



Mecanismos de desgaste em situações industriais

Henara L. Costa

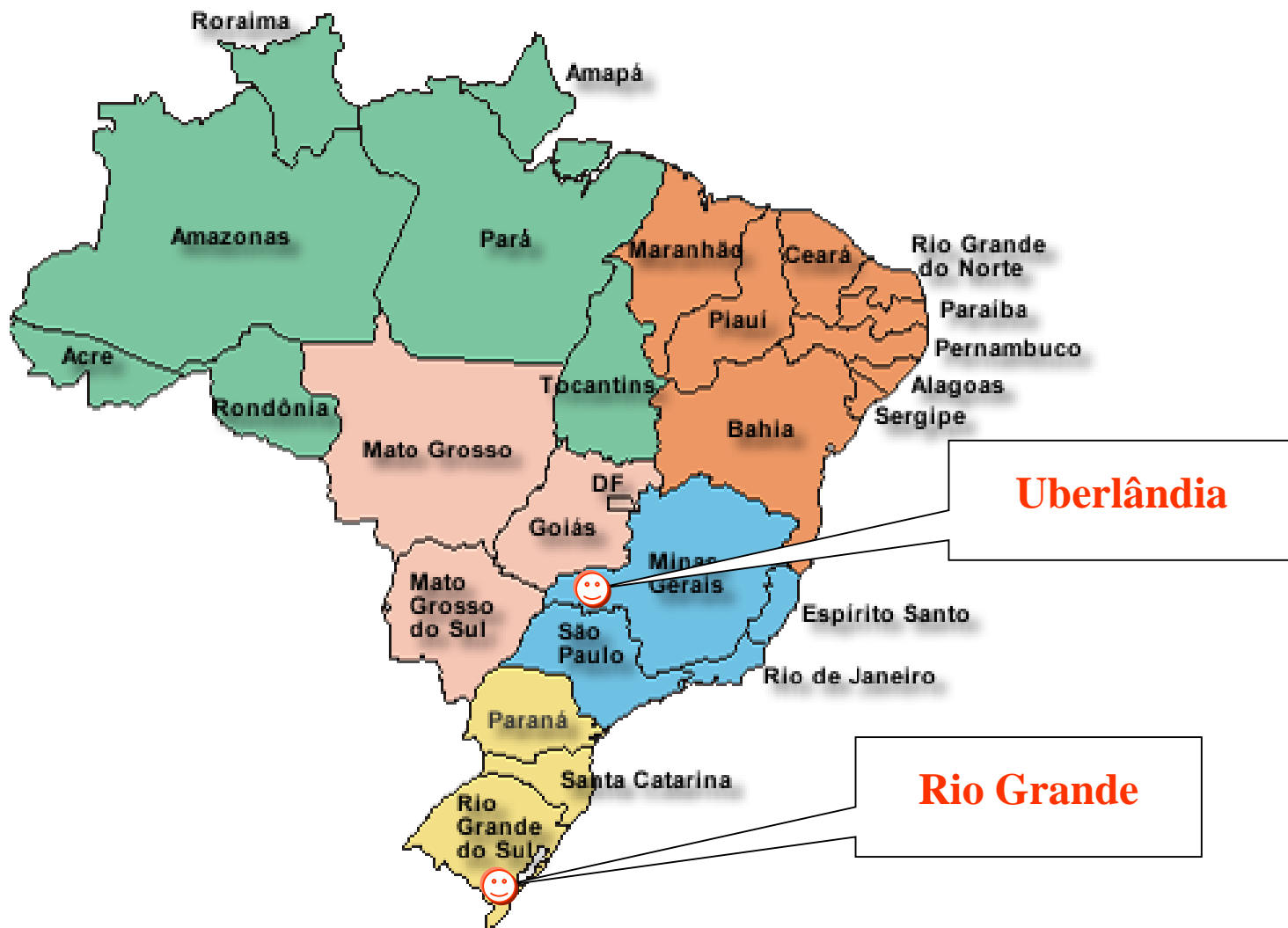
Universidade Federal do Rio Grande

Escola de Engenharia

henaracosta@furg.br

Discussões sobre mecanismos de desgaste obtidos em ensaios de desgaste que procuram simular atrito e desgaste em situações industriais:

- conformação mecânica
- cabos de amarração naval
- madeira, etc.





Conformação mecânica



Caso 1: Tribologia de modificações superficiais usadas em cilindros de laminação a frio



Laboratório de Tribologia e Materiais

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica
Universidade Federal de
Uberlândia

Deposição de cromo duro



Cromo hexavalente: cancerígeno

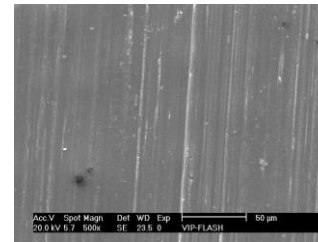
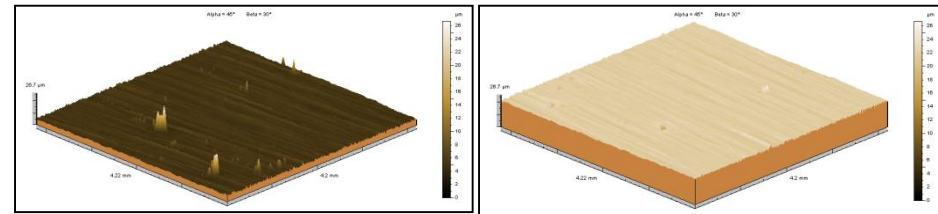
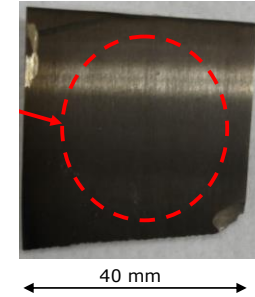
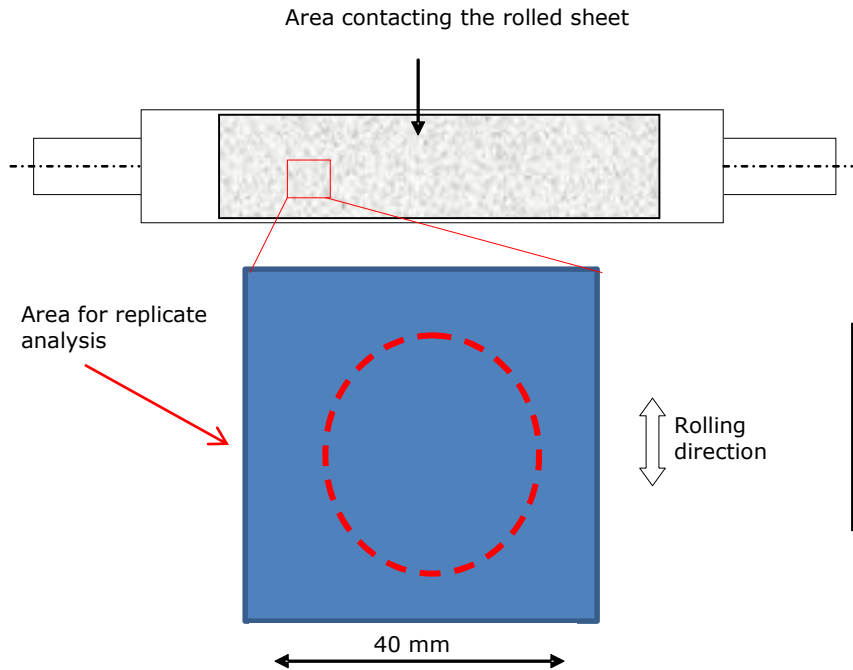


EUA= 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
(BARAL ;ENGELKEN, 2002)

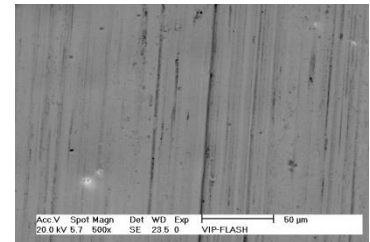
Europa: restrição ao uso de
produtos nos quais a cadeia de
produção envolva o uso de cromo
duro

(COMMUNITIES, 2000; SONNTAG ;SUNDARAM, 2004; ZHAO et al., 2011)

■ Técnica de replicação



Original



Invertida

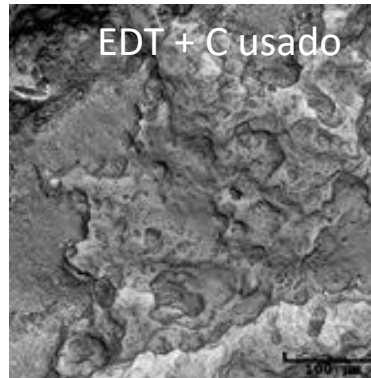
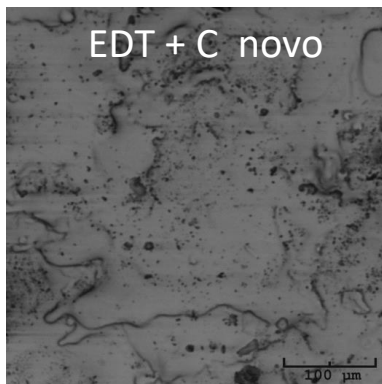
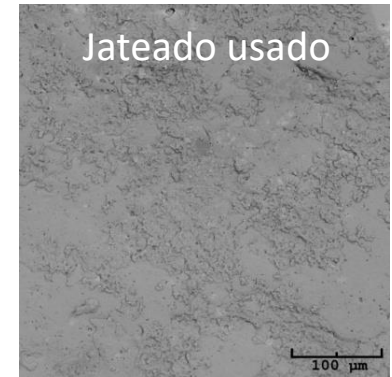
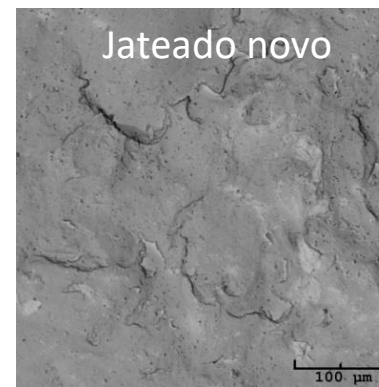
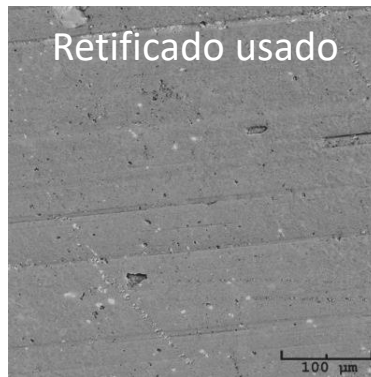
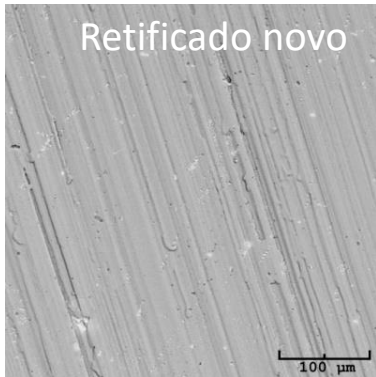


Réplicas - ZhermackColorbite D

B = jateado, C = cromo duro EDT = Texturização por descargas elétricas, G = Retificado

	Mill 1	Mill 2	Mill 3	Mill 4
	Surface Modifications			
Stand 1	B and C	G and C	G	G and C
Stand 2	G and C	G and C	G	G and C
Stand 3	G and C	G and C	G	G and C
Stand 4	G and C	G	B	EDT and C
Stand 5	EDT and C	EDT		

MEV das réplicas (invertidas digitalmente)

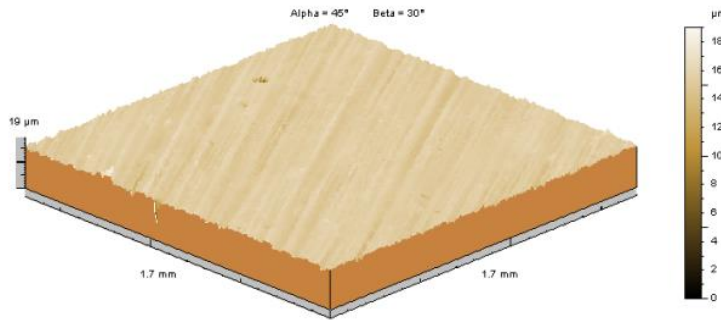


- Superfícies mais lisas
- Remoção das asperidades mais lisas
- Camadas transferidas

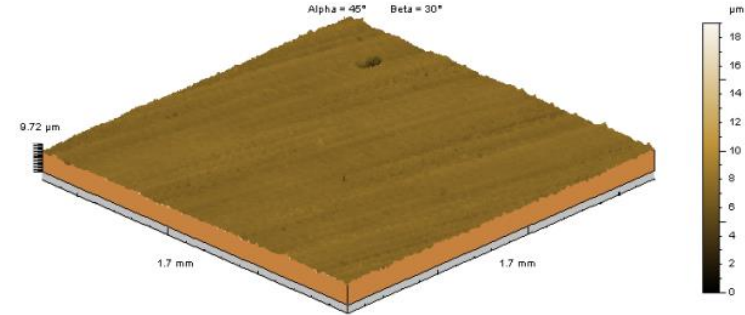
Montmitonnet et al. (2000) Transfer layer and friction in cold metal strip rolling processes, Wear, 245 125-135.

Topografia superficial das réplicas

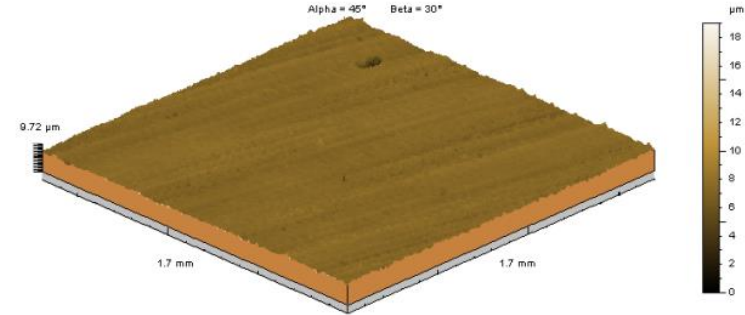
Novo



Retificado

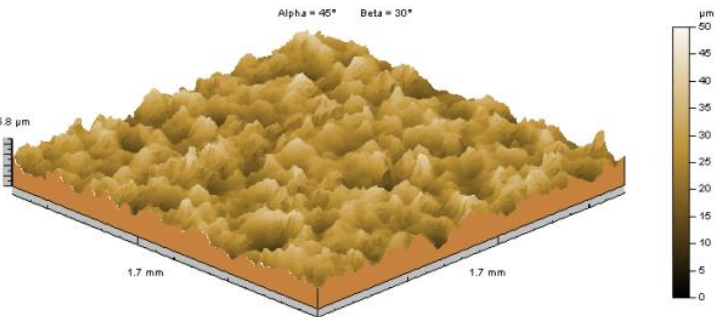


Desgastado

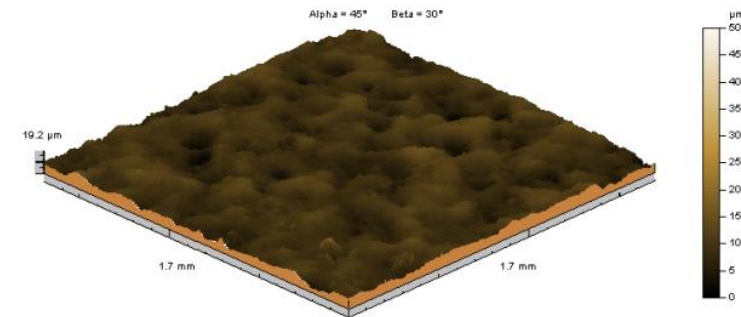


Sulcos de retificação menos visíveis

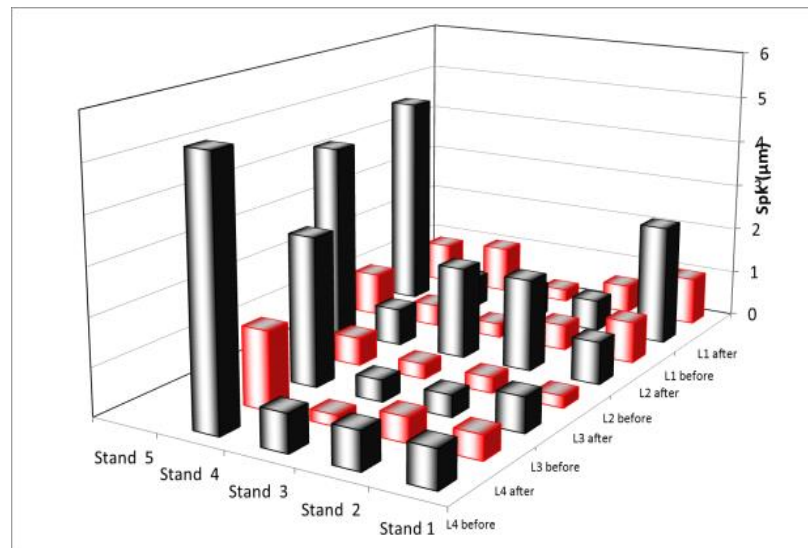
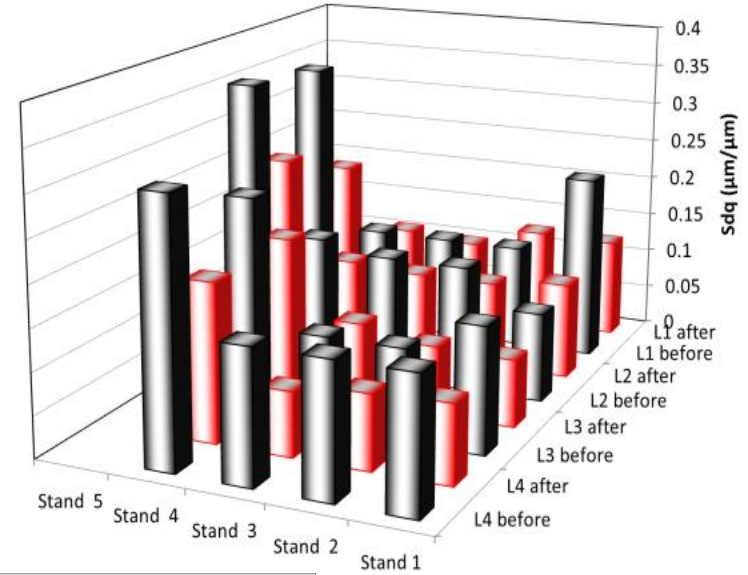
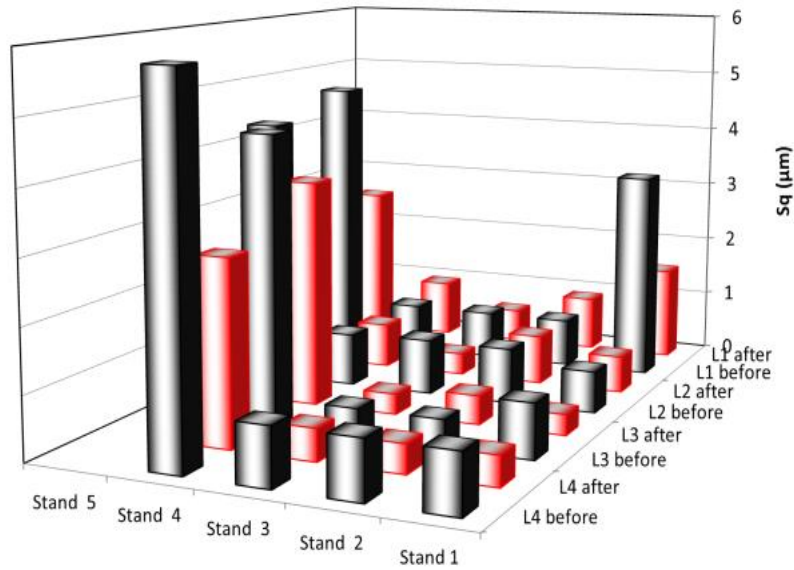
“Alisamento” da superfície



