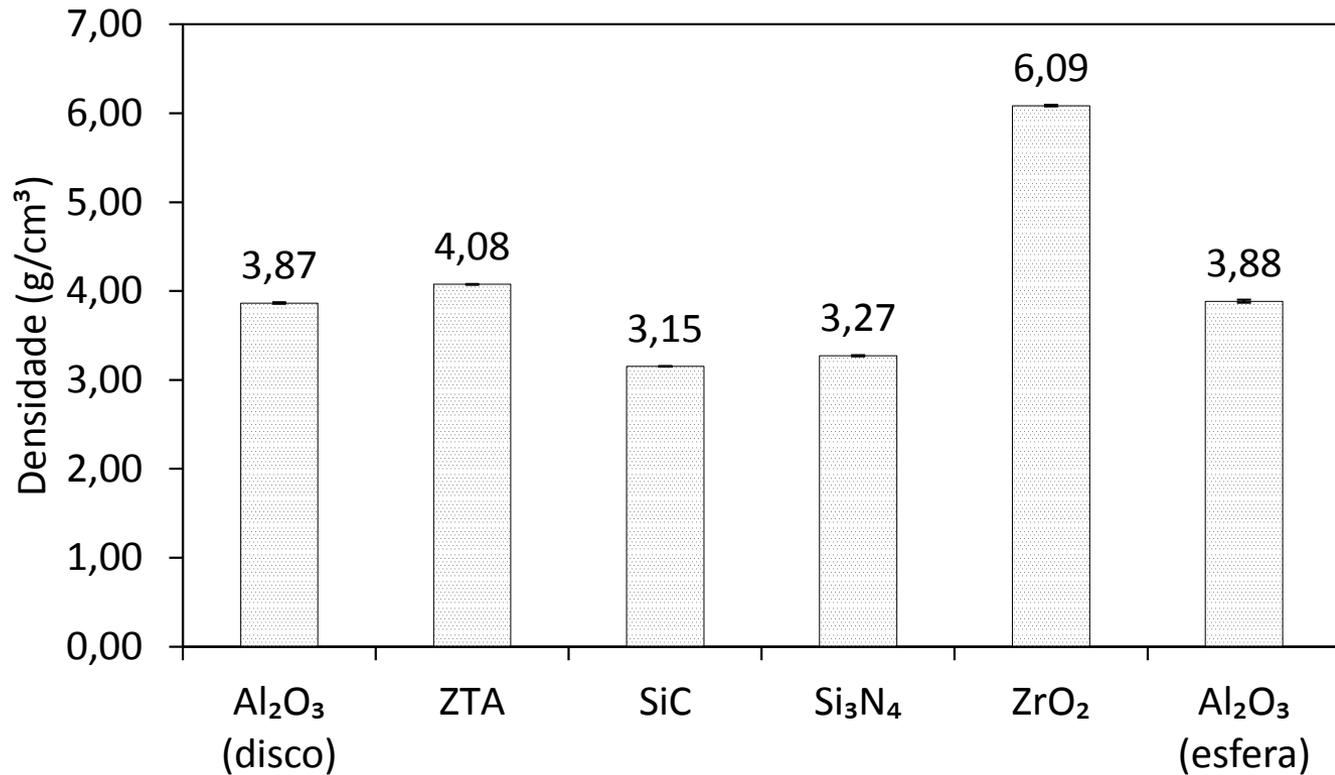
Conclusão

Sugestões para trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# DENSIDADE



**Fig. 22** – Densidade dos materiais. Fonte: autor.

# DUREZA DOS DISCOS E ESFERAS

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

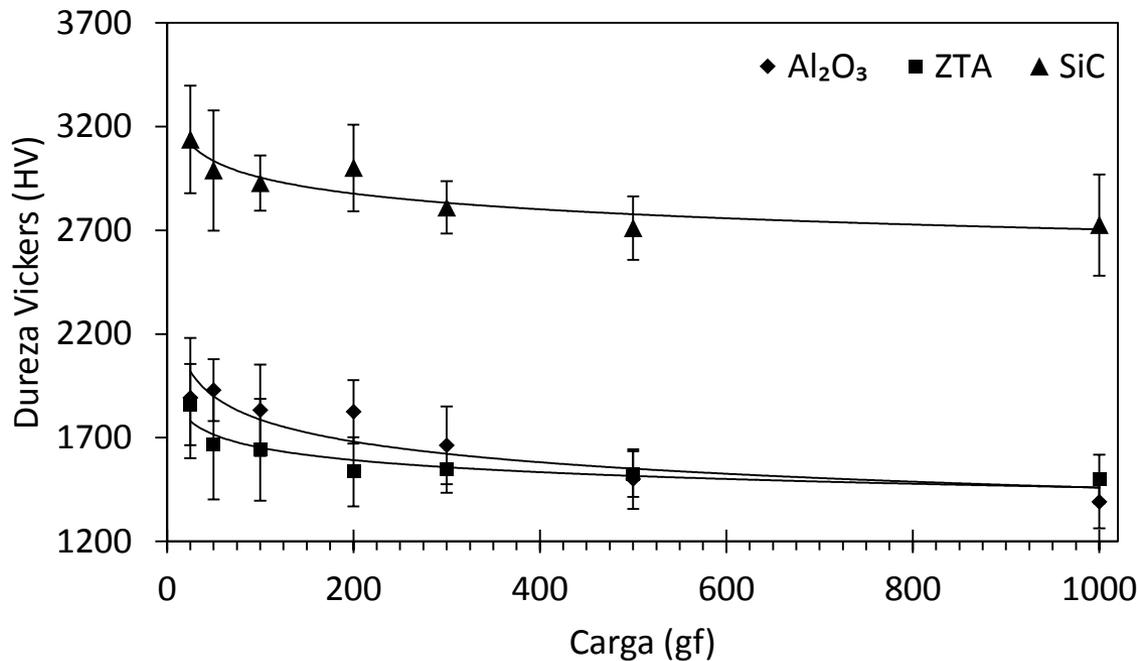
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 23** – Dureza dos discos. Fonte: autor.

*Dureza das Esferas*

Material	HK <sub>1</sub>
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1600
ZrO <sub>2</sub>	1300
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1440

Fonte: Coorstek®



UFES

PPGEM



Introdução

Revisão Bibliográfica

Materiais e Métodos

Resultados e Discussões

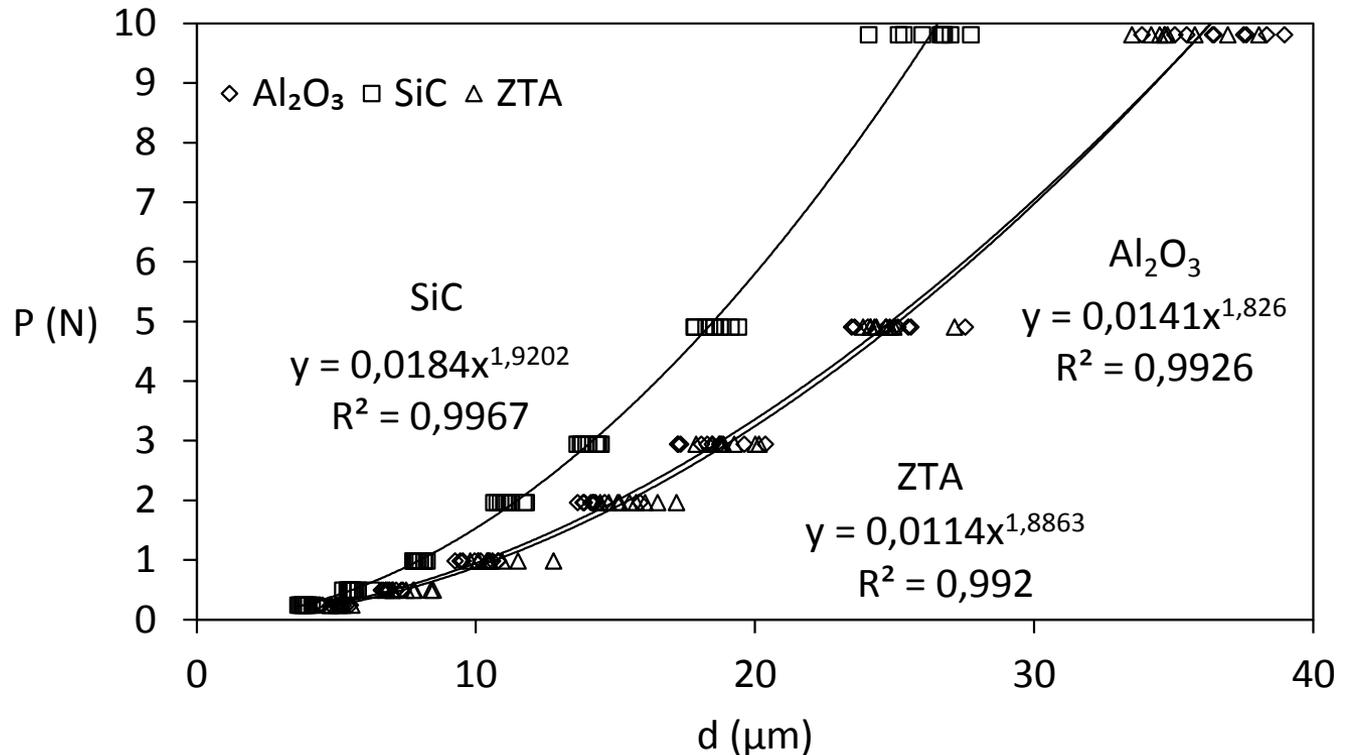
Conclusão

Sugestões para trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# INDENTATION SIZE EFFECT



**Fig. 24** – Carga versus tamanho da diagonal Vickers. Fonte: autor.



**PPGEM**

Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica

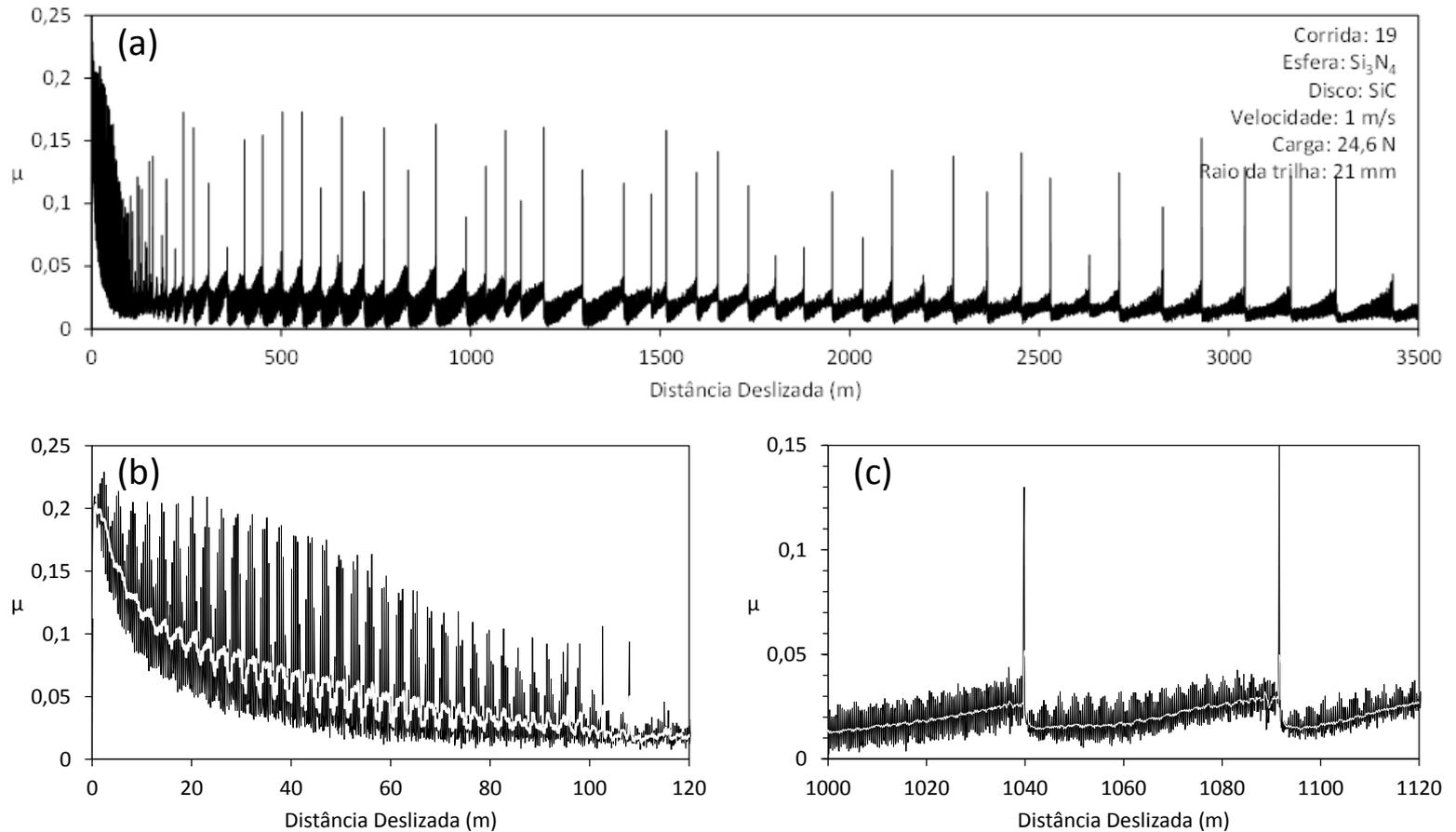


# ESFERA-DISCO: $\text{Si}_3\text{N}_4$ -SiC

---

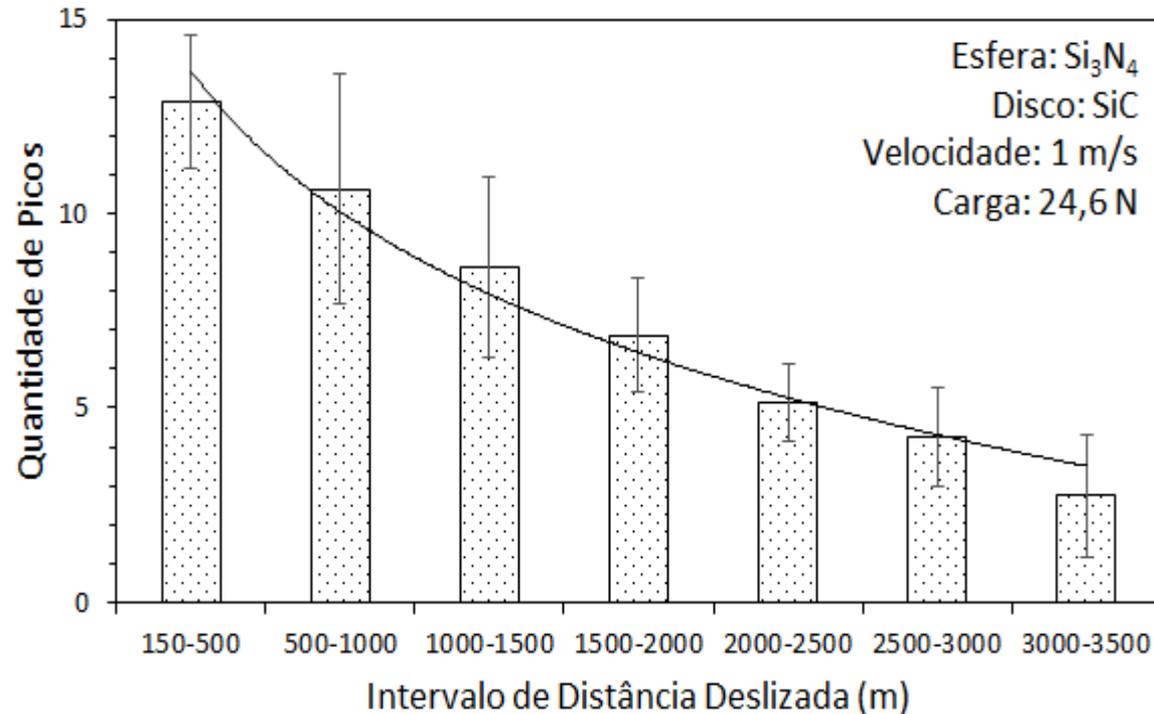
---

# $\text{Si}_3\text{N}_4$ -SiC: ATRITO



**Fig. 25** – Curva de atrito para  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -SiC. Fonte: autor.

# $\text{Si}_3\text{N}_4$ -SiC: ATRITO



**Fig. 26** – Quantidade de picos de atrito para  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -SiC no regime estacionário.

Fonte: autor.

# $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}$ : TOPOGRAFIA

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

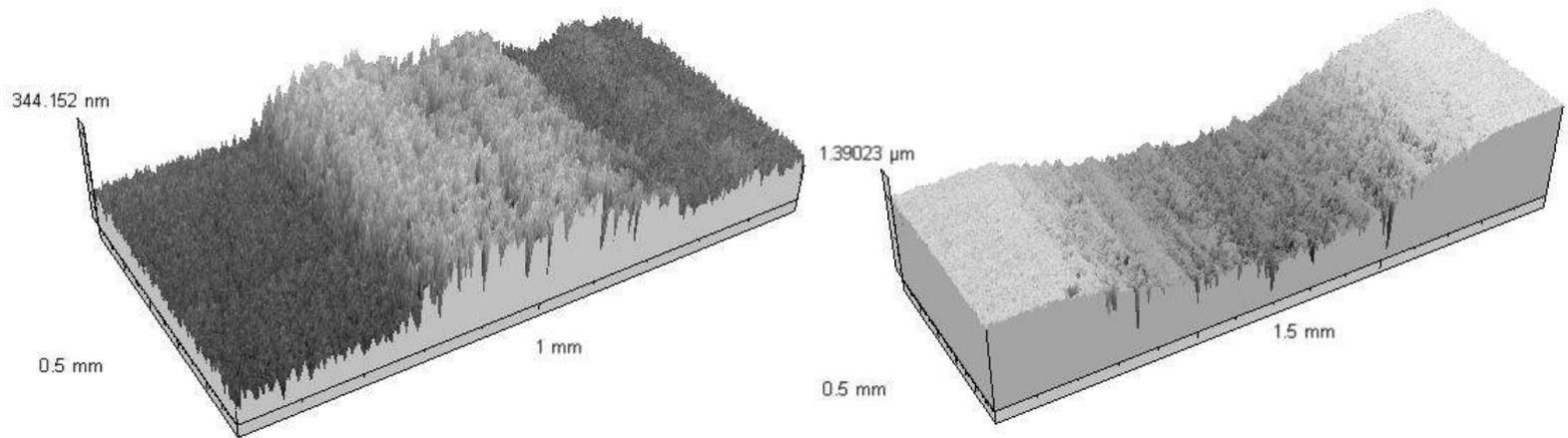
Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 27** – Topografia superficial de trilhas de desgaste do disco. Fonte: autor.

# $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}$

## CALOTA DE DESGASTE DA ESFERA

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

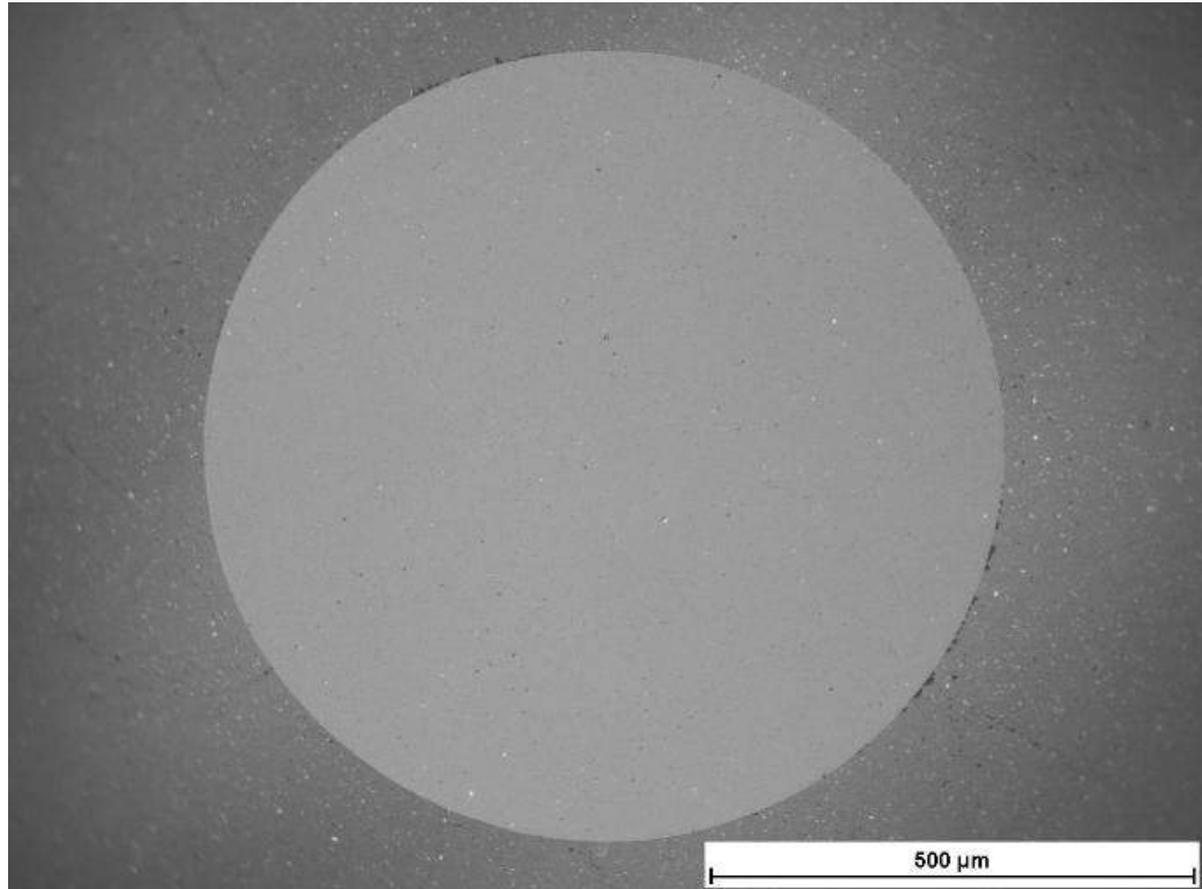
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 28** – MO da calota de desgaste da esfera. Fonte: autor.

Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

**Resultados e  
Discussões**

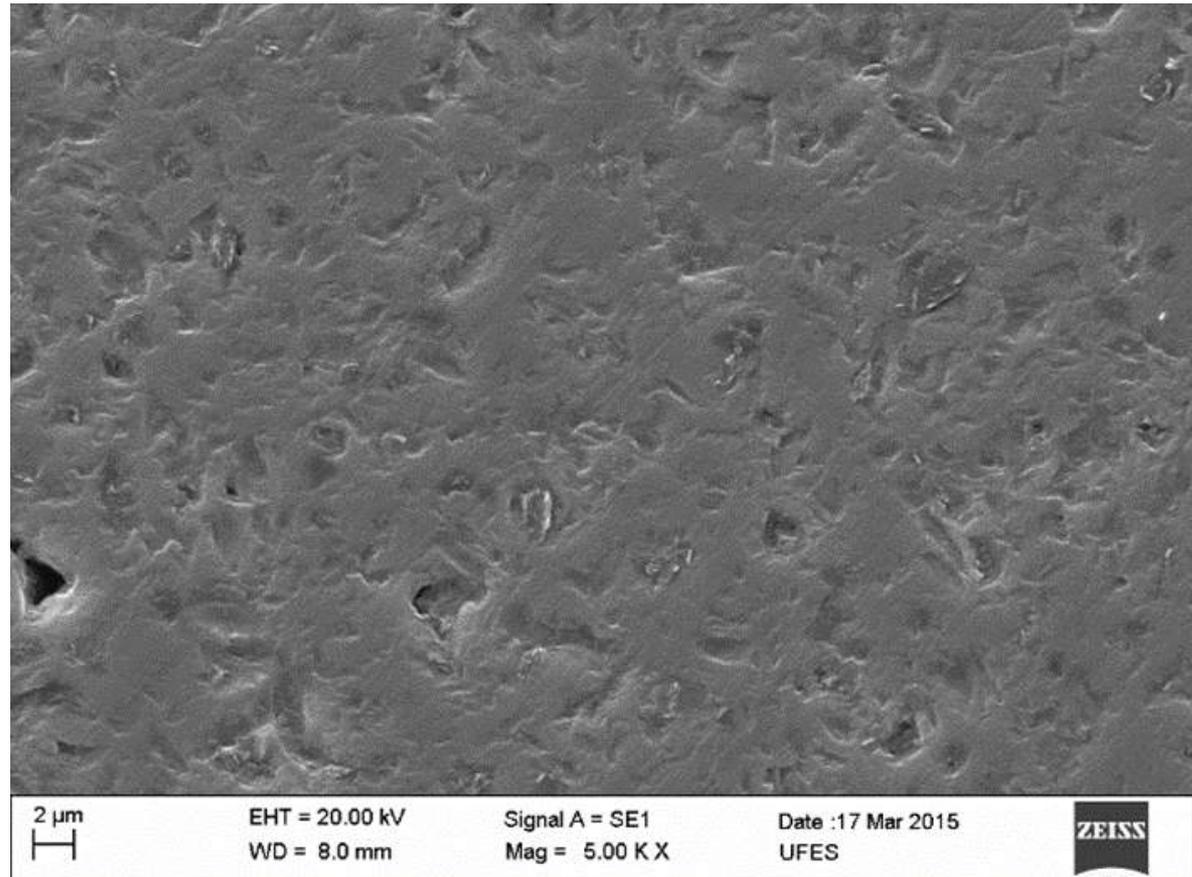
Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}$ SUPERFÍCIE ORIGINAL DO DISCO



**Fig. 29** – MEV da trilha de desgaste do disco de SiC. Fonte: autor.

Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

**Resultados e  
Discussões**

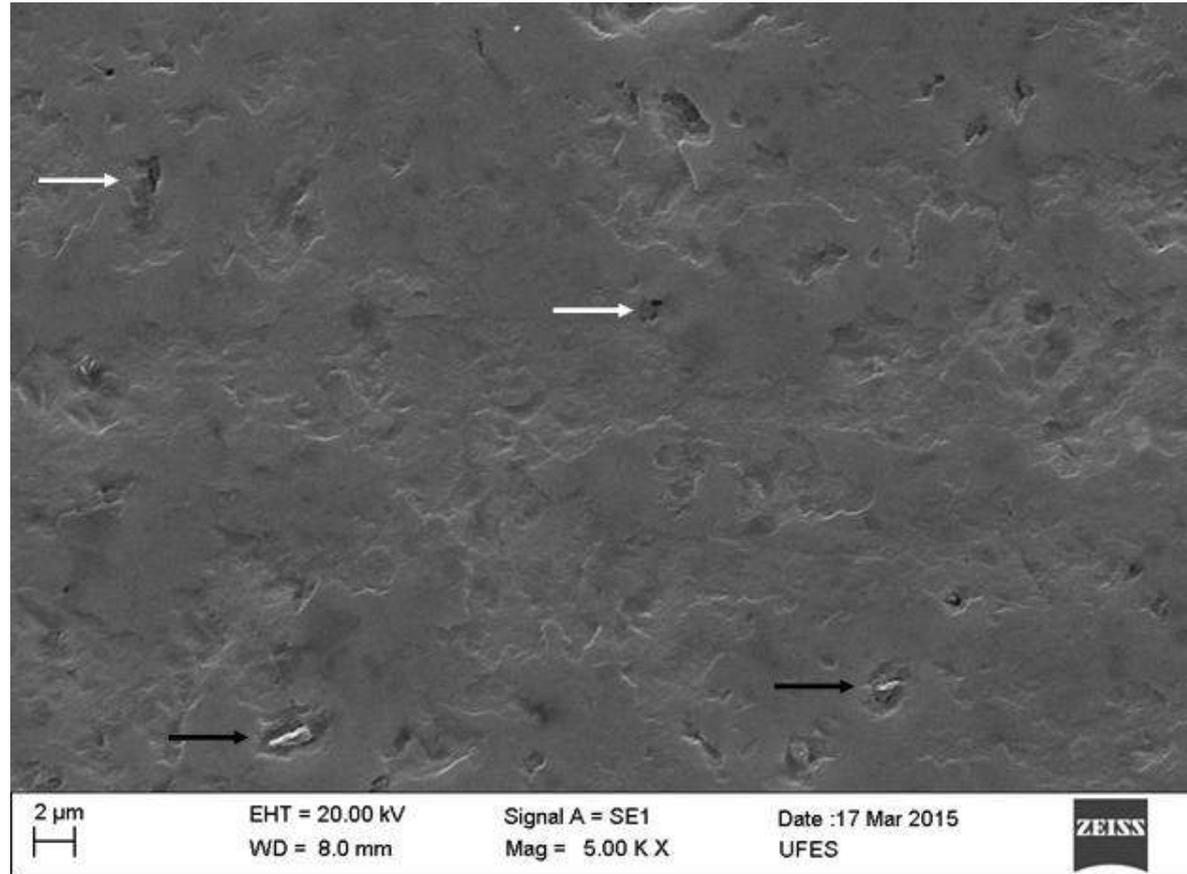
Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

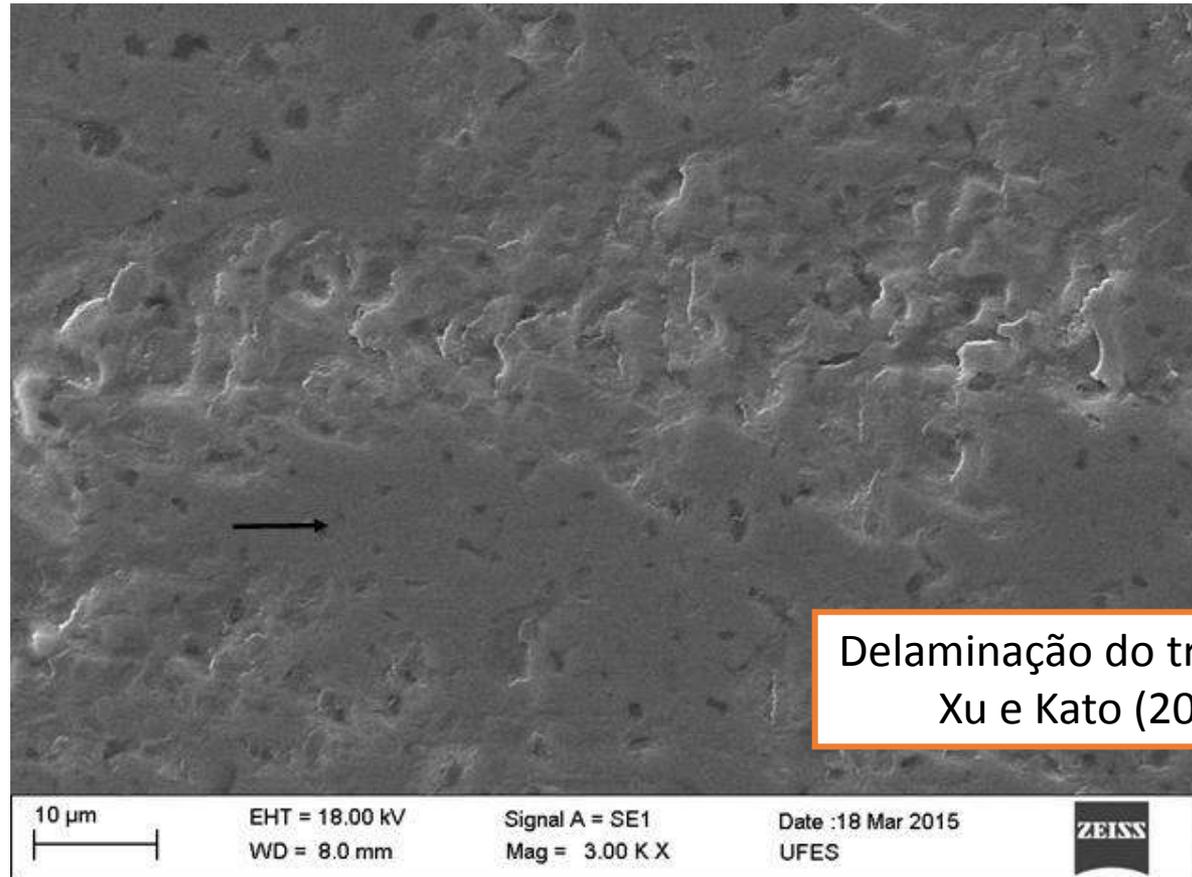
Agradecimentos

# $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}$ TRILHA DE DESGASTE DO DISCO

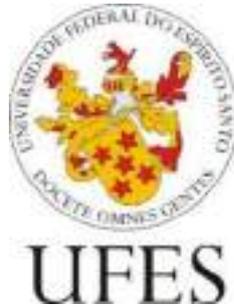


**Fig. 30** – MEV da trilha de desgaste do disco de SiC. Fonte: autor.

# $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}$ TRILHA DE DESGASTE DO DISCO



**Fig. 31** – MEV da trilha de desgaste do disco de SiC. Fonte: autor.



**PPGEM**

Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica

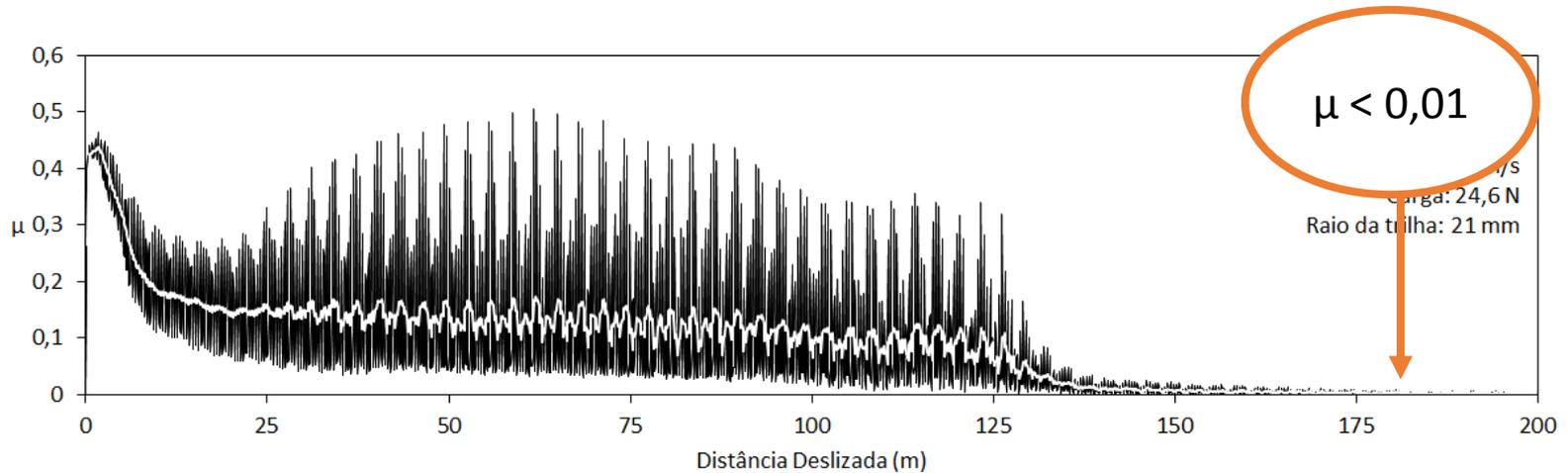


**ESFERA-DISCO:  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$**

---

---

# $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ : ATRITO



**Fig. 32** – Curva de atrito para o par  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Fonte: autor.

Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

**Resultados e  
Discussões**

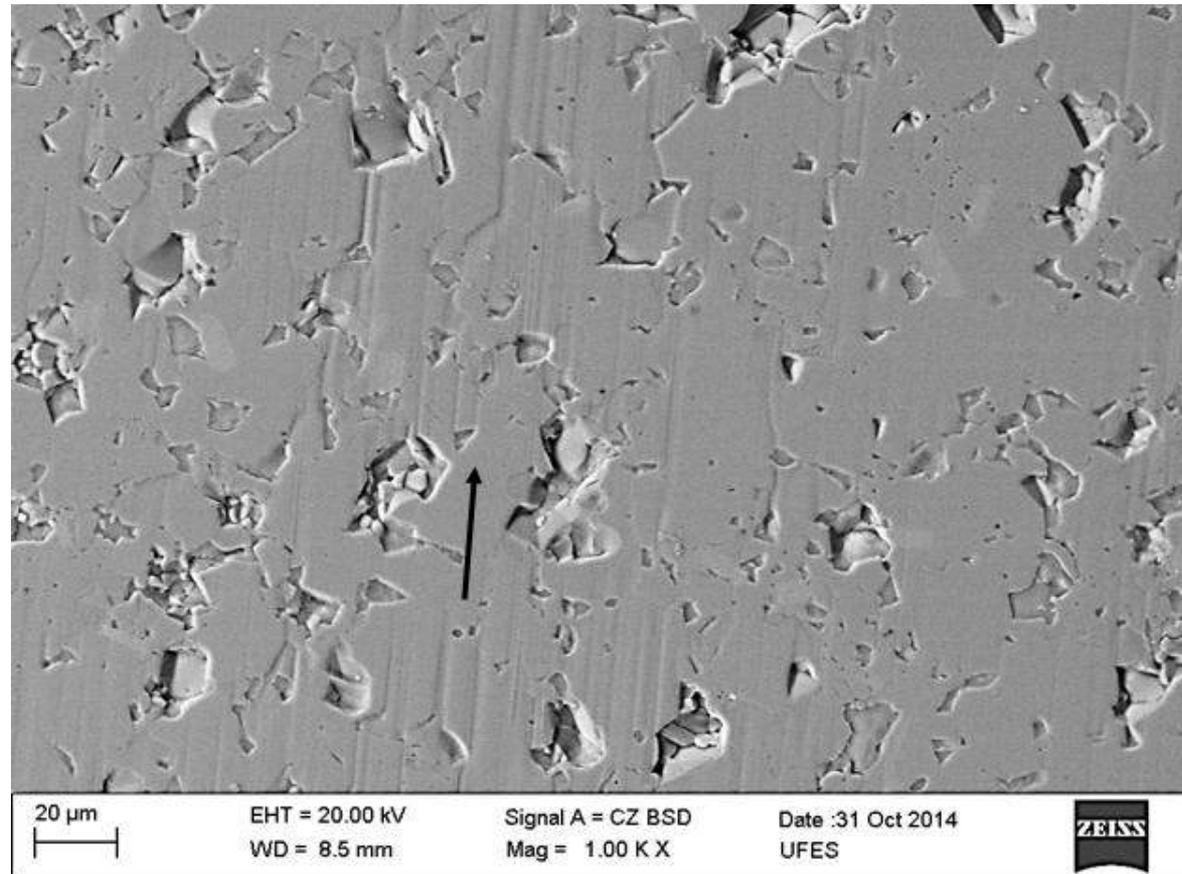
Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ TRILHA DE DESGASTE DO DISCO



**Fig. 33** –MEV da trilha de desgaste do disco de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Fonte: autor.

# $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ TRILHA DE DESGASTE DO DISCO

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

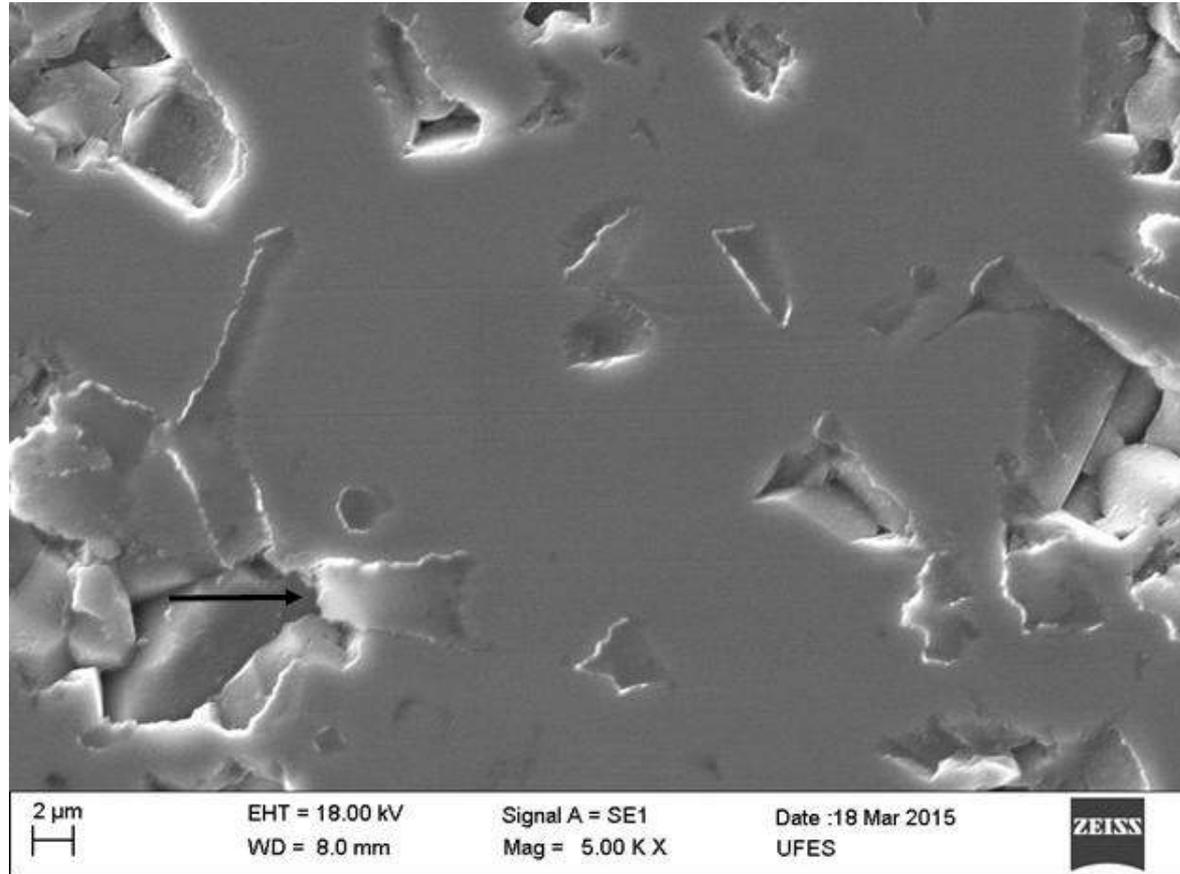
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

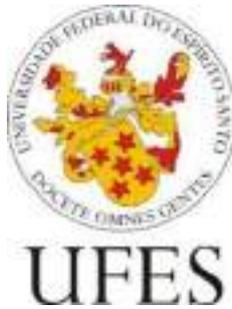
Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 34** –MEV da trilha de desgaste do disco de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Fonte: autor.



