

Laboratório de Tribologia e Materiais



Abrasão em mineração

Comparação campo-laboratório

Washington Martins da Silva Junior
Carlos A. Damião

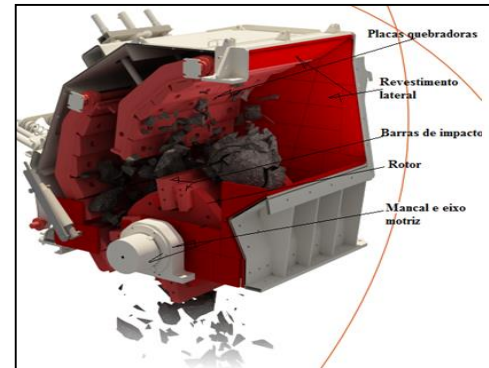


Moqueca Tribológica v.04



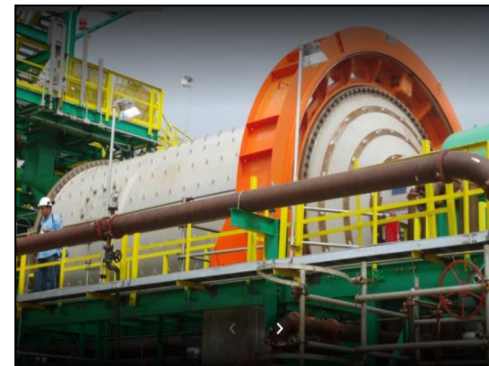


Motivação do estudo



Desgaste em geral pode chegar até 15% do custo de manutenção em mineração de níquel (Relatório custo de produção anual da Anglo American – Níquel- Brasil, 2016).

Entender os processos e mecanismos de desgastes.

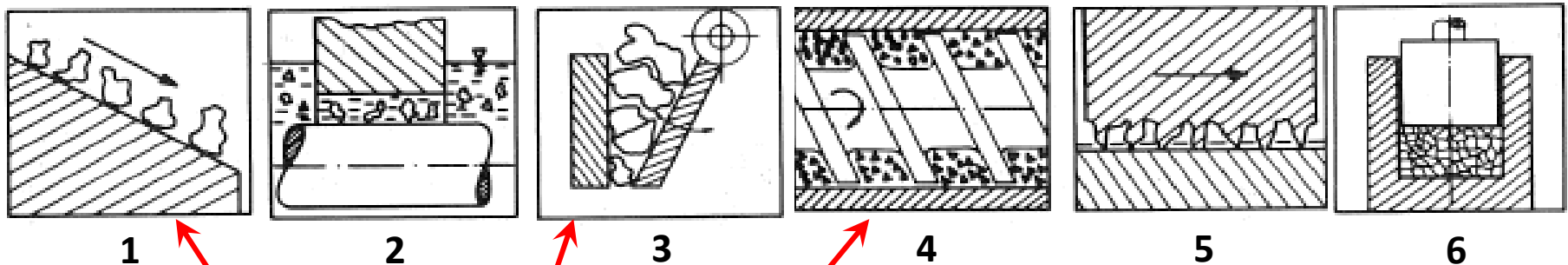




Aplicações em mineração

Sistemas tribológicos em que abrasão é o tipo de desgaste predominante

ZUM GAHR (1987)



Aços resistentes ao desgaste

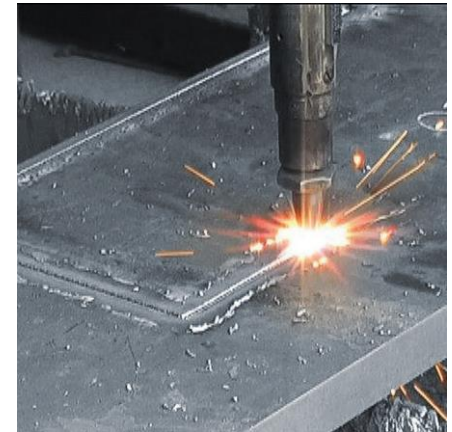
1. Chute, calhas
2. Flux. hidráulico
3. Britadores
4. Transportador de rosca
5. Contracorpo com protuberâncias
6. Prensagem (metalurgia do pó)



Empresa parceira

MinerMinas Soluções em Aço Para Desgaste (GRUPO GODOSAN)

Entender melhor o produto que estavam vendendo – placas resistentes a abrasão
Entender o comportamento de quatro materiais do catálogo.





Metodologia



Materiais

A		X		U		R		CAMPO	
Elemento	Valor	Elemento	Valor	Elemento	Valor	Elemento	Valor	Elemento	Valor
V	0,0022	V	0,000	V	0,0020	V	0,0019	V	0,0018
Nb	0,0032	Nb	0,002	Nb	0,0041	Nb	0,0041	Nb	0,0019
W	0,0032	W	0,002	W	0,0061	W	0,0055	W	0,0032
Mo	0,0043	Mo	0,004	Mo	0,0051	Mo	0,0050	Mo	0,0010
Ni	0,0101	Ni	0,014	Ni	0,0116	Ni	0,0114	Ni	0,0093
Cr	0,0307	Cr	0,035	Cr	0,0175	Cr	0,0192	Cr	0,0347
Si	0,2281	Si	0,220	Si	0,2063	Si	0,2050	Si	0,0229
C	0,4773	C	0,618	C	0,4547	C	0,4521	C	0,010
Mn	1,2548	Mn	0,666	Mn	1,3048	Mn	1,2817	Mn	1,2567

ASM-Metals Handbook. Vol 1.



Classificação

SAE-AISI

A 1552

X 9763

U 15480

R 15480

Campo

A588-D

Textura metalúrgica





Peça de campo desgastada

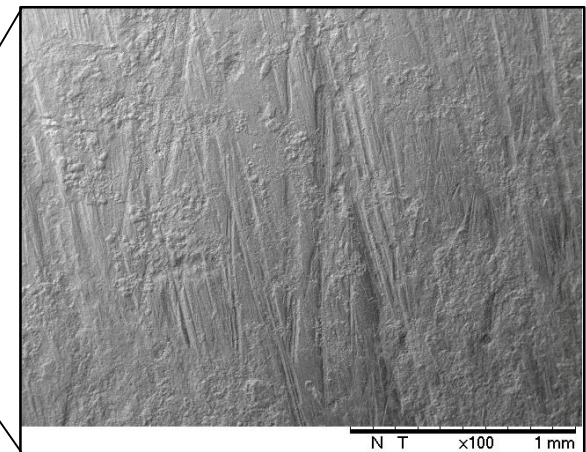
Equipamento: pá carregadeira.
Local de trabalho: lavra de minério.
Parte do equipamento: caçamba.
Peça de desgaste: lâmina frontal face superior.
Nome comercial: lâmina bico de pato.



Amostra desgastada em campo.



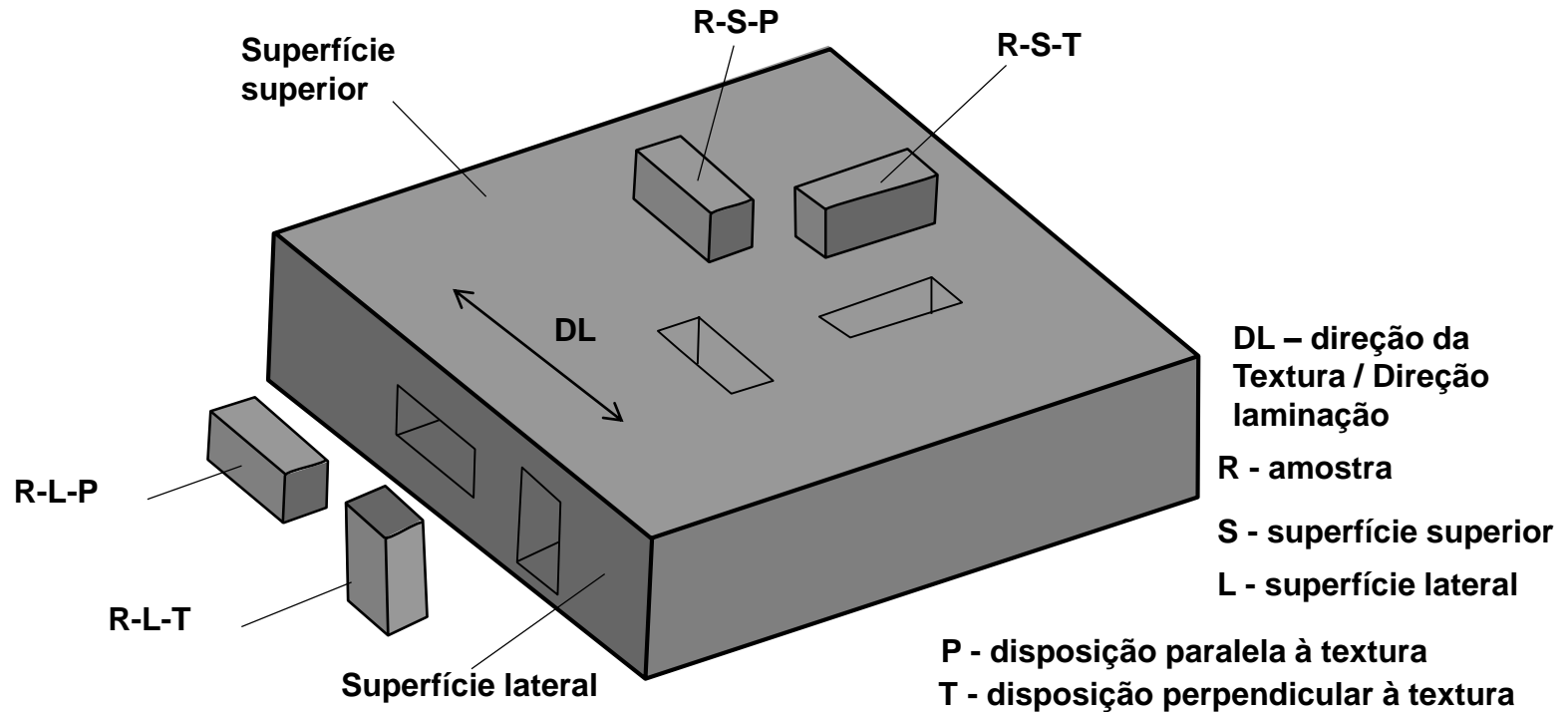
Lâmina bico de pato típica.



MEV da superfície desgastada em campo.



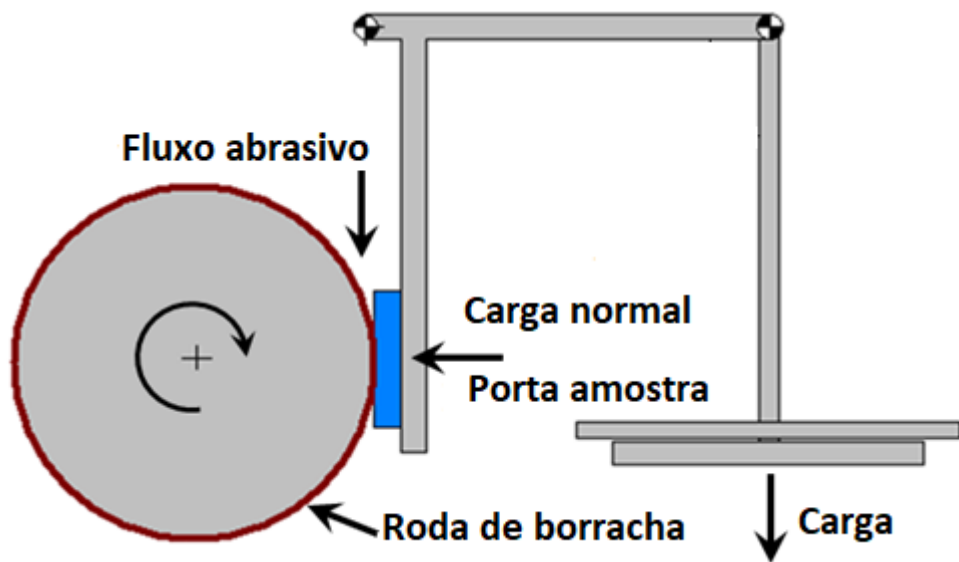
Amostras



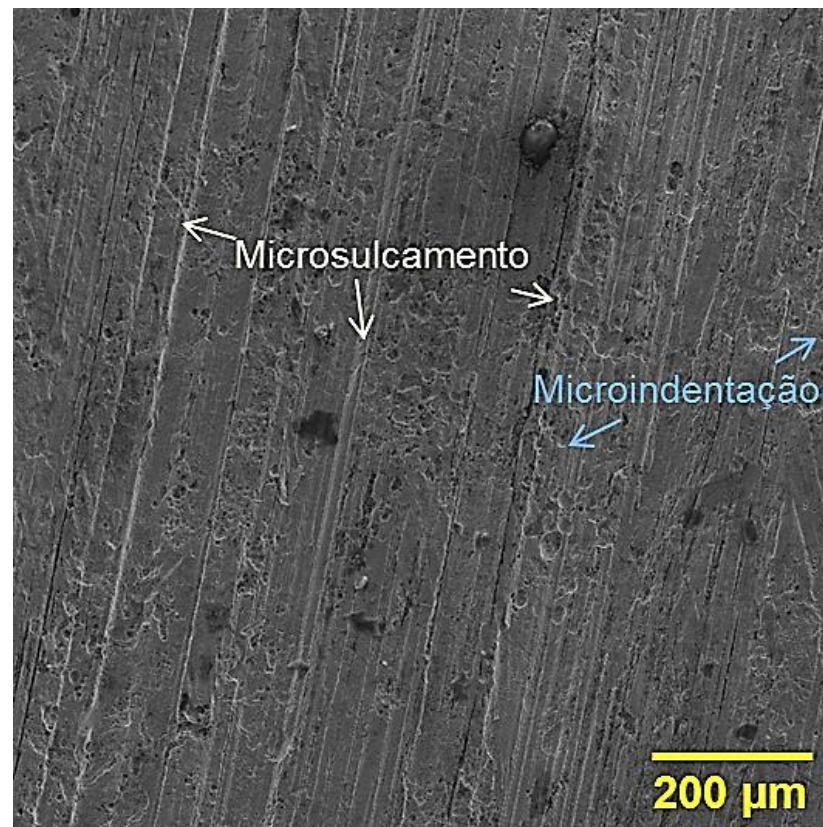
Posição de retirada das amostras das superfícies conforme direção da laminação (DL).



