

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ALCENIR BELING DO SACRAMENTO

**COMPARAÇÃO DE ENSAIO DE DESGASTE A FRIO E A QUENTE
SEM LUBRIFICAÇÃO NA CONFIGURAÇÃO PINO-DISCO: PINO DE
AÇO INOXIDÁVEL SUPERMATENSÍTICO SUPERCROMO 13% E
DISCO DE ALLOY 250.**

VITÓRIA

2014

ALCENIR BELING DO SACRAMENTO

**COMPARAÇÃO DE ENSAIO DE DESGASTE A FRIO E A QUENTE
SEM LUBRIFICAÇÃO NA CONFIGURAÇÃO PINO-DISCO: PINO DE
AÇO INOXIDÁVEL SUPERMATENSÍTICO SUPERCROMO 13% E
DISCO DE ALLOY 250.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Antônio César Bozzi.

VITÓRIA

2014

ALCENIR BELING DO SACRAMENTO

**COMPARAÇÃO DE ENSAIO DE DESGASTE A FRIO E A QUENTE
SEM LUBRIFICAÇÃO NA CONFIGURAÇÃO PINO-DISCO: PINO DE
AÇO INOXIDÁVEL SUPERMATENSÍTICO SUPERCROMO 13% E
DISCO DE ALLOY 250.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em _____ de dezembro de 2013.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio César Bozzi

Universidade Federal do Espírito Santo

Orientador

Prof. Dr. Cherlio Scandian

Universidade Federal do Espírito Santo

Pr. Dr. Estefano Vieira

Instituto Federal do Espírito Santo

A minha mãe e meus irmãos pelo apoio e paciência durante toda a trajetória.

Aos meus amigos e familiares pelo incentivo durante toda a trajetória até a conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe e meus irmãos pelo apoio e paciência durante toda a trajetória.

Aos meus amigos e familiares pelo incentivo durante toda a trajetória até a conclusão deste trabalho.

Ao mestrando Leandro Entringer Falqueto pela ajuda e paciência, pela qual não seria possível a realização deste trabalho.

Ao professor PhD. Antônio César Bozzi pela orientação neste trabalho.

Ao professor Dr. Cherlio Scandian pela paciência e ajuda durante a realização deste trabalho.

A Vallourec Tubos do Brasil por fornecer as amostras usadas nos ensaios.

Ao PRH-29 pela ajuda de custo durante o período dos ensaios.

Ao técnico Yukio Nishida pelo apoio e auxílio com imagens das amostras.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Um dos grandes motivos de se estudar tribologia nos dias atuais é a economia de recursos financeiros gastos com energia dissipada pelo atrito entre componentes de máquinas ou substituição de componentes devido ao desgaste excessivo, mas para isso é necessário estudar o que ocorre no contato entre estes componentes. Um exemplo prático é o que ocorre na indústria de fabricação de tubos de aço inoxidável supermartensítico supercromo 13% para a indústria do petróleo através do processo de laminação a quente. As guias de laminação, fabricadas de Alloy 250, sofrem desgaste severo e possuem baixa vida útil. No presente trabalho desenvolvido foram realizados ensaios de desgaste por deslizamento sem lubrificação na configuração pino-disco, onde os materiais do pino e do disco são, respectivamente, os materiais do tubo e da guia de laminação, em temperatura ambiente (a frio) e a 500°C (a quente). O objetivo é comparar o desgaste para essas temperaturas em diferentes cargas através de medidas de volume removido feitas indiretamente através do analisador tridimensional de superfícies e microscópio estereoscópico e estudar o que ocorre no desgaste dos pinos a quente através de imagens feitas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Palavras-chave: Desgaste por deslizamento, Alloy 250, Aço Inoxidável Supermartensítico Supercromo 13%.

ABSTRACT

One the big reasons to study tribology today is the economy of financial resources spent on energy dissipated by friction between machines components or replacement of components due to excessive wear, but this requires study what occurs at the contact between these components. A practical example is the case in the manufacturing industry of stainless steel tubes supermartensitic superchrome 13% for the oil industry through the hot rolling process. The rolling guides, made of Alloy 250, suffer severe wear and have low life. In the present work wear tests were conducted without lubrication in the sliding pin-disc configuration, where the pin materials and disc are respectively the materials of the tube and rolling guide, at room temperature (cold) and 500 ° C (hot). We sought to compare the wear to those temperatures at different loads through measurements of volume removed done indirectly through the three-dimensional analyzer surfaces and stereoscopic microscope and study what happens in the wear pins hot through images taken in the Scanning Electron Microscope (SEM).

Keywords: sliding wear, Alloy 250, Stainless Steel supermartensitic Superchrome 13%.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Uma força de atrito, F , é necessária para causar movimento por rolamento, à esquerda, e por deslizamento, à direita. (Fonte: [1])	14
Figura 2: Arranjos experimentais para o ensaio de desgaste por deslizamento. (Fonte: [1])	15
Figura 3: Mapa de desgaste para deslizamento não lubrificado de aço contra aço na configuração pino-disco. (Fonte: [1]).....	17
Figura 4: Mecanismo de desgaste dominado por deformação plástica proposto por Kato e colaboradores. (Fonte: [1])	19
Figura 5: Desenho técnico detalhado do pino utilizado no ensaio. (Fonte: Autor)	23
Figura 6: Desenho técnico detalhado do disco utilizado no ensaio. (Fonte: [8]).....	23
Figura 7: Tribômetro PLINT realizando o ensaio a quente. (Fonte: Autor).....	25
Figura 8: Tribômetro PLINT realizando o ensaio a frio. (Fonte: Autor).....	26
Figura 9: Aquecedor indutivo e bobina de aquecimento. (Fonte: Autor).....	27
Figura 10: Analisador tridimensional de superfícies. (Fonte: Autor)	28
Figura 11: Microscópio Estereoscópico. (Fonte: Autor).....	28
Figura 12: Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). (Fonte: Autor)	29
Figura 13: Curva do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio para os dois ensaios a quente com a carga de 7,3 N. (Fonte: Autor).....	33
Figura 14: Curva do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio para os dois ensaios a quente com a carga de 15,2 N. (Fonte: Autor)	33
Figura 15: Curva do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio para dois ensaios a quente com a carga de 23,0 N. (Fonte: Autor).....	34
Figura 16: Curva do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio para dois ensaios a quente com a carga de 29,9 N. (Fonte: Autor).....	34
Figura 17: Discos utilizados nos ensaios com carga de 15,2 N, no ensaio a frio a esquerda e no ensaio a quente a direita. Para o disco utilizado no ensaio a quente verifica-se a presença de possível deposição de material do pino na pista de desgaste. (Fonte: Autor).....	36
Figura 18: Pino após ensaio a frio, a esquerda, e pino após ensaio a quente, a direita. A carga utilizada em ambos os ensaios foi de 15,2 N. Podemos observar a diferença visual no diâmetro final para o ensaio a frio e a quente. (Fonte: Autor.).....	37
Figura 19: Pinos antes do ensaio: A esquerda é o pino quando é entregue pelo fabricante e a direita é o pino depois de lixado. (Fonte: Autor)	37
Figura 20: Pino de ensaio a frio mostrando a não conformidade entre pino e disco. Carga de 23 N. (Fonte: Autor.).....	37
Figura 21: Topografia de uma área do disco utilizado no ensaio a quente para a carga de 7,3 N. (Fonte: Autor).....	40
Figura 22: Perfil retirado da trilha de desgaste de um disco utilizado no ensaio a quente com carga de 7,3 N. (Fonte: Autor)	41
Figura 23: Gráfico mostrando o volume desgastado em função da carga aplicada nos ensaios a frio e a quente. (Fonte: Autor)	42
Figura 24: Gráfico comparativo entre os coeficientes de desgaste dimensional dos discos para os ensaios a frio e a quente em função da carga. (Fonte: Autor).....	44

Figura 25: Pista de desgaste destacando deposição de material do pino o disco para ensaio a quente com carga de 7,3 N. (Fonte: Autor)	45
Figura 26: Imagens feitas no MEV mostrando deformação plástica e deposição de material na trilha de desgaste do ensaio a quente com carga de 7,3 N. (Fonte: Autor).....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição de superligas a base de cobalto em função de suas propriedades. (Fonte: [5])	21
Tabela 2: Composição do pino de Aço Inoxidável Supermartensítico Supercromo 13% fornecido pelo fabricante.	24
Tabela 3: Composição do disco de Alloy 250 fornecido pelo fabricante.	24
Tabela 4: Valores de volume desgastado e coeficiente de desgaste dimensional do pino.(Fonte: Autor)	38
Tabela 5: Comparação entre os ensaios a frio e a quente das medias dos volumes desgastados dos discos. (Fonte: Autor).....	42
Tabela 6: Comparação entre os ensaios a frio e a quente do coeficiente de desgaste dimensional dos discos. (Fonte: Autor).....	43
Tabela 7: Comparação do coeficiente de desgaste dimensional do disco para os ensaios a frio e a quente. (Fonte: Autor)	44

SUMÁRIO

1. Introdução.....	11
2. Revisão bibliográfica.	13
2.1 Definições.....	13
2.2. Modos de ensaio de desgaste por deslizamento.....	15
2.3. Equação de desgaste de Archard.	17
2.4. Mecanismos de desgaste por deslizamento em metais.	18
2.4.1 Desgaste dominado pela plasticidade.....	18
2.4.2 Desgaste oxidativo.	19
2.5. Superligas.	20
3. Materiais e Metodologia.	22
3.1 Descrição dos equipamentos utilizados nos ensaios.	25
3.2 Descrição das etapas do ensaio.	29
3.2.1 Preparação das amostras.	29
3.2.2 Realização dos ensaios de desgaste.....	29
3.2.3 Análise dos resultados.....	31
4. Resultados e discussões.	32
4.1 Atrito	32
4.2 Imagens do Microscópio Estereoscópico.....	35
4.3 Analisador tridimensional de superfície.....	38
4.4 Microscópio Eletrônico de Varredura.	45
5. Conclusões.....	47
6. Referências.....	48
Apêndice.....	49

1. Introdução.

Nos dias atuais, o estudo da tribologia está relacionado com a tentativa de diminuir custos com substituição de peças desgastadas e diminuir custos de energia que é dissipada no atrito entre duas superfícies em contato. Um exemplo para custo com substituição de peças é o que acontece na fabricação de tubos flexíveis de aço inoxidável supermartensítico pelo Processo Mannesman para a indústria do petróleo onde as guias de laminação fabricadas de Alloy 250 necessitam ser trocadas a cada 40 tubos produzidos devido ao desgaste excessivo, gerando custos na aquisição de novas guias e de parada de produção para a troca. Se o material dos tubos fosse aço ao carbono comum a mesma guia precisaria ser trocada a cada 800 tubos produzidos, então é necessário entender os mecanismos de desgaste das guias para buscar alternativas para aumentar sua vida útil. Outro exemplo prático da aplicação da Tribologia: estima-se que 1% do produto nacional bruto do Reino Unido poderia ser economizado se houvesse um investimento mínimo em pesquisas na área e a economia seria maior se os investimentos fossem mais pesados. [1]

O objetivo deste trabalho é comparar os resultados de ensaios de desgaste a frio e a quente sem lubrificação na configuração pino-disco: pino de Aço Inoxidável Supermartensítico Supercromo 13% e o disco de Alloy 250. A comparação será realizada por meio do volume desgastado e do coeficiente de desgaste dimensional. Uma análise no mecanismo de desgaste do disco para o ensaio a quente também será realizado.

Este trabalho está organizado na seguinte forma: no capítulo 2 será abordada a parte teórica necessária para o desenvolvimento do trabalho, no Capítulo 3 será descrito como o ensaio foi realizado e os equipamentos utilizados, no capítulo 4

serão mostrados os resultados encontrados, no Capítulo 5 será discutido as conclusões.

2. Revisão bibliográfica.

2.1 Definições

Tribologia (do grego “*tribos*” que significa esfregação) é definida como a interação de superfícies em contato e em movimento relativo entre si [1]. No simples caminhar, na movimentação de grandes monumentos no Egito Antigo, no contato entre dentes de engrenagens, no esfregar de galhos secos para fazer fogo nos primórdios da civilização, na perfuração de poços de petróleo tem-se superfícies em contato e em movimento relativo, caracterizando a presença e destacando a importância da tribologia nas nossas vidas.