**PPGEM**

Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica

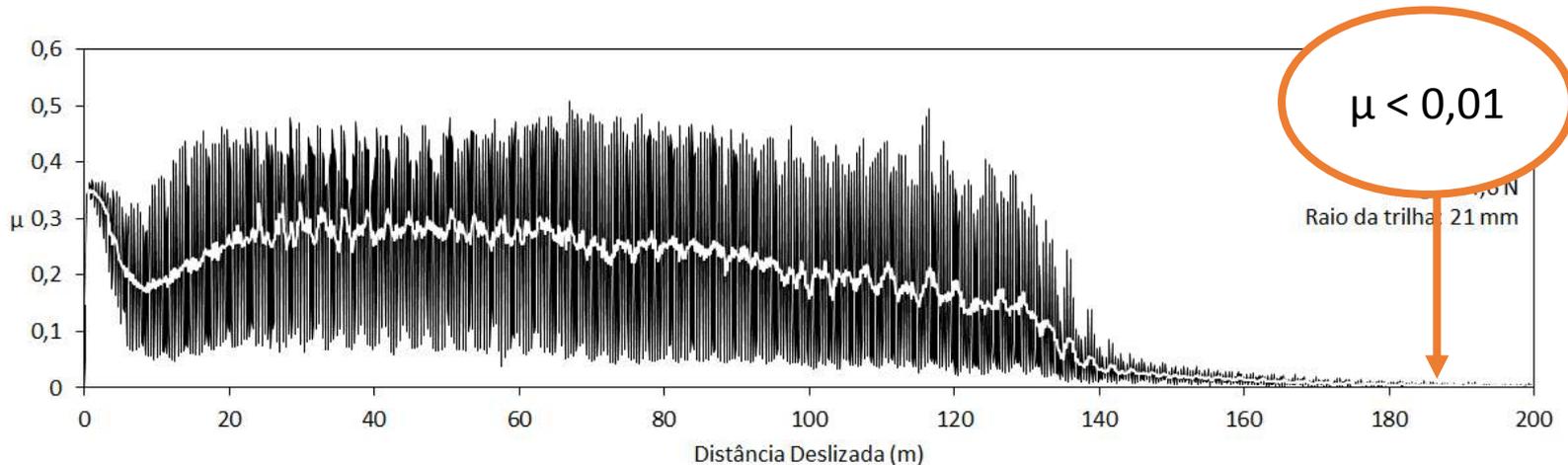


# ESFERA-DISCO: $\text{Si}_3\text{N}_4$ -ZTA

---

---

# $\text{Si}_3\text{N}_4$ -ZTA: ATRITO



**Fig. 35** – Curva de atrito para o par  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -ZTA. Fonte: autor.

# $\text{Si}_3\text{N}_4$ -ZTA

## CALOTA DE DESGASTE DA ESFERA

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

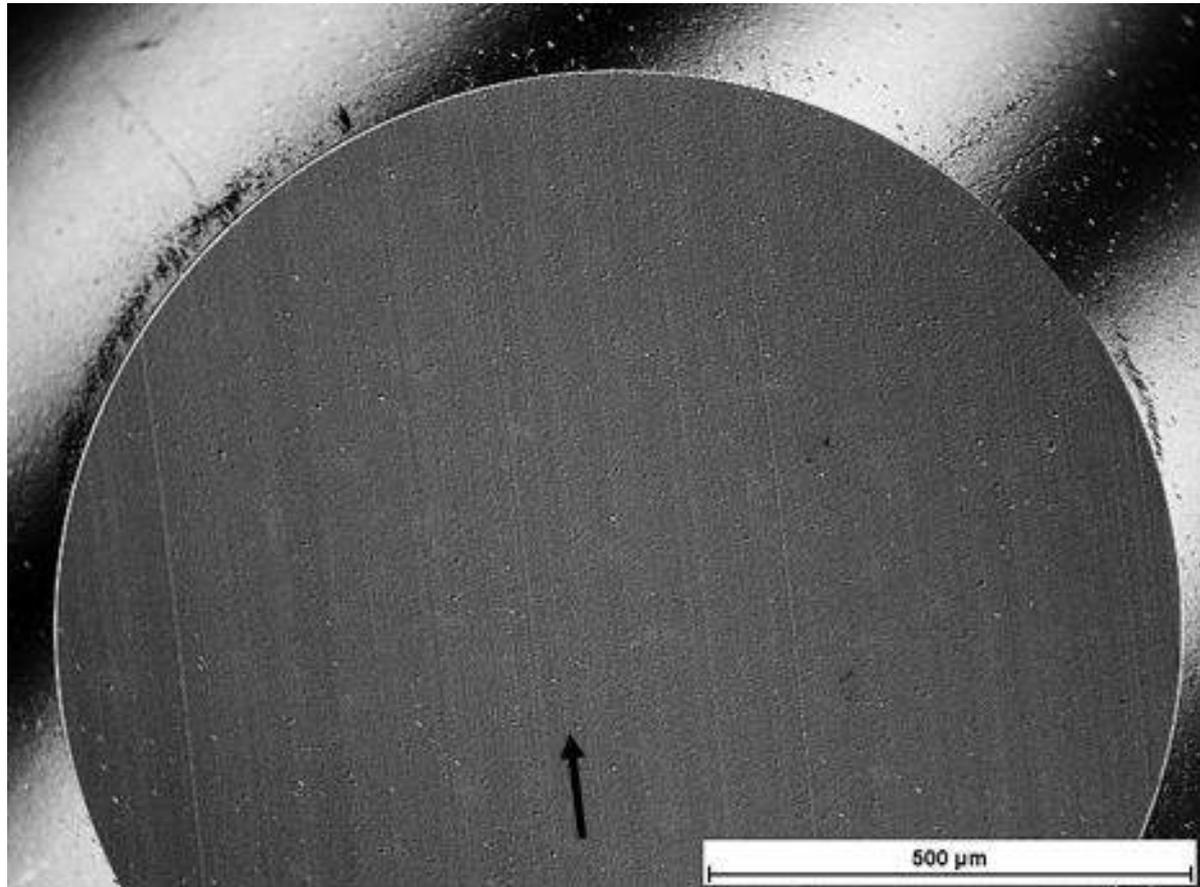
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 36** – MO da calota de desgaste da esfera de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Fonte: autor.

# $\text{Si}_3\text{N}_4$ -ZTA

## TRILHA DE DESGASTE DO DISCO

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

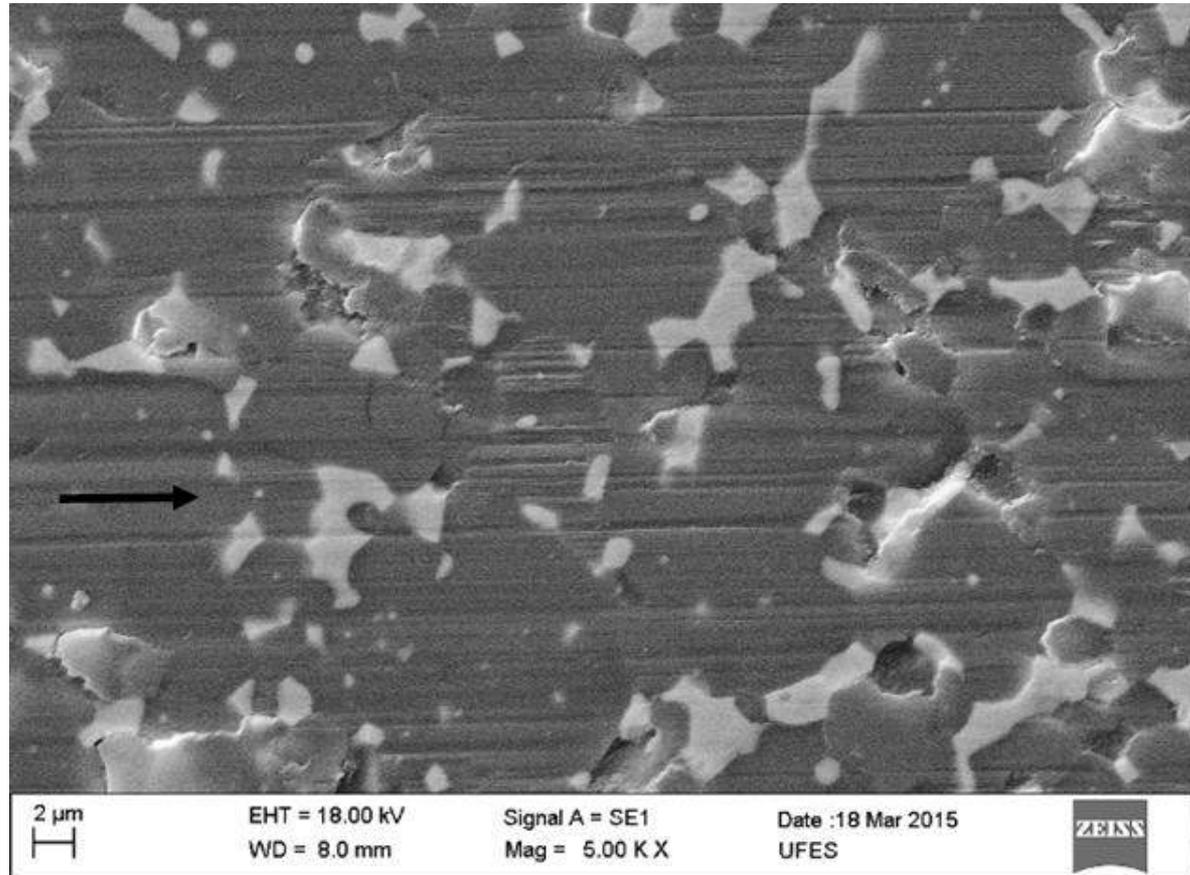
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 37** – MEV da trilha de desgaste do disco de ZTA. Fonte: autor.



**PPGEM**

Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica

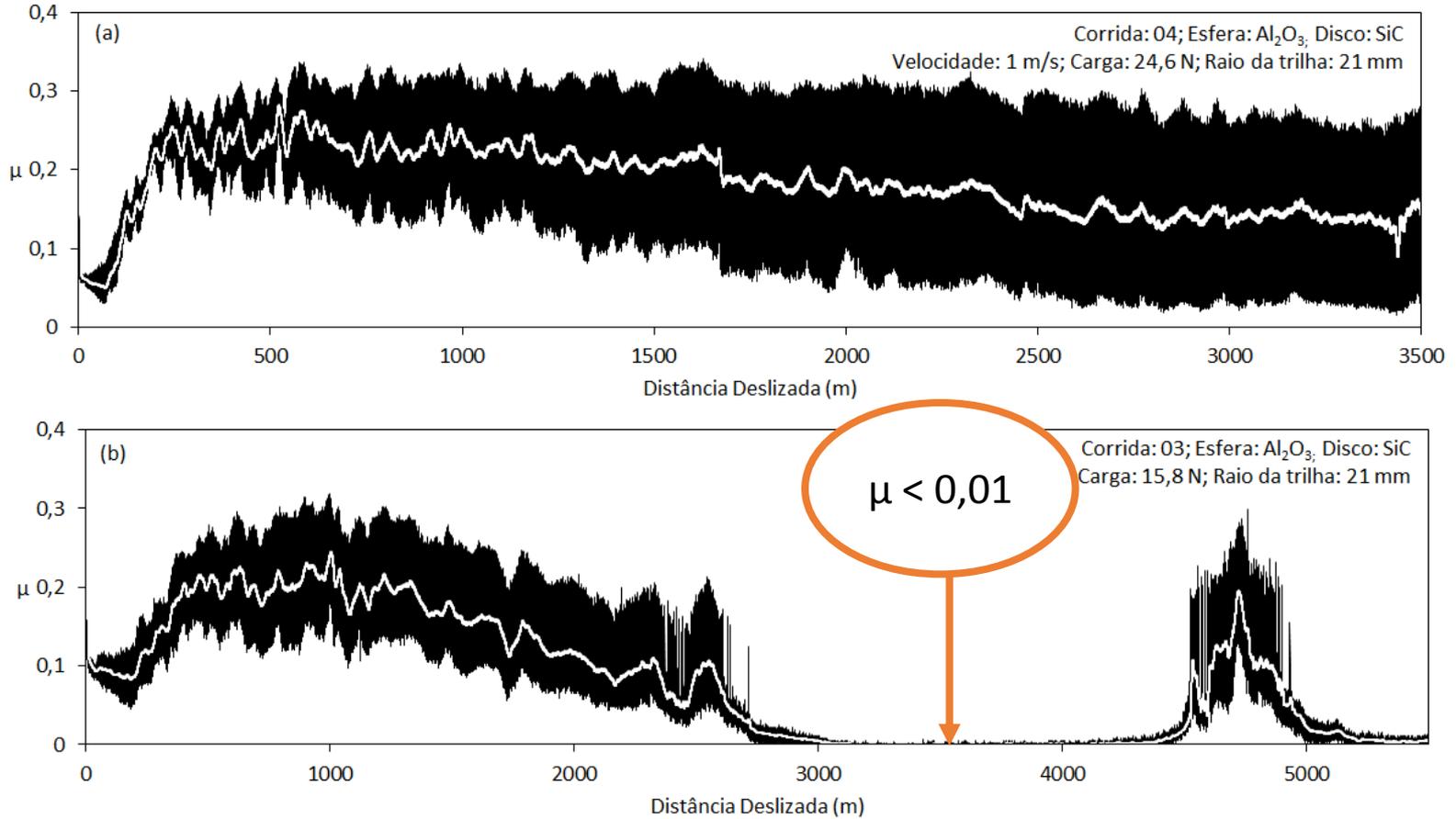


# ESFERA-DISCO: $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SiC

---

---

# Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC: ATRITO



**Fig. 38** – Curvas de atrito: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC. Fonte: autor.

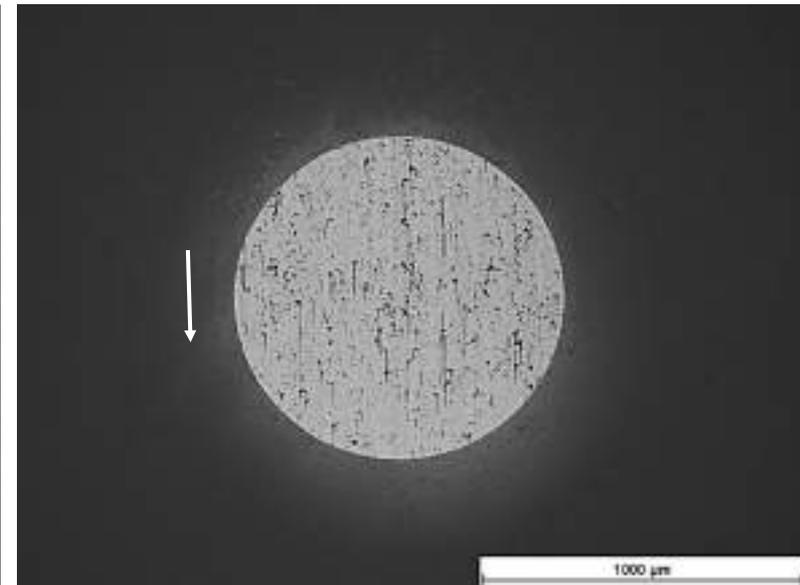
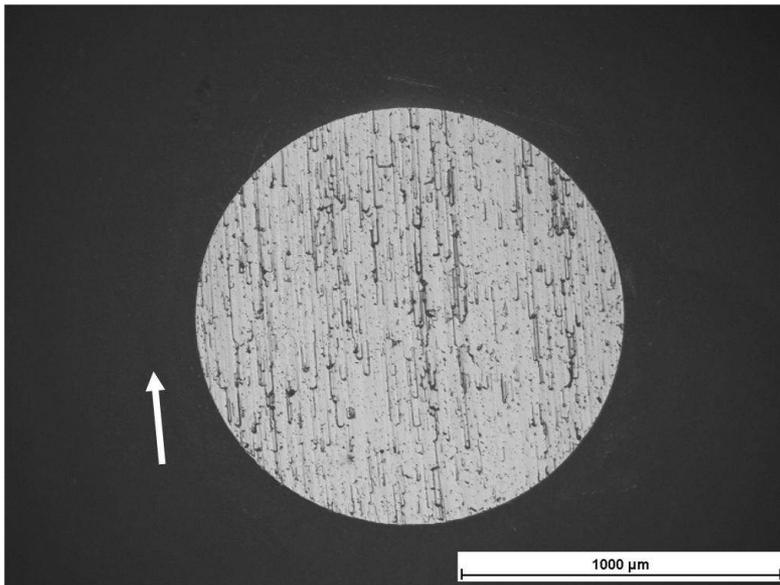
# $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$

## CALOTAS DE DESGASTE DAS ESFERAS

PPGEM

Condição A: 24,6 N e 1 m/s

Condição B: 15,8 N e 1,5 m/s



**Fig. 39** – MO e MEV das superfícies desgastadas de esferas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Fonte: autor.

Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

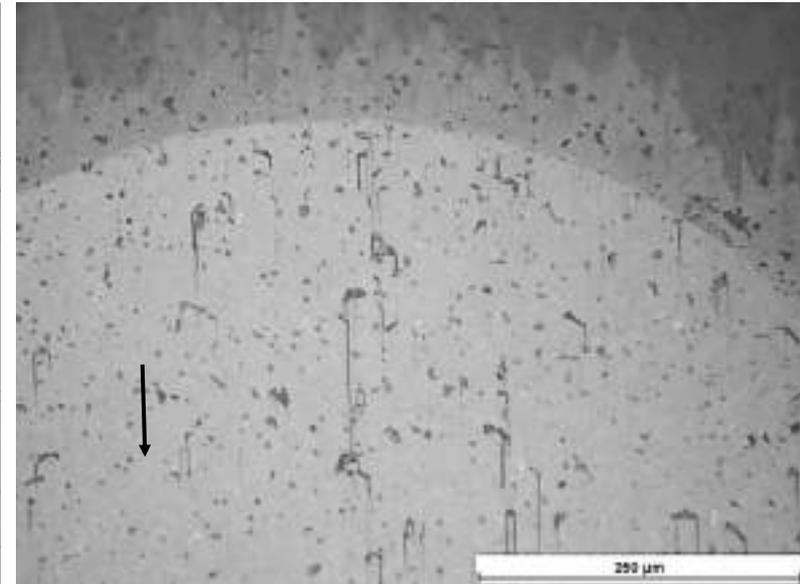
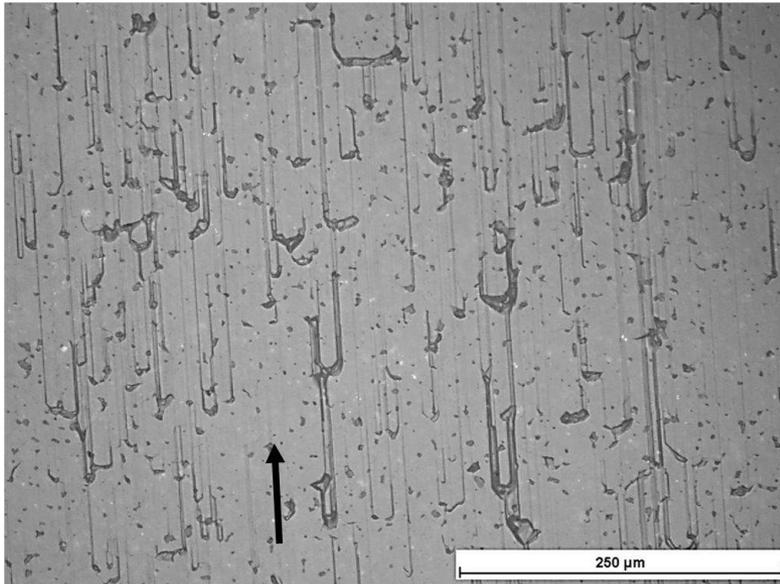
# $Al_2O_3$ -SiC

## CALOTAS DE DESGASTE DAS ESFERAS

PPGEM

Condição A: 24,6 N e 1 m/s

Condição B: 15,8 N e 1,5 m/s



**Fig. 40** – MO e MEV das superfícies desgastadas de esferas de  $Al_2O_3$ .

Fonte: autor.

Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$

## CALOTA DE DESGASTE DA ESFERA

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

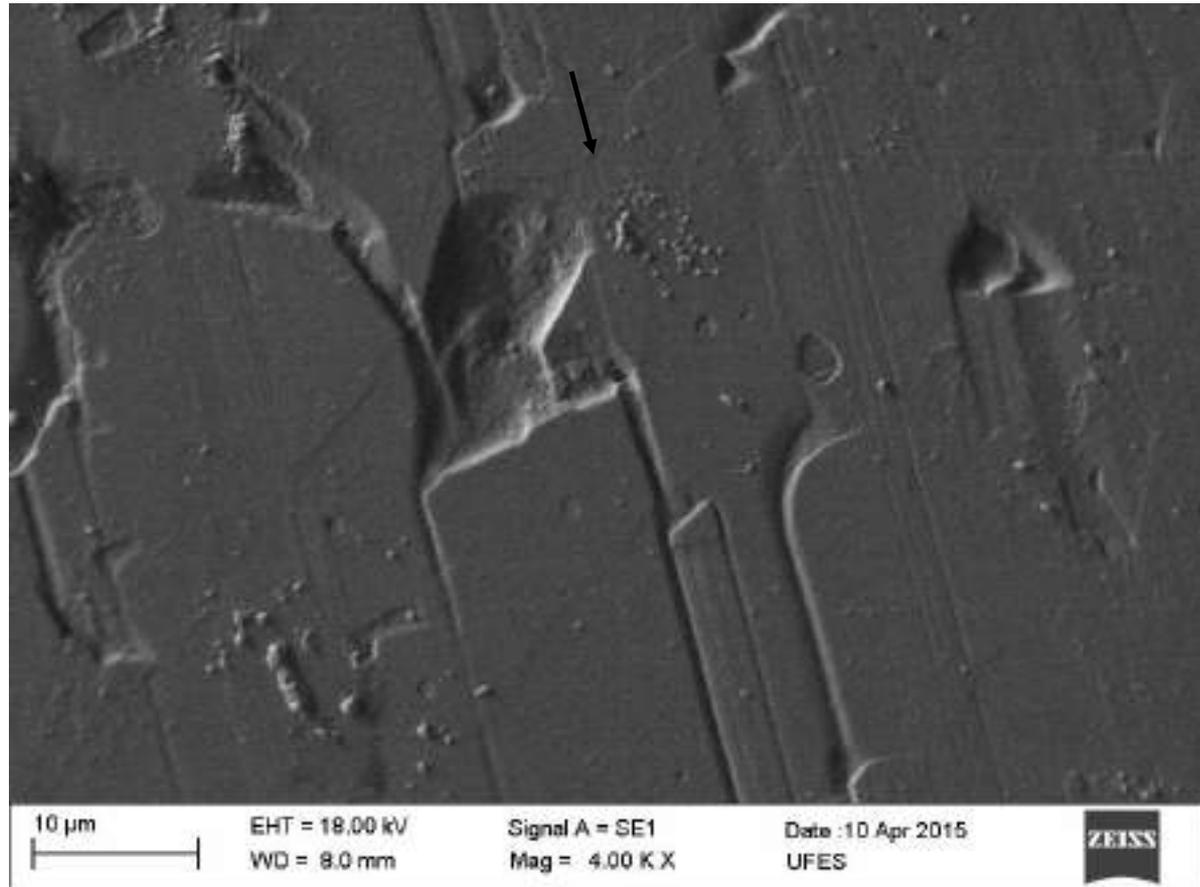
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 41** – MEV da calota de desgaste da esfera. Fonte: autor.

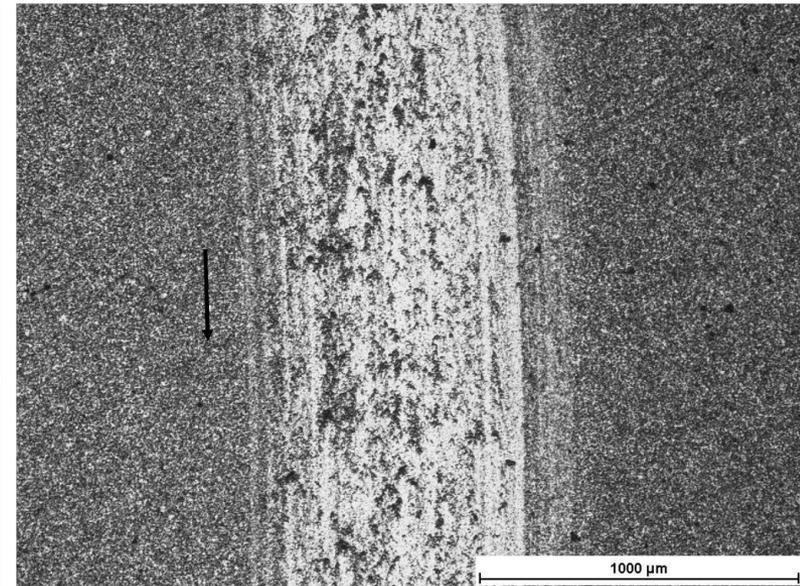
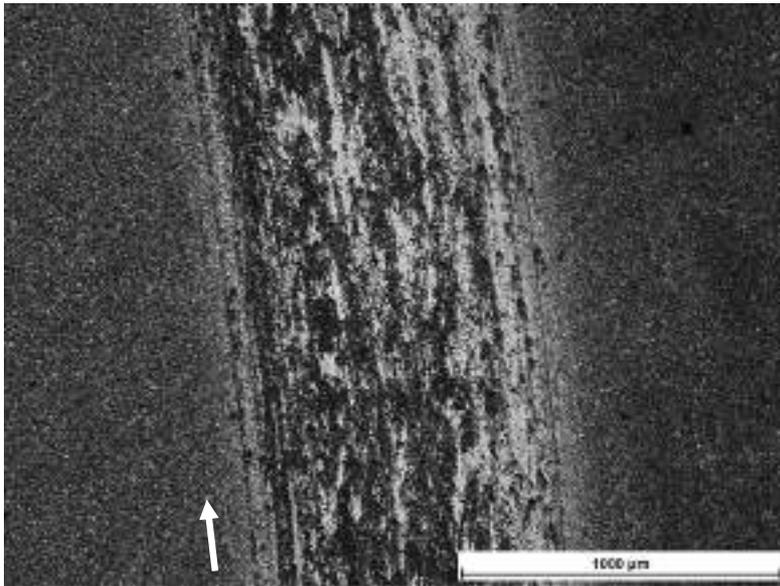
# $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$

## TRILHAS DE DESGASTE DOS DISCOS

PPGEM

Condição A: 24,6 N e 1 m/s

Condição B: 15,8 N e 1,5 m/s



**Fig. 42** – MO das superfícies desgastadas dos discos de SiC.

Fonte: autor.

Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

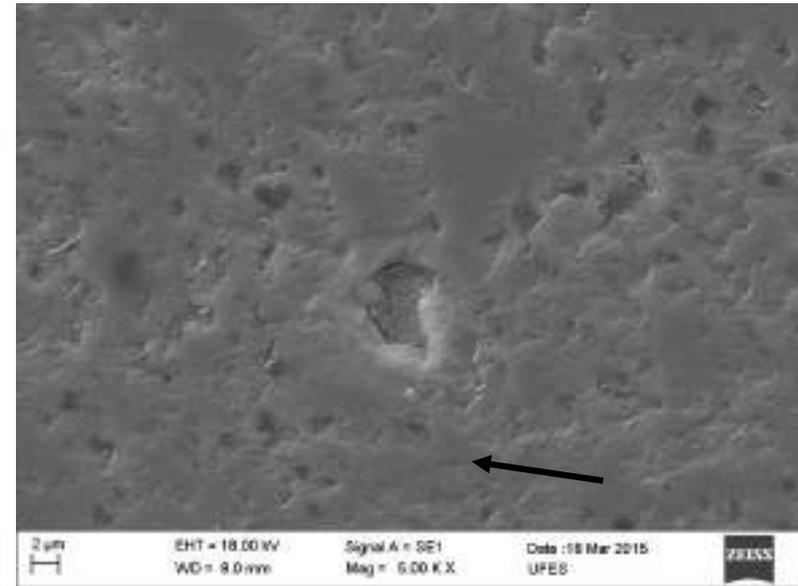
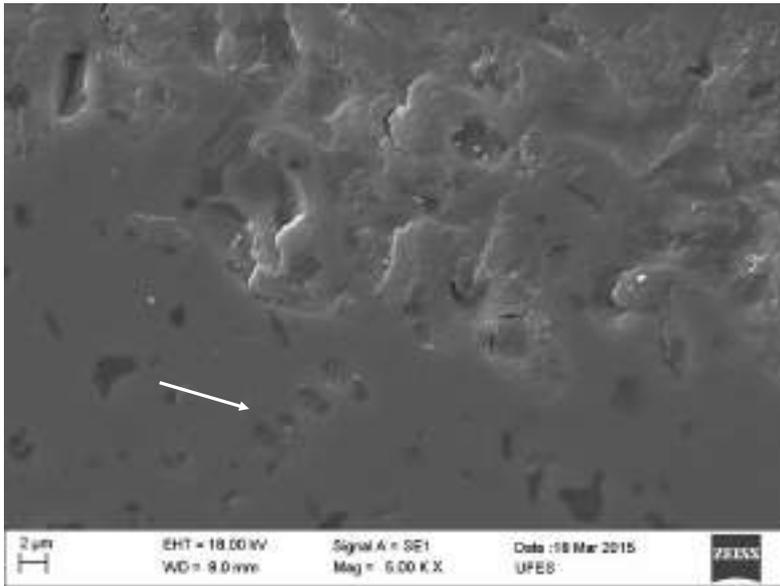
# $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$

## TRILHAS DE DESGASTE DOS DISCOS

PPGEM

Condição A: 24,6 N e 1 m/s

Condição B: 15,8 N e 1,5 m/s



**Fig. 43** – MEV das superfícies desgastadas dos discos de SiC.

Fonte: autor.

Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$ TRIBOFILME - EDS

Tabela 9 – EDS do tribofilme formado no disco de SiC quando deslizado contra  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Elemento Químico	Concentração no tribofilme (%at)	Concentração original (%at)
Silício	44,43	48,71
Carbono	44,66	47,97
Platina	0,93	0,68
Oxigênio	9,15	2,25
Alumínio	0,83	0,38

- Formação de hidróxidos de alumínio e sílica



**PPGEM**

Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica

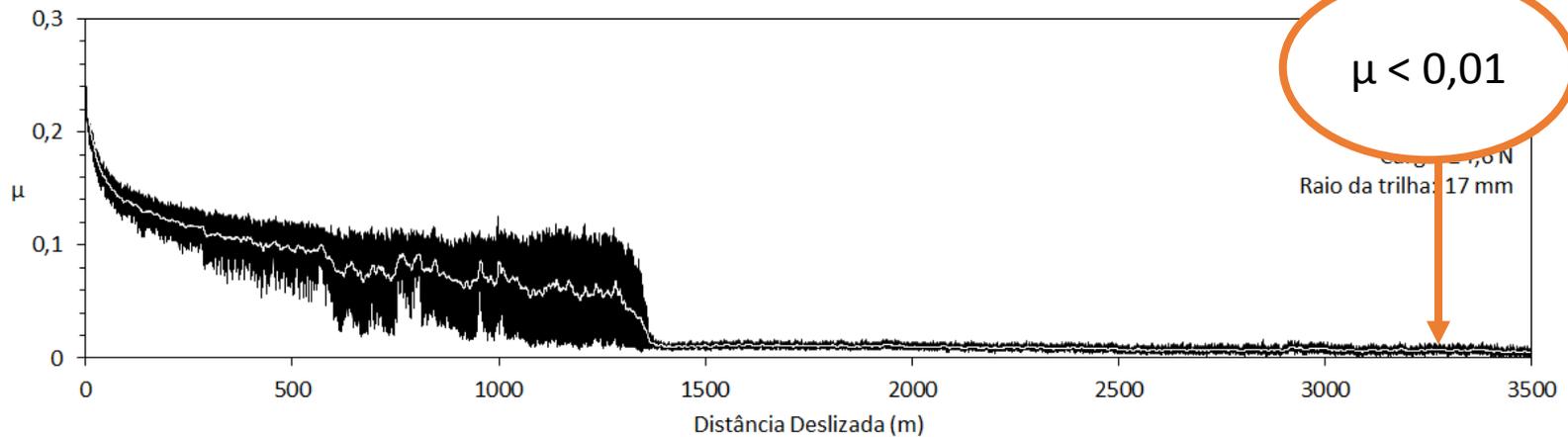


# ESFERA-DISCO: $ZrO_2$ -SiC

---

---

# ZrO<sub>2</sub>-SiC: ATRITO



**Fig. 44** – Curva de atrito para o par ZrO<sub>2</sub>-SiC. Fonte: autor.

# ZrO<sub>2</sub>-SiC

## CALOTA DE DESGASTE DA ESFERA

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

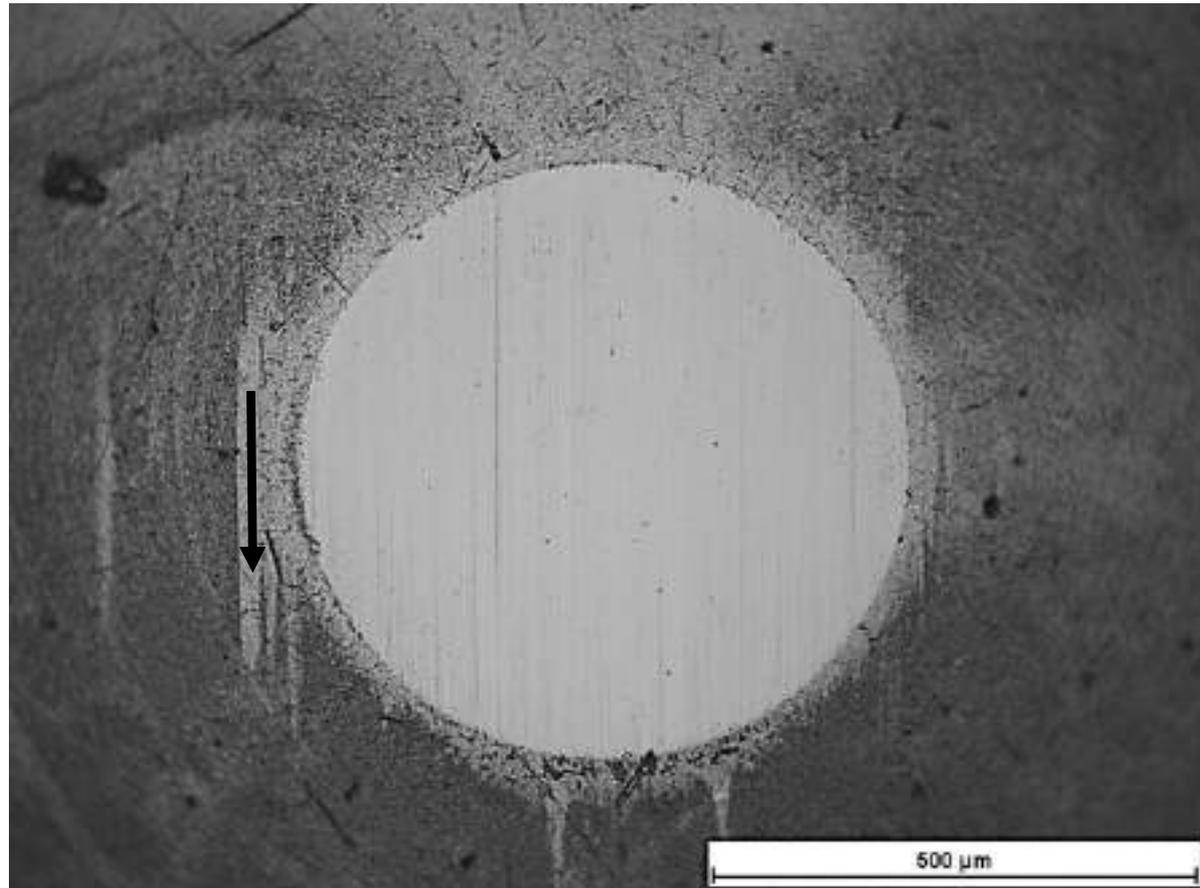
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 45** – MO da calota de desgaste da esfera de ZrO<sub>2</sub>. Fonte: autor.

# ZrO<sub>2</sub>-SiC

## CALOTA DE DESGASTE DA ESFERA

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

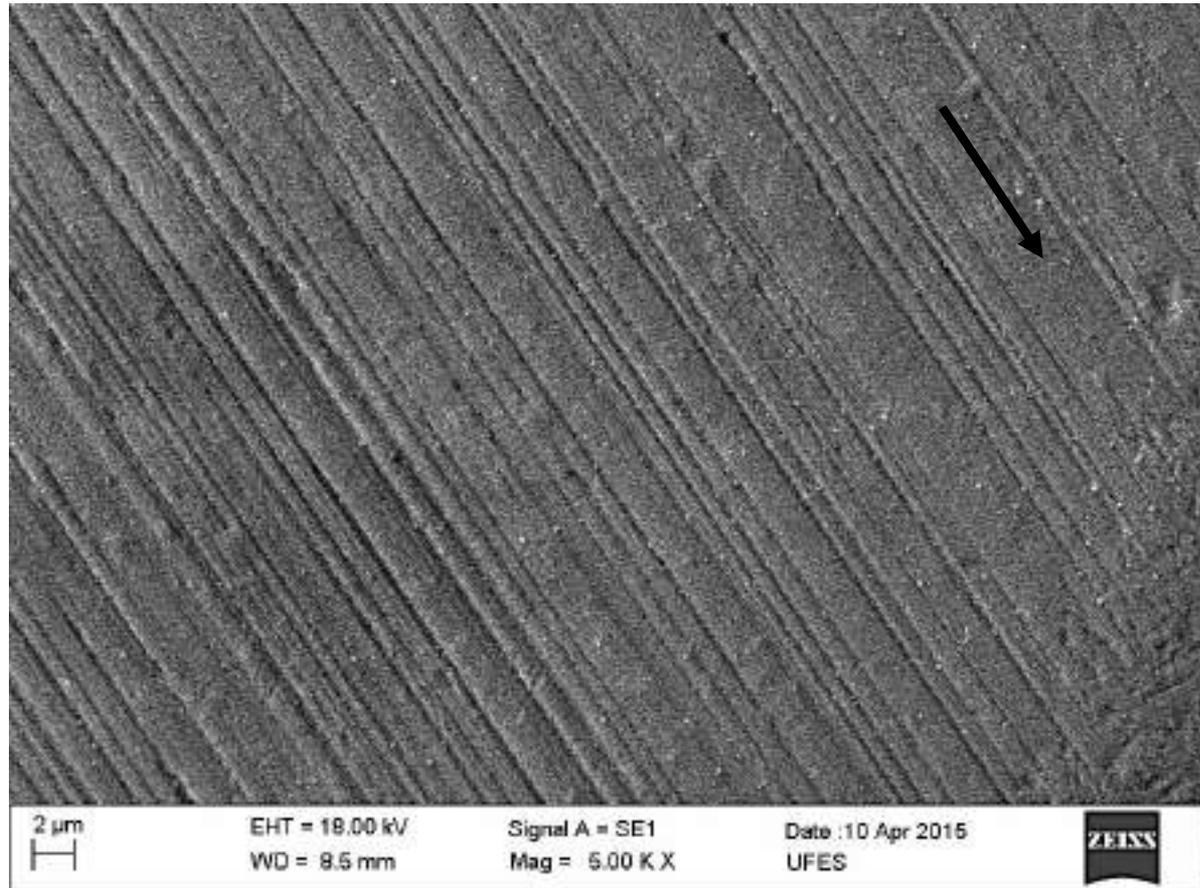
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 46** – MEV da calota de desgaste da esfera de ZrO<sub>2</sub>. Fonte: autor.

Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

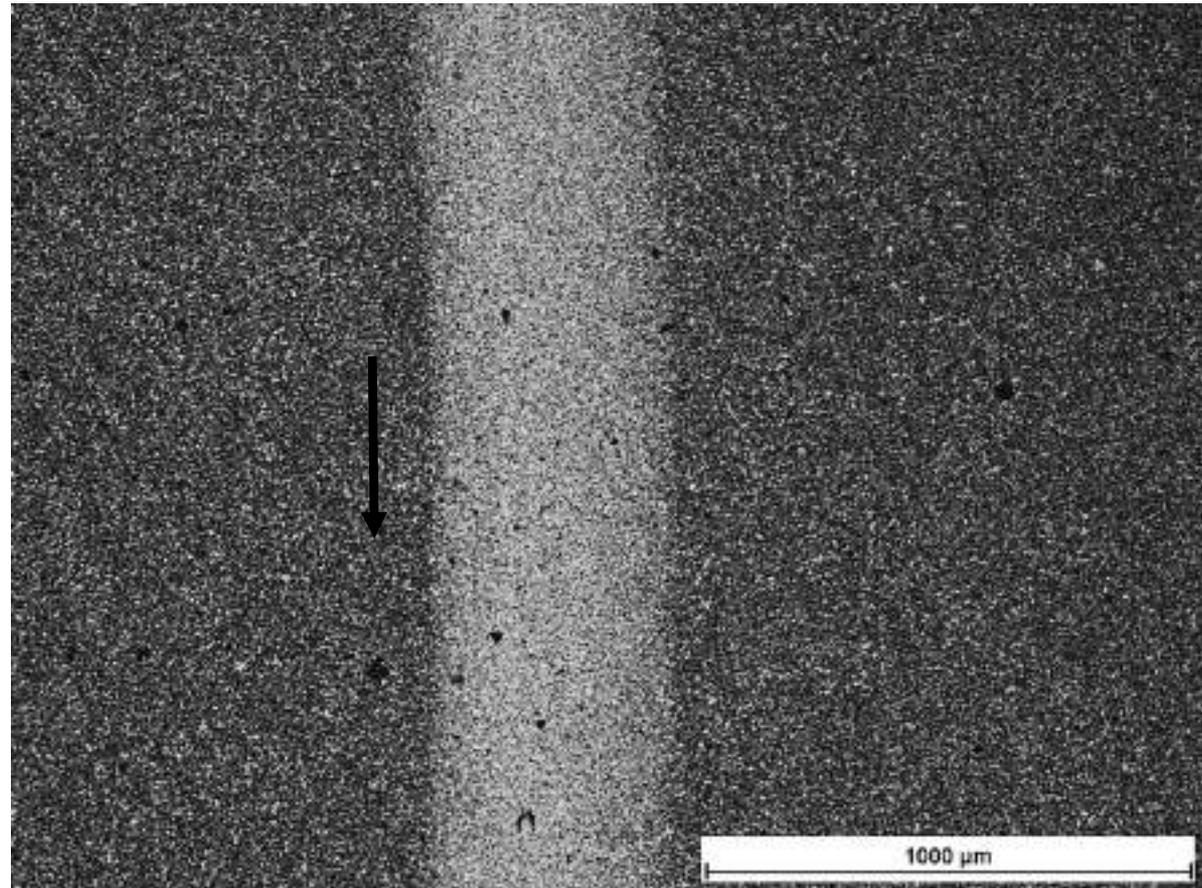
Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# ZrO<sub>2</sub>-SiC

## TRILHA DE DESGASTE DO DISCO



**Fig. 47** – MO da trilha de desgaste do disco de SiC. Fonte: autor.

Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

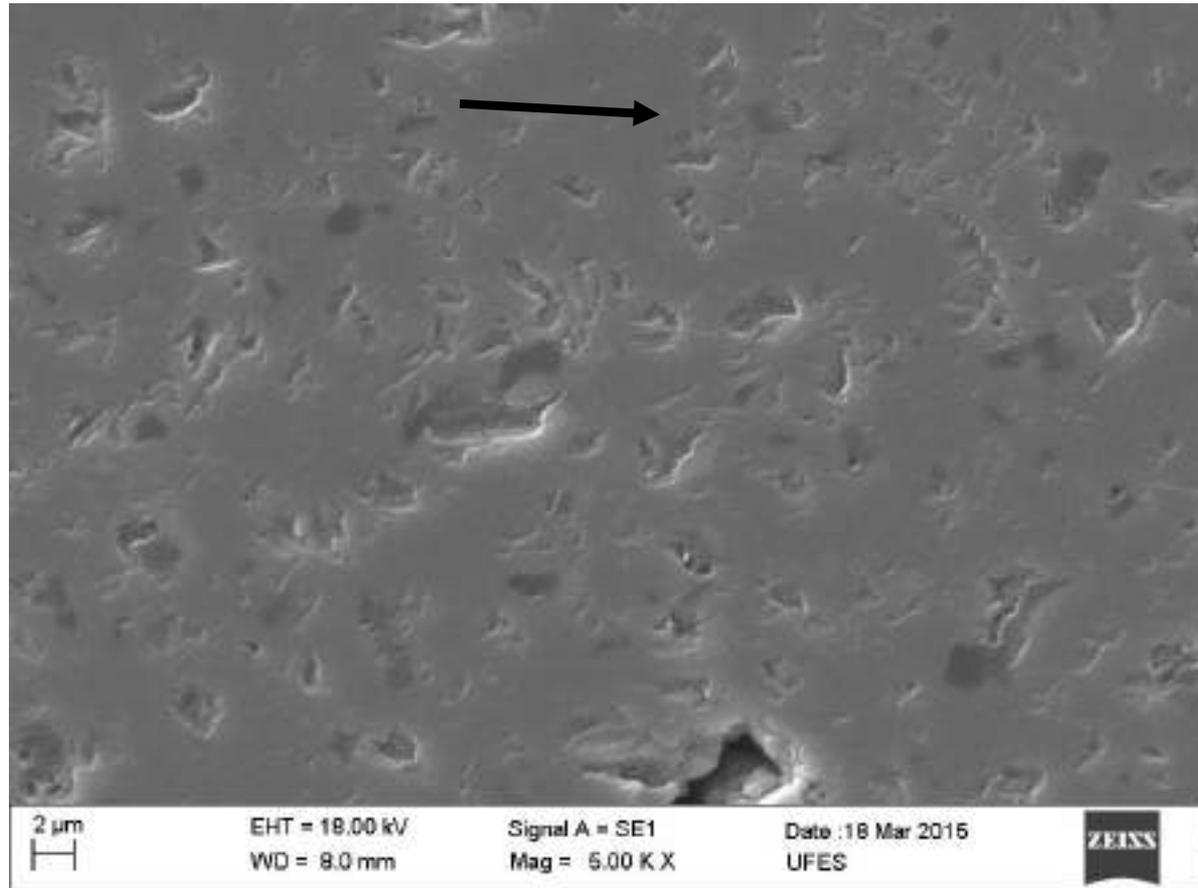
Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# ZrO<sub>2</sub>-SiC

## TRILHA DE DESGASTE DO DISCO



**Fig. 48** – MEV da trolha de desgaste do disco de SiC. Fonte: autor.

# ZrO<sub>2</sub>-SiC TRIBOFILME - EDS

Tabela 10 - EDS do tribofilme formado no disco de SiC quando deslizado contra ZrO<sub>2</sub>

Elemento Químico	Concentração no tribofilme (%at)	Concentração original (%at)
Silício	43,81 ± 3,44	48,71
Carbono	50,99 ± 3,60	47,97
Platina	0,92 ± 0,06	0,68
Oxigênio	4,15 ± 0,03	2,25
Zircônio	0,19 ± 0,18	-

