

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DE DESGASTE DE FERRO FUNDIDO NODULAR GGG 60, AÇO LNE 380 E AÇO  
LNE 250 ATRAVÉS DE ENSAIOS DE PINO CONTRA DISCO

por

Guilherme Schirmann

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2016



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO DE DESGASTE DE FERRO FUNDIDO NODULAR GGG 60, AÇO LNE 380 E AÇO  
LNE 250 ATRAVÉS DE ENSAIOS DE PINO CONTRA DISCO

por

Guilherme Schirmann

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Comissão de Avaliação:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 24 de junho de 2016

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha família, por todo apoio e incentivo que recebi durante os anos de graduação.

À minha namorada *Dandara*, por toda paciência, palavras de incentivo, compreensão e carinho por mim.

Ao meu orientador *Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira*, que cumpriu com excelência o papel de orientador.

À toda equipe do LATRIB, pelo tempo dedicado para realização dos ensaios e ajuda na obtenção das micrografias, em especial ao *Kássio F. Gomes* e ao *Liu Y. de Barros*.

À equipe do LdSM, pela paciência e disponibilidade do equipamento para digitalização dos componentes.

À Suspensys pelo fornecimento do material, em especial ao *Rodrigo S. da Rosa*.

SCHIRMANN, G. **Estudo de desgaste de Ferro Fundido Nodular GGG 60, aço LNE 380 e aço LNE 250 através de Ensaios de Pino contra Disco**. 2016. 25 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## **RESUMO**

A seleção correta de materiais para componentes que são suscetíveis a desgaste é uma tarefa que exige estudo e entendimento, pois os mecanismos de desgaste mudam conforme a combinação de parâmetros e materiais. Este trabalho tem por objetivo comparar o desgaste de metais típicos utilizados pela indústria de suspensão de veículos pesados através de ensaios de pino sobre disco, seguindo a norma ASTM G-99. Os discos de aço LNE 380, aço LNE 250 e ferro fundido nodular GGG 60, este na condição normalizado e com têmpera superficial por indução, foram atritados contra pinos de aço mola SAE 5160 e Nitreto de Silício. Para ensaios com pinos de aço, o desgaste dos componentes foi medido através de Digitalização Tridimensional a Laser, já para ensaios com pino de Nitreto de Silício, o desgaste dos discos foi calculado através de relações geométricas fornecida pela norma. Os mecanismos de desgaste foram analisados através de microscopia ótica. O material que apresentou maior resistência ao desgaste foi o ferro fundido nodular com têmpera superficial, independente do material do pino.

**PALAVRAS-CHAVE:** Desgaste, Pino sobre disco, Nitreto de silício.

SCHIRMANN, G. **Wear study of Nodular Cast Iron GGG 60, LNE 380 steel and LNE 250 steel by pin-on-disc tests.** 2016. 25 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## **ABSTRACT**

The right choice of materials for components which are susceptible to wear is a task that requires study and understanding, because the wear mechanisms change according to the material and parameters combination. This study aims to compare the wear of the typical metals that are used by the suspension industry for heavy vehicles by pin-on-disc tests, following the ASTM G-99 Standard. The LNE 380 steel, LNE 250 steel and the nodular cast iron GGG 60, with normalizing and surface induction hardening treatments, were rubbed against SAE 5160 steel and silicon nitride pins. For the steel pins tests, the wear of both components were evaluated by three-dimensional Laser Scanning, and for the Silicon Nitride pins tests, the wear of the discs were calculated using geometric relationships provided by the Standard. The wear mechanisms were analyzed by optical microscopy. The greatest wear resistance was presented by the surface hardened nodular cast iron, for both pins materials.

**KEYWORDS:** Wear, Pin-on-disc, Silicon nitride.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS .....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
4. METODOLOGIA.....	5
4.1 Tribômetro.....	5
4.2 Discos .....	6
4.3 Pinos.....	6
4.4 Ensaios de pino sobre disco.....	6
4.5 Microscopia ótica .....	7
4.6 Medição do desgaste .....	7
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	9
5.1 Desgaste.....	9
5.2 Coeficiente de atrito .....	11
5.3 Micrografias dos ensaios com pino de aço mola .....	13
5.4 Micrografias dos ensaios com esfera de Nitreto de Silício.....	14
6. CONCLUSÕES.....	14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
ANEXO A – INCERTEZAS DE MEDIÇÕES DO TRIBÔMETRO .....	16
APÊNDICE A – GRÁFICOS DE FORÇA, TORQUE E COEFICIENTE DE ATRITO.....	17

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Blau, 1995, desgaste é a perda progressiva de material devido ao movimento relativo entre superfícies em contato. Segundo Oliveira e Silva, 2015, o desgaste de componentes e equipamentos é uma das perdas operacionais e financeiras que mais gera preocupação nas indústrias em todo o mundo. Os autores ainda estimam que entre 1% (17 bilhões de reais) e 6% (104 bilhões de reais) do produto interno bruto do Brasil seja perdido indiretamente em função de desgaste de componentes, dados de 2004. Este estudo chama a atenção para a importância de se estudar e entender o desgaste, a fim de se reduzir perdas relacionadas.

Um exemplo de componente que sofre desgaste é o suporte de mola, peça que compõe sistemas de suspensão para veículos pesados. A Figura 1.1(a) mostra o desenho de uma suspensão mecânica de eixo rígido, identificando seus principais componentes. O desgaste no suporte de mola ocorre devido ao contato deste com as extremidades externas das molas. O feixe de mola tem a forma de um arco de circunferência, e quando é carregado verticalmente o raio desse arco cresce, aumentando o seu comprimento longitudinal. Isso faz com que a mola deslize sobre o suporte causando desgaste onde é apoiada, indicado pela seta na Figura 1.1(b).

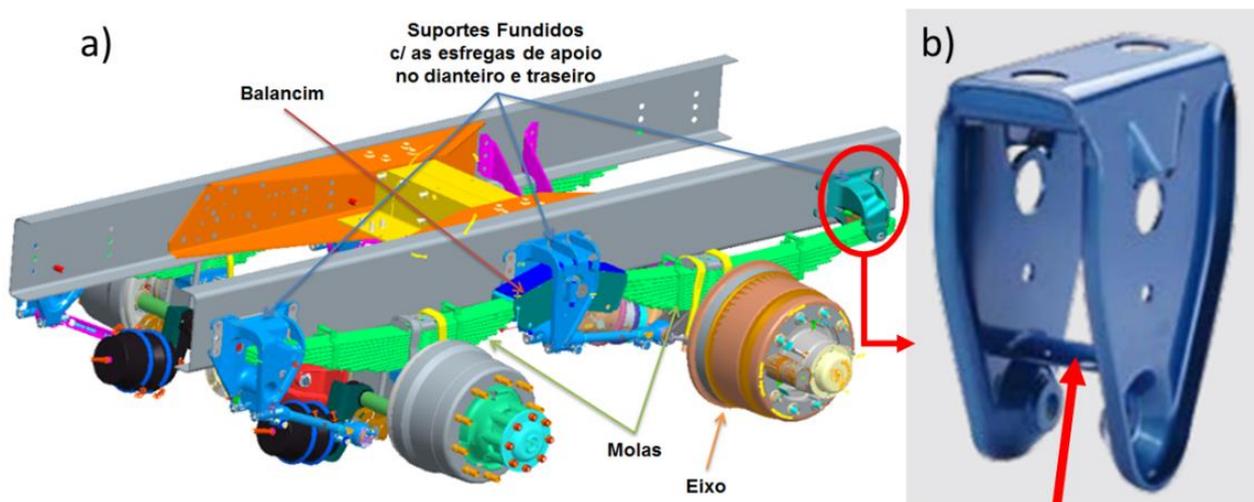


Figura 1.1 – (a) suspensão mecânica de eixo rígido e seus componentes e (b) detalhe para o suporte traseiro com a chapa de fricção.

O presente trabalho avalia, através de ensaios de pino sobre disco, o desgaste de alguns materiais utilizados nos suportes de mola, representados pelos discos, quando atritados contra as molas, representadas pelos pinos.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho consiste em comparar o desgaste de discos de ferro fundido nodular GGG 60 e dois aços, LNE 380 e LNE 250 quando atritados contra pinos de aço mola SAE 5160 e nitreto de silício.

