

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**LEANDRO ENTRINGER FALQUETO**

**INFLUÊNCIA DA CARGA NORMAL NA TRANSIÇÃO MODERADO-  
SEVERO DO DESGASTE POR DESLIZAMENTO DE AÇOS**

VITÓRIA  
2013

LEANDRO ENTRINGER FALQUETO

**INFLUÊNCIA DA CARGA NORMAL NA TRANSIÇÃO MODERADO-  
SEVERO DO DESGASTE POR DESLIZAMENTO DE AÇOS**

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. Cherlio Scandian

VITÓRIA

2013

LEANDRO ENTRINGER FALQUETO

**INFLUÊNCIA DA CARGA NORMAL NA TRANSIÇÃO MODERADO-  
SEVERO DO DESGASTE POR DESLIZAMENTO DE AÇOS**

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. Cherlio Scandian  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

---

Prof. Dr. Flávio José da Silva.  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

Prof. PhD. Antônio Cesar Bozzi  
Universidade Federal do Espírito Santo

Primeiramente a Deus, que me deu força pra continuar mesmo diante das dificuldades encontradas.

Aos meus familiares e amigos, que sempre foram compreensivos e deram a força nos momentos mais difíceis e que foram fundamentais para a conclusão desse curso.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela força necessária para superar cada desafio imposto por este trabalho.

Aos meus pais, Luciano e Ana Lúcia, pela compreensão, apoio e investimento durante toda essa caminhada até esta conquista.

Aos meus amigos e familiares que sempre animaram e incentivaram a conclusão deste trabalho.

Ao professor Dr. Cherlio Scandian pela paciência e ajuda, e por acreditar no meu potencial, orientando-me neste trabalho.

Ao professor Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo pela paciência, oportunidade e ajuda em vários momentos.

Ao professor Dr. Flávio José da Silva por acreditar no meu potencial pela ajuda durante esse projeto.

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

Ao mestrando Roberto Balarini Junior pela ajuda no trabalho e pelo conhecimento passado durante o mesmo.

Ao graduando Nathan Fantecelle Strey pela ajuda durante a construção deste trabalho.

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

## RESUMO

Em ensaios de desgaste por deslizamento de aços ocorrem transições entre regimes de desgaste moderado e severo em função da carga normal, velocidade de deslizamento, umidade, temperatura, entre outros fatores. No presente trabalho, foi investigada a influência da carga normal na transição do regime moderado-severo no desgaste por deslizamento dos aços AISI 1020 e AISI 4340, na configuração tribológica pino-disco, sem lubrificação e à temperatura ambiente. Os materiais dos pinos foram o aço AISI 1020 e 4340, enquanto que os discos o aço AISI 1020. A caracterização das amostras foi feita antes e após os ensaios, através do uso de microscópio estereoscópico, analisador tridimensional de superfície e microscópio eletrônico de varredura (MEV), além da medição de microdureza e de perda de massa via gravimétrica. Em adição, o comportamento do coeficiente de atrito em função do tempo foi investigado, com identificação de um regime de running-in para os casos estudados. Os pinos de AISI 1020 sofreram desgaste superior aos pinos de AISI 4340 e, em ambos os pares estudados, foi observada uma transição do modo de desgaste moderado-severo com o aumento da carga normal.

**Palavras Chave:** Aços AISI 1020 e 4340, desgaste por deslizamento, carga normal.

## ABSTRACT

In sliding wear tests of steels, transitions happen between the moderate and severe wear regimes as a function of the normal load, sliding speed, humidity, temperature, between other factors. In this work, the influence of the normal load in the wear transition of the AISI 1020 and AISI 4340 steel, using a pin-on-disc configuration, without lubrication and at ambient temperature. The pin materials were AISI 1020 and 4340 steel, meanwhile the discs material was AISI 1020 steel. The sample's characterization was done before and after the essays, through the use of a stereo microscope, a three-dimensional surface analyzer and a scanning electron microscope (SEM). Measurement of hardness and mass loss were also performed. In addition, the friction coefficient versus time behavior was investigated, with identification of a running-in regime for the studied cases. The AISI 1020 pins worn more than the AISI 4340 pins and, in both studied pairs, it was observed a moderate-severe wear regime transition with the increase of normal load.

**Keywords:** AISI 1020 and 4340 steel, sliding wear, normal load.

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1** – CURVAS DE COEFICIENTE DE ATRITO PARA DOIS ENSAIOS COM OS MESMOS PARÂMETROS, EVIDENCIANDO A REPETIBILIDADE DOS MESMOS. PINO DE AISI 4340, DISCO DE AISI 1020, VELOCIDADE DE DESLIZAMENTO 0,1 M/S, TEMPERATURA AMBIENTE.....6
- FIGURA 2** – INFLUÊNCIA DA CARGA NORMAL NAS CURVAS DE COEFICIENTE DE ATRITO. PINO DE AISI 4340, DISCO DE AISI 1020, VELOCIDADE DE DESLIZAMENTO 0,1 M/S.....7
- FIGURA 3** – TAXA DE DESGASTE EM FUNÇÃO DA CARGA NORMAL PARA O DESLIZAMENTO DE PINO DE AÇO AISI 1020 CONTRA DISCO DE AÇO AISI 1020. VELOCIDADE DE DESLIZAMENTO 0,1 M/S, TEMPERATURA AMBIENTE. AS MACROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DOS PINOS OBTIDAS NO MICROSCÓPIO ESTEREOSCÓPICO PARA CARGAS NORMAIS 9,9 N E 62,9 N ESTÃO APRESENTADAS, ASSIM COMO OS PONTOS EXPERIMENTAIS DO COEFICIENTE DE ATRITO PARA CADA UMA DAS CONDIÇÕES DE CARGA. ....8
- FIGURA 4** – SUPERFÍCIES DE PINOS DE AISI 4340 OBSERVADAS NO MEV. A IMAGEM DA ESQUERDA É A SUPERFÍCIE DE UM PINO ENSAIADO COM CARGA NORMAL DE 18,7 N E A DA DIREITA COM CARGA NORMAL DE 62,9 N. OBSERVA-SE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EM AMBAS AS SUPERFÍCIES, SENDO MUITO MAIS INTENSA NA SUPERFÍCIE DA IMAGEM À DIREITA. AMPLIAÇÃO DE 500X .....9

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1</b> – CARACTERÍSTICAS DOS PINOS E DISCOS .....	4
<b>TABELA 2</b> – COEFICIENTES DE ATRITO MÉDIO.....	7
<b>TABELA 3</b> - TAXAS DE DESGASTE MÉDIAS DOS PINOS .....	8

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>6</b>
	4.1 ATRITO	6
	4.2 DESGASTE	7
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	<b>10</b>
	5.1 ATRITO	10
	5.2 DESGASTE	10
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>12</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>13</b>
	<b>APÊNDICE A – MATERIAIS E MÉTODOS DETALHADOS</b>	<b>14</b>
	<b>APÊNDICE B – IMAGENS PARA CARACTERIZAÇÃO SUPERFICIAL DOS PINOS</b>	<b>19</b>
	<b>APÊNDICE C – GRÁFICO DE ATRITO E TAXA DE DESGASTE PARA O PAR TRIBOLÓGICO PINO AISI 4340 E DISCO AISI 1020</b>	<b>23</b>
	<b>APÊNDICE D – GRAFICO DE TAXAS DE DESGATES DOS PARES ESTUDADOS</b>	<b>24</b>
	<b>APÊNDICE E – GRAFICO DO COEFICIENTE DE DESGASTE DIMENSIONAL</b>	<b>25</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A palavra tribologia vem do grego “*tribos*” que significa esfregação, ou seja, esta é a ciência que estuda os fenômenos que ocorrem quando duas superfícies estão em contato e em movimento relativo entre si. Ela está presente desde a simples ação de caminhar até em atividades mais complexas como o movimento do pistão no motor de um automóvel. Apesar de influenciar na maioria das atividades da vida, ela não é tão simples de ser compreendida. Devido ao seu caráter sistêmico, seu estudo se torna difícil e árduo.

O desgaste é o dano em uma ou duas superfícies, geralmente envolvendo a perda progressiva de material, quando essas estão em movimento relativo (HUTCHINGS, 1992). Ele pode ser classificado de acordo com o mecanismo de remoção de material.

O desgaste por deslizamento, objeto de estudo neste trabalho, provém do movimento relativo entre duas superfícies sólidas em contato e das interações que ocorrem nessa interface. Ele está presente nos mais variados sistemas mecânicos e é de grande importância a compreensão dos mecanismos que o causa.