Teste de desgaste



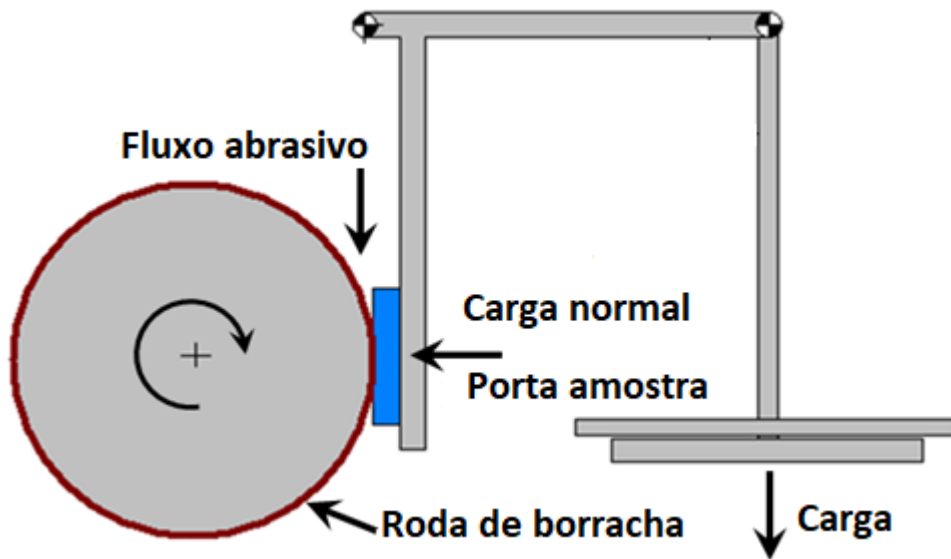
Abrasômetro roda de borracha - LTM



Amostra de Campo



Teste de desgaste - roda de borracha



Abrasômetro roda de borracha - LTM

PARÂMETROS	
Procedimento A ASTM G-65-04	
Fluxo de abrasivo	300-400 [g/min]
Tempo	30 [minutos]
Rotação	200 [RPM]
Carga normal	77,5 [N]
Borracha	Clorobutílica (60 ± 2 Shore A)
Tempo para coleta dados	A cada 5 minutos de teste

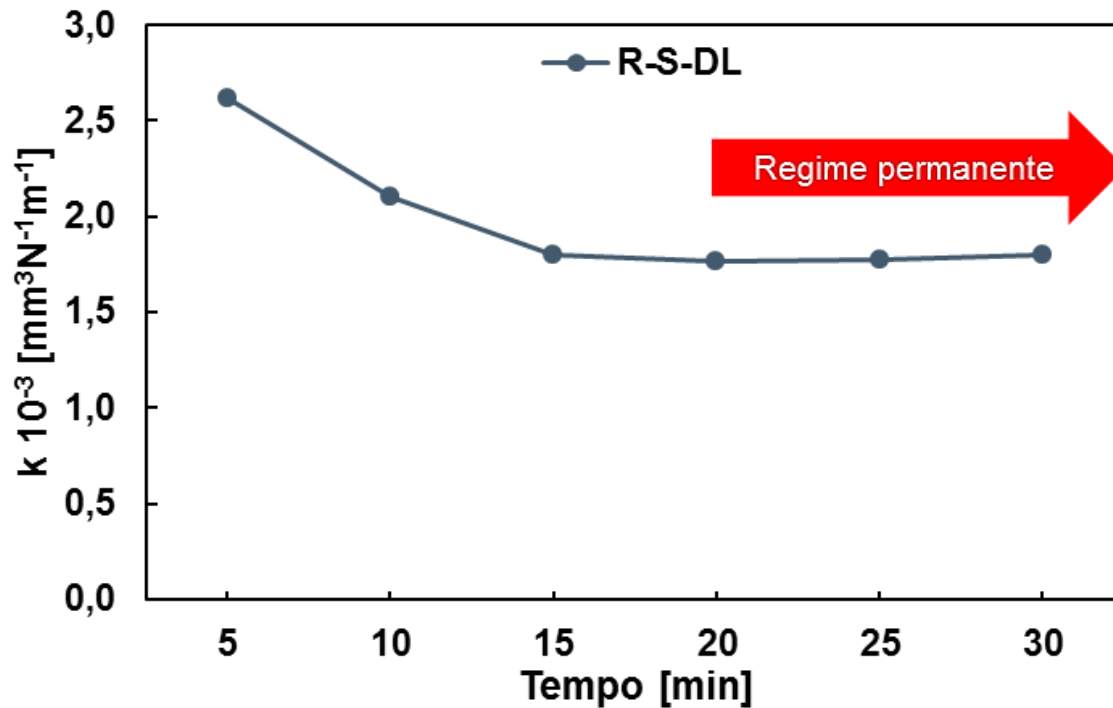
$$V = k \cdot F_N \cdot S$$
$$V = m/d$$



$$k = \frac{m}{d * L * F_N} \quad [\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$$



Teste de desgaste - roda de borracha

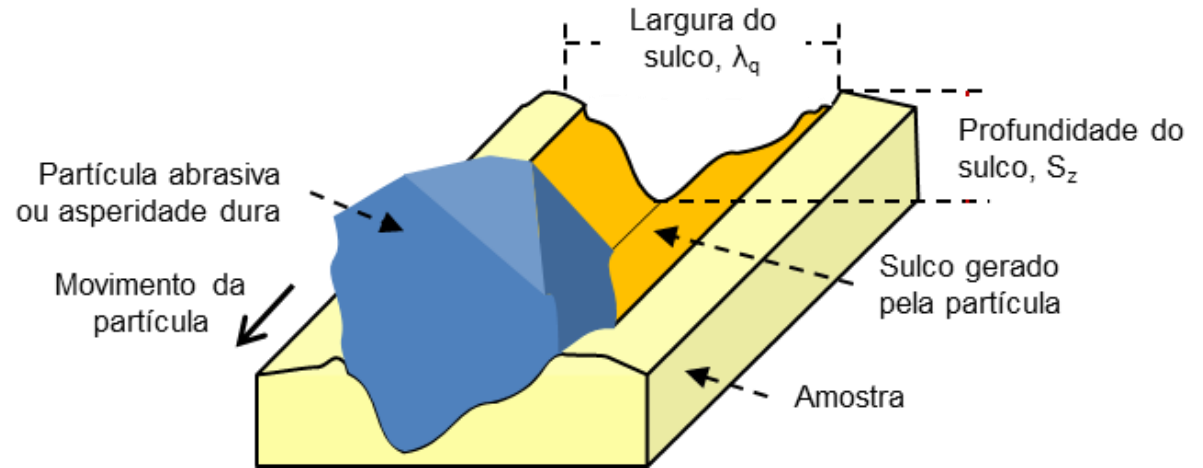


Regime permanente
Média móvel - erro relativo 5%

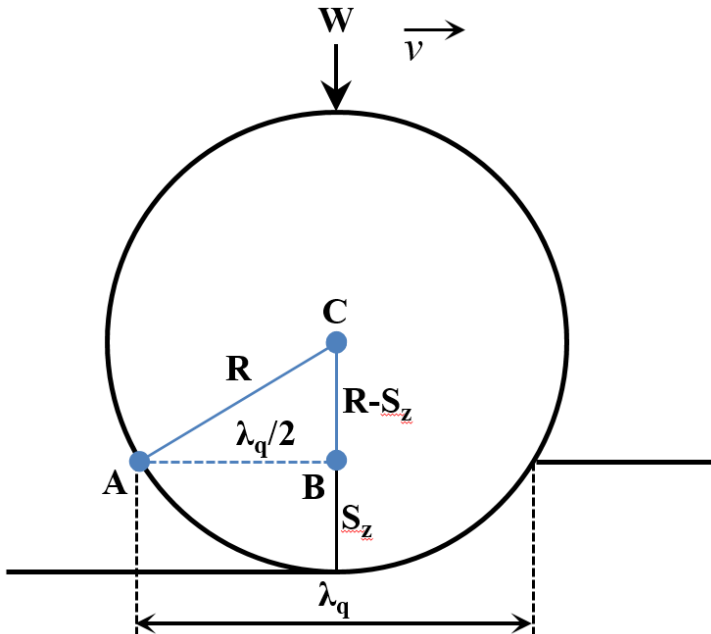
$$\begin{aligned} V &= k \cdot F_N \cdot S \\ V &= m/d \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad k = \frac{m}{d * L * F_N} \quad [\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$$



Definição do tamanho das partículas abrasivas



Modelo dos sulcos gerados por partículas abrasivas na amostra de campo.

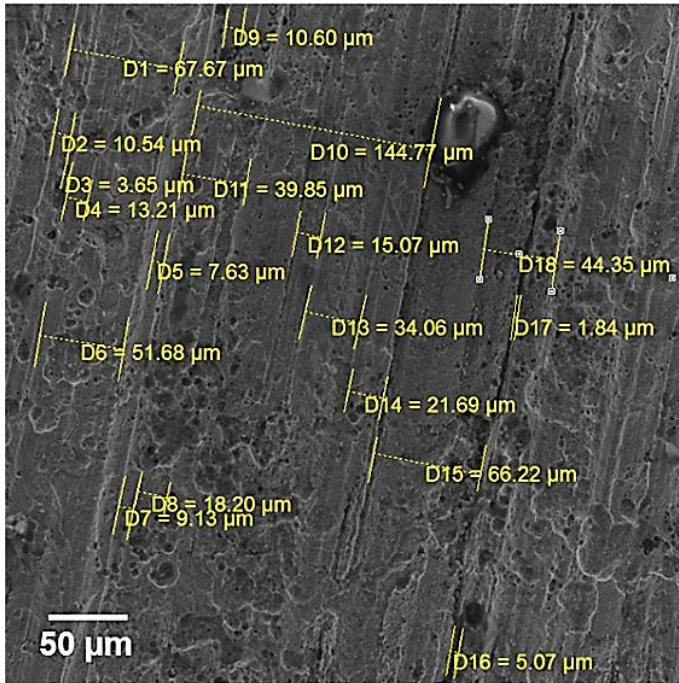


Modelo simplificado que permite o cálculo do raio da partícula abrasiva

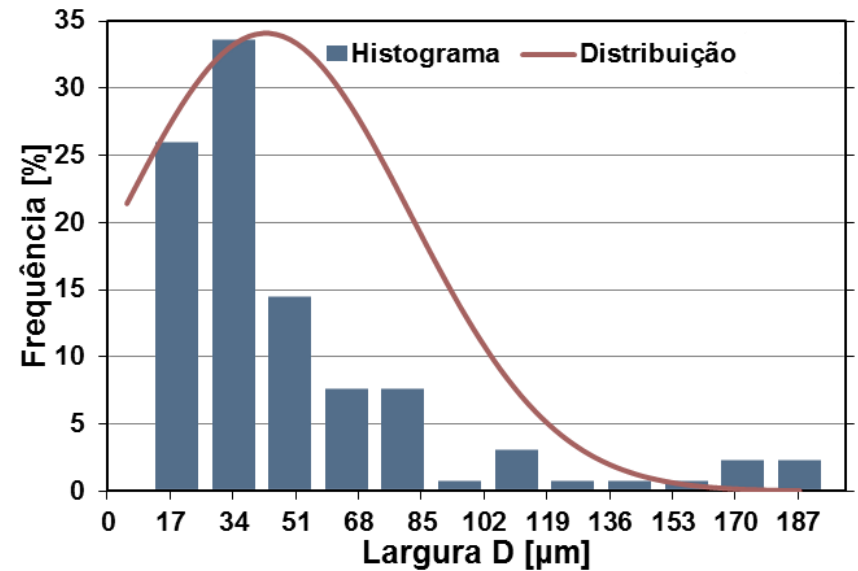
$$R = \frac{S_z^2 + \left(\frac{\lambda_q}{2}\right)^2}{2S_z} \text{ *cut-off?*}$$



Definição do tamanho das partículas abrasivas



Amostra de campo



Largura de eventos medidos nas imagens da amostra de campo

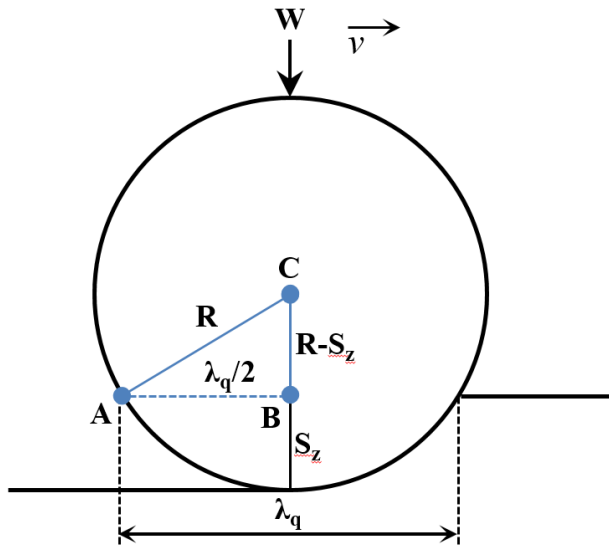


cut-off de 0,08 mm



Definição do tamanho das partículas abrasivas

Nesse modelo o parâmetro λ_q representa a largura média dos riscos/sulcos e o S_z a profundidade média do risco/sulco - **cálculo do raio da partícula abrasiva.**



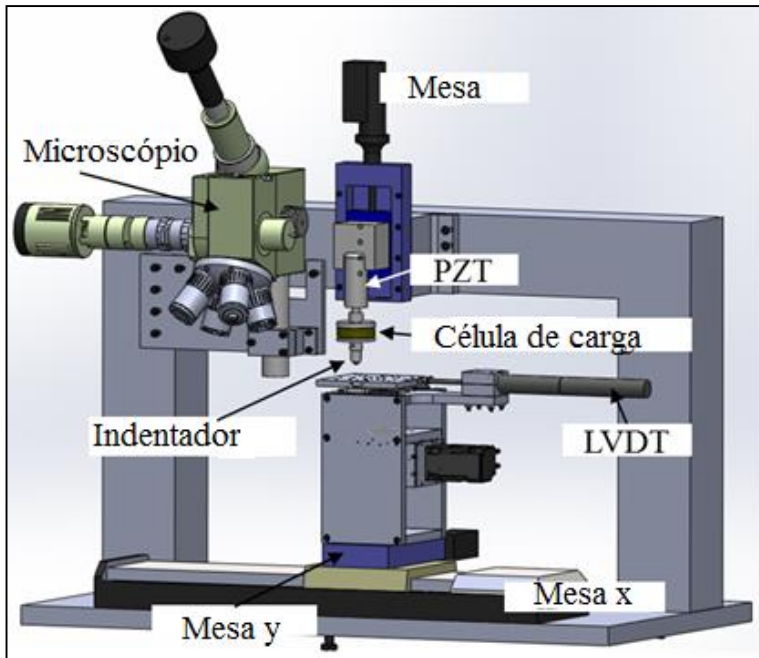
$$R = \frac{S_z^2 + \left(\lambda_q/2\right)^2}{2S_z}$$

Considerando o cut-off de 0,08 mm \rightarrow amostra de campo $S_z = 4,62 \mu\text{m}$ e $\lambda_q = 49 \mu\text{m}$ \rightarrow Diâmetro médio de **1,24 mm** para partícula abrasiva.