Objetivos específicos:

- Realização de um estudo através de ensaios de pino sobre disco em um tribômetro para frenagens;
- Utilização da técnica de Scanner Laser Tridimensional para medir o desgaste dos discos e pinos de aço ensaiados;
- Caracterização dos mecanismos de desgaste através de microscopia ótica.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A norma que rege ensaios de desgaste do tipo pino sobre disco é a ASTM G99 – 2004. O ensaio de pino sobre disco consiste em atritar um pino contra um disco em uma dada rotação e força. O ensaio é realizado por um determinado tempo, distância ou rotações completas do disco. A Figura 3.1 mostra um desenho esquemático da metodologia.

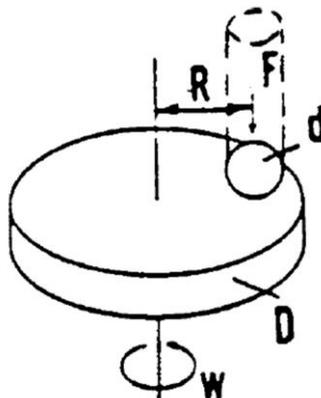


Figura 3.1 – Desenho esquemático de um ensaio de pino sobre disco (Fonte: ASTM G99-04)

A norma traz alguns requisitos e recomendações para os ensaios, além de como deve ser calculado o desgaste (apresentado na seção 4 do presente trabalho). Porém, outros trabalhos mostraram formas alternativas para se avaliar o desgaste. Neis et al., 2014, comparou diferentes métodos de medição de desgaste e concluiu que a utilização de Digitalização Tridimensional a Laser é adequado e útil para determinação de desgaste.

Segundo Both, 2011, tradicionalmente são aceitos quatro mecanismos de desgaste: adesivo; abrasivo; fadiga e erosivo.

- O desgaste adesivo se dá quando ocorre a transferência de material de uma superfície para outra, sob carga e movimento, causada por soldagem no estado sólido de um ponto. O surgimento e subsequente fratura do ponto ligado faz com que material de uma superfície fique aderido à outra de maneira temporária ou permanente. A severidade do desgaste adesivo é determinada pela presença ou ausência de óxidos. Se a remoção do filme de óxidos for equilibrada pela formação de novo filme, haverá uma baixa taxa de desgaste. Alta taxa de desgaste ocorre se as condições não permitirem a manutenção do filme de óxido.
- O desgaste abrasivo é provocado quando partículas duras são forçadas sobre uma superfície enquanto se movimentam. Frequentemente ocorre em materiais não metálicos. A taxa de desgaste depende da característica de cada superfície e da presença, ou não, de abrasivos entre os corpos. Caracteriza-se por apresentar ranhuras na direção do deslizamento;
- No desgaste por fadiga, esforços cíclicos provocam propagação de trincas subsuperficiais que podem ocasionar fratura e desprendimento de material;
- O desgaste erosivo ocorre devido ao impacto de partículas sólidas sobre a superfície. Sua ocorrência é esperada quando partículas duras contidas em um gás, líquido ou fluido incidem sobre um sólido com velocidade significativa (maior que 1 m/s).

Eyre et al, 1971, também classifica o desgaste como severo e suave. Desgaste suave (do inglês: *mild wear*) ocorre com a produção de uma camada de óxido em uma superfície endurecida. Desgaste severo (do inglês: *severe wear*), por sua vez, acontece quando o aquecimento da superfície é tal que ocorre redução da dureza do metal permitindo, dessa forma, deformação plástica da camada superficial do material. A Figura 3.2, adaptada de Eyre et al., 1971, mostra duas trilhas em um disco de aço com 3% de cromo atritado contra pinos do mesmo material, onde é possível perceber a presença de oxidação característica de desgaste suave na trilha superior e, na trilha inferior, ausência de óxido, característica de desgaste severo. Os ensaios foram realizados com velocidade de 1 m/s com diferentes forças normais aplicadas.

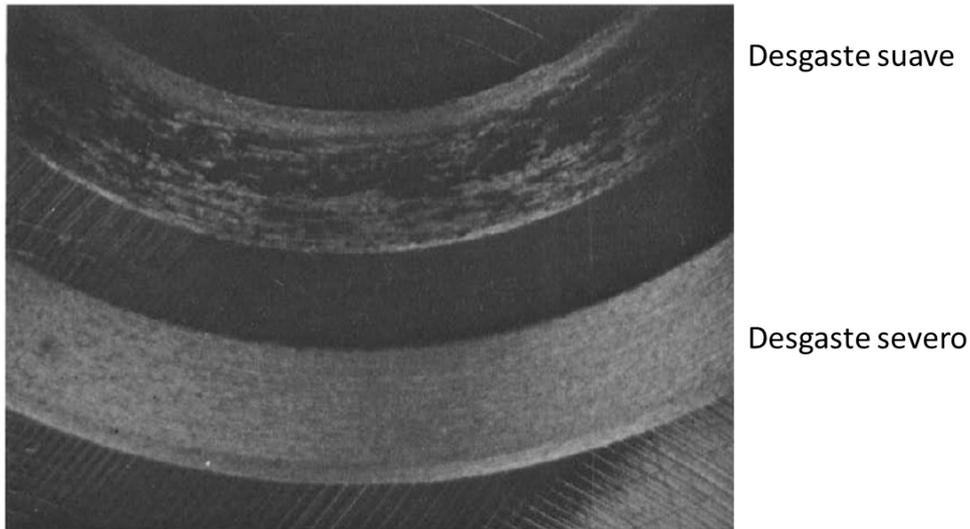


Figura 3.2 – Foto de um disco de aço com 3% de cromo mostrando o comportamento do desgaste para duas forças distintas. (adaptado de Eyre et al., 1971).

Segundo Eyre et al., 1971, incrementos de força ou de velocidade pode tornar o desgaste mais severo. Contudo, em algumas situações o aumento dos parâmetros pode fazer com que o desgaste se torne suave, devido à estabilização da formação de óxido entre as superfícies.

Takeuchi, 1971, realizou ensaios de desgaste de ferro fundido nodular contra aço SAE 1055 temperado e mostrou que este par de materiais apresentam desgaste adesivo. Em determinadas situações os apresentam regiões onde há arrancamento de material devido à soldagem, como mostrado na Figura 3.3.

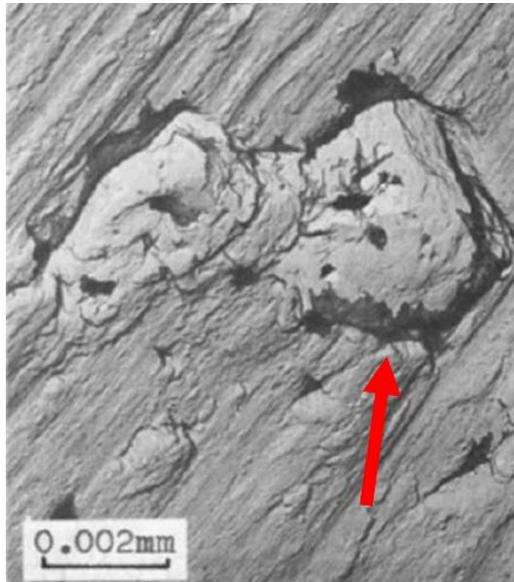


Figura 3.3 – Desgaste adesivo com arrancamento de material devido a solda (adaptado de Takeuchi, 1971).

Bergantin et al., 2003, realizou um trabalho comparando o desgaste de um par pino e disco de aço inoxidável austenítico (ASS) com o desgaste de um par de aço rápido (HSS). A Figura 3.4 mostra micrografias obtidas dos ensaios com velocidade de 0,81 m/s para os pinos de (a) aço inoxidável austenítico e (b) aço rápido. Os autores mencionam que o mecanismo predominante de desgaste para ASS foi desgaste adesivo, identificado pela deformação plástica. E para HSS, a presença de regiões escuras indicam oxidação. O desgaste para o HSS foi menor, comprovando que a presença de oxidação reduz a severidade do desgaste.