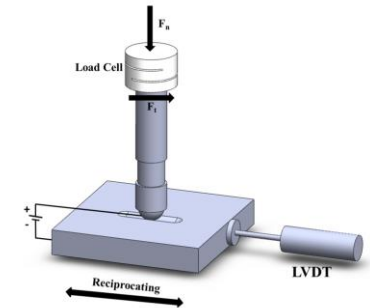
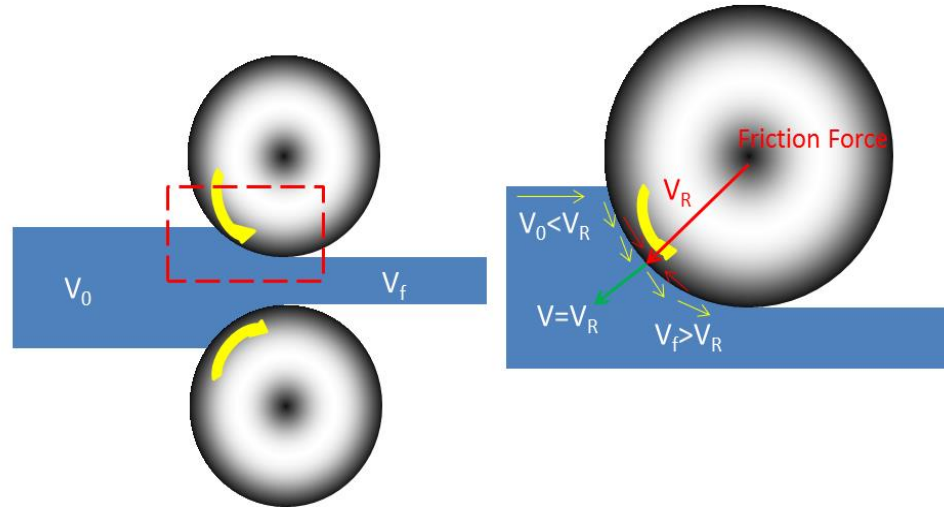
EDT + cromo duro



Removal of highest peaks, formation of a smooth tribolayer

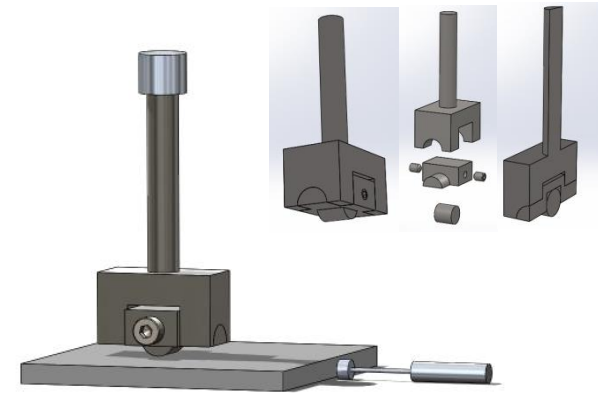
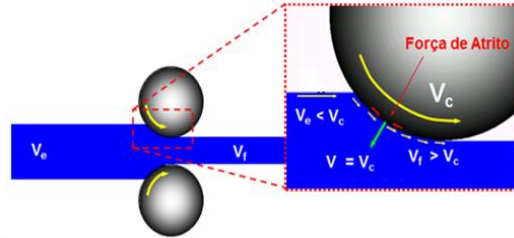
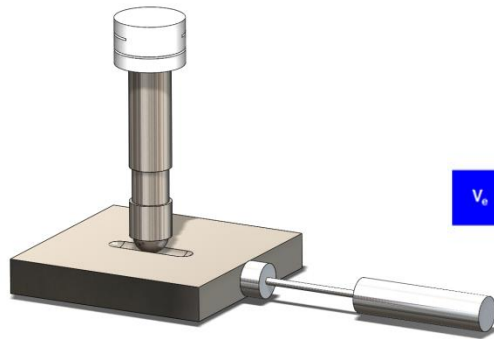


Metodologia para replicar mecanismos de desgaste



$$V_o b t_o = V_f b t_f$$

J.D.B. De Mello, J.L. Goncalves, H.L. Costa, Influence of surface texturing and hard chromium coating on the wear of steels used in cold rolling mill rolls, Wear, 302 (2013) 1295-1309.



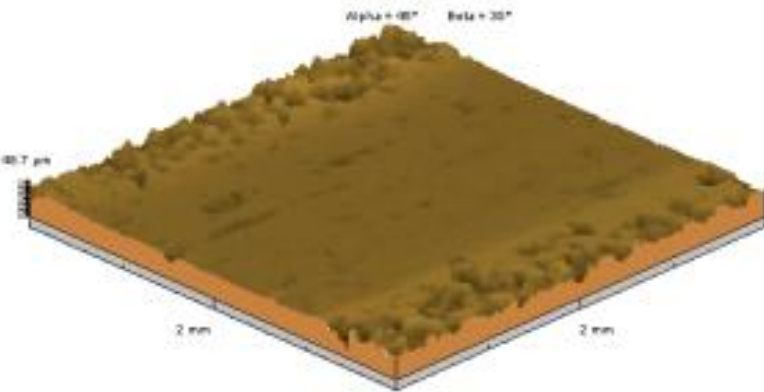
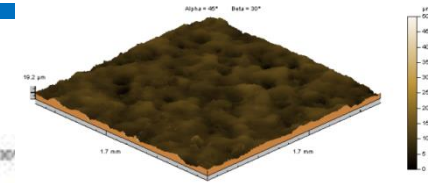
Contra-corpo esférico $D = 10 \text{ mm}$
 AISI 52100
 Comprimento: 10 mm
 Frequencia: 2 Hz
 Tempo: 1 h
 Cargas normais: 29N, 50N and 100N

Contra-corpo cilíndrico 9 x 9 mm
 AISI 52100
 Comprimento: 10 mm
 Frequencia: 2 Hz
 Tempo: 30 min, 3 h and 5 h
 Carga normal: 100 N

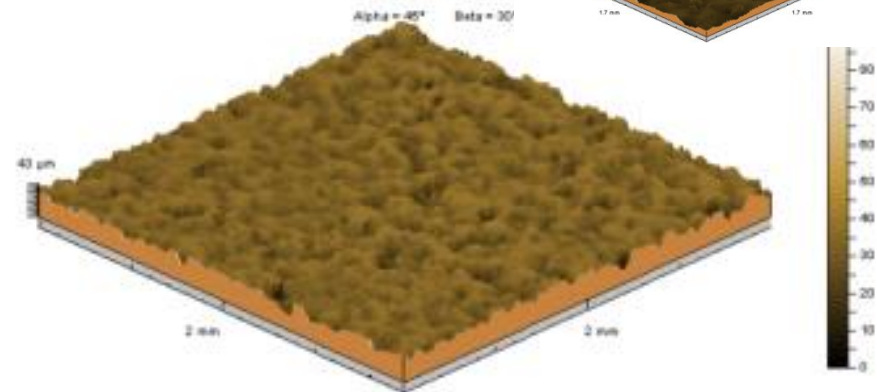
	Esférico			Cilíndrico
Carga normal(N)	29	50	100	100
Tensão máxima de Hertz (GPa)	0.6	0.7	2.8	0.17

Mapas 3D após ensaios (EDT+C)

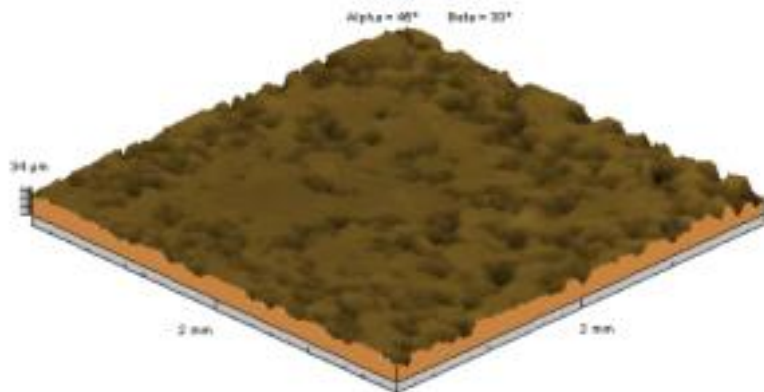
Réplica



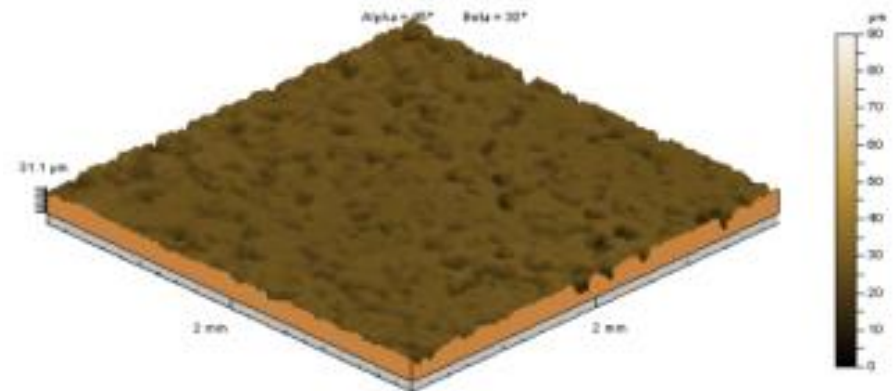
Contato esférico, 50N, 1h



Cilindro, contato em linha, 100N, 30 min



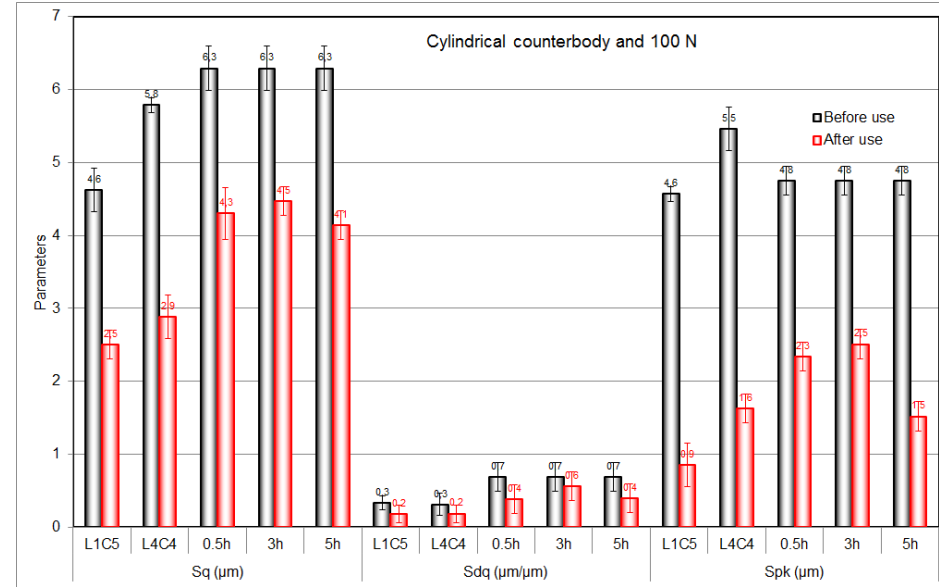
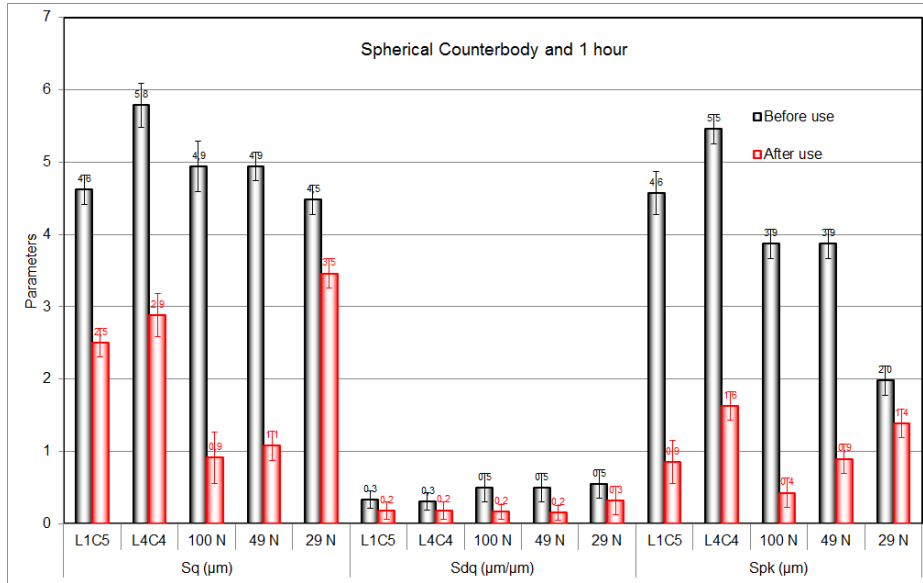
Cilindro, contato em linha, 100N, 3 h



