



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



## AUTOREPARAÇÃO MICROESTRUTURAL: UM FENÔMENO TRIBOLÓGICO

Prof. Dr. Paulo Cordeiro Machado  
Faculdade de Engenharia Ferroviária e Logística  
Instituto de Tecnologia - UFPA

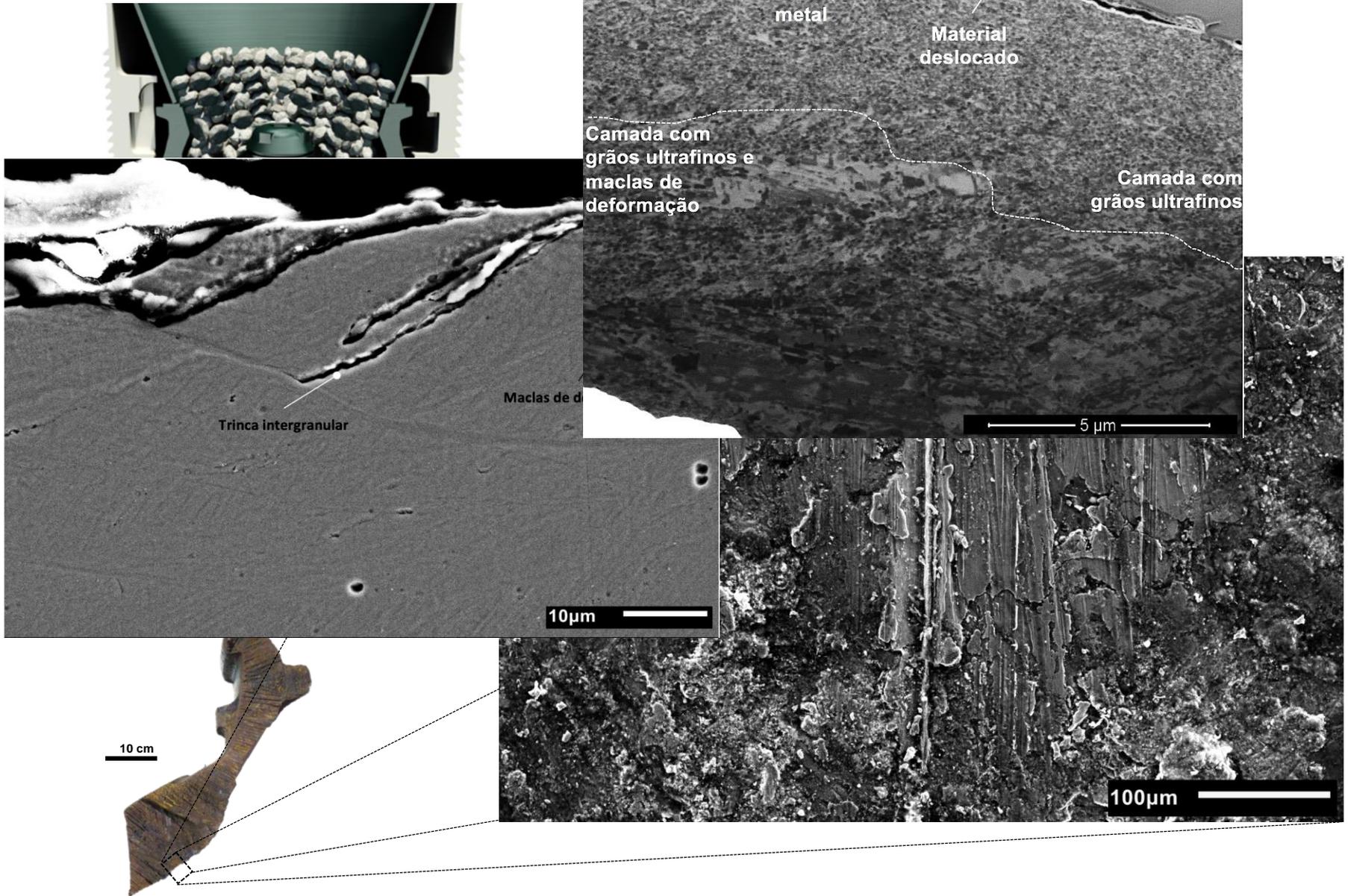
# Sumário



- Introdução
- Recristalização dinâmica por deformação plástica
- Teses LFS
  - Técnicas de caracterização de subsuperfícies
  - Resultados – Aço Hadfield; aço perlítico e *fofo* cinzento
- Modelo de autoreparação microestrutural (*self-healing*)

# Introdução

## Superfície Desgastada

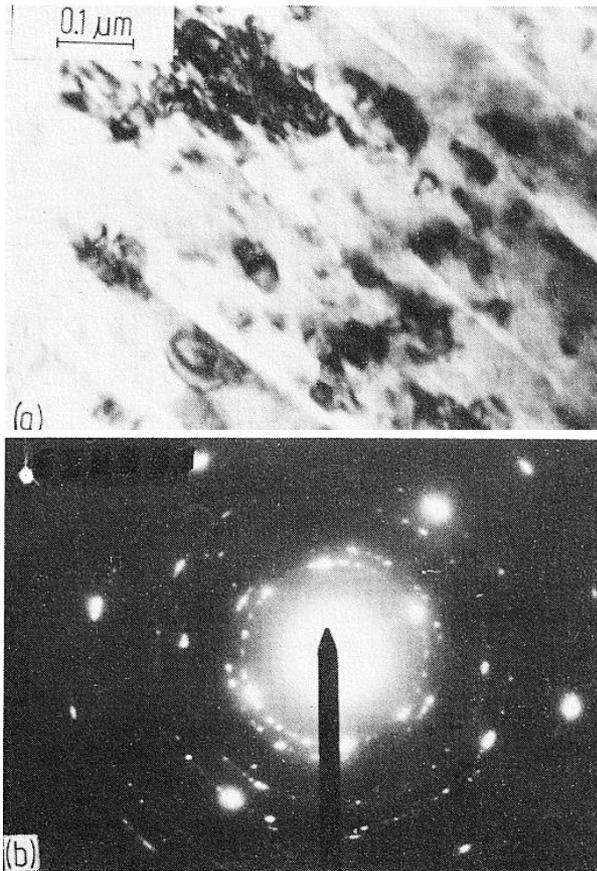


# Recristalização dinâmica por deformação plástica

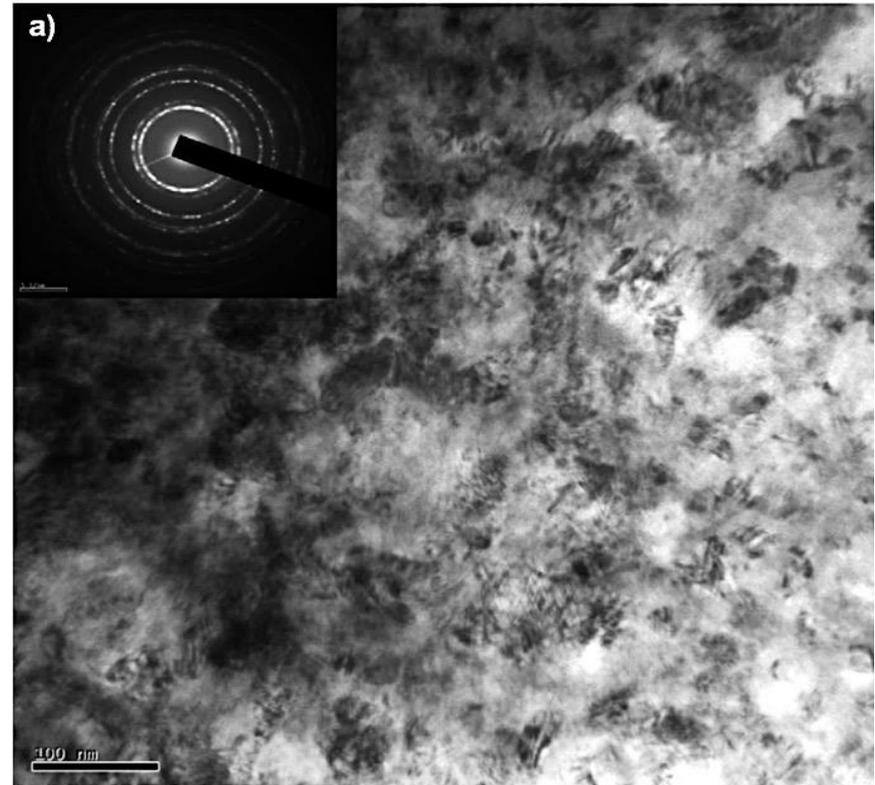


## Literatura - Microestrutura da subsuperfície

Recristalização de cavaco de alumínio puro



Aço Hadfield deformado por shot peening. Imagem de MET (campo claro) e difração da camada subsuperficial. 2 minutos de shot peening