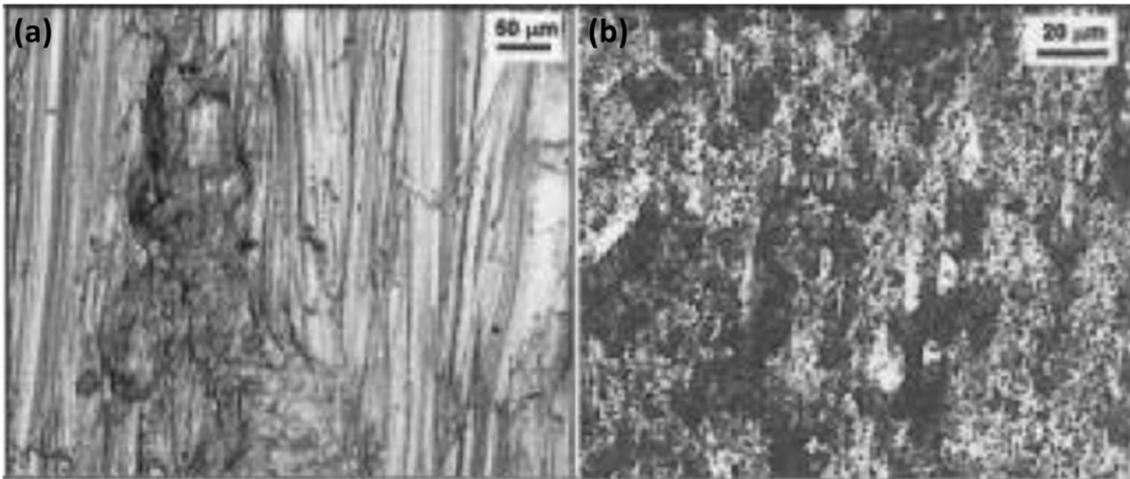


Figura 3.4 – Superfície desgastada de pino de (a) aço inoxidável austenítico e (b) aço rápido (adaptado de Bergantin et al., 2003).

Prasad, 2011, estudou a influência da velocidade, da força e da lubrificação sobre o desgaste volumétrico. O autor mostrou que incrementos de velocidade e de força aumentam o desgaste volumétrico, sendo que a força é mais significativa. A Figura 3.5 mostra o comportamento de um ferro fundido cinzento contra aço SAE 52100 em ensaio de pino contra disco, para diferentes parâmetros. Os autores concluíram que, para uma mesma força aplicada, na condição não lubrificado (linha tracejada), a variação da velocidade (marcador triângulo ou círculo) tem pouca influência no desgaste volumétrico, dentro dos limites e condições dos testes realizados.

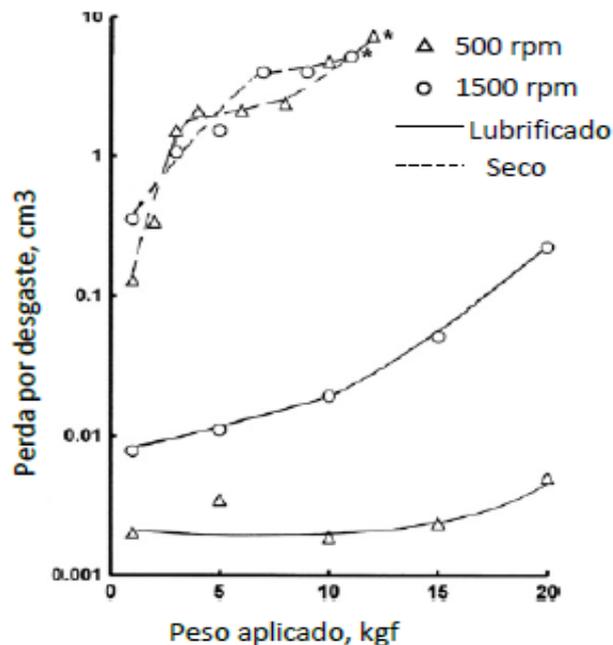


Figura 3.5 – Perdas por desgaste pela força normal aplicada no ensaio (adaptado de Prasad, 2011).

Ferrer et al., 2009, realizaram ensaios de pino sobre disco para avaliar desgaste de materiais utilizados em freios de trem. O estudo avaliou o comportamento de pinos de ferro fundido cinzento e uma liga sinterizada com Fe-Cu-Cr-grafite contra discos de aço ligado, mais duro que os pinos. Entre outros resultados, os autores mostraram que o coeficiente de atrito diminui com o aumento da força ou velocidade, para ensaios com ferro fundido, como mostrado na Figura 3.6. Para a liga sinterizada, o coeficiente de atrito se comporta de forma semelhante com relação à força, porém, o aumento da velocidade ocasionou um aumento do coeficiente de atrito.

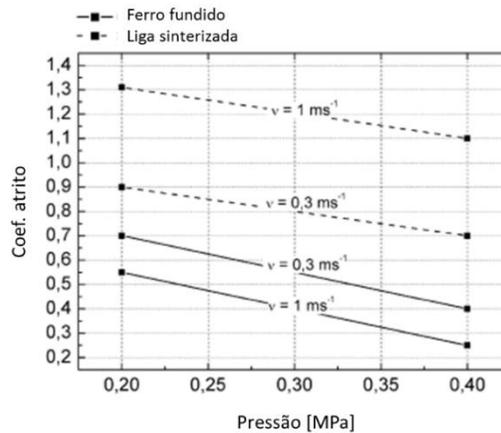


Figura 3.6 – Coeficiente de atrito em função da força (adaptado de Ferrer et al., 2009).

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Tribômetro

O tribômetro utilizado neste trabalho, Figura 4.1(a), teve seu funcionamento e construção detalhado por Neis, 2012. O equipamento foi desenvolvido para realização de testes de materiais utilizados em freios veiculares. Conforme o autor menciona, o projeto para este tipo de máquina é, em geral, mais robusto do que projetos de tribômetros comerciais. Estes, tipicamente, tem capacidade de força e velocidade restrita, não ultrapassando 100 N para a força. Por outro lado, o tribômetro em questão é capaz de aplicar uma força de até 4700 N e velocidade de rotação de até 2500 rpm.

O tribômetro é composto por três módulos responsáveis pela rotação, atuação e sustentação. O módulo de rotação se trata de um eixo, que liga o motor elétrico ao disco. Neste eixo está instalado um transdutor de torque, responsável por medir o torque durante ensaios. O módulo de atuação é composto por um atuador pneumático acoplado ao suporte do pino. Há, neste módulo, uma célula de carga, a qual fornece os dados da força normal aplicada durante os ensaios. A Figura 4.1(b) mostra um desenho esquemático do tribômetro.

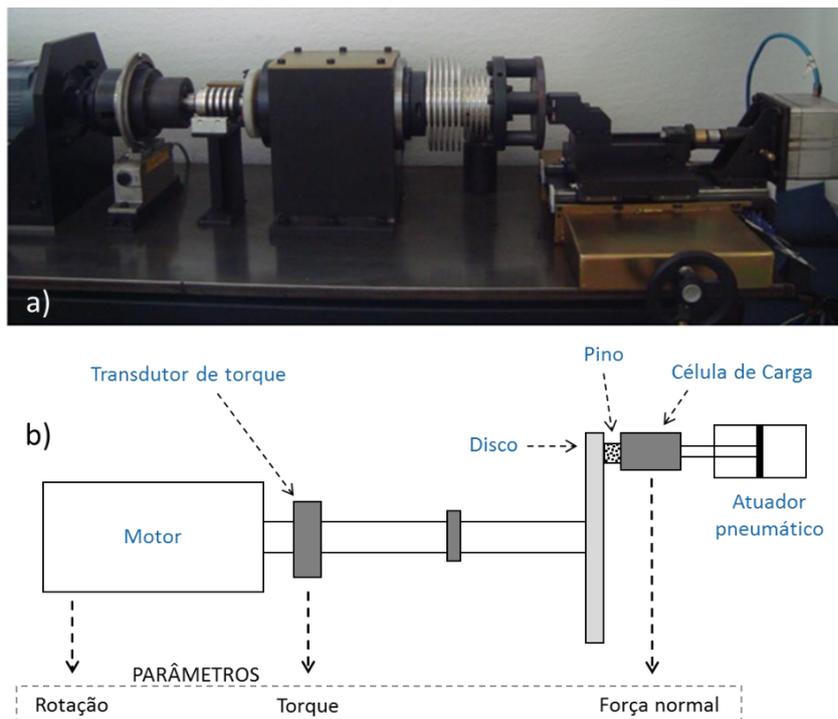


Figura 4.1 – Tribômetro: (a) real e (b) esquemático (Adaptado de Neis et al., 2014).