- Formação de sílica



**PPGEM**

Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica

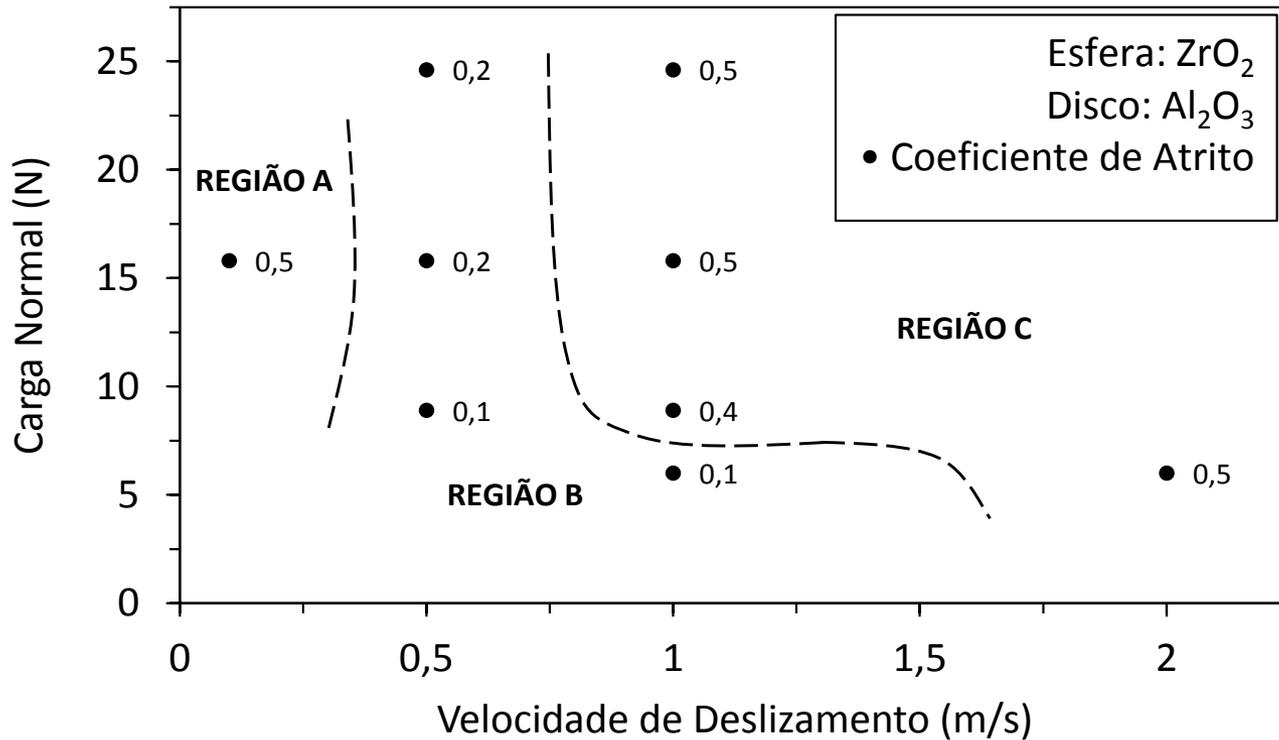


**ESFERA-DISCO:  $ZrO_2-Al_2O_3$**

---

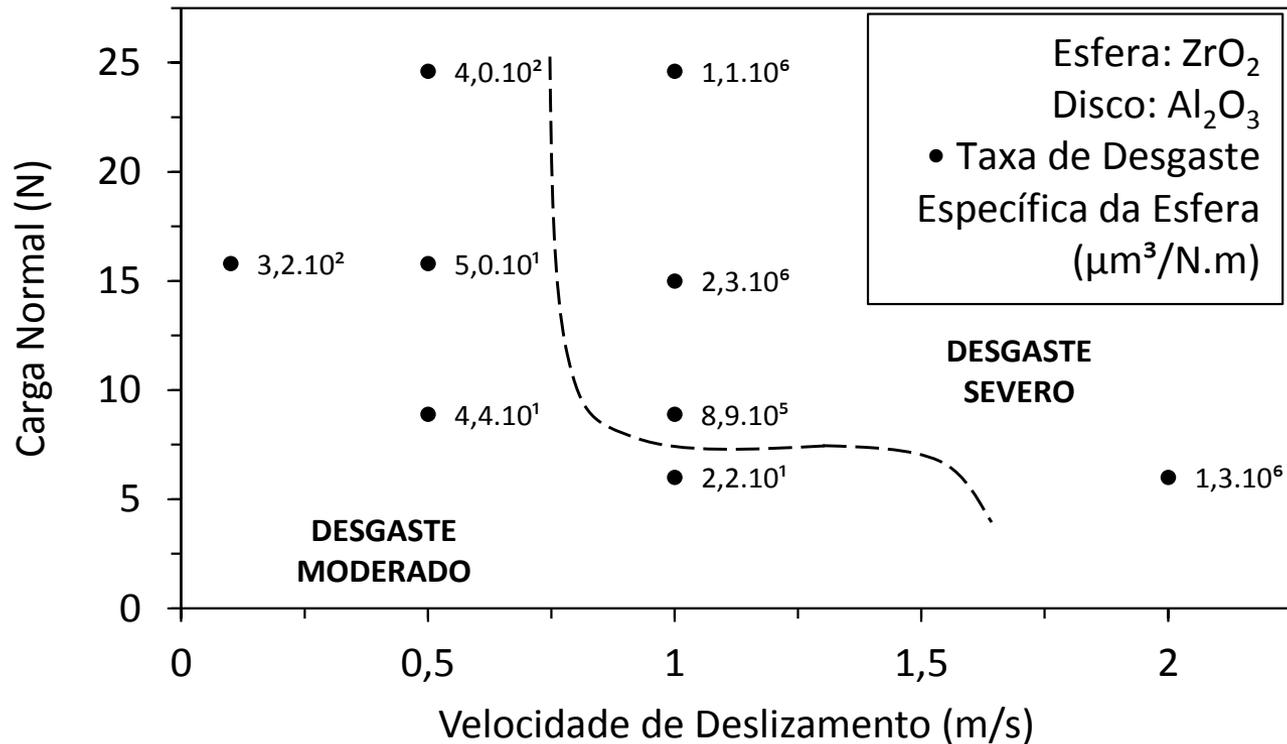
---

# ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: ATRITO



**Fig. 49** – Mapa de atrito: ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Fonte: autor.

# ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: DESGASTE DA ESFERA



**Fig. 50** – Mapa de desgaste para a esfera do par ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Fonte: autor.

# ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: DESGASTE DO DISCO

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

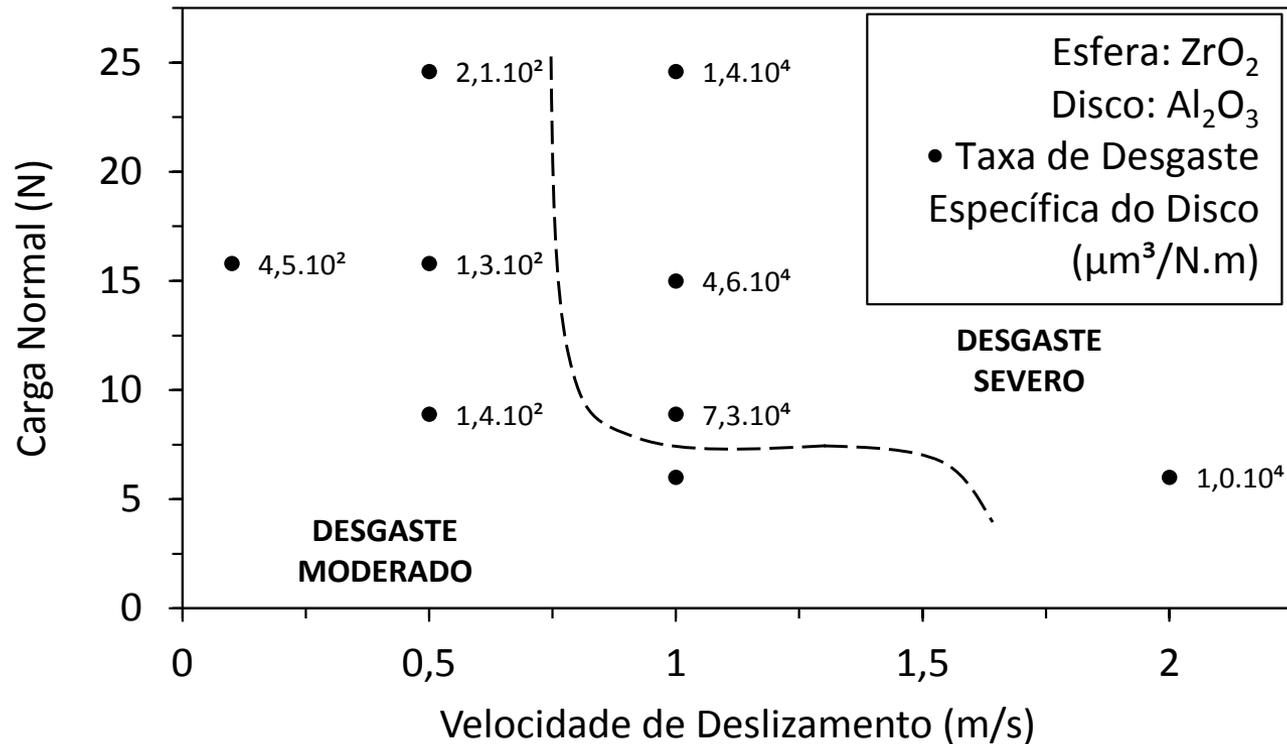
Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 51** – Mapa de desgaste para o disco do par ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Fonte: autor.

Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

**Resultados e  
Discussões**

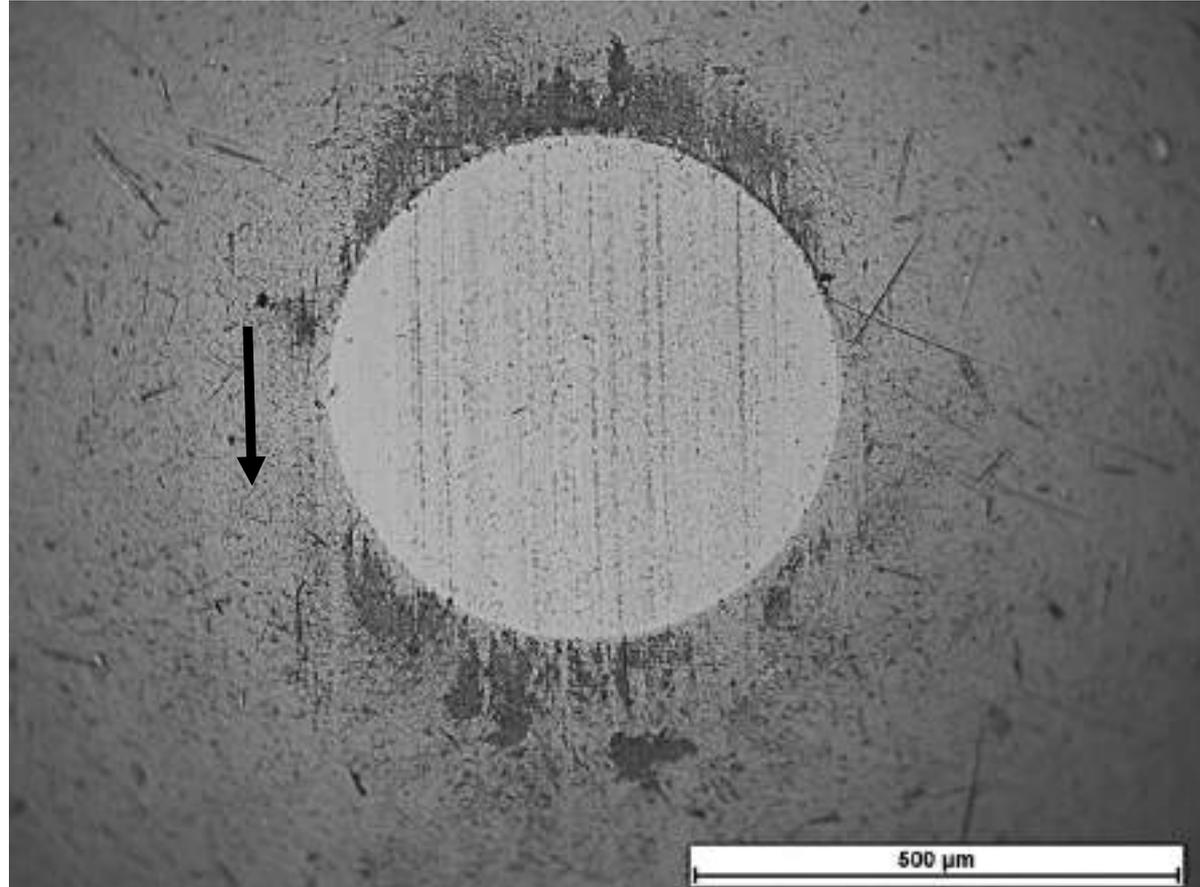
Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# $ZrO_2-Al_2O_3$ CALOTA DE DESGASTE DA ESFERA (M)



**Fig. 52** – MO e MEV das superfícies desgastadas em regime moderado.

Fonte: autor.

# $ZrO_2-Al_2O_3$ TRILHA DE DESGASTE DO DISCO (M)

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

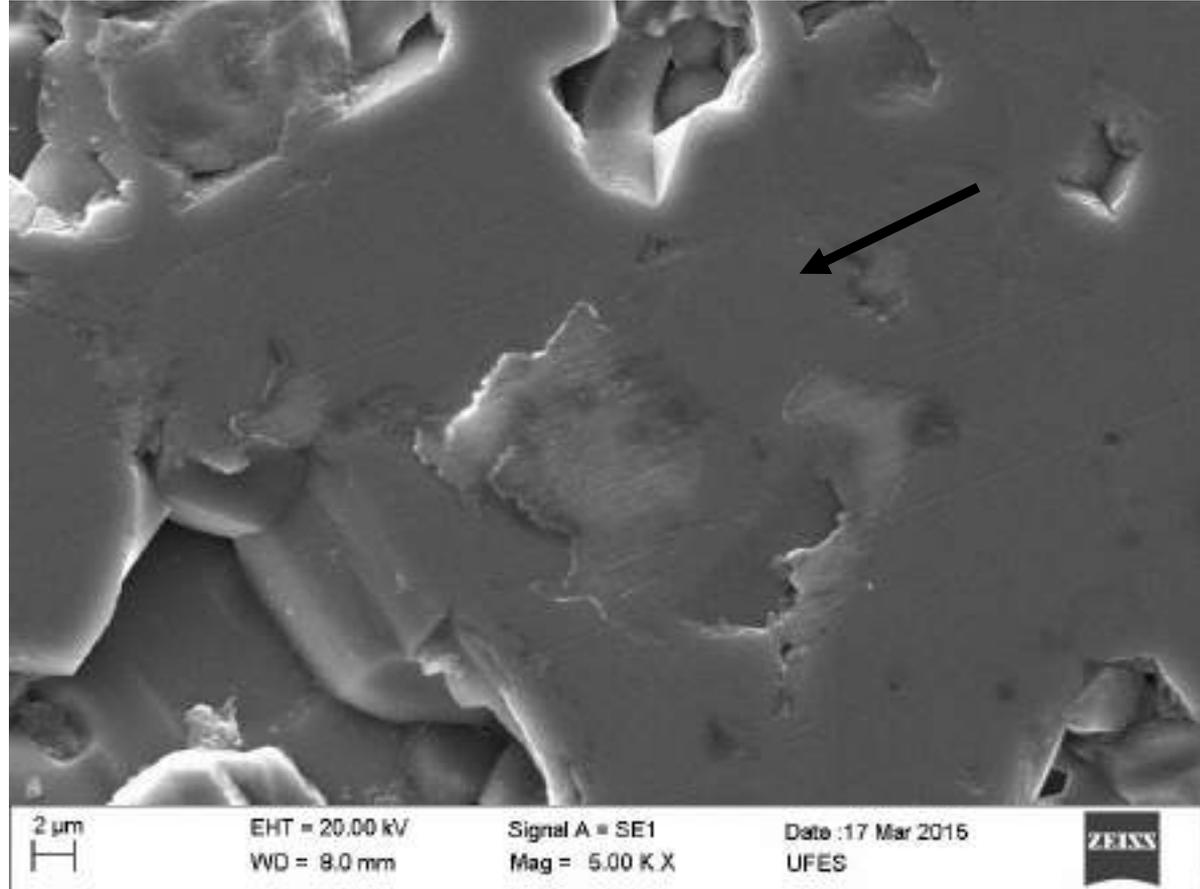
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 53** – MO e MEV das superfícies desgastadas em regime moderado.

Fonte: autor.

# $ZrO_2-Al_2O_3$ TRILHA DE DESGASTE DO DISCO (M)

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

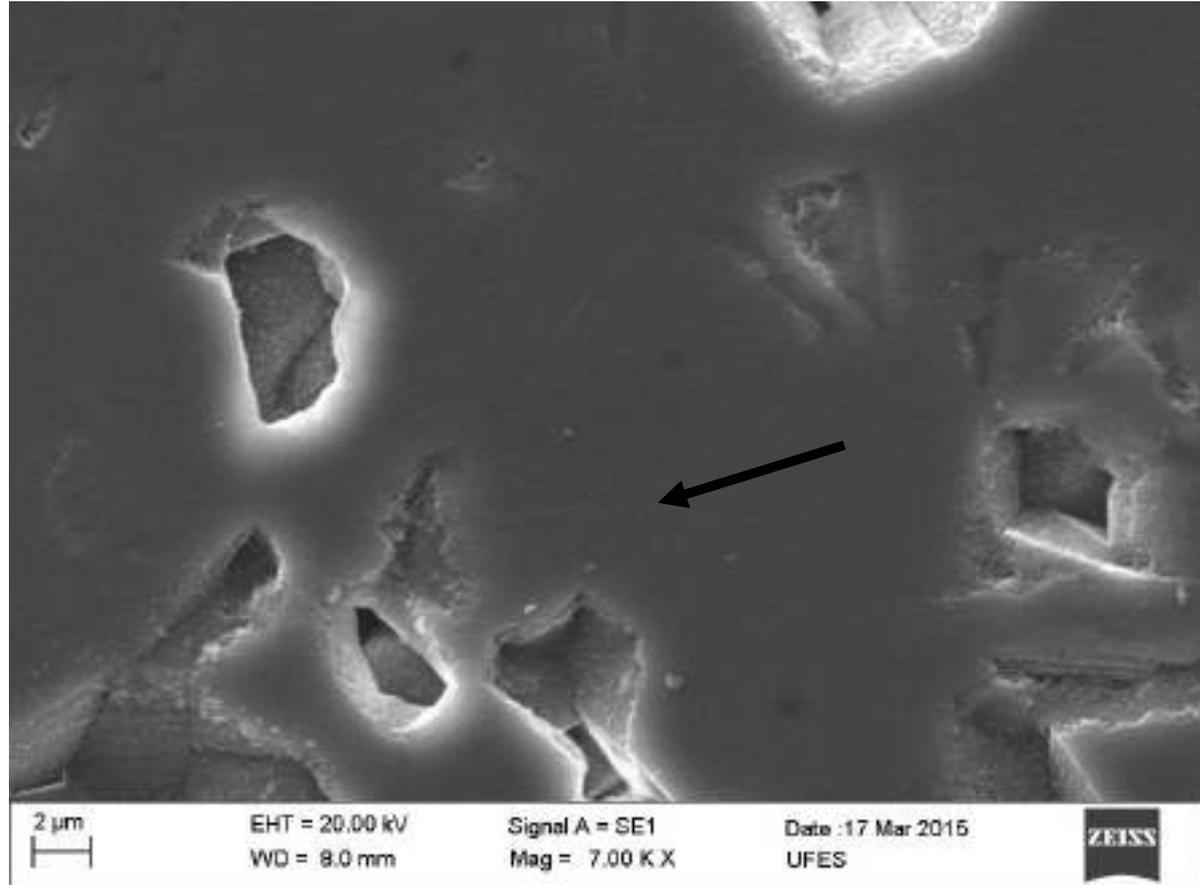
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 54** – MO e MEV das superfícies desgastadas em regime moderado.

Fonte: autor.

# $ZrO_2-Al_2O_3$ SUPERFÍCIES DESGASTADAS (S)

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

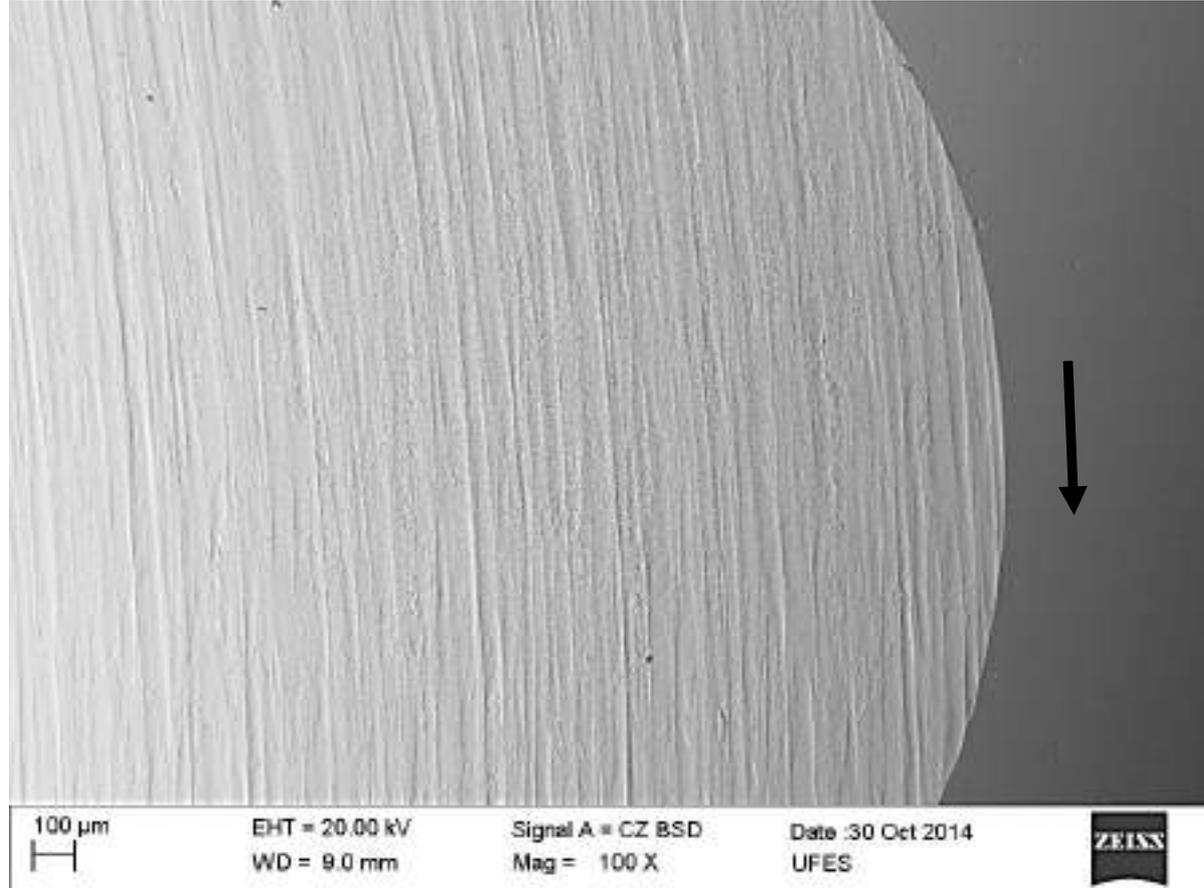
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 55** –MEV das superfícies desgastadas em regime severo.