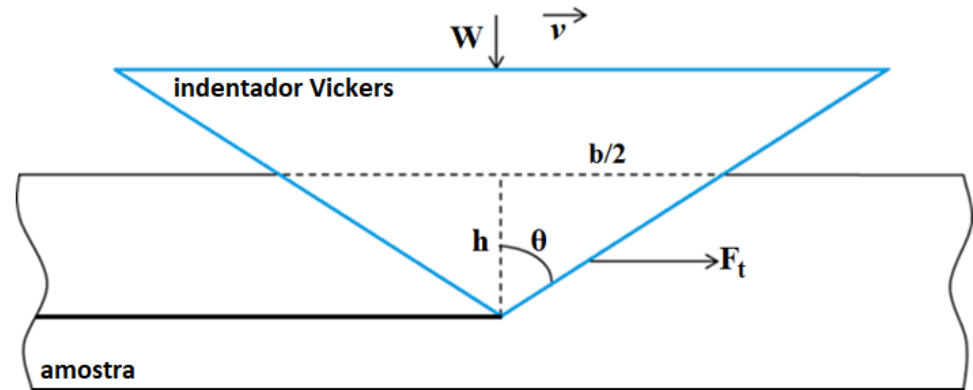
Areia (Sílica) nº 30 (IPT - peneira de 0,6 mm e granulometria entre 0,6 e 1,2 mm)



Esclerometria linear- energia específica



Esclerômetro linear LTM



$$e = F_t \cdot L / V$$

F_t - força tangencial

L - comprimento do risco

V - volume do risco

$$A = \frac{b \cdot h}{2}$$

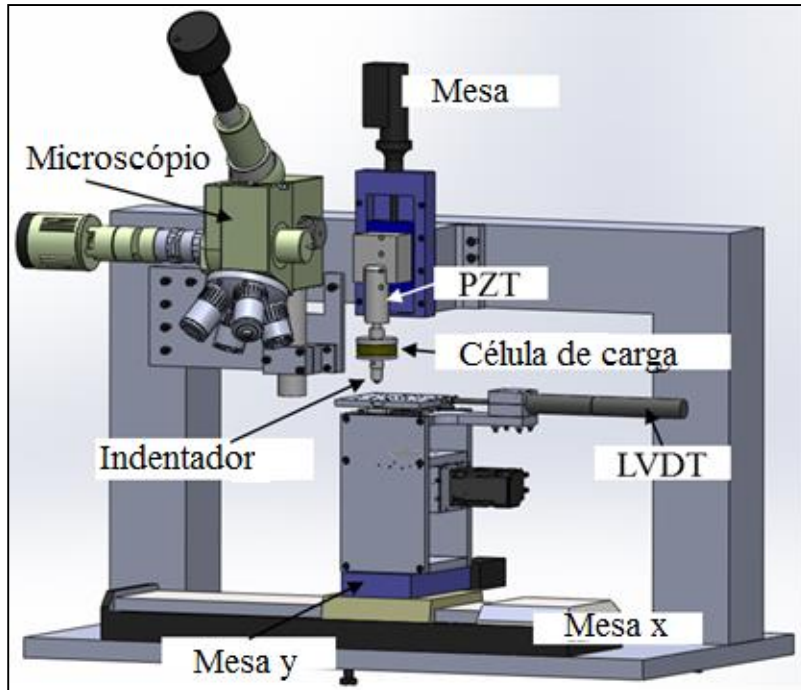
$$\Rightarrow A = \frac{b^2}{4 \cdot \text{tg}\theta} \Rightarrow V = A \cdot L \Rightarrow e = Ft \frac{L}{V}$$

$$h = \frac{b}{2 \cdot \text{tg}\theta}$$

$$e = 4 \cdot \text{tg}\theta \frac{F_t}{b^2}$$



Esclerometria linear- energia específica



Esclerômetro linear LTM

Parâmetros de teste

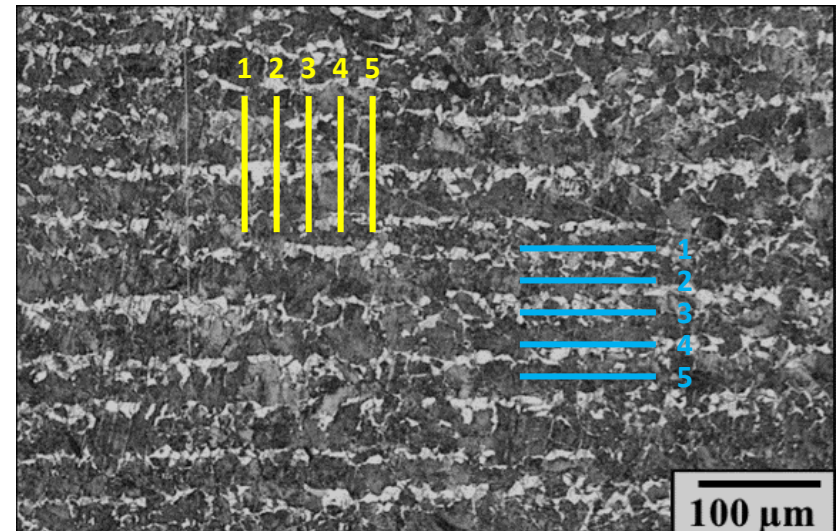
Indentador Vickers (68°)

Distância deslizada 4 mm

Velocidade 1 μm/s

Carga normal 1 e 10 N

$$e = 9,9 F_t / b^2$$





Testes e análises complementares

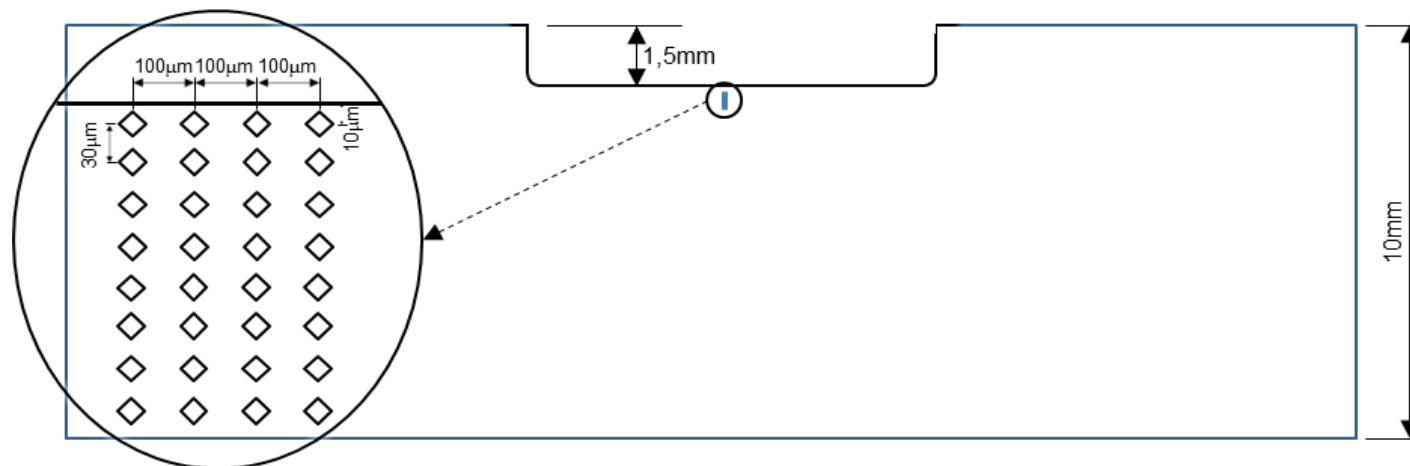
Microscopia eletrônica de varredura (MEV) - *TESCAN*[®] modelo *Vega3*

Interferometria laser 3D no equipamento *UBM Microfocus Expert IV*[®]

Software *Mountains Map Universal*[®] versão 3.1.9

Macro dureza, dureza Vickers 40 kgf - 30 seg - durômetro universal *Wolpert*[®]

Microdureza - *Shimadzu*[®] - HMV - carga 10 gf - 15 segundos – Vicker e Knoop

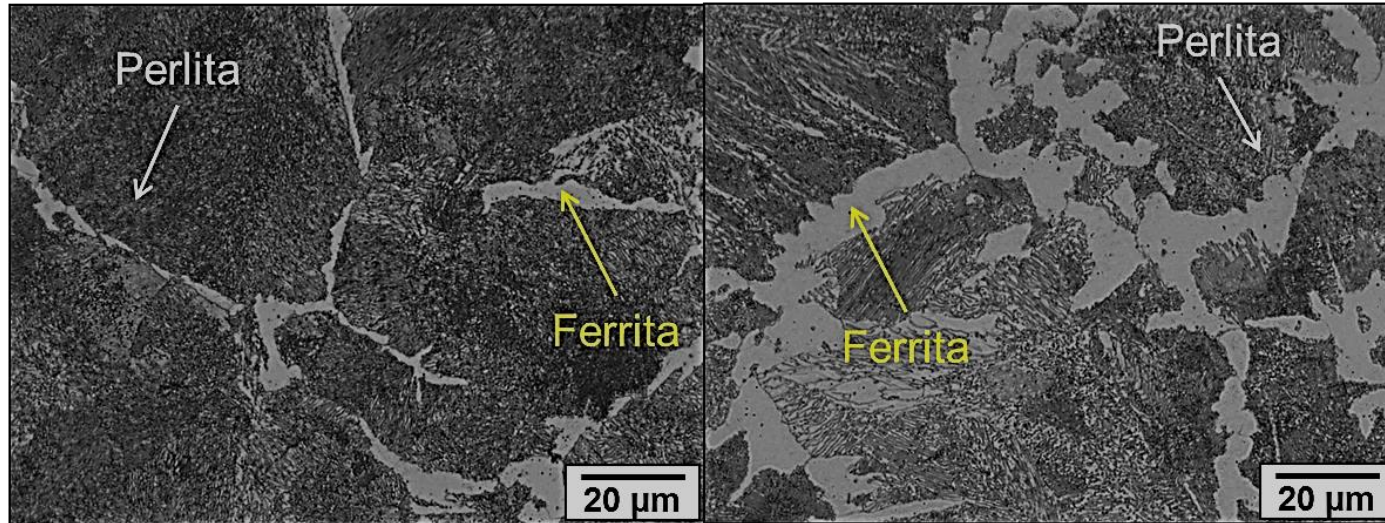




Resultados e Discussões

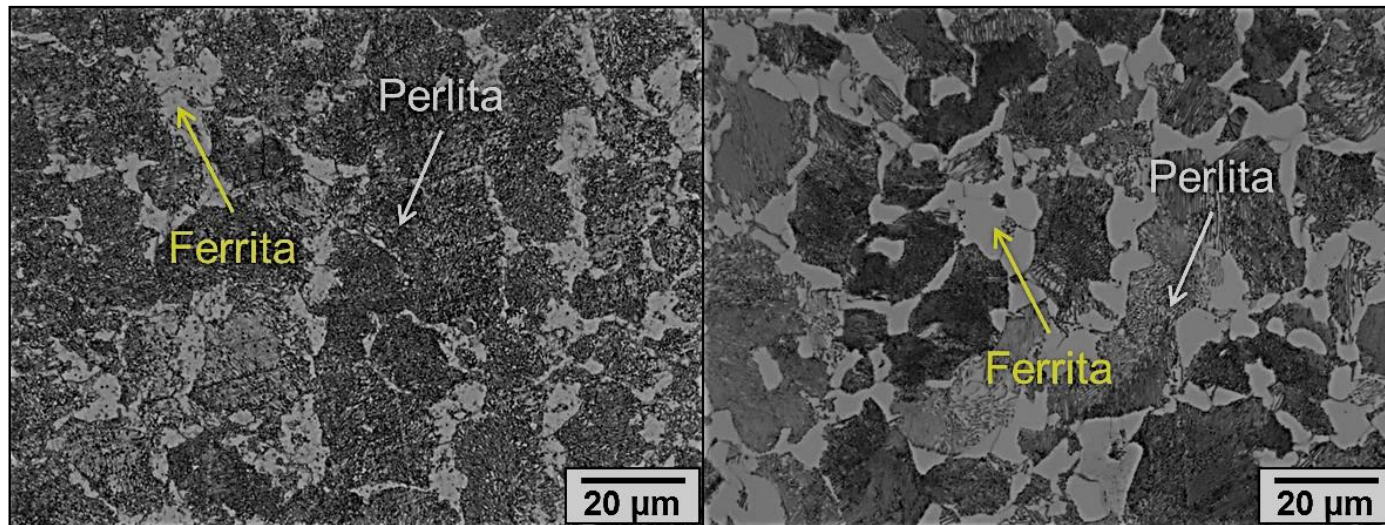


Microestrutura



A

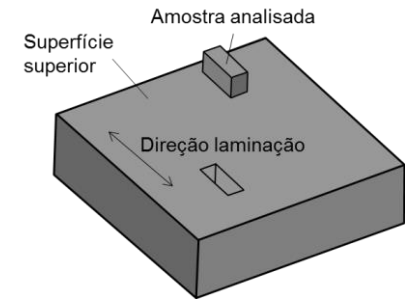
X



U

R

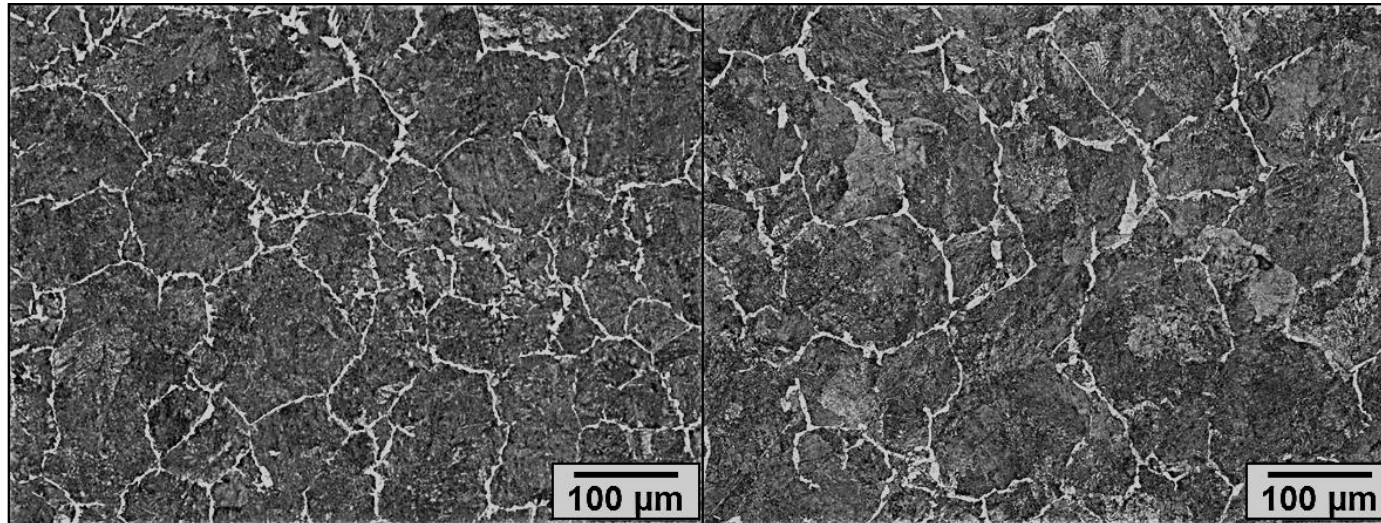
Superior



Microestrutura típica hipoeutetóide.