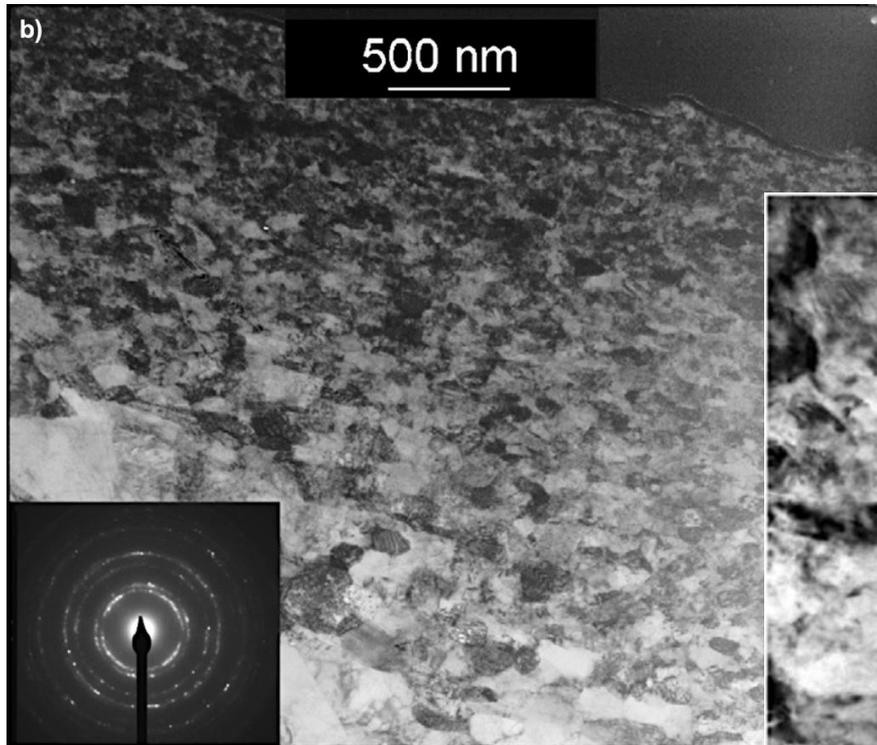


# Recristalização dinâmica por deformação plástica



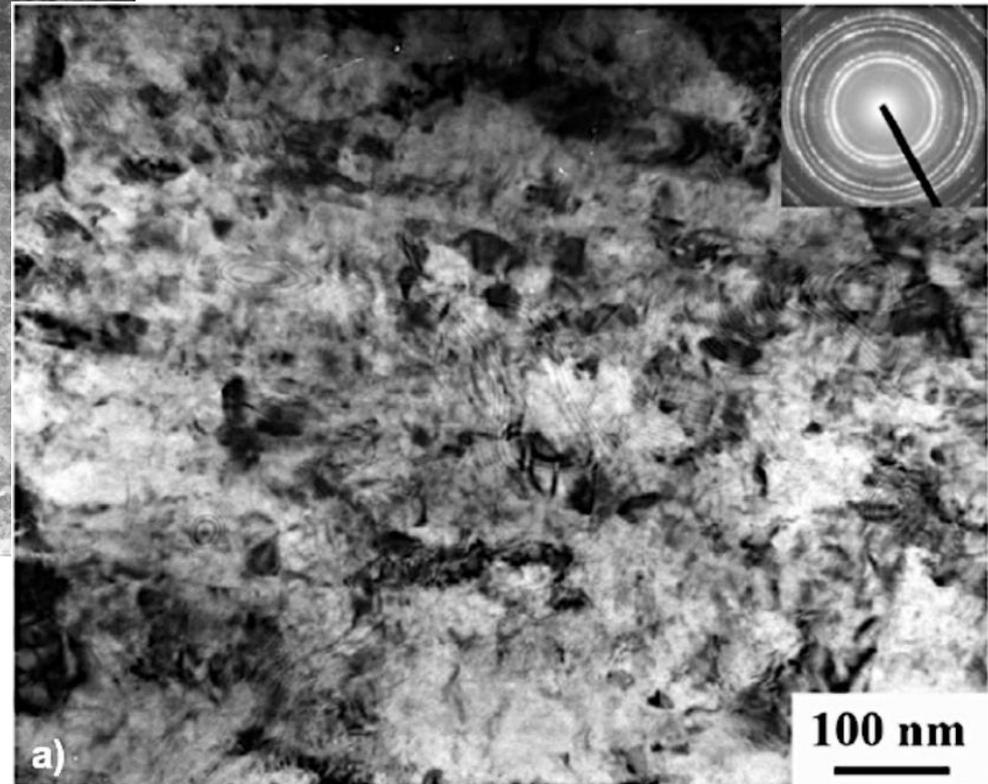
Literatura - Microestrutura da subsuperfície

**MET**



Seção transversal do disco de **cobre**. MET – Campo claro da camada subsuperficial e imagem de difração

Emge *et al.*, 2009



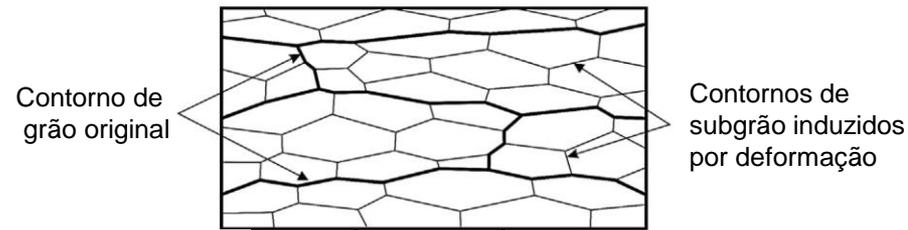
Aço **Hadfield** deformado por *high-speed pounding*. Imagem de MET (campo claro) e SAED da camada subsuperficial