Segundo Hutchings (1992), a carga normal e a velocidade são duas variáveis fundamentais neste tipo de desgaste. Com isso, o objetivo deste trabalho foi de avaliar a influência da carga normal na transição moderado-severo no desgaste por deslizamento de aços, com velocidade constante e sem lubrificação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desgaste de componentes em estruturas e sistemas mecânicos é assunto de grande interesse para pesquisadores e engenheiros. Busca-se compreender os mecanismos que levam ao desgaste dos materiais e identificar os principais fatores que o influenciam.

A liga metálica do aço AISI 1020 possui baixo teor de carbono, baixo custo e é amplamente utilizada na fabricação de estruturas e de elementos de máquina. O aço AISI 4340 é um aço baixa liga Níquel-Cromo-Molibdênio de características mecânicas superiores ao AISI 1020 e de ampla aplicação. Ambos podem estar sujeitos ao desgaste por deslizamento.

Duas variáveis são fundamentais no desgaste por deslizamento: carga normal e velocidade (HUTCHINGS, 1992). Tanto o mecanismo de desgaste quanto taxas de desgaste observadas são fortemente dependentes destas variáveis.

Existem vários mecanismos que levam a remoção de materiais de superfícies metálicas em deslizamento, sendo que a importância relativa de um mecanismo em relação aos outros depende das condições as quais está sujeito o sistema tribológico. Os principais fatores que controlam a importância destes mecanismos são as solicitações mecânicas, a temperatura e o fenômeno de oxidação (HUTCHINGS, 1992). Os mecanismos de desgaste de materiais metálicos podem ser divididos em dois grupos principais: plásticos e oxidativos.

Um método útil de representar vários regimes de desgaste onde diferentes mecanismos são predominantes é proporcionado pelos mapas de mecanismos de desgaste de Lim e Ashby (1987). Com estes mapas, que consistem de modelos analíticos simples calibrados por dados experimentais, é possível prever de maneira aproximada o mecanismo predominante de desgaste e as taxas de desgaste com base nas informações de carga e velocidade, além das propriedades térmicas dos materiais em deslizamento, a uma temperatura ambiente prescrita.

Os mapas de desgaste indicam que mudanças pequenas na velocidade de deslizamento ou pressão de contato levam a transições entre desgaste moderado e severo, podendo mais de uma transição ser gerada pela mudança de apenas uma variável (HUTCHINGS, 1992). Para aços, transições de desgaste moderado para severo em função da carga são explicadas, por exemplo, pela mudança da estrutura

dos óxidos ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ou  $\text{FeO}$ ) ou pela quebra de filmes óxidos protetores nas superfícies em deslizamento (QUINN; ROWSON; SULLIVAN, 1980).

O objetivo do presente trabalho foi estudar a influência da carga normal no desgaste por deslizamento dos aços AISI 1020 e AISI 4340. Estes dois materiais foram escolhidos para os ensaios por possuírem propriedades mecânicas bem distintas, sendo o AISI 4340 superior em vários aspectos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Ensaio de desgaste sem lubrificação, à temperatura ambiente, na configuração pino-disco, foram realizados em um tribômetro PLINT TE67. Os pinos utilizados tinham 7,95 mm de diâmetro e 68 mm de comprimento, enquanto que os discos tinham 75 mm de diâmetro e 8 mm de espessura. As superfícies das amostras foram retificadas antes dos ensaios. Demais características dos pinos e discos estão apresentadas na Tabela 1. A limpeza das amostras foi realizada, antes e após os ensaios, em banho de ultrassom com álcool absoluto e em seguida com acetona, durante 5 minutos cada. A velocidade de rotação dos discos utilizada foi 34 rpm e o raio do trilho de desgaste foi 28 mm, resultando numa velocidade de deslizamento de 0,1 m/s. O pino foi forçado contra o disco através de um sistema de peso morto, aplicado diretamente sobre o eixo central do pino. As cargas utilizadas foram 5,0 N, 9,9 N, 18,7 N, 36,4 N e 62,9 N. A força de atrito foi monitorada durante os ensaios por uma célula de carga e o coeficiente de atrito foi calculado como a razão entre a força de atrito e a carga normal. A comparação entre curvas de coeficiente de atrito ( $\mu$ ) com o tempo para ensaios utilizando os mesmos parâmetros (réplicas) serviram para validar a reprodutibilidade dos mesmos. Para cada configuração de parâmetros duas réplicas foram realizadas. Com as amostras devidamente limpas, elas foram desmagnetizadas. As massas dos pinos foram medidas, antes e após os ensaios, utilizando uma balança analítica (Sartorius CP 225 D) com precisão de 0,00001 g, de modo que a perda de massa durante os ensaios pôde ser calculada. O valor utilizado para a massa de cada pino foi a média de 5 medições realizadas.

**Tabela 1** – Características dos pinos e discos

	Pinos		Discos
<b>Material</b>	AISI 1020	AISI 4340	AISI 1020
<b>Dureza</b>	218 ± 2 HV1	340 ± 4 HV1	142 ± 3 HV1
<b>Parâmetro de rugosidade (<math>S_q</math>)</b>	0,50 ± 0,22 $\mu\text{m}$	0,30 ± 0,04 $\mu\text{m}$	1,20 ± 0,20 $\mu\text{m}$

O tempo total de cada ensaio foi de 30 minutos e, para todos eles, os valores de coeficiente de atrito se estabilizaram após um período inicial de *running-in*.

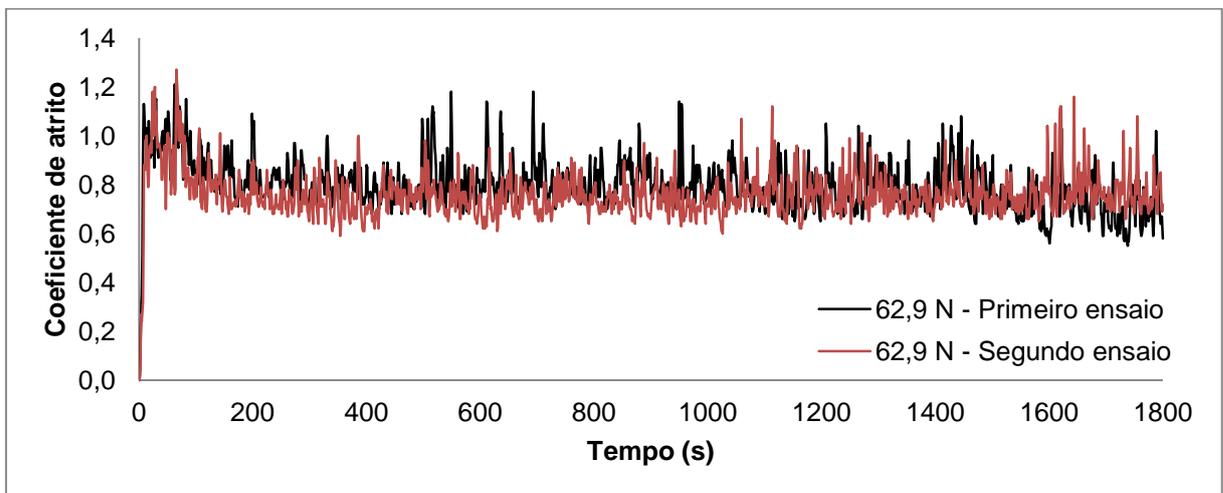
As superfícies das amostras foram caracterizadas antes e após os ensaios. A dureza foi medida com um microdurômetro Vickers utilizando carga normal de 1 kgf. Os

valores de rugosidade foram obtidos por um analisador tridimensional de superfícies (Talysurf CLI 1000, Taylor Robson Precision), utilizando um instrumento de contato. Os pinos foram analisados com microscópio estereoscópico (Zeiss) e microscópio eletrônico de varredura (MEV EVO 40XVP, Zeiss), de modo a caracterizar as superfícies.

