

A Tribologia e a arte do olhar

Cristina Godoy



POMPÉIA 79 d.C



Desgaste, Fratura e Dureza

"Wear may be defined as the removal of material from solid surfaces as a result of mechanical action", E. Rabinowicz

Remoção de material implica processo de **Fratura!** Logo, todo processo de **Desgaste** é resultado de um processo que envolve **Fratura!**

$$\left(Q = \frac{(KW)}{H} \right)$$

onde Q , *taxa de desgaste*, é igual a

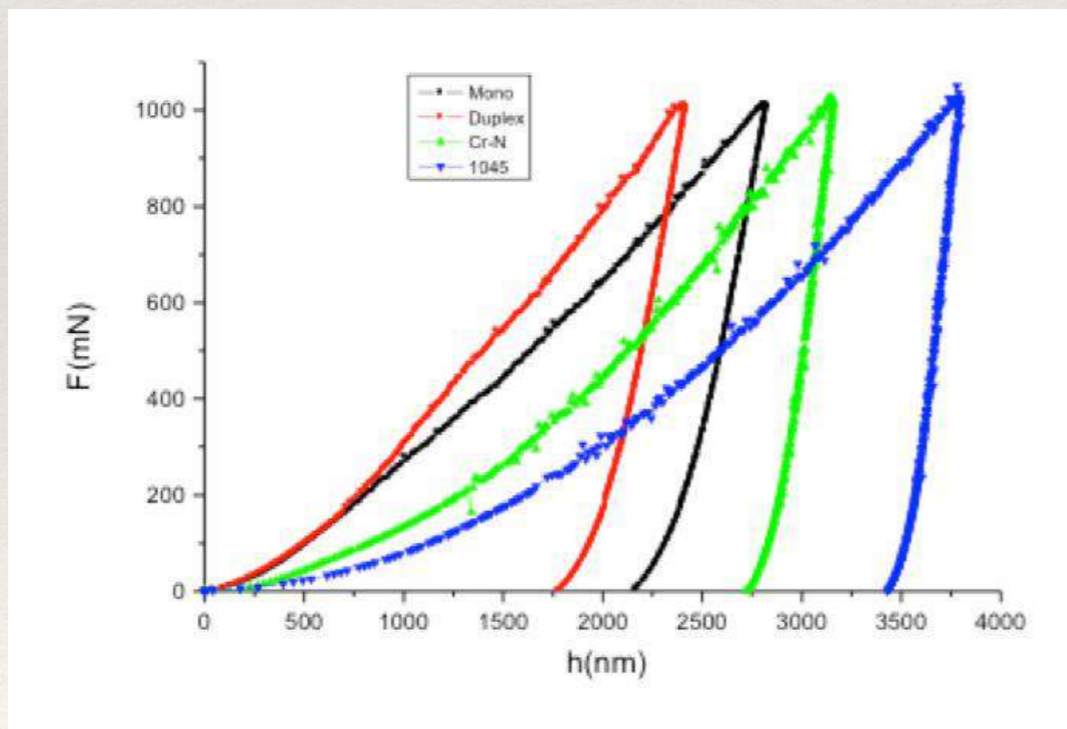
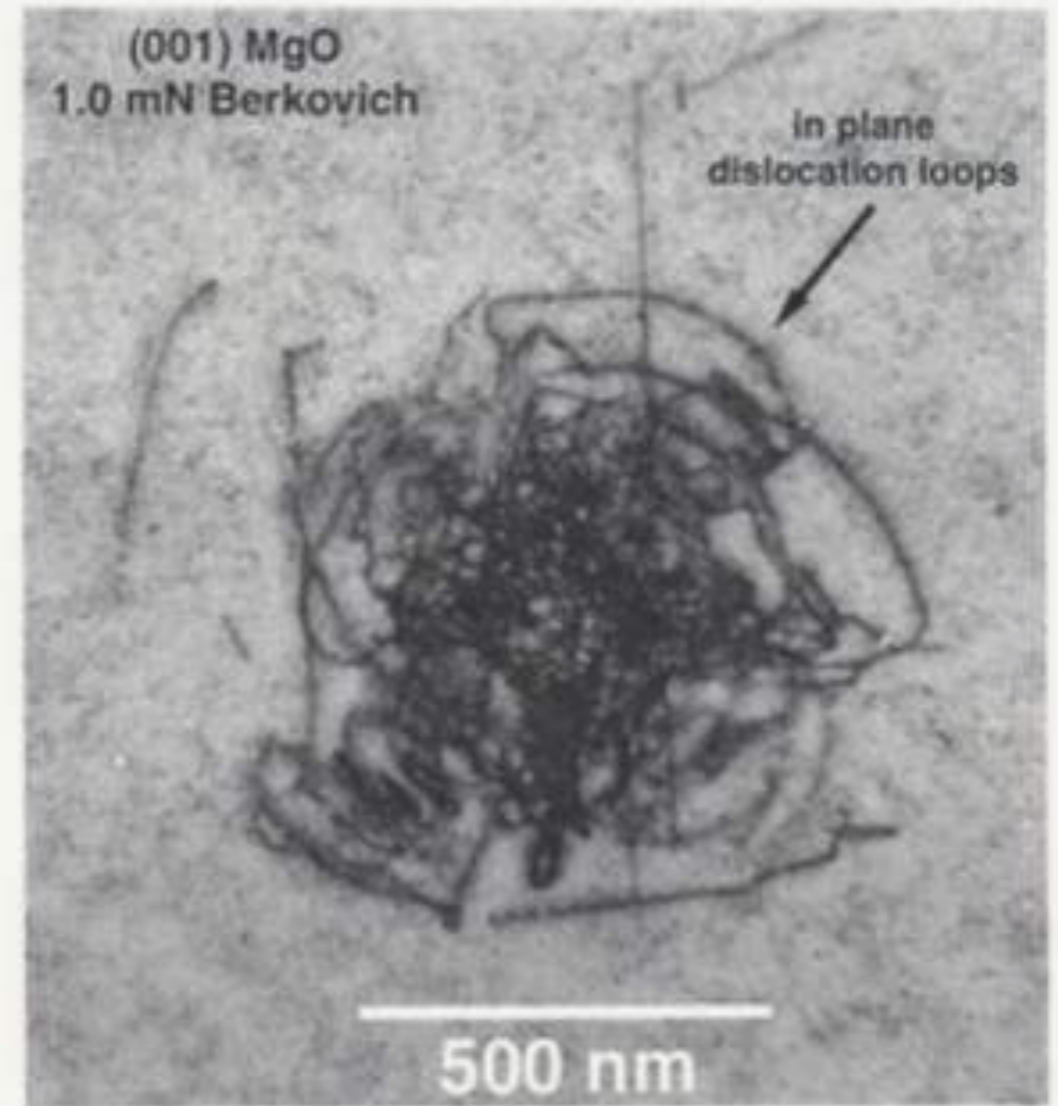
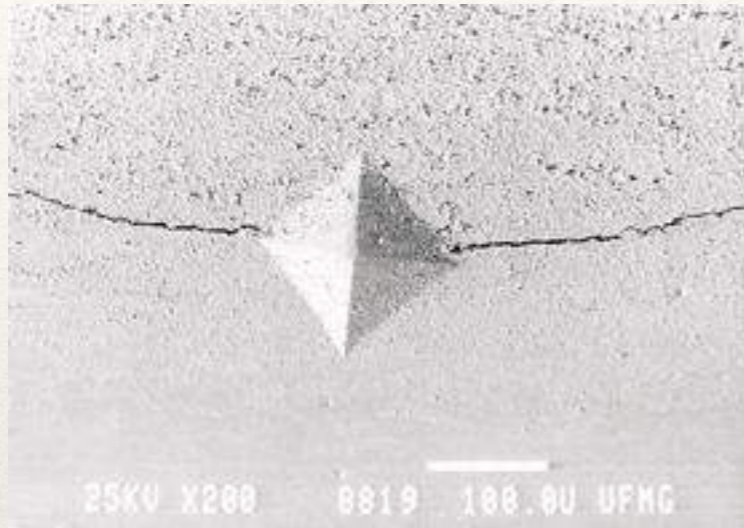
$$Q = \frac{V}{s}$$

V , é o *volume do material removido por Fratura!*

Dois principais mecanismos de Fratura são referenciados: fratura dúctil e fratura frágil!

Fratura Dúctil envolve deformação plástica e **Fratura Frágil** envolve pouca ou nenhuma deformação plástica

Dureza é a resistência à deformação plástica imposta .



Renato Reis, 2005 (tese de doutorado)
c/ NIST (National Institute of Standards and Technology)

Tipos de Desgaste

Desgaste por Fratura Dúctil

Desgaste por Fratura Frágil

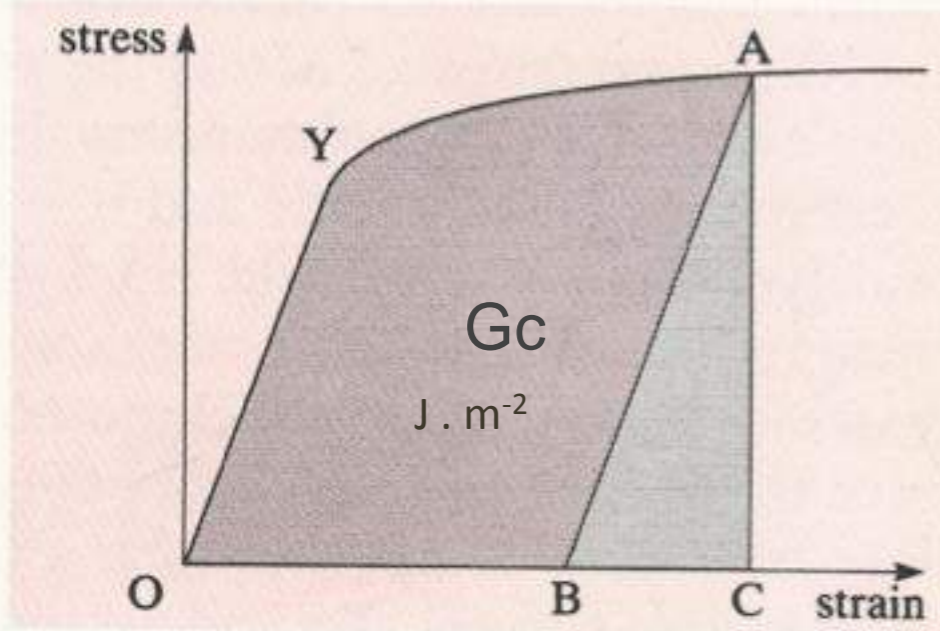


Figure 2.15 Stress-strain curve for plastically deformed material

G_c, tenacidade, é o trabalho necessário para fraturar uma parte do material. Obtido pela área de uma curva de um teste de tração de um corpo de prova que tem uma pré-trinca. Ou seja, é o trabalho realizado para propagação de uma trinca.

Quando maior a resistência mecânica (dureza, limite de escoamento, limite de resistência, taxa de encrumento e DUREZA) e maior ductilidade, Maior G_c.

Os materiais que possuem **alta dureza** e baixa ductilidade (baixo G_c) tenderão a sofrer desgaste por fratura frágil

Os materiais que possuem **alta dureza** e alta ductilidade (alto G_c) tenderão a sofrer desgaste por fratura dúctil

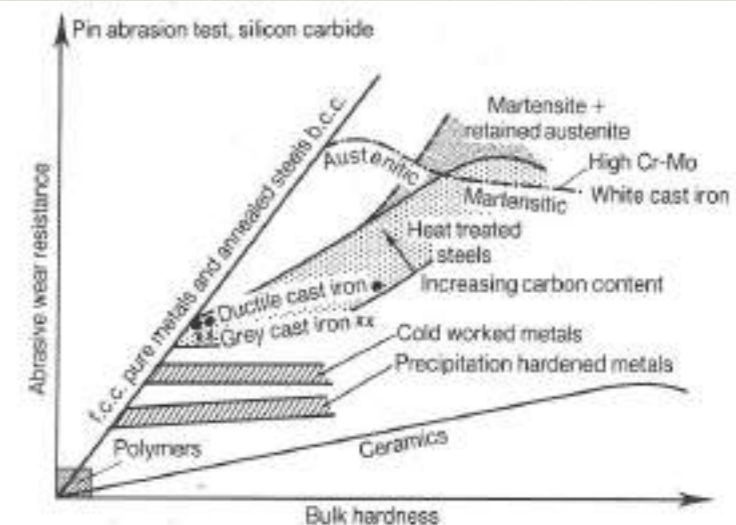


Fig. 6.18 Two-body abrasion resistance (1/volume wear rate) of various materials plotted against bulk hardness (from Zum Gahr K-H, *Microstructure and Wear of Materials*, Elsevier, 1987)

Dureza

A Dureza é um parâmetro de controle no processo de desgaste.