Fonte: Feng *et al.*, 2013

# Recristalização dinâmica por deformação plástica

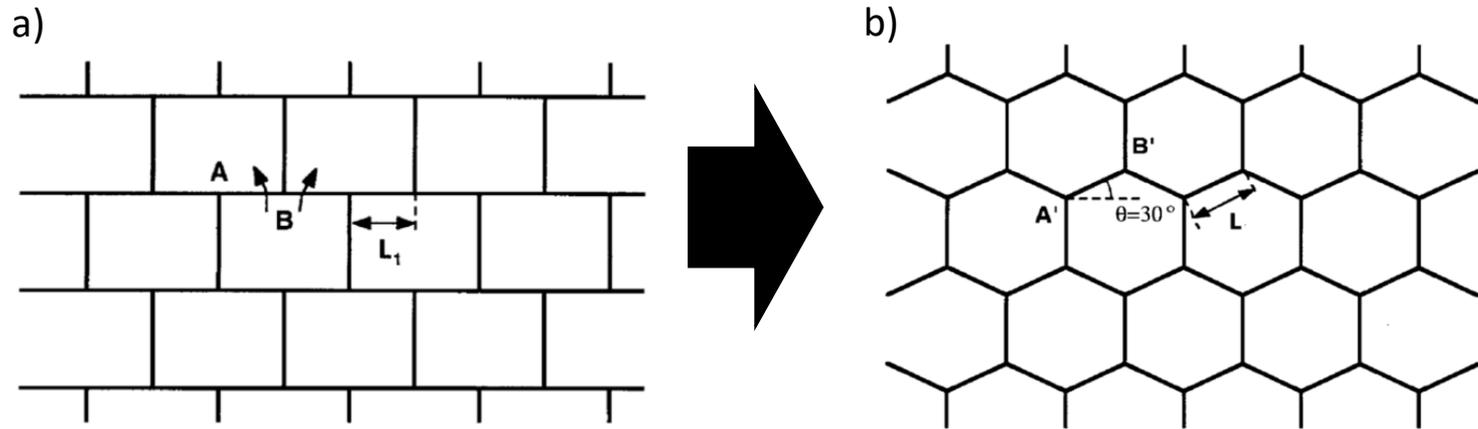


Modelos de recristalização dinâmica por deformação plástica a frio



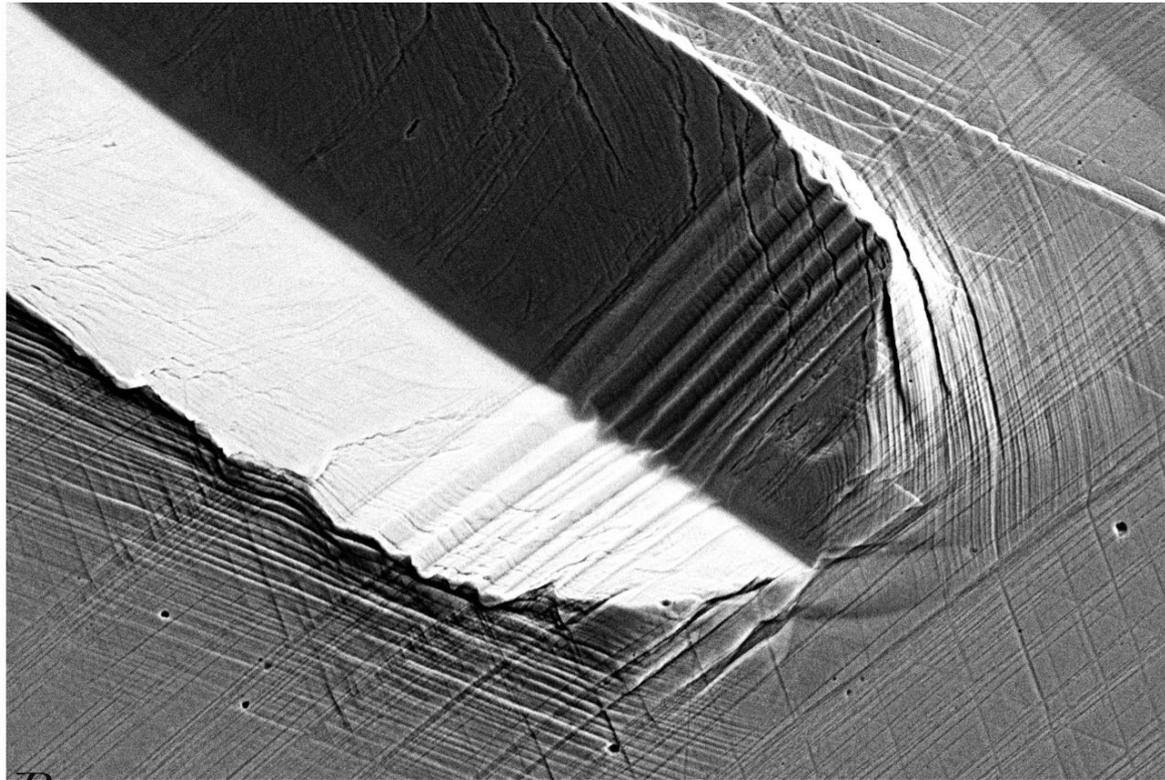
**Modelo 2**

## Modelo 3: Recristalização dinâmica por rotação





# Resultados de Teses LFS



*Barca paraense*

# Resultados de Teses LFS

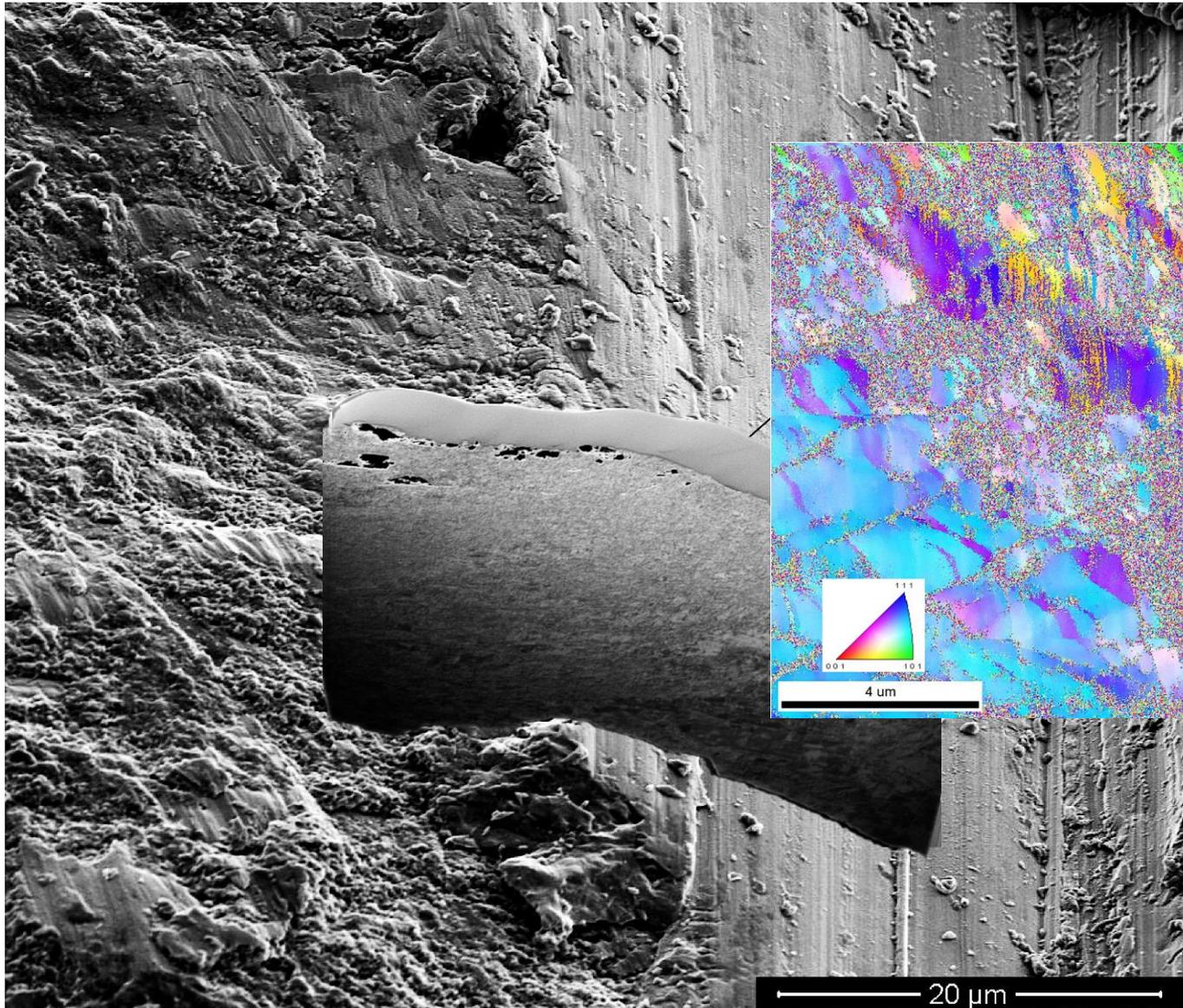


- Machado, P.C.
  - Desgaste abrasivo de Aço Hadfield
    - Revestimento de britador de minério (desgaste em britador e esclerometria linear)
- Pereira, J.I.
  - Desgaste de Aço perlítico
    - Revestimento de moinho (ensaio roda de borracha)
    - Trilho ferroviário (ensaio disco-disco)
- Franco, L.
  - Desgaste abrasivo de Ferro fundido cinzento
    - Cilindro de motor de combustão interna (ensaio de esclerometria linear)
- Obara, R.
  - Desgaste por deslizamento de Ferro fundido cinzento
    - Cilindro de motor de combustão interna (caracterização de desgaste de cilindro)

# Metodologia

## Microestrutura da subsuperfície – FIB/EBSD

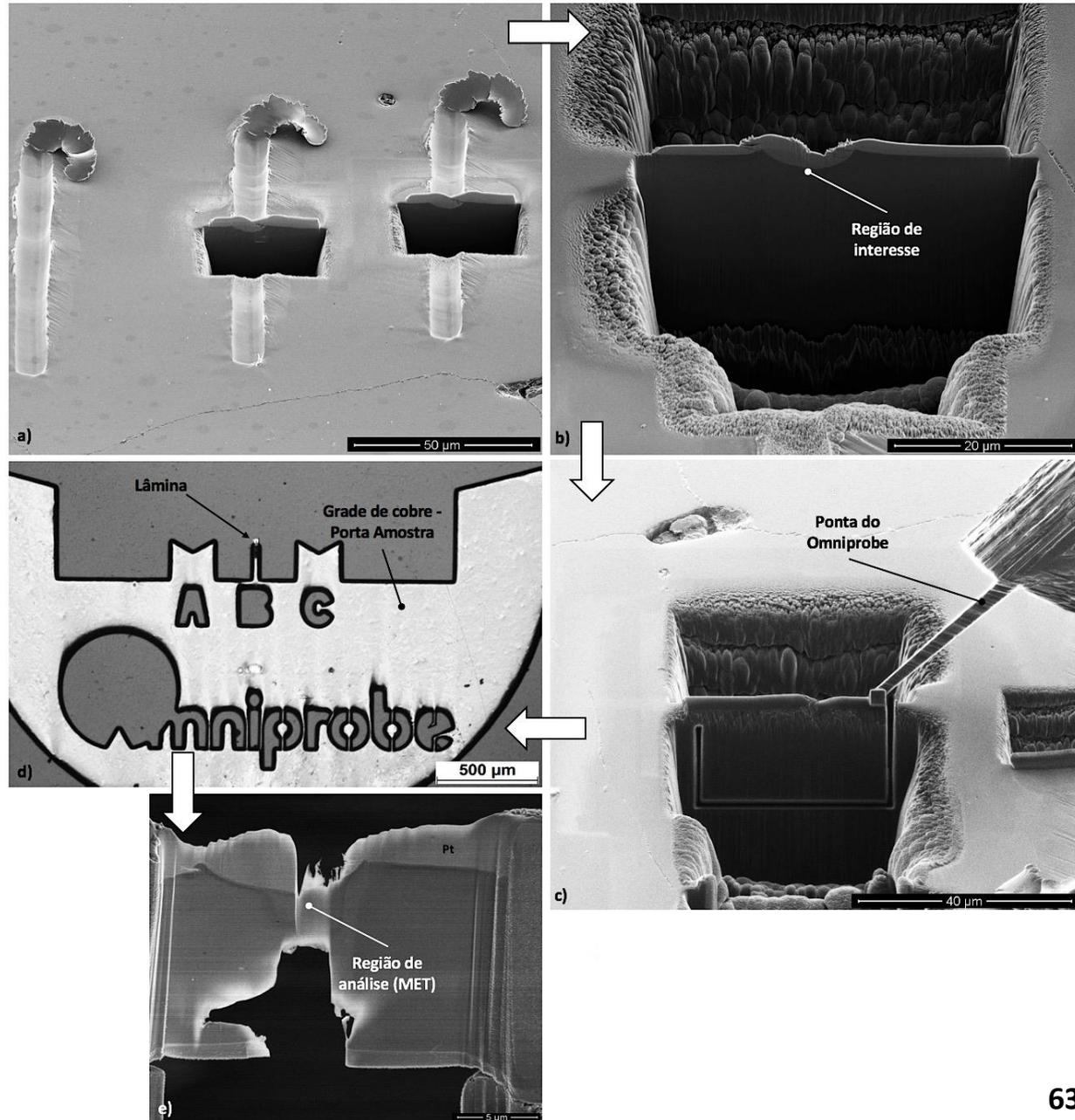
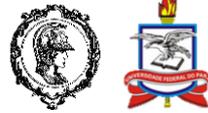
Imagem de FIB da superfície desgastada do aço 12Mn. 5000x



# Metodologia

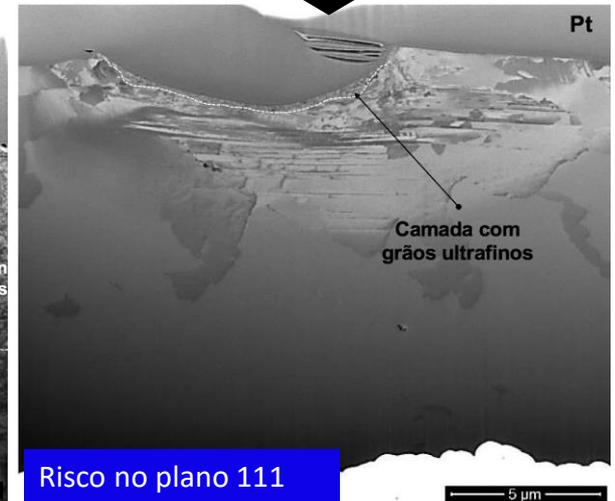
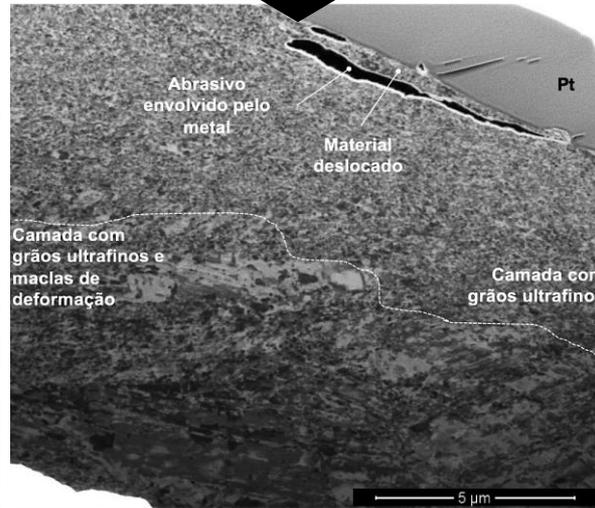
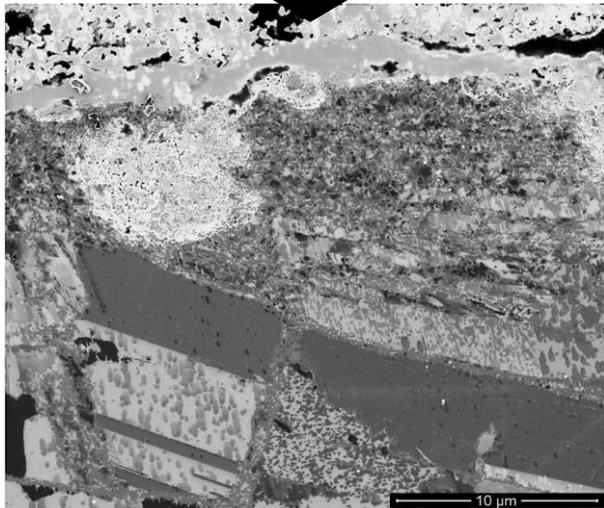
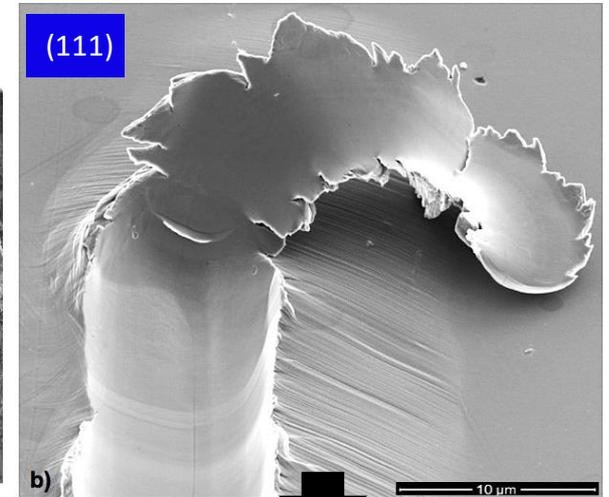
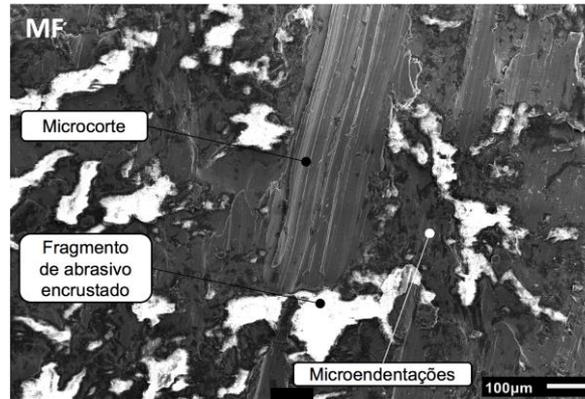
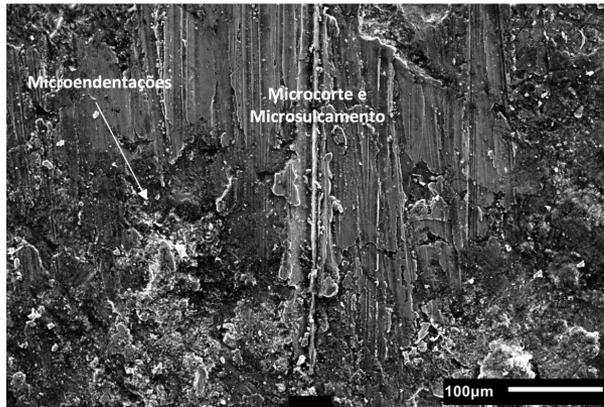
## Obtenção de amostra para MET via FIB