Atrito é definido como a resistência encontrada por um corpo em movimento sobre outro [7]. É uma característica do sistema e não uma propriedade do material. A figura 1 mostra, à esquerda, um corpo rolando sobre uma superfície estacionária e, à direita, um corpo deslizando sobre outra superfície estacionária. Em ambos os casos, há uma força tangencial F é necessária para mover o corpo e uma força normal N aplicada no corpo. Denomina-se μ o coeficiente de atrito é definido como a razão entre a força tangencial F necessária para mover o corpo e a força normal N .

$$\mu = F/N$$

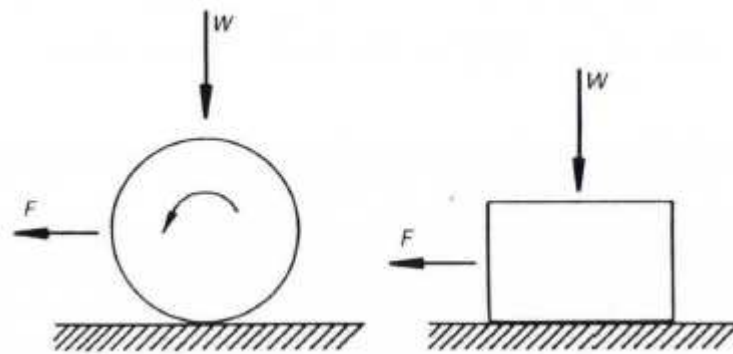


Figura 1: Uma força de atrito, F , é necessária para causar movimento por rolamento, à esquerda, e por deslizamento, à direita. (Fonte: [1])

Desgaste é o fenômeno de remoção de material de uma superfície devido a interações com outra superfície, não sendo uma propriedade dos materiais, mas sim uma resposta do sistema. A avaliação do desgaste pode ser realizada através do volume desgastado e do grau do desgaste, avaliado através do coeficiente dimensional de desgaste. Os principais tipos de desgaste que existem são o desgaste: adesivo, abrasivo, por fadiga e corrosivo. [2]

O desgaste por deslizamento, também conhecido como desgaste adesivo, é o desgaste que ocorre quando duas superfícies sólidas deslizam uma sobre a outra. Este modo de desgaste pode ser lubrificado, quando há uma camada de lubrificante entre as superfícies, e a seco, quando as superfícies deslizam ao ar sem lubrificante. [1]

Galling é usualmente definido como uma forma de desgaste para denotar dano causado por desgaste adesivo severo se as superfícies não estão lubrificadas. A norma ASTM G40 diz que galling é uma forma de dano superficial decorrente do deslizamento de dois sólidos distinguido pela criação de protruções macroscópicas

acima da superfície original incluindo, normalmente, escoamento plástico ou transferência de material ou ambos. [3]

2.2. Modos de ensaio de desgaste por deslizamento.

Para estudar o desgaste por deslizamento são utilizados arranjos experimentais como mostrados na figura 2. São mostradas as configurações anel-anel, face-face, pino-disco, pino-anel, bloco-anel e pino-plano, respectivamente, em 2A, 2B, 2C, 2D, 2E e 2F, sendo os primeiros (2A e 2B) simétricos, ou seja, a taxa de desgaste para discos de mesmo material deveria ser o mesmo, e os demais são assimétricos. Os ensaios podem ser lubrificados ou a seco (sem lubrificação).

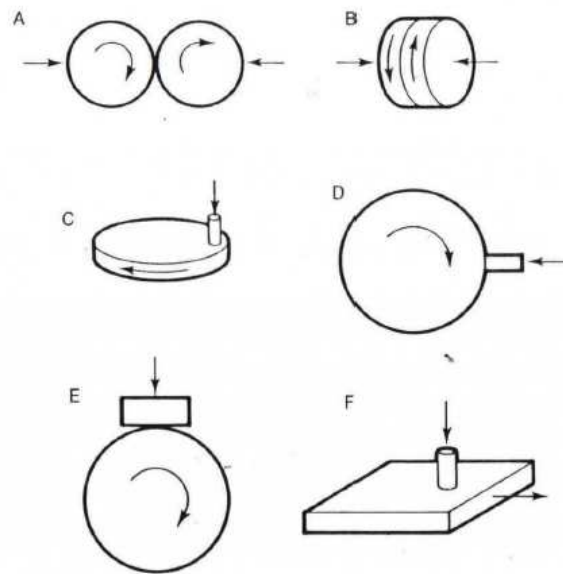


Figura 2: Arranjos experimentais para o ensaio de desgaste por deslizamento. (Fonte: [1])

Os ensaios de desgaste tem baixa repetibilidade e os resultados em laboratório e em campo podem apresentar resultados muito diferentes. Este fato ocorre porque a mudança de uma condição do ensaio muda o mecanismo de desgaste do sistema

tribológico. Torna-se necessário a medição e o controle de parâmetros fundamentais. A carga normal aplicada e a temperatura são dois exemplos de tais parâmetros e a influência destes parâmetros no ensaio de desgaste por deslizamento é (segundo Hutchings, 1992):

- O desgaste depende da pressão de contato entre as superfícies, pois transições podem ser induzidas pela mudança na pressão de contato. A figura 3 mostra um mapa de desgaste que exemplifica a influência da pressão de contato no ensaio de desgaste por deslizamento na configuração pino-disco de aço contra aço. A ordenada é a pressão de contato normalizada pelo produto da área nominal e dureza do material mais macio. O regime de desgaste pode mudar de moderado para severo e de severo para seizure dependendo do valor da pressão de contato que por sua vez depende da carga normal aplicada no ensaio. Esta mudança de regime está relacionada a quebra do filme de óxido formado na superfície e aumento da área de contato entre as superfícies ocasionados por um valores mais altos de carga aplicada.
- A temperatura afeta as propriedades mecânicas do material, a taxa de oxidação e a viscosidade do fluido no caso de ensaios de desgaste por deslizamento lubrificado.

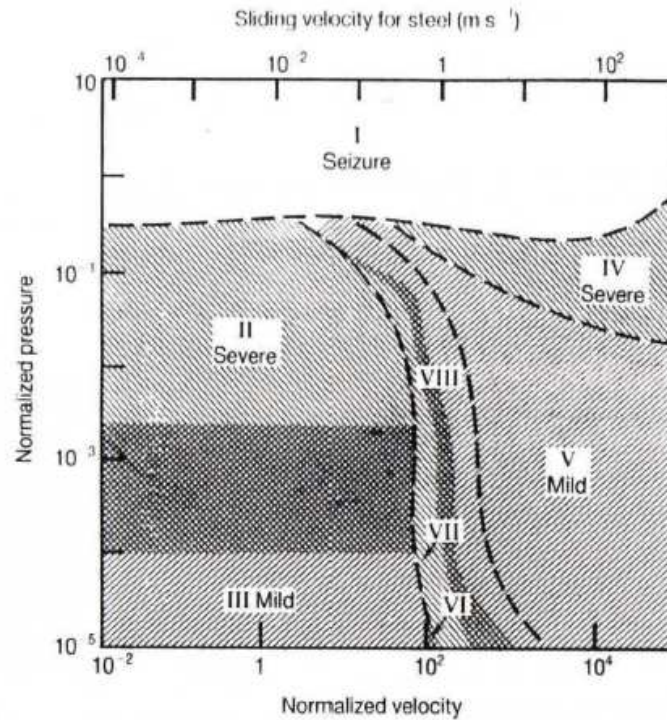


Figura 3: Mapa de desgaste para deslizamento não lubrificado de aço contra aço na configuração pino-disco. (Fonte: [1])

2.3. Equação de desgaste de Archard.

A equação abaixo é chamada de equação de Archard e é importante para avaliar os parâmetros que influenciam no desgaste por deslizamento e a severidade do desgaste através do coeficiente de desgaste adimensional K. Nesta equação, Q é o volume de material desgastado por distancia deslizada em mm³/m, W é a carga aplicada em N e H é a dureza da superfície mais macia (N/mm²).

$$Q = \frac{KW}{H}$$

Archard e Holm, na concepção da equação acima, consideraram que o contato entre as superfícies ocorre no contato entre as asperezas e que a verdadeira área de

contato será igual a soma das áreas de contato individuais das asperezas. A deformação local devido ao contato entre as asperezas será plástica. Hutchings (1992), a partir das considerações acima, desenvolve esta equação nas páginas 82 e 83.

Para aplicações de engenharia a quantidade K/H tem, em muitos casos, mais utilidade do que o coeficiente K . Denomina-se $k = K/H = Q/W$ o coeficiente de desgaste dimensional e é geralmente cotado em unidades de $\text{mm}^3/(\text{Nm})$ e representa o volume de material removido pelo desgaste (em mm^3) por unidade de distancia deslizada (em metros), por unidade de carga normal de contato (em newtons). [1]

2.4. Mecanismos de desgaste por deslizamento em metais.

2.4.1 Desgaste dominado pela plasticidade.

Na literatura, muitos mecanismos têm sido propostos para explicar o desgaste de metais. São diferentes na forma como o material é removido, mas todos envolvem deformação plástica [1]. A figura 4 mostra o mecanismo proposto por Kato e colaboradores. Em (a) temos duas asperezas de duas superfícies em movimento relativo. Em (b) ocorre deformação plástica das asperezas em um plano de deslizamento e em (c) o limite plástico do material é atingido e uma trinca é formada e outro plano de deslizamento começa a sofrer deformação plástica. Em (d) o novo plano sofre a deformação plástica, em (e) o limite plástico do material é atingido e a trinca se propaga, formando um novo plano de deslizamento. Este processo ocorre inúmeras vezes até que em (f) a trinca provoca o rompimento da aspereza que sai aderida ao contracorpo.

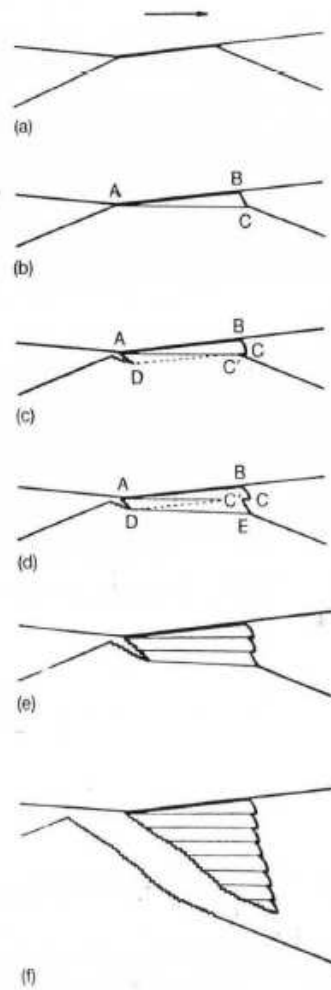


Figura 4: Mecanismo de desgaste dominado por deformação plástica proposto por Kato e colaboradores. (Fonte: [1])

2.4.2 Desgaste oxidativo.

O filme de óxido formado na superfície suprime os mecanismos dominados por deformação plástica por que reduz a resistência ao cisalhamento da interface e, portanto, o desenvolvimento de grandes deformações cisalhantes sub-superficiais necessárias para esses mecanismos. A taxa de crescimento do filme óxido tem relação direta com a temperatura e em temperatura ambiente o crescimento do filme óxido ocorre nas asperezas devido a temperaturas localizadas que podem chegar a centenas de graus Celsius por causa do deslizamento. Se a temperatura é elevada,

ocorre oxidação generalizada da superfície. No deslizamento, o crescimento da camada de óxido obedece a equação de Arrhenius, mesma equação utilizada para condições estáticas [1]:

$$k_p = A \exp\{-Q/RT\}$$

Onde k_p é a taxa de crescimento de filme óxido, A é a constante de Arrhenius, T é a temperatura absoluta, Q é a energia de ativação e R é a constante dos gases.

Assim como nos mecanismos plásticos, existem muitos mecanismos propostos para explicar o desgaste oxidativo. Um destes mecanismos é o seguinte: o filme óxido presente na superfície é raspado e pequenas partículas óxidas são removidas pelo contato com o contracorpo e um novo filme óxido se forma, processo chamado de “oxidation-scrape-reoxidation”, essas partículas se aglomeram até atingir um tamanho crítico e depois se despreendem do material na forma de debris [1].

2.5. Superligas.

Com o desenvolvimento tecnológico tornou-se necessário o desenvolvimento de ligas que possuíssem considerável resistência mecânica (comparado aos aços inoxidáveis) e alta resistência a corrosão em altas temperaturas. Estas ligas, chamadas de superligas, são à base de níquel, níquel-ferro e cobalto geralmente utilizadas em temperaturas acima de 540°C [6]. Exemplo de aplicação de superligas de cobalto: guias de laminação a quente. A tabela 1 mostra a composição de superligas de cobalto de acordo com propriedades das ligas. A liga UMCo-50 possui a mesma composição da liga Stellite® Alloy 250, diferenciando o processo de fabricação: Alloy 250 é uma liga fundida e UMCo-50 é uma liga forjada. Possui densidade de 8,05 g/cm³ e ponto de fusão de 1395°C. É usada em aplicações cuja temperatura de trabalho esta entre 650 e 1150°C [4].