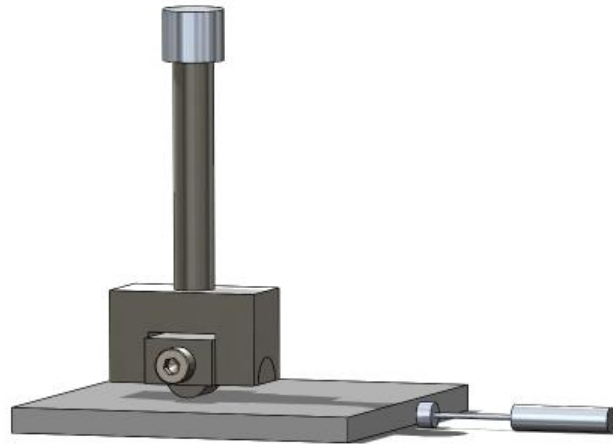
Cilindro, contato em linha, 100N, 5h



■ Parâmetros topográficos após os testes



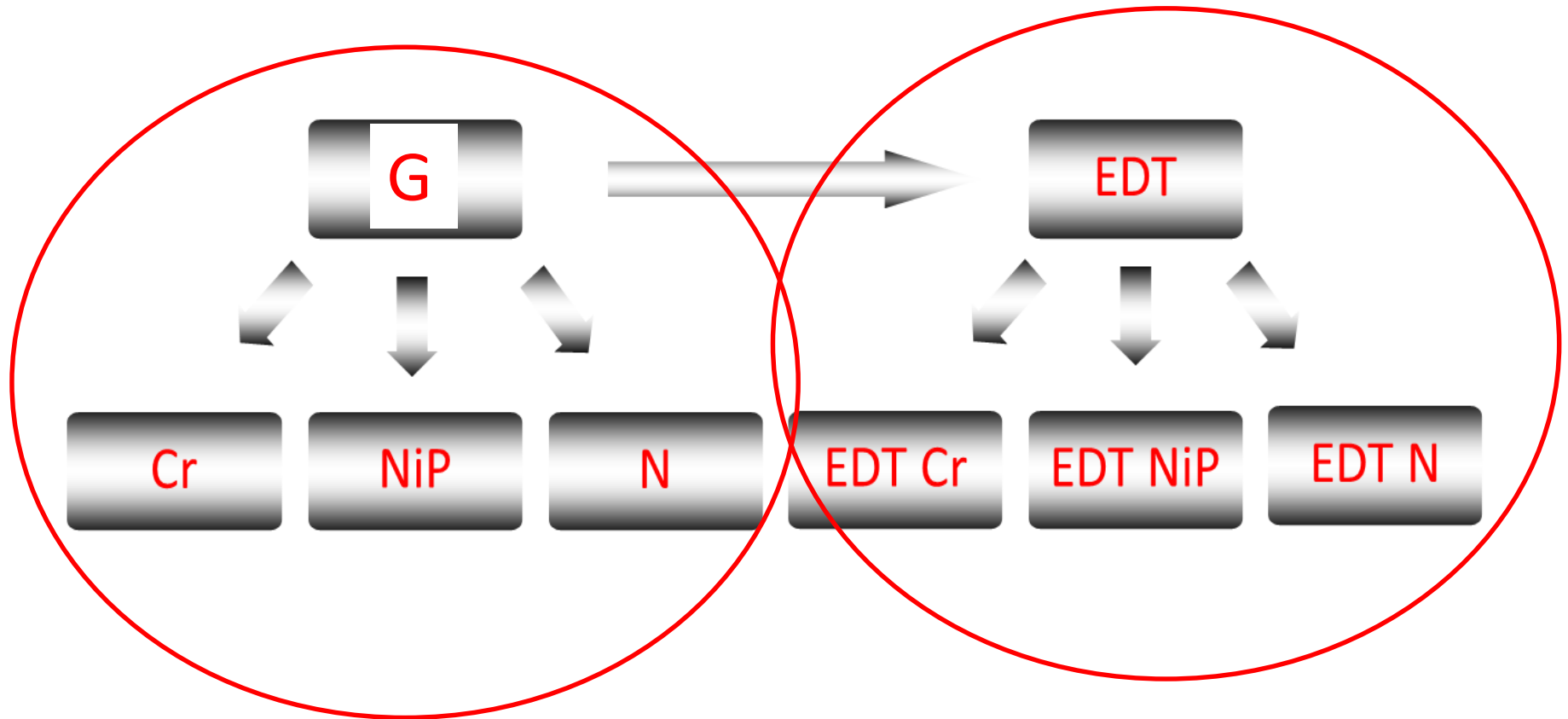
Condições de teste selecionadas



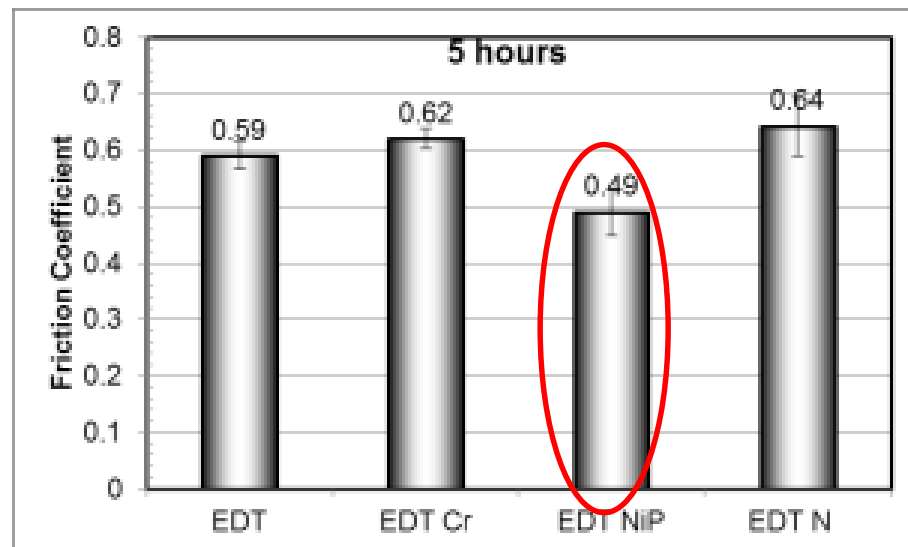
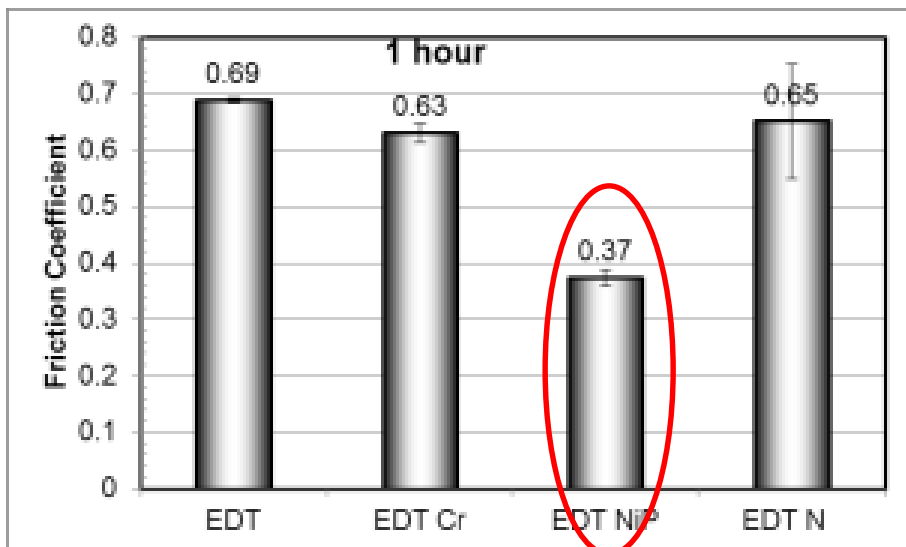
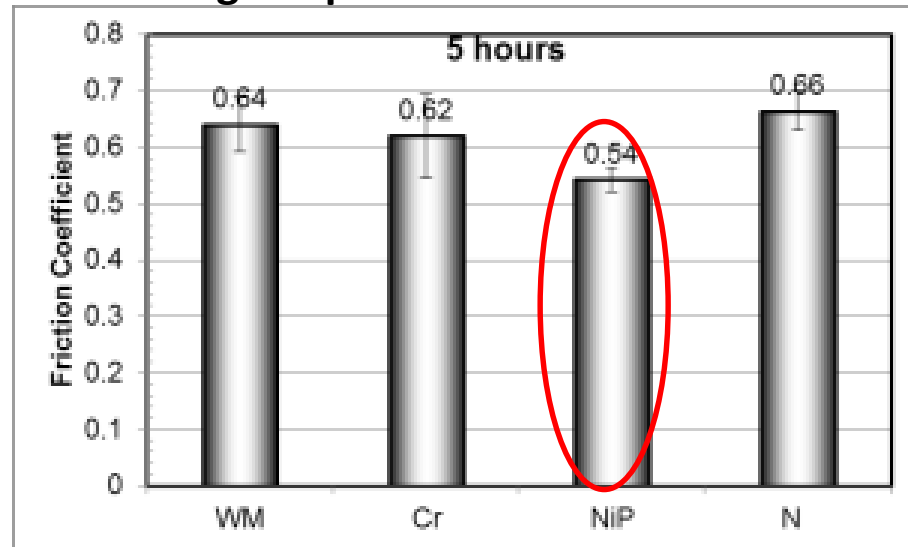
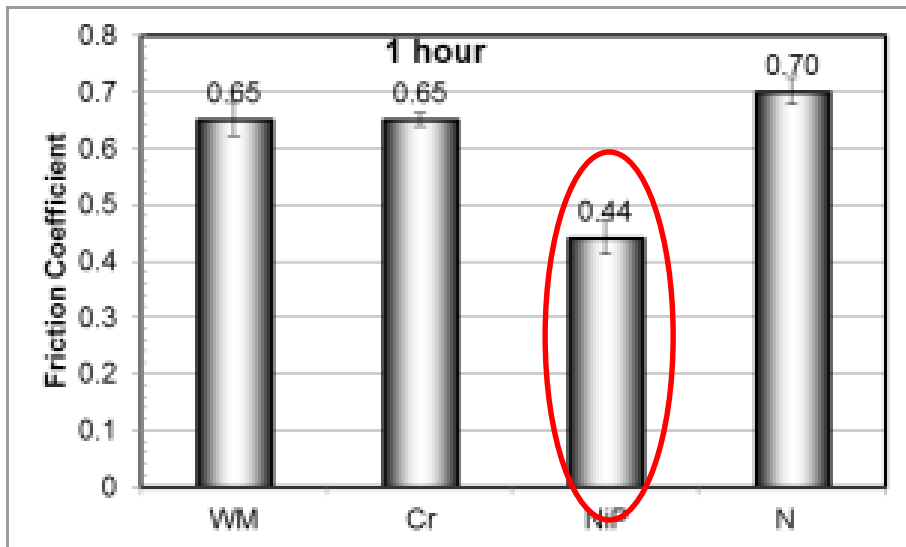
- Contra-corpo cilíndrico 9 x 9 mm
- AISI 52100
- Comprimento: 10 mm
- Frequência: 2 Hz
- Tempo: 1 h e 5 h
- Carga normal: 100 N

Gonçalves JL, de Mello JDB, Costa HL. Wear in cold rolling milling rolls: A methodological approach. Wear. 2019;426-427:1523-35.

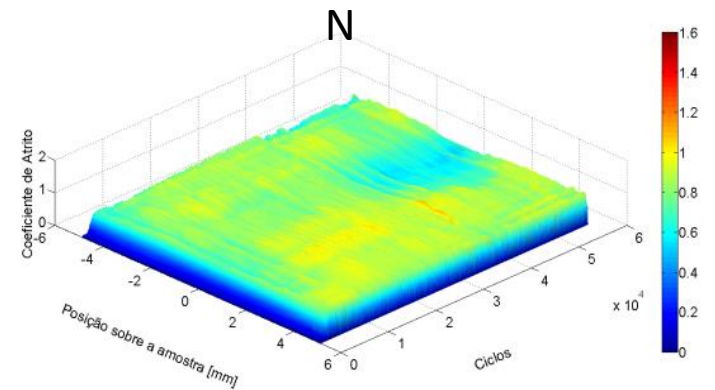
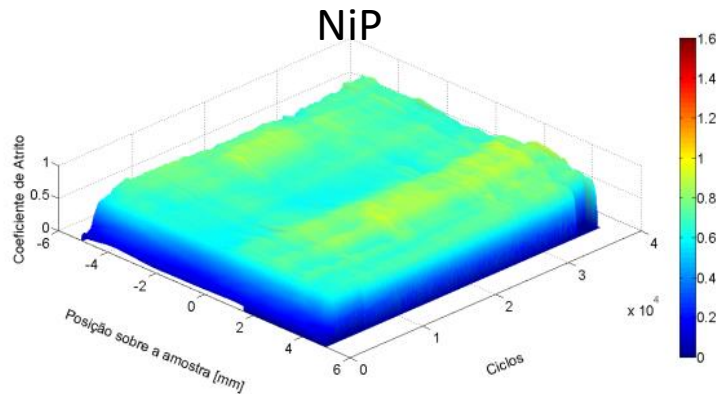
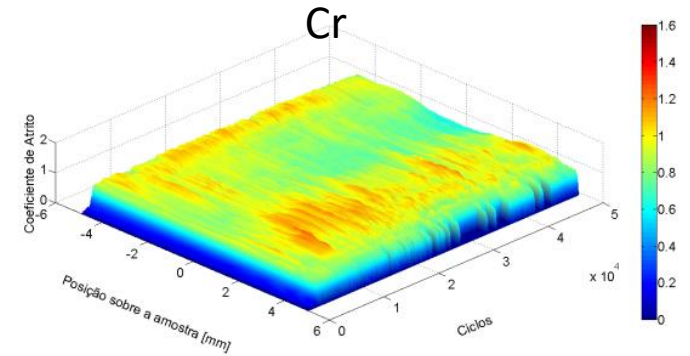
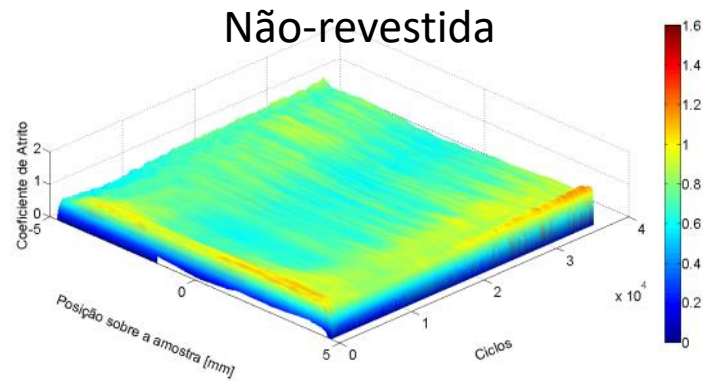
Substituição do cromo duro?



■ Coeficientes de atrito: média de 3 testes dentro do regime permanente

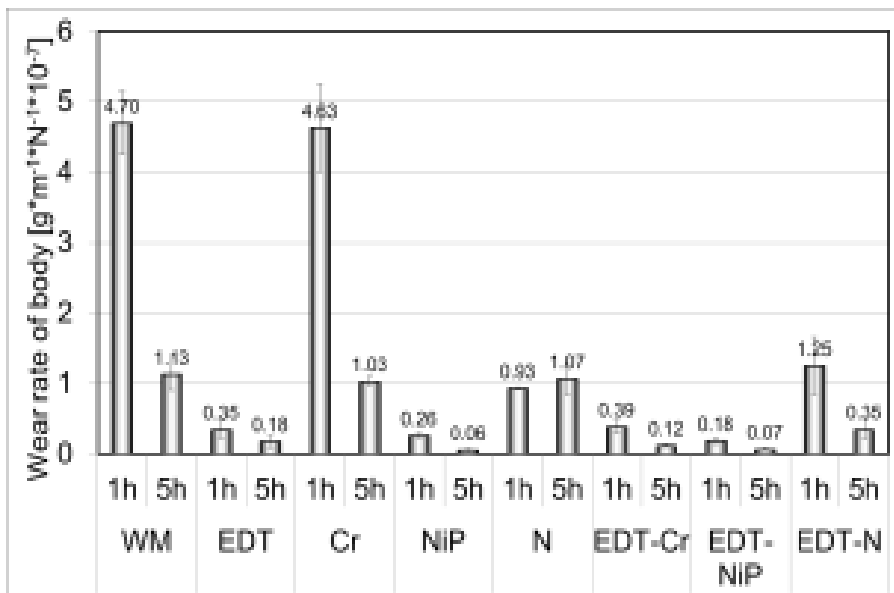


■ Mpas triboscópicas do coeficiente de atrito

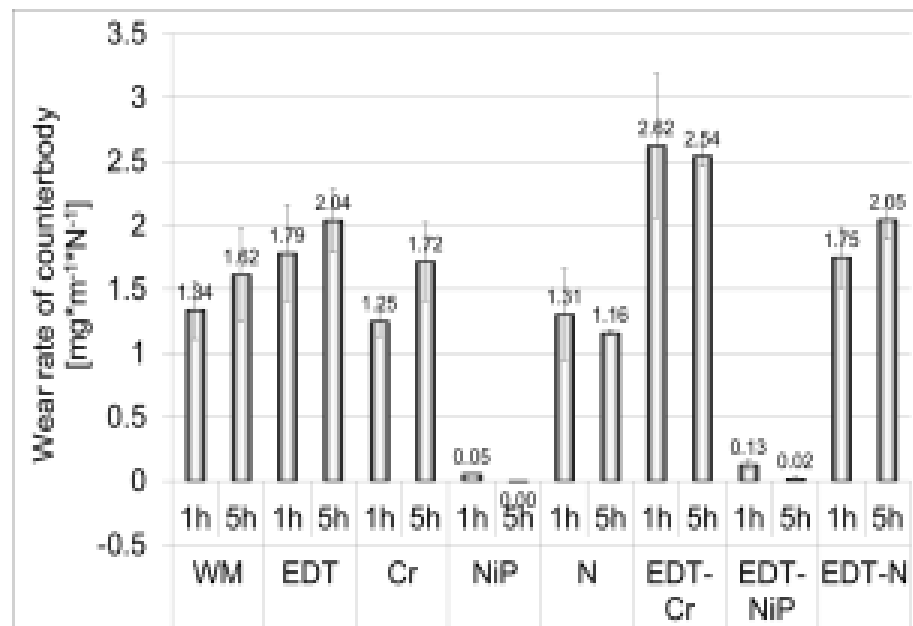




Taxas de desgaste

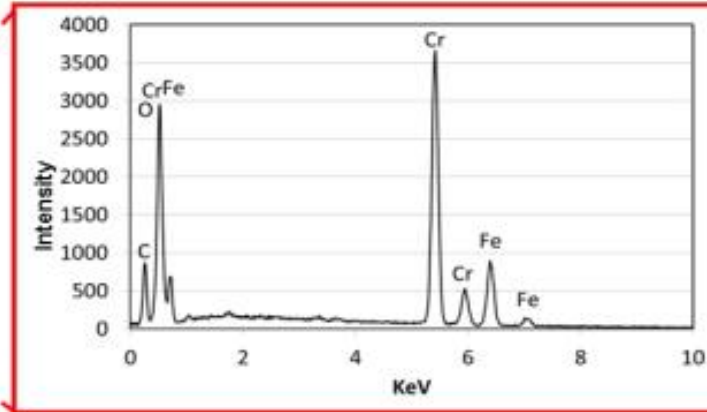
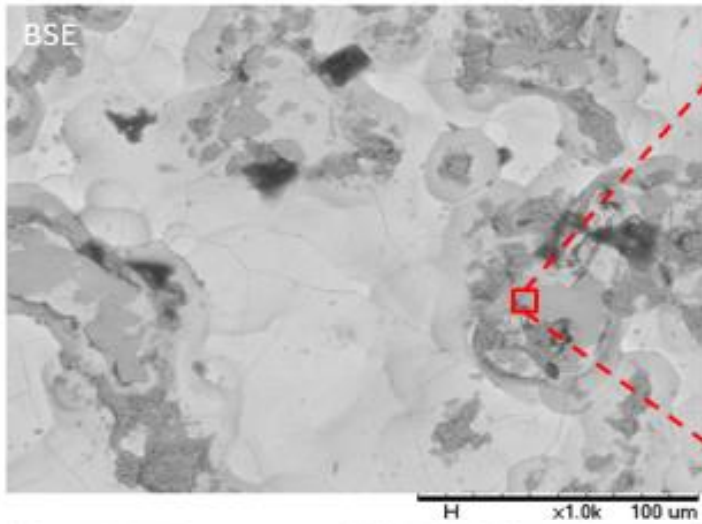


Amostras

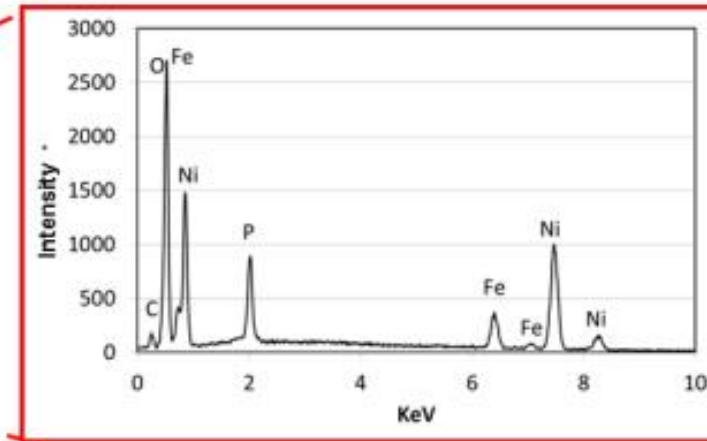
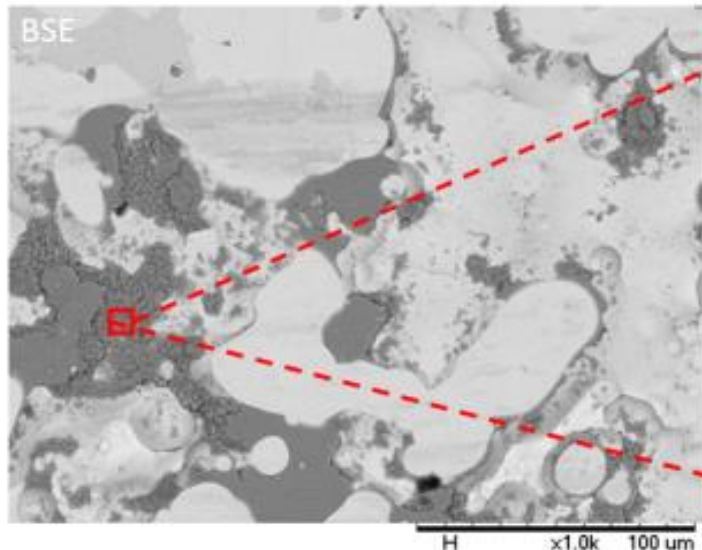