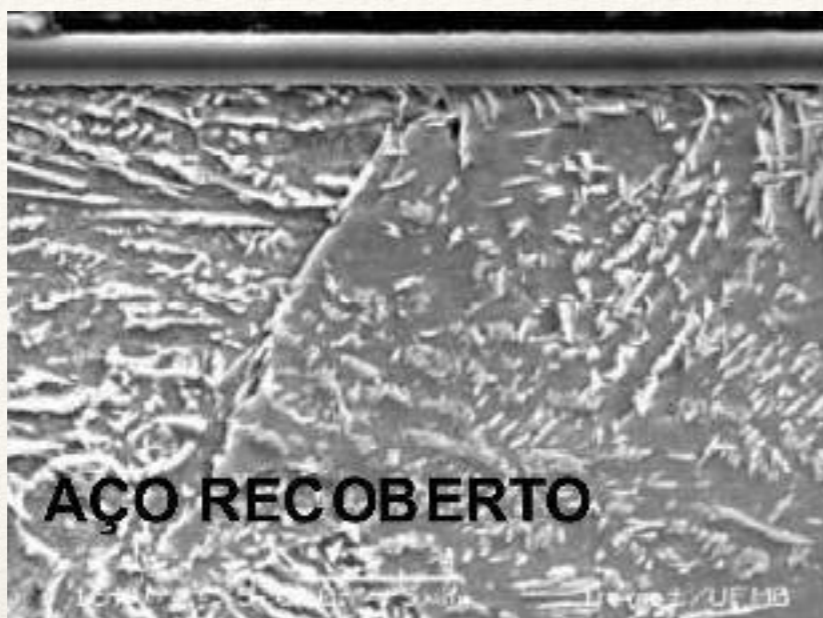
Como Medi-la?

Depende da arte do olhar.....

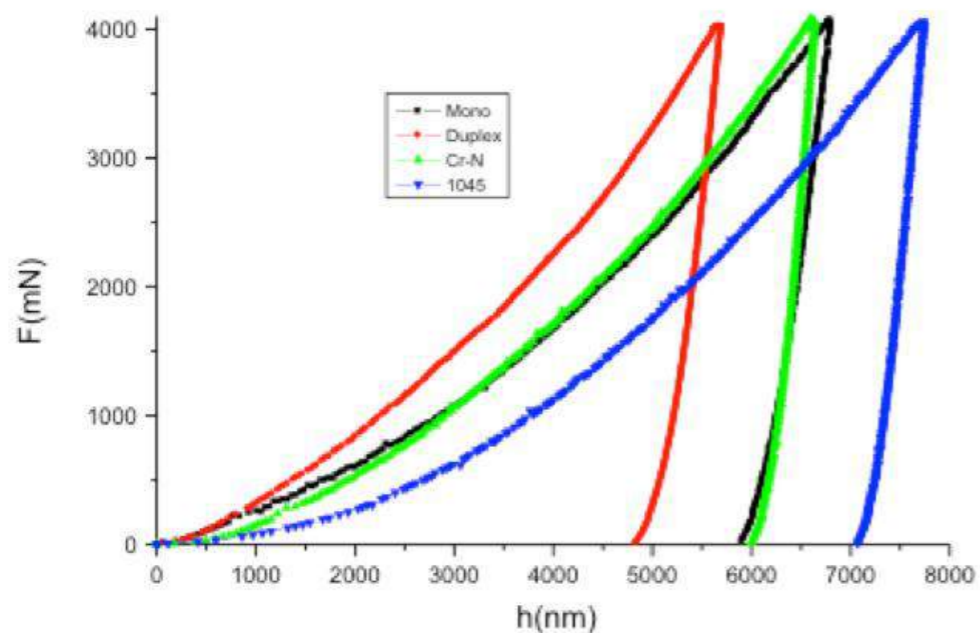


Sapatos Desgastados, Van Gogh, 1888 e 1887

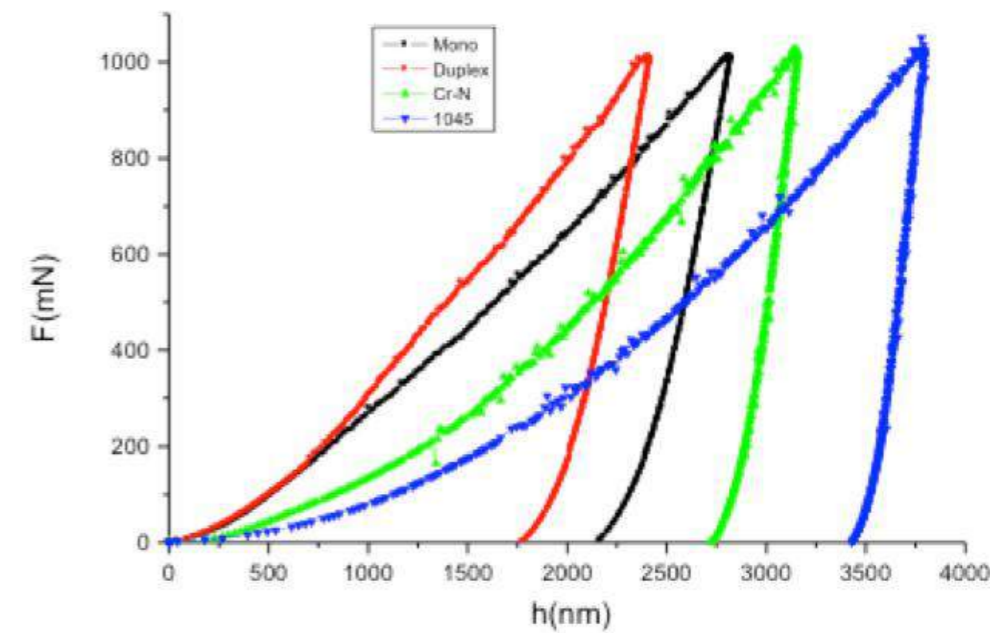
Dureza e Nanotecnologia



(a) Conjugado Monocamada (aço ABNT 1045 recoberto com Cr-N); (b) Conjugado “Dúplex” (aço nitretado a plasma mais recobrimento de Cr-N); MANCOSU, 2005.



Vermelho: Nitretado a Plasma e Recoberto (DUPLEX)
Preto: Recoberto (Monocamada)
Verde: Nitretado a Plasma
Azul: Aço ABNT 1045

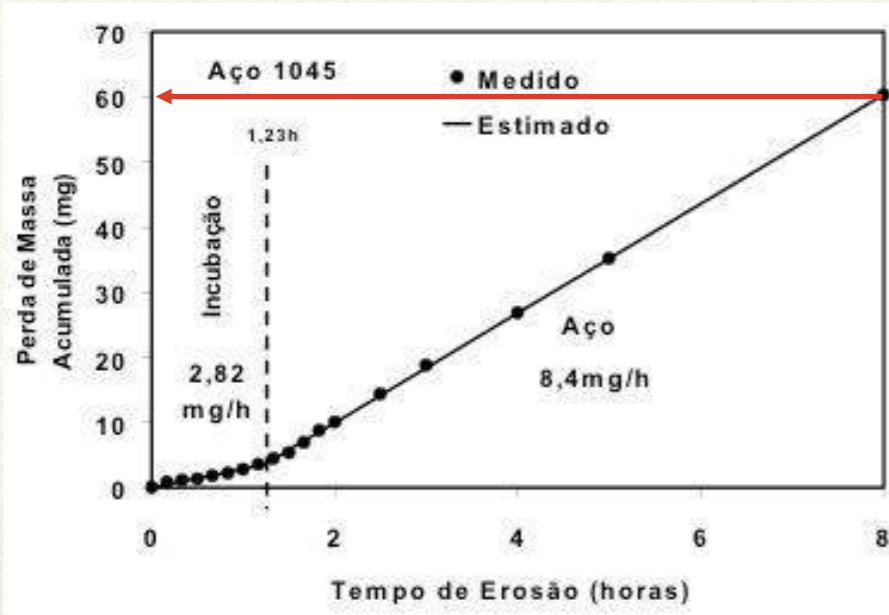


National Institute of Standards and Technology – NIST/EUA

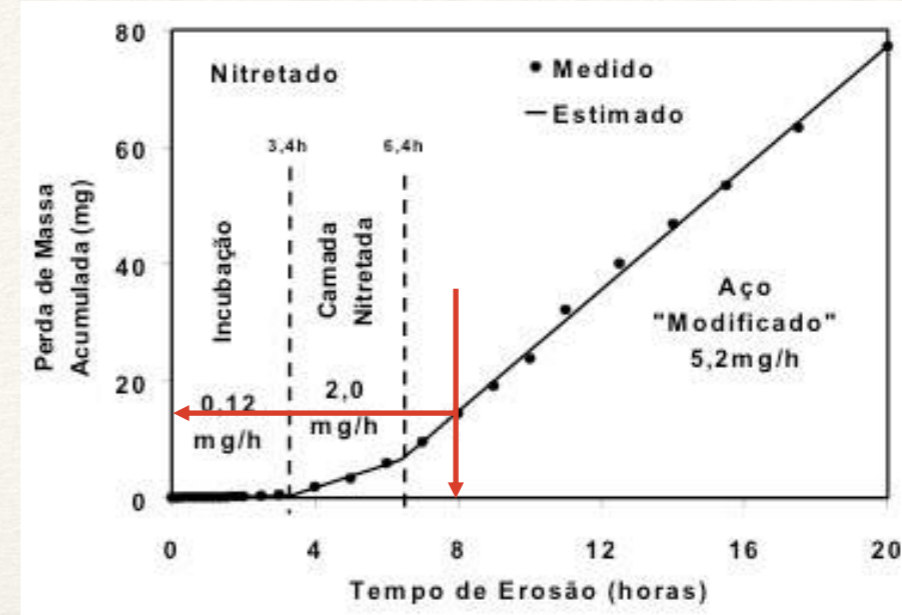
Surge uma falsa dependência da dureza com a força aplicada!