## 4 RESULTADOS

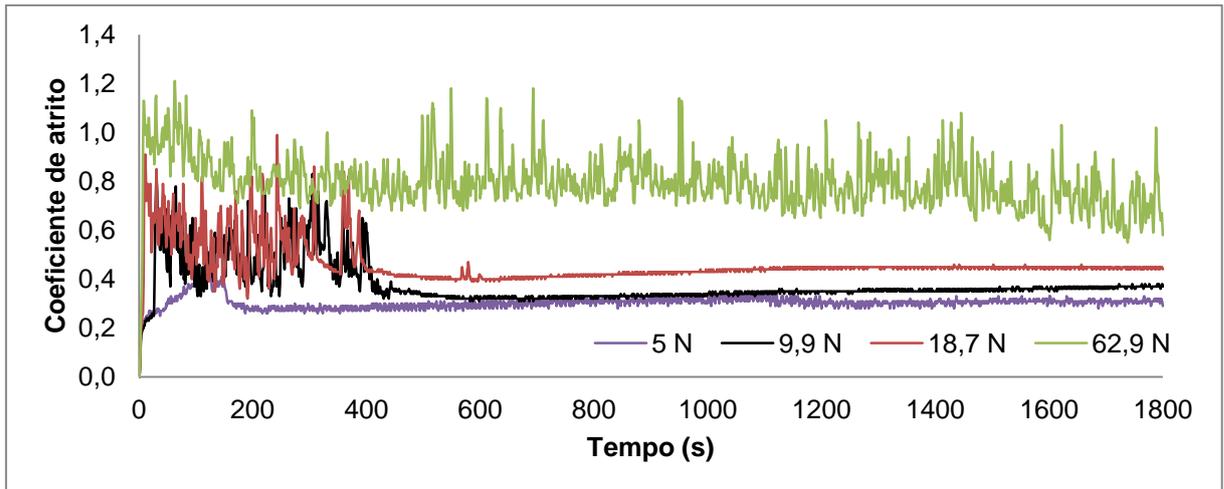
### 4.1 ATRITO

Na Figura 1 estão contidas duas curvas de coeficiente de atrito que demonstram uma boa repetibilidade dos ensaios. Para ambas as curvas apresentadas, os mesmos parâmetros foram utilizados.



**Figura 1** – Curvas de coeficiente de atrito para dois ensaios com os mesmos parâmetros, evidenciando a repetibilidade dos mesmos. Pino de AISI 4340, disco de AISI 1020, velocidade de deslizamento 0,1 m/s, temperatura ambiente.

A influência do valor da carga normal nas curvas de coeficiente de atrito para o deslizamento de pinos de AISI 4340 contra discos de AISI 1020 está apresentada na Figura 2. As curvas exibiram um período inicial de *running-in* seguido de um regime permanente, sendo que este comportamento é mais evidente nas curvas com cargas intermediárias (9,9 N e 18,7 N).



**Figura 2** – Influência da carga normal nas curvas de coeficiente de atrito. Pino de AISI 4340, disco de AISI 1020, velocidade de deslizamento 0,1 m/s.

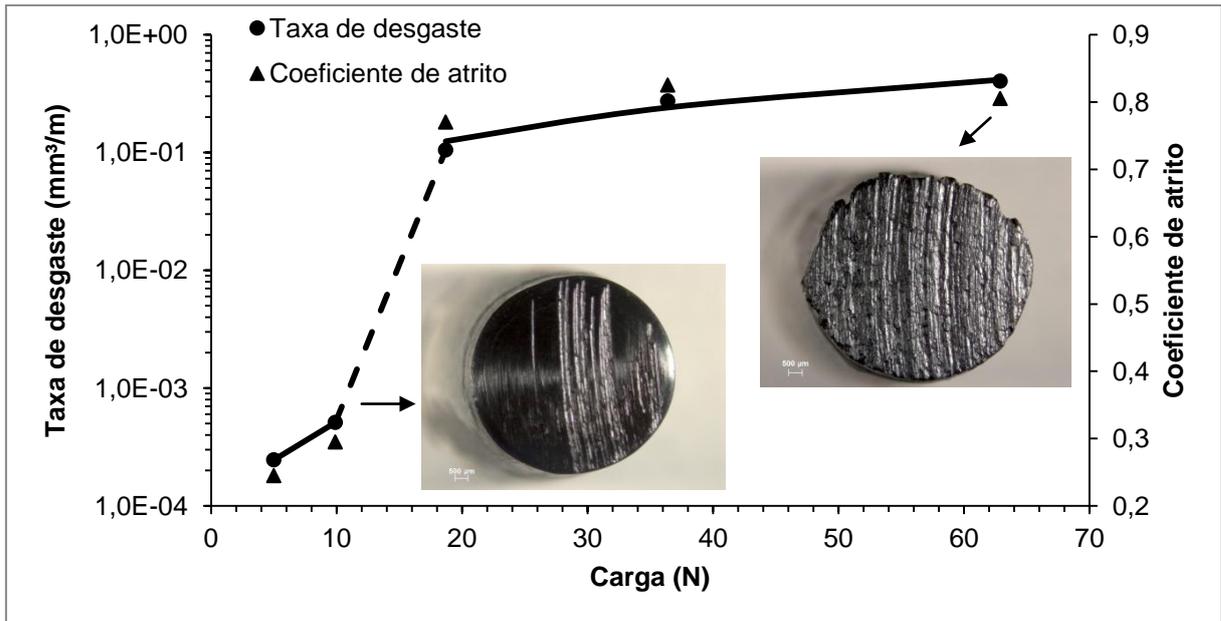
Valores médios dos coeficientes de atrito para todas as condições estudadas estão apresentadas a seguir, na Tabela 2. Estes foram calculados no regime permanente através da média aritmética dos últimos cem valores coletados durante o ensaio.

**Tabela 2** – Coeficientes de atrito médio

Carga Normal (N)	Coeficiente de atrito	
	AISI 1020 X AISI 1020	AISI 1020 X AISI 4340
5,0	0,25	0,29
9,9	0,30	0,32
18,7	0,76	0,41
36,4	0,80	0,37
62,9	0,80	0,73

## 4.2 DESGASTE

Taxas de desgaste em função da carga observados nos ensaios de pinos de AISI 1020 deslizando contra discos de AISI 1020 são mostradas na Figura 3. Para este caso observam-se dois patamares bem definidos para as taxas de desgaste. Em cargas baixas, os valores de taxa de desgaste são da ordem de  $10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/m, enquanto que em cargas mais elevadas são da ordem de  $10^{-1}$  mm<sup>3</sup>/m. Entre as cargas de 9,9 N e 18,7 N ocorre uma transição entre os dois patamares de desgaste, representada por uma linha tracejada. Na figura também estão apresentados os pontos experimentais com valores de coeficiente de atrito médio.



**Figura 3** – Taxa de desgaste em função da carga normal para o deslizamento de pino de aço AISI 1020 contra disco de aço AISI 1020. Velocidade de deslizamento 0,1 m/s, temperatura ambiente. As macrografias das superfícies dos pinos obtidas no microscópio estereoscópico para cargas normais 9,9 N e 62,9 N estão apresentadas, assim como os pontos experimentais do coeficiente de atrito para cada uma das condições de carga.

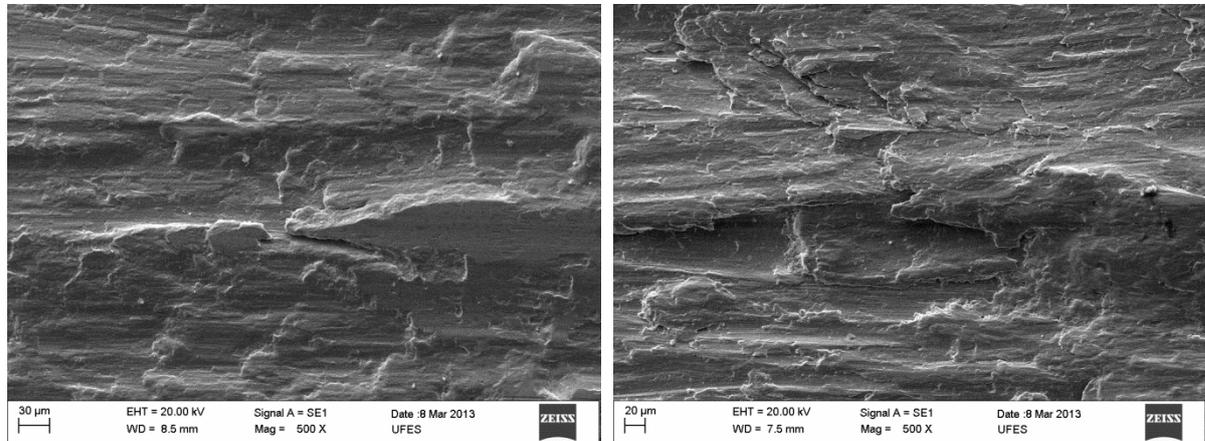
O comportamento da curva é similar para o caso do AISI 4340 deslizando contra AISI 1020, exceto pelo fato de que, para este caso, a transição ocorre entre as cargas de 36,4 N e 62,9 N. De forma geral, menores taxas de desgaste são observadas para o pino em relação ao caso anterior. Valores médios de taxas de desgaste dos pinos para todos os casos estudados estão na Tabela 3, a seguir.