Contra-corpos

■ MEV + EDX: Amostras

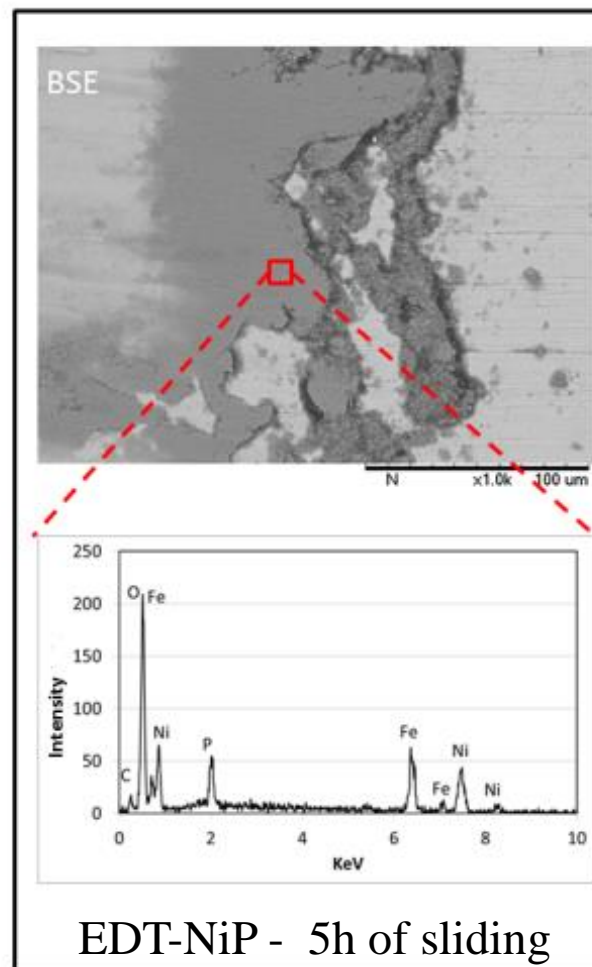
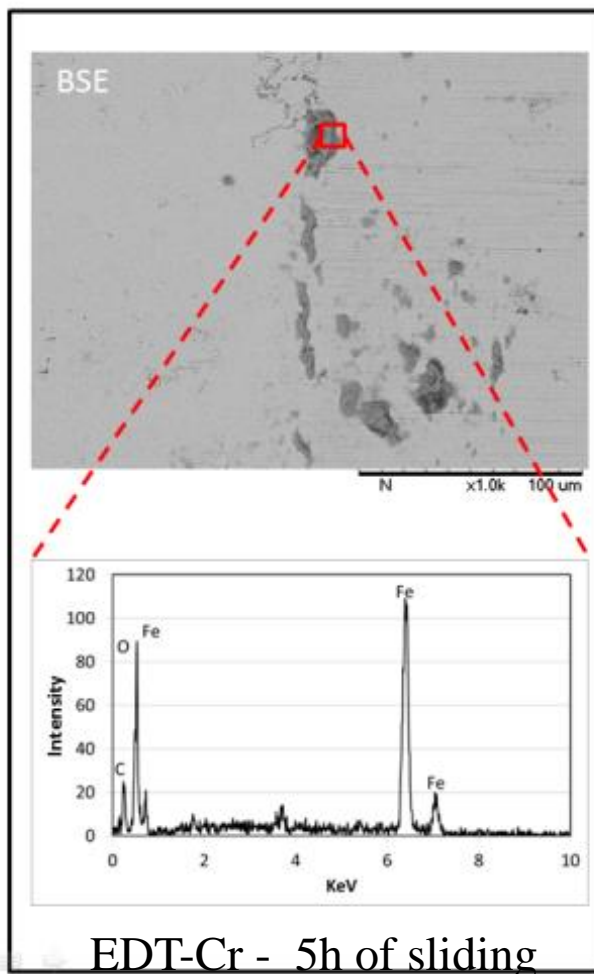


EDT-Cr - 5h



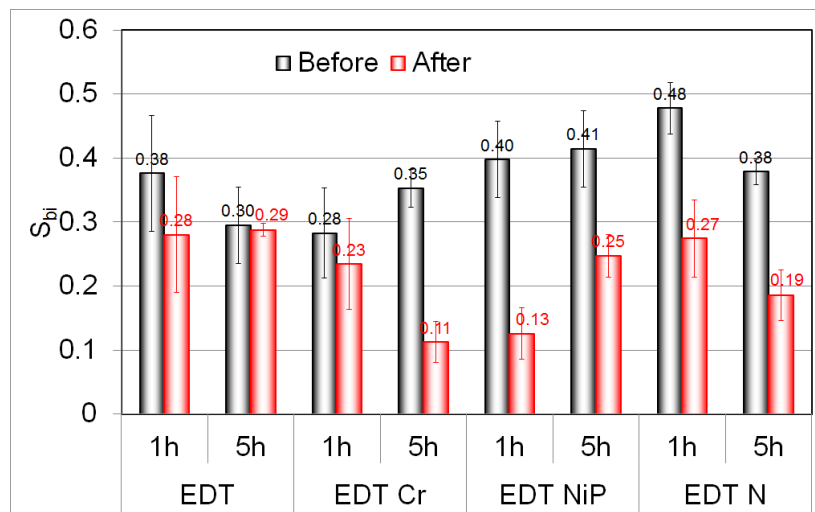
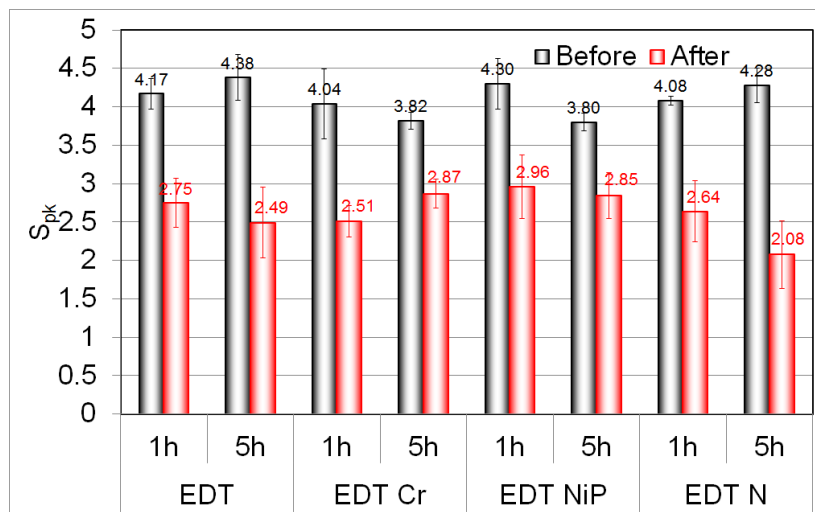
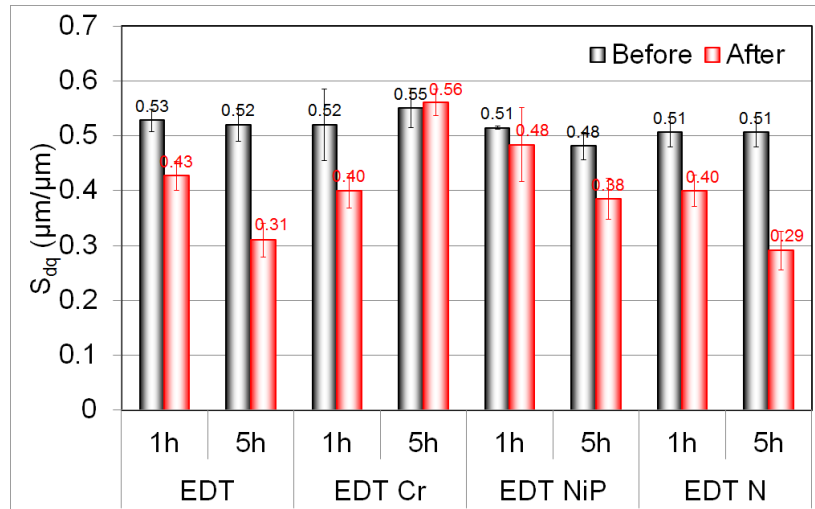
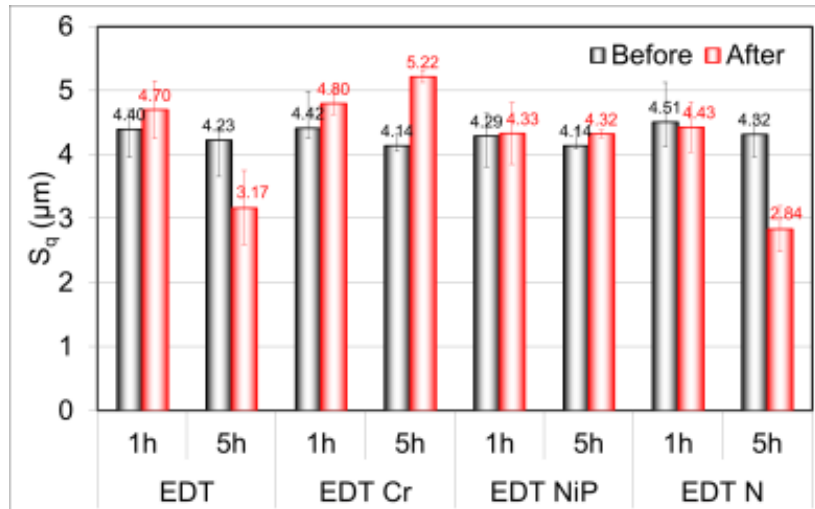
EDT-NiP - 5h

MEV + EDX: Contracorpos



Formação de tribocamada protetora de baixo atrito, a qual reduz o desgaste tanto da amostra quanto o do contra-corpo

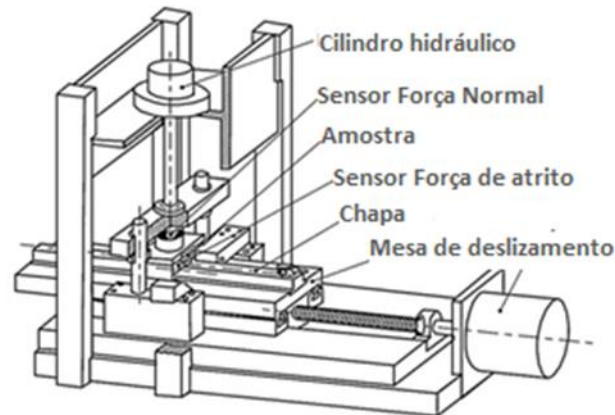
■ Alterações na topografia superficial devido ao desgaste



Caso 2: Mecanismos de desgaste em ferramentas de estampagem revestidas



De Souza e Liewald (2010)



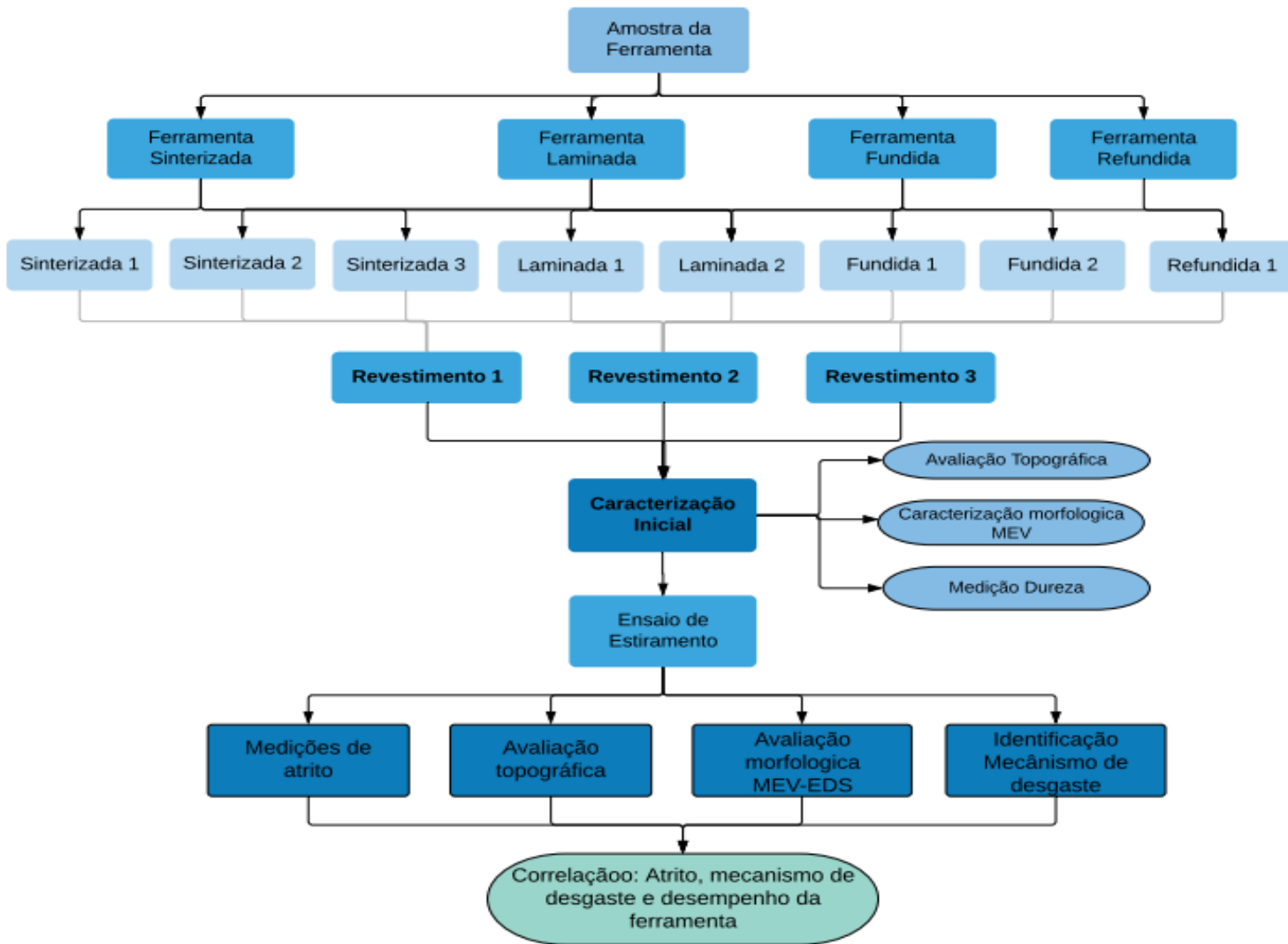
Ensaio que permite o controle de velocidade e carga normal, utilização de diferentes tipos e quantidade de lubrificantes;

Ensaio rápido;

Apresentam boa repetitividade;

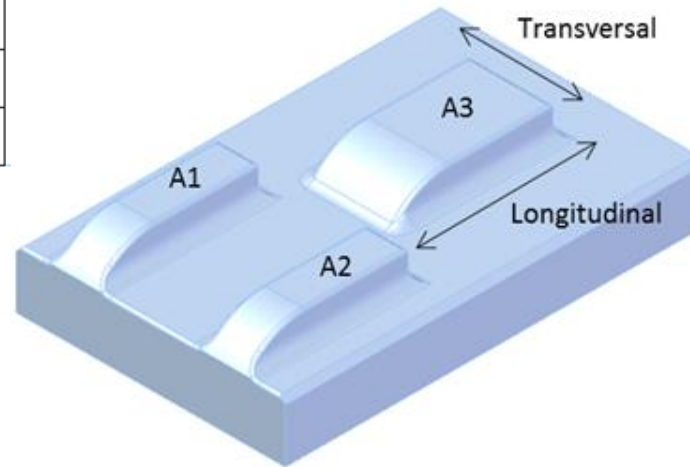
ENSAIOS DE ATRITO



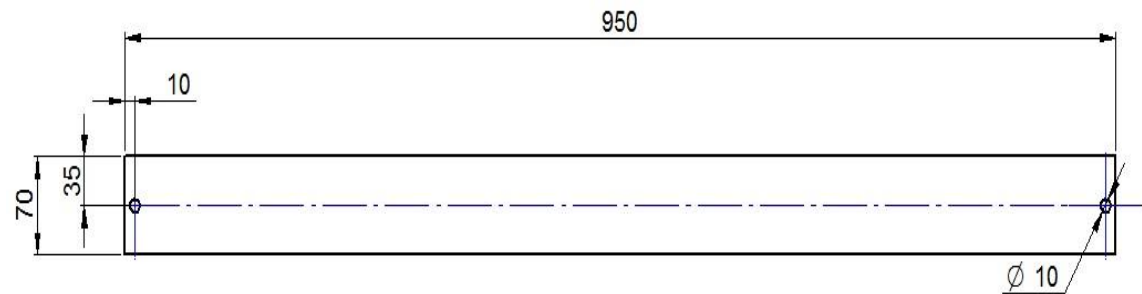


Amostra da Ferramenta

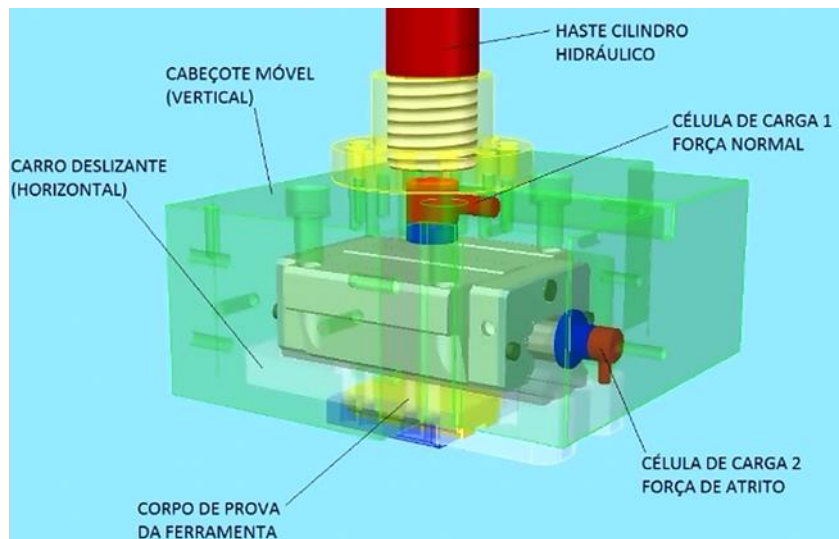
A1=A2	60,82 mm ²
A3	121,66 mm ²
A TOTAL	243,3 mm ²



Chapa Deslizada



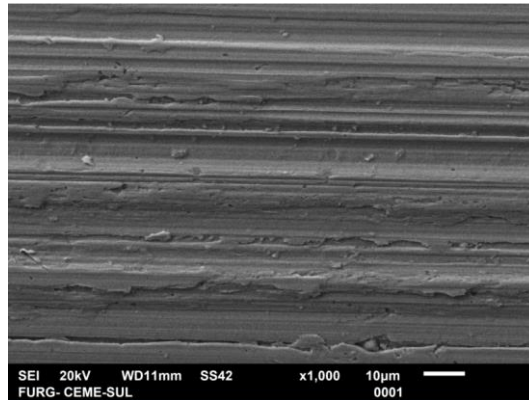
Parâmetros de ensaio



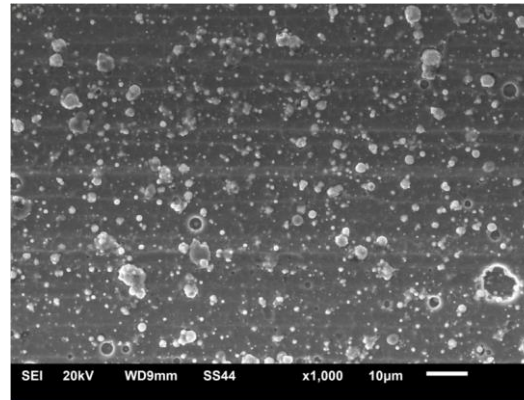
- A força normal foi ajustada para 5000 kgf;
- Velocidade constante de deslizamento foi de 100 mm/s;
- Deslizamento de 600 mm por chapa;
- Todos os testes foram realizados em temperatura ambiente;
- Aquisição de dados 1000Hz (força normal, força de atrito e posição da mesa)