PAPVD e Erosão por Cavitação

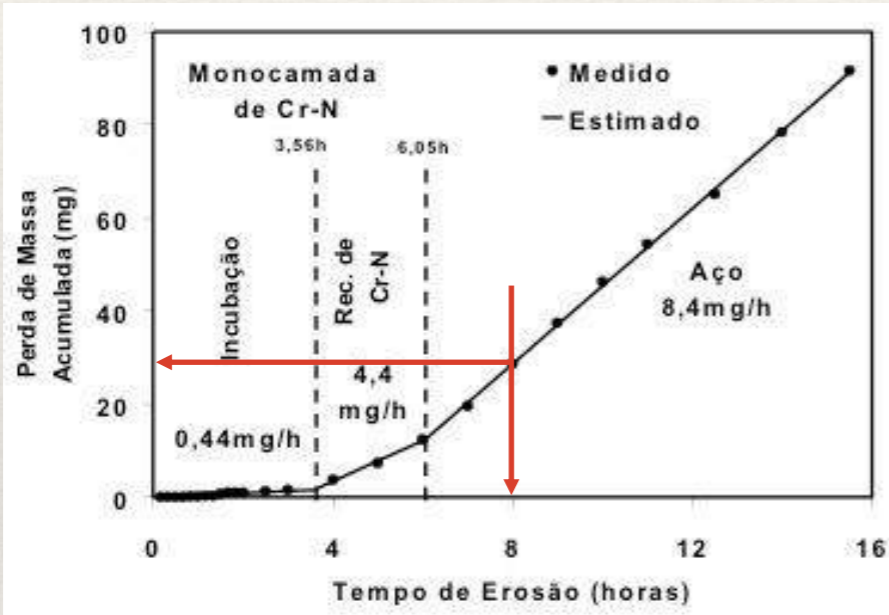
Aço ABNT 1045



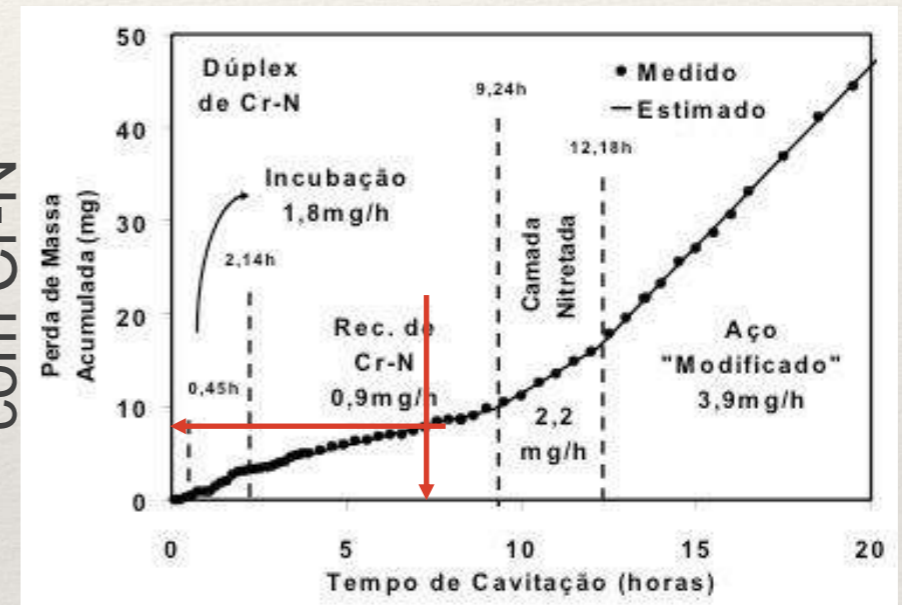
Aço ABNT 1045 Nitretado a Plasma



Aço ABNT 1045 Filme Cr-N



Dúplex Nitretado e Recoberto com Cr-N



Mancosu, 2005

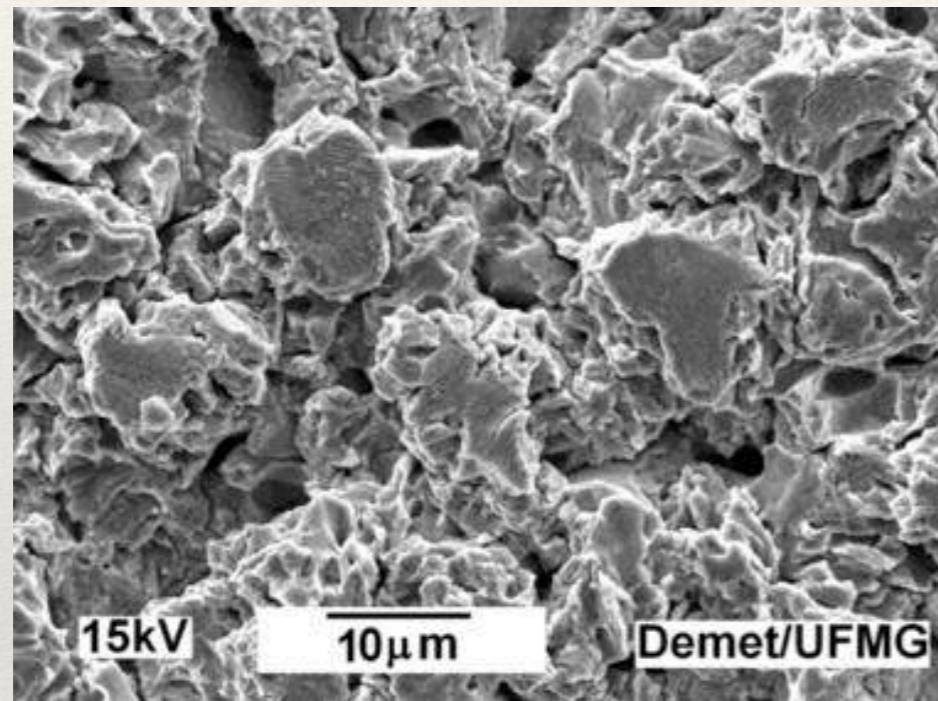
Uma alta profundidade de endurecimento é mais importante que uma alta dureza superficial!

A ideia de profundidade de uma superfície ampliou: por uma centena de micrômetros!

PAPVD e Erosão por Cavitação

Uma alta profundidade de endurecimento é mais importante que uma alta dureza superficial!

A ideia de profundidade de uma superfície ampliou: por uma centena de micrômetros

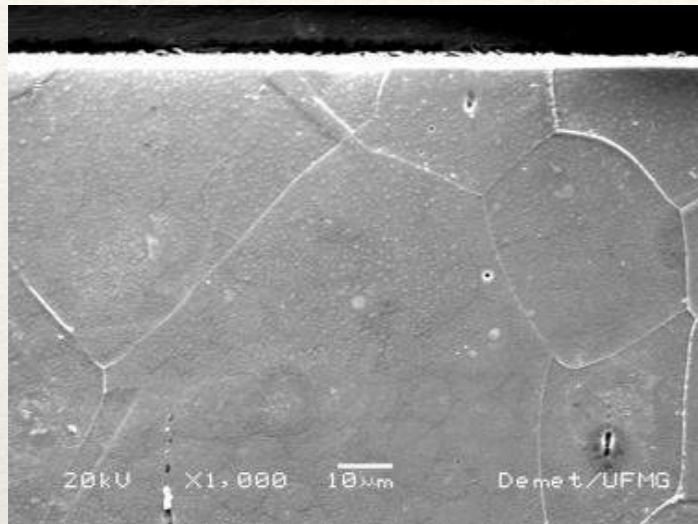


Mancosu, 2005

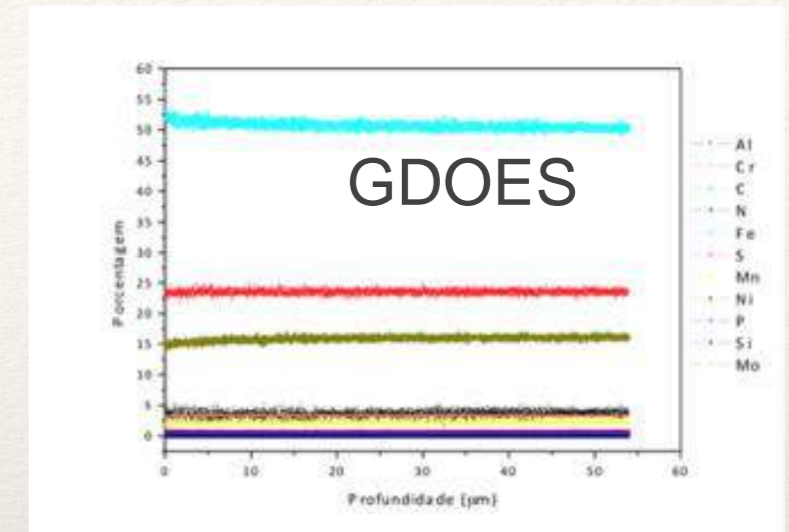
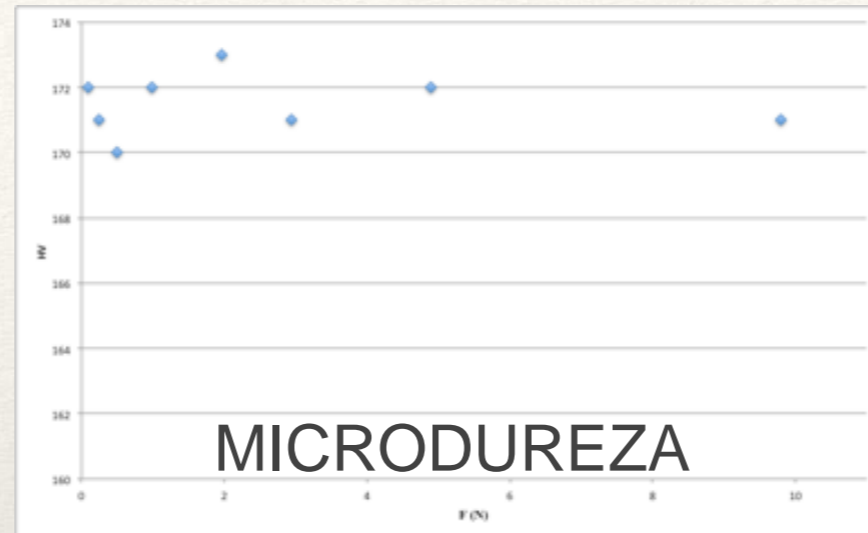
**GODOY, C, MANCOSU, R, MACHADO, R, MODENESI, P, AVELAR BATISTA, J.,
Which hardness (nano or macrohardness) should be evaluated in cavitation?,
Tribology International, v.42, p.1021 - 1028, 2008**

"UM OLHAR ATÔMICO"

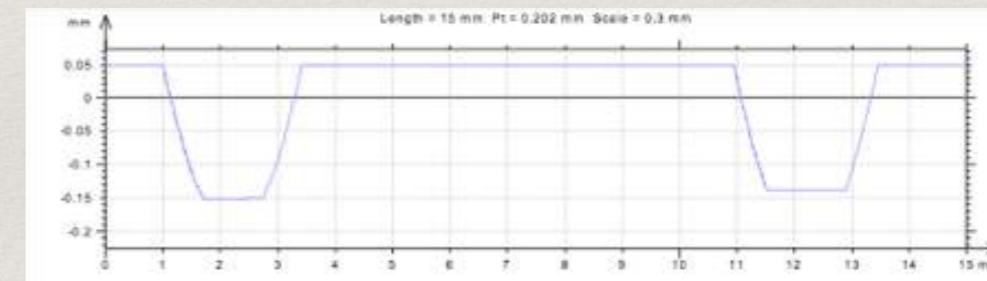
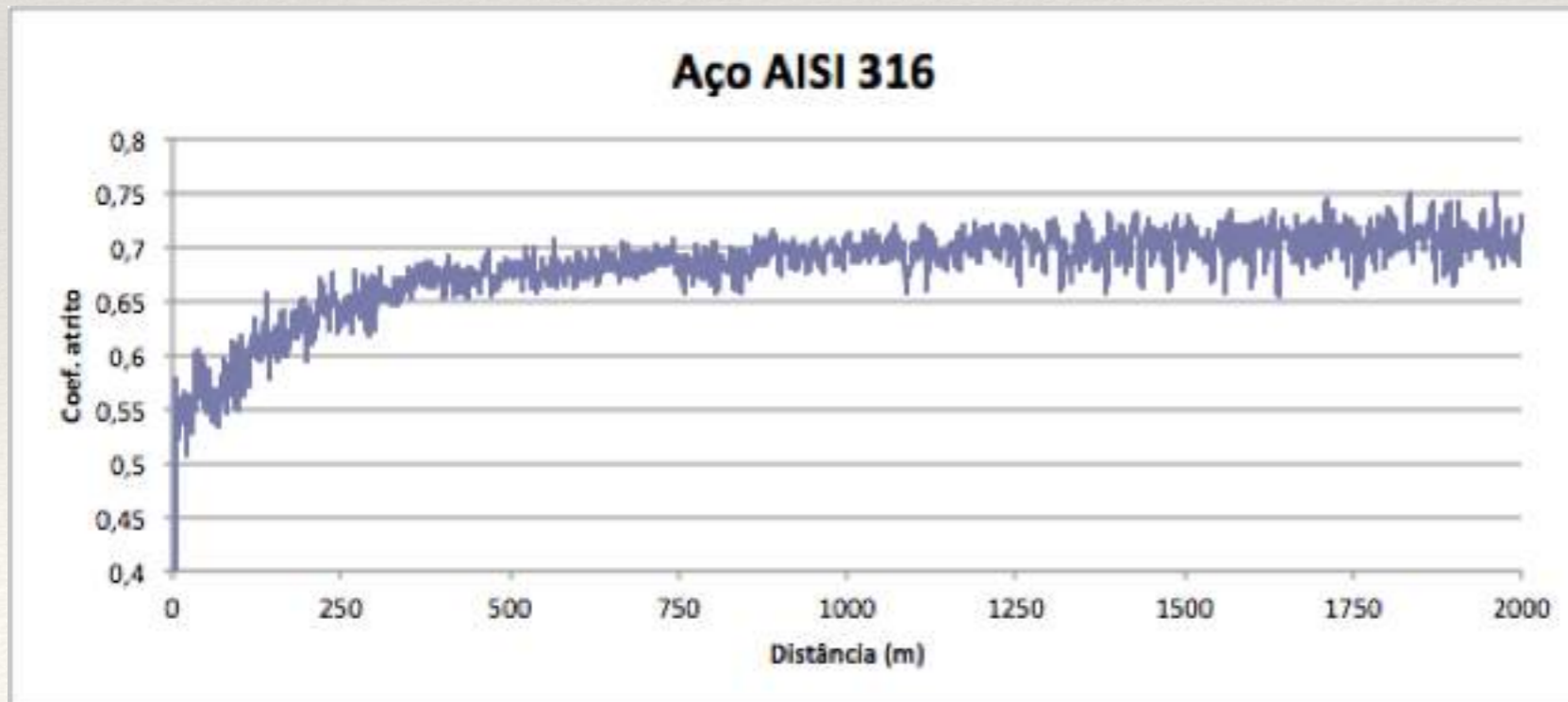
GDOES (Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy) versus MEV