Tabela 1: Composição de superligas a base de cobalto em função de suas propriedades. (Fonte: [5])

Alloy tradename	UNS No.	Nominal composition, wt%									
		Co	Cr	W	Mo	C	Fe	Ni	Si	Mn	Others
Cast, P/M, and weld overlay wear resistant alloys											
Stellite 1	R30001	bal	30	13	0.5	2.5	3	1.5	1.3	0.5	...
Stellite 3 (P/M)	R30103	bal	30.5	12.5	...	2.4	5 (max)	3.5 (max)	2 (max)	2 (max)	1 B (max)
Stellite 4	R30404	bal	30	14	1 (max)	0.57	3 (max)	3 (max)	2 (max)	1 (max)	...
Stellite 6	R30006	bal	29	4.5	1.5 (max)	1.2	3 (max)	3 (max)	1.5 (max)	1 (max)	...
Stellite 6 (P/M)	R30106	bal	28.5	4.5	1.5 (max)	1	5 (max)	3 (max)	2 (max)	2 (max)	1 B (max)
Stellite 12	R30012	bal	30	8.3	...	1.4	3 (min)	1.5	0.7	2.5	...
Stellite 21	R30021	bal	27	...	5.5	0.25	3 (max)	2.75	1 (max)	1 (max)	0.007 B(max)
Stellite 98M2 (P/M)	...	bal	30	18.5	0.8 (max)	2	5 (max)	3.5	1 (max)	1 (max)	4.2 V, 1 B (max)
Stellite 703	...	bal	32	...	12	2.4	3 (max)	3 (max)	1.5 (max)	1.5 (max)	...
Stellite 706	...	bal	29	...	5	1.2	3 (max)	3 (max)	1.5 (max)	1.5 (max)	...
Stellite 712	...	bal	29	...	8.5	2	3 (max)	3 (max)	1.5 (max)	1.5 (max)	...
Stellite 720	...	bal	33	...	18	2.5	3 (max)	3 (max)	1.5 (max)	1.5 (max)	0.3 B
Stellite F	R30002	bal	25	12.3	1 (max)	1.75	3 (max)	22	2 (max)	1 (max)	...
Stellite Star J (P/M)	R30102	bal	32.5	17.5	...	2.5	3 (max)	2.5 (max)	2 (max)	2 (max)	1 B (max)
Stellite Star J	R31001	bal	32.5	17.5	...	2.5	3 (max)	2.5 (max)	2 (max)	2 (max)	...
Tantung G	...	bal	29.5	16.5	...	3	3.5	7 (max)	...	2 (max)	4.5 Ta/Nb
Tantung 144	...	bal	27.5	18.5	...	3	3.5	7 (max)	...	2 (max)	5.5 Ta/Nb
Laves-phase wear resistant alloys											
Tribaloy T-400	R30400	bal	9	...	29	...	...	...	2.5	...	...
Tribaloy T-800	...	bal	18	...	29	...	...	...	3.5	...	...
Wrought wear resistant alloys											
Stellite 6B	R30016	bal	30	4	1.5 max	1	3 (max)	2.5	0.7	1.4	...
Stellite 6K	...	bal	30	4.5	1.5 max	1.6	3 (max)	3 (max)	2 (max)	2 (max)	...
Wrought heat resistant alloys (see Table 4 for cast alloy compositions)											
Haynes 25 (L605)	R30605	bal	20	15	...	0.1	3 (max)	10	0.4 (max)	1.5	...
Haynes 188	R30188	bal	22	14	...	0.1	3 (max)	22	0.35	1.25	0.03 La
Inconel 783	R30783	bal	3	...	...	0.03 (max)	25.5	28	0.5 (max)	0.5 (max)	5.5 Al, 3 Nb, 3.4 Ti (max)
UMCo-50	...	bal	28	...	...	0.02 (max)	21	...	0.75	0.75	...
S-816	R30816	40 (min)	20	4	4	0.37	5 (max)	20	1 (max)	1.5	4 Nb
Corrosion resistant alloys											
Ultimet (1233)	R31233	bal	26	2	5	0.06	3	9	0.3	0.8	0.08 N
MP159	R30159	bal	19	...	7	...	9	25.5	...	...	3 Ti, 0.6 Nb, 0.2 Al
MP35N	R30035	35	20	...	10	...	...	35	...	...	...
Duratherm 600	R30600	41.5	12	3.9	4	0.05 (max)	8.7	bal	0.4	0.75	2 Ti, 0.7 Al, 0.05 Be
Elgiloy	R30003	40	20	...	7	0.15 (max)	bal	15.5	...	2	1 Be (max)
Havar	R30004	42.5	20	2.8	2.4	0.2	bal	13	...	1.6	0.06 Be (max)

P/M, powder metallurgy; bal, balance

3. Materiais e Metodologia.

Foram realizados ensaios de desgaste sem lubrificação a frio e a quente na configuração pino-disco, sendo o pino de aço inoxidável Supermartensítico Supercromo 13% e o disco de alloy 250. As figuras 5 e 6 mostram um desenho técnico detalhado do pino e do disco, respectivamente, utilizados no ensaio. A composição do material do pino é mostrada na tabela 2 e a composição do material do disco é mostrada na tabela 3. Buscou-se variar a carga aplicada para analisar o comportamento destes materiais em termos de desgaste na temperatura ambiente e a 500°C e comparar os resultados obtidos. Os parâmetros utilizados na realização dos ensaios são: raio da pista de desgaste de 28 mm, velocidade linear do disco na região de contato de 0,2 m/s, velocidade angular do disco de 68 rpm, cargas de 7,3; 15,2; 23 e 29,9 N aplicadas através de peso morto de 340, 1140, 1940 e 2640 g respectivamente. Para cada carga foram realizados um ensaio a frio e dois ensaios a quente.

O ensaio é dividido em 3 etapas: preparação das amostras, realização do ensaio de desgaste e análise dos resultados.

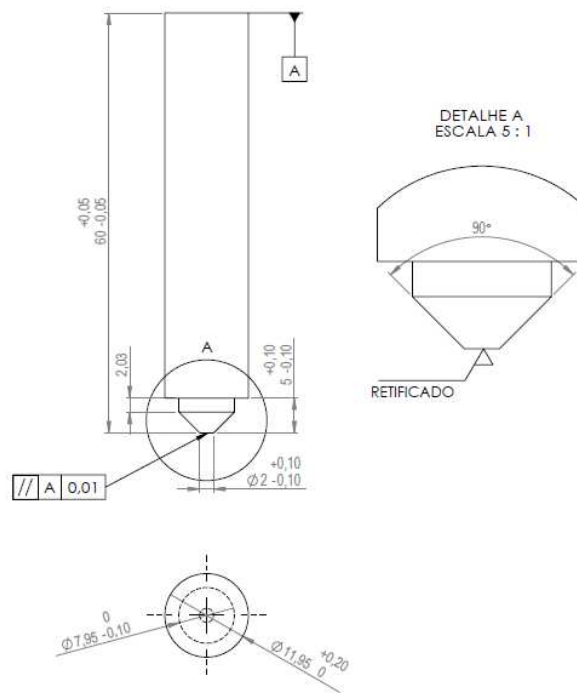


Figura 5: Desenho técnico detalhado do pino utilizado no ensaio. (Fonte: Autor)

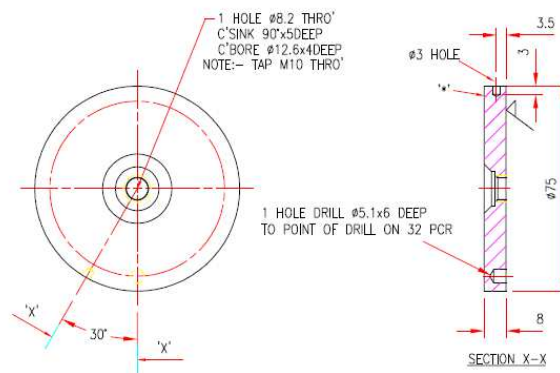


Figura 6: Desenho técnico detalhado do disco utilizado no ensaio. (Fonte: [8])

Tabela 2: Composição do pino de Aço Inoxidável Supermartensítico Supercromo 13% fornecido pelo fabricante.

Elemento	Composição (%)
Cr	13
C	≤0,02
Ni	8
Mo	2
Fe	base

Tabela 3: Composição do disco de Alloy 250 fornecido pelo fabricante.

Elemento	Composição (%)
Co	41-52
Cr	27-29
Fe	22
Mo	0,3
Mn	0,3-1
W	0,1-0,8
C	0,05-0,15
Si	0,05-1,20
P	0,02

A descrição dos equipamentos e das etapas do ensaio é discutida nas próximas seções.

3.1 Descrição dos equipamentos utilizados nos ensaios.

Os equipamentos descritos abaixo se encontram no laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (TRICORRMAT) da Universidade Federal do Espírito Santo.

Tribômetro PLINT TE67: Utilizada para realização dos ensaios de desgaste e mostrada sua montagem nas figuras 7 e 8 para os ensaios a quente e a frio, respectivamente. A carga é aplicada através de peso morto e o raio da pista (28 mm) é ajustado antes do início do ensaio. A força de atrito é medida através de uma célula de carga previamente montada no equipamento que possui uma capacidade máxima de 200 N. Um software, a partir de dados de entrada tais como rotação do disco, valor da carga aplicada através de peso morto, raio da pista de desgaste, e da força de atrito medida pela célula de carga, calcula a velocidade tangencial no contato entre pino e disco e coeficiente de atrito que são dados importantes para o controle do ensaio e os registra ao longo do ensaio.

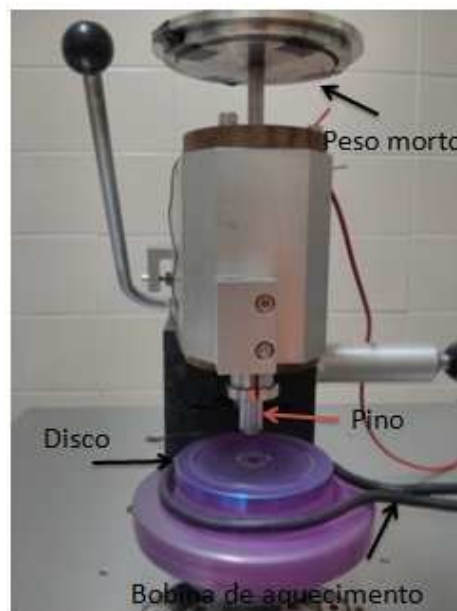


Figura 7: Tribômetro PLINT realizando o ensaio a quente. (Fonte: Autor)



Figura 8: Tribômetro PLINT realizando o ensaio a frio. (Fonte: Autor)

Termopar do tipo K: Utilizado para medição da temperatura durante o aquecimento do disco antes do ensaio a quente para garantir que o ensaio comece somente quando a temperatura do disco alcance 500°C.

Lavadora Ultrassônica: Utilizada para limpeza das amostras antes do ensaio para o caso dos ensaios a frio e antes do aquecimento para o caso dos ensaios a quente.

Aquecedor indutivo do fabricante Ambrell e modelo EASYHEAT0112: Uma corrente elétrica passa por uma bobina de cobre que induz um campo magnético no disco, gerando correntes parasitas, aquecendo o disco por efeito Joule. A potência fornecida pelo aquecedor está em torno de 1300 W, mostrado pelo equipamento, mas a potência máxima que este modelo poderia fornecer é de 1200 W. A explicação para uma potência fornecida acima da potência máxima deste modelo está no fato de que na manutenção realizada no equipamento pelo fabricante a capacidade do equipamento foi aumentada para aproximadamente 2000 W. A figura

9 mostra o aquecedor indutivo e a bobina utilizada. Os dois tubos que aparecem à esquerda da figura abaixo são utilizados para circulação de água de resfriamento que passa pelo interior da bobina, evitando o aquecimento excessivo do seu isolamento (material polimérico).



Figura 9: Aquecedor indutivo e bobina de aquecimento. (Fonte: Autor)

Os equipamentos listados abaixo pertencem ao Laboratório de Caracterização de Superfícies Metálicas da Universidade Federal do Espírito Santo (LCSM-UFES).

Analizador tridimensional de superfícies modelo Talysurf CLI 1000 do fabricante Taylor Robson: É mostrado na figura 10 e foi utilizado para caracterização das superfícies dos discos após os ensaios. Este equipamento pode gerar áreas, que fornece uma noção da altura dos picos e profundidade dos vales da trilha de desgaste, ou perfis, que possibilitam o cálculo posterior do volume desgastado do disco, como será mostrado na seção 4.3.

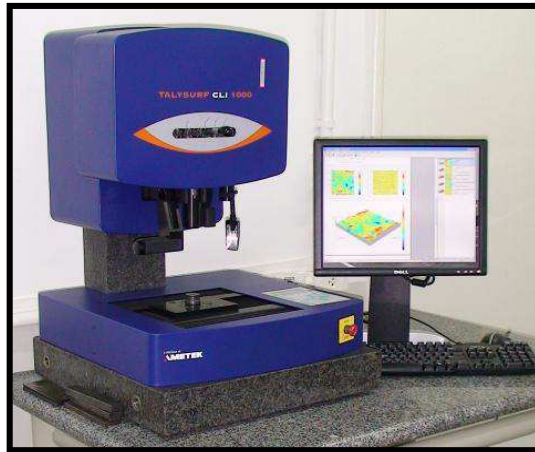


Figura 10: Analisador tridimensional de superfícies. (Fonte: Autor)

Microscópio Estereoscópico: A figura (...) mostra o equipamento. É utilizado para fotografar a superfície desgastada do pino e a pista de desgaste do disco para comparar os resultados dos ensaios a frio e a quente. O raio do pino desgastado pode ser obtido no microscópio estereoscópico que tem a opção de medi-lo na imagem criada. Este valor é utilizado para o cálculo do volume perdido pelo pino, como será mostrado na seção 4.2.