CARACTERIZAÇÃO INICIAL

Usinagem
prévia bem
definida

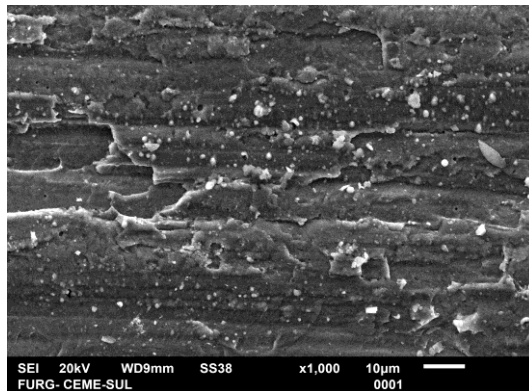


Sem Revestimento

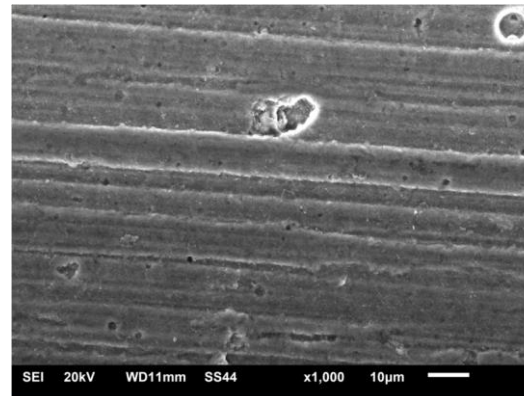


Revestimento 1

superfície
mais lisa e
uniforme +
alguns
glóbulos



Revestimento 2



Revestimento 3

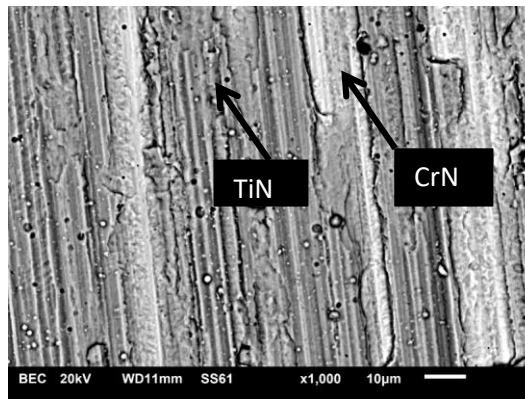
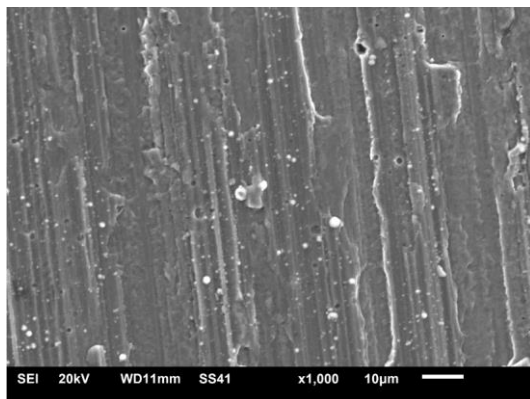
Crescimento
estrutura
colunar

Acompanho
u as marcas
de usinagem
prévias

CARACTERIZAÇÃO INICIAL

Caracterização de composição química do revestimento;

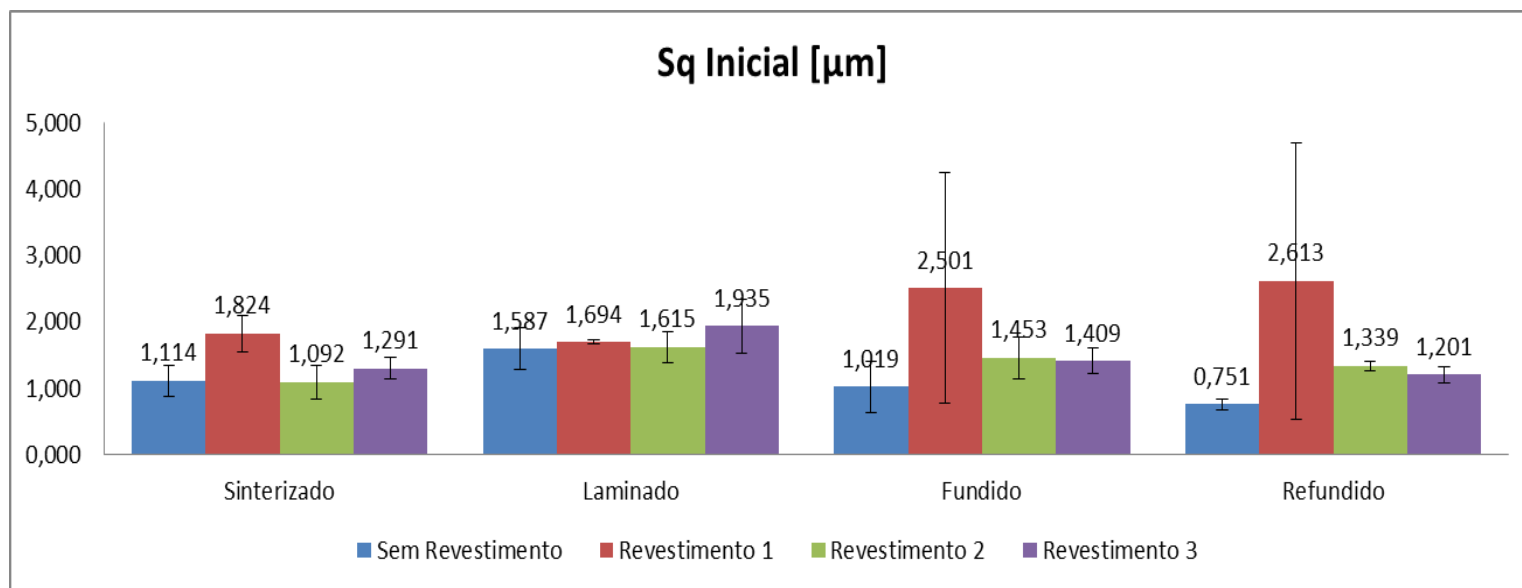
Amostra	% C	% N	% V	% Ti	% Cr	% Al
Revestimento 1	-	12 - 14	86 - 88	-	-	-
Revestimento 2 (1)	5-7	7 - 9	-	82 - 88	0 -3	
Revestimento 2 (2)	-	15 -18		5-15	60-80	
Revestimento 3	-	15 - 18	-	55-70	-	22-25





CARACTERIZAÇÃO INICIAL

Revestimento 1 maior rugosidade;
Amostras fundidas maior rugosidade para Revestimento 1;





CARACTERIZAÇÃO INICIAL

Dureza combinada:

	Revestimento 1	Revestimento 2	Revestimento 3	Substrato
Média	1638 HV	2533 HV	1906 HV	903 HV
Desvio P.	62,3 HV	88,2 HV	108,3 HV	25,2 HV

Dureza calculada:

Revestimento 1	Revestimento 2	Revestimento 3
3316,04 HV	5397,42 HV	4068,13 HV

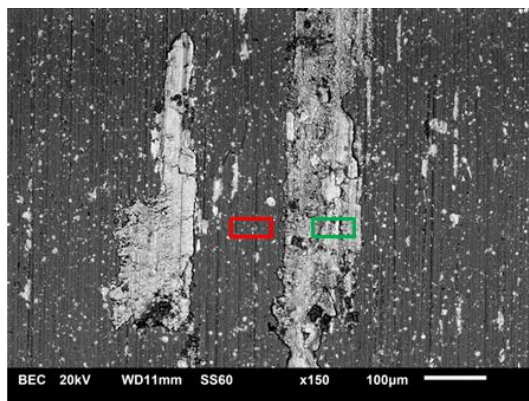
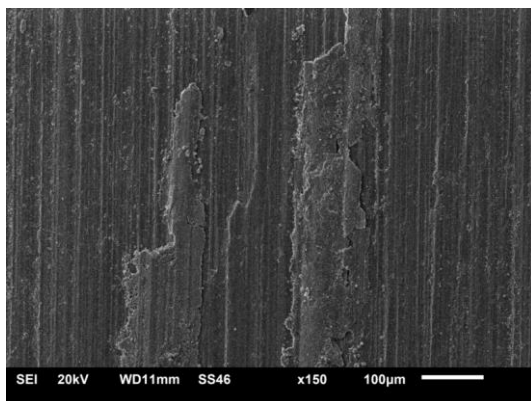


ENSAIO TRIBOLÓGICO

Corpo de prova		Revestimento	Nº chapas deslizadas
Aço sinterizado	Condição Final	Sem revestimento	1
	Condição Final	Revestimento 1	25
	Condição Final	Revestimento 2	25
	Condição Final	Revestimento 3	20
Aço Laminado	Condição Final	Sem Revestimento	1
	Condição Final	Revestimento 1	25
	Condição Final	Revestimento 2	25
	Condição Final	Revestimento 3	17
Aço fundido	Condição Final	Sem Revestimento	1
	Condição Final	Revestimento 1	25
	Condição Final	Revestimento 2	25
	Condição Final	Revestimento 3	25
Aço Refundido	Condição Final	Sem Revestimento	1
	Condição Final	Revestimento 1	25
	Condição Final	Revestimento 2	25
	Condição Final	Revestimento 3	25

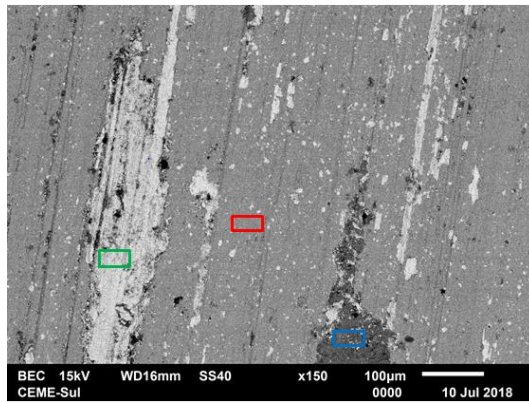
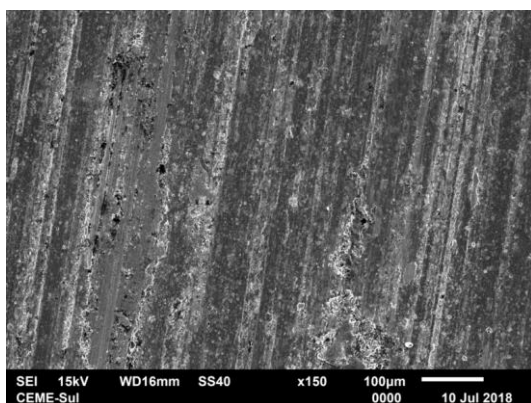
**MECÂNIISMOS DE
DESGASTES**

Análise via MEV– Amostras Revestimento 1



% Peso	N	O	V	Cr	Mn	Fe
 	8,11	34,58	55,81	0 -	-	1,24
 	5,42	15,03	24,17	0,1	1,05	51,83

Intermediária

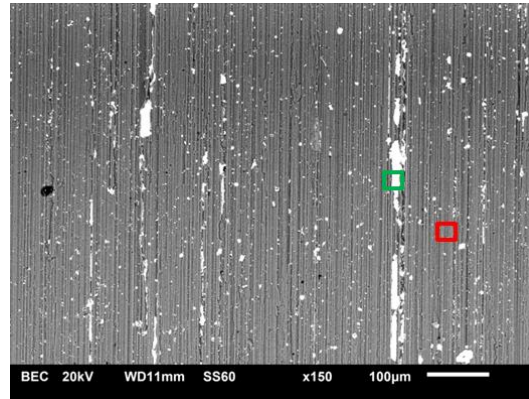
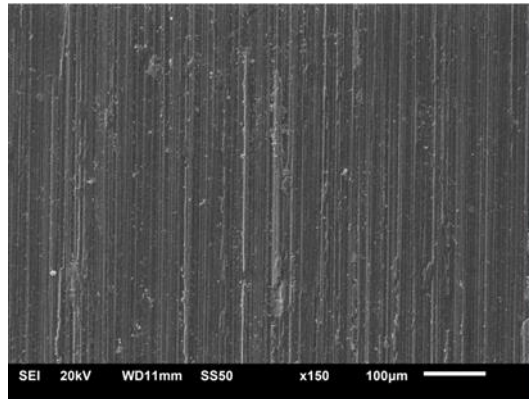


% Peso	N	O	V	Cr	Mn	Fe
 	8,38	28,19	60,45	-	-	2,66
 	-	5,15	2,52	0,19	1,84	88,37
 	-	32,12	2,88	-	1,4	56,91

Final

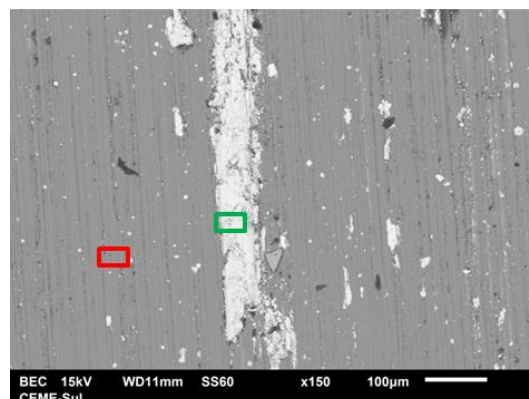
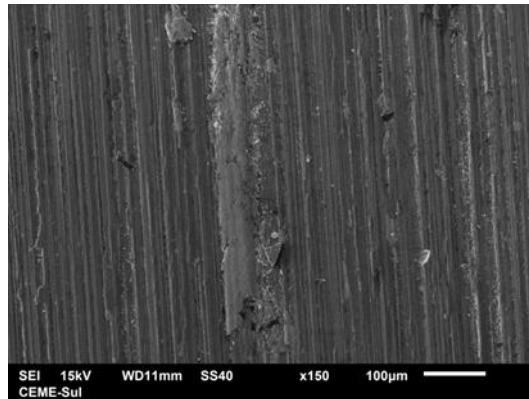
MECÂNIISMOS DE
DESGASTES

Análise via MEV– Amostras Revestimento 3



% Peso	N	O	Al	Ti	Mn	Fe
Red Box	-	22,88	1,42	22,55	50,2	1,26
Green Box	-	-	1,09	0,88	4,19	1,59
						90,99

Intermediária

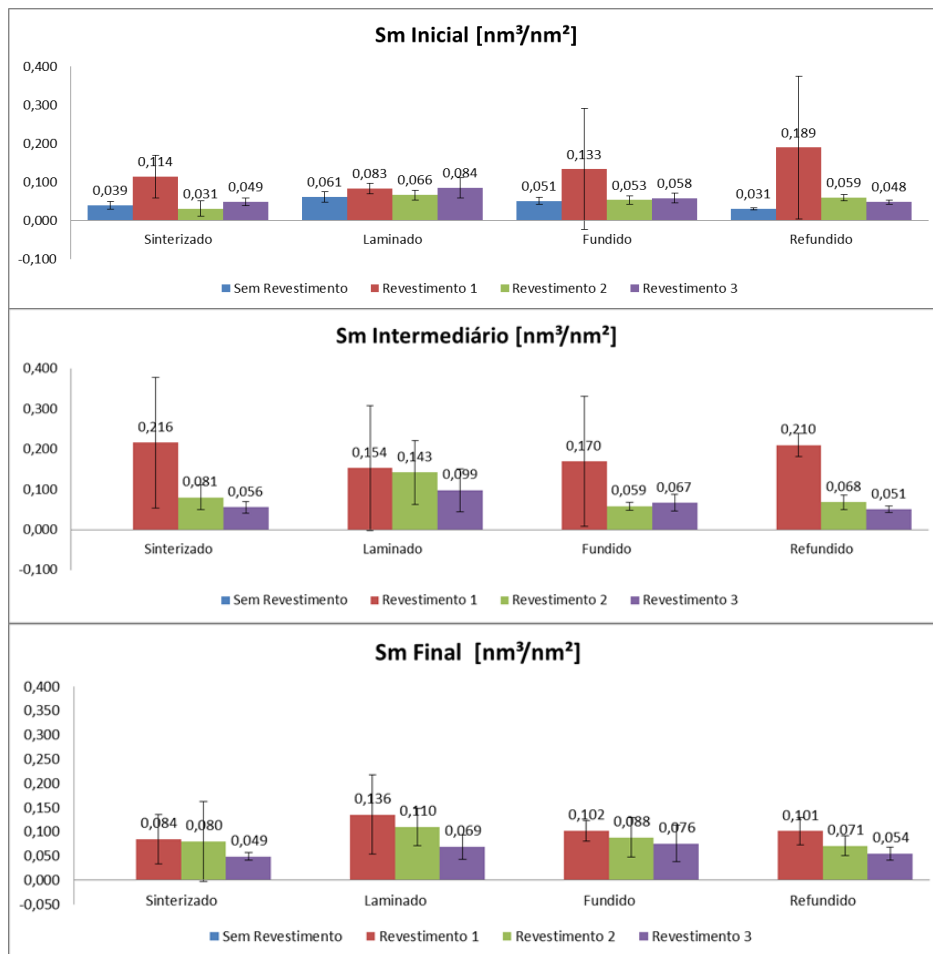


% Peso	N	O	Al	Ti	Mn	Fe
Red Box	-	20,03	0,28	23,42	53,96	1,12
Green Box	-	-	1,53	0,23	0,37	1,83
						94,57