**Tabela 3** – Taxas de desgaste médias dos pinos

Carga Normal (N)	Taxa de desgaste (mm³/m)	
	AISI 1020 X AISI 1020	AISI 1020 X AISI 4340
5	$2,46 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-5}$
9,9	$5,12 \cdot 10^{-4}$	$1,93 \cdot 10^{-4}$
18,7	$1,05 \cdot 10^{-1}$	$1,94 \cdot 10^{-4}$
36,4	$2,73 \cdot 10^{-1}$	$2,07 \cdot 10^{-4}$
62,9	$4,02 \cdot 10^{-1}$	$1,74 \cdot 10^{-3}$

Exemplos de superfícies observadas no MEV que apresentaram taxas de desgaste em duas diferentes ordens de grandeza ( $10^{-4}$  e  $10^{-1}$  mm³/m) para o aço AISI 4340 são mostrados na Figura 4. As superfícies apresentam nível elevado de deformação plástica, sendo que a superfície que deslizou sujeita a maior carga apresenta maior deformação se comparada à superfície que deslizou em menor carga normal.

Comportamento similar é observado para o deslizamento de AISI 1020 contra AISI 1020.



**Figura 4** – Superfícies de pinos de AISI 4340 observadas no MEV. A imagem da esquerda é a superfície de um pino ensaiado com carga normal de 18,7 N e a da direita com carga normal de 62,9 N. Observa-se deformação plástica em ambas as superfícies, sendo muito mais intensa na superfície da imagem à direita. Ampliação de 500X

## 5 DISCUSSÃO

### 5.1 ATRITO

Teorias de contato plástico entre superfícies preveem que a área real de contato é proporcional à carga normal aplicada (GREENWOOD, WILLIAMSON, 1966), enquanto que teorias a respeito do atrito dizem que a força de adesão entre as superfícies é proporcional a essa mesma área (HUTCHINGS, 1992). Se considerarmos que a resistência de cisalhamento das duas superfícies em contato é a mesma para todas as condições de carregamento, chegamos à conclusão de que o atrito devido à adesão também é proporcional à carga normal aplicada. Isso é observado na Figura 2, na qual o valor do coeficiente de atrito cresce à medida que é aumentada a carga normal.

Em regime de desgaste moderado foi observado um coeficiente de atrito mais baixo do que em regime severo, como pode ser observado na Figura 3. Fica evidente que, para os experimentos realizados, o valor de  $\mu$  em regime tem alguma relação com a taxa de desgaste dos pinos, sendo que em regime de desgaste severo o coeficiente de atrito é praticamente duas vezes maior que em regime de desgaste moderado.

Fenômenos envolvidos no atrito são bastante complexos. Fatores como encruamento do material, formação de óxidos e crescimento de junções competem de forma a influenciar no valor de  $\mu$  observado na prática.

### 5.2 DESGASTE

A equação de Archard para o desgaste por deslizamento (ARCHARD, 1953) prevê que o aumento da carga normal conduz a um aumento da taxa de desgaste. A Figura 3 comprova isso para o deslizamento do aço AISI 1020 contra ele mesmo.

Contudo, a Figura 3 também mostra que, em determinado valor de carga, há aumento abrupto na taxa de desgaste (a ordem de grandeza salta de  $10^{-4}$  para  $10^{-1}$   $\text{mm}^3/\text{m}$ ), que é um comportamento não previsto pela equação do desgaste. A transição é acompanhada por um aumento expressivo no valor do coeficiente de desgaste dimensional (K), que salta de aproximadamente  $5,0 \cdot 10^{-5}$   $\text{mm}^3/\text{N.m}$  antes da transição para aproximadamente  $6,5 \cdot 10^{-3}$   $\text{mm}^3/\text{N.m}$  após a transição. Esses valores

de taxas de desgaste antes e após a transição ocorrer representam regimes de desgaste moderado e severo, respectivamente (HUTCHINGS, 1992; VENKATESAN, 1992).

Para o pino de AISI 1020, a mudança de regime foi notada entre os valores de carga de 9,9 N e 18,7 N. Já no caso do pino de AISI 4340, esse mesmo tipo de variação brusca foi observada apenas em cargas maiores, entre 36,4 N e 62,9 N. Resultados da literatura (SULLIVAN; HODGSON, 1988) para o deslizamento do aço AISI 52100 contra ele mesmo na configuração pino-disco, à velocidade de 0,1 m/s, mostram que a transição ocorreu entre 9,8 N e 19,6 N. Em outro estudo (GOTO; AMAMOTO, 2003), para o deslizamento de aço 0,33 %C na configuração pino-disco, à velocidade de 0,15 m/s, a carga de transição situou-se entre 6,9 N e 10,3 N.

Blau (BLAU, 1981) descreve quatro processos distintos que podem levar a transições de regime de desgaste em metais, sendo eles: transferência metálica, formação e remoção de filmes, geração de *debris* e deterioração cíclica da superfície. Embora estes não sejam os únicos processos que podem levar a variações bruscas nas taxas de desgaste, eles são os mais comumente observados na prática. Análises mais detalhadas necessitam ser feitas para explicar qual destes processos predomina na transição de desgaste para o deslizamento dos aços AISI 1020 e AISI 4340.

Transições de regimes de desgaste podem ser causadas pela variação de outros parâmetros além da carga, como velocidade de deslizamento (SULLIVAN; HODGSON, 1988) e dureza dos materiais (VIÁFARA; SINATORA, 2011). A avaliação destes efeitos é objeto de trabalhos subsequentes.

De forma geral o AISI 4340 se desgastou menos que o AISI 1020 em toda a faixa de cargas normais estudadas. Pode-se explicar este comportamento com base na análise da dureza destes materiais. Devido à maior dureza do AISI 4340 ( $340 \pm 4$  HV1) em relação ao AISI 1020 ( $218 \pm 2$  HV1), ele possui maior resistência à deformação plástica na superfície em deslizamento, e sua maior resistência ao desgaste é prevista pela equação de Archard.

## 6 CONCLUSÕES

O valor do coeficiente de atrito acompanhou o regime de desgaste. Em regimes de desgaste moderado o atrito foi baixo, enquanto que em regimes de severo o atrito foi bem maior.

O aumento da carga normal propiciou a elevação na taxa de desgaste em ambos os pares ensaiados, conforme previsto pela equação de Archard.

A transição de desgaste moderado-severo foi percebida nos dois casos estudados. Para o pino de AISI 1020 ela ocorreu entre as cargas 9,9 N e 18,7N e para o pino de AISI 4340 foi entre 36,4 N e 62,9 N.

O pino AISI 4340 apresentou maior resistência ao desgaste em relação ao pino AISI 1020 devido a maior dureza do primeiro, fator também previsto pela equação de desgaste por deslizamento.

## 7 REFERÊNCIAS

- ARCHARD, J. F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal of Applied Physics*, England, v. 24, n. 8, p. 981-8, ago. 1953.
- BLAU, P. Mechanisms for Transitional Friction and Wear Behavior of Sliding Metals, *Wear*, Lausanne, v. 72, n. 1, p. 55-66, out. 1981.
- GOTO, H.; AMAMOTO, Y. Effect of Varying Load on Wear Resistance of Carbon Steel Under Unlubricated Conditions, *Wear*, v. 254, n. 12, p. 1256-1266, nov. 2003.
- GREENWOOD, J. A.; WILLIAMSON, J. B. P. Contact of Nominally Flat Surfaces, *Proceedings of the Royal Society London A*, London, v. 295, n. 1442, p. 300-319, dez. 1966.
- HUTCHINGS, I. M. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. London: Butterworth-Heinemann, 1992.
- LIM, S. C.; ASHBY, M. F. Overview NO. 55: Wear-Mechanism Maps. *Acta Metallurgica*, Great Britain, v. 35, n. 1, p. 1-24, jan. 1987.
- QUINN, T. F. J.; ROWSON, D. M.; SULLIVAN, J. L. Application of the Oxidational Theory of Mild Wear to the Sliding Wear of Low Alloy Steel. *Wear*, Lausanne, v.65, n. 1, p. 1-20, dez. 1980.
- SULLIVAN, J. L., HODGSON, S. G. A Study of Mild Oxidational Wear for Conditions of Low Load and Speed, *Wear*, v. 121, n. 1, p. 95-106, jan. 1988.
- VENKATESAN, S.; RIGNEY, D. A. Sliding Friction and Wear of Plain Carbon Steels in Air and Vacuum, *Wear*, v. 153, n. 1, p. 163-178, mar. 1992.
- VIÁFARA, C. C.; SINATORA, A. Unlubricated Sliding Friction and Wear of Steels: An Evaluation of the Mechanism Responsible for the T<sub>1</sub> Wear Regime Transition, *Wear*, v. 271, n. 9-10, p. 1689-1700, jul. 2011.