O sistema de aquisição de dados é capaz de armazenar dados dos ensaios para os parâmetros de força, rotação, torque e temperatura do disco, este último parâmetro não medido neste trabalho. Os dados podem ser extraídos e manipulados através de um algoritmo em MATLAB® (MathWorks). Este algoritmo utiliza da equação 4.1 para calcular o coeficiente de atrito. As incertezas de medição dos parâmetros do tribômetro estão no ANEXO A.

$$\mu = \frac{T}{F \cdot r} \quad (4.1)$$

Onde  $\mu$  é o coeficiente de atrito (adimensional), T é o torque medido pelo transdutor de torque (Nm), F é a força normal medida pela célula de carga (N) e r é o raio efetivo de aplicação da força (m).

## 4.2 Discos

Quatro discos com diferentes combinações de materiais e tratamentos térmicos foram usinados com 159 mm de diâmetro e 12 mm de espessura. A combinação de material e tratamento térmico está apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Característica dos discos.

Disco	Material	Tratamento térmico	Dureza [HB]
1	Ferro fundido GGG 60	Têmpera superficial	285
2	Ferro fundido GGG 60	Normalização	258
3	Aço LNE 380	Sem tratamento	186
4	Aço LNE 250	Sem tratamento	184

## 4.3 Pinos

Foram fabricados seis pinos de aço SAE 5160, com forma semiesférica de 10 mm de diâmetro sobre uma base para fixação no tribômetro, como mostrado na Figura 4.2(a). Os pinos de aço não possuem forma de uma semiesfera perfeita, apresentando achatamento da superfície. Os pinos foram marcados com punção para posterior identificação, conforme indicado pela seta em (a). A dureza dos pinos de aço é de 400 HB (corresponde a 43 HRc). Além do aço, uma esfera de Nitreto de Silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), com diâmetro de 15,87 mm e dureza de 85 HRc, também foi usada. Para fixação da esfera foi utilizado um suporte, mostrado na Figura 4.2(b) na condição desmontado e (c) com a esfera fixada.



Figura 4.2 – (a) Pino de aço mola; (b) suporte para a esfera de nitreto de silício: desmontado e (c) montado.

## 4.4 Ensaio de pino sobre disco

Os ensaios seguiram a norma ASTM G99-04 de pino sobre disco. Com o objetivo de se obter uma rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) menor do que  $0,8 \mu\text{m}$ , requisito da norma, os discos foram lixados utilizando 6 lixas na seguinte ordem de granulometria: 240, 300, 400, 500, 600 e 1500. Todos os discos apresentaram rugosidade ( $R_a$ ) menor do que  $0,65 \mu\text{m}$  antes dos ensaios, estas medidas foram realizadas na direção radial, na região onde o contato com o pino ocorreu.

Os ensaios seguiram os parâmetros e ordem apresentados na Tabela 4.2. Inicialmente os ensaios foram realizados utilizando uma força normal de 600 N, parâmetro utilizado em trabalhos de frenagens realizados no tribômetro em questão [Barros, 2015; Castel 2015]. Contudo, observou-se no ensaio 2 um desgaste excessivo no pino, fazendo com que o parâmetro de força fosse reavaliado. A força para os demais ensaios passou a ser de 100 N.

Os ensaios 1 a 6 utilizaram os pinos de aço mola SAE 5160, e os ensaios 7 a 10 nitreto de silício. A velocidade, distância e duração foi a mesma para todos os materiais, 1 m/s, 750 m e 12,5 minutos, respectivamente. Para manter a velocidade constante, a rotação do motor foi ajustada levando em conta o raio efetivo de contato.

Tabela 4.2 – Parâmetros dos ensaios.

Ensaio	Pino	Disco	Raio [mm]	Carga [N]	Velocidade [m/s]	Distância [m]	Tempo [min]
1	SAE 5160	GGG 60 temp	55	600	1	750	12,5
2		LNE 380	55				
3		GGG 60 temp	43	100			
4		GGG 60 norm	35				
5		LNE 380	35				
6		LNE 250	35				
7	Nitreto de Silício	GGG 60 temp	27				
8		GGG 60 norm	34				
9		LNE 380	35				
10		LNE 250	31				

#### 4.5 Microscopia ótica

As trilhas dos discos e os pinos foram micrografados utilizando aumentos de 50x, 100x e 200x. Foi utilizado um microscópio ótico da marca Zeiss, modelo Axio Lab.A1. Pelo fato da superfície em questão não ser um plano, algumas imagens foram montadas através de uma série de micrografias, com distâncias focais distintas, com a finalidade de melhorar a nitidez. Para fazer as montagens utilizou-se o software Adobe Photoshop. As micrografias foram utilizadas na avaliação dos mecanismos de desgaste.

#### 4.6 Medição do desgaste

Para calcular o volume de material perdido por desgaste, a norma ASTM G99-04 fornece as equações 4.2 e 4.3, para desgaste do disco e do pino, respectivamente. A equação 4.2 é válida desde que o desgaste do disco seja muito superior ao do pino. Por outro lado, para se usar a equação 4.3, o desgaste do pino deve ser muito superior ao do disco.

Os ensaios realizados com nitreto de silício apresentaram desgaste mais significativo nos discos, por isso utilizou-se a equação 4.2 para determinar o volume perdido de material.

$$V_{disco} = \frac{\pi \cdot R \cdot w_{disco}^3}{3 \cdot d} \quad (4.2)$$

$$V_{pino} = \frac{\pi \cdot w_{pino}^4}{32 \cdot d} \quad (4.3)$$

Onde,  $V$  é o volume de material perdido por atrito em  $\text{mm}^3$ ,  $R$  é o raio da pista em mm,  $w_{disco}$  é a largura medida da pista no disco em mm,  $d$  é o diâmetro do pino em mm,  $w_{pino}$  é o diâmetro da marca deixada no pino em mm.

A incerteza da equação 4.2 é de 1% se a largura da pista dividida pelo raio da esfera for menor que 0,3, para razões maiores que esta e menores que 0,8 a incerteza é de 5%. Já a

incerteza para a equação 4.3 é de 1% se a razão entre diâmetro da marca deixada na esfera e o raio da esfera for menor que 0,3 e 5% se esta for menor do que 0,7.

A norma ainda define que caso haja desgaste significativo em ambos os componentes do ensaio, a profundidade do desgaste deve ser medida. Este caso se aplica para os ensaios realizados com pinos de aço mola.

#### 4.6.1 Digitalização Tridimensional a Laser

Para medir a geometria dos pinos de aço e discos utilizou-se do processo de Digitalização Tridimensional a Laser. O método consiste de um cabeçote emissor de Laser associado a uma fresadora CNC. O scanner 3D se movimenta no plano xy através do sistema CNC, enquanto o cabeçote Laser mede a altura em z. O equipamento é fabricado pela Tecnodrill, modelo Digimill 3D. O cabeçote acoplado ao equipamento é da marca Optimet, modelo Conoprobe 1000. A digitalização gera uma nuvem de pontos com uma cota para cada combinação de x e y em arquivo de texto. Silva, 2011, detalha o funcionamento do scanner em questão.

A geometria dos pinos de aço foi medida, antes e após os ensaios, utilizando a técnica de Digitalização Tridimensional a Laser.

Os dados obtidos da digitalização foram analisados através do software Geomagic Wrap® 2015, o qual permite obter uma superfície a partir da nuvem de pontos, transformar a superfície em um sólido e, então fornecer o volume deste sólido. A nuvem de pontos para os pinos na condição original e desgastado foram alinhados através dos pontos puncionados, então cortados por um plano paralelo ao horizontal, de forma a manter somente a parte de interesse para o cálculo do volume dos pinos antes (a) e depois (b) do ensaio, mostrado na Figura 4.3.