Etapas do procedimento de obtenção de lâmina para MET.



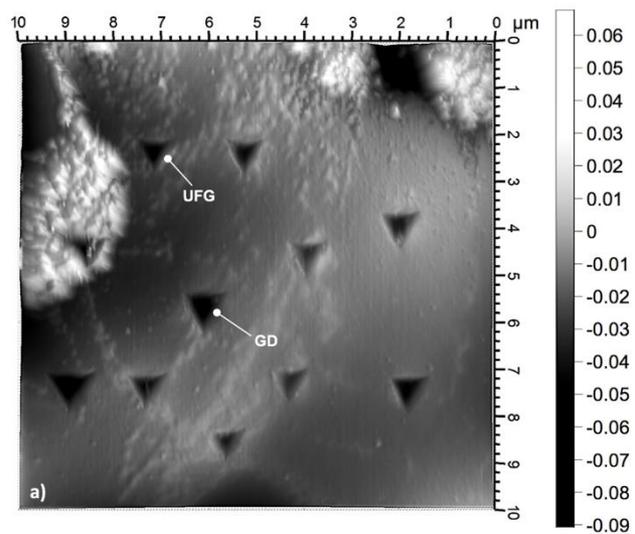
## • Desgaste abrasivo de Aço Hadfield

- Revestimento de britador de minério (desgaste em campo, ensaio de britador de mandíbula e esclerometria linear)

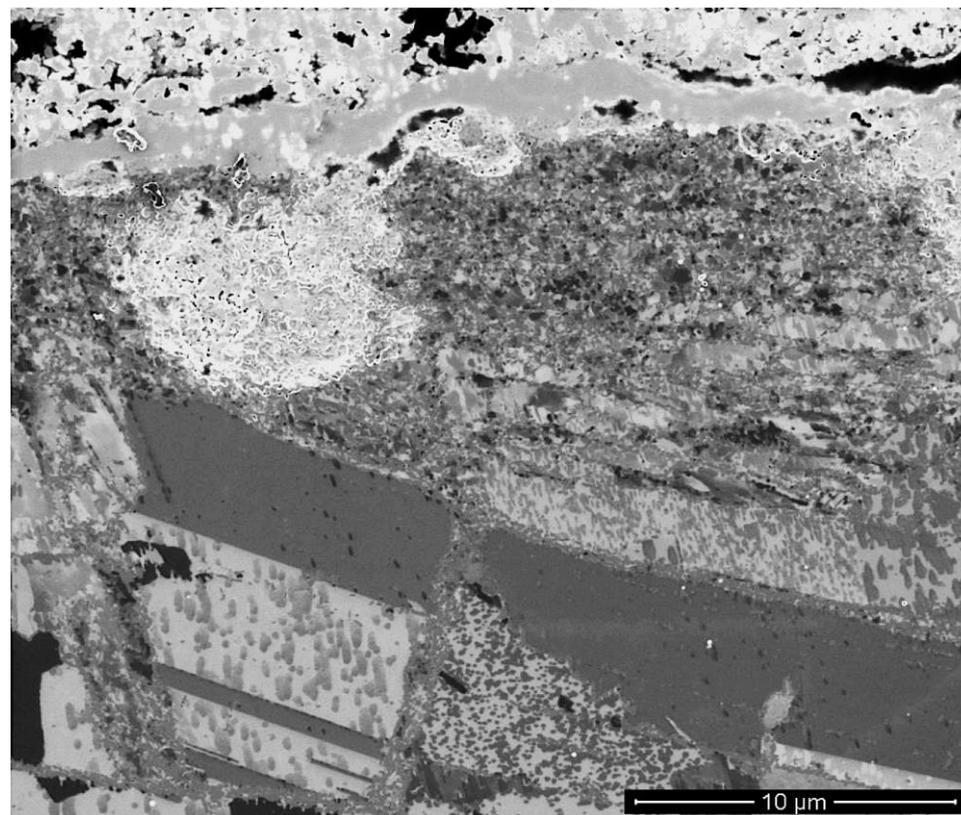




Nanoindentações nas regiões com UFG e GD

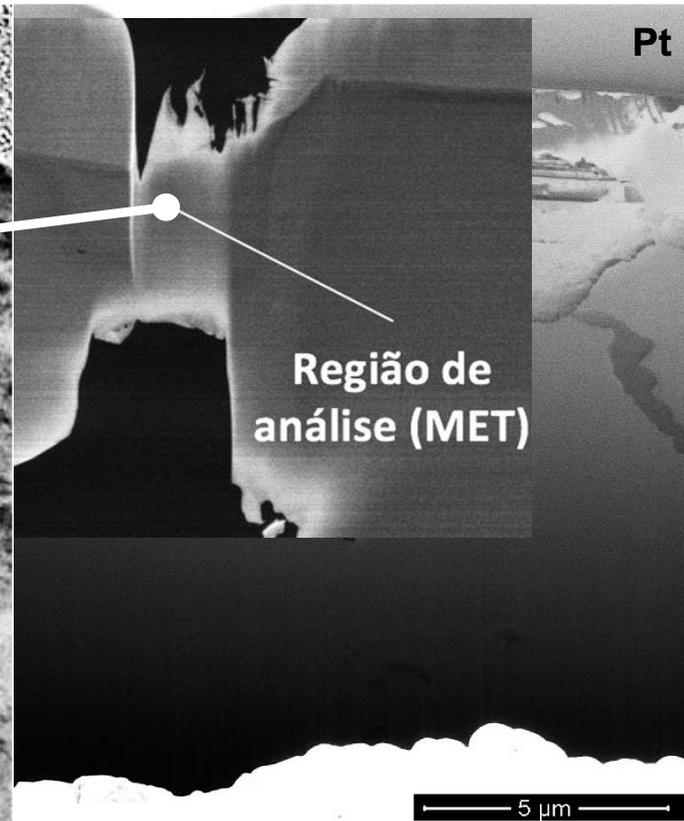
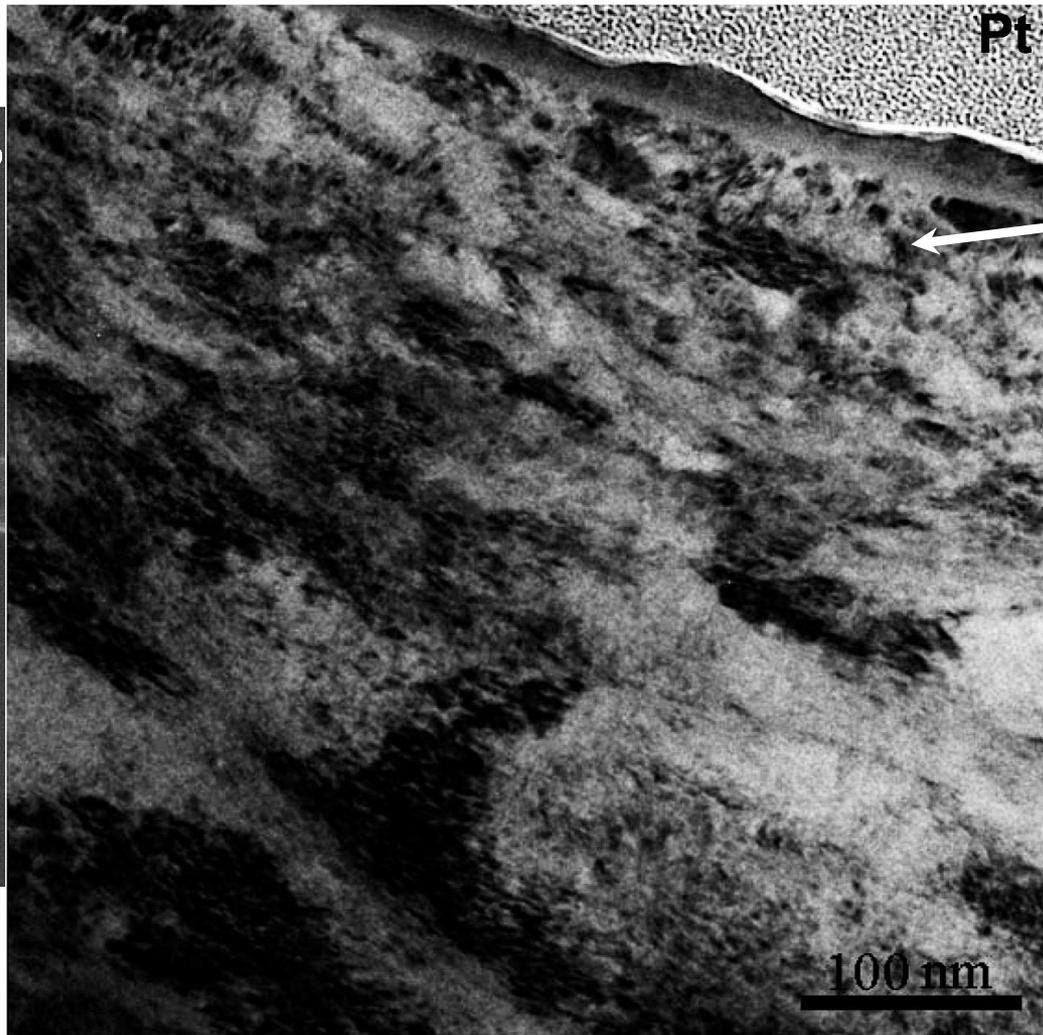
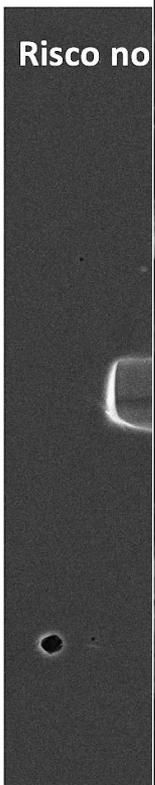