Final

PARÂMETROS DE SUPERFÍCIE

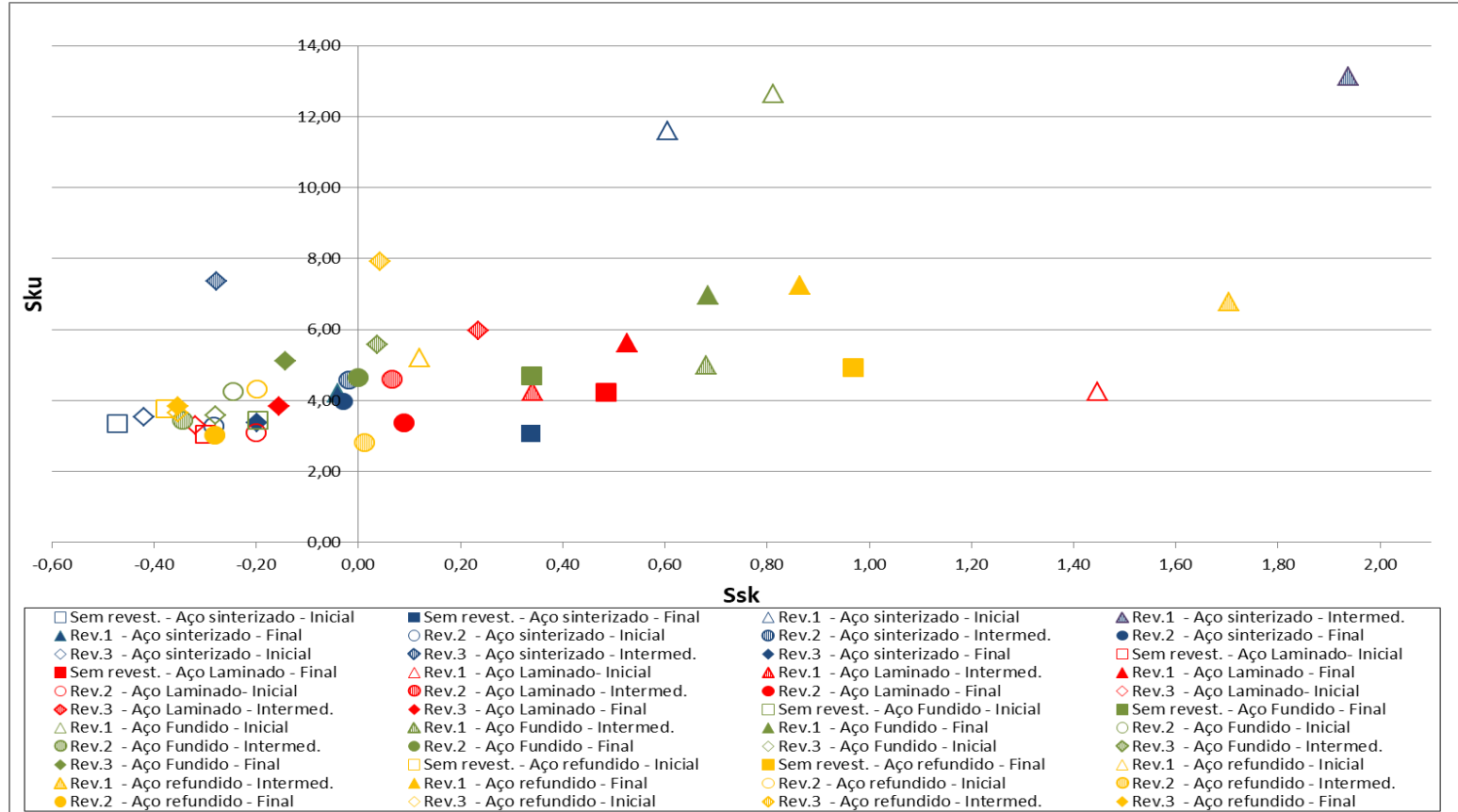
Parâmetro Sm





PARÂMETROS DE SUPERFÍCIE

Espaço Morfológico





CARACTERÍSTICAS DOS REVESTIMENTOS

Revestimento 1

- Desenvolvimento de uma camada transferida da chapa, relativamente lisa e deformada sobre a superfície da ferramenta.

- Camada transferida oxidada;

- O revestimento também está sendo oxidado.

- Características morfológicas de desgaste semelhante para todos os substratos analisados.

Revestimento 2

- Desenvolvimento de uma camada transferida da chapa, relativamente lisa e deformada sobre a superfície da ferramenta.

- Camada transferida oxidada;

- O revestimento também está sendo parcialmente oxidado.

- Características morfológicas de desgaste semelhante para todos os substratos analisados.

Revestimento 3

- Camada transferida menos compactada

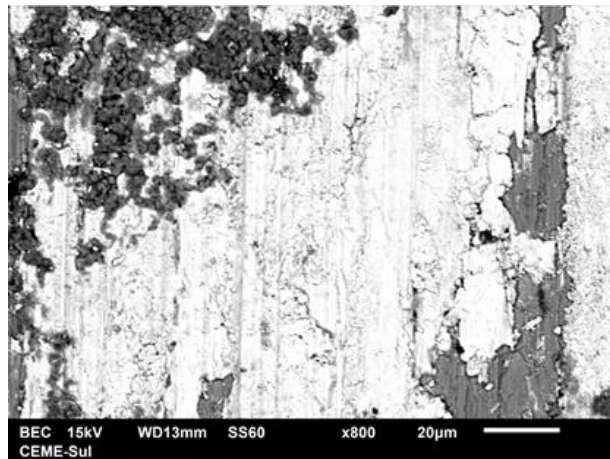
- Menor adesão da camada transferida à superfície da ferramenta

- Pouca deformação, formando protuberâncias

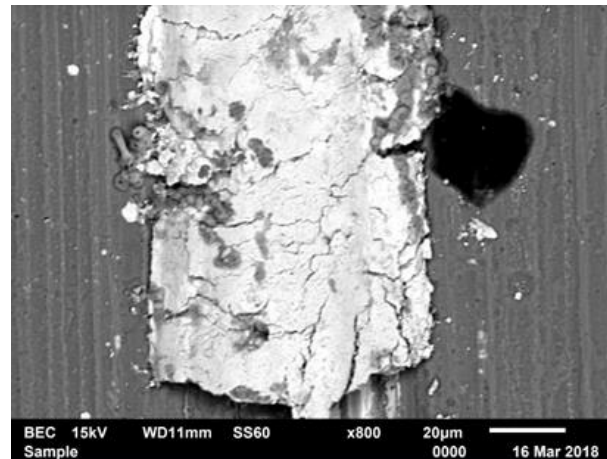
- Ausência de oxidação (tanto na camada transferida quanto no revestimento).

Papel da camada transferida na tribologia de ferramentas de conformação

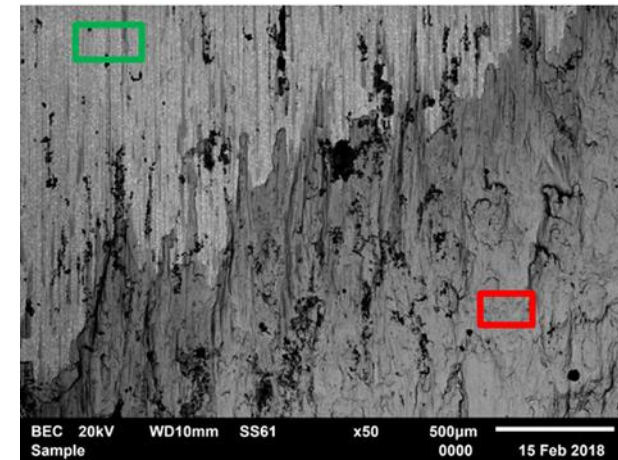
■ Camada transferida



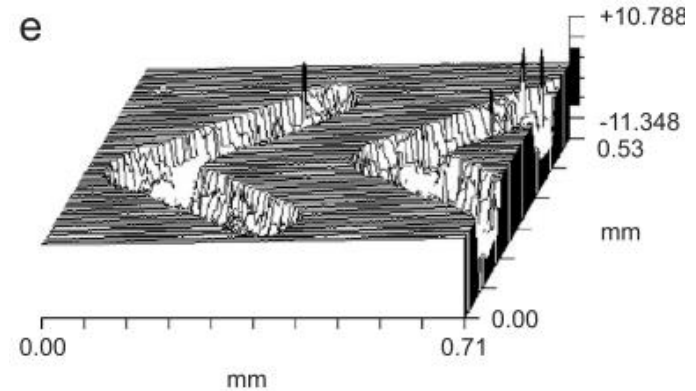
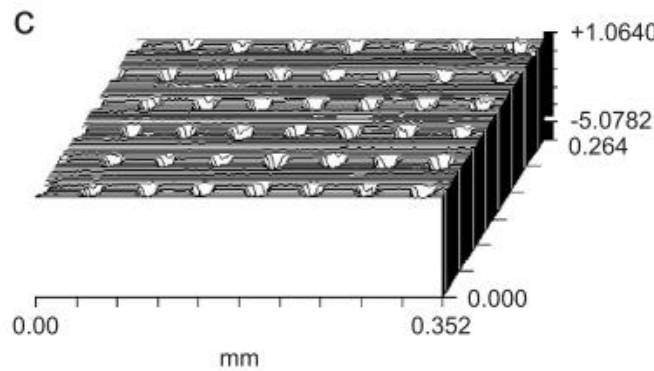
■ Camada transferida



■ Adesão

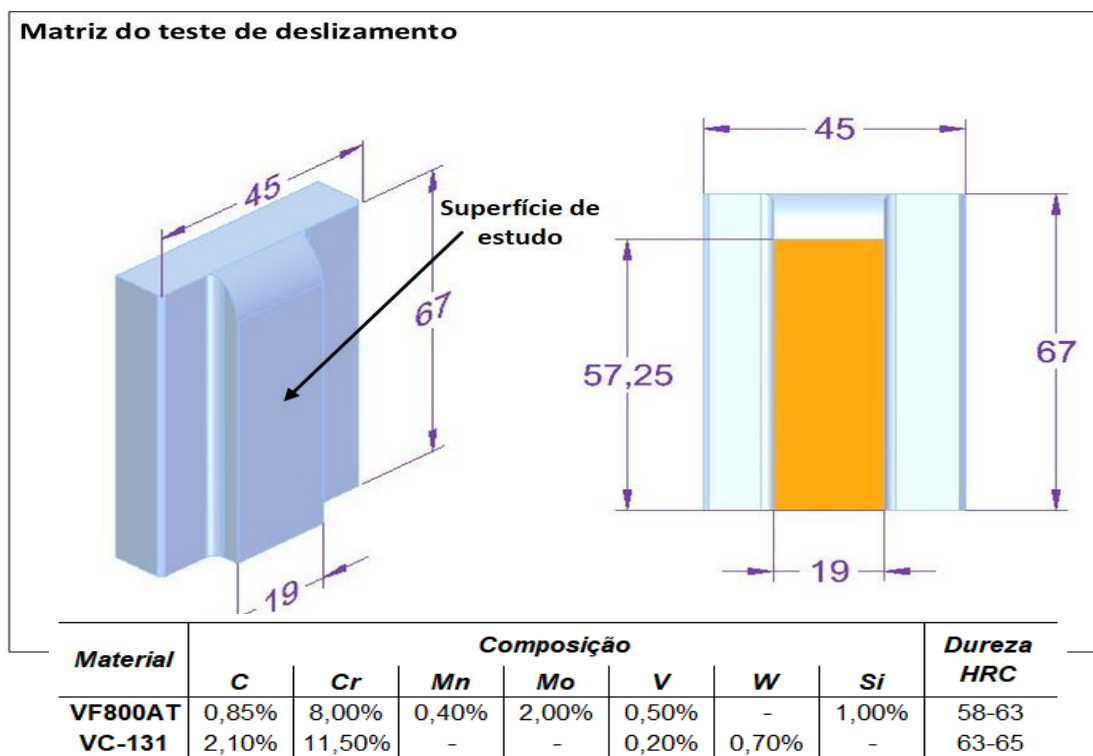


Caso 3: texturização + revestimento de ferramentas de estampagem

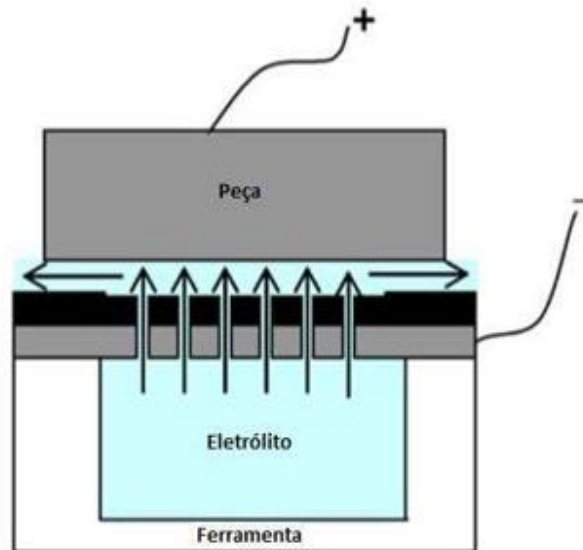


Regime	Super-hidrofílico	Hidrofílico	Hidrofóbico	Super-hidrofóbico
Diagrama da gota				
Ângulo de contato	$\theta < 10^\circ$	$\theta < 90^\circ$	$\theta > 90^\circ$	$\theta > 150^\circ$

4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL



TÉCNICA DE TEXTURIZAÇÃO - *MECT* - *Maskless electrochemical texturing*

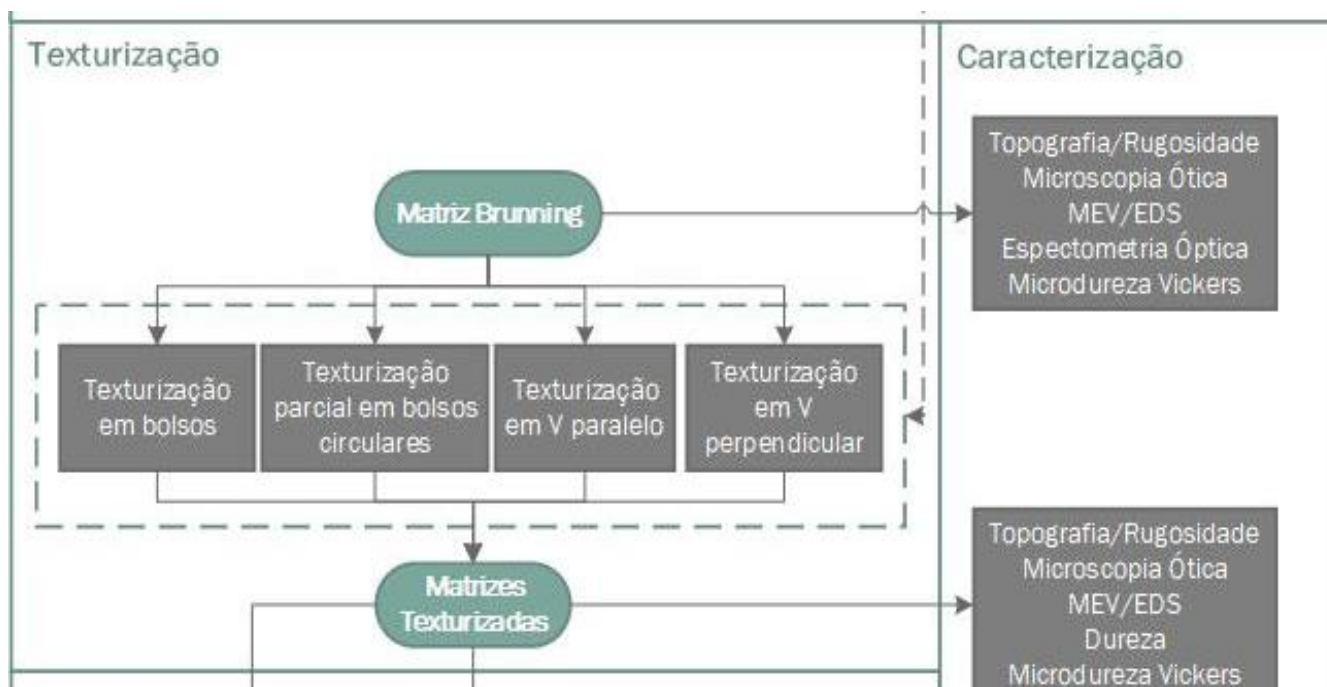


COSTA, H. L.; HUTCHINGS, I. M. Development of a maskless electrochemical texturing method. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009;
FERRI, G. G. B. Texturização superficial eletroquímica sem mascaramento de componentes cilíndricos, 2019. Universidade Federal do Rio Grande.

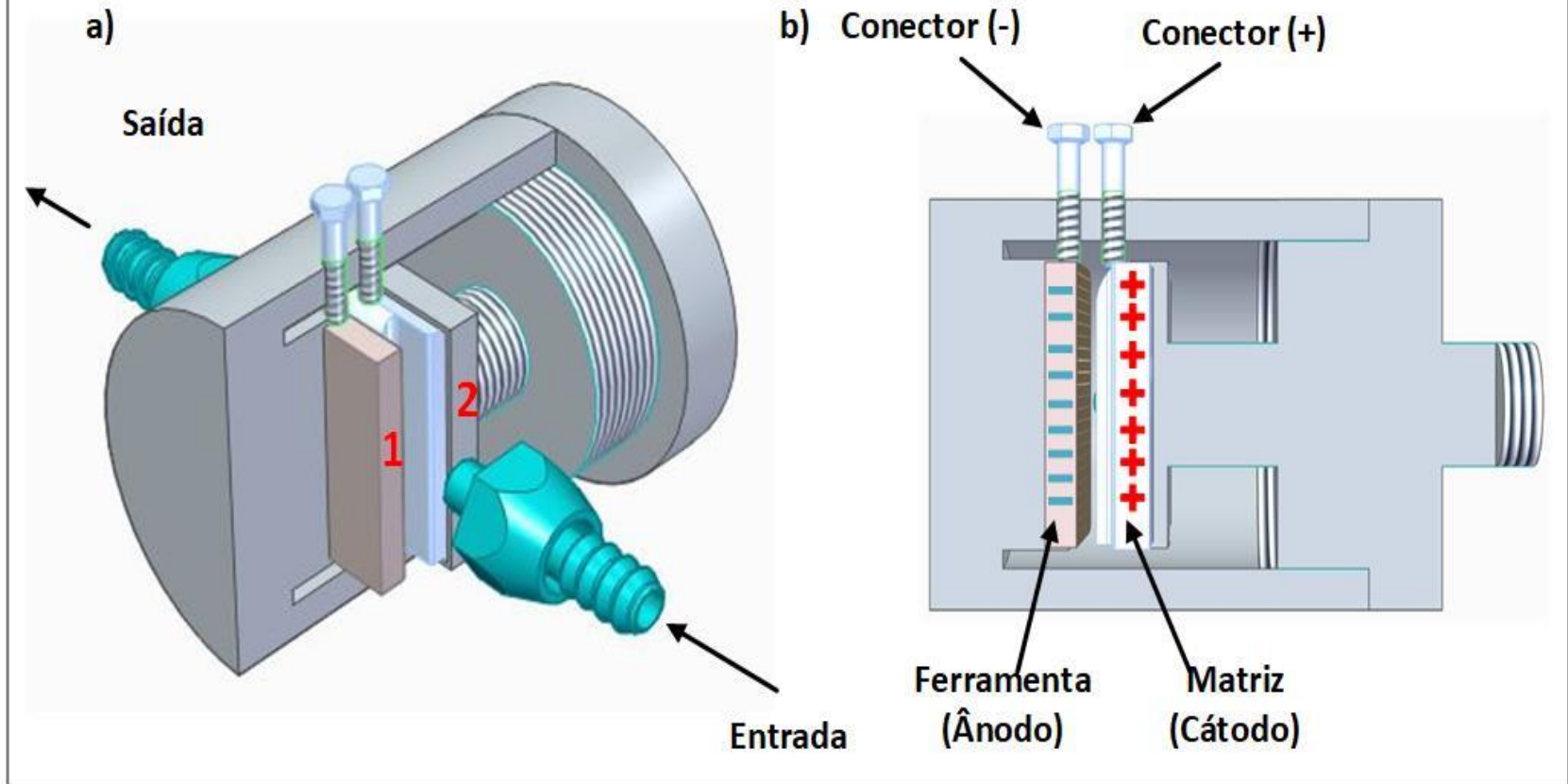
4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL