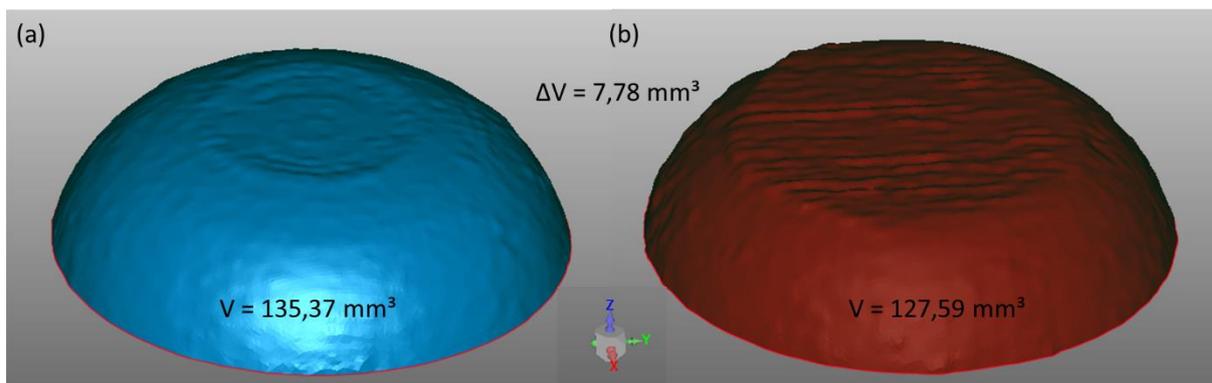


Figura 4.3 – Ilustração de pinos de aço mola obtidos do processo de digitalização (a) antes e (b) depois dos ensaios.

Os quatro discos também foram digitalizados após os ensaios: foram feitas digitalizações na direção radial, do centro para a borda, com o objetivo de medir o perfil trilhas geradas pelo desgaste. Foi obtido com isso a geometria de um corte de cada disco, perpendicular à superfície na direção radial.

O primeiro passo para calcular o volume de material perdido nas trilhas foi fazer a superfície do disco coincidir com o plano horizontal. Para isso, calculou-se a média na coordenada z dos pontos próximos as bordas da trilha e se subtraiu esse valor de todos os valores de z.

Então para se obter o volume perdido por desgaste das trilhas calculou-se a área de diversos trapézios, como na Figura 4.4 em amarelo. Integrando-se a área destes trapézios em  $\theta$ , de 0 a  $2\pi$ , obteve-se pequenos volumes que, somados um a um, resultam no desgaste total da trilha, como demonstrado pelas equações 4.4 a 4.7.

$$V = \sum_{r=r_{\text{início da trilha}}}^{r_{\text{fim da trilha}}} \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_{i+1}} (ar + b) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \quad (4.4)$$

Integrando (4.4) em relação a  $\theta$  e  $r$ , obtém-se (4.5):

$$V = \sum_{r=r_{\text{início da trilha}}}^{r_{\text{fim da trilha}}} \frac{\pi}{3} \cdot (2a \cdot (r_{i+1}^3 - r_i^3)) + (3b \cdot (r_{i+1}^2 - r_i^2)) \quad (4.5)$$

$$a = \frac{z_{i+1} - z_i}{r_{i+1} - r_i} \quad (4.6)$$

$$b = z_i - a \cdot r_i \quad (4.7)$$

Onde  $z$  é a profundidade [mm] do respectivo raio  $r$  [mm] da pista.

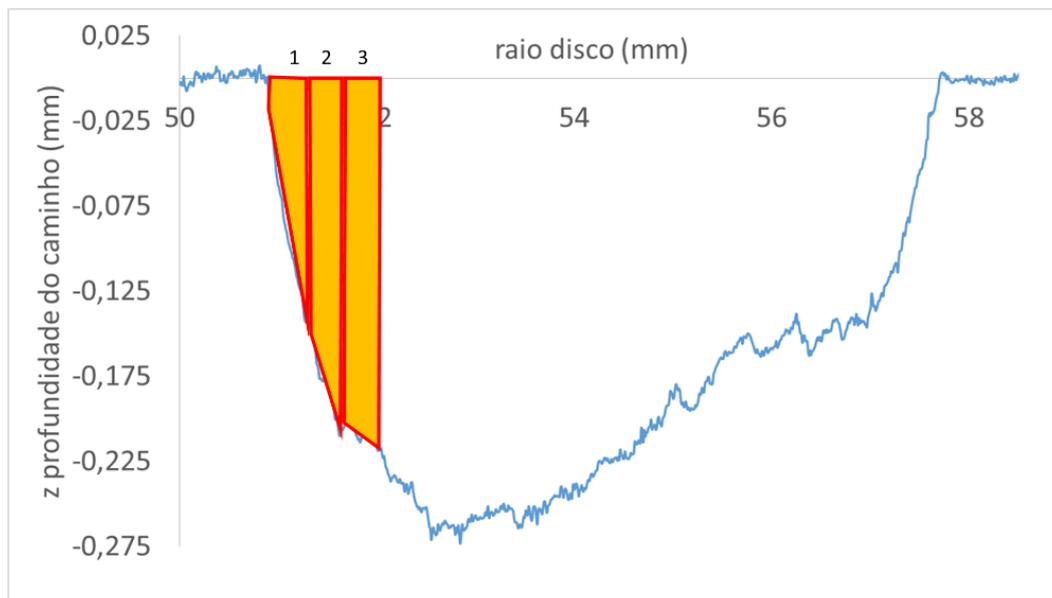


Figura 4.4 – Aproximação utilizada para calcular o volume perdido por desgaste nas trilhas dos discos.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Desgaste

O desgaste total obtido para os discos está apresentado na Figura 5.1, em  $\text{mm}^3$ . As barras azuis representam o desgaste para os discos atritados contra o pino de aço SAE 5160 e as barras laranja, os discos atritados contra nitreto de silício. A escala para o  $\text{Si}_3\text{N}_4$  foi ampliada para melhor demonstrar os resultados. A barra mais à esquerda, para o ferro fundido GGG60 temperado, foi o resultado obtido com força normal de 600 N. Os demais resultados referem-se a ensaios realizados com força normal de 100 N.

Para os ensaios com 100 N de força, o ferro fundido nodular temperado apresentou o menor desgaste, independente do material do pino. Por outro lado, o desgaste resultante no disco de ferro fundido normalizado foi o maior para o ensaio com pino de aço. Além disso, o aço LNE 250 apresentou um desgaste apenas 1,3 vezes maior do que o GGG 60 temperado, no ensaio com pino de aço mola.

Com a exceção do ferro fundido GGG 60 temperado, o desgaste dos discos, para os testes contra a esfera de nitreto de silício, apresentaram resultado muito próximos entre si. Dessa forma é possível afirmar que a fricção contra o pino de aço conseguiu distinguir melhor o desempenho dos materiais. Vale ainda salientar que o par da aplicação prática nos suportes se

dá com o aço mola ensaiado como pino, portanto, nessa condição, o resultado representa melhor o problema objeto deste trabalho.

Considerando a média de desgaste dos discos produzidos por cada pino (ensaios com força de 100 N) o pino de aço produziu um desgaste 10,5 vezes maior do que o nitreto de silício, sendo que a maior diferença foi observada no disco de ferro fundido normalizado (19,1x) e a menor foi produzida no aço LNE 250 (4,7x).

A elevação da força de 100 para 600 N (6x), resultou em um aumento de 4,8 vezes no desgaste, comprovando o estudo de Prasad, 2011, que mostrou que a força tem significativa importância no desgaste.

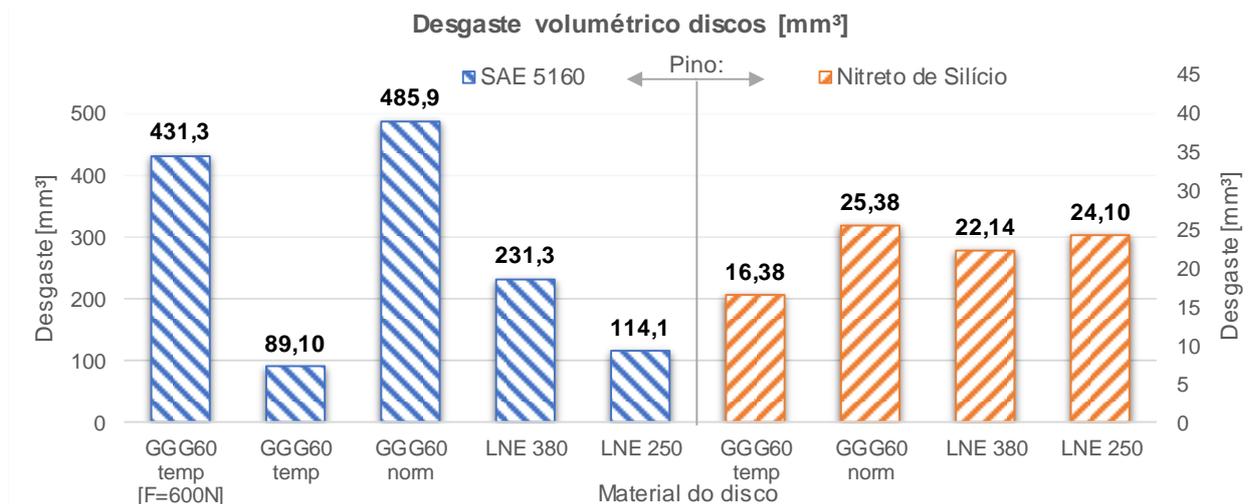


Figura 5.1 – Desgaste nos discos.