## APÊNDICE A – MATERIAIS E MÉTODOS DETALHADOS

### a. Equipamentos

A caracterização inicial das amostras foi realizada medindo dureza e rugosidade. Este processo foi realizado no durômetro de marca Pantec Metrologia Dimensional, localizado no Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (TRICORRMAT) da UFES, e no analisador tridimensional de superfícies Talysurf CLI 1000, localizado no Laboratório de Caracterização de Superfícies de Materiais (LCSM) também da UFES.



**Figura a1** – À esquerda está o durômetro Vickers Pantec Metrologia Dimensional utilizado na caracterização da dureza das amostras. À direita está o analisador tridimensional Talysurf CLI 1000 utilizado para a caracterização das superfícies das amostras.

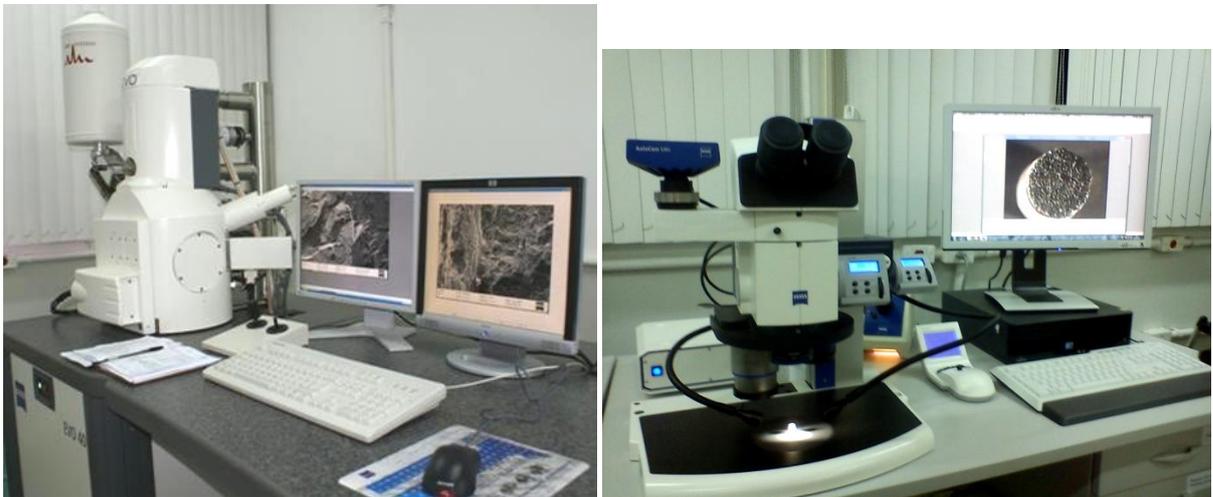
Para o ensaio de dureza Vickers foram feitas cinco endentações, calculando-se a média posteriormente. Já para a rugosidade, foi realizada uma análise tridimensional da superfície, o que permitiu calcular o  $S_q$  da mesma. Os cálculos, neste caso, são feitos através de um programa apropriado que possibilita obter os dados necessários.

Após a caracterização inicial das amostras, foi dado início aos ensaios. Estes foram feitos num tribômetro PLINT TE67. Em cada ensaio foi realizada a limpeza das amostras através de banho ultrassônico. E também foi feita a medição da perda de massa através de uma balança de analítica, Sartorius CP 225 D.



**Figura a2** – À esquerda está a balança analítica, Sartorius CP 225 D, utilizada para verificar a variação de massa das amostras. Ao centro está o equipamento de ultrassom utilizado para limpeza das amostras. À direita está o tribômetro PLINT TE67 utilizado para os ensaios na configuração pino contra disco sem lubrificação.

Por fim, utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV EVO 40XVP, Zeiss) e o microscópio estereoscópico (Zeiss), localizados no LCSM, para caracterizar a superfície pós-ensaio. Além destes, também foi usado o analisador tridimensional de superfície para caracterização das trilhas de desgaste dos discos, a fim de calcular o volume desgastado.



**Figura a3** – À esquerda está o microscópio eletrônico de varredura (MEV), utilizado para caracterização das superfícies dos pinos. À direita está o microscópio estereoscópico (Zeiss), também utilizado para caracterização da superfície das amostras.

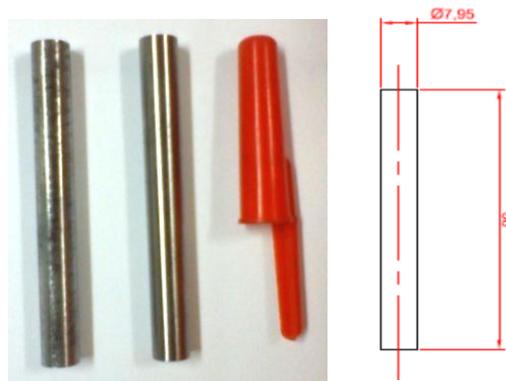
#### b. Amostras

As amostras utilizadas nos ensaios são de dois tipos de aços. Os discos são do mesmo material em todos os casos, aço AISI 1020, enquanto que os pinos variaram entre o aço AISI 1020 e aço AISI 4340. A dureza média e o valor de  $S_q$  inicial das amostras são apresentados na tabela abaixo:

**Tabela a1 – Características dos pinos e discos**

	Pinos		Discos
<b>Material</b>	AISI 1020	AISI 4340	AISI 1020
<b>Dureza</b>	218 ± 2 HV1	340 ± 4 HV1	142 ± 3 HV1
<b>Rugosidade RMS inicial (<math>S_q</math>)</b>	0,50 ± 0,22 $\mu\text{m}$	0,30 ± 0,04 $\mu\text{m}$	1,20 ± 0,20 $\mu\text{m}$

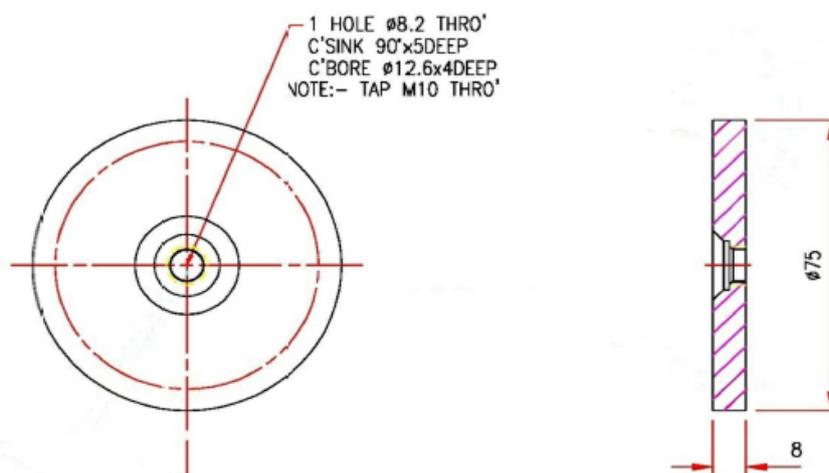
O disco possui 75 mm de diâmetro e 8 mm de espessura, enquanto que os pinos possuem 7,95 mm de diâmetro por 68 mm de comprimento. Todas as amostras foram retificadas antes dos ensaios.



**Figura a4** – Pinos utilizados para o ensaio. À esquerda está o pino de AISI 1020 e, à direita, o de AISI 4340. Ao lado é apresentado o desenho mecânico dos pinos utilizados.



**Figura a5** – Disco de AISI 1020 utilizado para o ensaio.



**Figura a6** – Desenho mecânico dos discos utilizados.

### c. Descrição do experimento

O experimento consiste no deslizamento de um pino sobre um disco, variando a carga aplicada sobre o primeiro.