Fonte: autor.

# $ZrO_2-Al_2O_3$ SUPERFÍCIES DESGASTADAS (S)

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

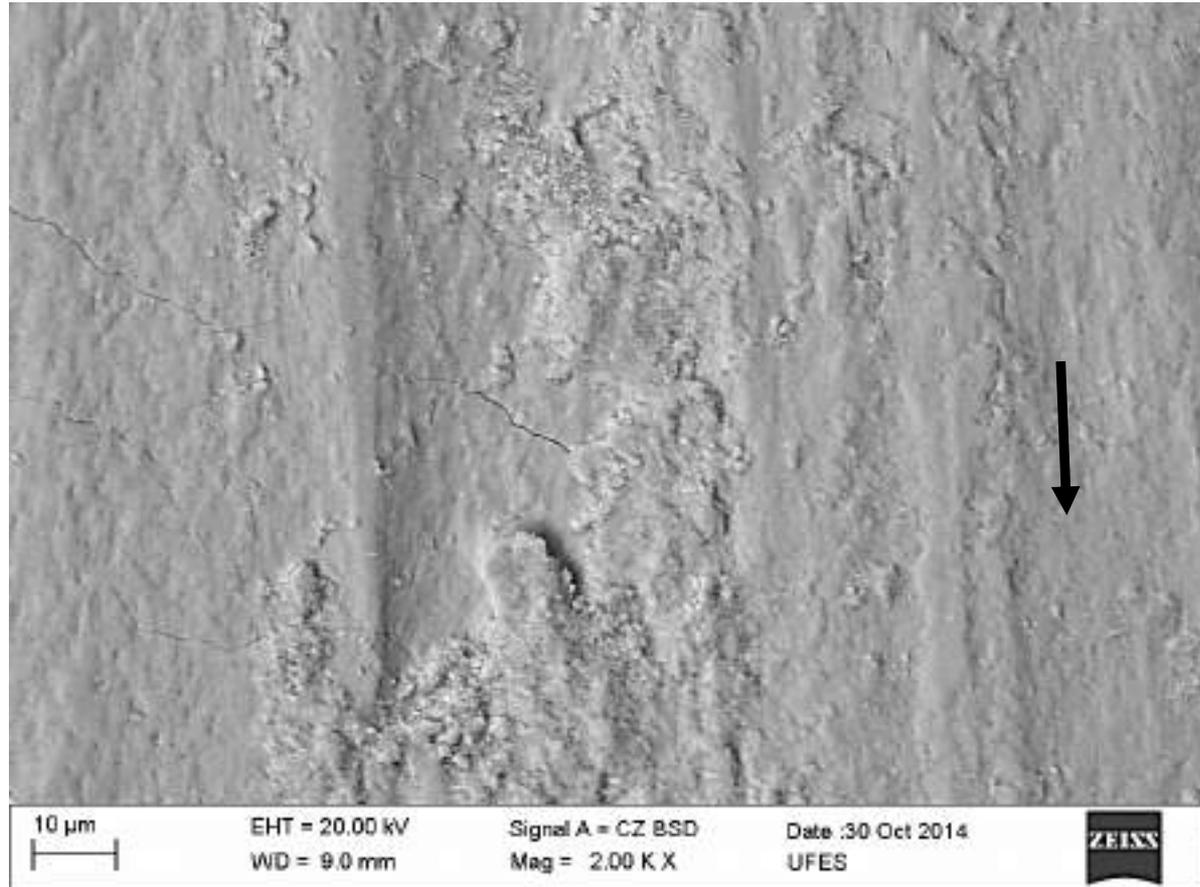
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 56** –MEV das superfícies desgastadas em regime severo.

Fonte: autor.

# $ZrO_2-Al_2O_3$ SUPERFÍCIES DESGASTADAS (S)

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

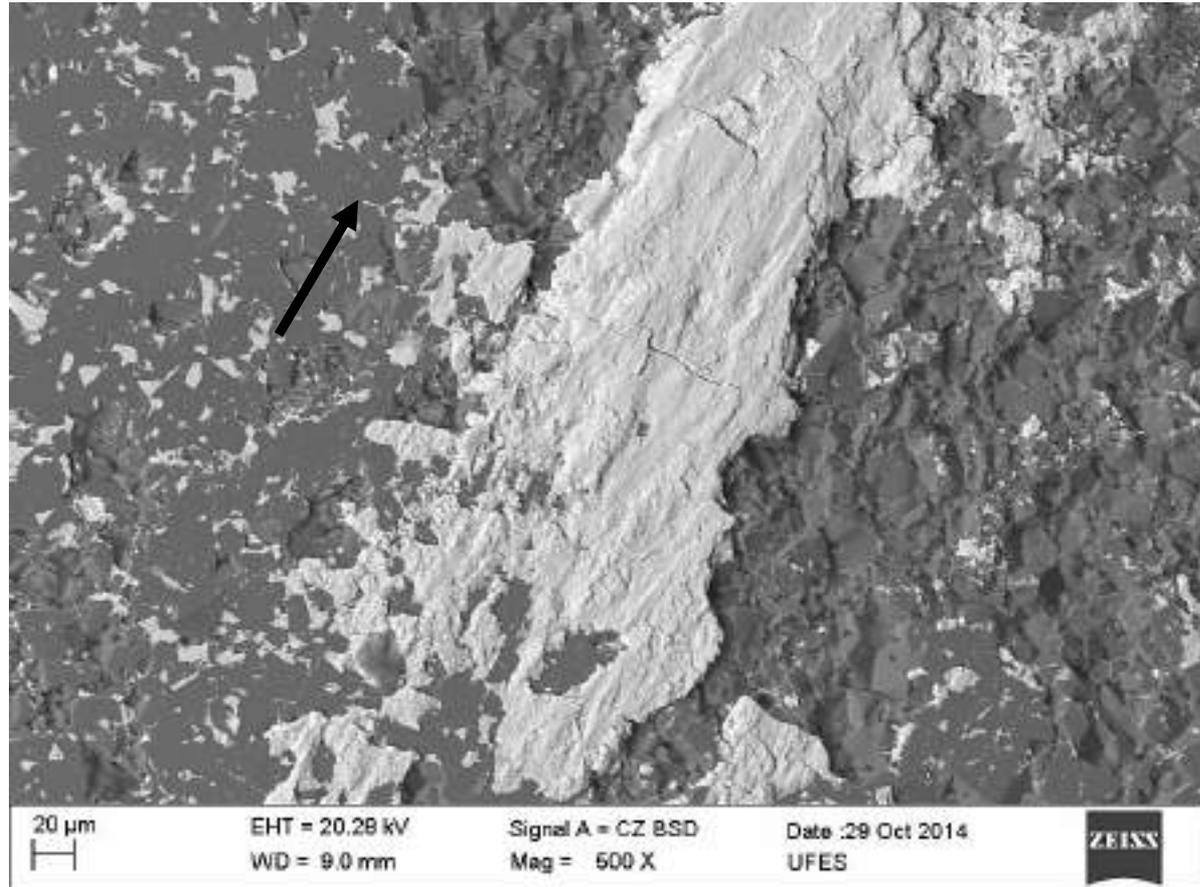
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 57** –MEV das superfícies desgastadas em regime severo.

Fonte: autor.

# $ZrO_2-Al_2O_3$ SUPERFÍCIES DESGASTADAS (S)

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

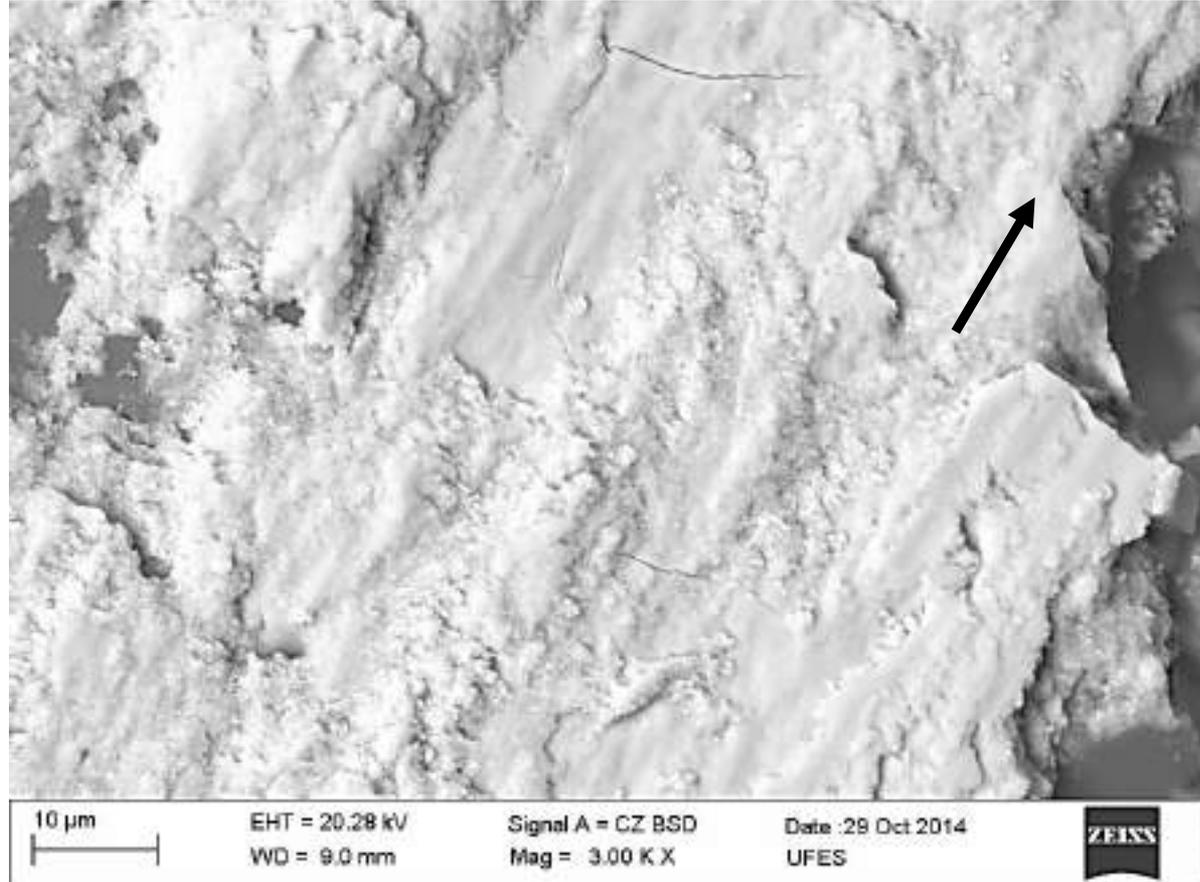
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 58** –MEV das superfícies desgastadas em regime severo.

Fonte: autor.



**PPGEM**

Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica



# ESFERA-DISCO: $ZrO_2$ -ZTA

---

---



UFES

PPGEM



Introdução

Revisão Bibliográfica

Materiais e Métodos

Resultados e Discussões

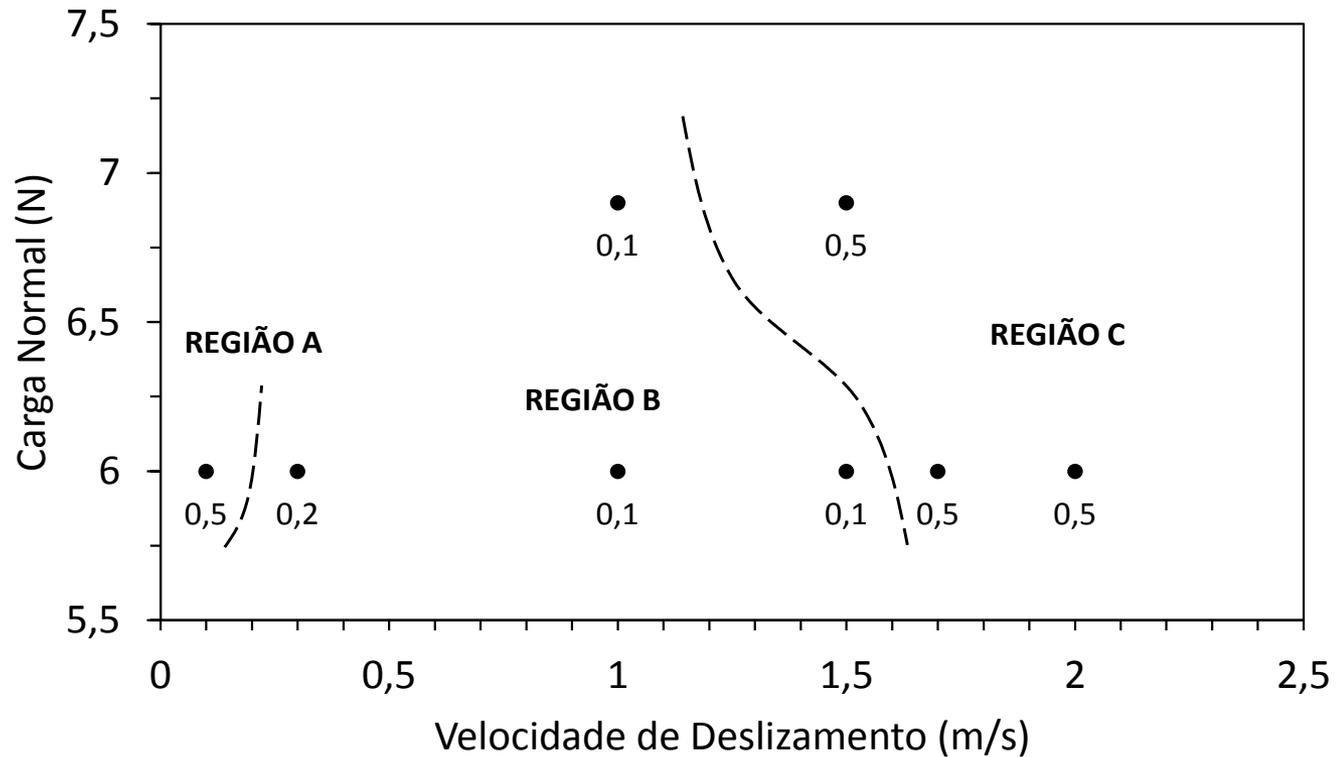
Conclusão

Sugestões para trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# ZrO<sub>2</sub>-ZTA: ATRITO



**Fig. 59** – Mapa de atrito: ZrO<sub>2</sub>-ZTA. Fonte: autor.

# ZrO<sub>2</sub>-ZTA: DESGASTE DA ESFERA

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

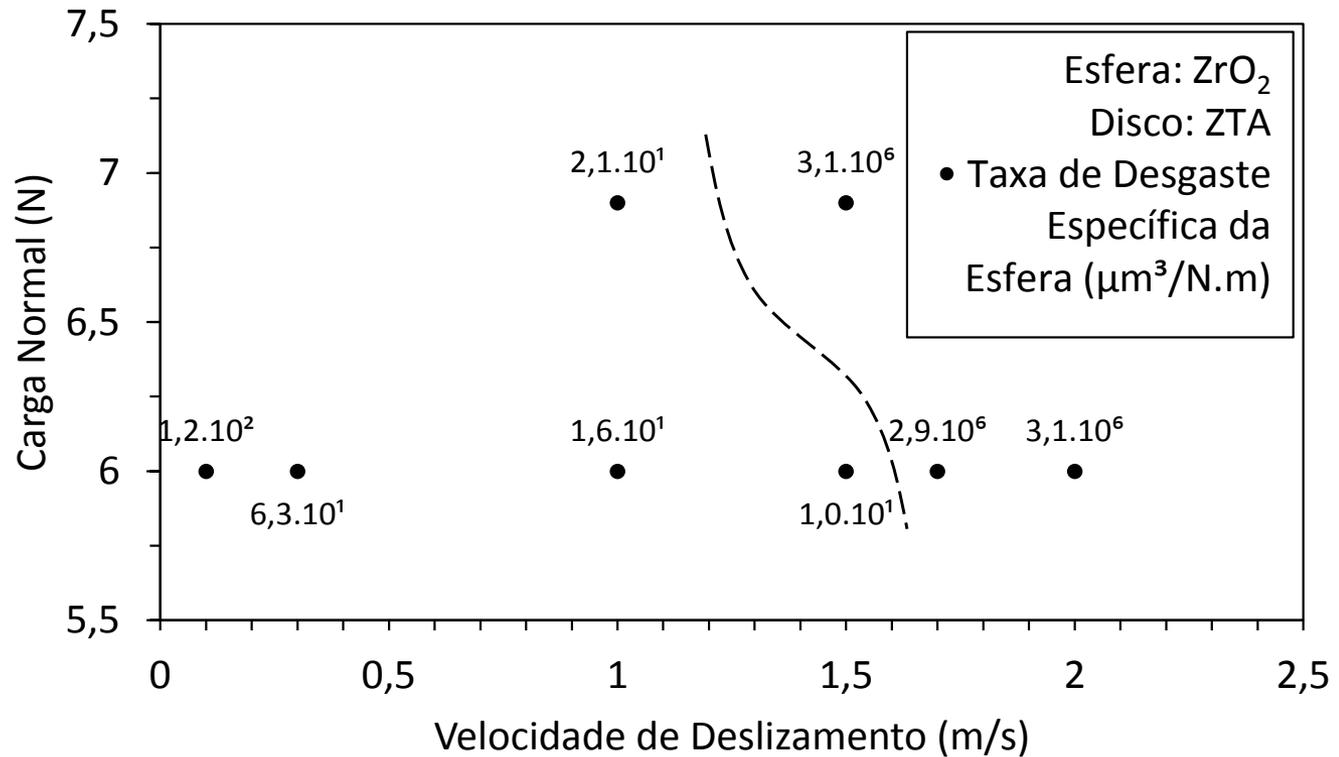
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 60** – Mapa de desgaste para a esfera do par ZrO<sub>2</sub>-ZTA. Fonte: autor.

# ZrO<sub>2</sub>-ZTA: DESGASTE DO DISCO

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

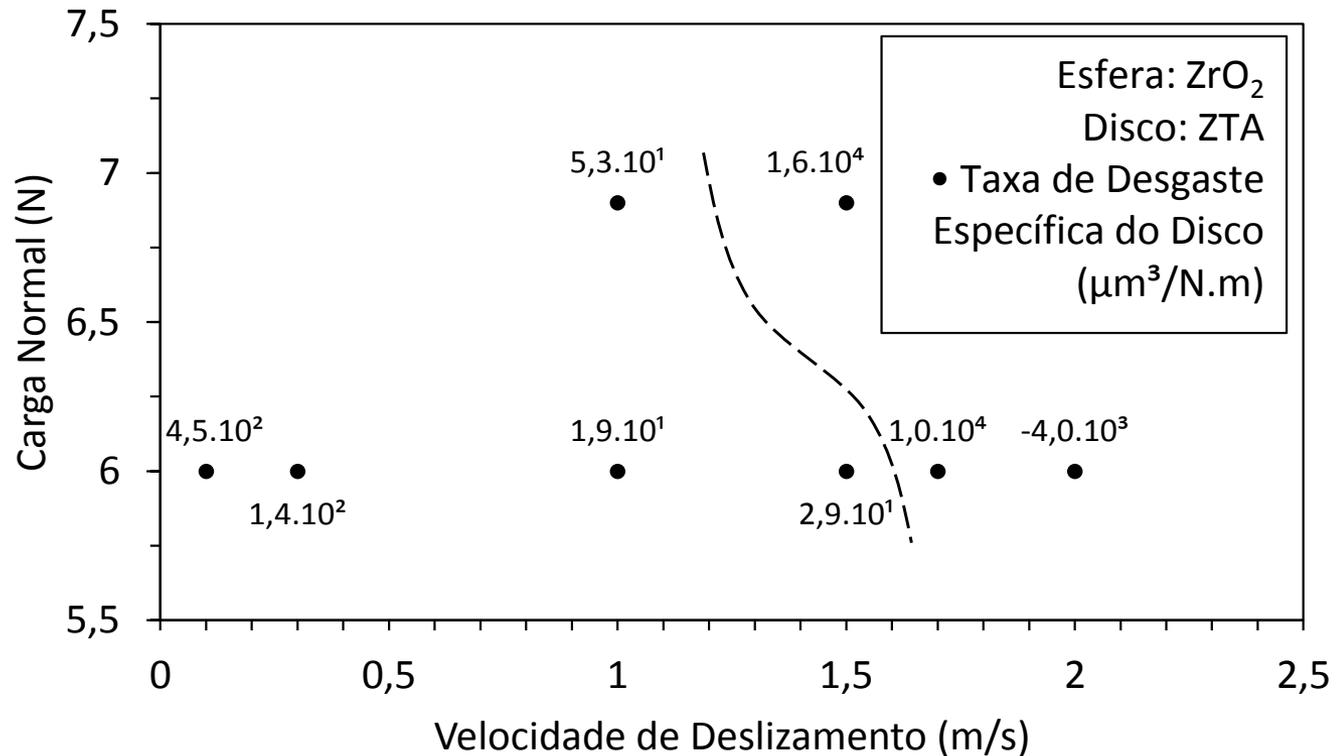
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 61** – Mapa de desgaste para o disco do par ZrO<sub>2</sub>-ZTA. Fonte: autor.