Figura 11: Microscópio Estereoscópico. (Fonte: Autor)

Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV): Mostrado na figura 12. Utilizado para fazer imagens retroespalhadas das superfícies do pino e do disco, possibilitando avaliar a presença de deposição de material na superfície do disco e deformação plástica na pista de desgaste.



Figura 12: Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). (Fonte: Autor)

3.2 Descrição das etapas do ensaio.

3.2.1 Preparação das amostras.

A etapa de preparação das amostras se iniciou com o corte dos pinos (redução de 10 mm no seu comprimento) para que sua medida se adequasse a sua montagem no tribômetro. Depois a superfície do pino foi lixada na posição em que o pino iria ser ensaiado para que as superfícies do pino e do disco ficassem paralelas, reduzindo os efeitos de não conformidade entre o pino e o disco. Antes do início do ensaio as amostras passaram por um processo de limpeza na lavadora ultrassônica, imersos em acetona (5 minutos) e depois em álcool etílico (5 minutos), objetivando a eliminação de sujeira das amostras.

3.2.2 Realização dos ensaios de desgaste.

A realização dos ensaios ocorreu de forma distinta para os ensaios a frio e a quente devido ao aquecimento do disco.

Para o ensaio a frio, após a limpeza das amostras e montagem das mesmas manuseando-as sem o contato direto entre as amostras e as mãos para não contaminar as superfícies já limpas, os parâmetros do ensaio foram carregados

diretamente no computador que comanda o ensaio e a carga, através de peso morto, foi aplicada e o equipamento ligado para o início do ensaio com duração de 1 hora.

Para o ensaio a quente há uma etapa de aquecimento antes da realização do ensaio. Esta etapa ocorre logo depois da montagem das amostras e do carregamento dos parâmetros do ensaio da mesma forma que no ensaio a frio. O aquecimento é feito através de uma passagem de campo magnético, gerado por uma bobina, no disco, induzindo uma corrente elétrica no mesmo e aquecendo-o por efeito Joule. A bobina de cobre, fabricada pelo mestrando Leandro Entringer Falqueto, é acionada pelo aquecedor indutivo, fornecendo uma potência média para o aquecimento de 1300 W em média. O processo de aquecimento foi realizado da seguinte forma: aquecedor ligado e disco girando a 50 rpm durante 10 minutos para garantir um aquecimento uniforme, mas sem contato com o pino, com uma parada posterior de 5 minutos na rotação do disco, mas não no aquecimento, para medição de temperatura com o termopar, não sendo possível realizar essa medição com o disco girando porque o atrito entre a superfície do disco e o termopar fariam com que o mesmo sofresse flexão, podendo danificá-lo. Após a medição, o termopar é retirado e o disco volta a girar novamente durante 10 minutos. Este processo é repetido durante aproximadamente 1 hora até que a medição do termopar seja de 500°C onde o ensaio é iniciado (pino e disco são colocados em contato) com tempo de duração de 1 hora.

Ao final dos ensaios a frio as amostras são retiradas do equipamento, identificadas e guardadas para posterior análise dos resultados. No caso dos ensaios a quente é necessário esperar que pino e disco se resfriem (aproximadamente 2 horas) para retirar, identificar e guardar as amostras.

3.2.3 Análise dos resultados

Esta etapa foi realizada com auxílio de equipamentos pertencente ao Laboratório de Caracterização de Superfícies da Universidade Federal do Espírito Santo (descritos no item 3.1) e com os dados registrados na PLINT. Os resultados são mostrados na seção 4.

4. Resultados e discussões.

Os ensaios a frio foram analisados utilizando o analisador tridimensional de superfície (somente disco) e microscópio estereoscópico (pino e disco). Os ensaios a quente foram analisados utilizando microscópio estereoscópico (pino e disco), analisador tridimensional de superfície (somente disco) e MEV (somente disco). Ao longo deste capítulo serão mostradas algumas fotos e imagens feitas no microscópio estereoscópico e MEV, respectivamente, para algumas cargas e as que não são mostradas podem ser encontradas no apêndice.

4.1 Atrito

As curvas de atrito são importantes para mostrar a reprodutividade dos ensaios, garantindo um bom comportamento dos mesmos e a possibilidade de comparar os resultados. As figuras 13, 14, 15 e 16 abaixo mostram os resultados de atrito para os dois ensaios a quente realizados para cada carga a partir de dados registrados pelo software do tribômetro PLINT TE67.

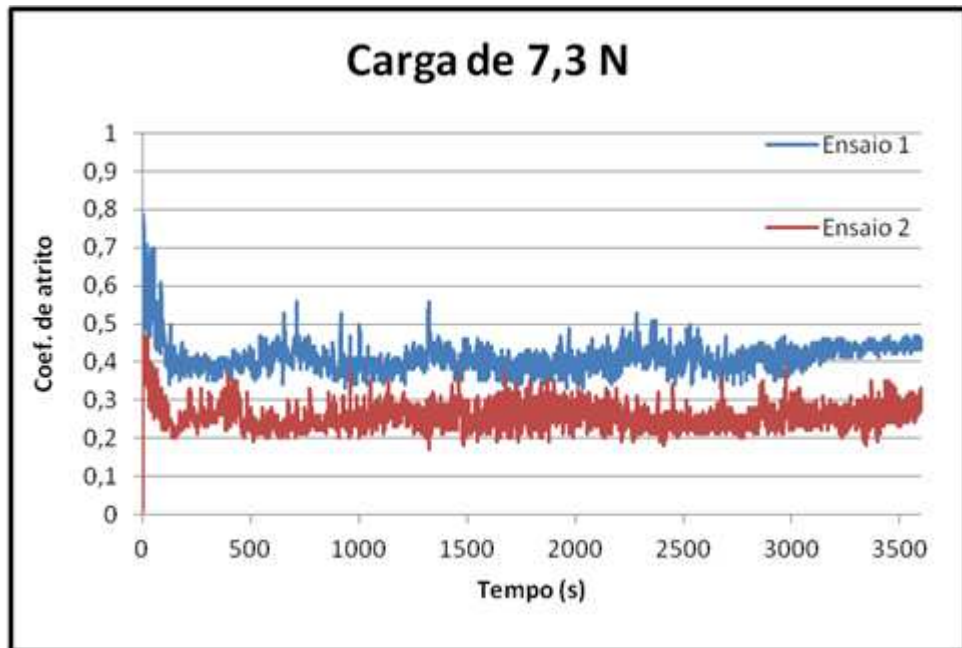


Figura 13: Curva do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio para os dois ensaios a quente com a carga de 7,3 N. (Fonte: Autor)

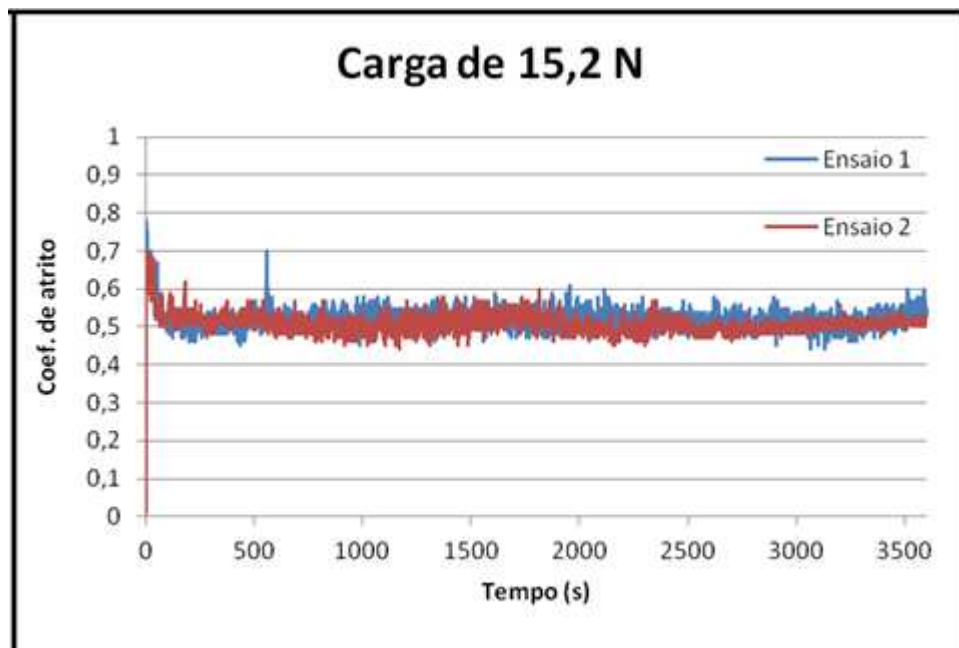


Figura 14: Curva do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio para os dois ensaios a quente com a carga de 15,2 N. (Fonte: Autor)

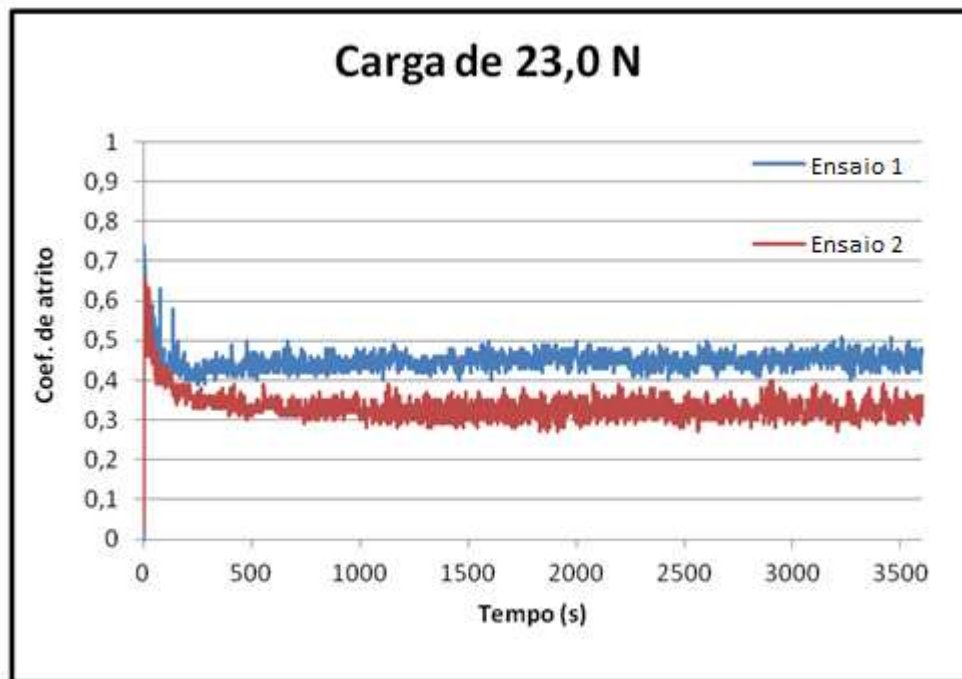


Figura 15: Curva do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio para dois ensaios a quente com a carga de 23,0 N. (Fonte: Autor)

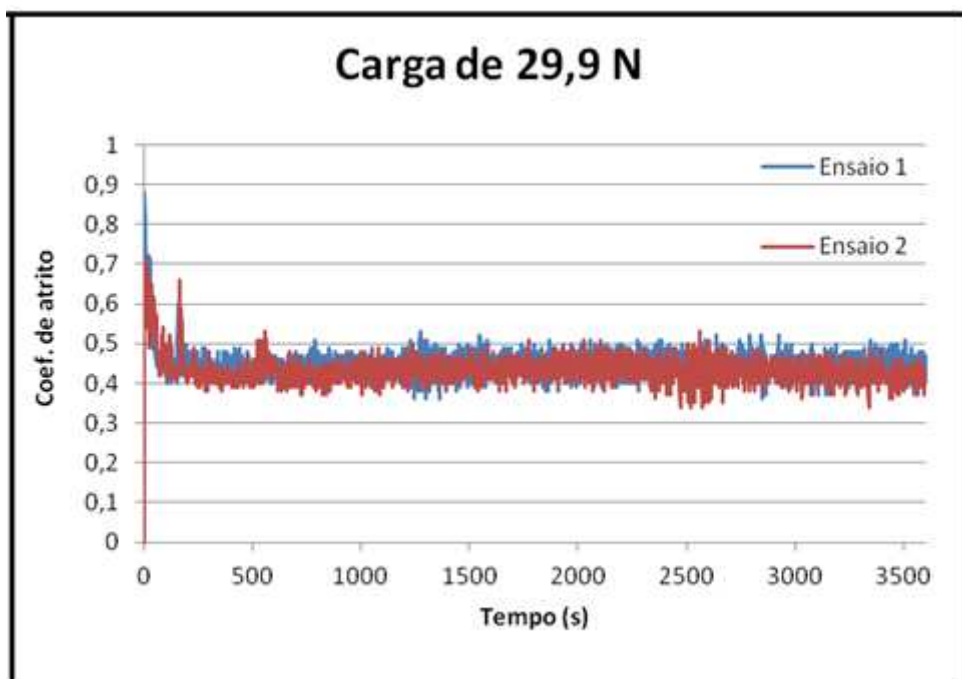


Figura 16: Curva do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio para dois ensaios a quente com a carga de 29,9 N. (Fonte: Autor)

Estas curvas mostram que o atrito se manteve estável durante todos os ensaios, evidenciando o fato de que os ensaios foram realizados sob as mesmas condições e apresentaram uma boa reprodutividade. No início dos ensaios, nos 250 s iniciais aproximadamente, o coeficiente de atrito apresentou um valor maior do que o valor médio, fenômeno conhecido como running-in. Após este período o coeficiente de atrito diminui e se estabiliza, caracterizando o estado estacionário.