O desgaste resultante dos ensaios para os pinos de aço estão mostrados na Figura 5.2. Muito similar ao comportamento do desgaste no disco, o aumento da força de 100 para 600 N produziu um desgaste 4,6 vezes maior nos discos de GGG 60 temperado. Para os ensaios com 100 N, o material do disco que gerou menor desgaste do pino foi o GGG 60 temperado. Ou seja, o ferro fundido nodular com têmpera superficial foi o material menos desgastado e o que menos desgastou o pino, para os ensaios com pino de aço mola, o que indica ser o melhor material a ser utilizado nos suportes de mola.

O desgaste para os demais pinos foi distinto, sendo que aquele atritado contra o LNE 250 foi o que sofreu maior desgaste, 3 vezes superior ao GGG 60 temperado. Por tanto, considerando o par da aplicação prática, o uso do LNE 250 nos suportes, pode ocasionar desgaste prematuro das molas.

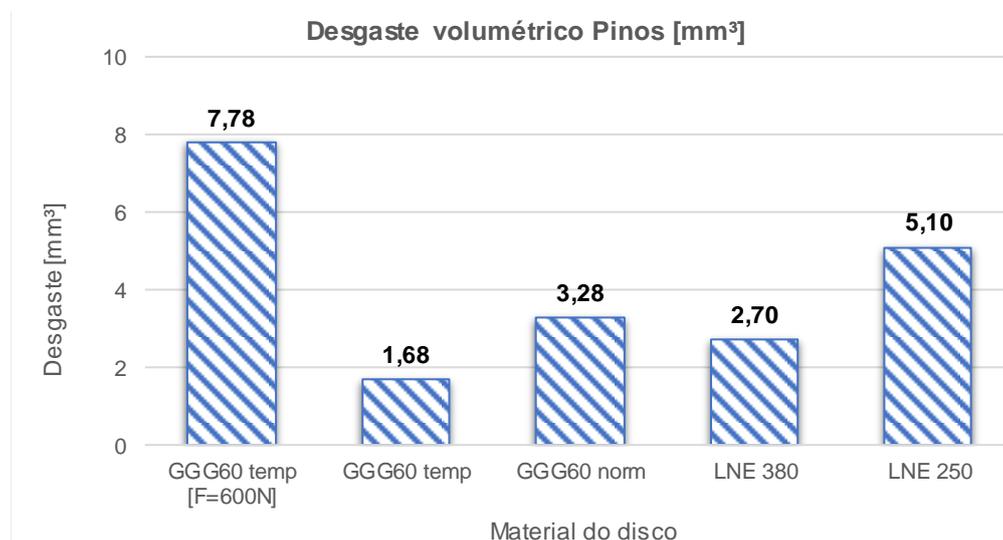


Figura 5.2 – Desgaste nos pinos de aço SAE 5160.

## 5.2 Coeficiente de atrito

A Figura 5.3 apresenta o coeficiente de atrito médio obtido para os ensaios, barras azuis representam os ensaios contra o pino de aço e laranja contra nitreto de silício. O coeficiente foi considerado como a média obtida a partir de 100 metros de ensaio, após o assentamento do pino sobre o disco. A barra de erro representa o desvio padrão do coeficiente e foi proporcional à vibração percebida durante os ensaios.

O menor coeficiente de atrito, para ambos os pinos, foi encontrado para o disco de ferro fundido GGG 60 temperado, independente da força aplicada. Além disso, para o mesmo disco, observou-se que, com o aumento da força, houve uma diminuição do coeficiente de atrito, reproduzindo o que havia sido mostrado por Ferrer et al., 2009. A classificação entre os materiais ensaiados mantém a mesma ordem independente do material do pino, sendo que o coeficiente para pinos de aço mola ficaram em torno de 1,5 vezes superiores.

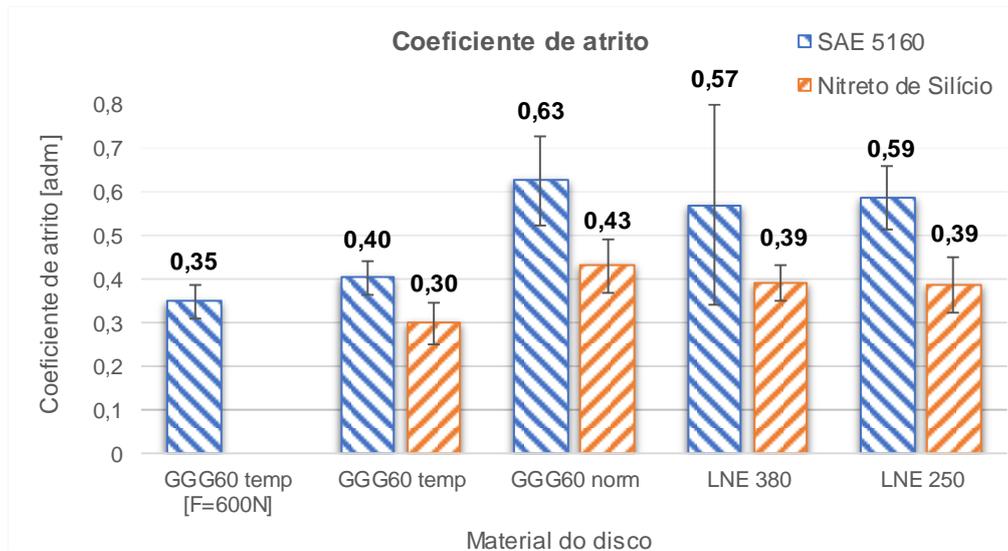


Figura 5.3 – Coeficiente de atrito médio para os ensaios.

A seguir são apresentados os coeficientes de atrito medidos durante os ensaios. O gráfico para o ensaio realizado com força de 600 N e pino de aço SAE 5160 contra disco de ferro fundido GGG 60 temperado está apresentado na Figura 5.4. É possível perceber, que entre 450 e 470, e entre 620 e 640 metros de distância houve uma redução no nível de variação do coeficiente de atrito, o que está associado à redução da vibração. Este fato também foi percebido pelo operador do tribômetro pela diminuição significativa do ruído.

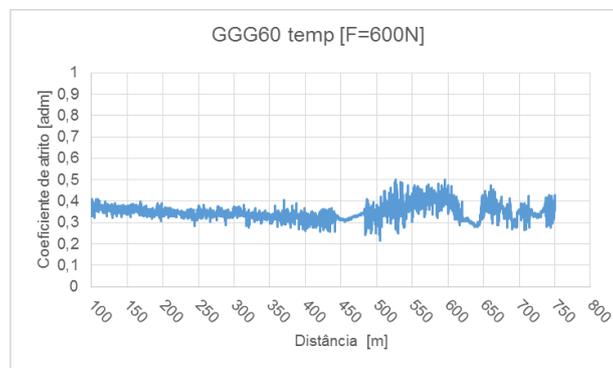


Figura 5.4 - Coeficiente de atrito pela distância para GGG 60 temperado contra pino de aço mola [F=600N].

A Figura 5.5 mostra os gráficos para cada disco, obtidos para os ensaios com pino de aço mola em função da distância. Os primeiros 100 metros não foram mostrados por se tratarem

do período de assentamento. É possível identificar que o disco de GGG 60 temperado foi o que apresentou significativamente menor nível de variação do coeficiente de atrito devido à vibração, também percebido pelo operador através do ruído.