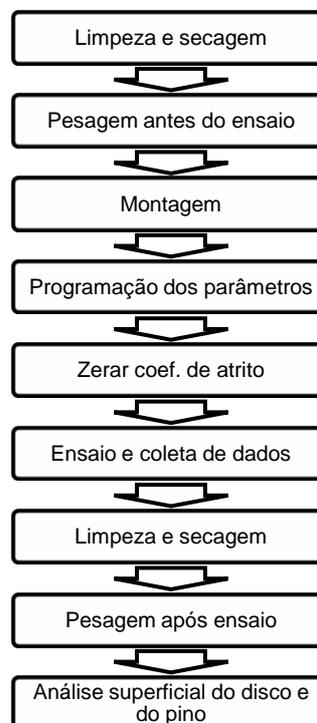
O pino é forçado contra o disco através de um sistema de peso morto, aplicado diretamente sobre o eixo central do pino, sendo que as cargas utilizadas foram 5,0 N, 9,9 N, 18,7 N, 36,4 N e 62,9 N.

A força de atrito foi monitorada através de uma célula de carga com limite de 200 N. Esses dados são captados e armazenados por um computador a cada segundo. O valor do coeficiente de atrito é calculado através da relação entre a força de atrito e a carga normal.

A velocidade de rotação do disco é mantida constante, num valor de 34 rpm e o pino é posicionado de forma que a trilha de desgaste tenha um raio médio de 28 mm. Com isso a velocidade tangencial do pino é de 0,1 m/s durante todo o ensaio, que dura um tempo de 1800 s.

### d. Procedimento

O procedimento dos ensaios pode ser descrito pelo fluxograma da abaixo:



**Figura a7** – Fluxograma do procedimento de ensaio utilizado.

A limpeza das peças foi feita através do uso de detergente neutro e, em seguida, elas foram colocadas no equipamento de ultrassom, com 5 minutos em álcool e mais

5 minutos em acetona. Utilizando luvas para não contaminar as amostras, elas passaram por um processo de secagem com um secador comum, durante 15 segundos.

Após a limpeza e secagem, os pinos foram desmagnetizados e pesados em uma balança com precisão de cinco casas decimais. Para garantir um bom valor da massa, foram feitas cinco medidas e delas retirou-se a média e o desvio padrão.

Com isso, o ensaio foi realizado. Para tal, o pino e disco foram posicionados no tribômetro, assim como o peso morto. Depois do posicionamento das amostras e da massa se faz necessário uma correção manual da força de atrito. Esta é zerada por um controle analógico do próprio equipamento. Só então é feita a programação de tempo, velocidade e os outros parâmetros necessários para controle dos dados do ensaio e para o início do experimento.

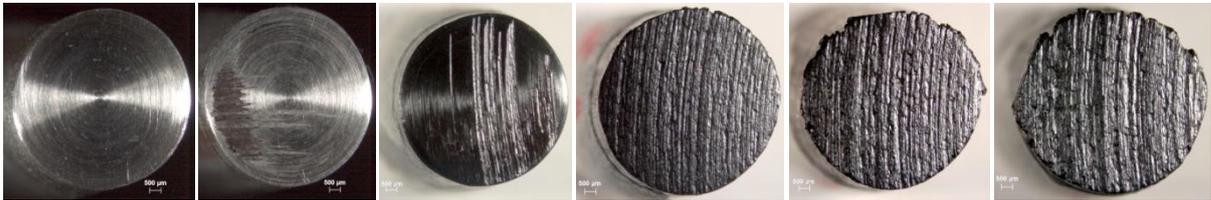
Ao final dos 30 minutos, as amostras passaram por um segundo processo de limpeza, que seguiu o mesmo procedimento do primeiro. Os pinos foram desmagnetizados novamente e foi realizada uma nova pesagem dos mesmos, a fim de medir a variação de massa e os discos foram submetidos a uma caracterização superficial, com o objetivo de calcular o volume de material removido.

Depois disso, com a finalidade de caracterizar a superfície dos pinos, estes foram levados ao microscópio estereoscópico e ao MEV.

## APÊNDICE B – IMAGENS PARA CARACTERIZAÇÃO SUPERFICIAL DOS PINOS

Fotos tiradas no microscópio estereoscópico para cada ensaio:

(a) Pino AISI 1020



Sem ensaio

5,0 N

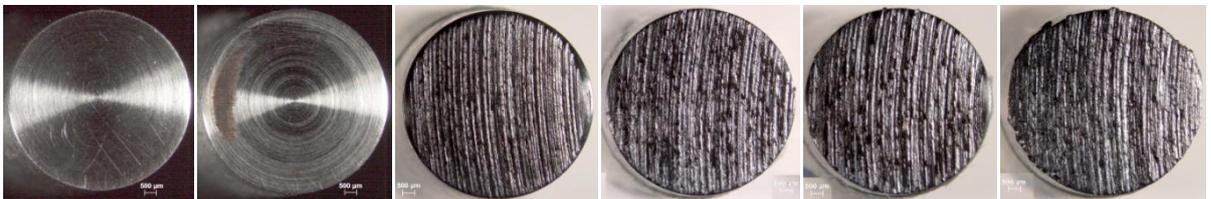
9,9 N

18,7 N

36,4 N

62,9 N

(b) Pino AISI 4340



Sem ensaio

5,0 N

9,9 N

18,7 N

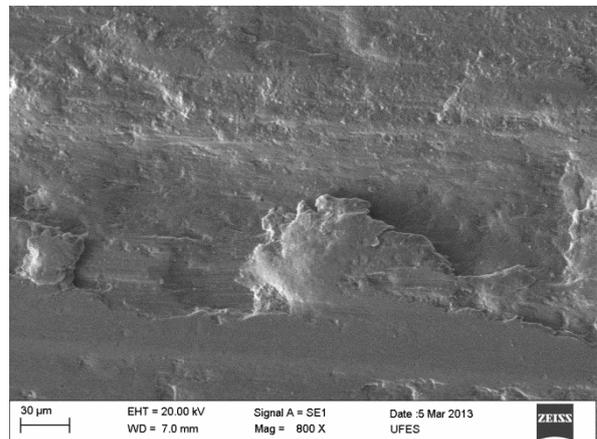
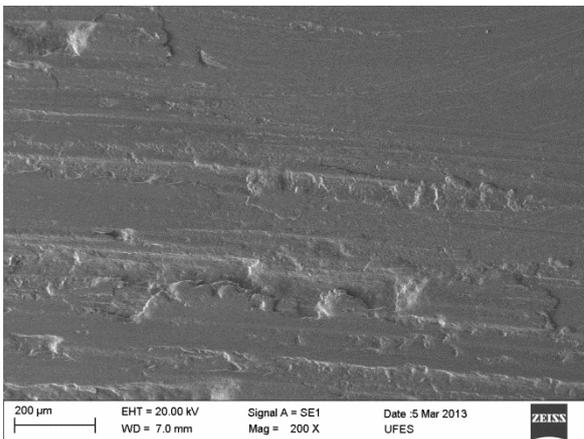
36,4 N

62,9 N

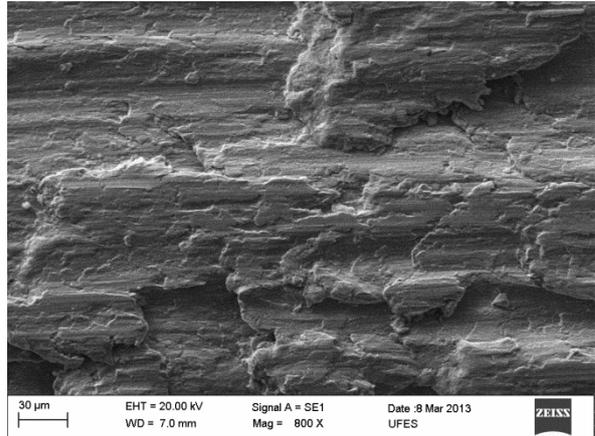
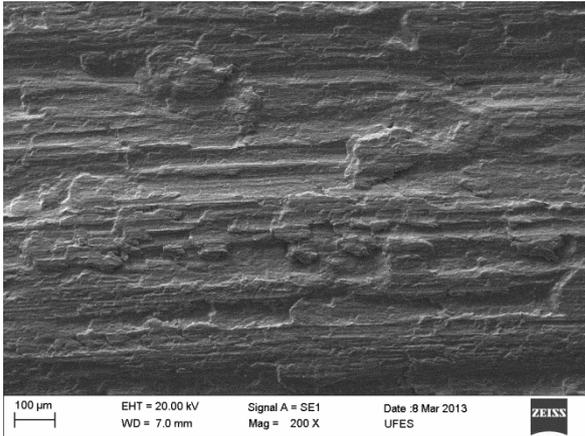
Abaixo estão as imagens obtidas em MEV:

(c) Pinos de AISI 1020

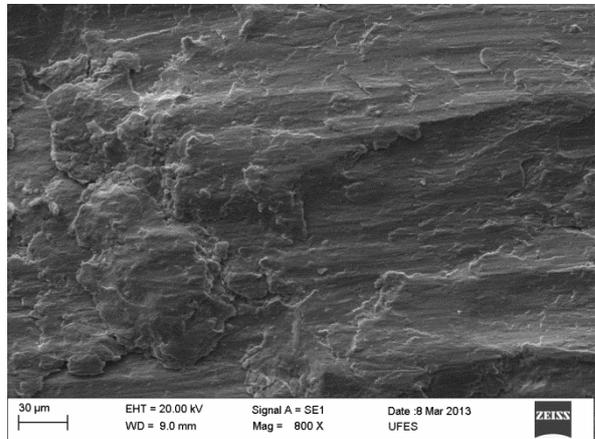
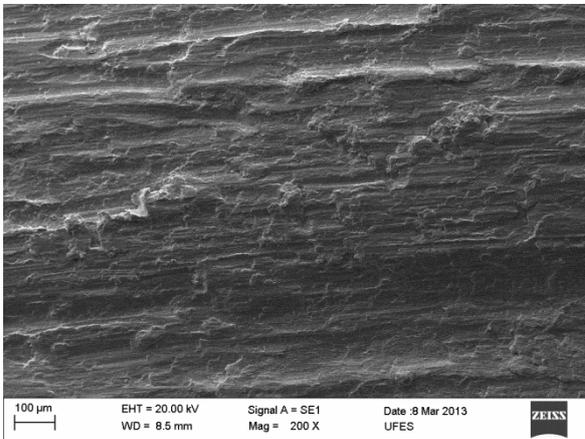
Carga: 9,9 N



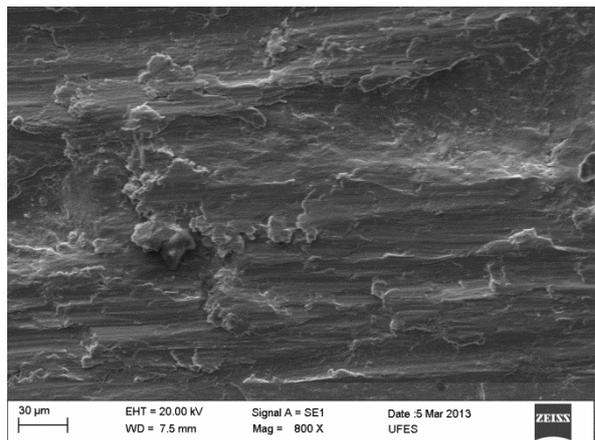
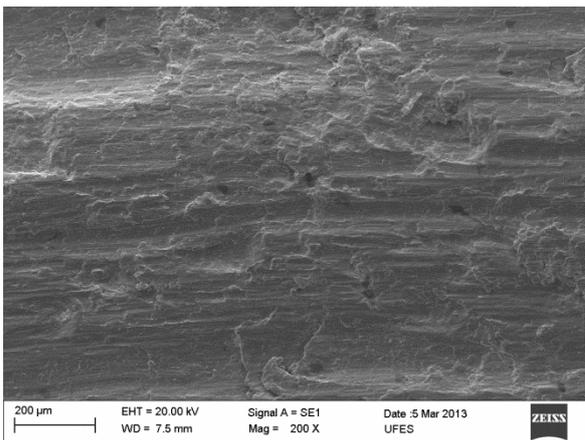
Carga: 18,7 N



Carga: 36,4 N

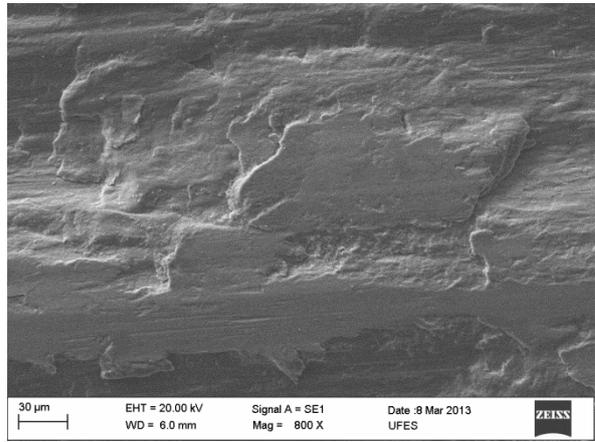
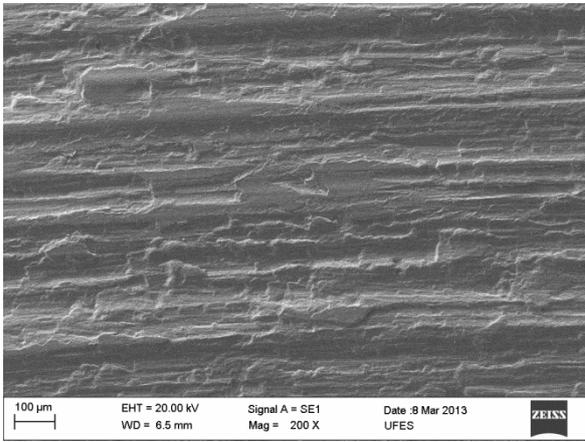


Carga: 62,9 N

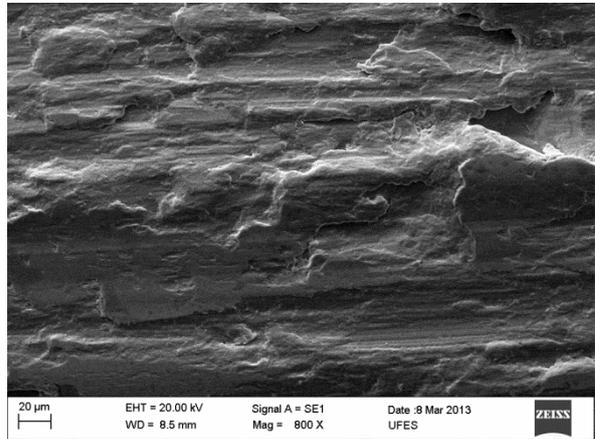
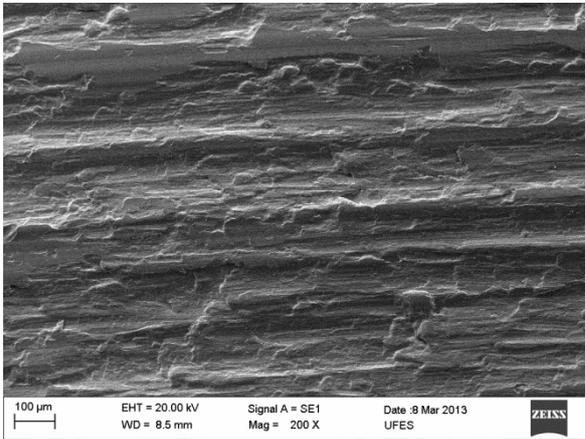


(d) Pinos de AISI 4340

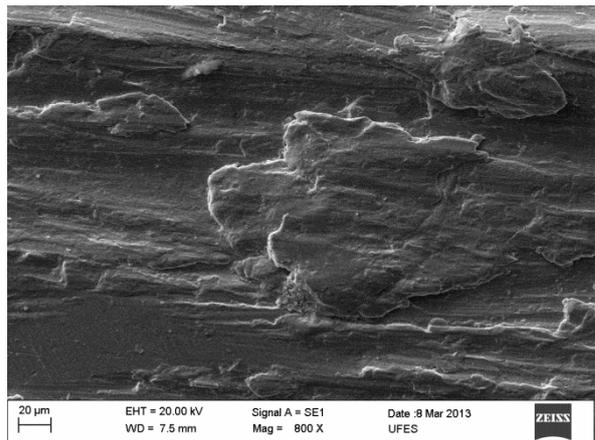
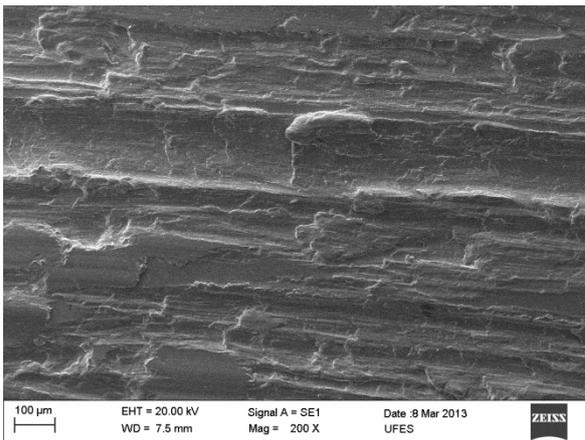
Carga: 9,9 N