$$22 \% \left\{ \begin{array}{l} \text{UFG} = 7,4 \pm 0,4 \text{ GPa} \\ \text{GD} = 5,8 \pm 1,1 \text{ GPa} \end{array} \right.$$





Submicroestrutura do risco em aço austenítico com 12 %Mn, plano (111)



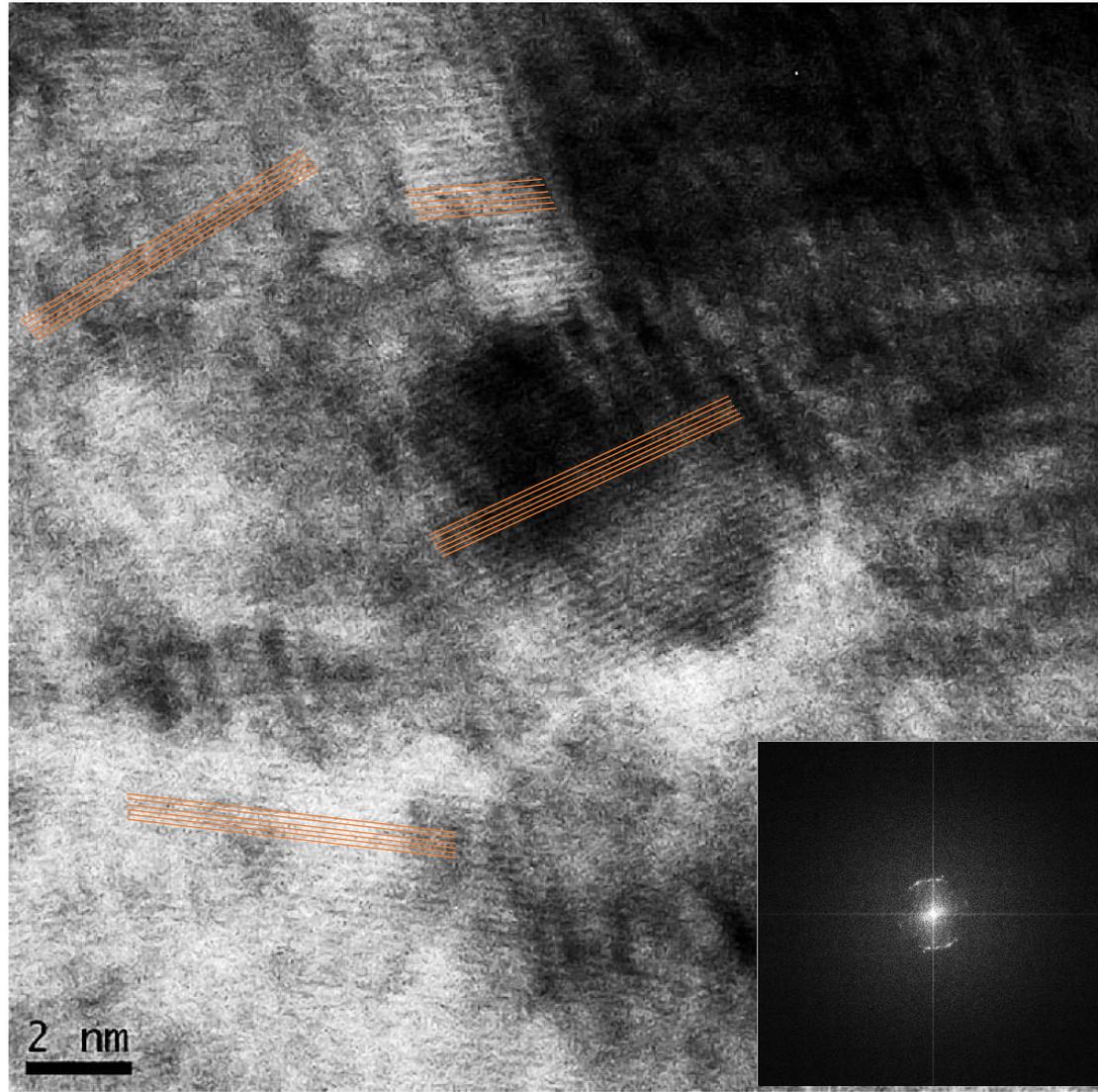
Machado, P.C.

Microestrutura da subsuperfície - TEM

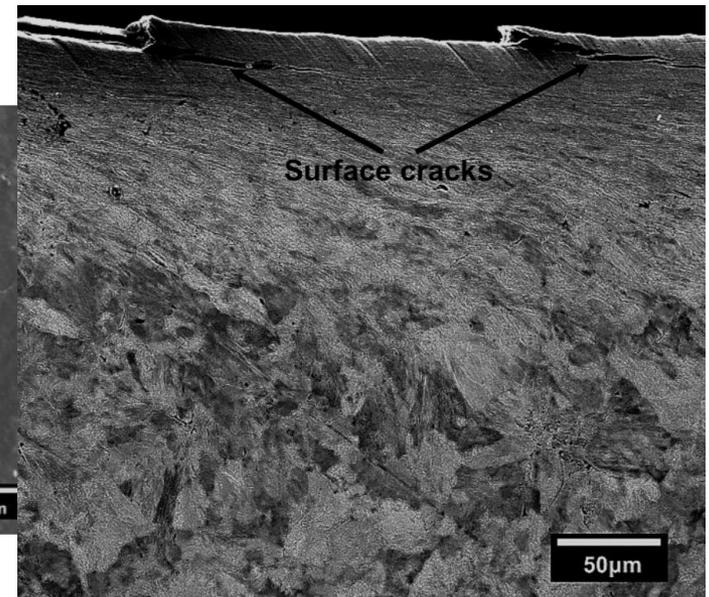
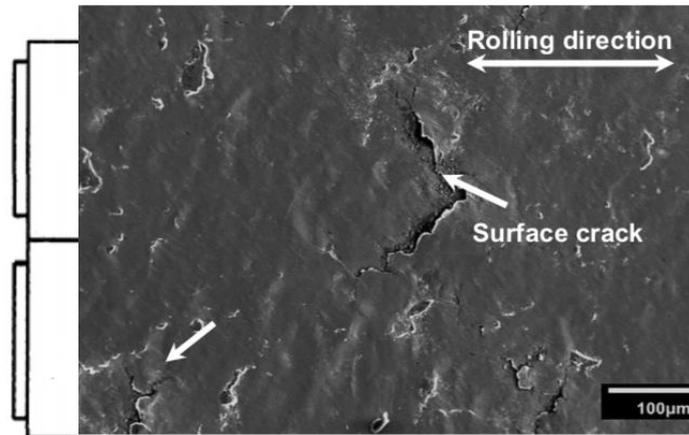
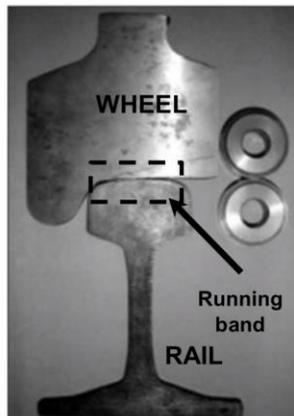
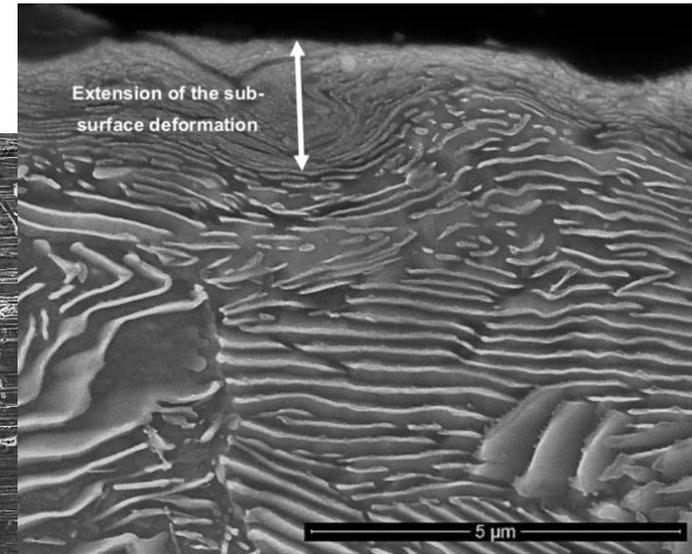
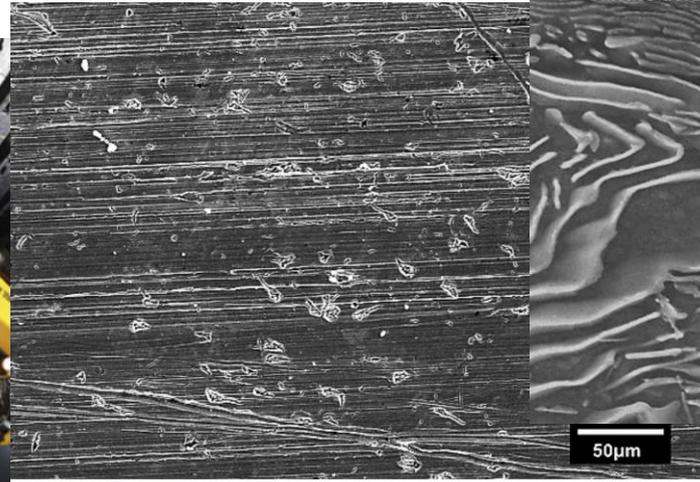
**Campo claro e difração**