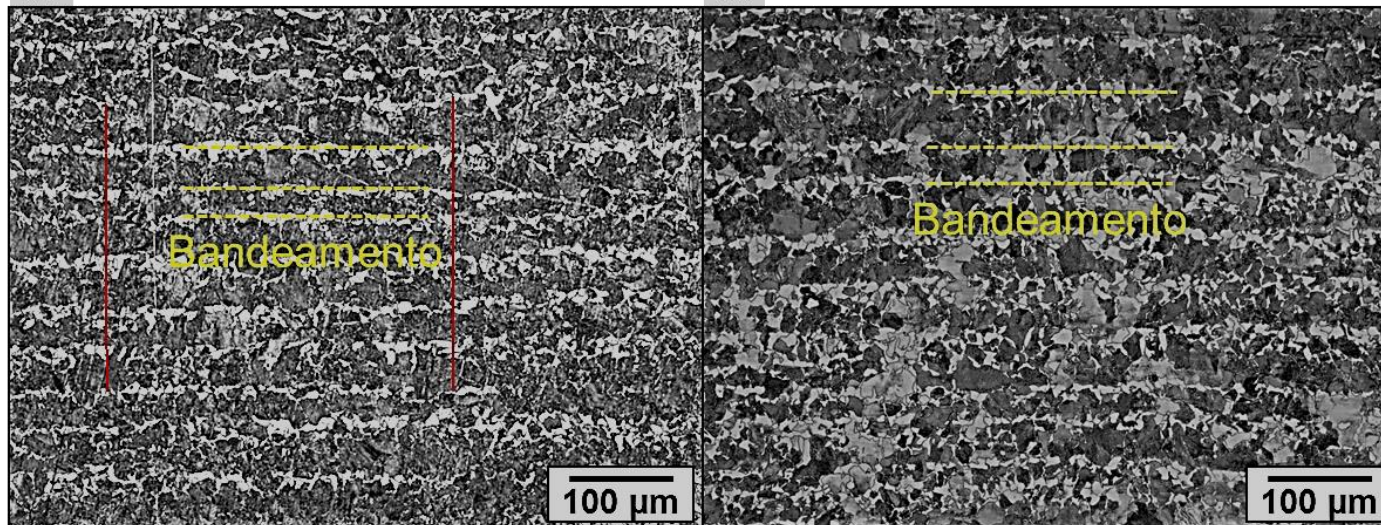


Microestrutura



A

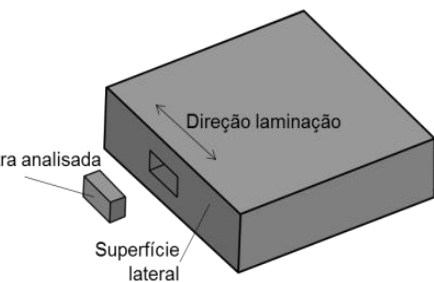
X



U

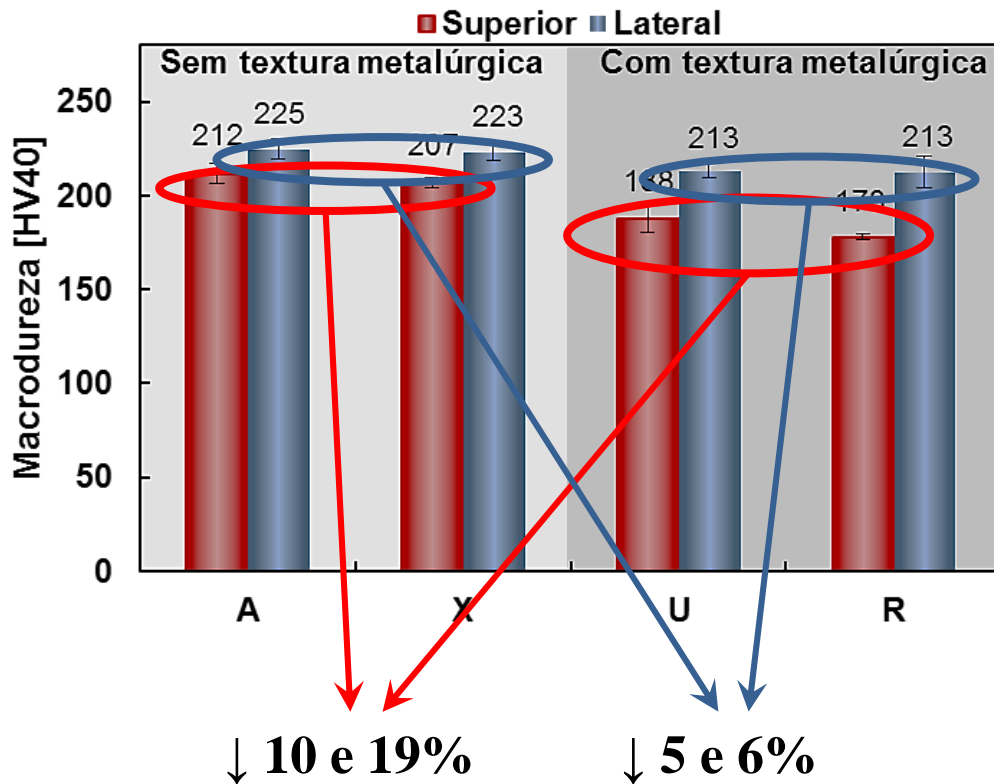
R

Lateral



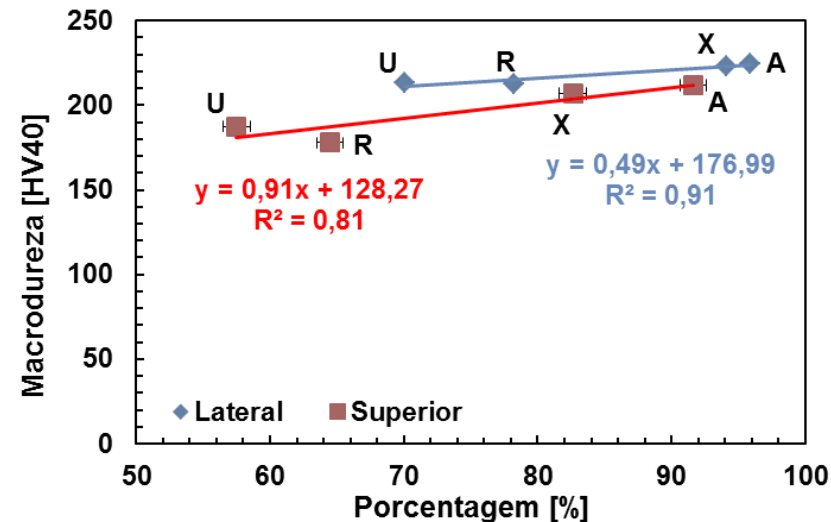
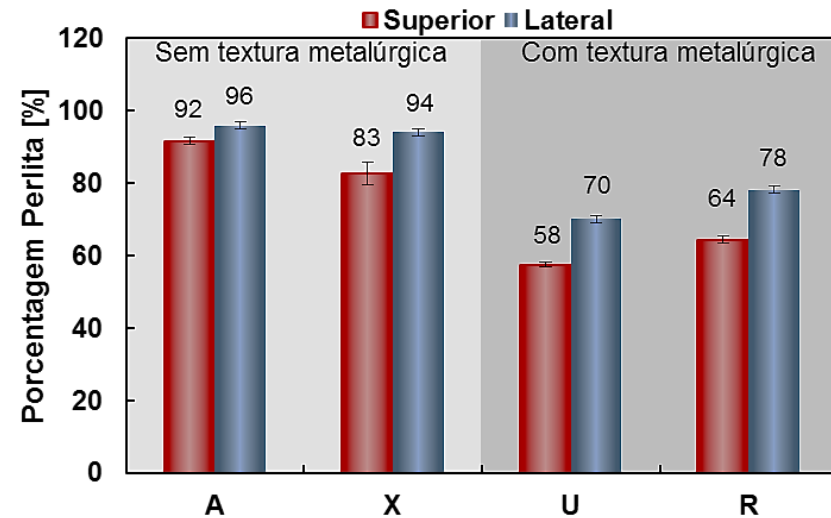
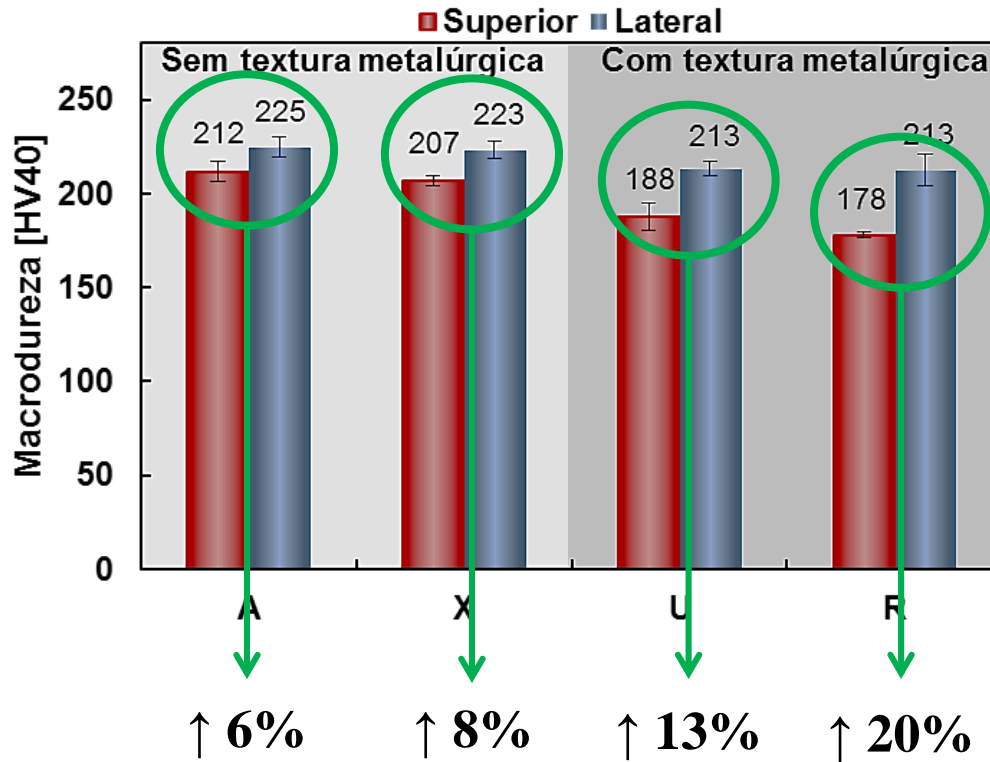


Macro dureza





Macro dureza



A fração de perlita influencia os resultados de macro dureza

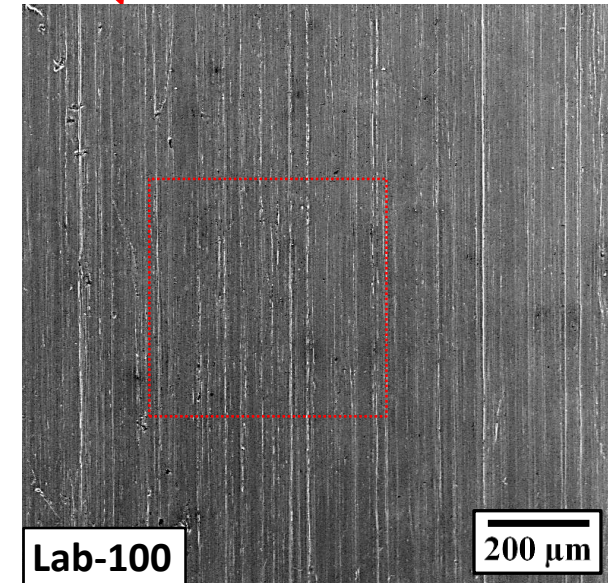
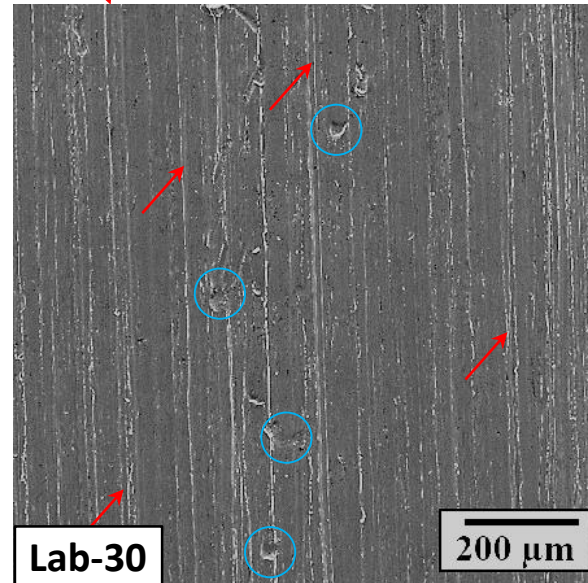
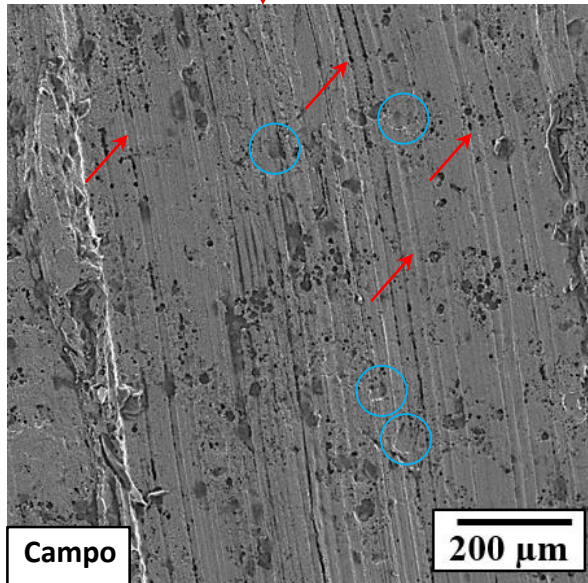
Maiores percentuais de perlita apresentam maiores durezas



Comparação: Campo x Laboratório

DEFINIÇÃO DO TAMANHO DA PARTÍCULA

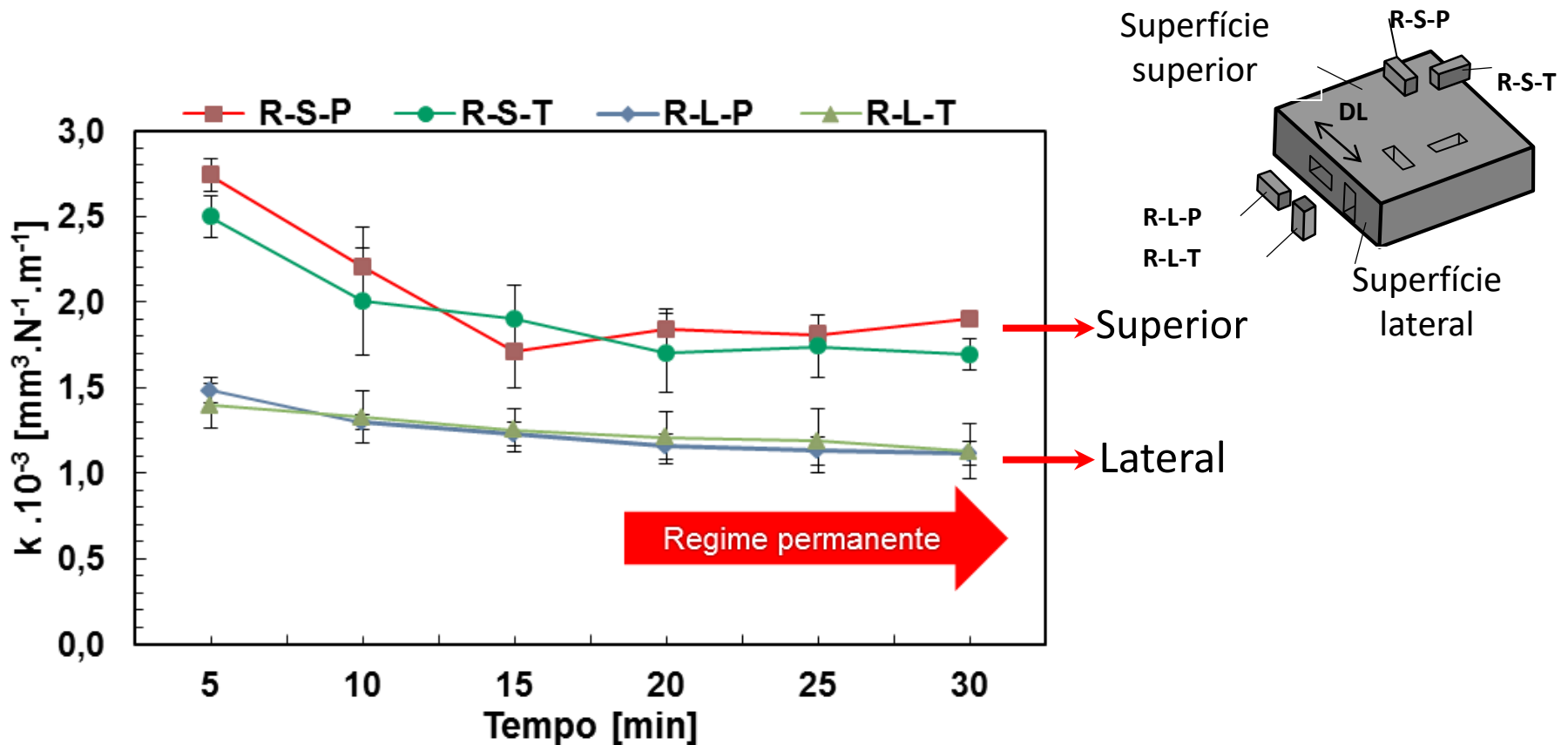
	Campo	Laboratório nº30	Erro nº30	Laboratório nº100	Erro nº100
S_q (μm)	0,147	0,160	8,8 %	0,117	20,2 %
S_z (μm)	0,524	0,510	2,7 %	0,547	4,2 %
λ_q (μm)	53,0	68,0	28,3 %	10,0	81,1 %