4.2 Imagens do Microscópio Estereoscópico.

As figuras 17, 18, 19 e 20 mostram algumas imagens obtidas no microscópio estereoscópico do LCSM-UFES após o ensaio a frio e a quente. A figura 17 mostra a imagem dos discos para o ensaio a frio, a esquerda, e a quente, a direita, utilizando carga de 15,2 N. A coloração azulada na superfície do disco utilizado no ensaio a quente é devido a formação acelerada de óxido que ocorre em temperaturas elevadas. Para o disco utilizado no ensaio a quente esta destacado regiões com possíveis deposições de material do pino. No pino utilizado no ensaio a frio não se observa este fenômeno. O local da pista de desgaste foi escolhido buscando mostrar detalhes da pista, tais como a presença de deposição, que ajuda a entender os mecanismos de desgaste envolvidos. A figura 19 mostra uma foto retirada da superfície do pino antes do ensaio, onde a esquerda temos o pino como é entregue pelo fabricante e a direita o pino após lixamento no tribômetro. A figura 18 mostra fotos das superfícies dos pinos para um ensaio a frio e um a quente, a esquerda e a direita, respectivamente, utilizando carga de 15,2 N. Visualmente, podemos notar a diferença no diâmetro final dos pinos para o ensaio a frio e a quente, levando-nos a concluir que o desgaste dos pinos no ensaio a quente foi maior que no ensaio a frio. A figura 20 mostra o pino de um ensaio a frio utilizando carga de 23 N onde o pino

não sofreu desgaste por igual, fato evidenciado pelo aparecimento de duas regiões distintas na superfície do pino, causado pela não conformidade entre o pino e o disco. Nos ensaios a quente não foi verificado este fenômeno porque a severidade do desgaste permitiu um desgaste por inteiro da superfície do pino. Além de mostrar o aspecto da superfície do pino após os ensaios, o microscópio estereoscópico possibilita a medição do raio final dos pinos, permitindo o cálculo do volume desgastado dos pinos pela equação:

$$V = \pi(R^3 - r^3)/3$$

Onde R é o raio final do pino e r é o raio inicial do pino ($r = 1 \text{ mm}$). O ângulo de ponta do cone que seria formado se o cone fosse completo é de 90° . A equação acima é obtida a partir da equação para o volume de tronco de cone.

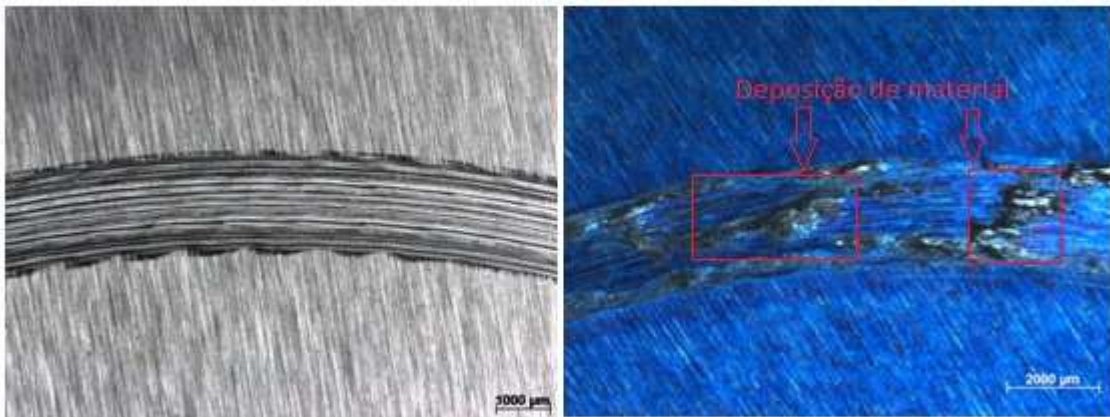


Figura 17: Discos utilizados nos ensaios com carga de 15,2 N, no ensaio a frio a esquerda e no ensaio a quente a direita. Para o disco utilizado no ensaio a quente verifica-se a presença de possível deposição de material do pino na pista de desgaste. (Fonte: Autor)



Figura 18: Pino após ensaio a frio, a esquerda, e pino após ensaio a quente, a direita. A carga utilizada em ambos os ensaios foi de 15,2 N. Podemos observar a diferença visual no diâmetro final para o ensaio a frio e a quente. (Fonte: Autor.)

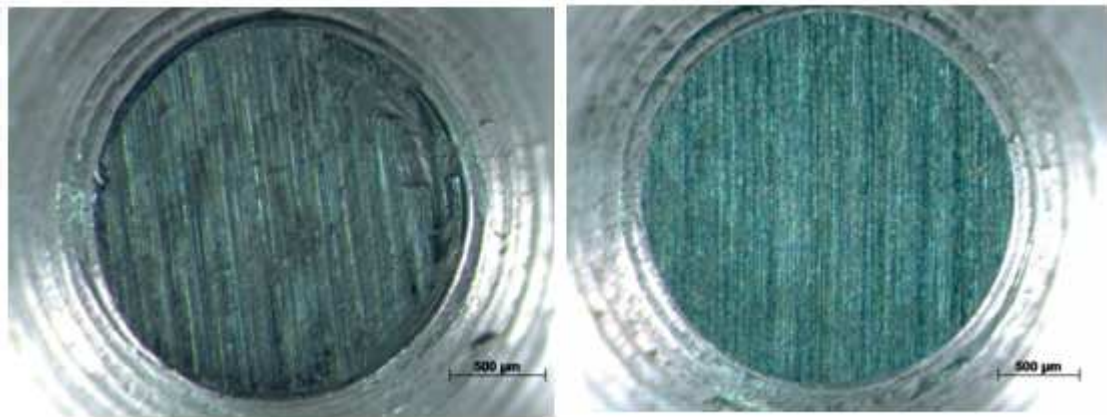


Figura 19: Pinos antes do ensaio: A esquerda é o pino quando é entregue pelo fabricante e a direita é o pino depois de lixado. (Fonte: Autor)



Figura 20: Pino de ensaio a frio mostrando a não conformidade entre pino e disco. Carga de 23 N. (Fonte: Autor.)

A tabela 4 mostra o volume desgastado e o coeficiente de desgaste dimensional dos pinos para o ensaio a quente. Para o ensaio a frio considerou-se que o volume desgastado foi aproximadamente zero porque não houve desgaste da superfície do pino por inteiro. O volume desgastado apresentou valores próximos para todos os ensaios. Podemos determinar o coeficiente de desgaste dimensional que pode ser definido pela equação $k = Q/W$, onde Q é a razão entre o volume desgastado (em mm^3) pela distancia deslizada (em m) definido por $D = 2\pi rn/60000$ ($r = 28 \text{ mm}$ é o raio da pista de desgaste e $n = 68 \text{ rpm}$ é a rotação do disco) e W é a carga aplicada no ensaio em N. O coeficiente de desgaste dimensional apresentou valores diferentes (com uma ordem de grandeza) devido ao valor das cargas.

Tabela 4: Valores de volume desgastado e coeficiente de desgaste dimensional do pino.(Fonte: Autor)

Carga (N)	Volume desgastado (mm^3)	Coeficiente de desgaste dimensional (mm^3/Nm)
7,3	1,13E+00	2,16E-04
15,2	1,24E+00	1,13E-04
23,0	1,10E+00	6,65E-05
29,9	1,29E+00	6,02E-05

4.3 Analisador tridimensional de superfície.

As superfícies do pino e do disco são caracterizadas através de um apalpador, revelando sua topografia através de leitura de áreas e perfis. A figura 21 mostra a topografia de uma pequena área da superfície do disco de um ensaio a quente com carga de 7,3 N e nos fornece uma noção da dimensão da profundidade da trilha de desgaste que esta na ordem de micrometros. A figura 22 mostra um perfil de rugosidade da trilha de desgaste para o ensaio a quente de 7,3 N, onde o local da

pista para a leitura do perfil é escolhido aleatoriamente, na qual o primeiro perfil mostrado é o registrado pelo software na leitura do apalpador, a segunda é o perfil nivelado pela superfície do disco que não sofreu o desgaste e o terceiro mostra em vermelho a área onde houve remoção de material na trilha de desgaste e consequentemente esta abaixo da linha da superfície do disco e em verde a área ou de material do pino aderido ou de material do disco que, devido a deformação plástica do disco, se elevou formando um sulco na superfície do disco. Destacado abaixo do terceiro perfil esta o valor das áreas das regiões em vermelho e em verde. Utilizando estes valores podemos fazer o cálculo do volume desgastado do disco da seguinte forma: subtrai-se a área em vermelho da área em verde temos uma estimativa do valor da área desgastada deste perfil, calcula-se o volume desgastado multiplicando-se esta área por $2\pi r$ (r é o raio da pista), repete-se esta operação para mais sete perfis tais que os oito perfis estejam igualmente espaçados de 45° na pista de desgaste e retira-se a média dos oito volumes calculados para obter um valor médio de volume desgastado e seu desvio padrão. Como para o ensaio a quente foram realizados dois ensaios para cada carga, foi retirada a média dos dois valores de volume desgastado para comparar um único valor para o ensaio a frio e a quente. As equações abaixo ilustram o procedimento descrito. Esta forma de calcular o volume é utilizada para os discos dos ensaios a frio e a quente e os resultados são mostrados na tabela 5 e comparados no gráfico (figura 23).

$$A_{desg_i} = A_{rem_i} - A_{acima_i}$$

$$V_{desg_i} = 2\pi r A_{desg_i}$$

$$V_{desg_{med}} = (\sum_{i=1}^8 V_{desg_i})/8$$

Onde A_{desg_i} é a área desgastada no perfil i , A_{rem_i} e A_{acima_i} são, respectivamente, as áreas vermelha e verde da figura 4.3b, V_{desg_i} é o volume desgastado no perfil i , $V_{desg_{med}}$ é o volume desgastado médio do disco e r é o raio da pista.