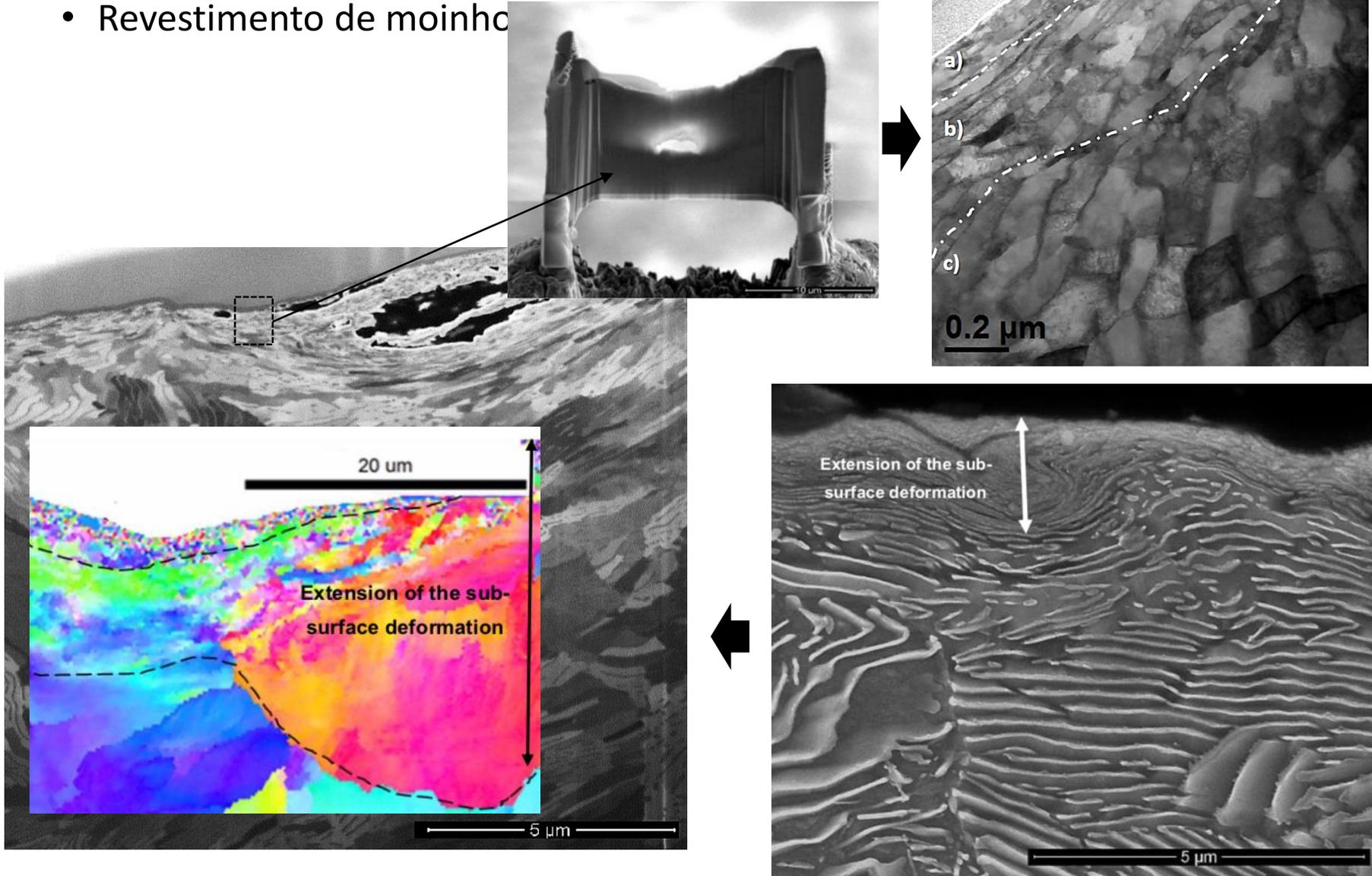
Camada com grãos ultrafinos



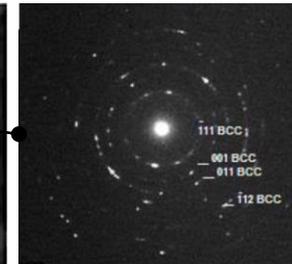
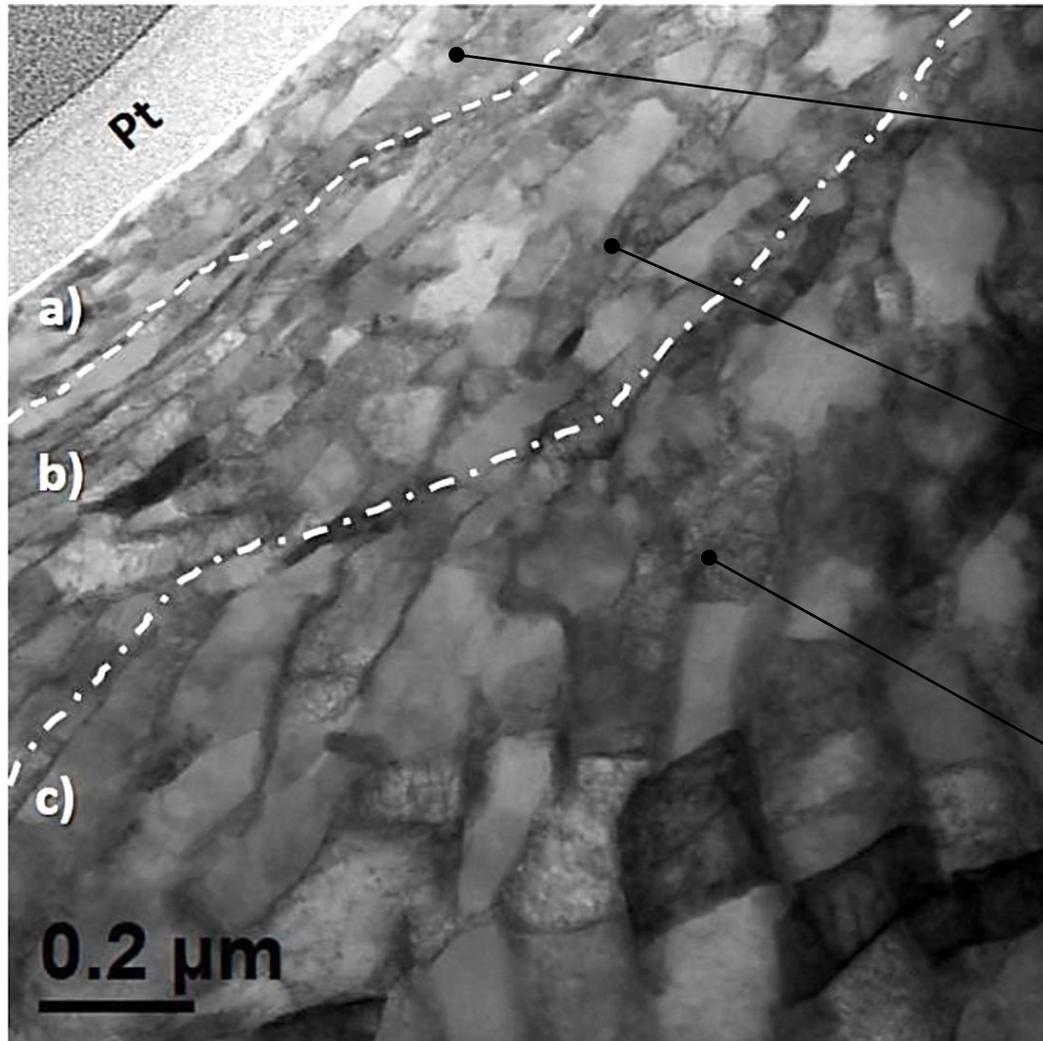
- Desgaste de Aço perlítico



- Desgaste abrasivo de Aço perlítico
  - Revestimento de moinho

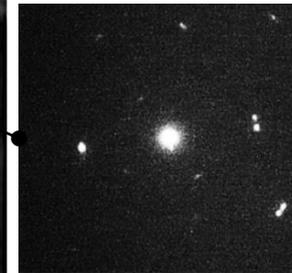


- Desgaste abrasivo de Aço perlítico
  - Amostra de ensaio roda de borracha (abrasão)



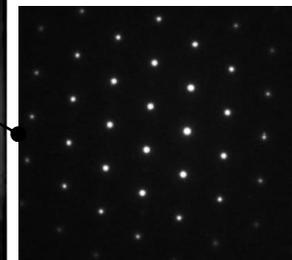
Policristais

- Grãos ultrafinos (nanométricos)