# ZrO<sub>2</sub>-ZTA

## TRILHA DE DESGASTE DO DISCO (M)

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

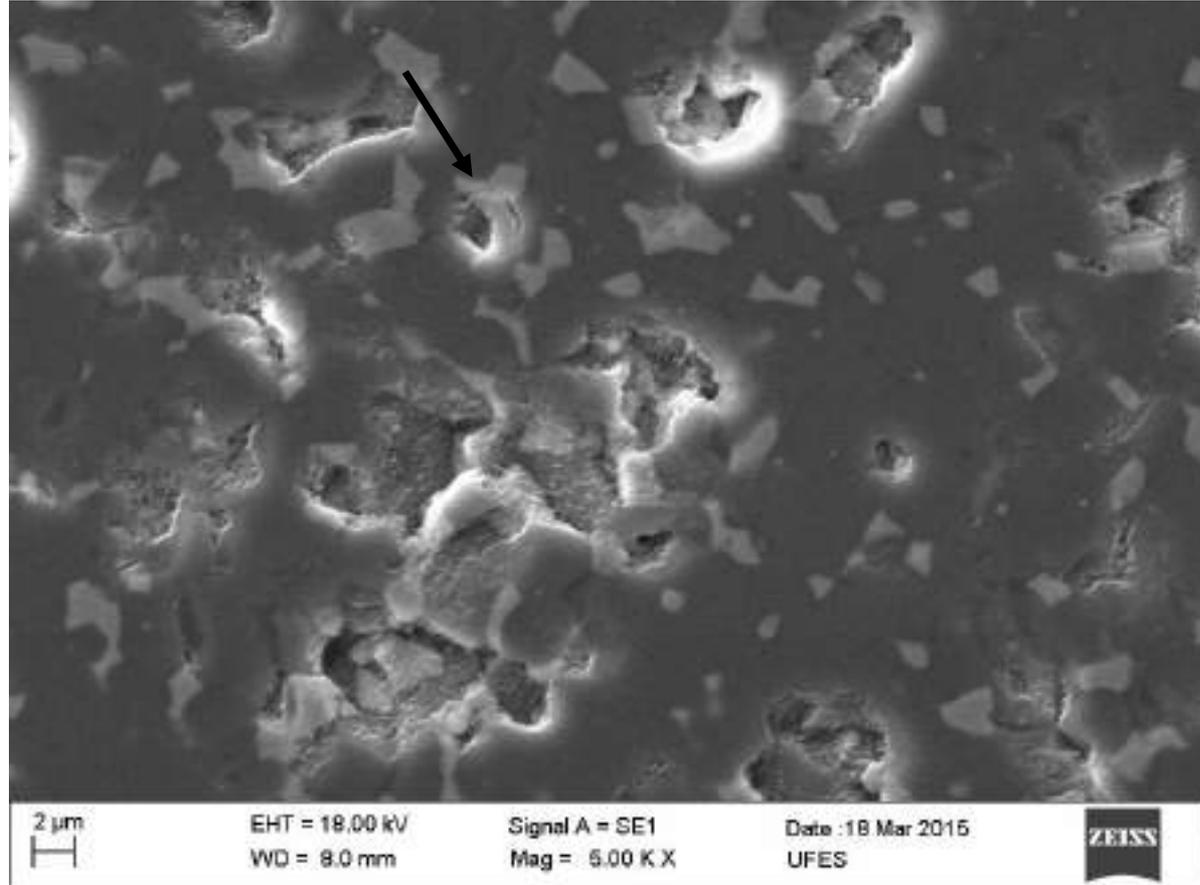
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 62** – MEV das superfície desgastada do disco em regime moderado.  
Fonte: autor.

# ZrO<sub>2</sub>-ZTA

## CALOTA DE DESGASTE DA ESFERA (S)

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

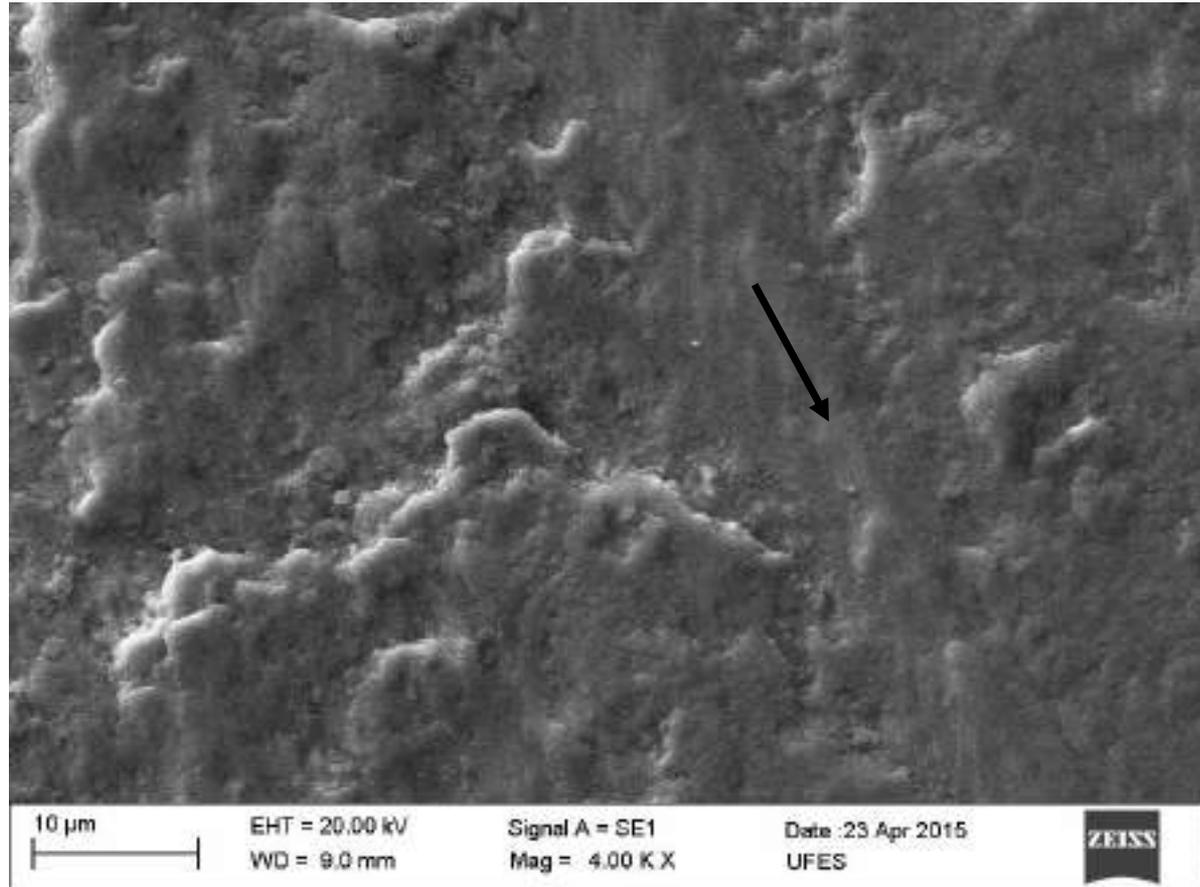
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 63** – MEV das superfícies desgastadas em regime severo.

Fonte: autor.

# ZrO<sub>2</sub>-ZTA

## TRILHA DE DESGASTE DO DISCO (S)

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

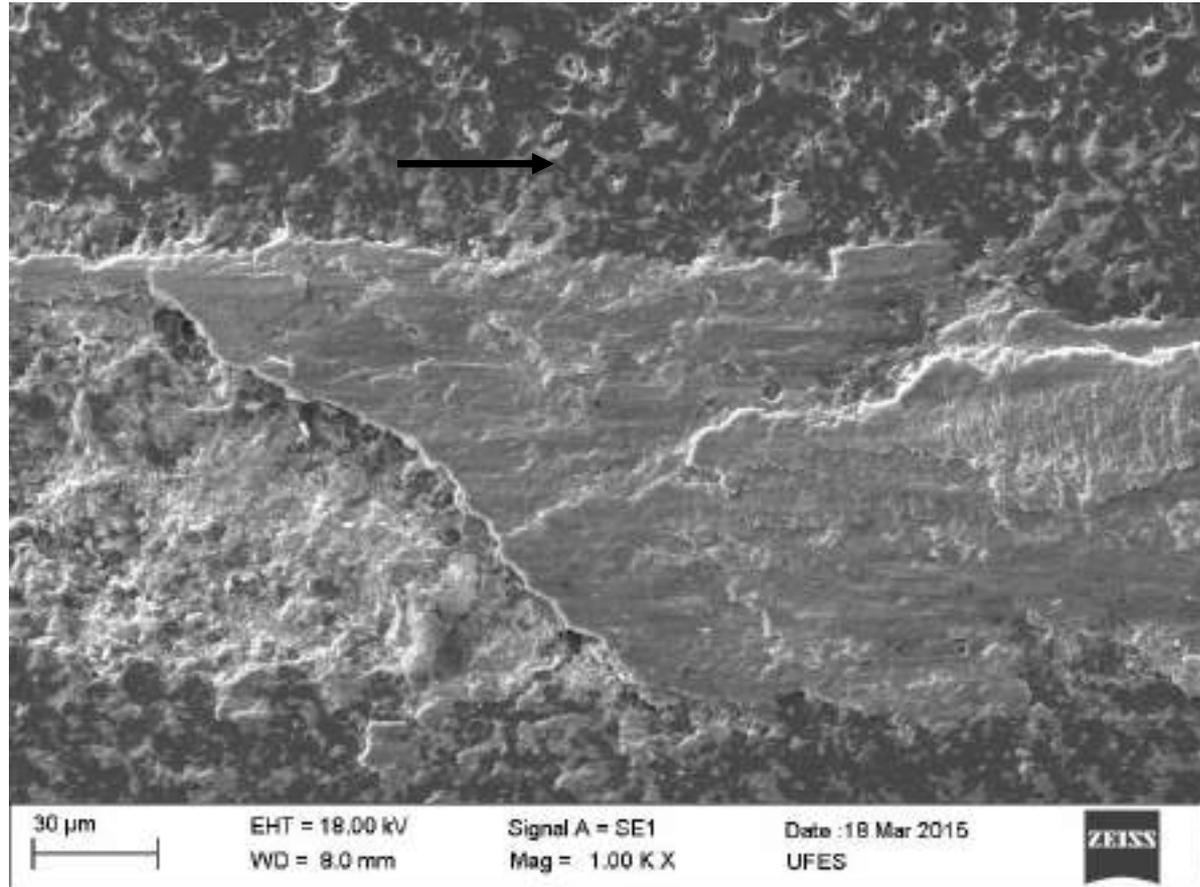
**Resultados e  
Discussões**

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 64** – MEV das superfícies desgastadas em regime severo.

Fonte: autor.



**PPGEM**

Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica



# COMPARAÇÃO ENTRE OS PARES TRIBOLÓGICOS

---

---



UFES

PPGEM



Introdução

Revisão Bibliográfica

Materiais e Métodos

Resultados e Discussões

Conclusão

Sugestões para trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

$\mu_{final}$

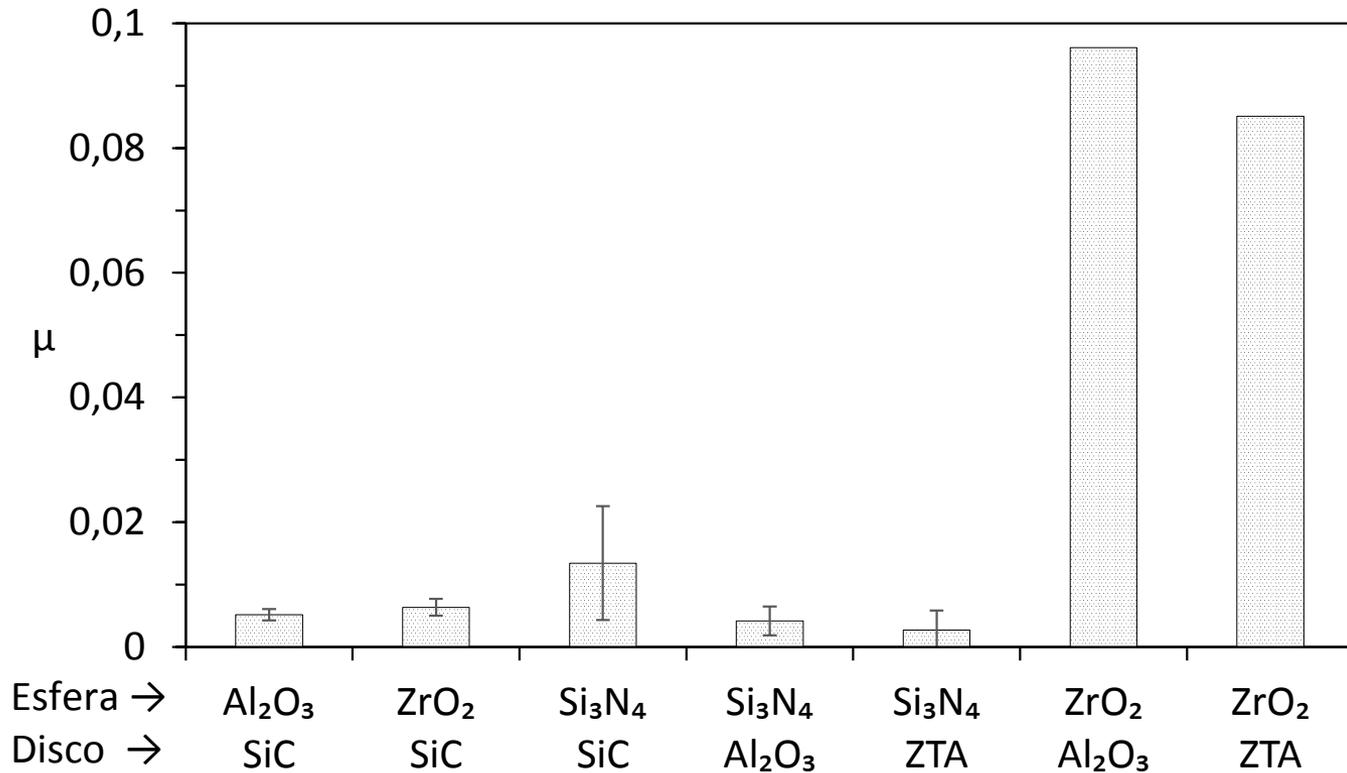


Fig. 65 –  $\mu_{final}$ . Fonte: autor.



UFES

PPGEM



Introdução

Revisão Bibliográfica

Materiais e Métodos

Resultados e Discussões

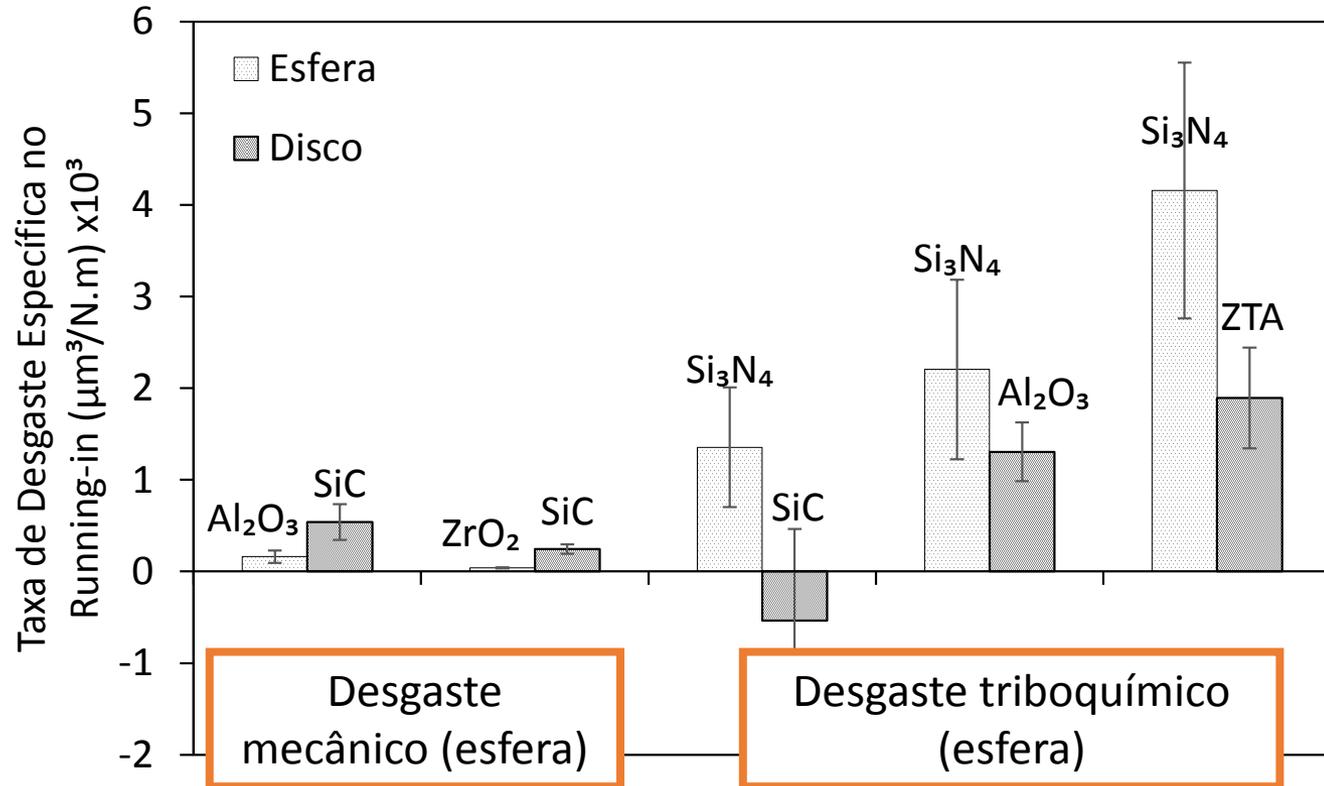
Conclusão

Sugestões para trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# DESGASTE DURANTE O *RUNNING-IN*