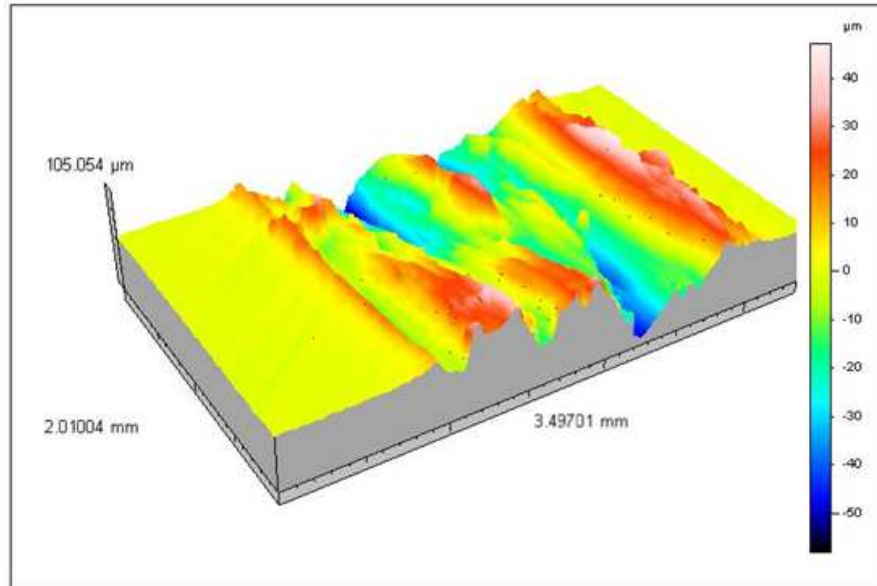


Figura 21: Topografia de uma área do disco utilizado no ensaio a quente para a carga de 7,3 N. (Fonte: Autor)

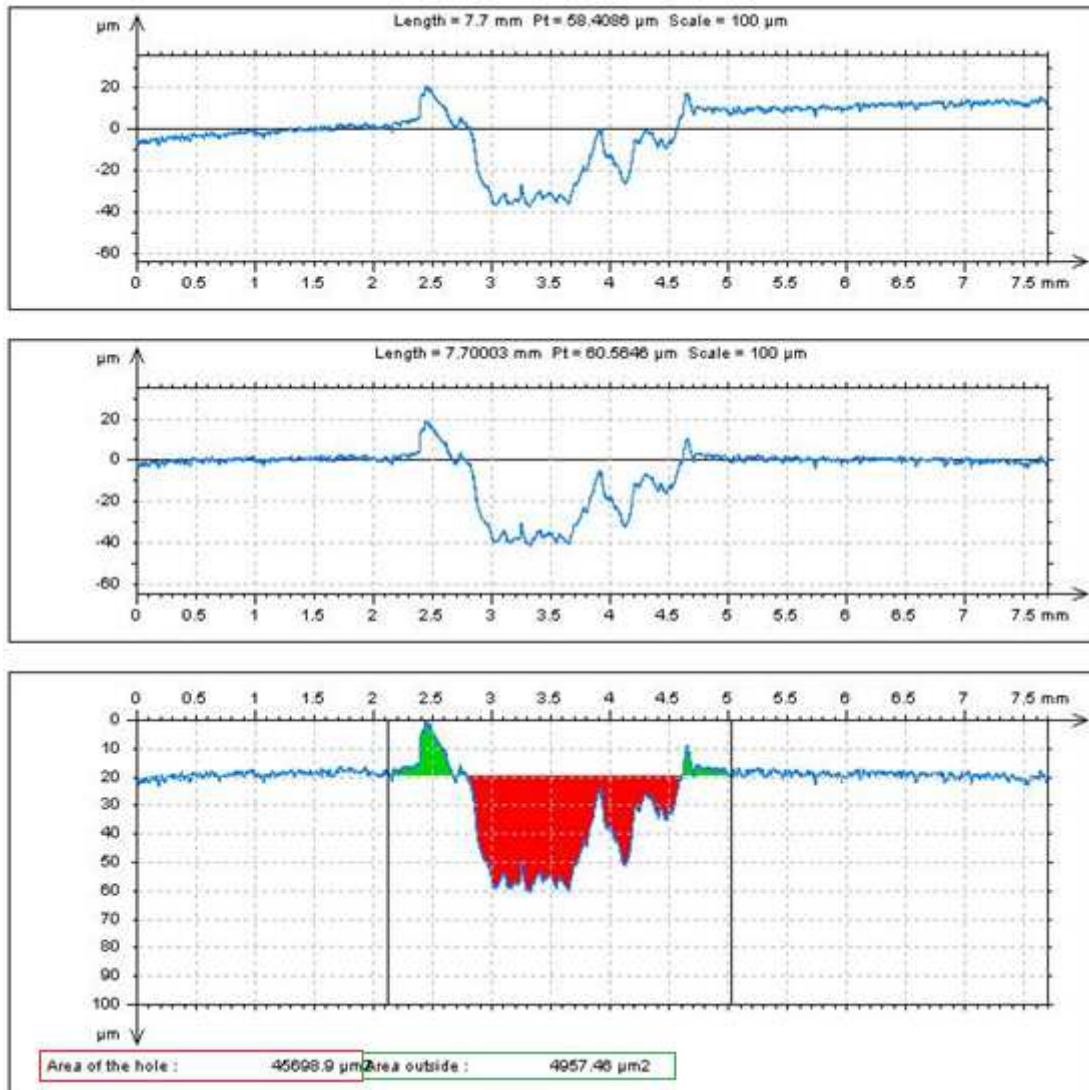


Figura 22: Perfil retirado da trilha de desgaste de um disco utilizado no ensaio a quente com carga de 7,3 N. (Fonte: Autor)

Tabela 5: Comparação entre os ensaios a frio e a quente das medias dos volumes desgastados dos discos. (Fonte: Autor)

Carga (N)	Ensaio a quente		Ensaio a frio	
	Média dos volumes desgastados (mm ³)	Desvio padrão	Média dos volumes desgastados (mm ³)	Desvio padrão
7,3	1,20E+01	1,08E+00	1,14E+00	2,07E-01
15,2	2,03E+01	2,12E+00	1,44E+00	1,73E-01
23	3,14E+01	2,15E+00	1,24E+00	2,52E-01
29,9	2,17E+01	2,80E+00	1,91E+00	1,50E-01

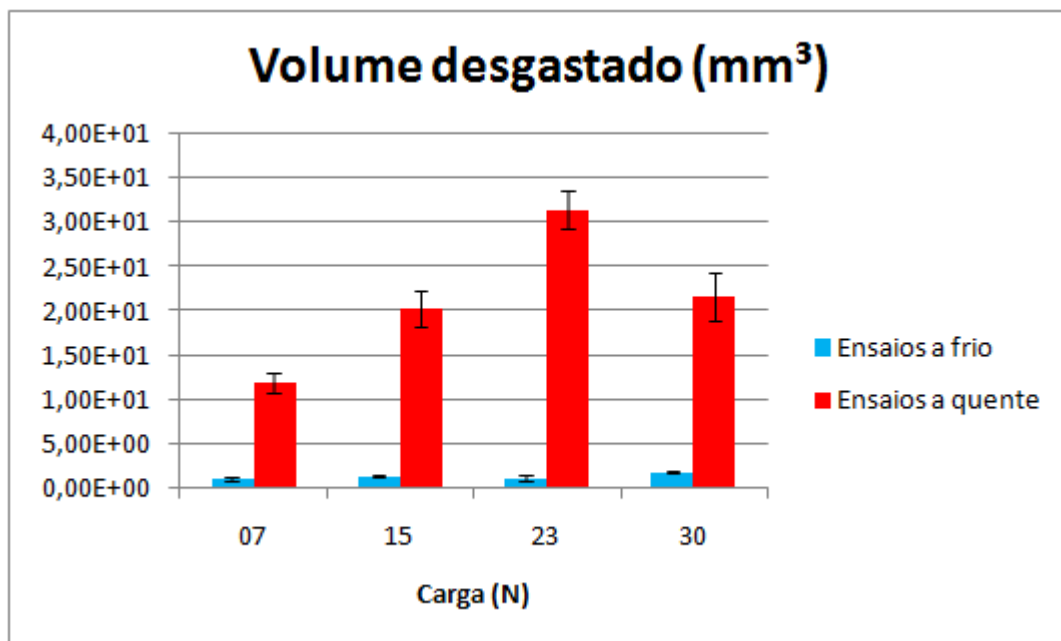


Figura 23: Gráfico mostrando o volume desgastado em função da carga aplicada nos ensaios a frio e a quente. (Fonte: Autor)

Para os discos no ensaio a quente o volume desgastado apresentou um crescimento até a carga de 23 N e uma queda na carga de 29,9 N. Nos discos dos ensaios a frio os valores apresentaram flutuações: o volume desgastado para carga de 7,3 N e 23 N foi menor que para carga de 15,2 N que foi menor que o volume desgastado para carga de 29,9 N.

Os valores do coeficiente de desgaste dimensional para os discos dos ensaios a frio e a quente são mostrados na tabela 6 e comparados no gráfico (figura 24). A diferença entre o coeficiente de desgaste dimensional para os ensaios a frio e a quente de uma, ou até duas ordens de grandeza não podemos afirmar que houve mudança no regime de desgaste de moderado para severo entre os ensaios realizados na temperatura ambiente e realizados a 500°C.

Tabela 6: Comparação entre os ensaios a frio e a quente do coeficiente de desgaste dimensional dos discos. (Fonte: Autor)

Carga (N)	Ensaio a quente		Ensaio a frio	
	Coeficiente de desgaste dimensional (mm ³ /(Nm))	Desvio padrão	Coeficiente de desgaste dimensional (mm ³ /(Nm))	Desvio padrão
7,3	2,29E-03	2,06E-04	2,18E-04	3,96E-05
15,2	1,86E-03	1,94E-04	1,32E-04	1,58E-05
23	1,91E-03	1,30E-04	7,52E-05	1,53E-05
29,9	1,01E-03	1,31E-04	8,90E-05	7,00E-06

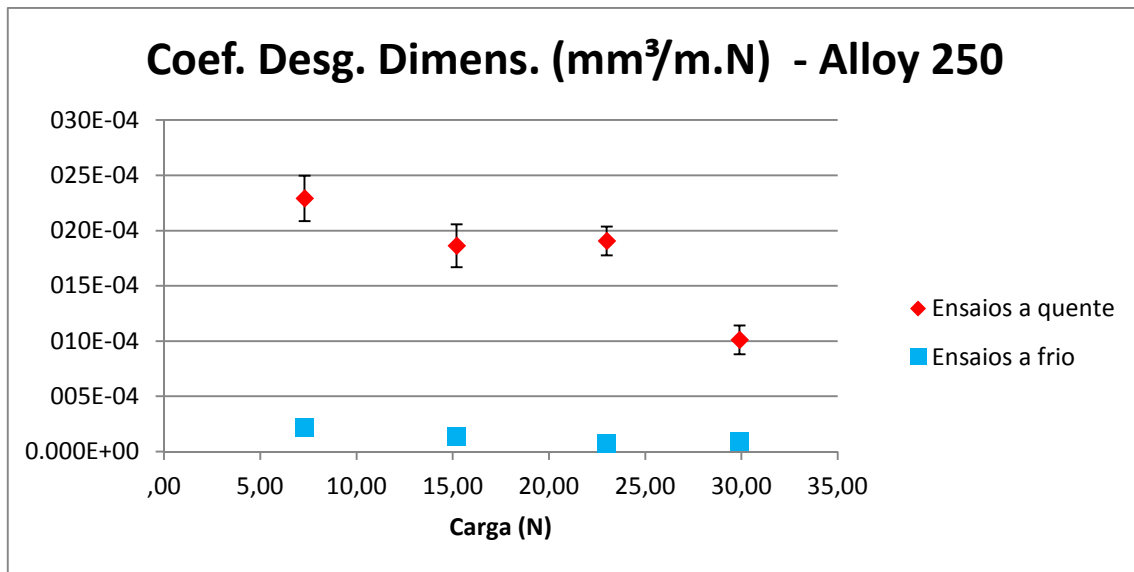


Figura 24: Gráfico comparativo entre os coeficientes de desgaste dimensional dos discos para os ensaios a frio e a quente em função da carga. (Fonte: Autor)

O coeficiente de desgaste dimensional do disco apresentou uma redução para os ensaios a frio e a quente, com um pequeno aumento para carga de 29,9 N em relação a carga de 23 N. Para cargas de 15,2 e 23 N no ensaio a quente os valores foram muito próximos, estando o valor do coeficiente de desgaste para uma destas dentro dos limites de desvio padrão da outra. Para comparar os valores para os ensaios a frio e a quente observamos a tabela 7.

Tabela 7: Comparação do coeficiente de desgaste dimensional do disco para os ensaios a frio e a quente. (Fonte: Autor)

Carga (N)	k_{quente}/k_{frio}
7,3	10
15,2	14
23	25
29,9	11

4.4 Microscópio Eletrônico de Varredura.

As imagens feitas com o auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) são utilizadas para identificar quais mecanismos de desgaste atuam no sistema tribológico. Como pode ser observado na figura 25 de uma região da pista de desgaste do disco utilizado no ensaio com carga de 7,3 N com um aumento de 70x, há uma região destacada mostrando uma possível deposição de material do pino no disco e como pode ser observada na imagem aumentada em 1500x, esta deposição ocorreu em múltiplas camadas.

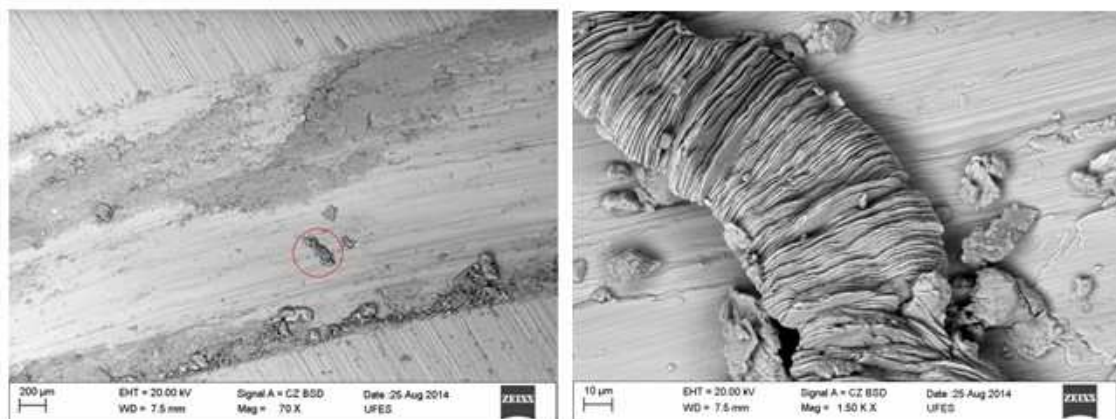


Figura 25: Pista de desgaste destacando deposição de material do pino o disco para ensaio a quente com carga de 7,3 N. (Fonte: Autor)

A figura 26 mostra duas imagens obtidas pelo MEV, ambas do primeiro ensaio a quente com carga de 7,3 N. A imagem a esquerda, com aumento de 70x, mostra a pista de desgaste completa e a imagem a direita, com aumento de 150x, mostra com mais detalhes uma região onde podemos observar deformação plástica e outra com deposição de material do pino. Observando a diferença na coloração entre a superfície do disco e a região mais escura, indicando que o material nesta região pode ser diferente do material do disco, ou seja, é o material transferido do pino para

o disco. As regiões com a presença de deformação plástica e deposição de material caracterizam a forma de desgaste severo conhecido como galling (Segundo definição do termo pela norma ASTM G40).