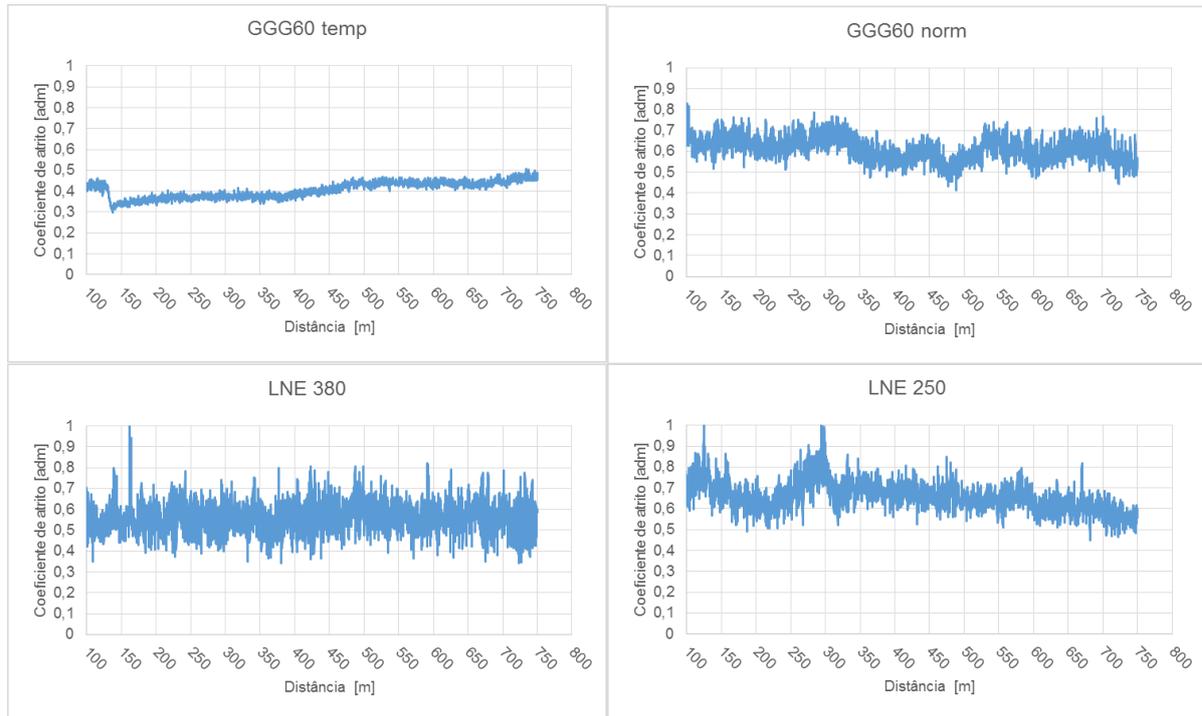


Figura 5.5 – Coeficiente de atrito pela distância para ensaios com pino de aço mola [F=100N].

Os gráficos para o atrito pela distância dos ensaios com nitreto de silício para todos os discos estão apresentados na Figura 5.6. A região circulada no gráfico do disco de GGG 60 normalizado foi resultado de uma perda de sinal no transdutor de torque. Essa região foi desconsiderada para calcular a média e o desvio padrão, mostrados na Figura 5.3. Gráficos para força, torque e coeficiente de atrito de todos os ensaios estão no APÊNDICE A.

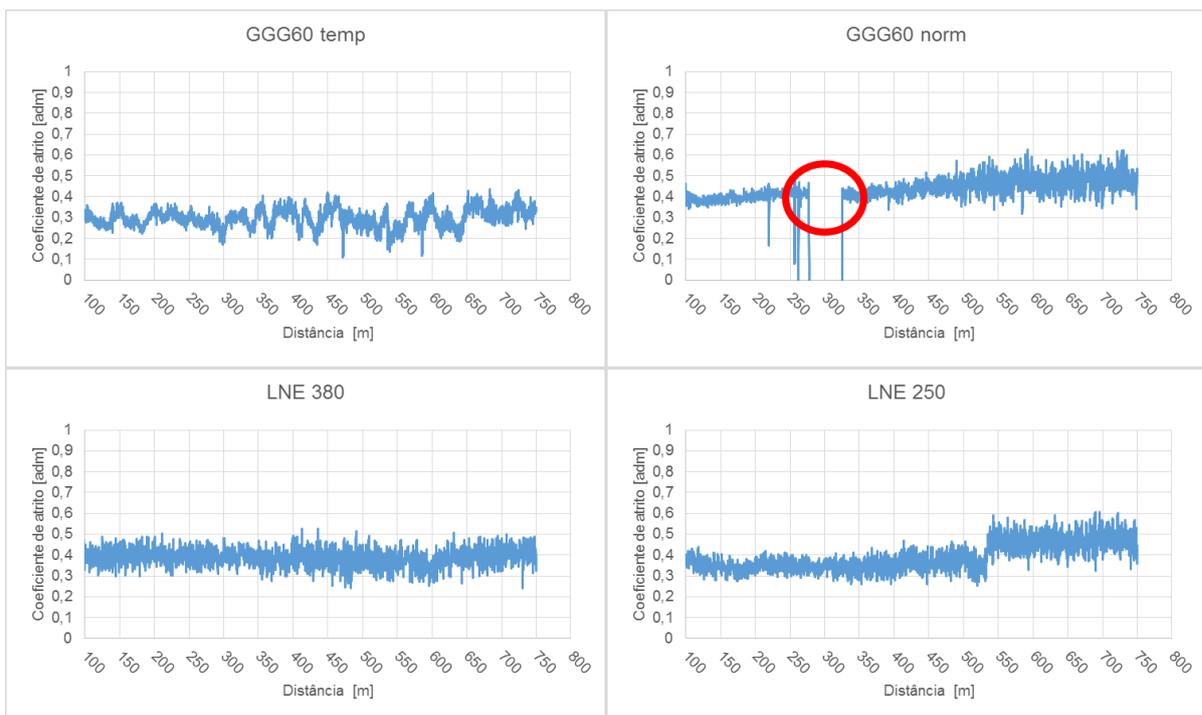


Figura 5.6 - Coeficiente de atrito pela distância para ensaios com de nitreto de silício [F=100N]

### 5.3 Micrografias dos ensaios com pino de aço mola

A Figura 5.7 apresenta micrografias do centro das trilhas dos discos atritados contra pino de aço mola. Em todas é possível perceber desgaste adesivo como principal mecanismo, caracterizado pela deformação plástica presente. Para o caso (a), onde a força normal foi de 600 N, se percebe deformação plástica mais intensa, além de pontos com material aderido, indicado pela seta. O incremento da força pode ter ocasionado um aumento da temperatura no contato, o que agravou a deformação plástica. No entanto, a temperatura não foi suficientemente alta para estabilizar a formação de camada de óxido e abrandar o desgaste.

O desgaste dos discos de aço, mostrados na Figura 5.7 (d) LNE 380 e (e) LNE 250, apresentam regiões onde houve arrancamento de material (fato não observado nos discos de ferro fundido), indicadas pelas setas.