4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

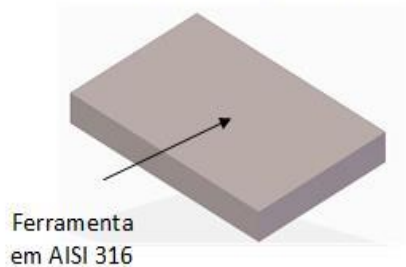


Câmara de texturização em corte

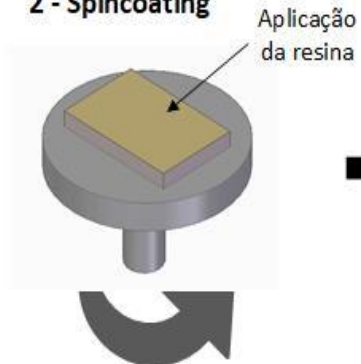


Fabricação da ferramenta de texturização

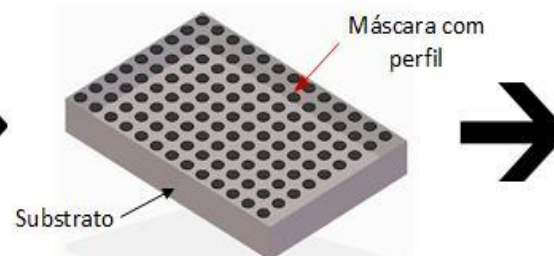
1 - Limpeza da superfície



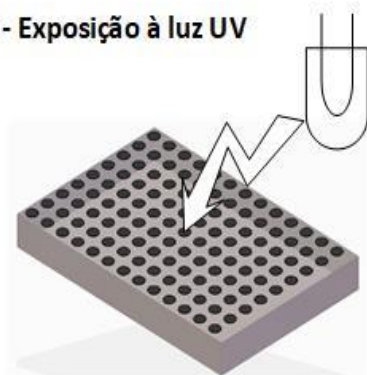
2 - Spincoating



3 - Mascaramento da resina



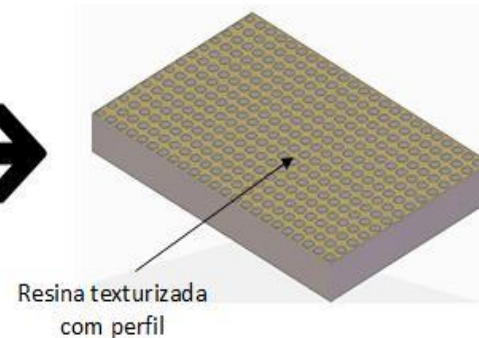
4 - Exposição à luz UV

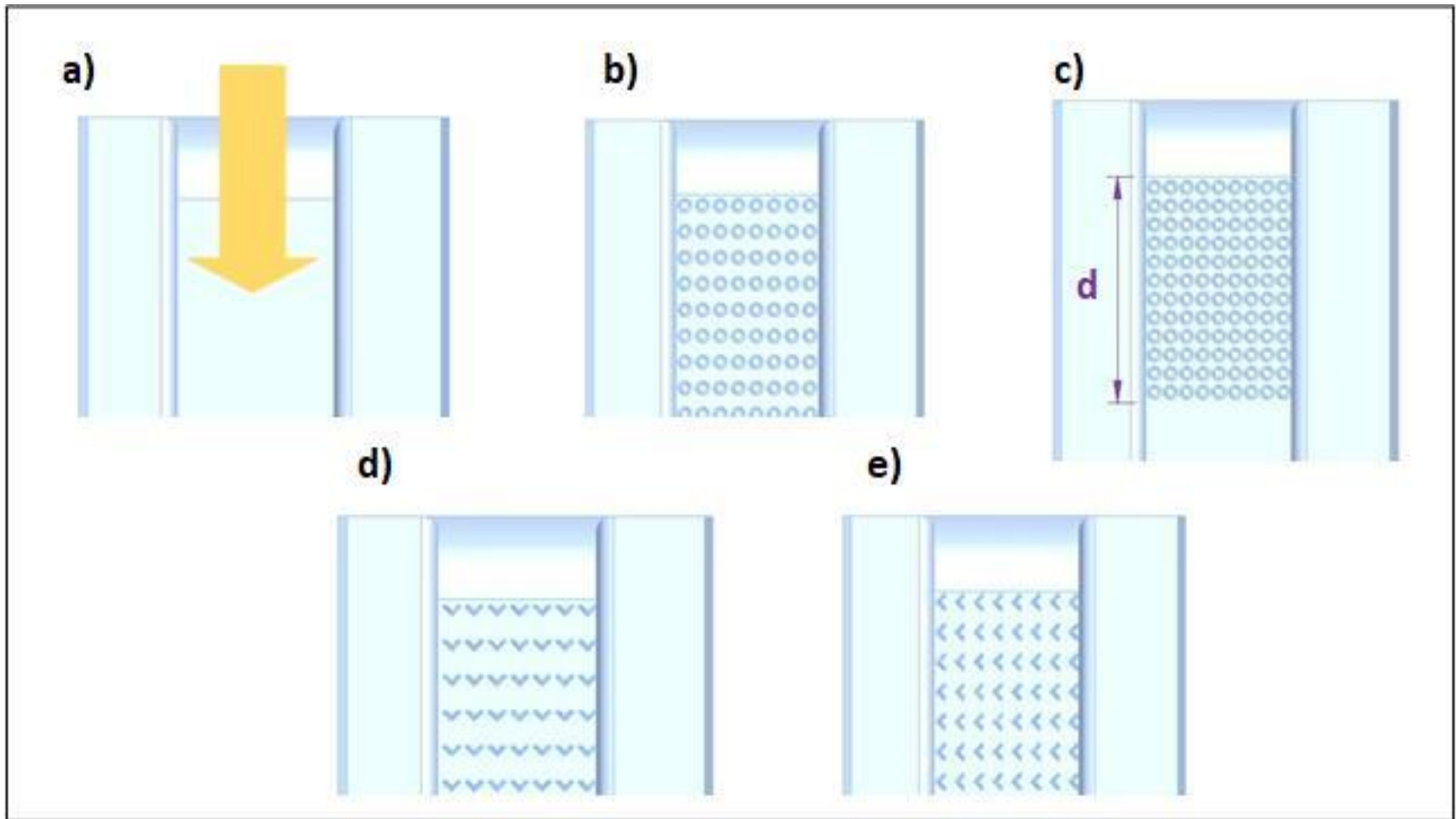


5- Desenvolvimento da resina

Aplicação do developer e enxague

6 - Obtenção da ferramenta de texturização

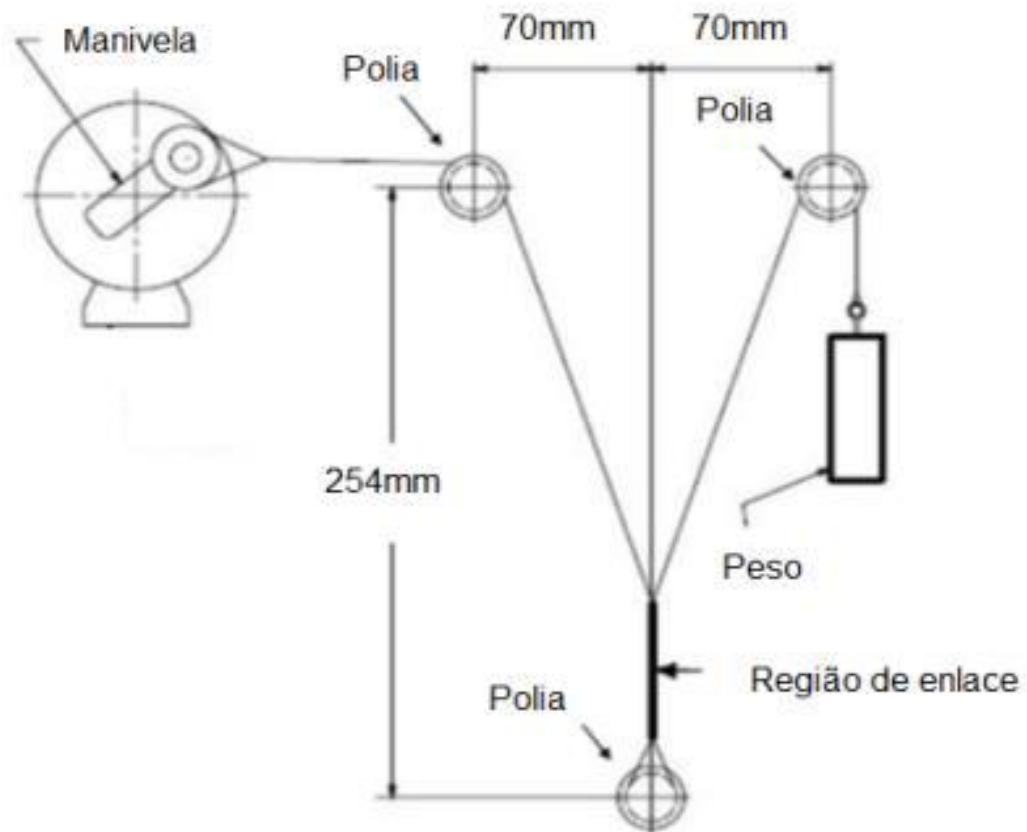






Cabos de amarração poliméricos

Cordage Institute, CI 1503-99 e ASTM Standards, D6611/2007





Ensaio de tração simples

	Cabo usado				Cabo virgem		
Carga de ruptura	170,23 N			Carga de ruptura	262,30 N		

Ensaio de desgaste

	Cabo usado				Cabo virgem		
Carga	4%	4%	4%	Carga	4%	4%	4%
Atmosfera	seca	úmida	salina	Atmosfera	seca	úmida	salina
CP1	5407	4846	5806	CP1	1950	6805	7740
CP2	5709	3809	5117	CP2	2183	6456	7008
CP3	6603	4334	4806	CP3	2312	7136	7989
CP4	5392	5796	5771	CP4	1997	6989	7521
CP5	6775	5010	5012	CP5	2044	6841	7733
CP6	4997	3697	5957	CP6	2349	6341	7803
CP7	5797	4825	5672	CP7	1946	7292	7718
CP8	6164	5265	6430	CP8	1803	6817	7452
Média	5856	4698	5571	Média	2073	6835	7621



Desgaste em compósitos de madeira



Eucalyptus sp

Boas condições de plantio
Rápido crescimento
Programas de reflorestamento

Fibras de madeira

Celulose

O RS tem uma estrutura consolidada para a produção e exportação

Resina UF

Hidrólise ácida

Nanocelulose ácida

Alta rigidez
Resistência mecânica
Baixa densidade

Painéis de madeira MDF

Acidificação da resina
Processo de polimerização



Painéis MDF

MAIOR
VALOR
AGREGADO

Melhora nas propriedades mecânicas ou superficiais???

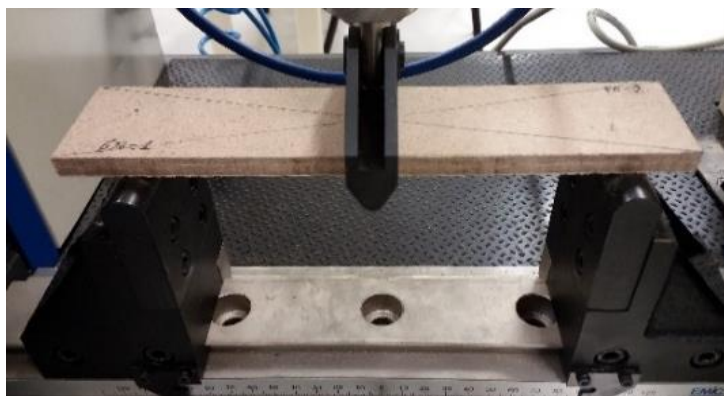
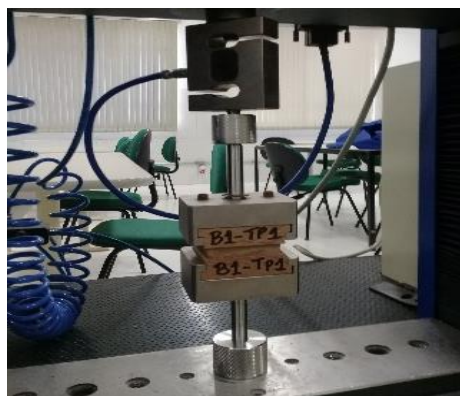


ENSAIOS MECÂNICOS

Tração perpendicular (adesão interna);

Flexão estática (MOE e MOR);

Dureza Shore D.





ENSAIOS SUPERFICIAIS

Rugosidade;

Desgaste;

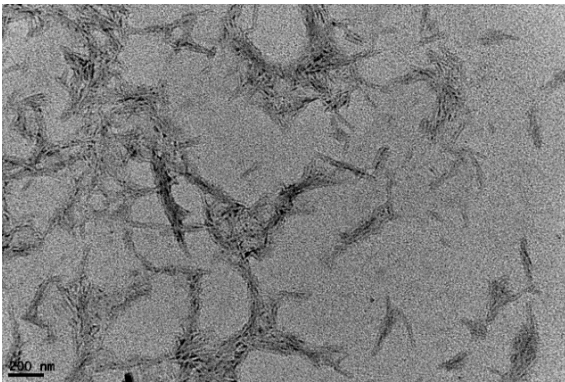
MEV das amostras desgastadas.

$$Q = \frac{\Delta m}{d \cdot F} \left(\frac{Kg}{m \cdot N} \right) \quad d = 40 \text{ m}, F = 10 \text{ N}$$

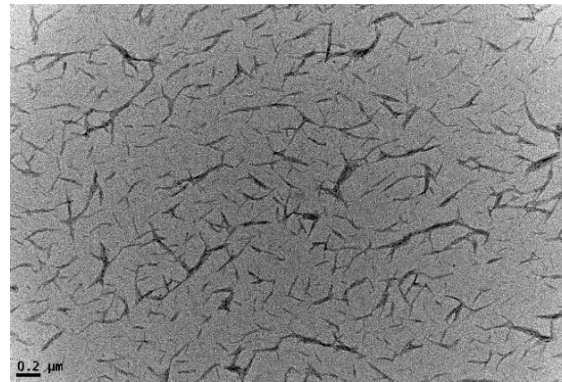


IMAGENS DE MET e pH

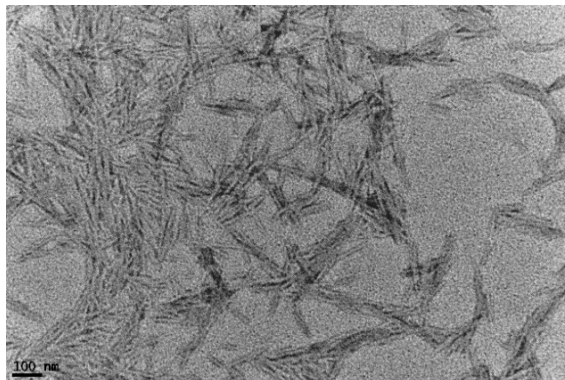
Nanocristais de celulose obtidos do sobrenadante



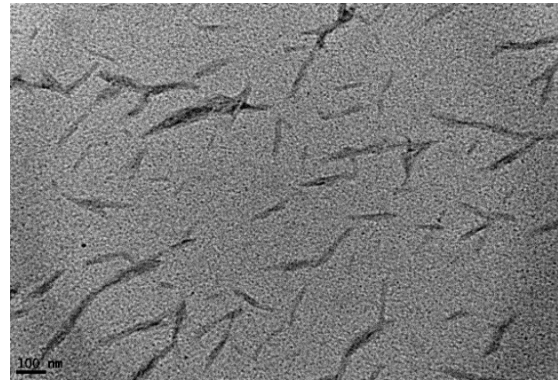
Terceira centrifugação, menor aumento



Quinta centrifugação, menor aumento



Terceira centrifugação, maior aumento



Quinta centrifugação, maior aumento

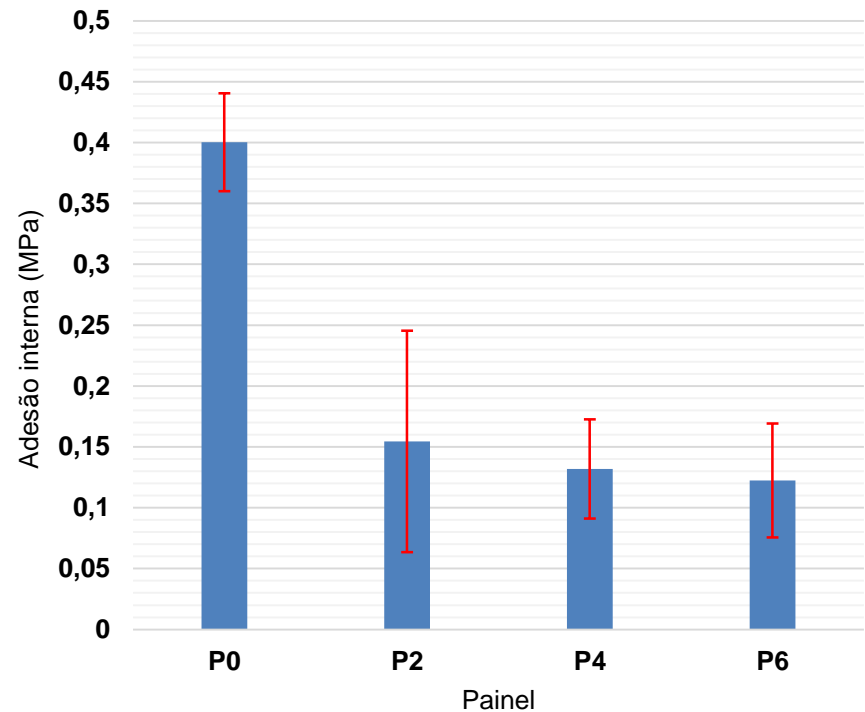
Números de centrifugações	pH
1	0,57
3	1,94
4	2,39
5	3,54