Mono/Policristal

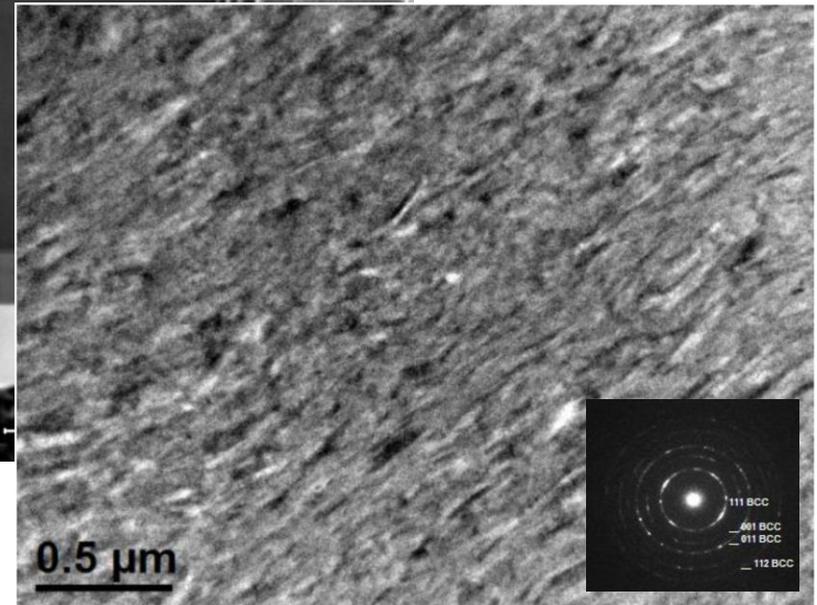
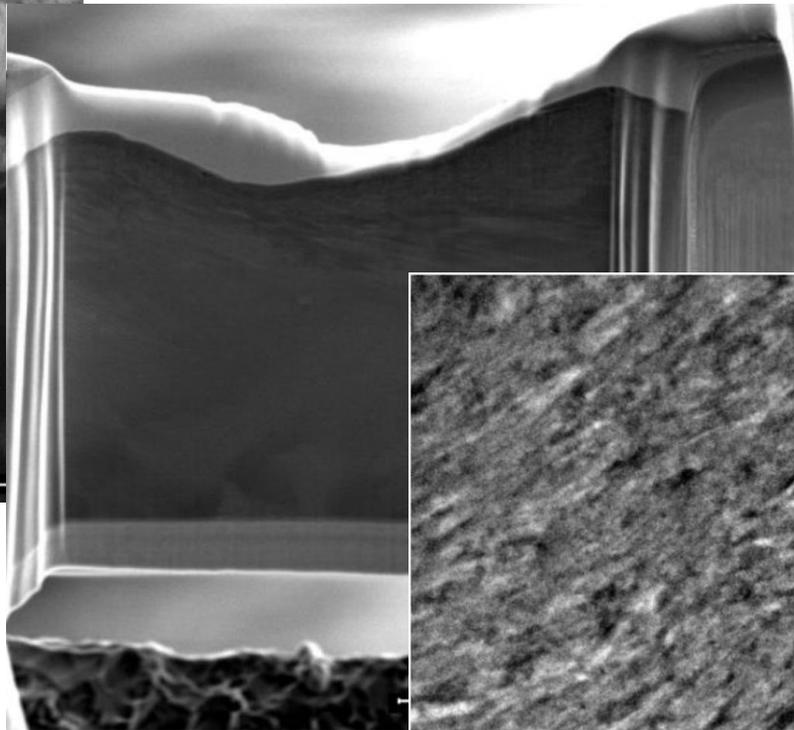
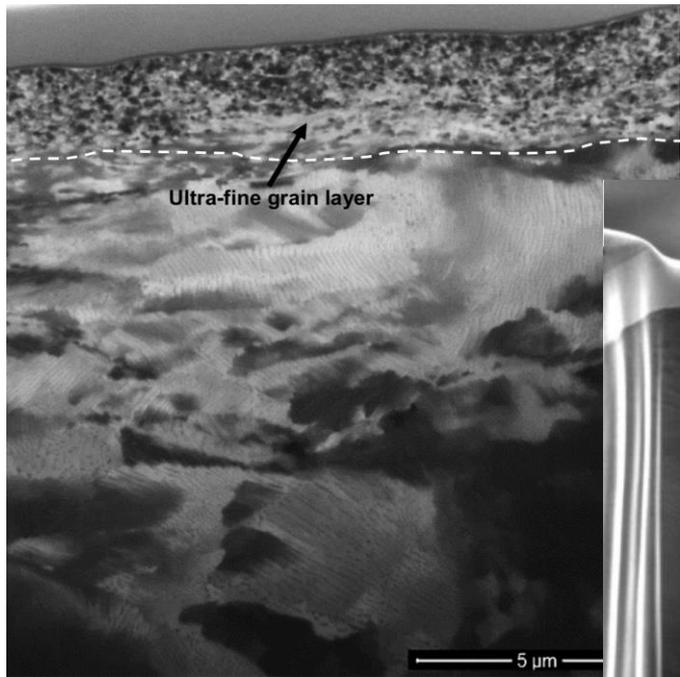
- Subgrãos



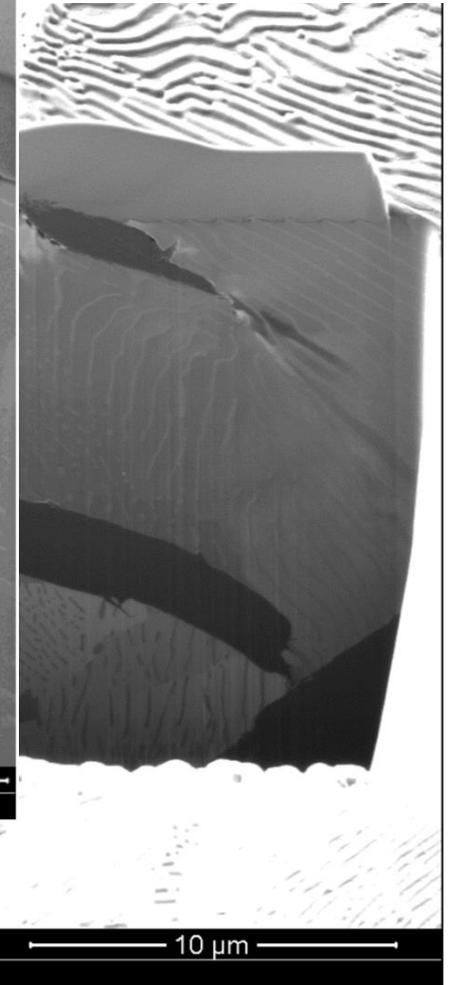
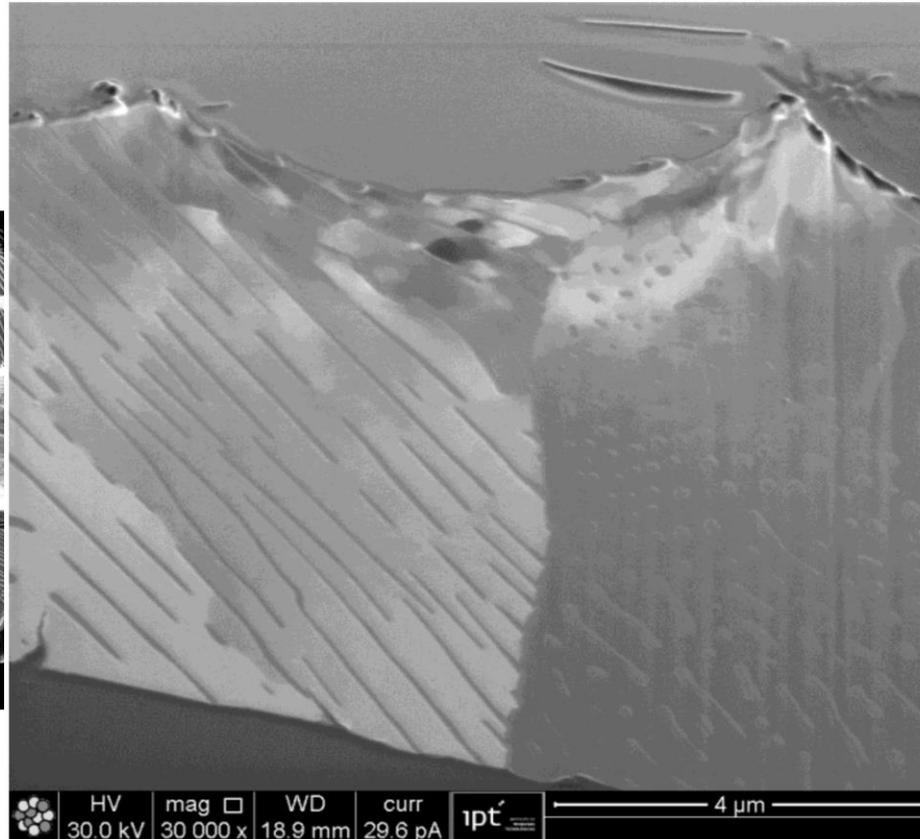
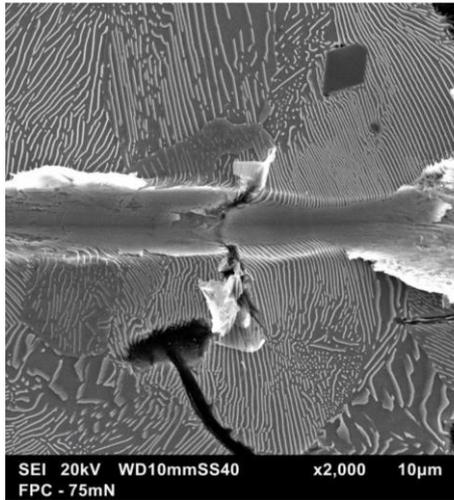
Monocristal

- Células de discorância

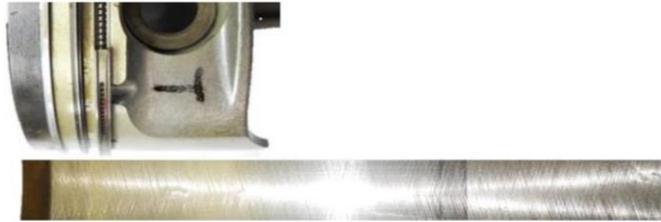
- Desgaste abrasivo de Aço perlítico
  - Amostra de ensaio disco-disco (RCF)