AÇO AUSTENÍTICO AISI 316L



TESTE DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO
contra-corpo esfera de 6mm WC-Co, F = 10N

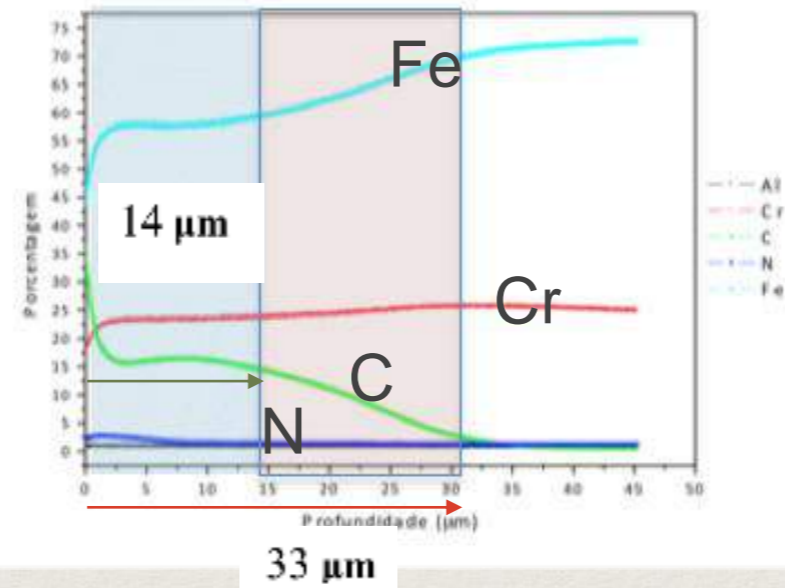
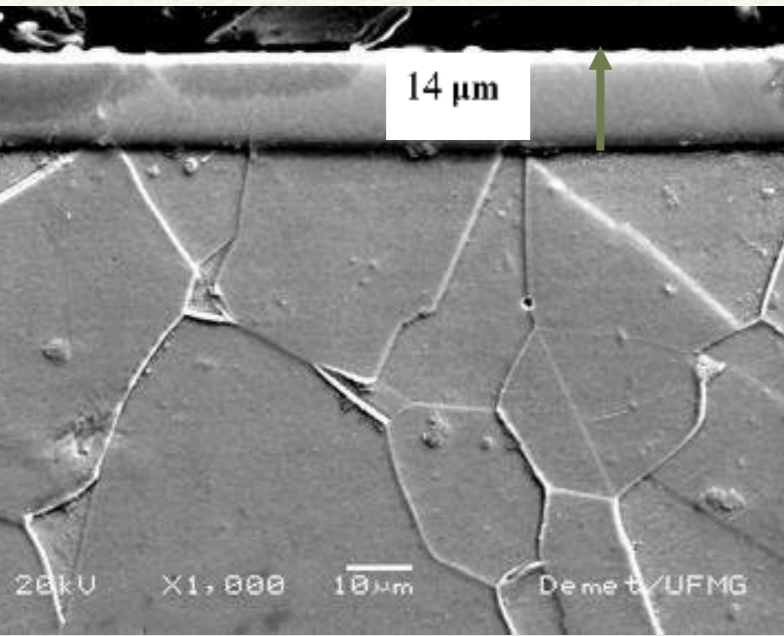


profundidade de desgaste = 202 µm

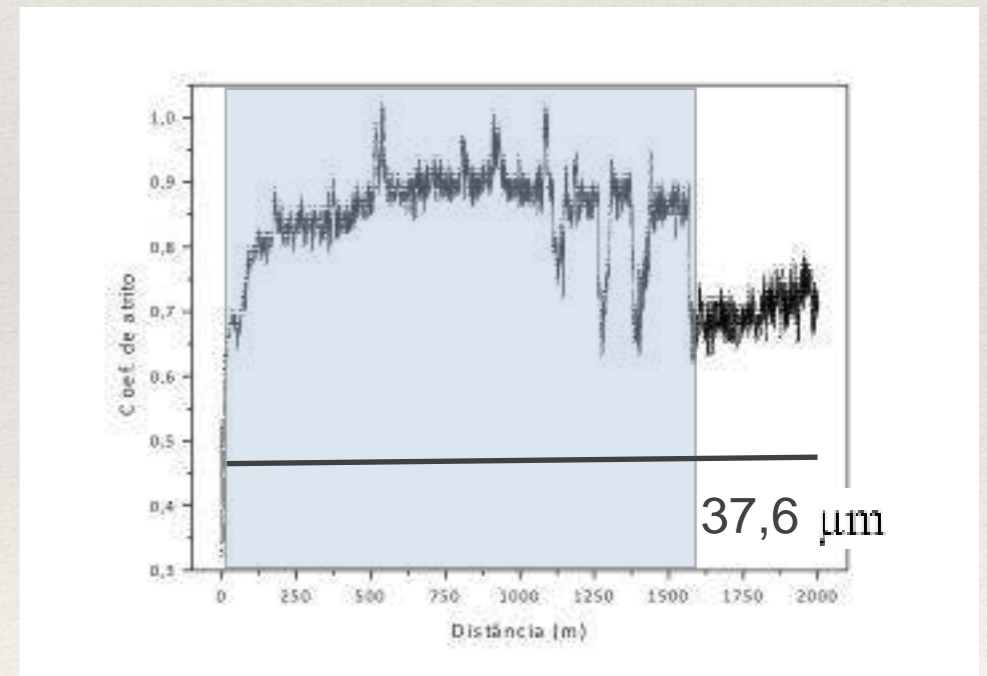
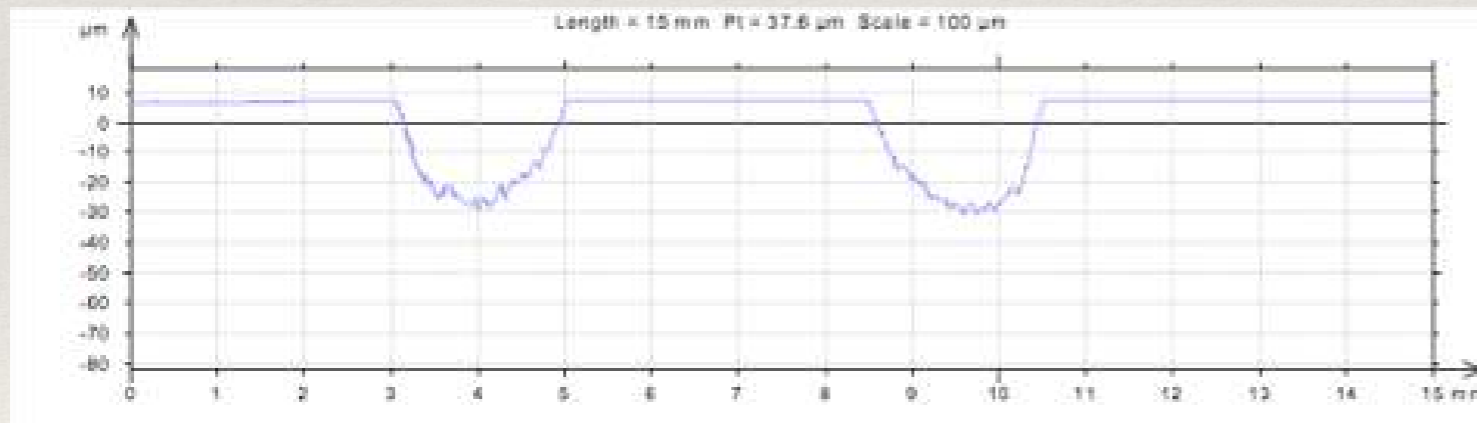
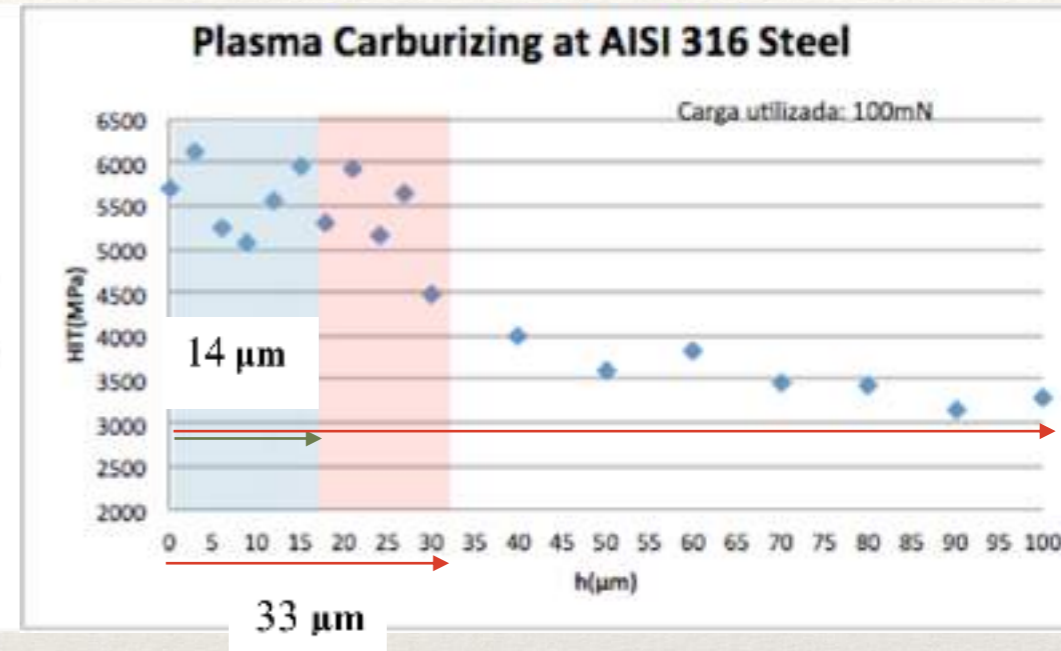
Reinaldo Oliveira,
tese de doutorado,
2011