Desgaste abrasivo

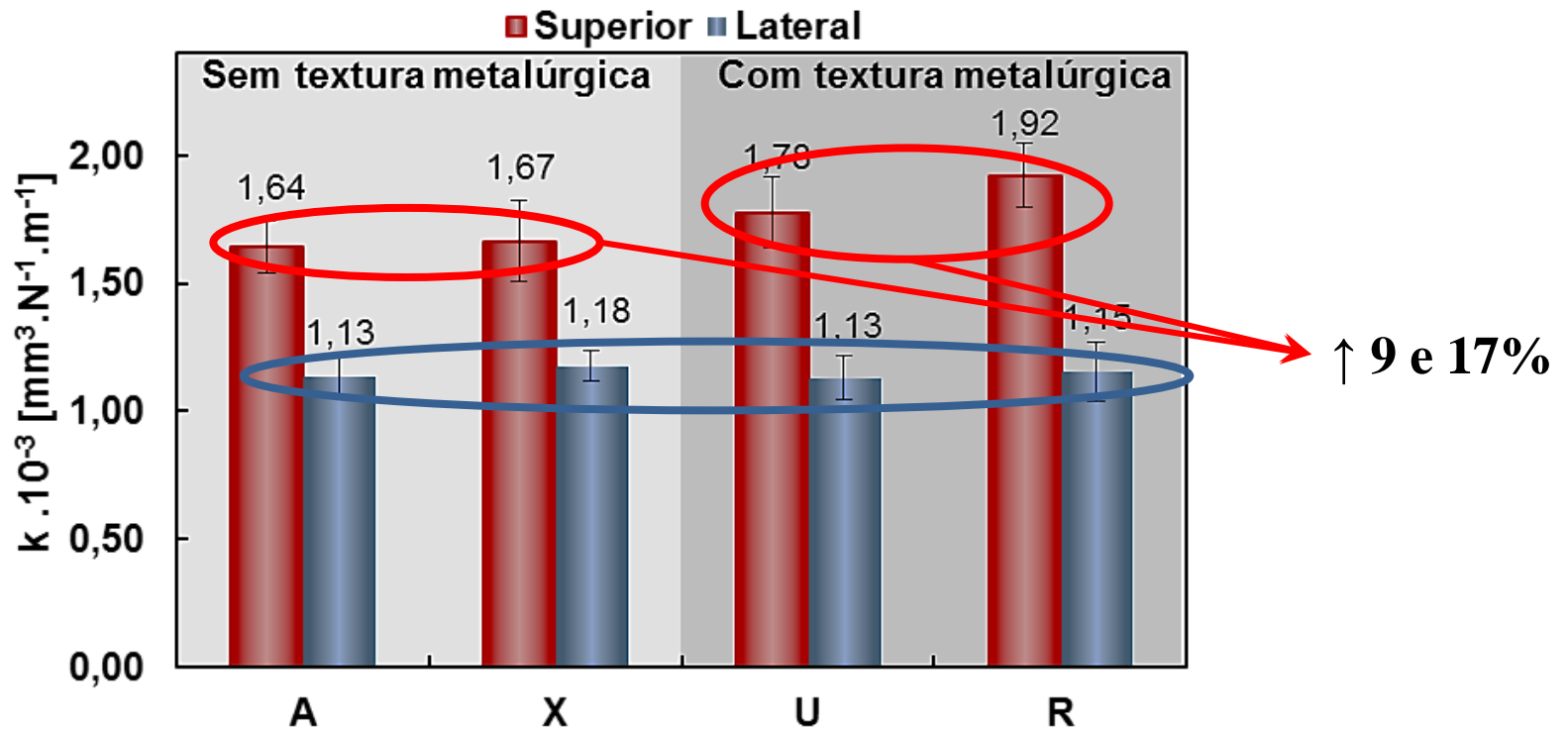
MOVIMENTO DA PARTÍCULA X DIREÇÃO DE LAMINAÇÃO



A direcionabilidade dos testes não influencia a taxa desgaste para a mesma superfície.

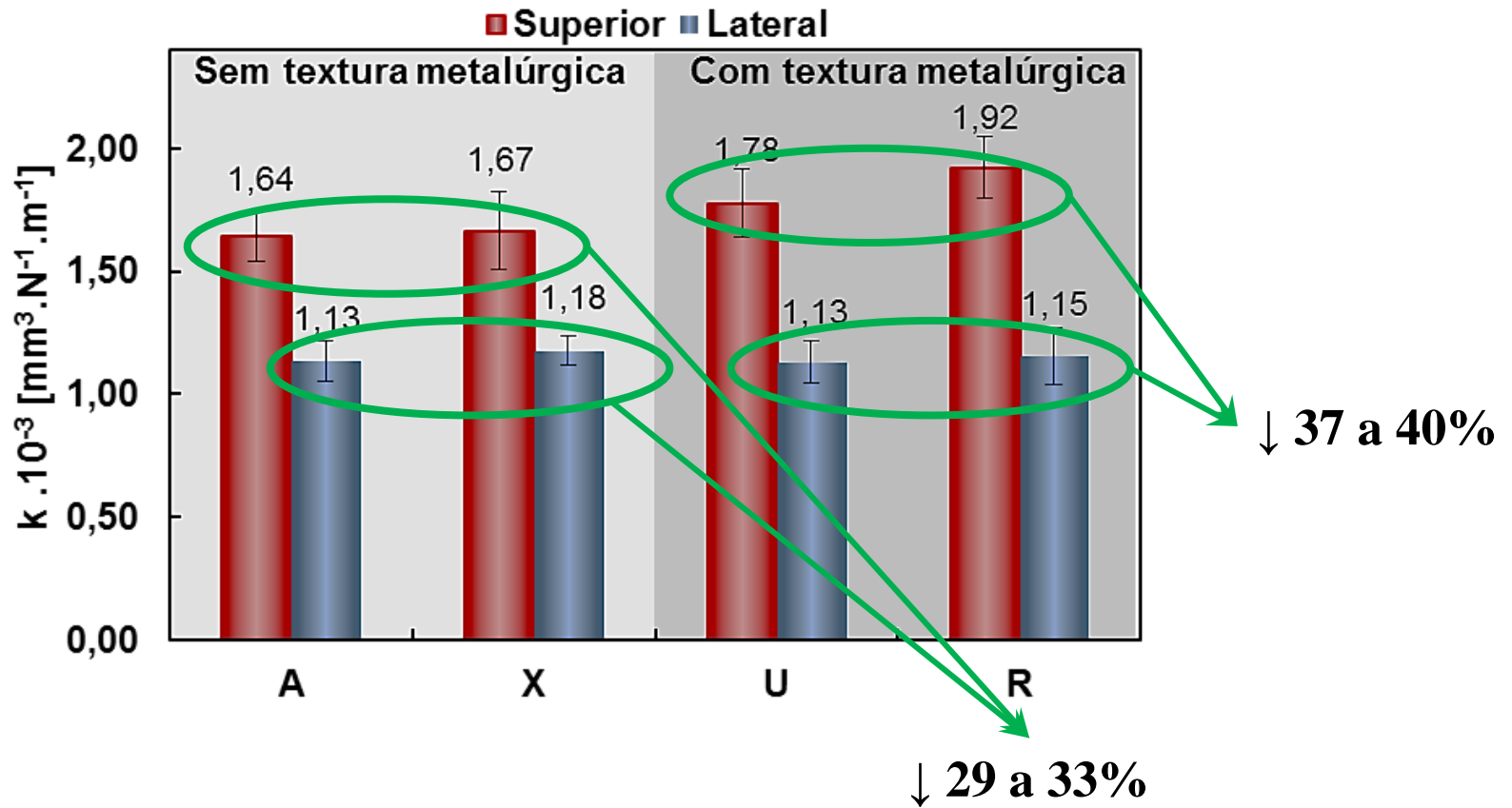


Taxa de desgaste



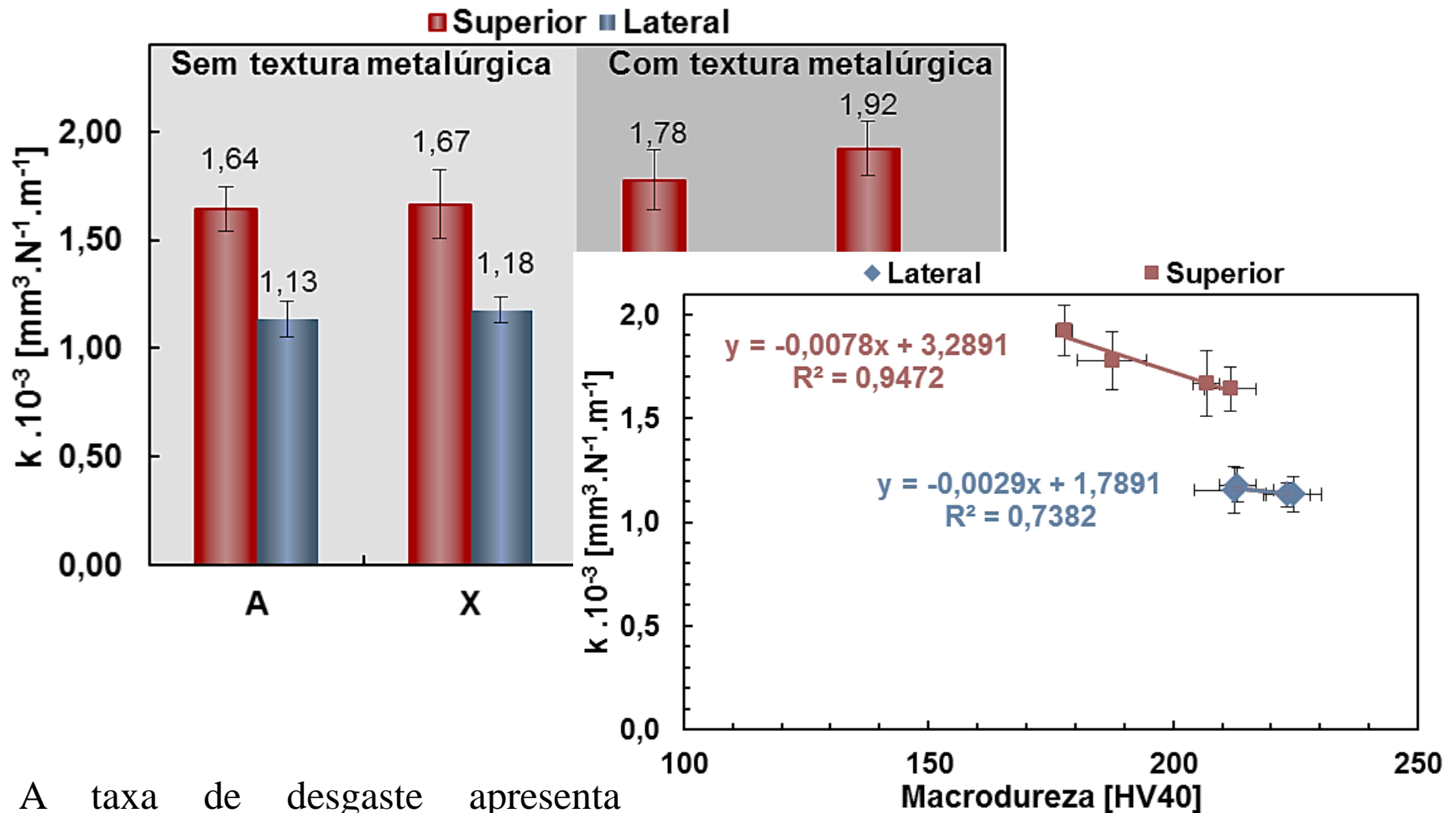


Taxa de desgaste





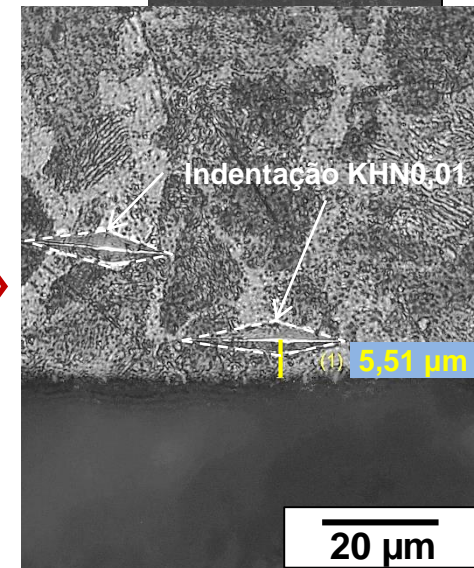
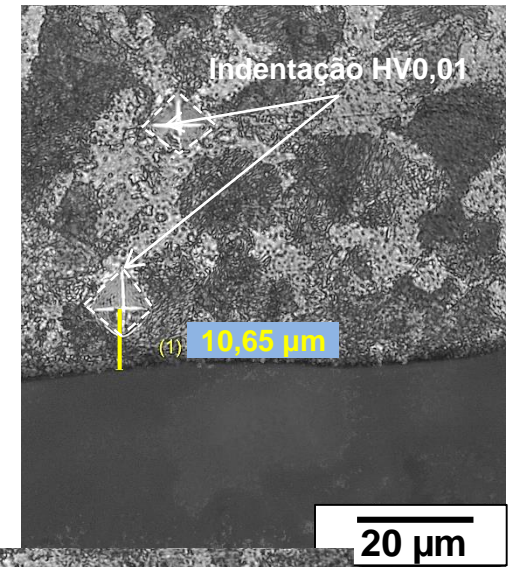
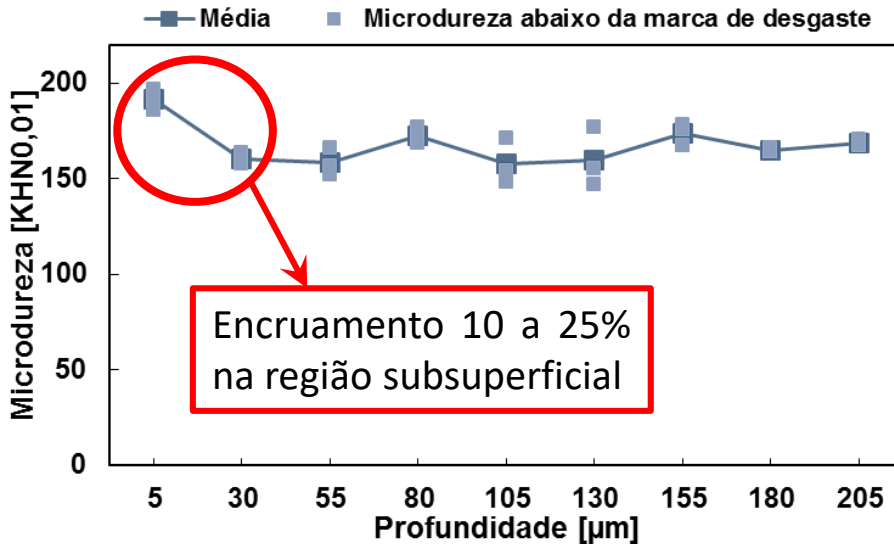
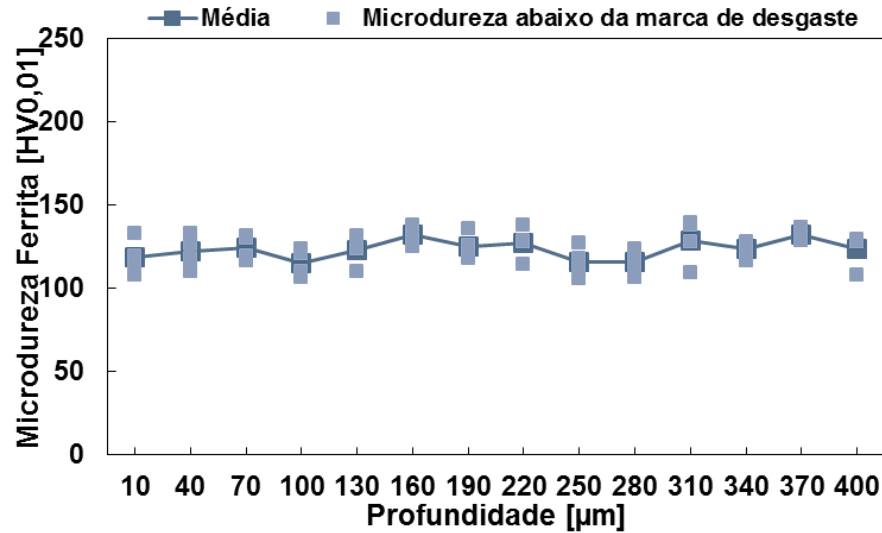
Taxa de desgaste x Macro dureza