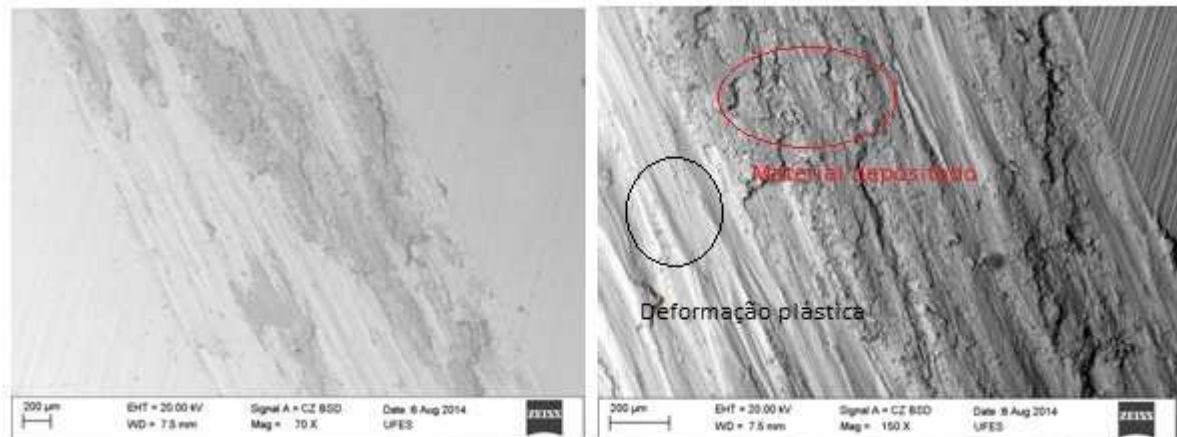


Figura 26: Imagens feitas no MEV mostrando deformação plástica e deposição de material na trilha de desgaste do ensaio a quente com carga de 7,3 N. (Fonte: Autor)

5. Conclusões.

O coeficiente de atrito apresentou valores estáveis para todas as cargas do ensaio a quente avaliadas, não havendo uma grande variação em seu valor que indicasse alguma mudança na execução do ensaio.

Nos ensaios a frio, os pinos apresentaram o problema de não conformidade entre as superfícies do pino e do disco e o desgaste sofrido pelo pino não foi suficiente para que a superfície do pino se desgastasse por igual, sendo possível observar este efeito na figura 20. Nos ensaios a quente, a superfície do pino desgastou por completo, como pode ser observado na figura 18.

O volume desgastado dos discos no ensaio a quente foi maior que no ensaio a frio, entretanto a maior diferença verificada foi para o ensaio de 23 N com uma diferença de 25 vezes, não sendo uma diferença muito elevada. Não podemos afirmar que houve uma transição de desgaste entre o ensaio a frio e a quente.

Podemos observar a forma de desgaste chamada de galling que é caracterizada pela ocorrência de deformação plástica e transferência de material entre pino e disco.

6. Referências.

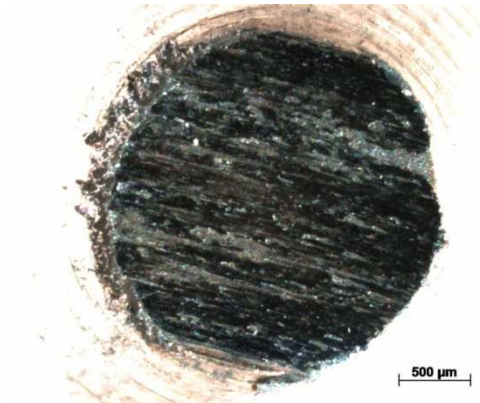
- [1]. HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Ed. Edward Arnold, London, 1992.
- [2]. BUSHAN, B., **Modern Tribology Handbook**, CRC Press, 2001.
- [3]. MARKOV, D., KELLY, D., **Mechanisms of adhesion-initiated catastrophic wear: pure sliding**, WEAR 239, pg 189-210, 2000
- [4]. ASM International, **Specialty Handbook – Heat-Resistant Material**, USA, 1997.
- [5]. ASM International, **Specialty Handbook Nickel, Cobalt and their Alloys**, USA, 1ª edição, 2000.
- [6]. ASM International, **Superalloys – A technical Guide**, USA, 2ª edição, 2002.
- [7]. ASM – American Society for Metals, **Metals Handbook, Vol. 18 - Friction, Lubrication and Wear Technology**; USA, 1992.
- [8]. Manual PLINT.

Apêndice.

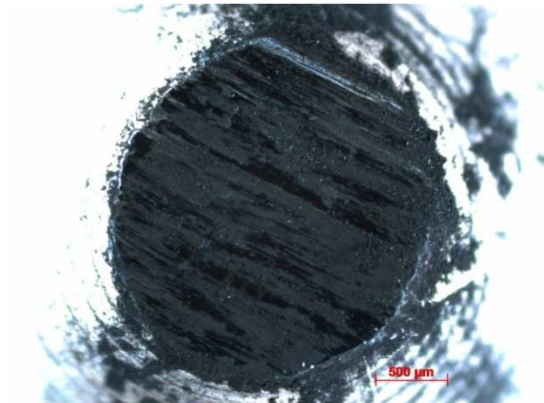
A) Fotos dos pinos no microscópio estereoscópico.

Ensaio a quente:

Carga: 7,3 N.

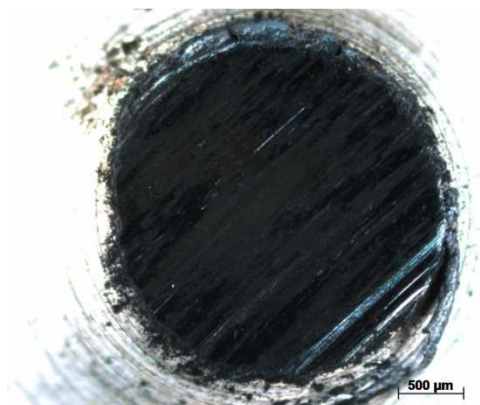


Ensaio 1

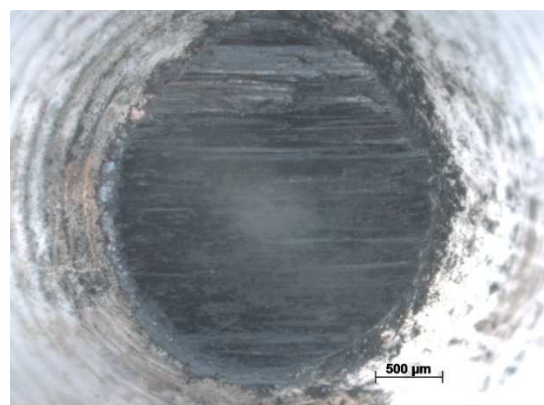


Ensaio 2

Carga: 15,2 N.

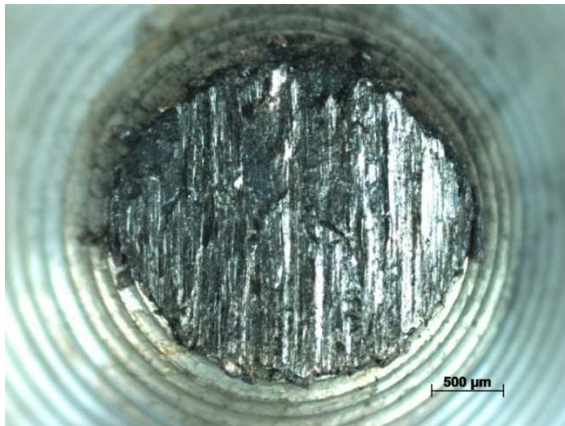


Ensaio 1

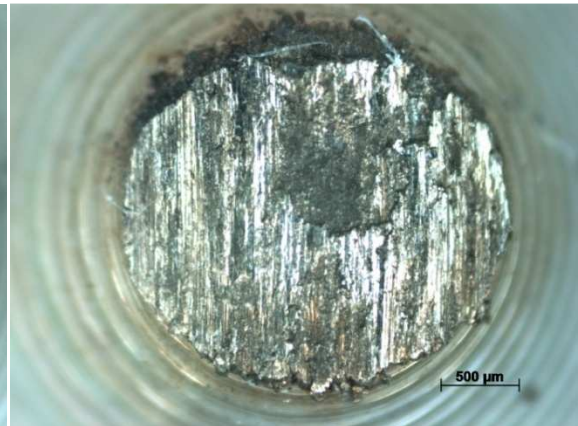


Ensaio 2

Carga: 23 N.

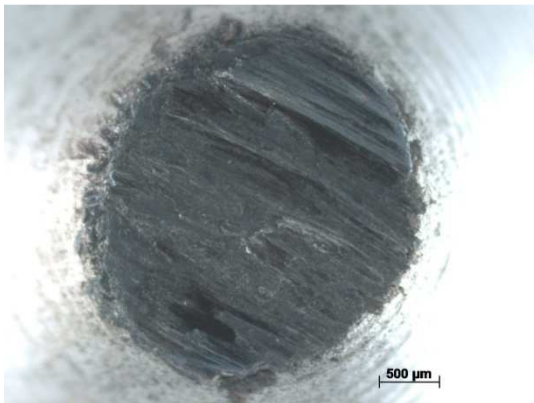


Ensaio 1

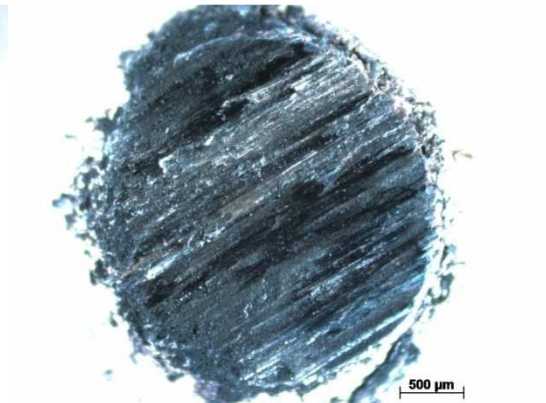


Ensaio 2

Carga: 29,9 N.



Ensaio 1



Ensaio 2

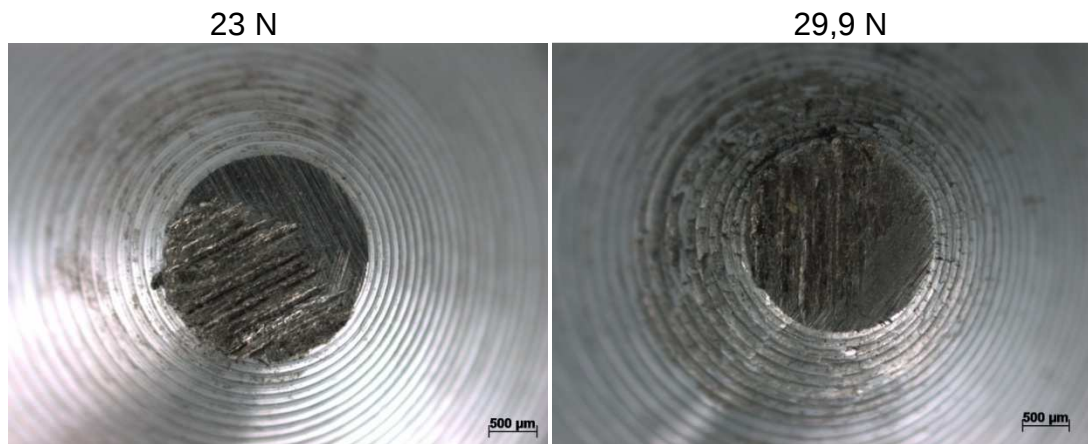
Ensaio a frio:

7,3 N



15,2 N

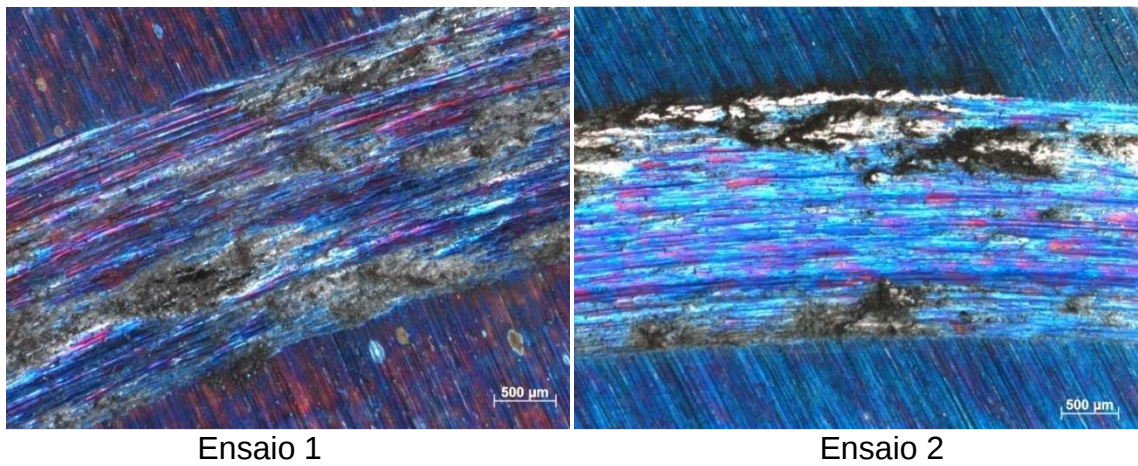




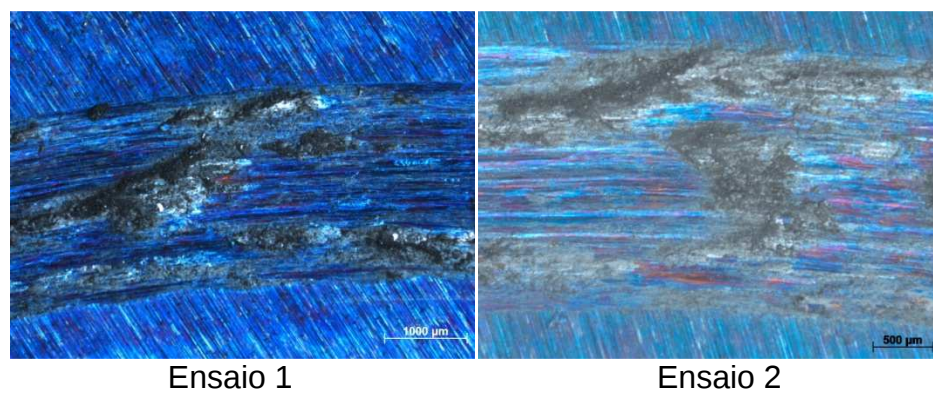
B) Fotos do disco no microscópio estereoscópico.

Ensaio a quente:

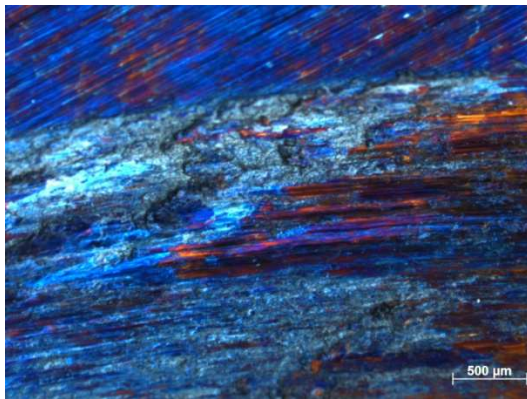
Carga: 7,3 N.



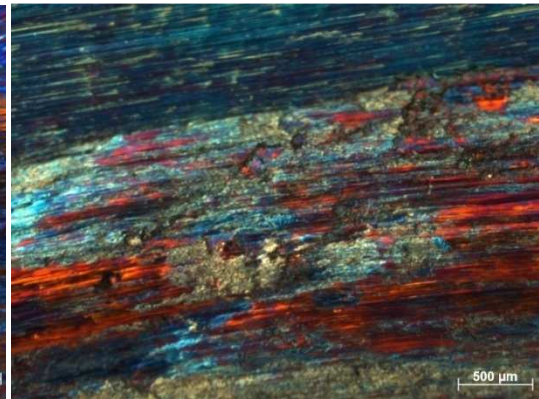
Carga: 15,2 N.



Carga: 23 N.

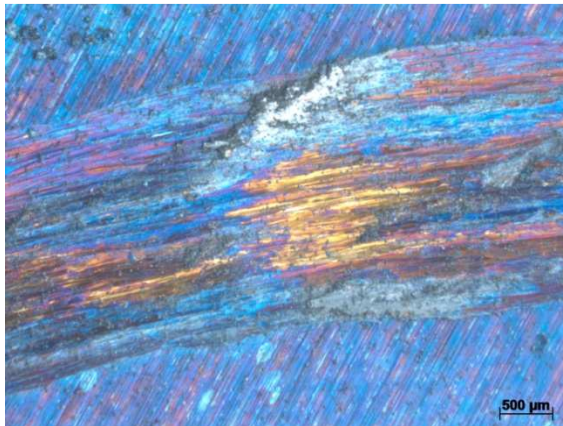


Ensaio 1

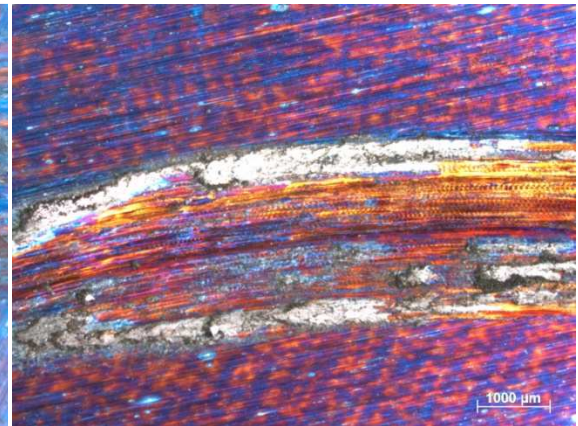


Ensaio 2

Carga: 29,9 N.



Ensaio 1



Ensaio 2

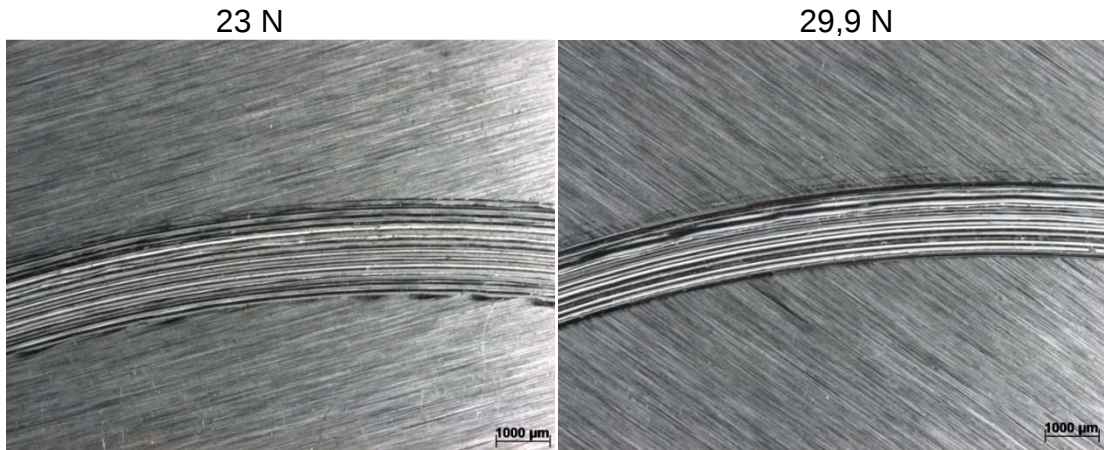
Ensaio a frio:

7,3 N



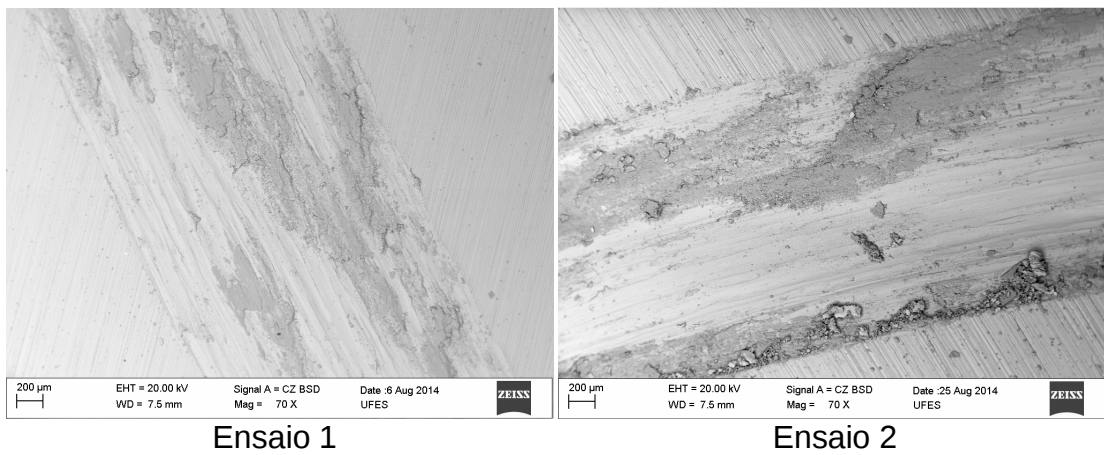
15,2 N



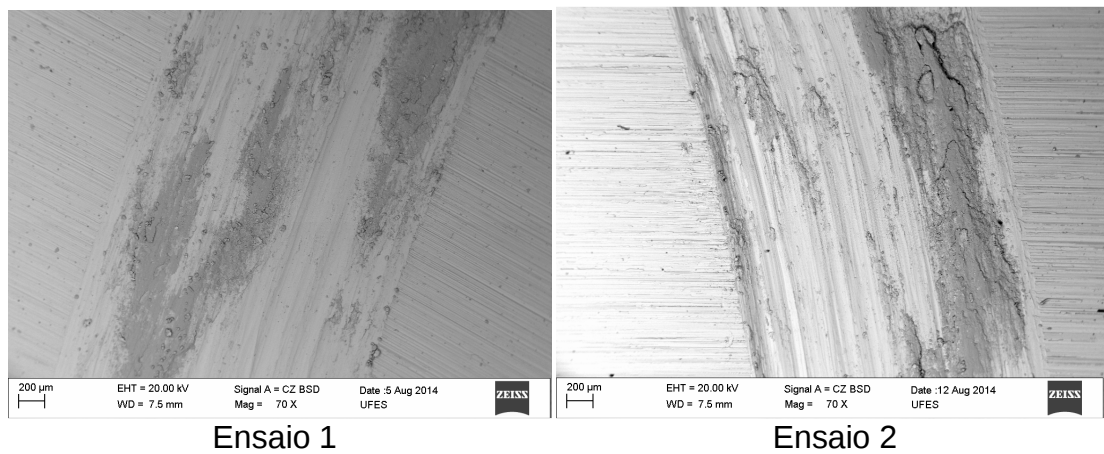


C) Imagens dos discos dos ensaios a quente feitas no MEV.

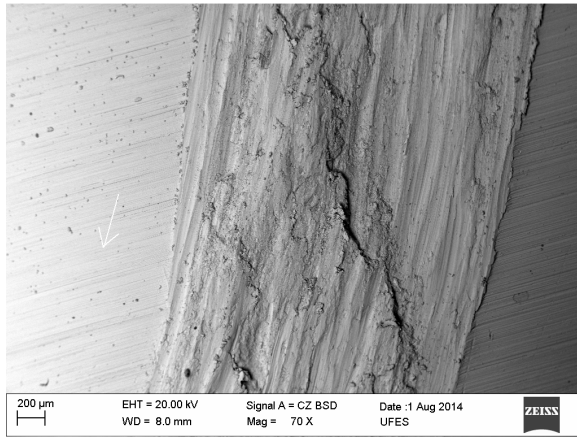
Carga: 7,3 N.



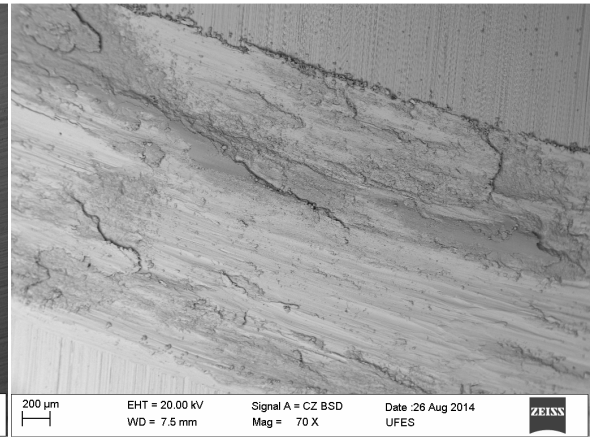
Carga: 15,2 N.



Carga: 29,9 N.



Ensaio 1



Ensaio 2