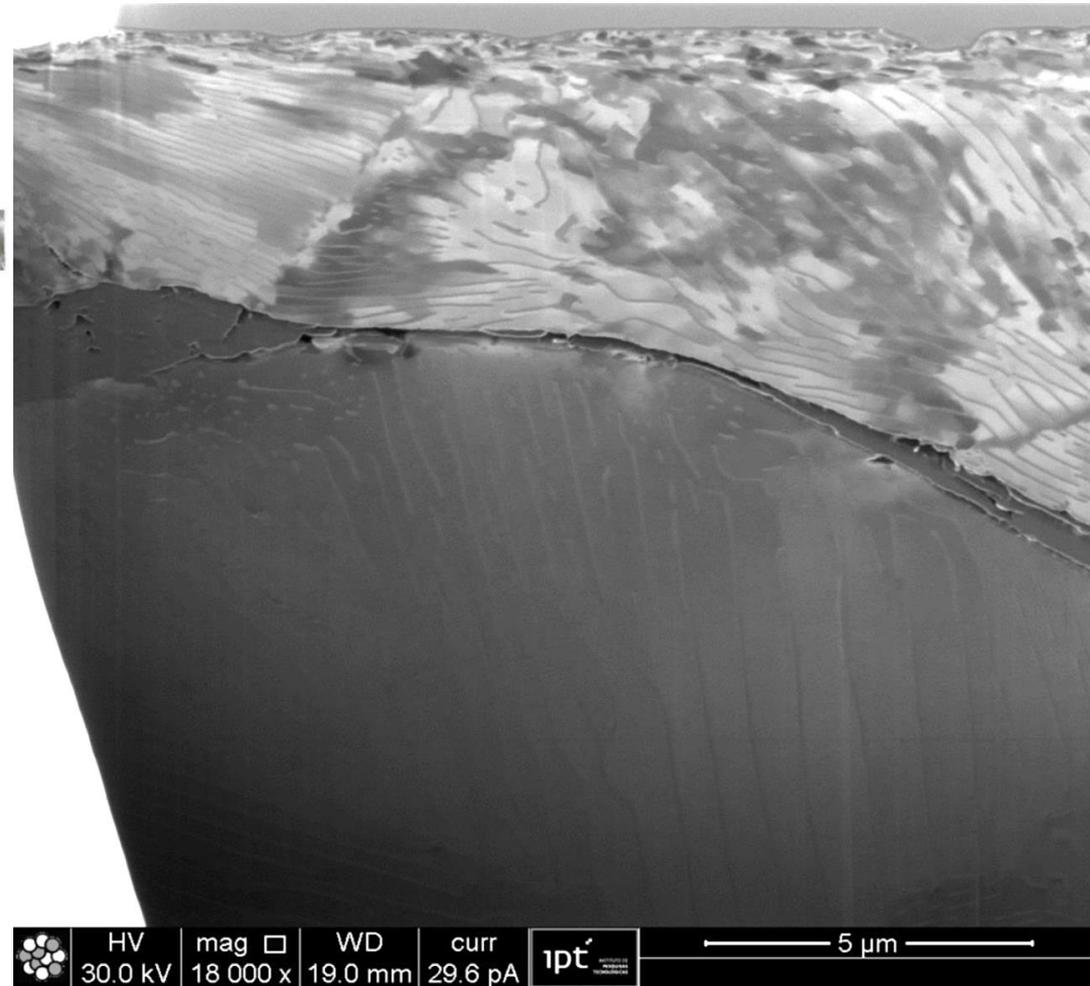
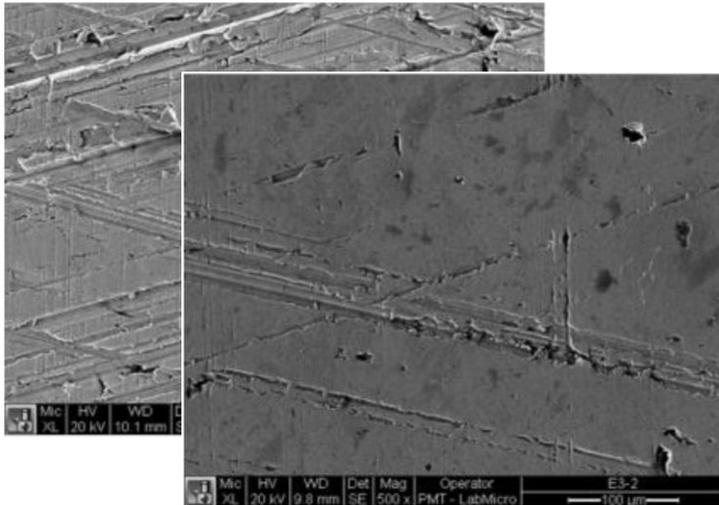
- Desgaste abrasivo de Ferro fundido cinzento
  - Ensaio de esclerometria linear



- Desgaste por deslizamento de Ferro fundido cinzento
  - Cilindro de motor de combustão interna



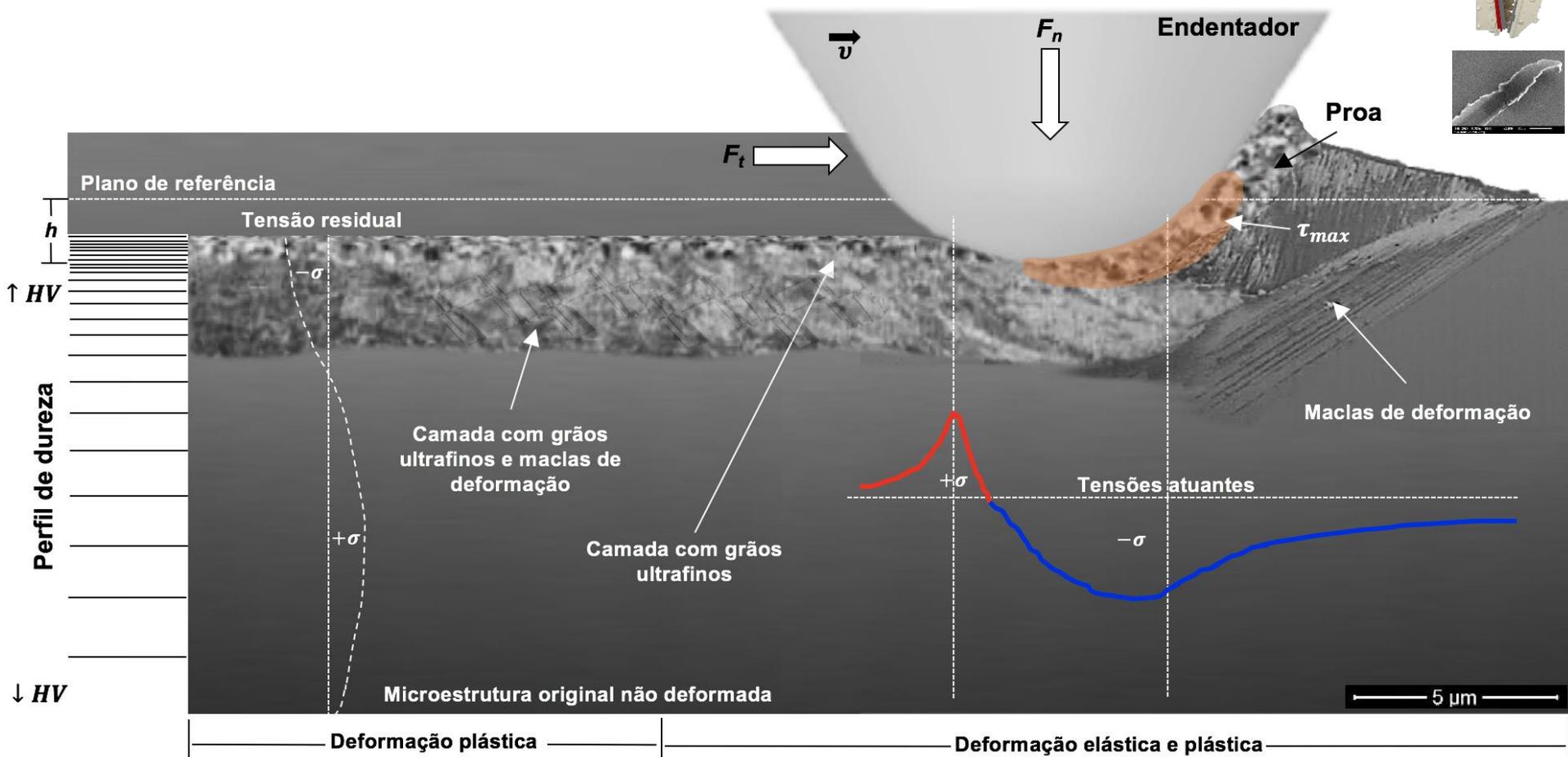
Perfil da superfície do cilindro após uso



# Machado, P.C. - Autoreparação Microestrutural

Modelo de recristalização dinâmica em superfície desgastada.

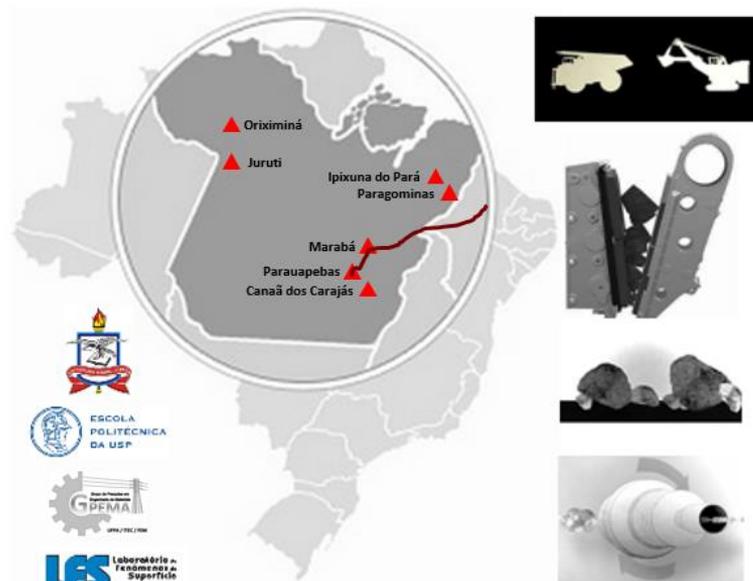
Perfil longitudinal do risco



# Bibliografia



- PAULO CORDEIRO MACHADO, Análise multiescala da abrasão de aços austeníticos ao manganês aplicados em britadores de minério, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Orientador: Amilton Sinatora, 2017
- JUAN IGNACIO PEREIRA AGUDELO, Analysis of the microstructure transformation (wel formation) in pearlitic steel used in relevant engineering wear systems, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Orientador: Amilton Sinatora, 2018
- LUIZ ALBERTO PEREIRA DAS NEVES FRANCO, Abrasão de ferro fundido cinzento aplicação a motores automotivos, Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Orientador: Amilton Sinatora, 2015
- RAFAEL BRISOLLA OBARA, Avaliação do desgaste em cilindros de motores de combustão interna – Mapeamento de mecanismos e quantificação do desgaste, Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Orientador: Amilton Sinatora, 2018
- EMGE, A.; KARTHIKEYAN, S.; RIGNEY, D. A. The effects of sliding velocity and sliding time on nanocrystalline tribolayer development and properties in copper. **Wear**, v. 267, n. 1–4, p. 562–567, 2009.
- SAKAI, T. et al. Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions. **Progress in Materials Science**, v. 60, n. 1, p. 130–207, 2014.<sup>[1]</sup><sub>[SEP]</sub>
- YAN, W. L. et al. Effect of surface nanocrystallization on abrasive wear properties in Hadfield steel. **Tribology International**, v. 42, n. 5, p. 634–641, 2009.
- ZUM GAHR, K. **Microstructure and wear of materials**. 1987.



Apoio:



# 1º TRIBOPARÁ

## “Tribologia e Mineração”

Belém-PA, Brasil, 21-23/06/2015



# Agradecimentos

- Obrigado pela atenção!!