“UM OLHAR ATÔMICO” GDOES X MEV

Aço Austenítico 316L cementado a plasma

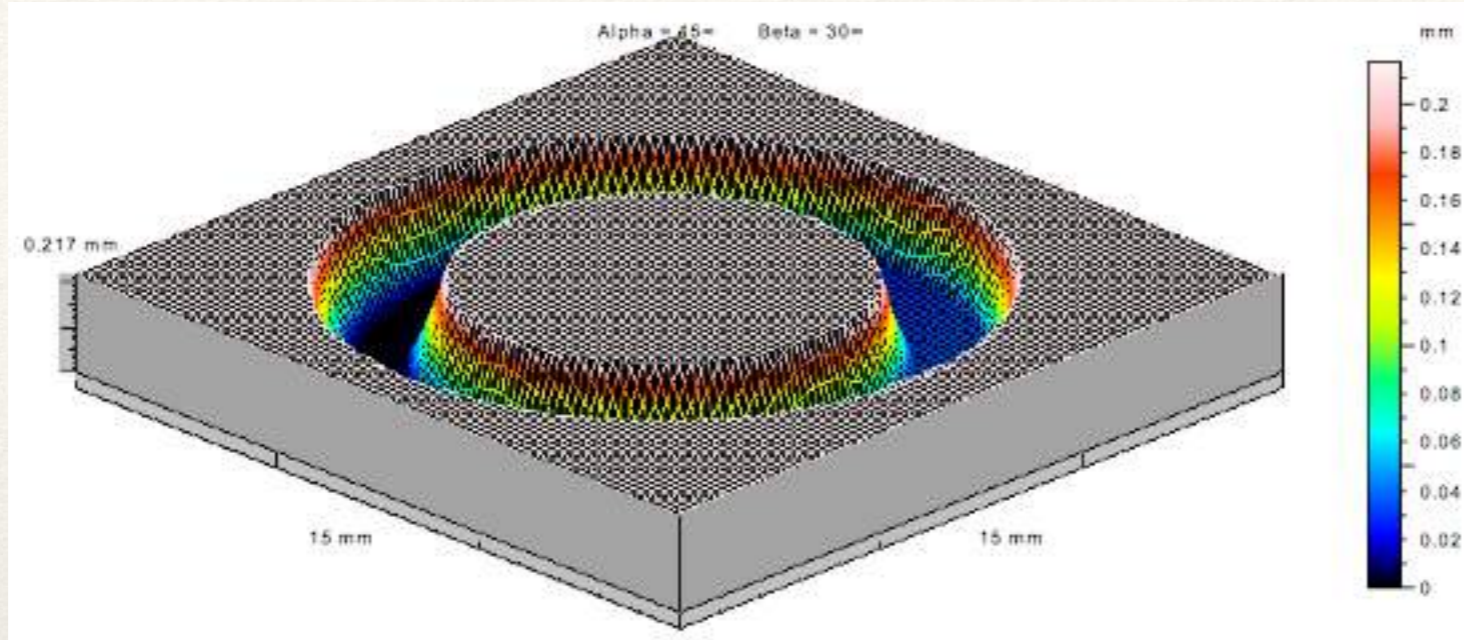


Ultramicrodureza instrumentada



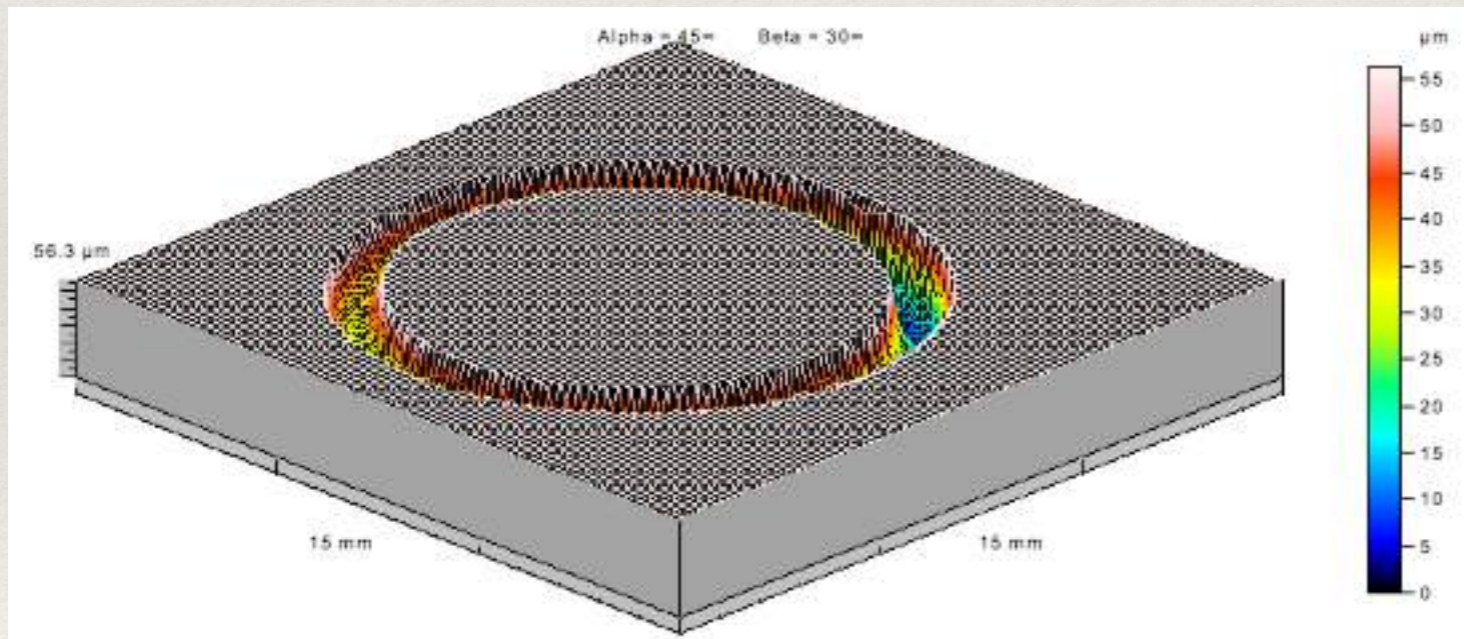
Para 2000m de distância de escorregamento,
Profundidade Total da Trilha de Desgaste = 37,6 μm

Perfilometria Tridimensional



Aço Inoxidável Austenítico AISI 316

profundidade de desgaste = 202 μm



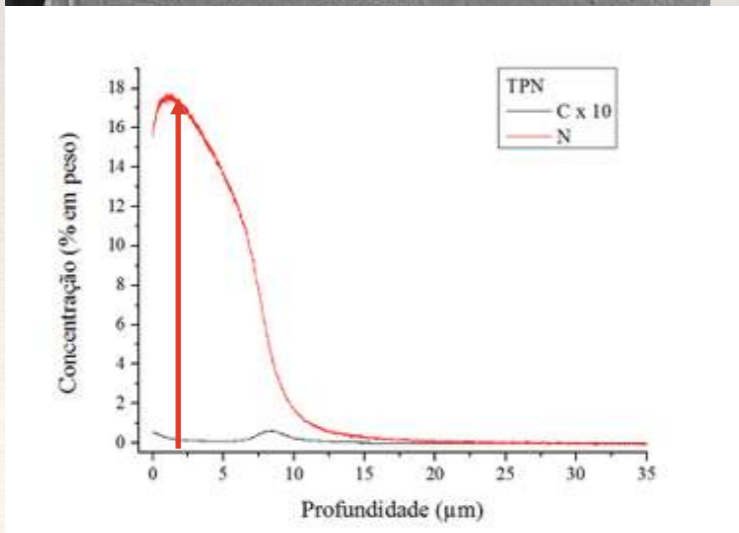
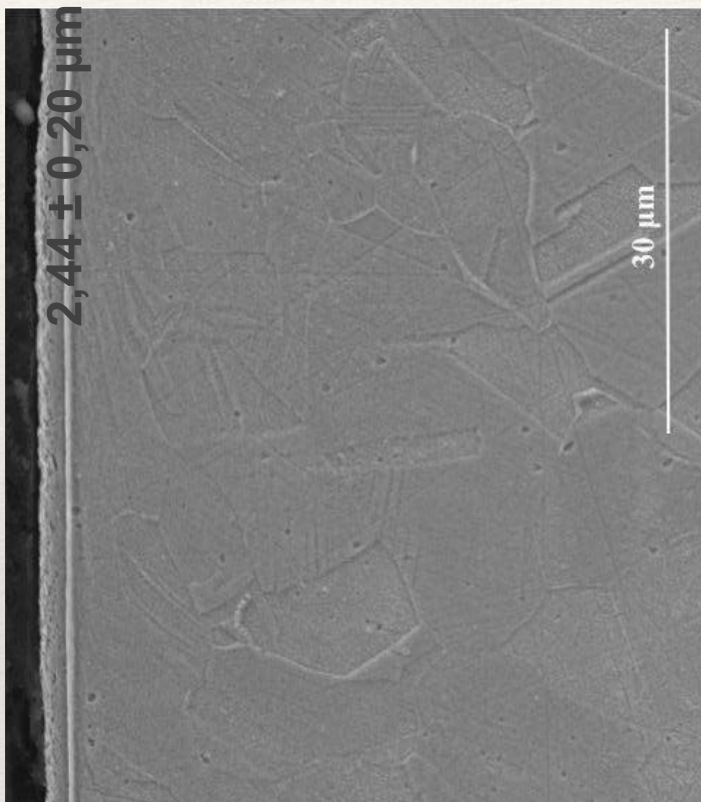
Aço Inoxidável Austenítico AISI 316
cementado a plasma

profundidade de desgaste = 37,6 μm

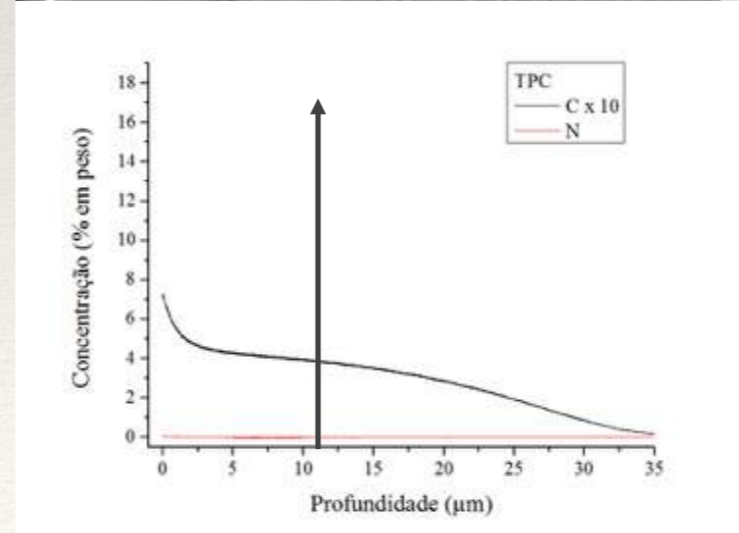
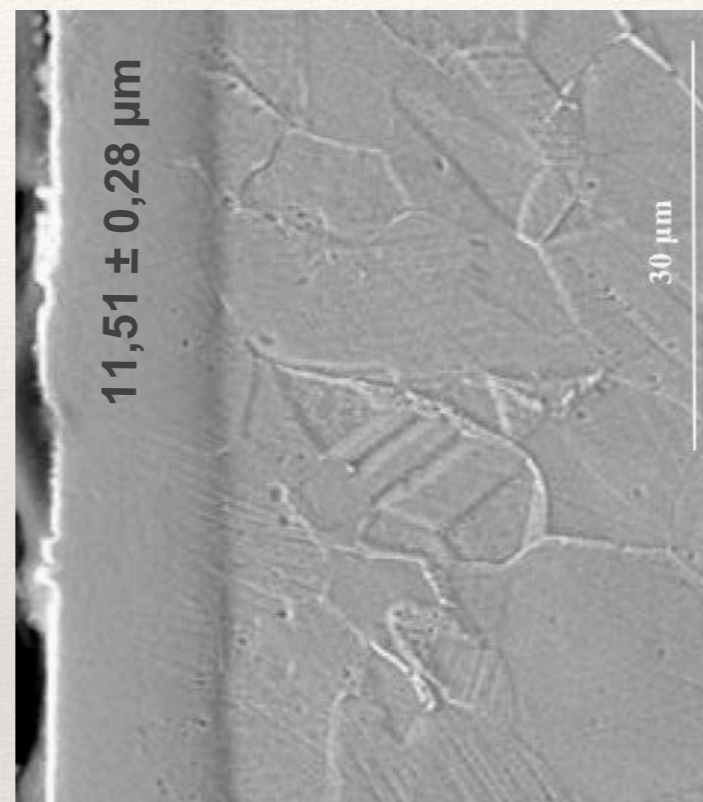
"UM OLHAR ATÔMICO"