PROPRIEDADES MECÂNICAS

Resistência à tração perpendicular

Painel	Adesão interna* (MPa)	Desvio padrão
P0	0,40 a	0,04
P2	0,15 b	0,09
P4	0,13 b	0,04
P6	0,12 b	0,05

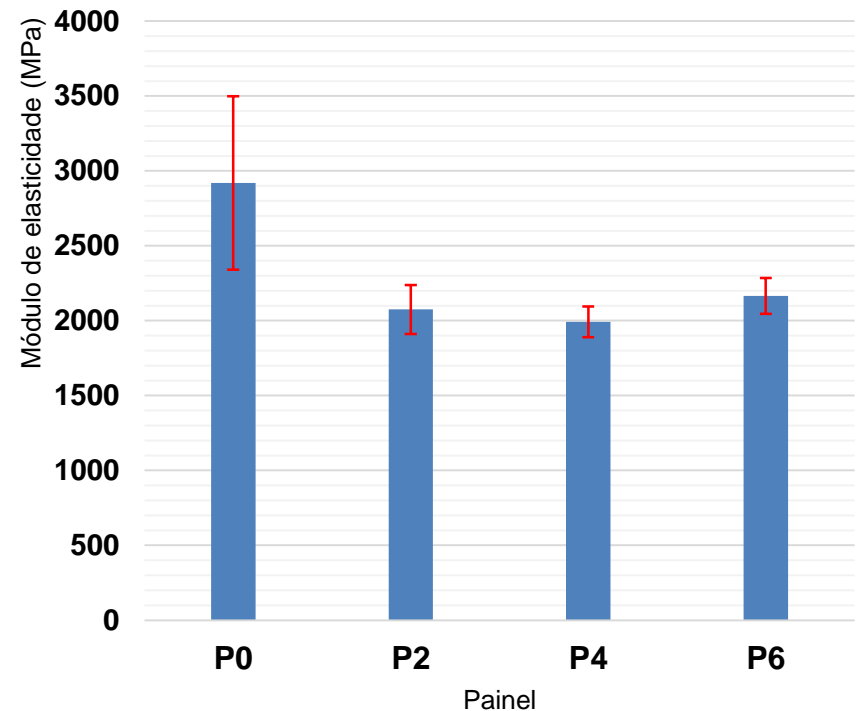




PROPRIEDADES MECÂNICAS

Flexão elástica (MOE)

Painel	Módulo de elasticidade* (MPa)	Desvio padrão
P0	2920,33 a	579,05
P2	2074,77 b	163,38
P4	1991,61 b	102,47
P6	2164,94 b	119,54

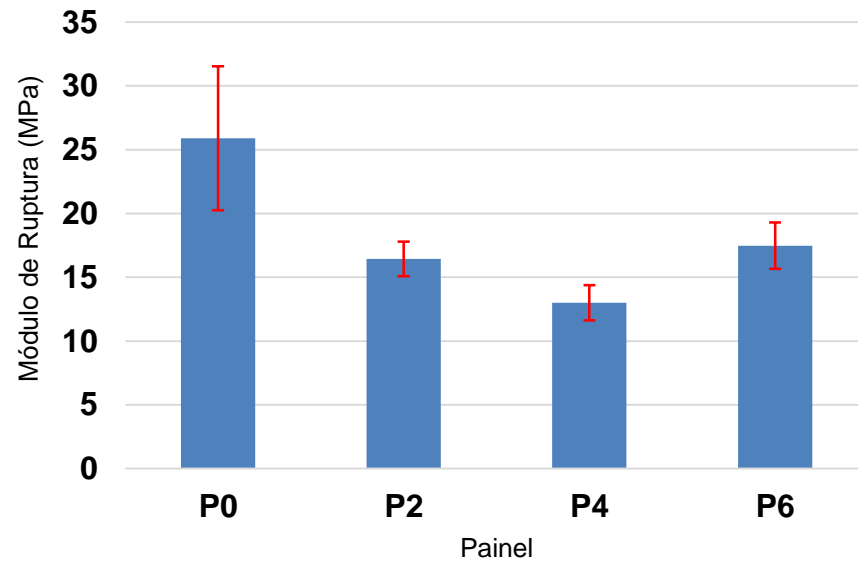




PROPRIEDADES MECÂNICAS

Flexão elástica (MOR)

Painel	Módulo de ruptura* (MPa)	Desvio padrão
P0	25,90 a	5,65
P2	16,43 b	1,35
P4	13,00 b	1,38
P6	17,47 b	1,82

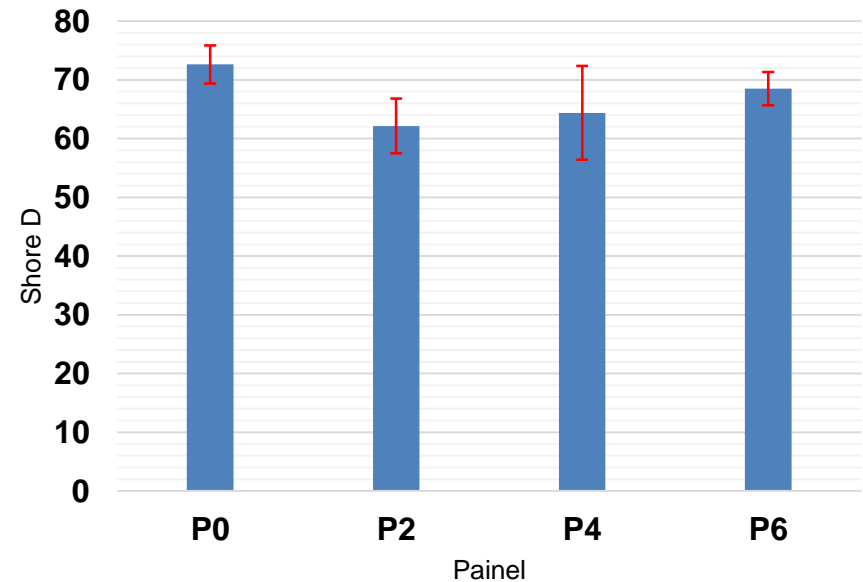




PROPRIEDADES MECÂNICAS

Dureza Shore D

Painel	Shore D*	Desvio padrão
P0	72,63 a	3,22
P2	62,15 b	4,67
P4	64,38 b	7,98
P6	68,50 ab	2,85

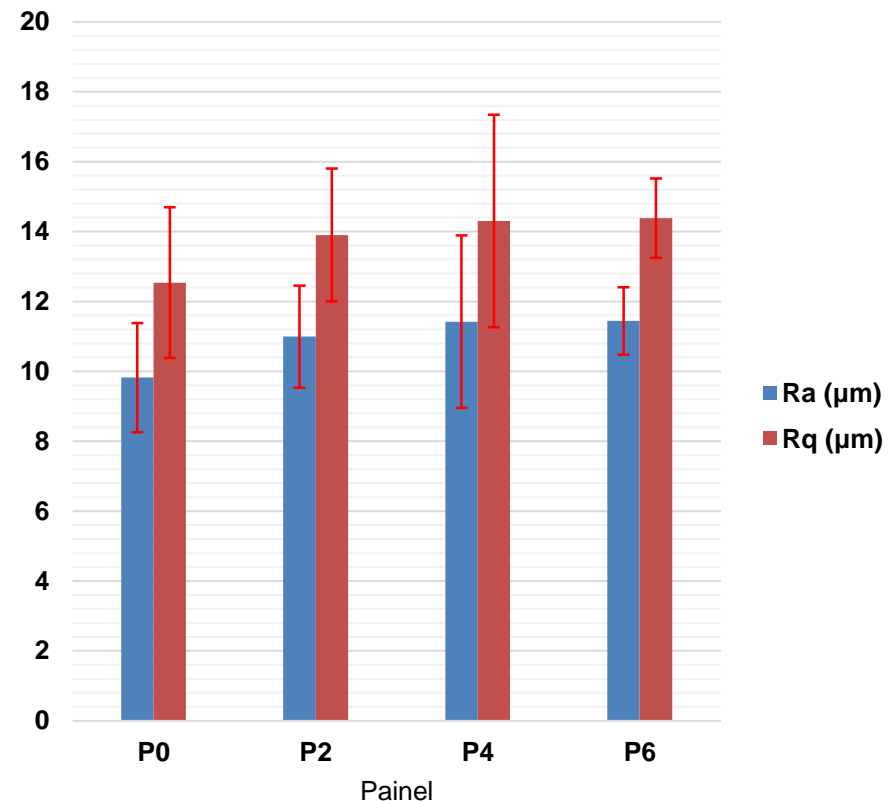




PROPRIEDADES SUPERFICIAIS

Resultados médios dos parâmetros Ra e Rq

Painel	Ra* (μm)	Desvio padrão	Rq* (μm)	Desvio padrão
P0	9,82 a	1,56	12,54 a	2,16
P2	10,99 a	1,46	13,90 a	1,90
P4	11,42 a	2,47	14,30 a	3,04
P6	11,44 a	0,96	14,39 a	1,13

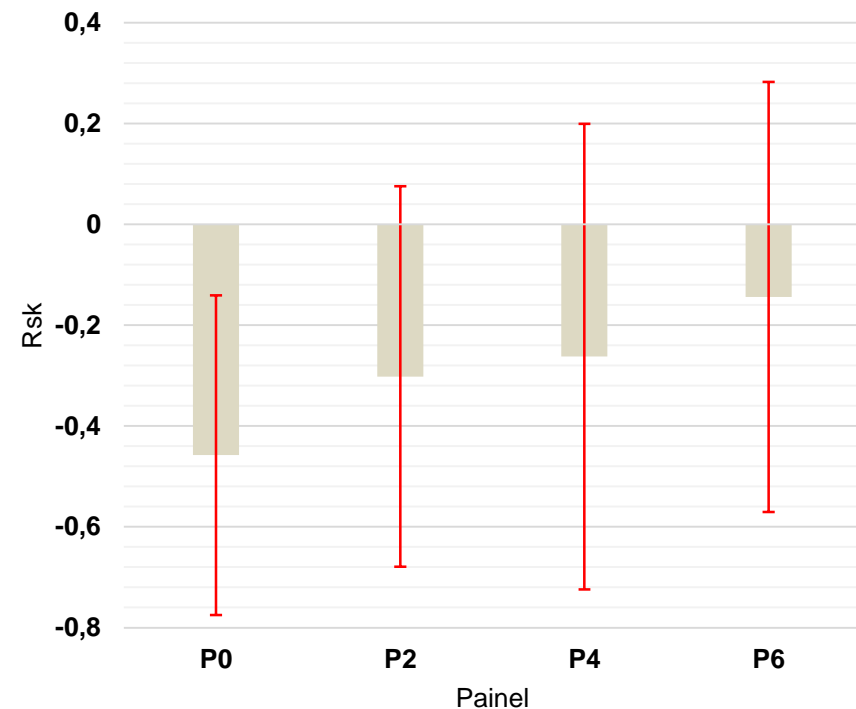




PROPRIEDADES SUPERFICIAIS

Resultados médios do parâmetro Rsk

Painel	Rsk*	Desvio padrão
P0	-0,46 a	0,32
P2	-0,30 a	0,38
P4	-0,26 a	0,46
P6	-0,14 a	0,43

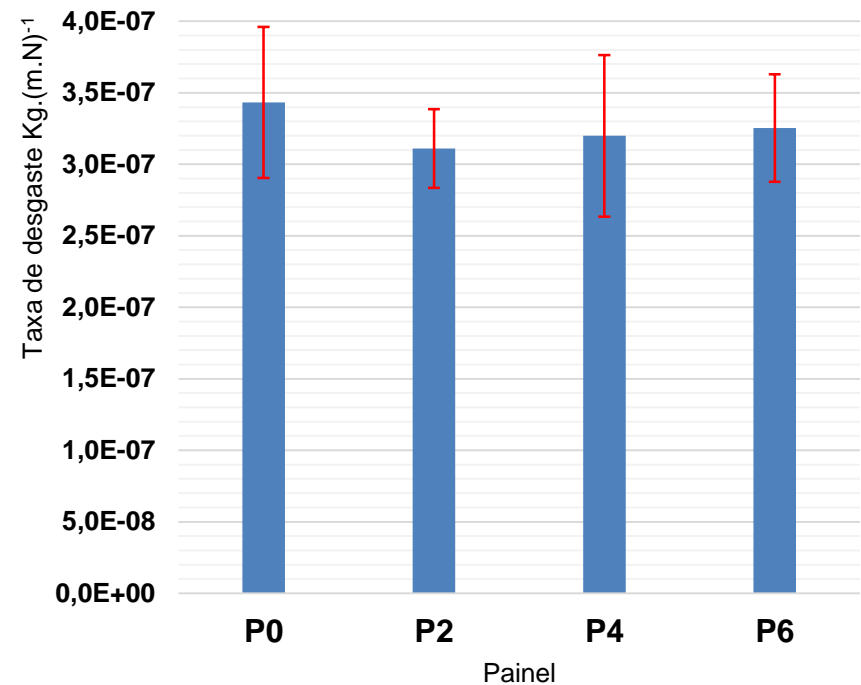




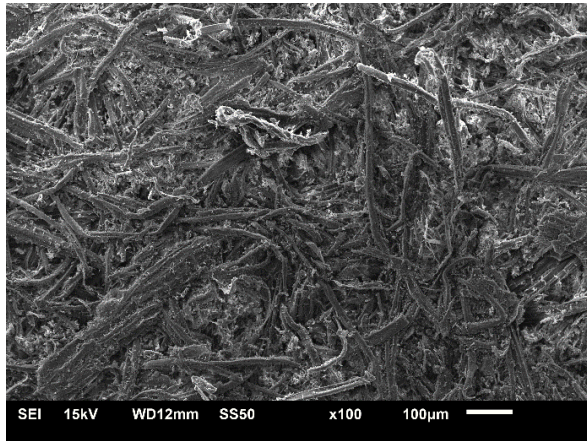
PROPRIEDADES SUPERFICIAIS

Taxa de desgaste

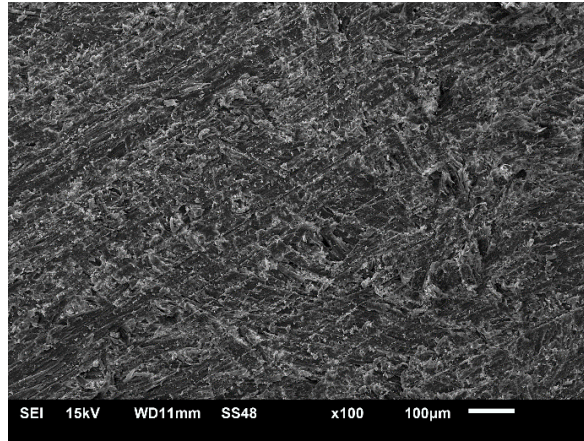
Painel	Taxa de desgaste* (Kg/(m.N))	Desvio padrão
P0	3,43E-07 a	5,28E-08
P2	3,11E-07 a	2,76E-08
P4	3,20E-07 a	5,65E-08
P6	3,25E-07 a	3,76E-08



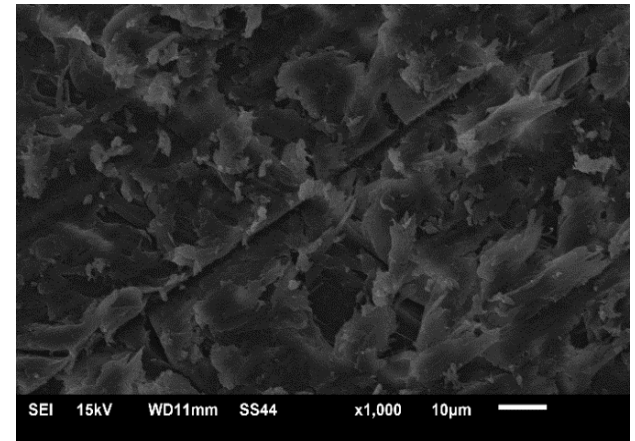
Imagens de MEV



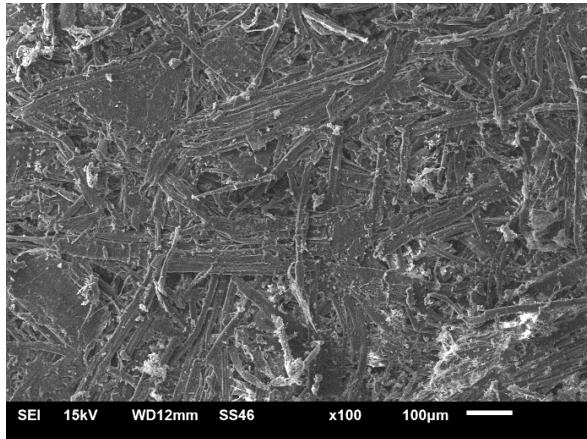
P0, antes do ensaio de abrasão



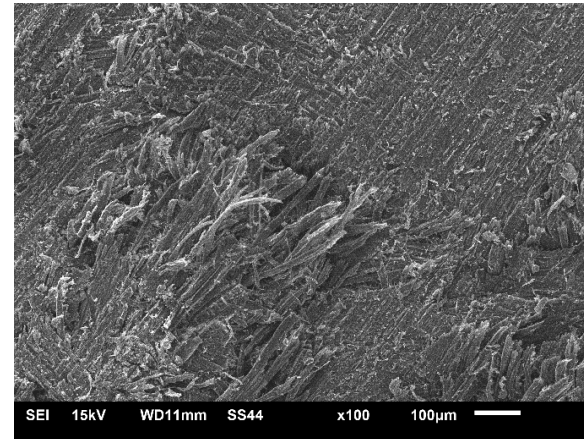
P0, depois do ensaio de abrasão



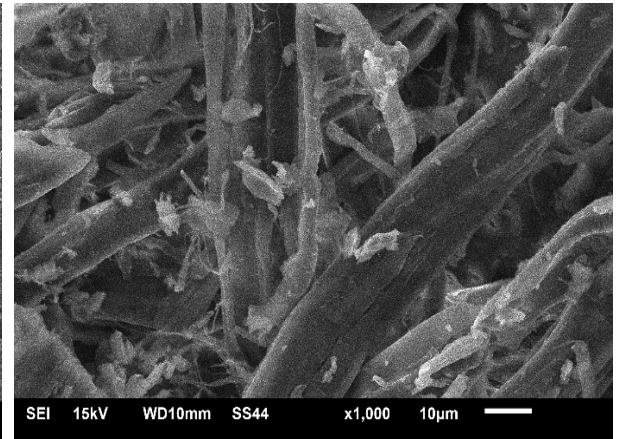
P0, depois do ensaio de abrasão



P2, antes do ensaio de abrasão



P2, depois do ensaio de abrasão



P2, depois do ensaio de abrasão



Obrigada!!!