A taxa de desgaste apresenta correlação clara com a macro dureza na superfície superior.

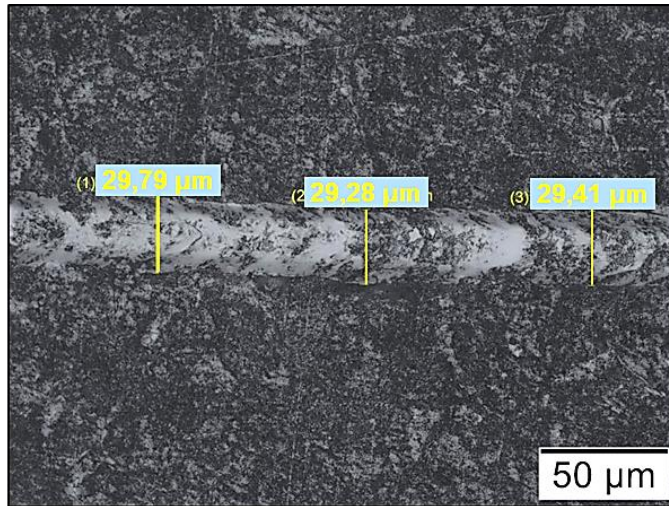


Perfis de microdureza sob a marca de desgaste

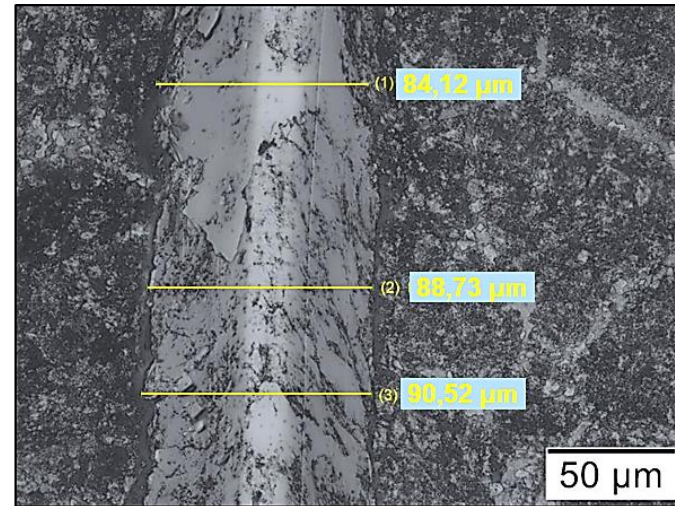




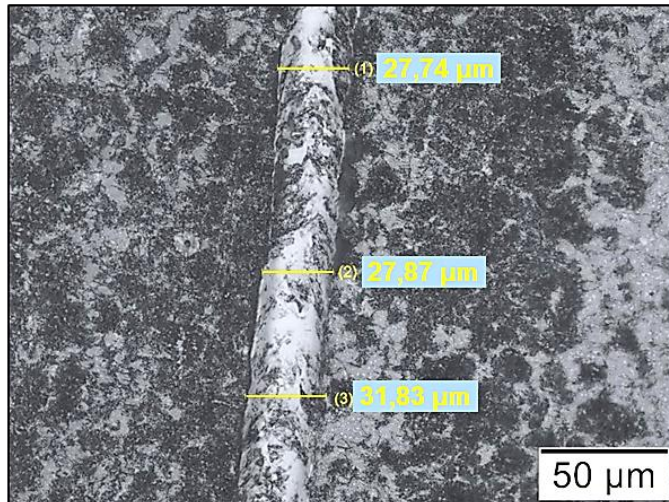
Esclerometria Linear



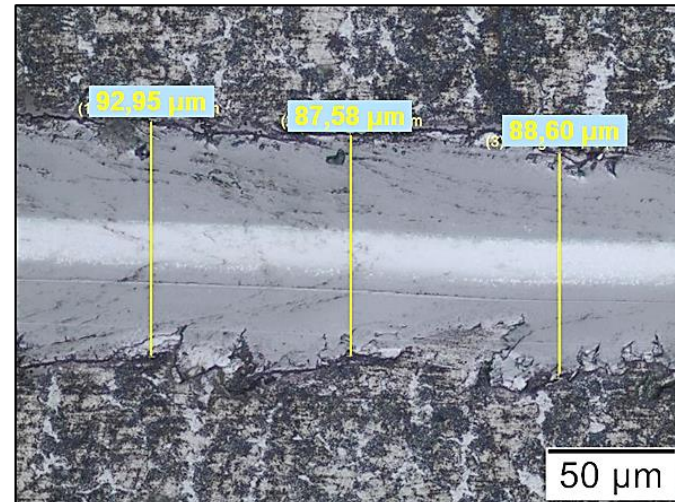
1N – A - Superior



10N – X - Superior



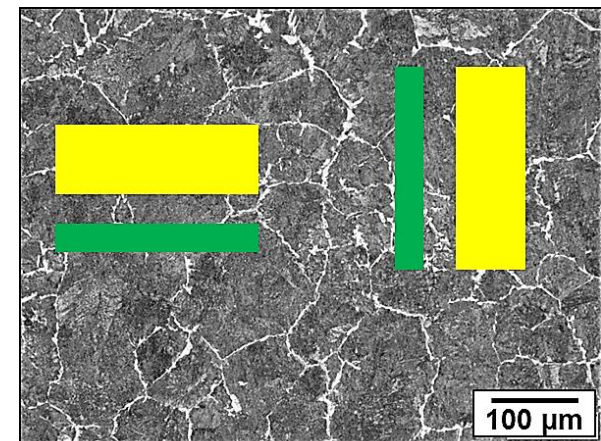
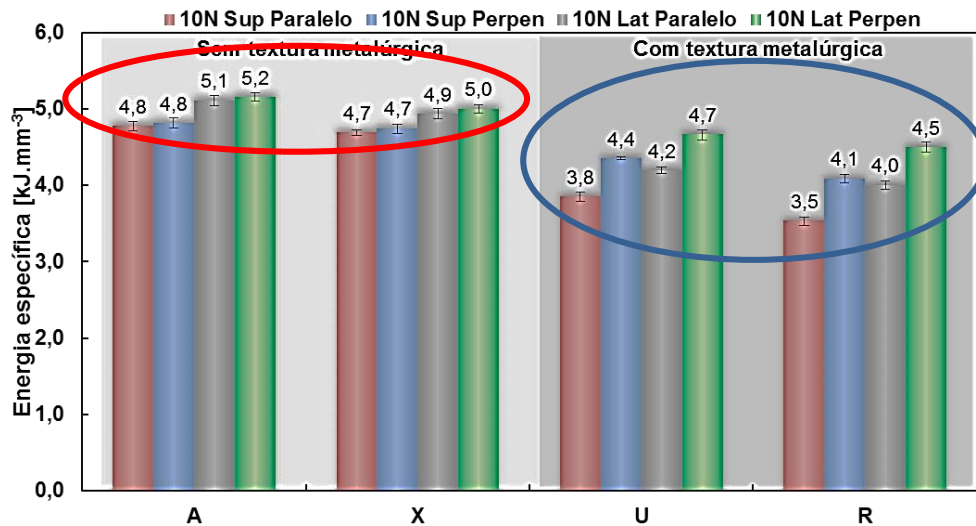
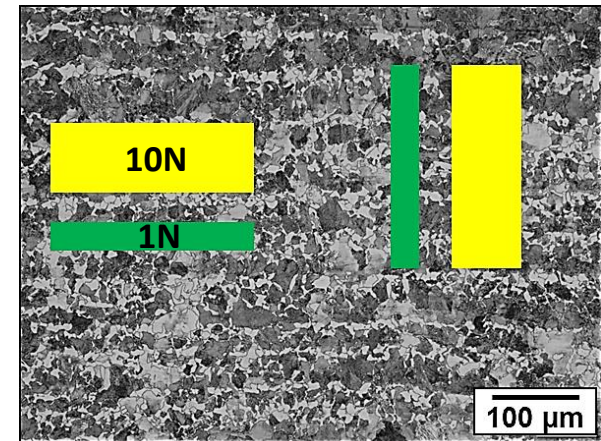
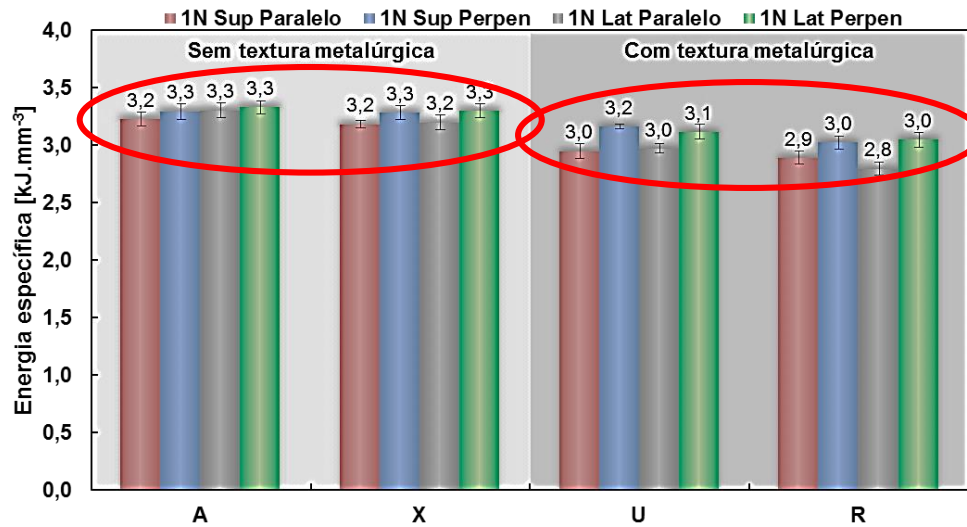
1N – U - Lateral