GDOES (Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy) versus MEV

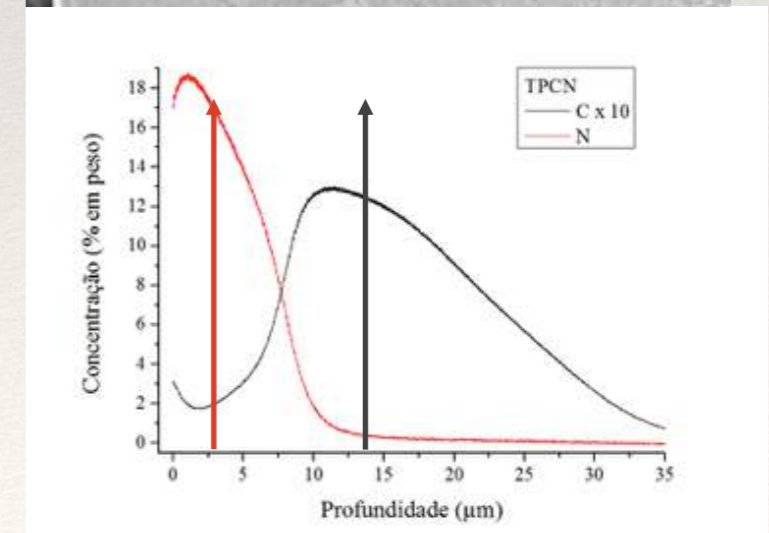
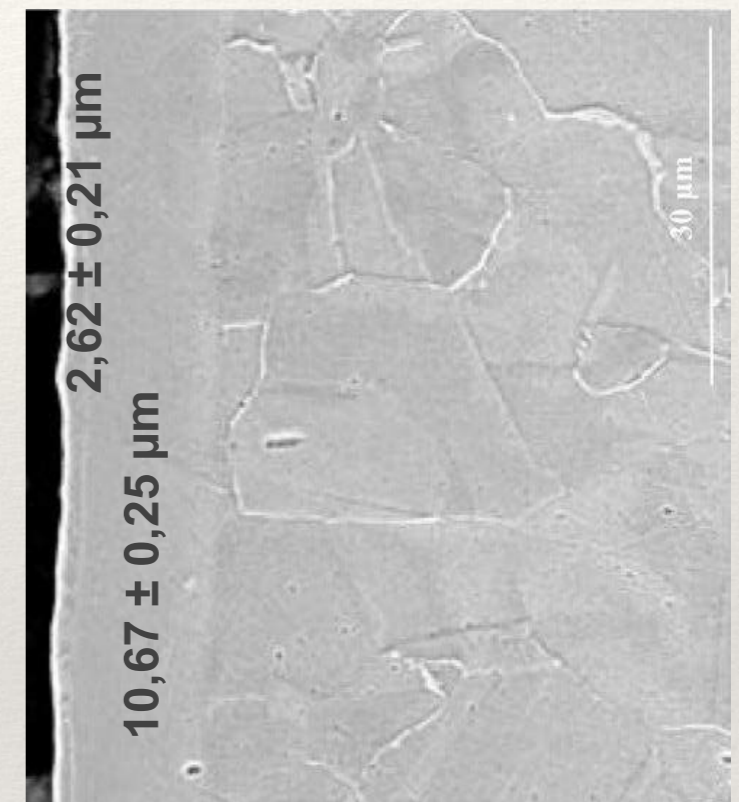
Nitretado a Plasma
TPN



Cementado a Plasma
TPC



Cementado e Nitretado a Plasma
TPC + TPN



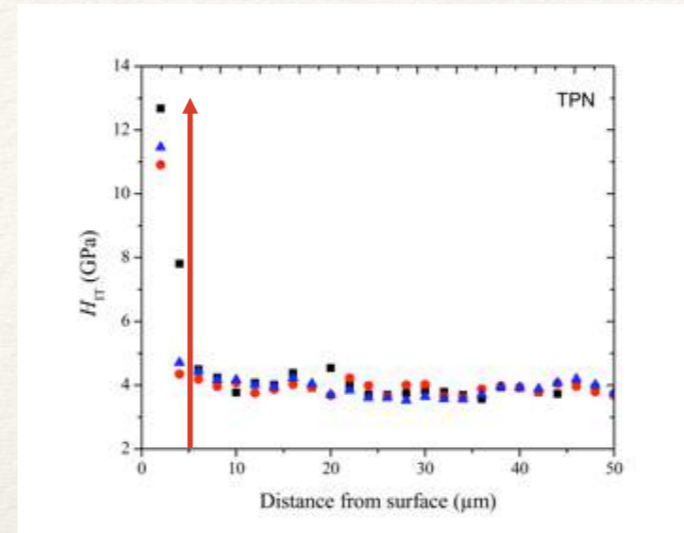
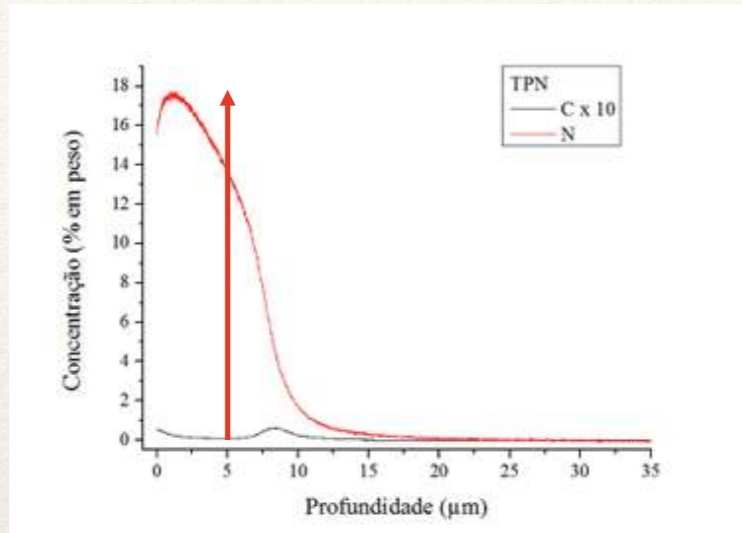
“UM NANO-OLHAR”

GDOES X NANODUREZA Instrumentada

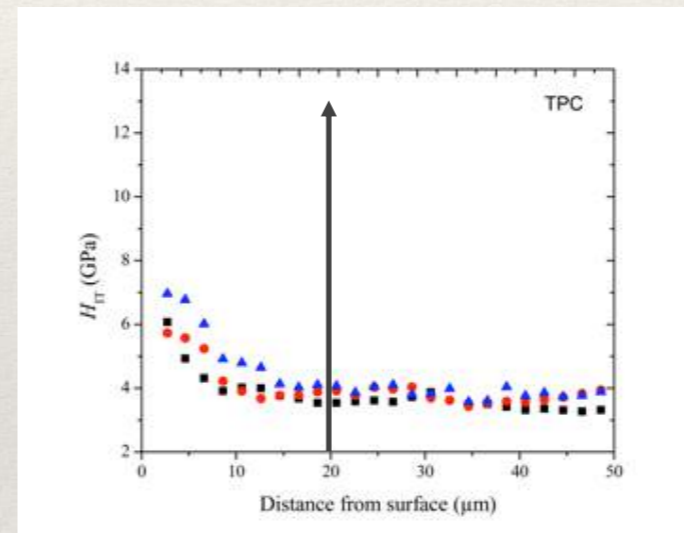
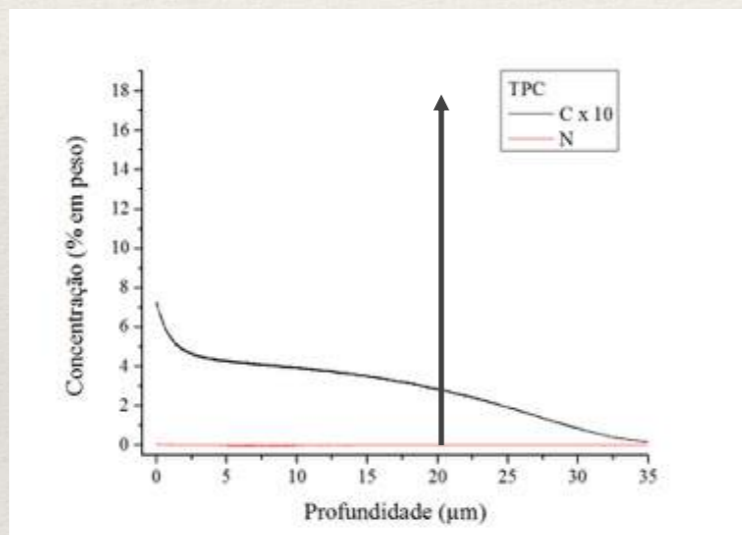
GDOES

NANODUREZA

TPN

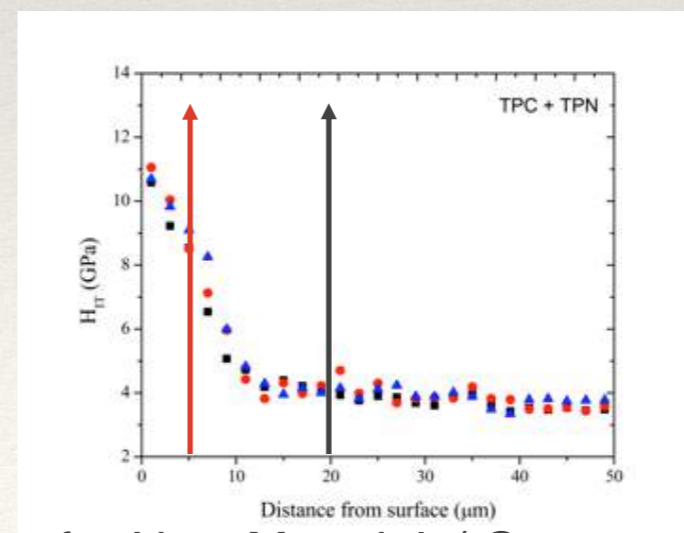
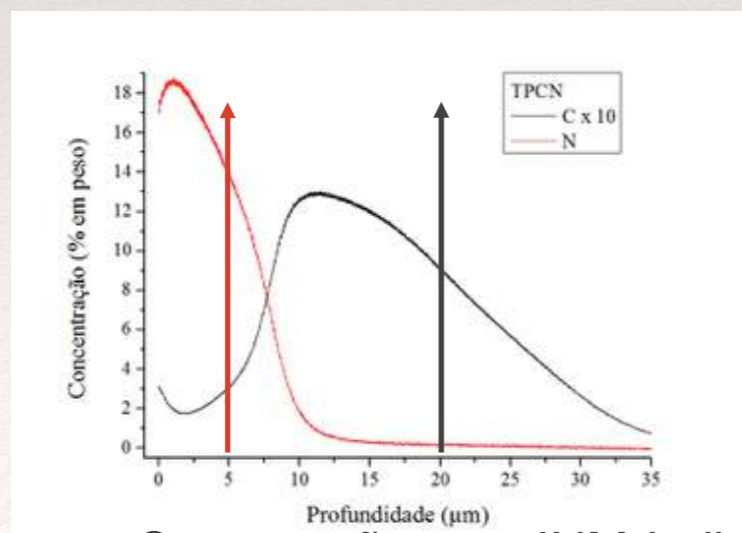