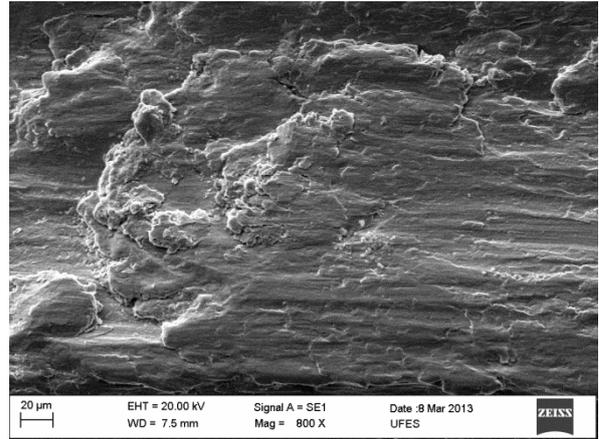
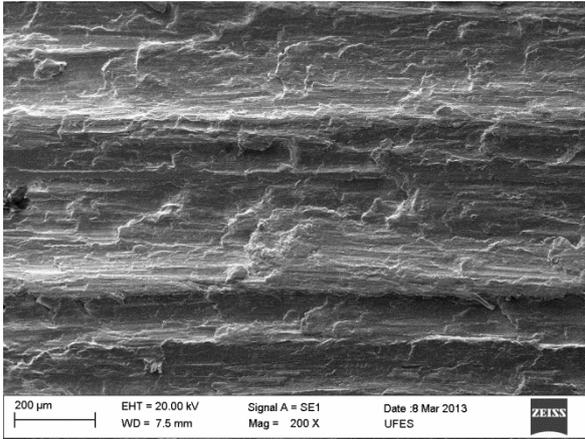
Carga: 18,7 N



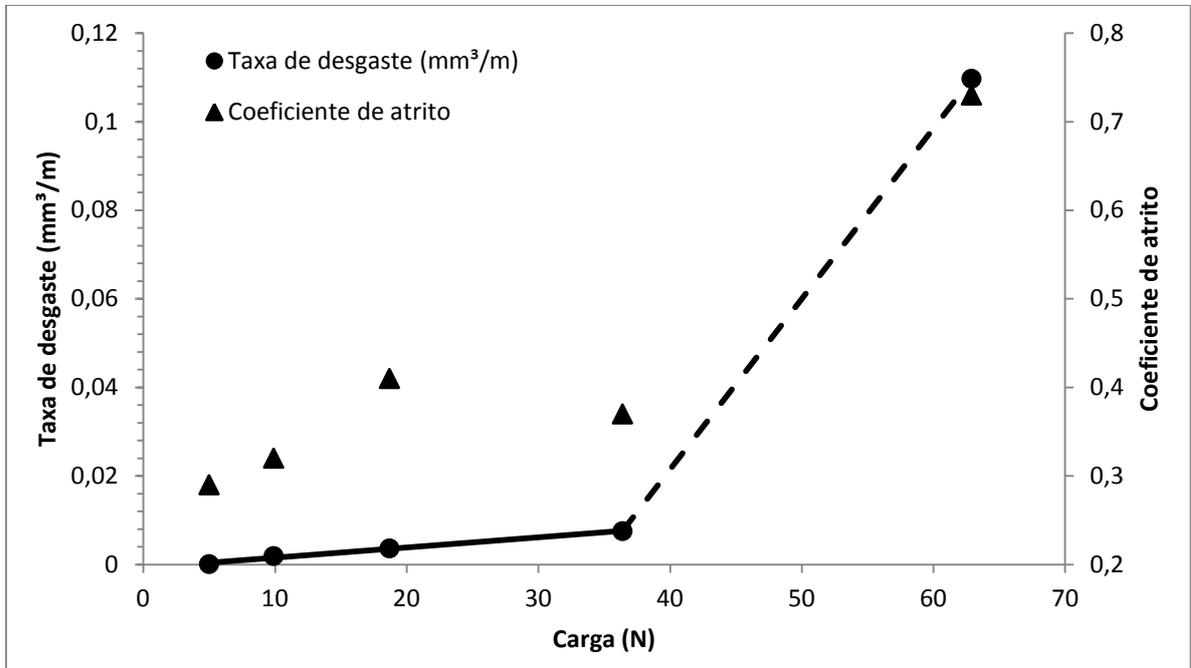
Carga: 36,4 N

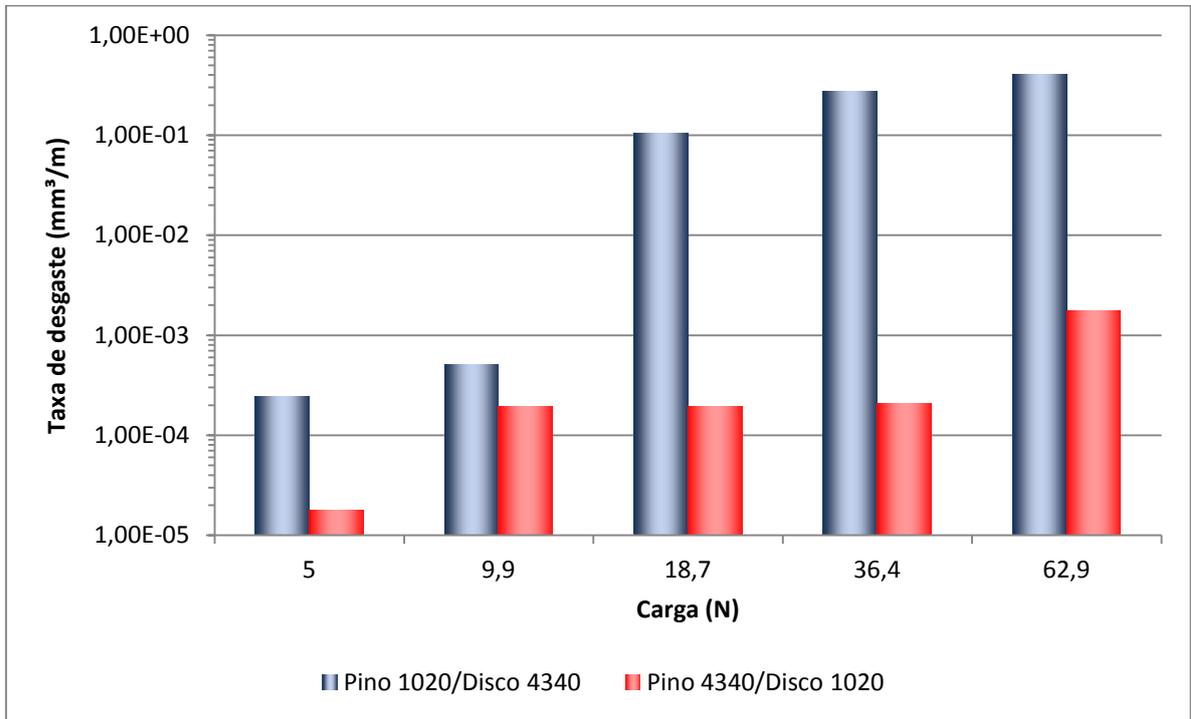


Carga: 62,9 N



**APÊNDICE C – GRÁFICO DE ATRITO E TAXA DE DESGASTE PARA O PAR TRIBOLÓGICO PINO AISI 4340 E DISCO AISI 1020.**



**APÉNDICE D – GRAFICO DE TAXAS DE DESGATES DOS PARES ESTUDADOS.**

**APÊNDICE E – GRAFICO DO COEFICIENTE DE DESGASTE DIMENSIONAL.**