10N – R - Lateral

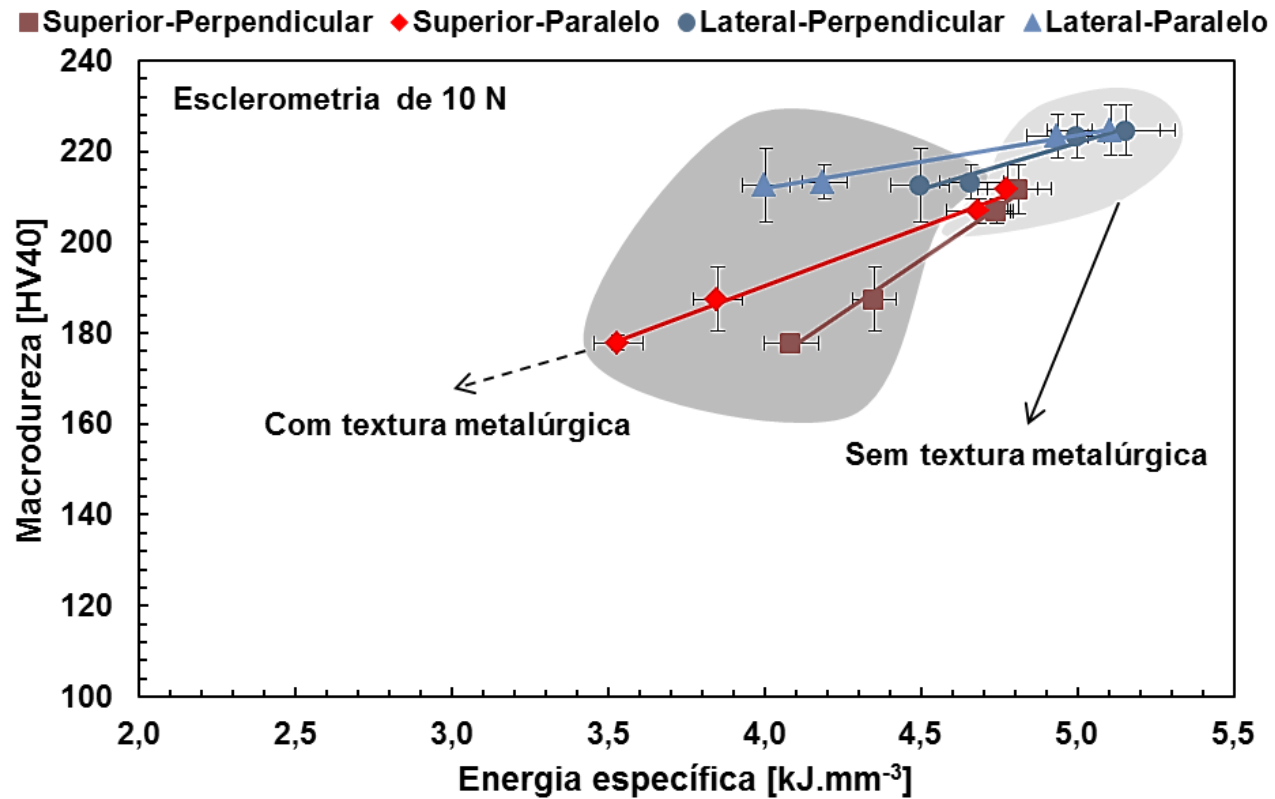


Esclerometria - Energia especifica



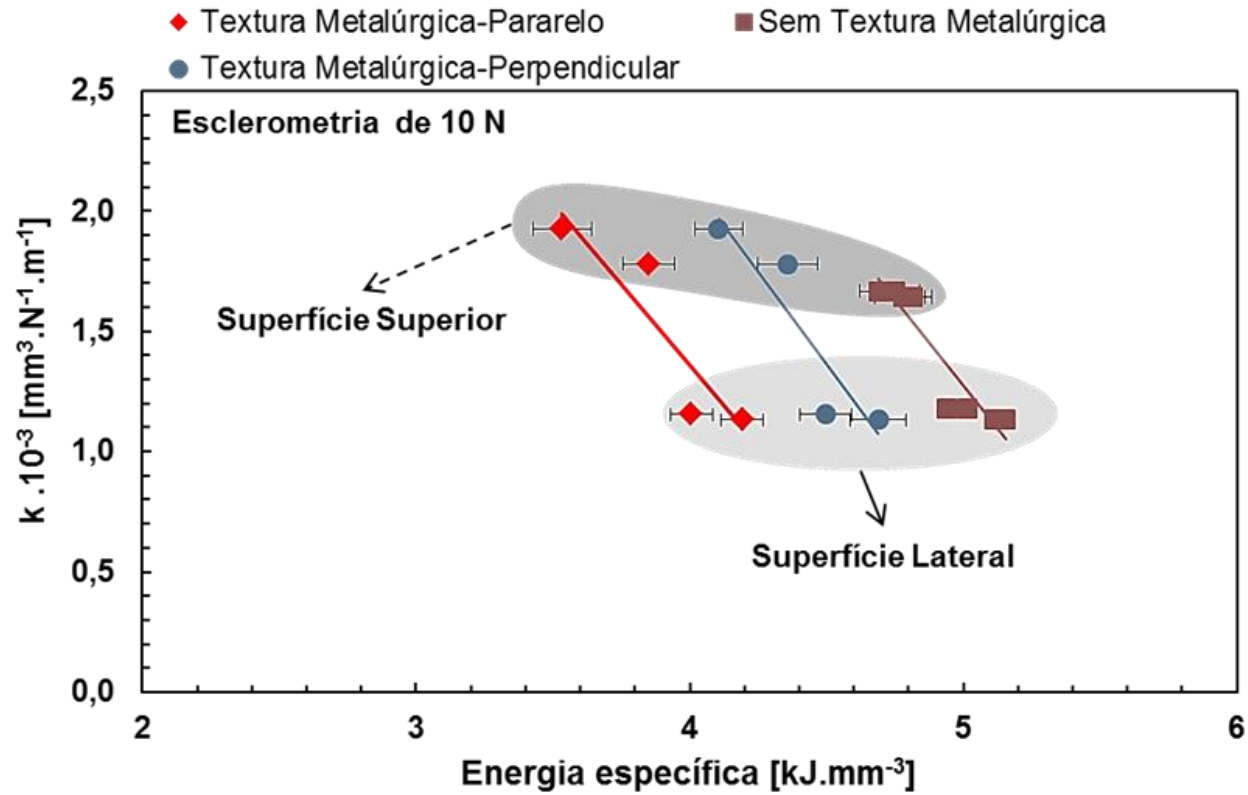


Esclerometria - Energia específica x Dureza





Esclerometria - Energia específica x Taxa de desgaste





Conclusões

A metodologia desenvolvida teve como objetivo replicar os fenômenos de desgaste que ocorreram na lâmina de uma caçamba de pá-carregadeira utilizada na indústria de mineração. **Os mecanismos de desgaste observados na amostra de campo foram replicados em laboratório.** Esses mecanismos estavam ligados ao deslizamento e ao rolamento de partículas abrasivas. Além disso, os **parâmetros topográficos** encontrados nos testes de laboratório foram próximos aos encontrados na superfície de campo. Essa comparação permitiu a **definição do tamanho das partículas** usadas no teste roda de borracha.

Foram testadas quatro amostras de aços de carbono resistentes ao desgaste (A, X, U e R), que normalmente são aplicadas como material resistente ao desgaste em caçambas de pás-carregadeiras. A análise metalográfica evidenciou a presença de **textura metalúrgica** (bandeamento) na superfície lateral das placas referentes aos materiais U e R. A presença de textura metalúrgica também foi associada a pequenas diferenças na composição química entre as amostras.

A **amostra A** se apresentou como um bom substituto para esta aplicação específica pois a taxa de desgaste foi **29% menor** que a amostra de campo em relação à superfície superior.

C.A. Damião, G.C. Alcarria, V.C. Teles, J.D.B. de Mello, W.M. da Silva Jr. Influence of metallurgical texture on the abrasive wear of hot-rolled wear resistant carbon steels, *Wear* 426–427, pp 101–111, 2019.

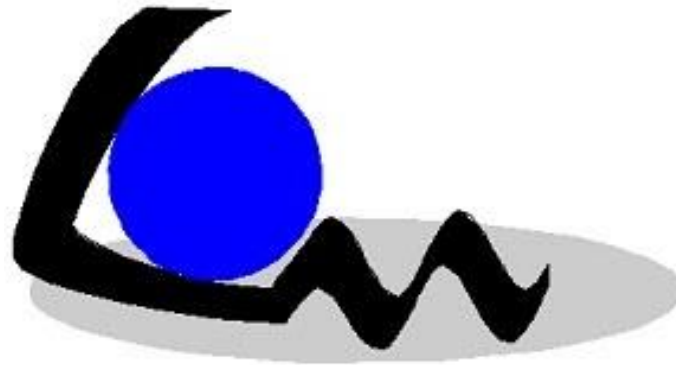
Obrigado!

Washington Martins da Silva Jr. - washington.martins@ufu.br

Carlos A. Damião - cadamiao@hotmail.com

José Daniel B. de Mello - ltm-demello@ufu.br

Henara L. Costa Murray - henaracosta@furg.br

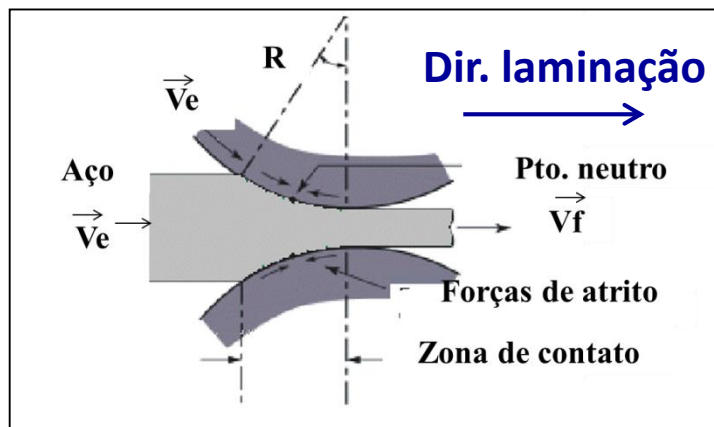




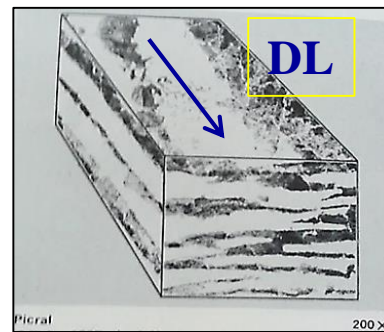
Aços ao manganês - Textura metalúrgica

c)

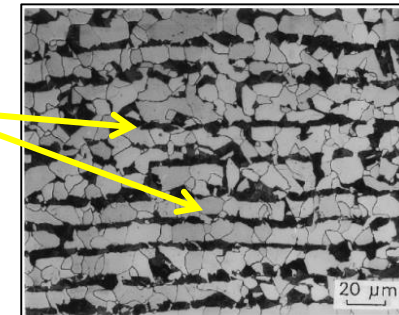
a)



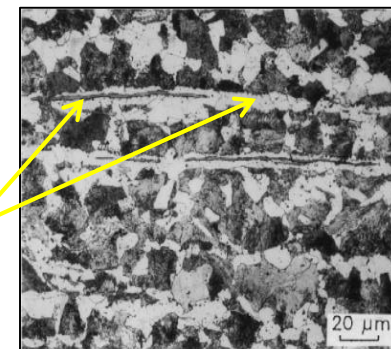
b)



Inclusões sulfeto de Manganês MnS



d)



a) Processo laminação a quente;

b) Aço austenitizado 1600°F resfriamento a 100°F/hora, Handbook 1981;

c) Texturas de ferrita (clara) e perlita (escuro) em chapas de aço 1020 laminado a quente, atacado com nital; KRAUSS (2003), GRANGE (1971), CABALLERO (2006).

d) Faixas de ferrita c/inclusões de MnS e faixas de perlita em barra de aço laminada a quente com taxa de redução de 27:1, seção longitudinal, atacado com nital, KRAUSS (2003), GRANGE (1971), CABALLERO (2006).

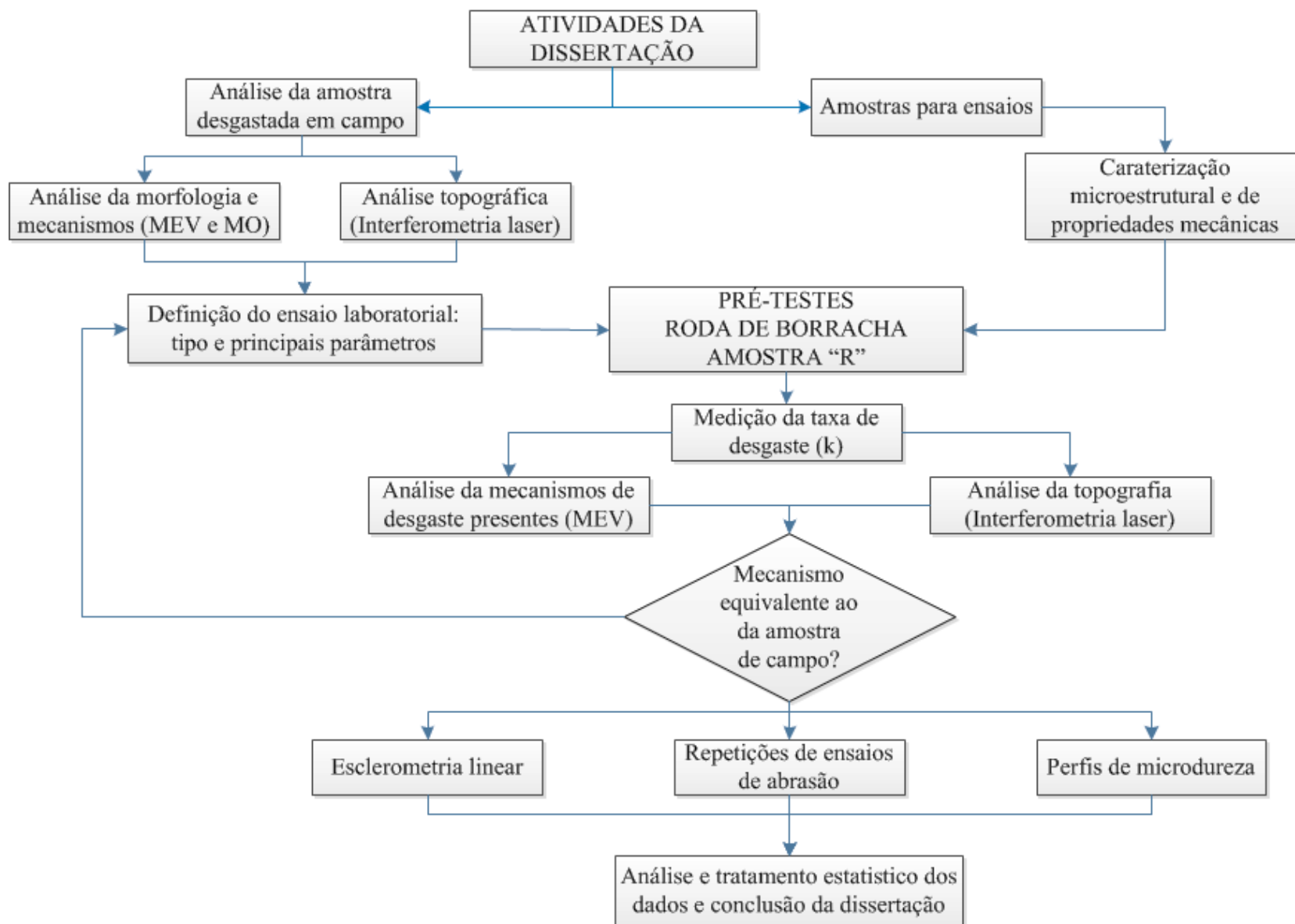


Materiais

MATERIAL	DESEGNAÇÃO DAS AMOSTRAS	SUPERFÍCIE DESGASTE	DIREÇÃO DA TEXTURA	QUANTIDADE DE AMOSTRAS
A	A-S-P	Superior	Paralela	3
X	X-S-P	Superior	Paralela	3
U	U-S-P	Superior	Paralela	3
R	R-S-P	Superior	Paralela	3
R	R-S-P	Superior	Paralela	3
A	A-L-P	Lateral	Paralela	3
X	X-L-P	Lateral	Paralela	3
U	U-L-P	Lateral	Paralela	3
R	R-L-P	Lateral	Paralela	3
R	R-L-T	Lateral	Perpendicular	3