TPC



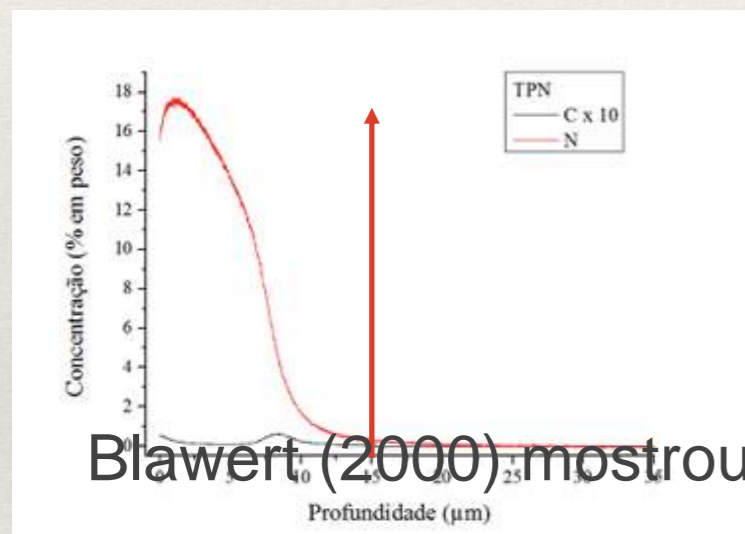
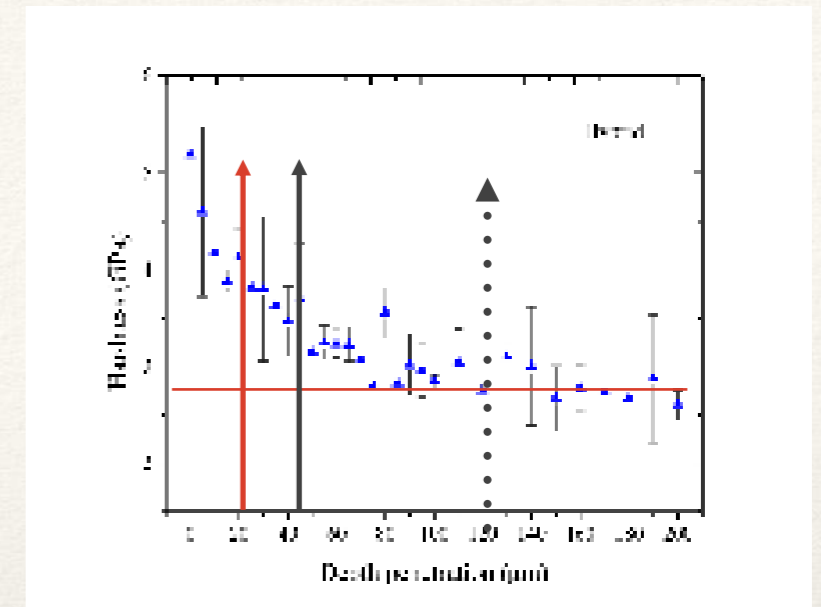
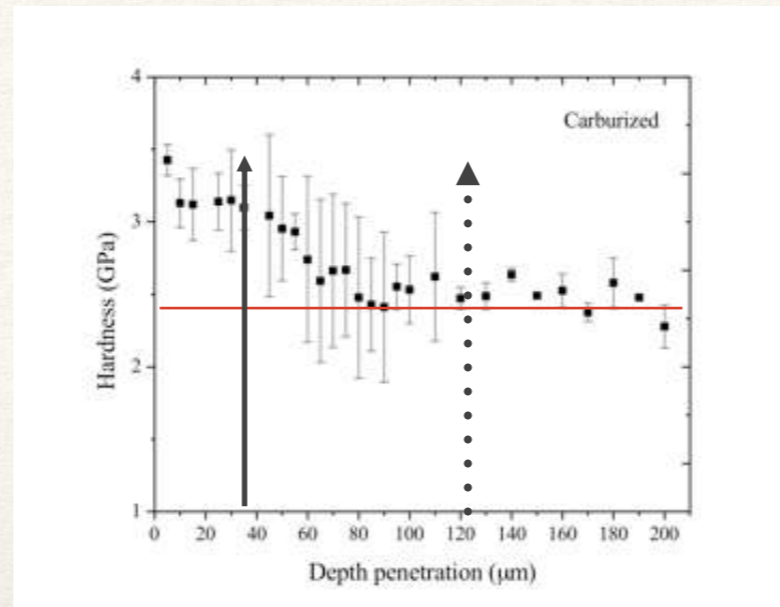
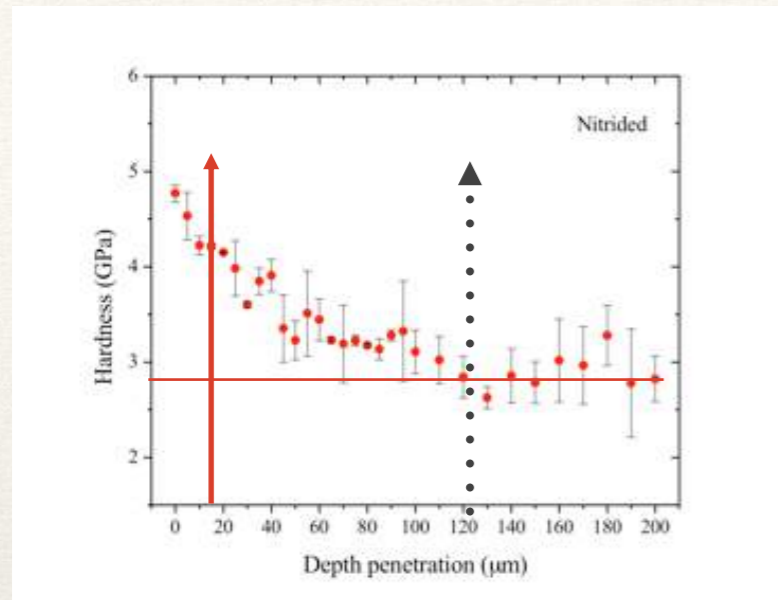
F = 2 mN

TPC + TPN



ULTRAMICRODUREZA Instrumentada: Um micro-olhar

F= 100 mN



Blawert (2000) mostrou que a zona de difusão (i.e. profundidade de tratamento) é mais profunda

que os perfis de concentração dos elementos obtidos por GDOES.

Este fato foi atribuído à resolução de detecção de concentração de um dado elemento por esta técnica.

Por exemplo, Em aços ferríticos a solubilidade do nitrogênio é menor que $< 0,00001\%C$ e o GDOES não detectaria valores de concentração de nitrogênio abaixo de $0,1\%N$.

Ou seja, existe nitrogênio suficiente em profundidades maiores que as detectadas por GDOES.

O que o GDOES não vê, a ultramicrodureza viu!

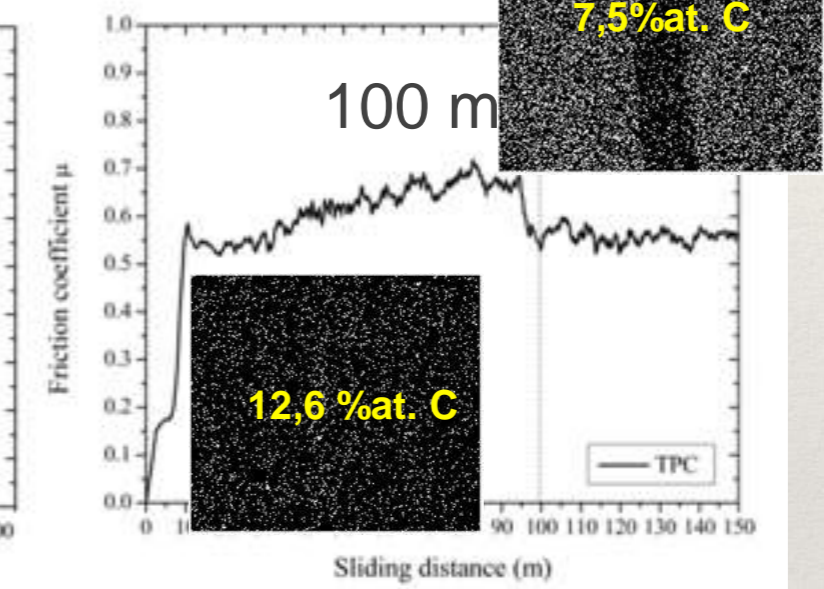
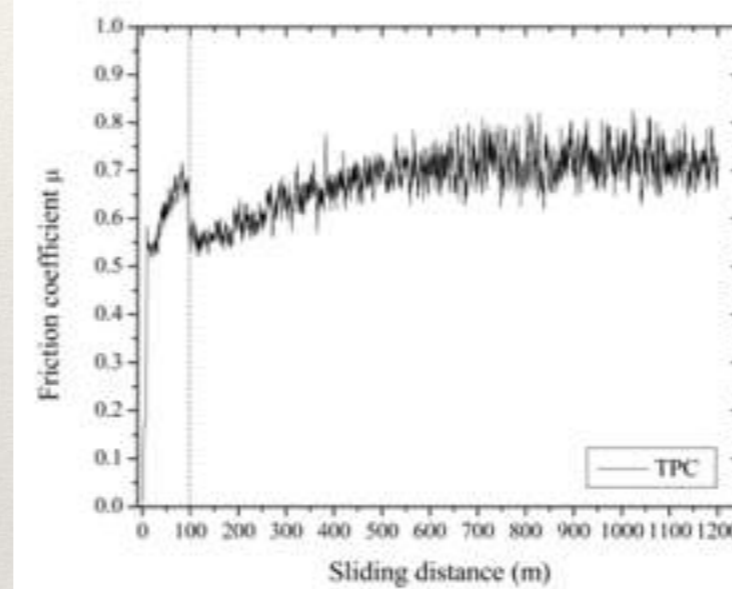
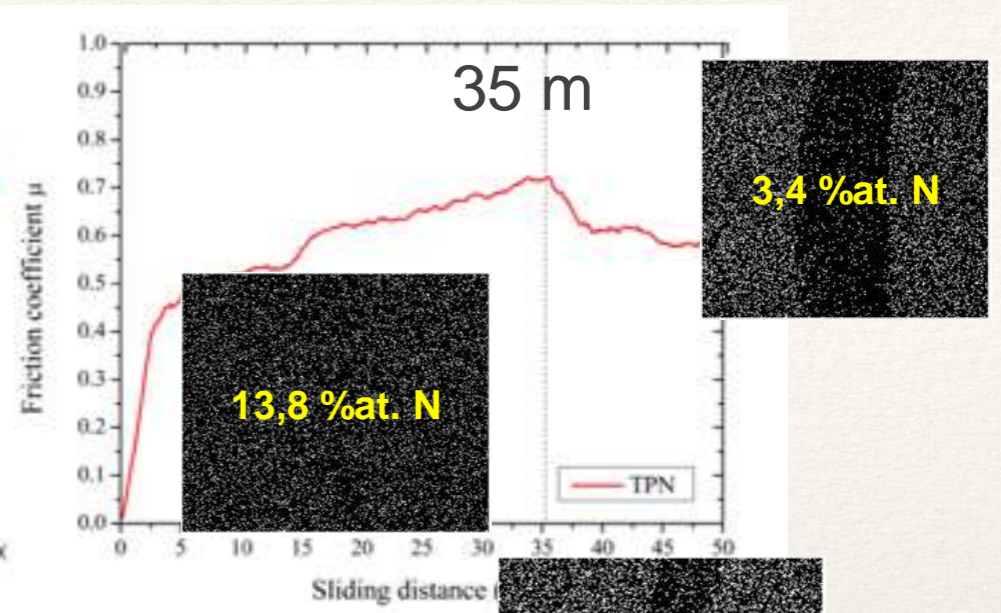
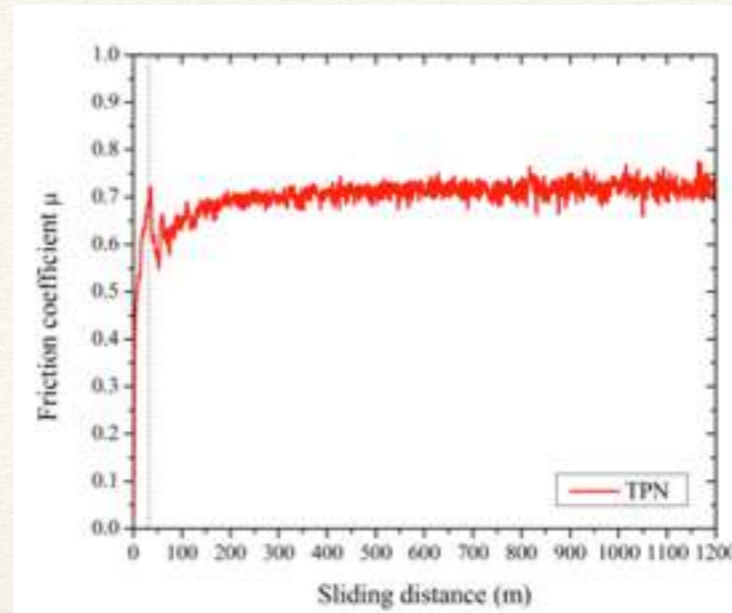
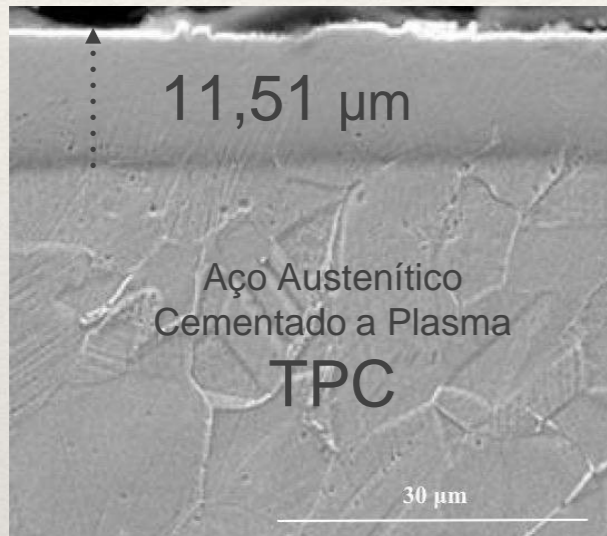
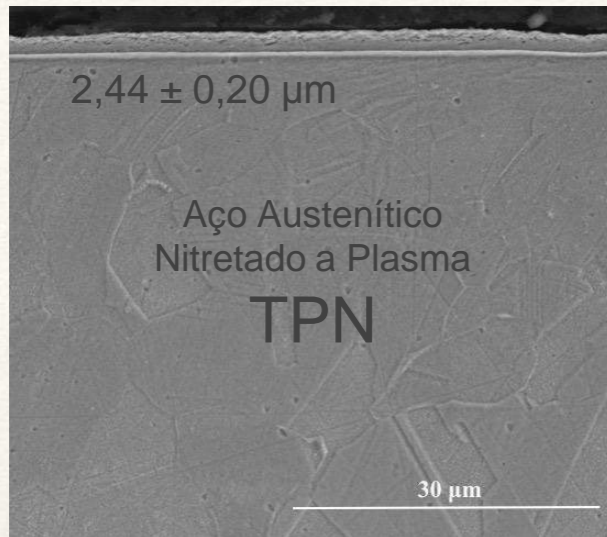
Um caso de Propriedade Emergente?