**Fig. 66** – Distância deslizada no running-in. Fonte: autor.



UFES

PPGEM



Introdução

Revisão Bibliográfica

Materiais e Métodos

Resultados e Discussões

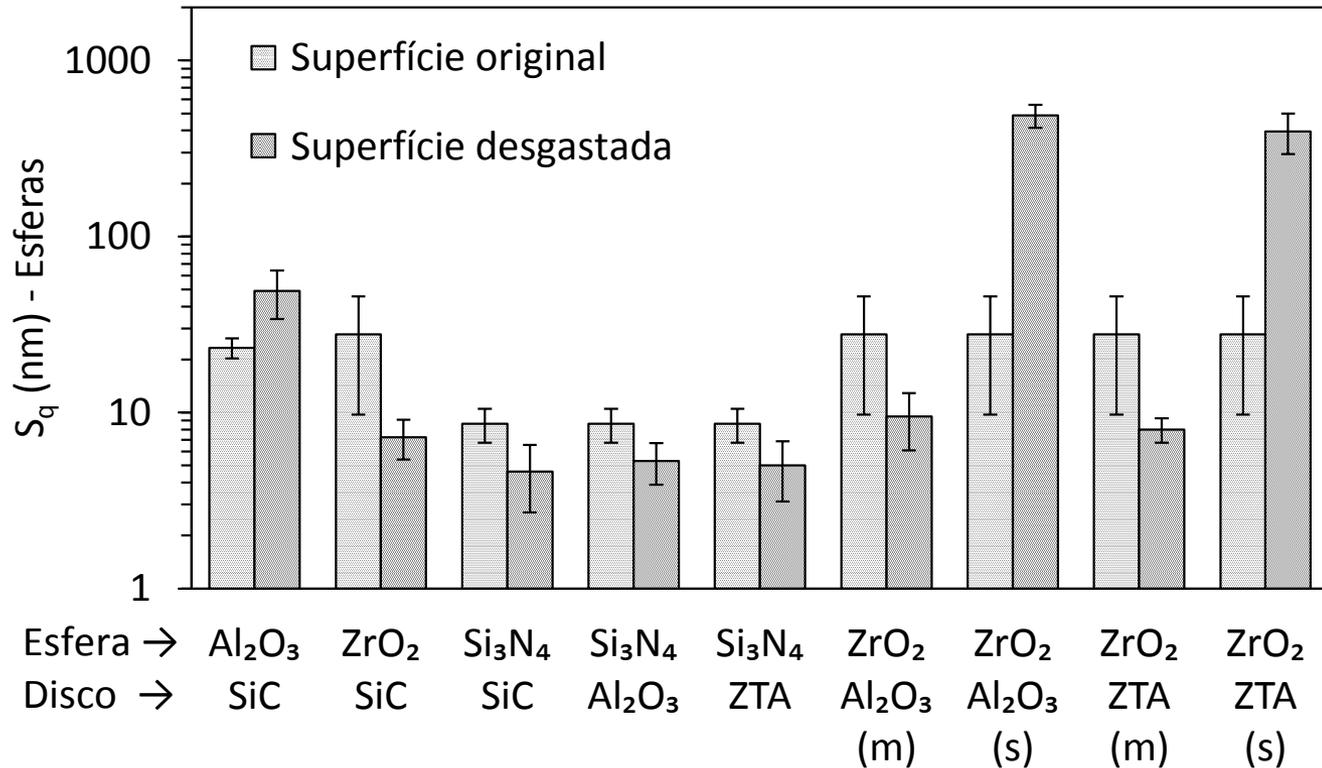
Conclusão

Sugestões para trabalhos futuros

Referências

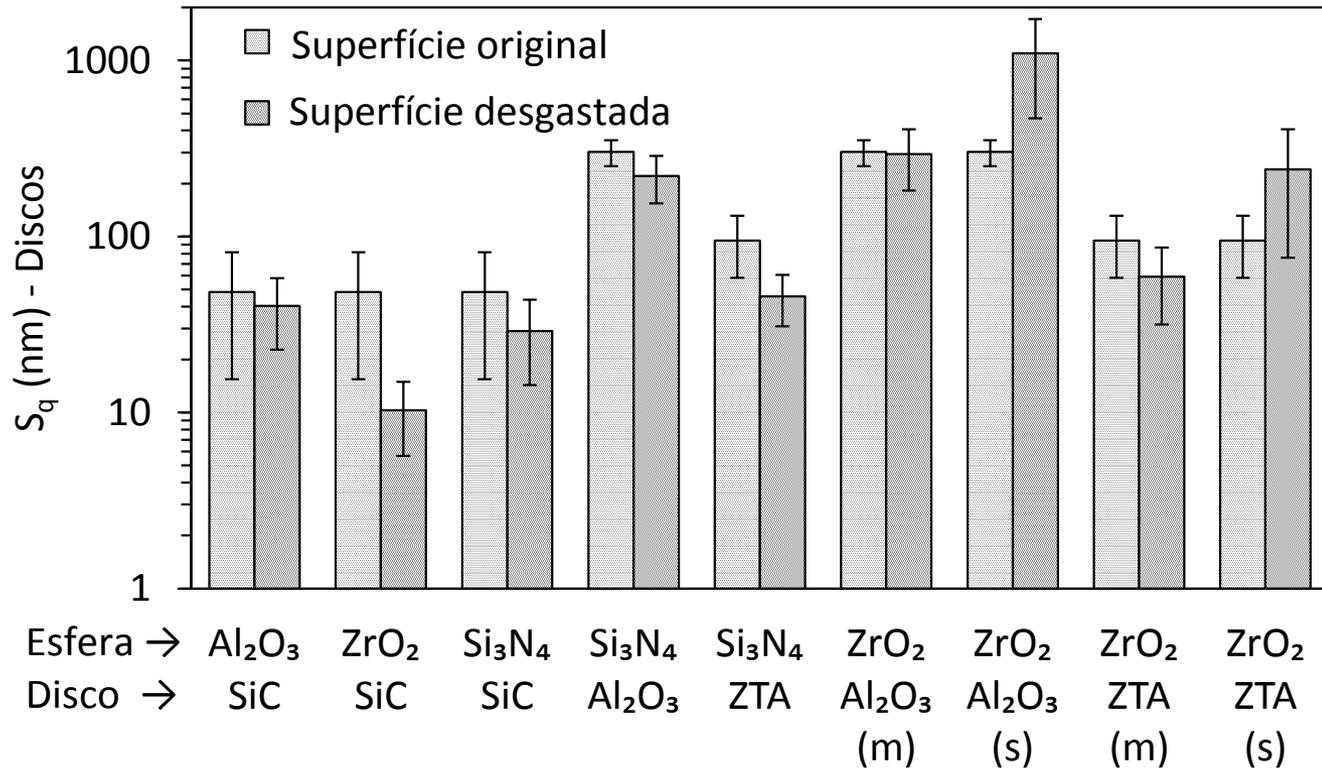
Agradecimentos

# RUGOSIDADE SUPERFICIAL - ESFERAS



**Fig. 67** – Rugosidade superficial das esferas. Fonte: autor.

# RUGOSIDADE SUPERFICIAL - DISCOS



**Fig. 68** – Rugosidade superficial dos discos. Fonte: autor.



UFES

PPGEM



Introdução

Revisão Bibliográfica

Materiais e Métodos

Resultados e Discussões

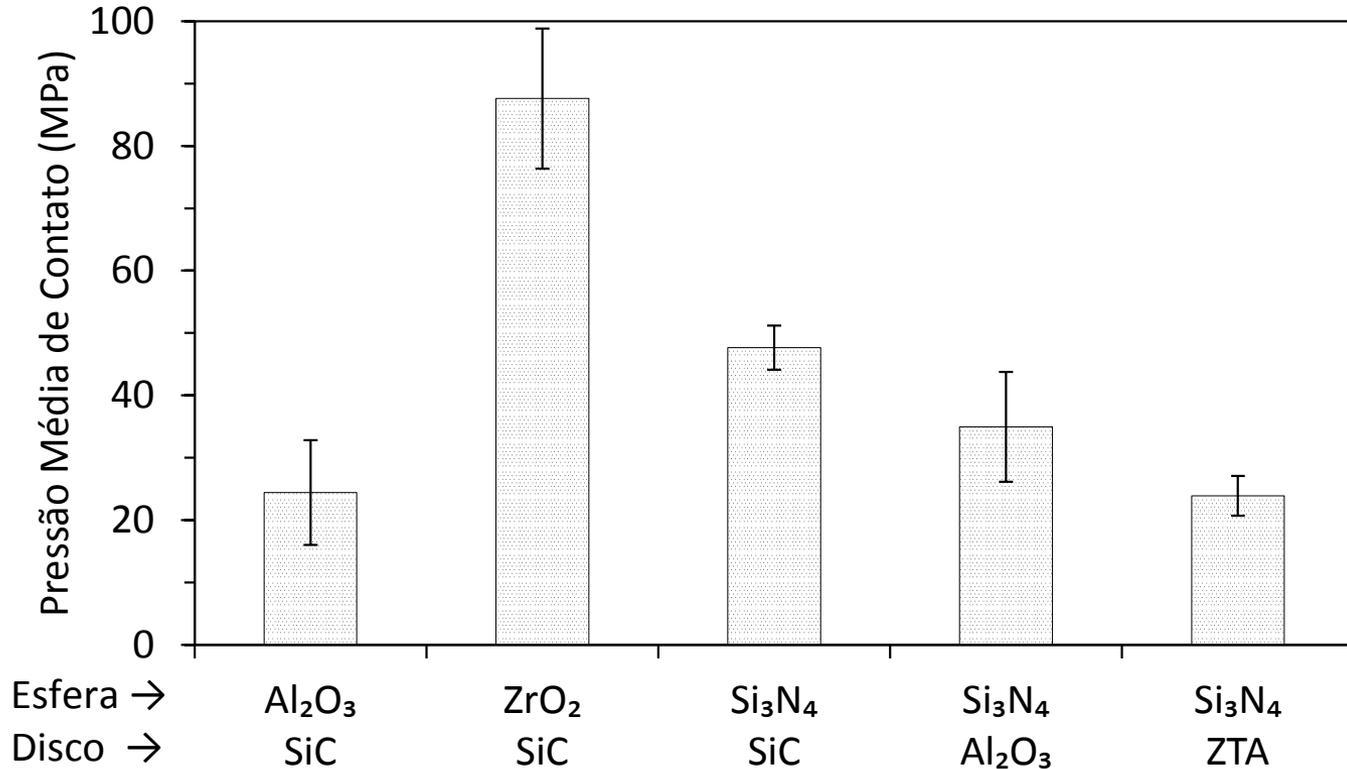
Conclusão

Sugestões para trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# PRESSÃO MÉDIA DE CONTATO



**Fig. 69** – Pressão média de contato. Fonte: autor.

# LUBRIFICAÇÃO

## DETERMINAÇÃO DA RAZÃO $\lambda$

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

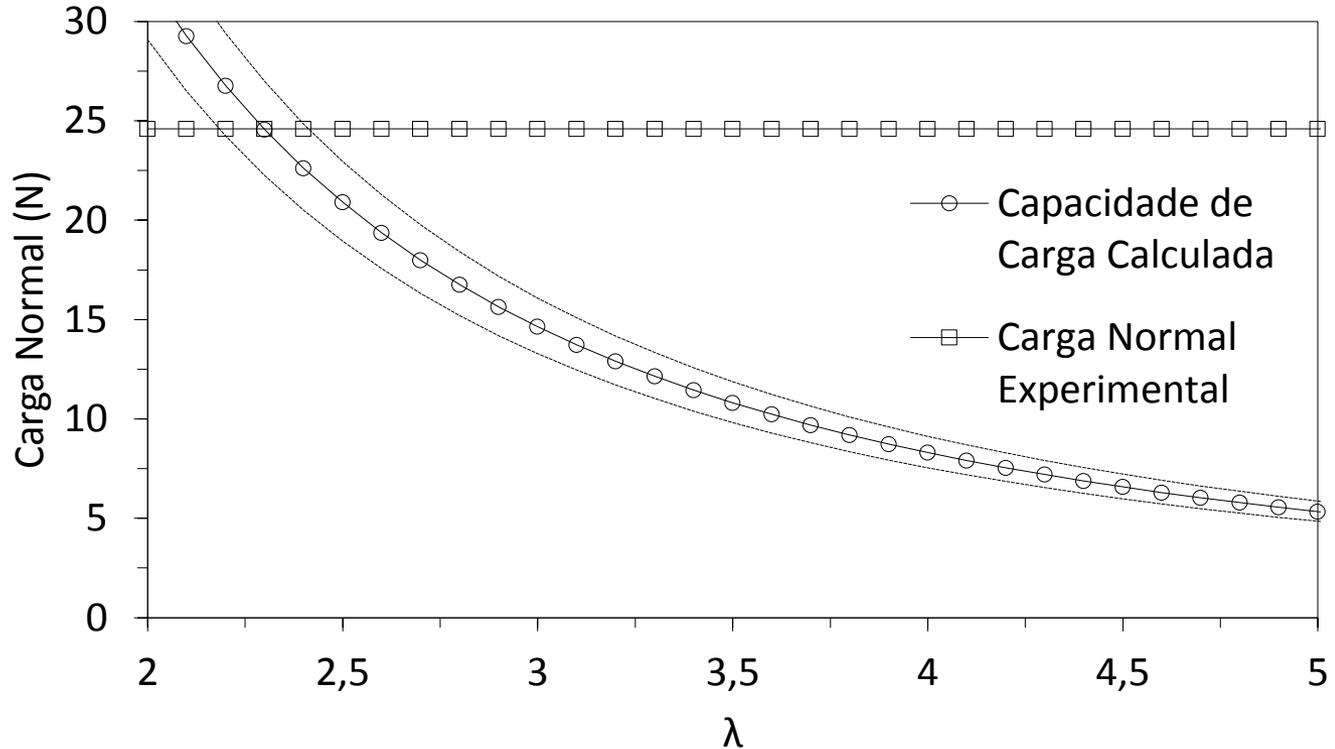
Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos



**Fig. 70** – Capacidade de carga em função da razão  $\lambda$ :  $ZrO_2$ -SiC. Fonte: autor.



UFES

PPGEM



Introdução

Revisão Bibliográfica

Materiais e Métodos

Resultados e Discussões

Conclusão

Sugestões para trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# LUBRIFICAÇÃO: RAZÃO $\lambda$

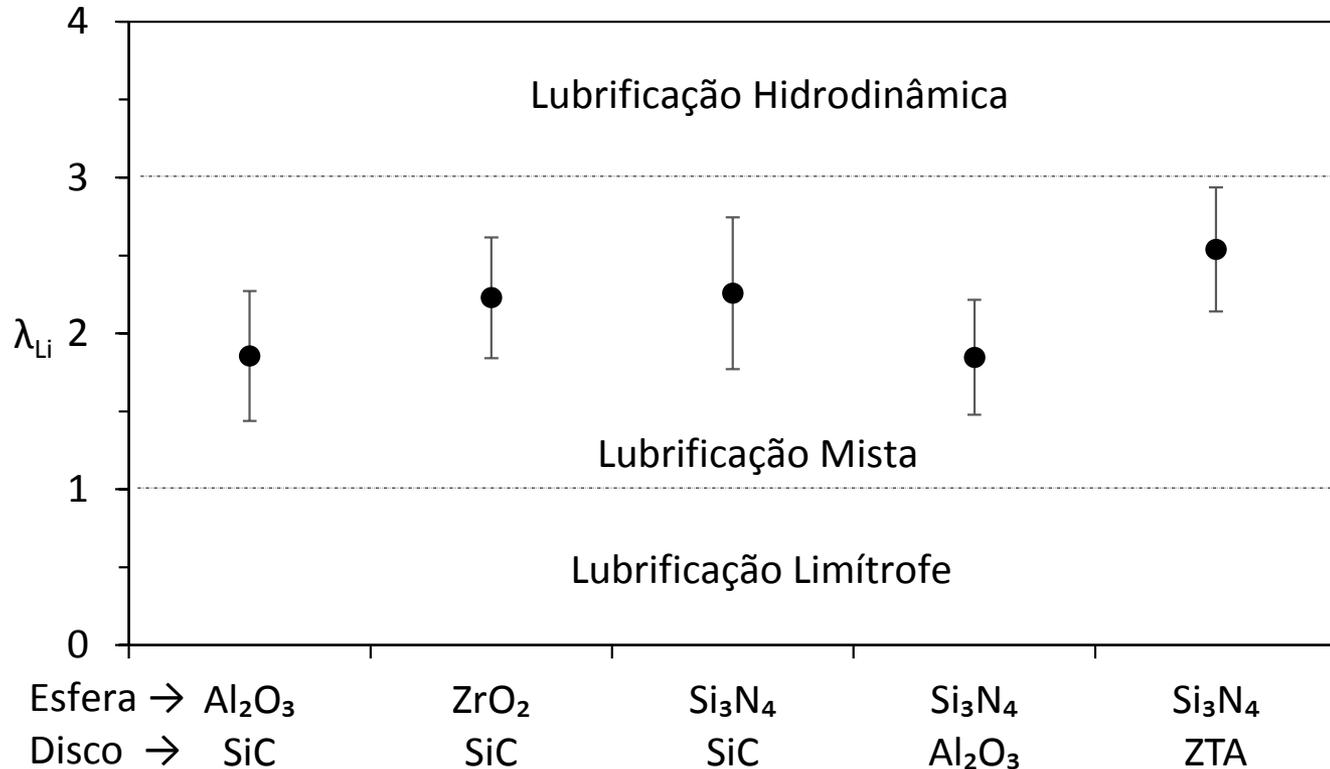


Fig. 71 –Razão  $\lambda$ . Fonte: autor.



UFES

PPGEM



Introdução

Revisão Bibliográfica

Materiais e Métodos

Resultados e Discussões

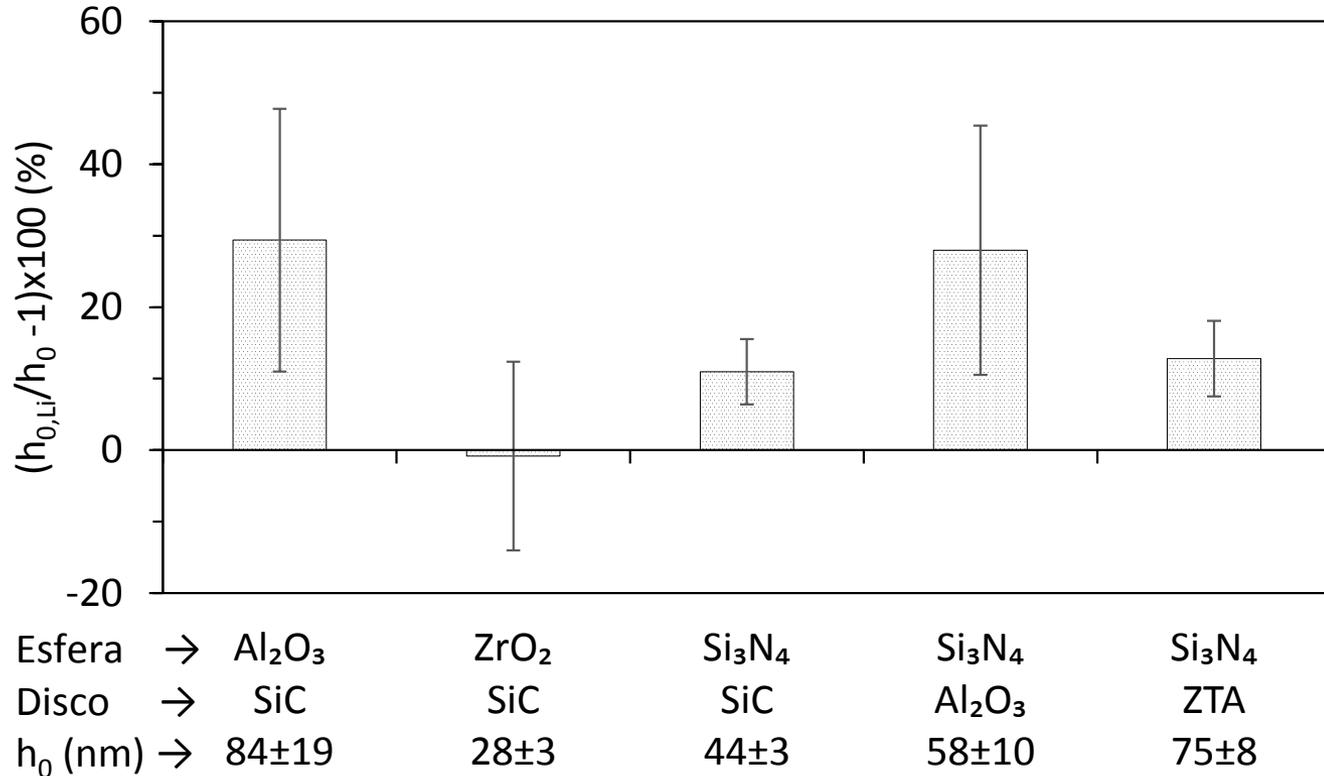
Conclusão

Sugestões para trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# ESPESSURA DO FILME LUBRIFICANTE

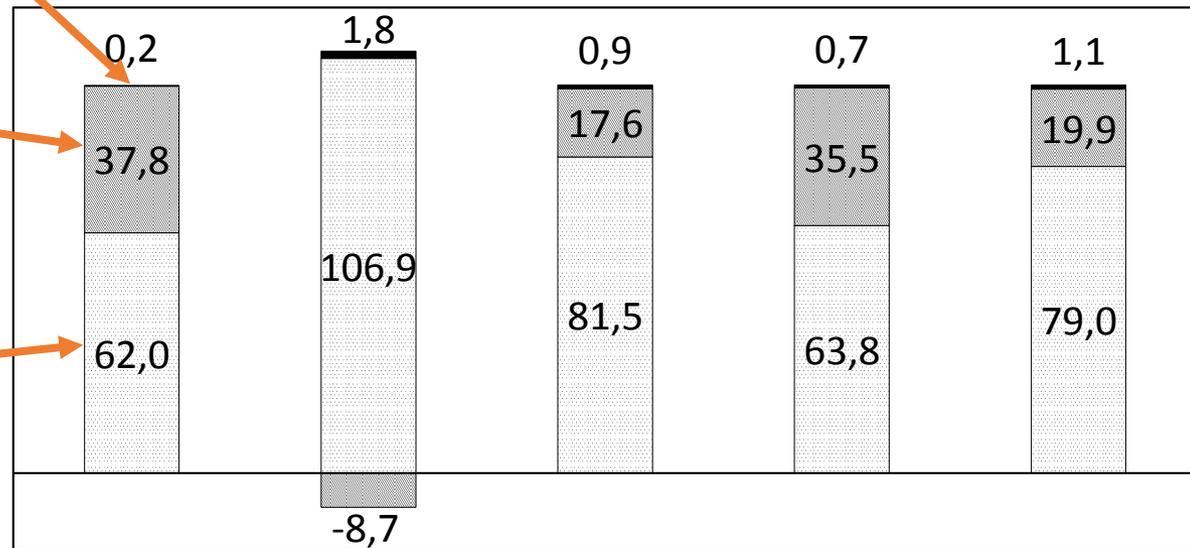


**Fig. 72** – Espessura do filme lubrificante. Fonte: autor.

# CONTRIBUIÇÕES PARA A CAPACIDADE DE CARGA

Dupla Camada Elétrica

□ P<sub>0</sub> (%)   □ P<sub>1</sub> (%)   ■ P<sub>2</sub> (%)



Esfera → Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>      ZrO<sub>2</sub>      Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>      Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>      Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>  
 Disco → SiC      SiC      SiC      Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>      ZTA

**Fig. 73** – Contribuição relativa de cada fenômeno considerado no modelo de lubrificação. Fonte: autor.

PPGEM

Topografia superficial

Hidrodinâmica (clássica)

Introdução

Revisão Bibliográfica

Materiais e Métodos

Resultados e Discussões

Conclusão

Sugestões para trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# LIMITAÇÕES DO MODELO DE LI (2005)

---

---

- Não considera:
  - Contato entre as asperezas ou deformação elástica
  - Efeito da rugosidade superficial afeta nas interações de DCE
  - Sobreposição das DCEs
- Limitação experimental
  - Potencial zeta ( $\zeta$ )



**PPGEM**

Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica



# CONCLUSÃO

---

---



UFES

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

Resultados e  
Discussões

**Conclusão**

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# CONCLUSÃO

- $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-ZTA}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$  e  $\text{ZrO}_2\text{-SiC}$  apresentaram superlubricidade
- A superlubricidade está associada à presença de tribofilmes de sílica hidratada
- $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{ZrO}_2\text{-ZTA}$ 
  - $\mu_{\min} \approx 0,1$
  - Transições tribológicas  $\rightarrow f(W, v)$

# CONCLUSÃO

- Severidade de contato baixa
  - $\mu \approx 0,1$  ou  $\mu < 0,01$
  - Taxa de desgaste específica  $< 10^3 \mu\text{m}^3/\text{N.m}$
  - Redução da rugosidade superficial
  - Desgaste triboquímico ou mecânico (plasticidade)
- Severidade de contato alta
  - $\mu > 0,4$
  - Taxa de desgaste específica  $> 10^4 \mu\text{m}^3/\text{N.m}$
  - Aumento da rugosidade superficial
  - Desgaste mecânico (fratura frágil e plasticidade)

# CONCLUSÃO

---

---

- Lubrificação hidrodinâmica
  - Efeitos da topografia superficial
  - Efeitos da dupla camada elétrica
- Regime de lubrificação misto
  - A importância do tribofilme de sílica
- Pressão média de contato
  - $ZrO_2$ -SiC
  - Qualidades do tribofilme

# SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

---

---

- Estudar os mecanismos fundamentais da causa do baixo atrito promovido pelos tribofilmes de sílica hidratada e suas propriedades:
  - Físicas: forças de Van der Waals, ligações de hidrogênio, adsorção
  - Químicas: composição, cinética das reações
  - Topográficas: nanorugosidade
  - Mecânicas: nanodureza, elasticidade

# SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

---

---

- Verificar experimentalmente um modelo de lubrificação mista
  - Persson (2010)
  - Larsson (2009)
- Estudar o efeito da adição de sílica coloidal com modificações da carga superficial (potencial zeta) na lubrificação
  - Pham, Fullston e Sagoe-Crentsil (2007)

# REFERÊNCIAS

ADACHI, K.; KATO, K.; CHEN, N. Wear map of ceramics. **Wear**, v. 203-204, p. 291-301, 1997.

BALARINI JR., R. **Ultra baixo coeficiente de atrito no deslizamento de  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$  em água**: Estudo ab initio do running-in. Vitória: Dissertação de Mestrado, 2013.

FERREIRA, ; YOSHIMURA, H. N.; SINATORA, A. Ultra-low friction coefficient in alumina–silicon nitride pair lubricated with water. **Wear**, v. 296, p. 656–659, 2012.

KATO, K.; ADACHI, K. Wear Mechanisms. In: BUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook**: Principles of Tribology. 1ª. ed. Boca Ration: CRC Press, v. 1, 2000. Cap. 7, p. 273-300.

LI, W.-L. Effects of electrodouble layer (EDL) and surface roughness on lubrication theory. **Tribology Letters**, v. 20, p. 53-61, 2005.

TOMIZAWA, H.; FISCHER, T. E. Friction and Wear of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and  $\text{SiC}$  in Water: Hydrodynamic Lubrication at Low Sliding Speed Obtained by Tribochemical Wear. **ASLE Trans.**, v. 30, n. 1, p. 41-46, 1987.

XU, J.; KATO, K. Formation of tribochemical layer of ceramics sliding in water and its role for low friction. **Wear**, v. 245, p. 61-75, 2000.



UFES

PPGEM



Introdução

Revisão  
Bibliográfica

Materiais e  
Métodos

Resultados e  
Discussões

Conclusão

Sugestões para  
trabalhos futuros

Referências

Agradecimentos

# AGRADECIMENTOS



**anp**  
Agência  
Nacional do  
Petróleo



[www.engenhariadesuperficies.com.br](http://www.engenhariadesuperficies.com.br)





Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica



*Defesa de Dissertação de Mestrado*

---

# TRIBOLOGIA DE CERÂMICOS DISSIMILARES NO DESLIZAMENTO EM ÁGUA

Estudos de Caso:  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-ZTA}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$ ,  
 $\text{ZrO}_2\text{-SiC}$ ,  $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{ZrO}_2\text{-ZTA}$

---

**Mestrando:**

*Nathan Fantecelle Strey*

**Comissão Examinadora:**

*Prof. Dr. Cherlio Scandian – UFES - Orientador*

*Prof. Dr. Antônio César Bozzi – UFES*

*Prof. Dr. Amilton Sinatora – USP*

*Prof. Dr. Deniol Katsuki Tanaka - USP*