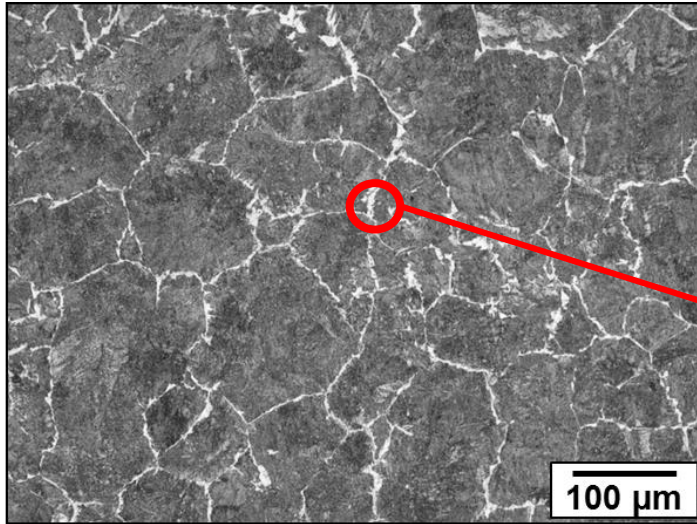


Desenvolvimento do trabalho

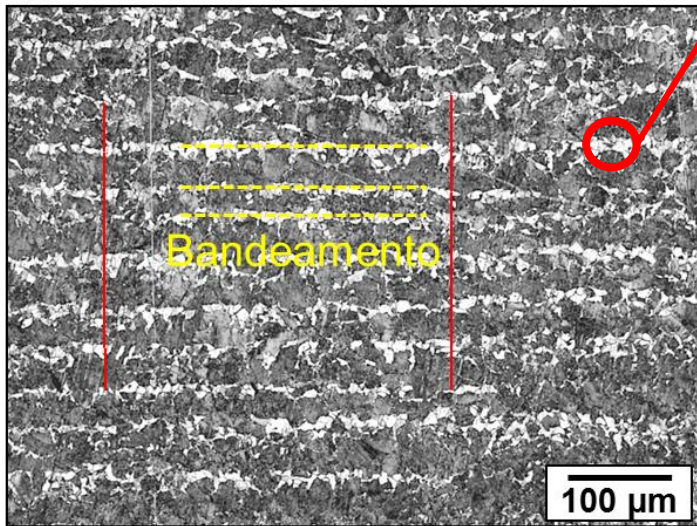




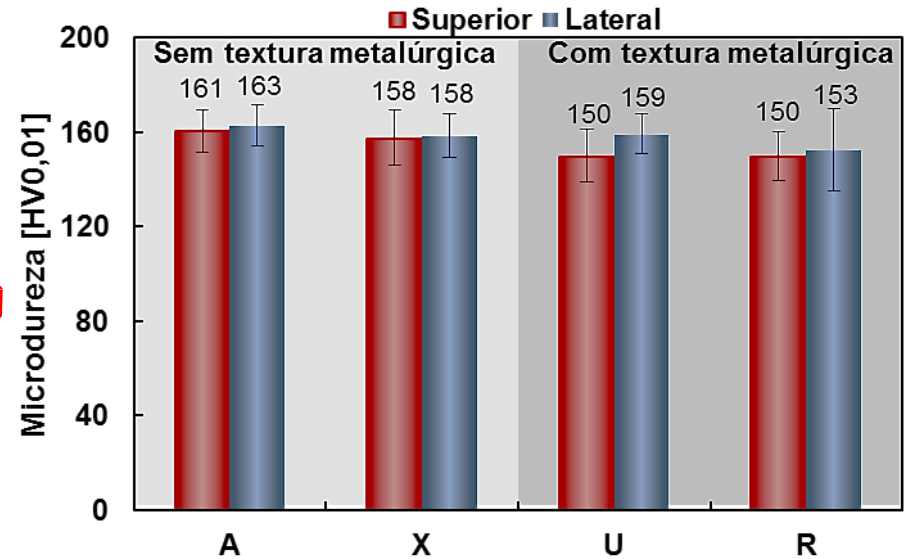
Microestrutura



A



U

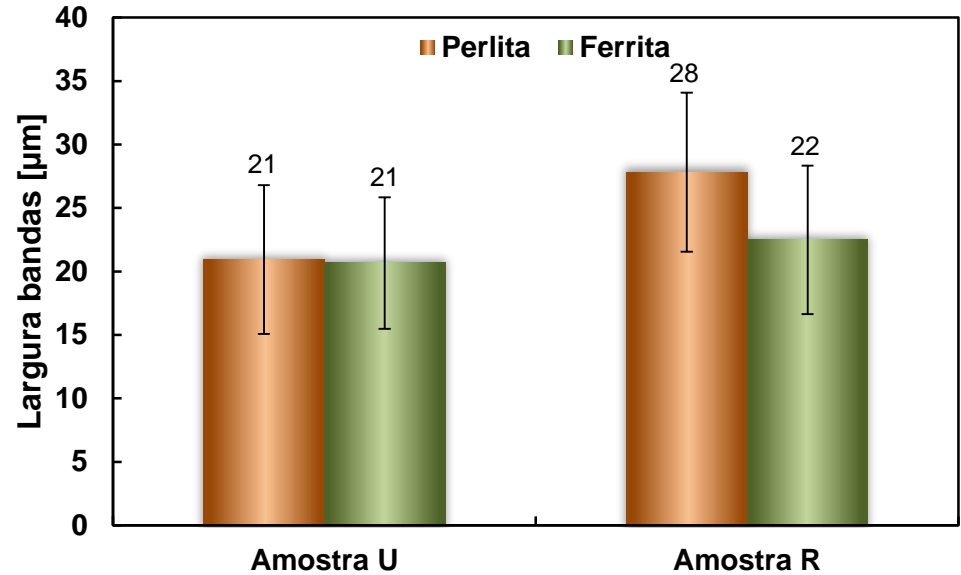
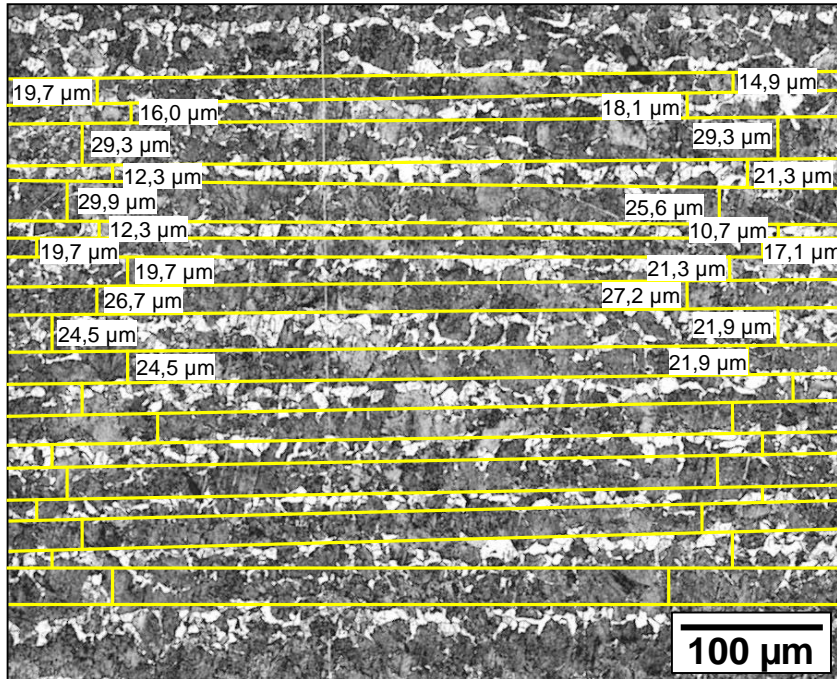


Microdureza (HV-10 gf) das regiões brancas apresentadas nas microestruturas das amostras A, X, U e R nas superfícies lateral e superior.

Regiões brancas = ferrita



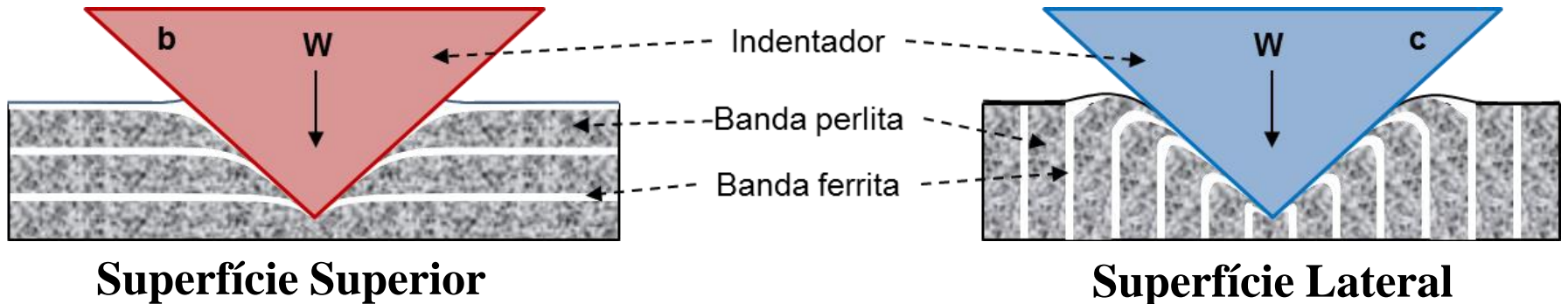
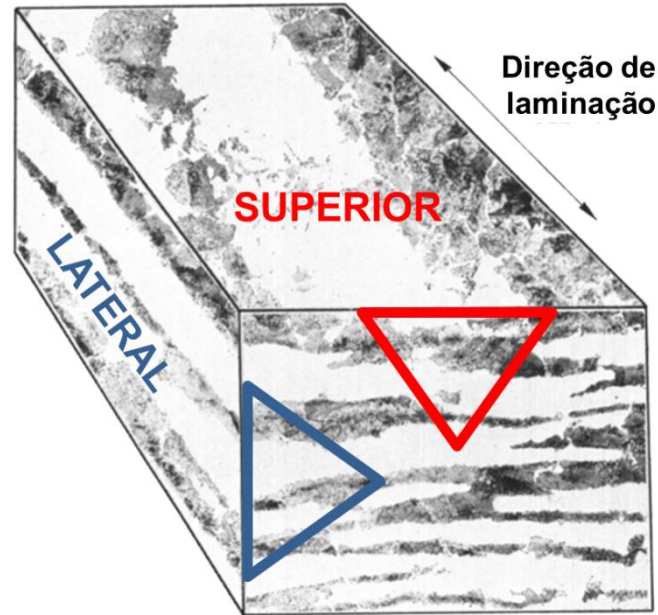
Microestrutura: largura das bandas



Regiões brancas = ferrita



Dureza: Análise das indentações na textura metalúrgica



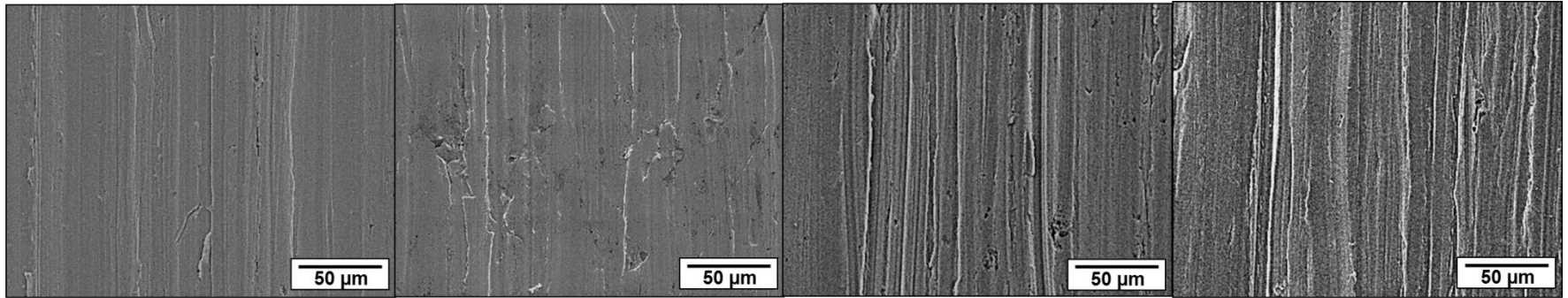


Desgaste abrasivo tipo roda de borracha: análise das marcas de desgaste

Sem textura metalúrgica

Com textura metalúrgica

SUPERIOR



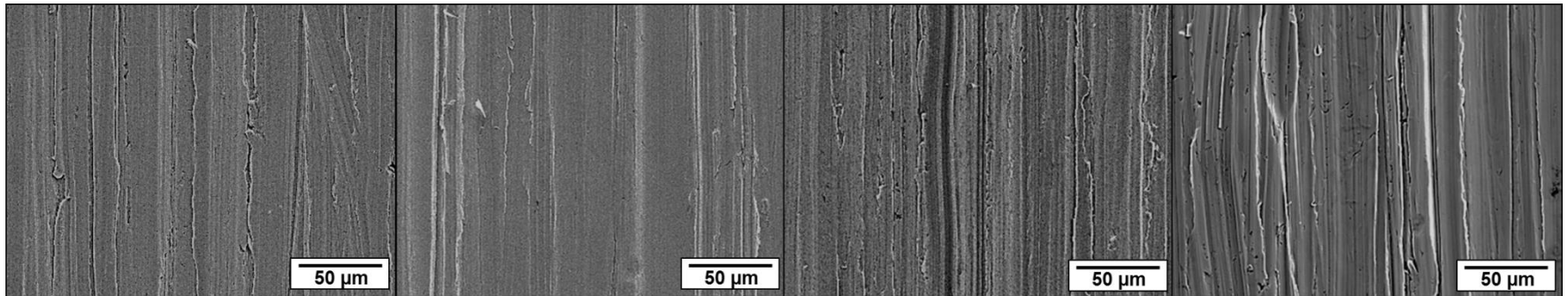
A

X

U

R

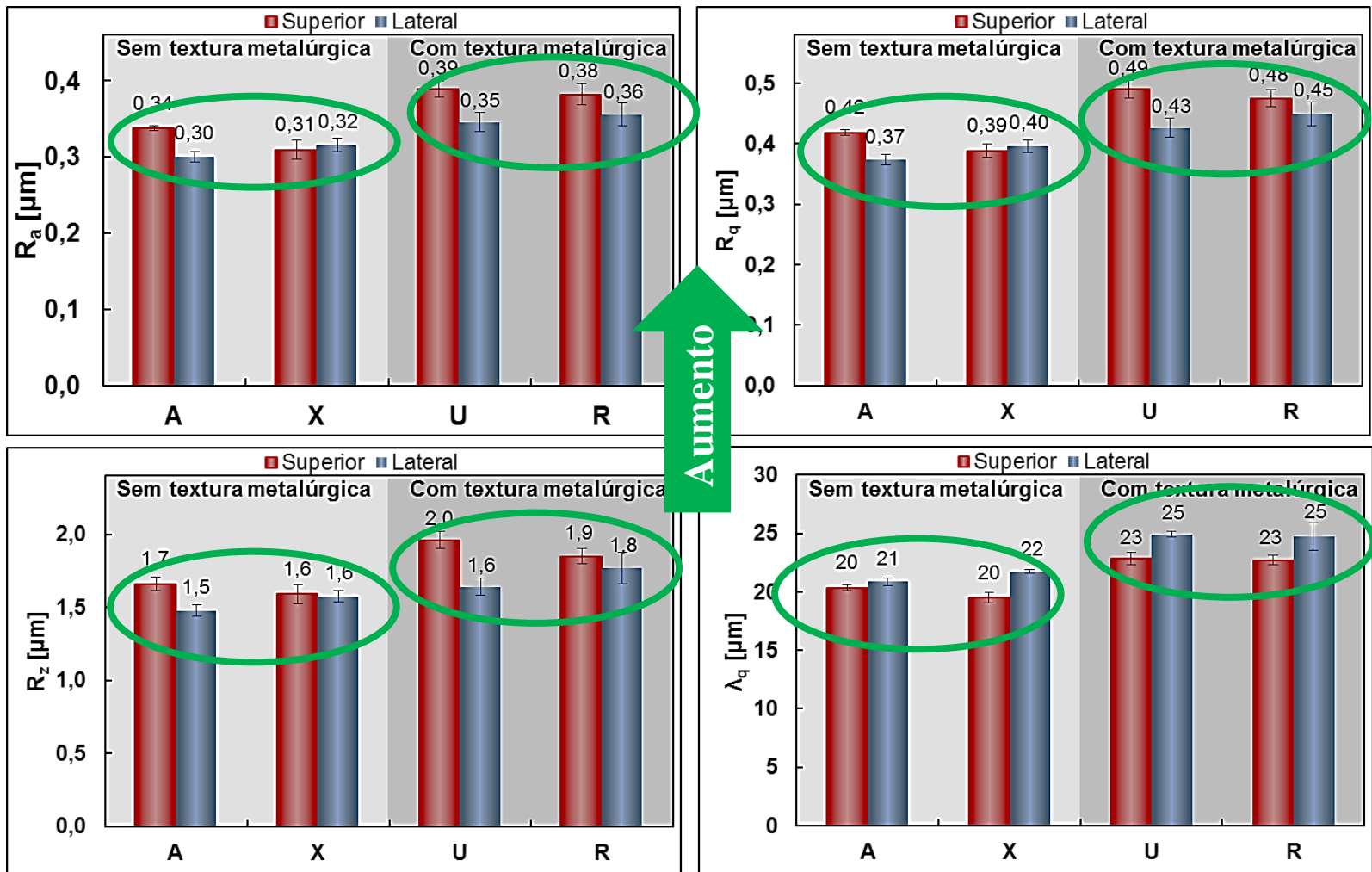
LATERAL



Predominância de deslizamento de partículas abrasivas.



Desgaste abrasivo tipo roda de borracha: análise das marcas de desgaste





Desgaste abrasivo tipo roda de borracha: análise das marcas de desgaste