“In [physics](#), emergence is used to describe a property, law, or phenomenon which occurs at macroscopic scales (in space or time) but not at microscopic scales, despite the fact that a macroscopic system can be viewed as a very large ensemble of microscopic systems”. (De: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Emergência>, 05/05/2015 e RÉMY LESTIENNE).

Fricção. As partículas elementares não possuem fricção, ou mais precisamente as forças entre estas partículas são conservativas. Entretanto, a fricção emerge quando consideramos estruturas mais complexas de matérias, cujas superfícies podem absorver energia quando esfregadas uma contra a outra. Considerações similares são aplicadas aos conceitos emergentes na mecânica contínua tais como como a viscosidade e elasticidade.

Seria a dureza e/ou a deformação plástica propriedades emergentes? Uma quantidade grande de matéria forneceria maior precisão na sua medição? O que é precisão de uma medida?

Transição nos regimes de desgaste por deslizamento, em Tempos de Nanotecnologia



TPN

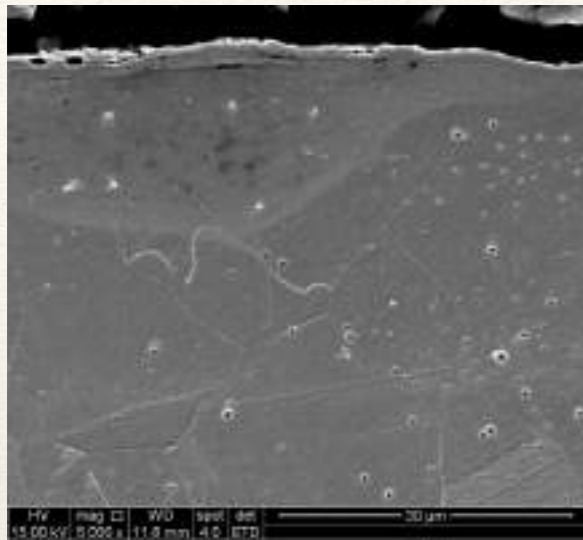
TPC

| Distância de Escorregamento (m) | Wt (μm) | V (volume de desgaste), mm^3 |
|---------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| 1200 | 405,5 | 18,3 |
| 200 | 99,7 | |
| 50 | 42,9 | |
| 25 | 5,6 | |

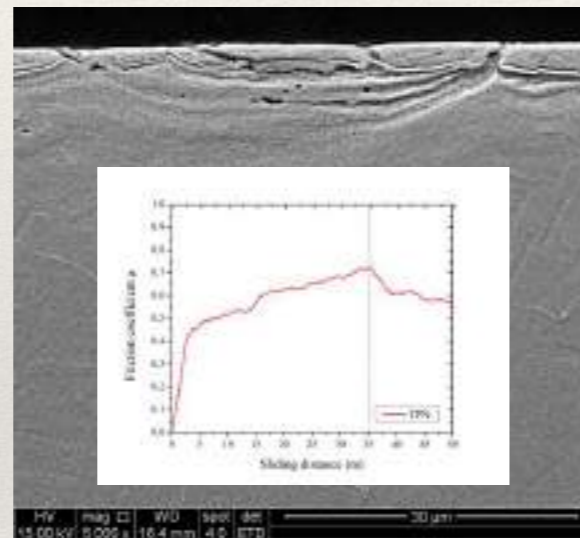
| Distância de Escorregamento (m) | Wt (μm) | V (volume de desgaste), mm^3 |
|---------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| 1200 | 325,5 | 10,1 |
| 200 | 9,8 | |
| 100 | 7,7 | |
| 50 | 5 | |

Transição nos regimes de desgaste por deslizamento, em Tempos de Nanotecnologia

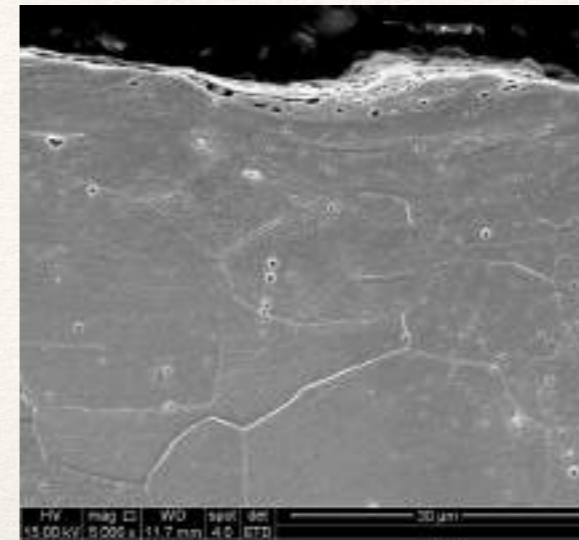
Sem DESGASTE



Desgaste na Região de alta concentração de nitrogênio ou carbono



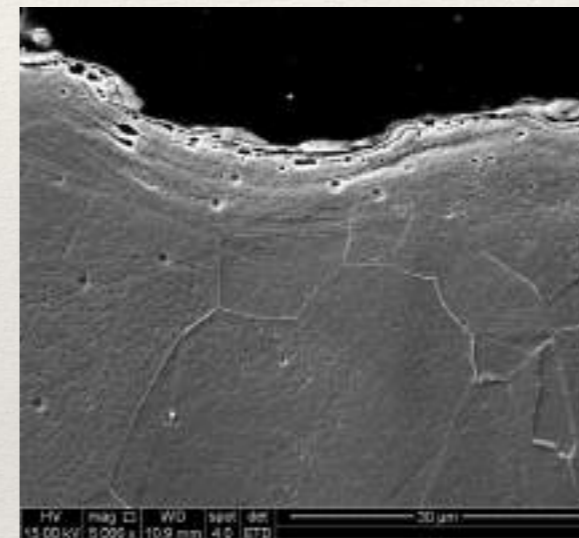
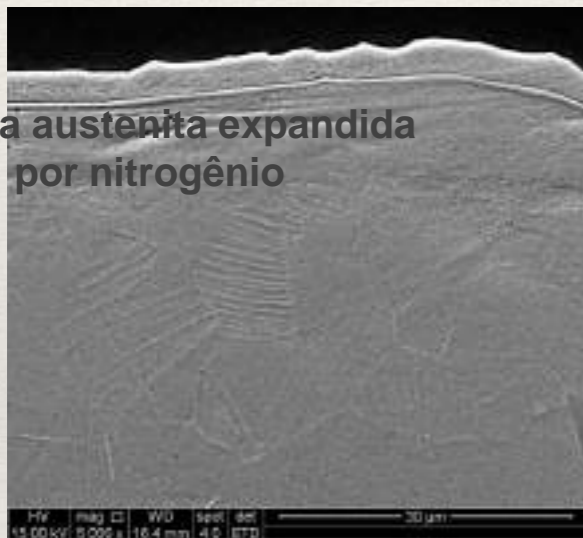
Desgaste em 1200m



Aço inoxidável austenítico AISI 316L

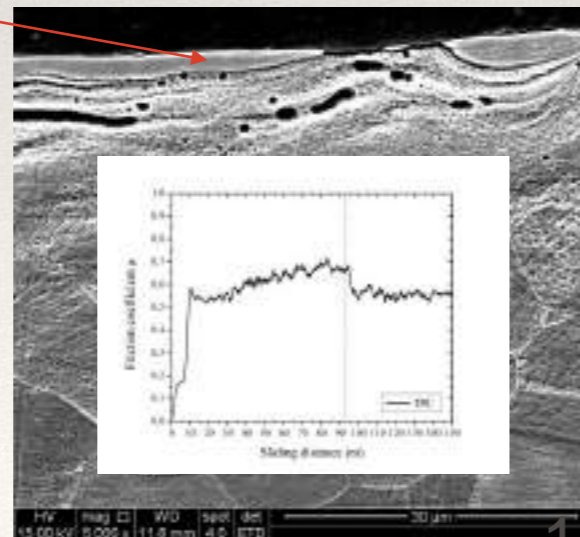
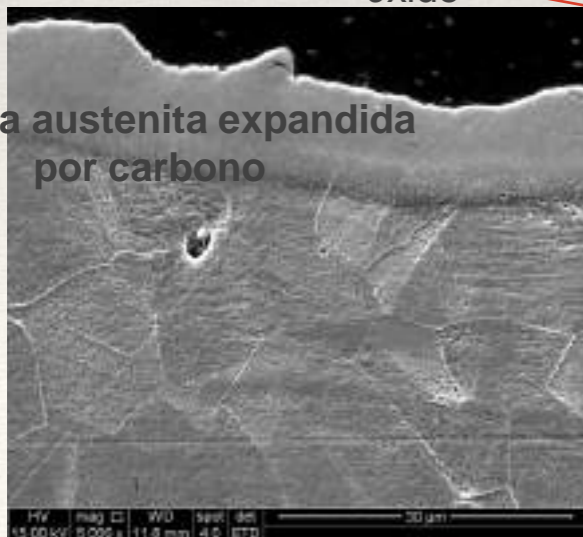
TPN

camada austenita expandida por nitrogênio



óxido

camada austenita expandida por carbono



TPC
Dimas Pacheco,
aluno em orientação,
TFC2015

Em Tempos de Nanotecnologia, temos:

- A Dureza dependendo da força aplicada,
- A Dureza apresentando unidade dimensional (em geral, GPa)
- As propriedades voltam a ser correlacionadas com a composição química (GDOES x Nanodureza).
- A Dureza sendo medida “*graficamente*” e “*matematicamente*”,
- O período de “regime permanente” em testes de desgaste podem apresentar um tempo de existência mínimo, compatível com o volume de endurecimento detectado no equipamento.

DUARTE, M.C.S., GODOY, CRISTINA, WILSON, J.C.A.B., Analysis of sliding wear tests of plasma processed AISI 316L steel. Surface & Coatings Technology, v.260, p.316 - 325, 2014.

Síntese

O novo não está propriamente no instrumento ou em novas fontes, mas em um novo modo de olhar (Carlos Antônio Brandão, 2005)



Noonday Rest, 1866 :
Jean-François Millet,
1866



La sieste
Van Gogh. 12/1889 e
01/1890.

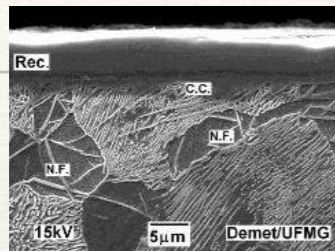


OBRIGADA!

Um Doce Olhar



Engenharia de Superfície: PAPVD (1994-2015)



RECOBRIMENTO DÚPLEX (DUPLEX COATING)

| Sistemas Dúplex | L_{C1} (N) | LC (95%) | L_{C2} (N) | LC (95%) |
|---|--------------|---------------|--------------|-----------------|
| $T_{\text{assimetria}} = 573\text{K}_1$ $t_{\text{aque}} = 10 \text{ min}$ | 36,3 | [31,8 - 40,7] | 152,1 | [143,6 - 160,6] |
| $T_{\text{assimetria}} = 573\text{K}_1$ $t_{\text{aque}} = 0 \text{ min}$ | 37,7 | [34,3 - 41,0] | 152,8 | [143,5 - 162,1] |
| $T_{\text{assimetria}} = 773\text{K}_1$ $t_{\text{aque}} = 20 \text{ min}$ | 37,5 | [33,1 - 40,7] | 150,5 | [143,4 - 157,6] |
| $T_{\text{assimetria}} = 573\text{K}_1$ $t_{\text{aque}} = 20 \text{ min}$ | 35,4 | [30,6 - 40,3] | 147,5 | [141,4 - 153,6] |
| Non-Duplex (Ti-N) | 25,7 | [22,5 - 29,0] | 52,3 | [49,4 - 55,2] |

lha adesiva, e intervalos de confiança IC (95%). (BATISTA, J.C.A, 2001).