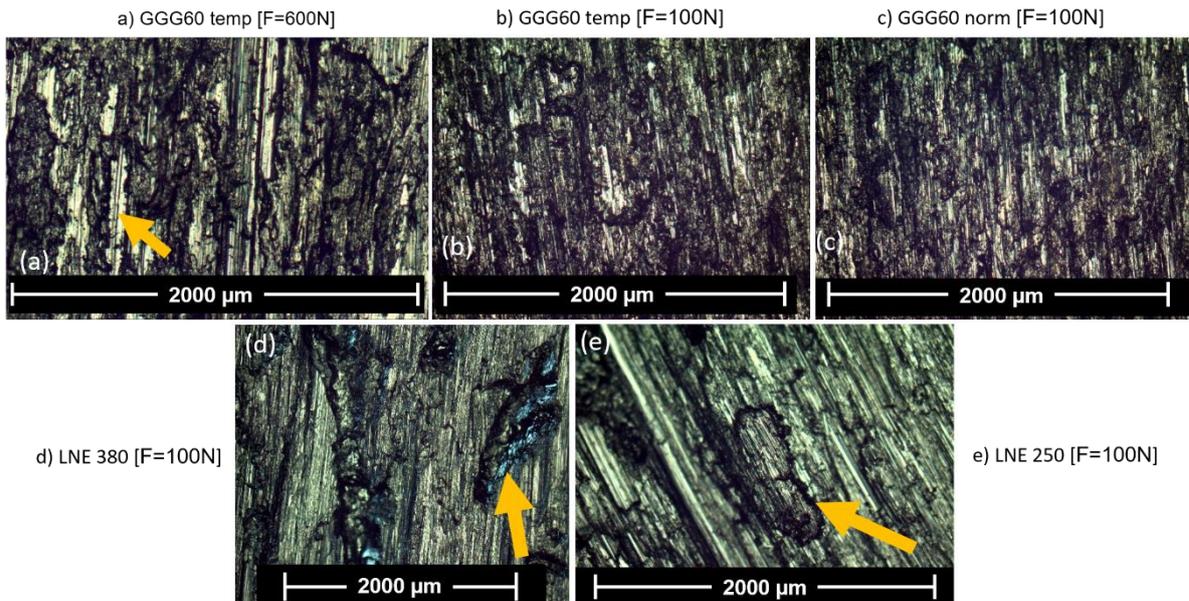


Figura 5.7 – Trilha do disco de: (a) GGG60 temperado [F=600 N]; (b) GGG60 temperado; (c) GGG60 normalizado; (d) LNE 380; (e) LNE 250.

A Figura 5.8 mostra as micrografias obtidas dos pinos de aço mola para cada ensaio.

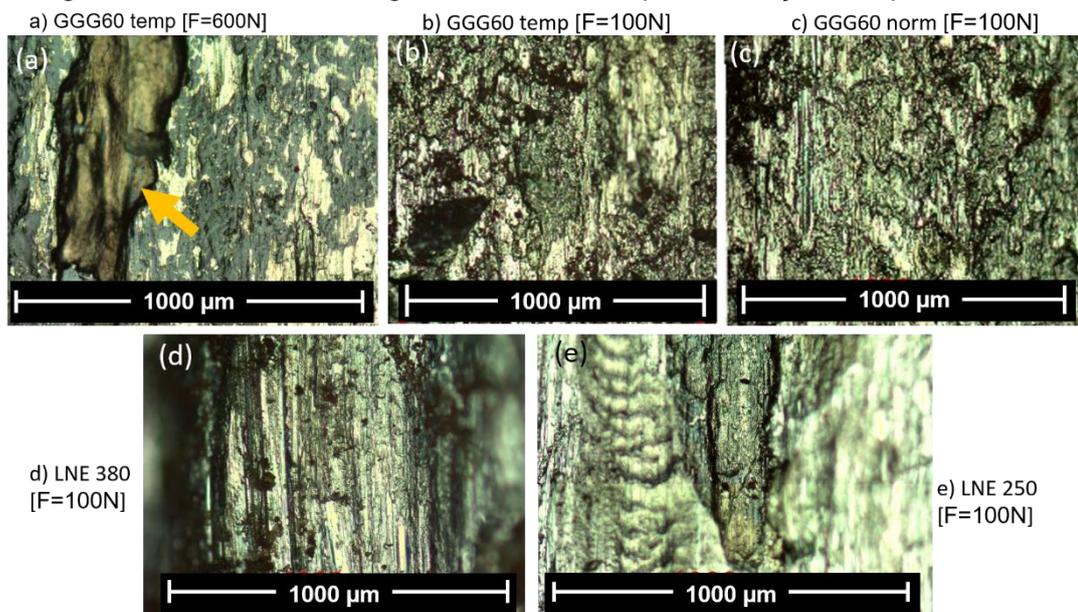


Figura 5.8 – Pinos de aço SAE 5160 atritados contra: (a) GGG 60 temperado [F=600N]; (b) GGG 60 temperado; (c) GGG 60 normalizado; (d) LNE 380; (e) LNE 250.

É possível perceber regiões onde houve arrancamento de material em (a), indicado pela seta. Este fato reforça a possibilidade de que tenha havido transferência de material entre o pino e disco, visto que o disco apresentou material aderido em sua superfície, como mostrado anteriormente. Todos os pinos apresentam deformação plástica da superfície, indicando que o mecanismo predominante foi desgaste adesivo.

#### 5.4 Micrografias dos ensaios com esfera de Nitreto de Silício

A Figura 5.9 mostra as micrografias obtidas nos discos ensaiados contra a esfera de nitreto de silício: (a) e (b) são as trilhas nos discos de ferro fundido temperado e normalizado, respectivamente. Estas apresentam desgaste homogêneo, com formação de camada de óxido sobre a superfície desgastada. É possível perceber algo semelhante nos discos de aço: LNE 380 (c) e LNE 250 (d), porém com trilhas menos homogêneas.

A camada de oxidação, conforme mostrado por Eyre et al., 1971., é característica de um mecanismo de desgaste suave, diferente do que ocorreu para os ensaios contra pino de aço. Isto, muito provavelmente se deve ao fato de o nitreto de silício não ter afinidade química com os metais do disco, além de apresentar uma dureza consideravelmente maior (85 HRc).

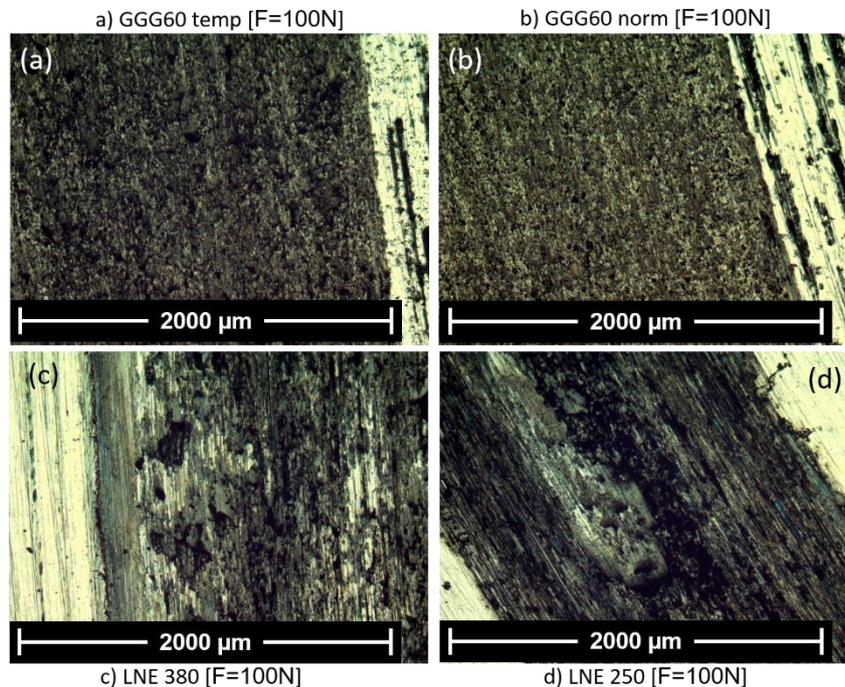


Figura 5.9 – Trilha do disco de: (a) GGG60 temperado; (b) GGG60 normalizado; (c) LNE 250; (d) LNE 380.

## 6. CONCLUSÕES

A utilização do tribômetro se mostrou adequada para obtenção dos resultados, visto que foi possível determinar qual foi o material que apresentou melhor desempenho frente ao desgaste. Uma das vantagens deste equipamento é a possibilidade de se trabalhar com forças superiores a 100 N, limitação da maioria dos tribômetros comerciais.

Através da microscopia ótica foi possível identificar os mecanismos de desgaste presente nos discos e pinos de aço mola. Comparando com micrografias da literatura, foi possível constatar a presença de camada de óxido nos discos atritados contra nitreto de silício, e arrancamento de material, devido à soldagem das superfícies, nos discos de aço atritados contra pinos de aço mola.

A utilização de digitalização via Scanner Tridimensional a Laser se mostrou uma alternativa interessante para determinação da perda volumétrica de material por desgaste, quando este é significativo em ambos os componentes do ensaio.

Os discos ensaiados contra nitreto de silício apresentaram um desgaste na ordem de 10,5 vezes menor que os medidos contra aço. O desgaste foi caracterizado como suave devido à presença de camada de oxidação.

Por fim, o material que apresentou a maior resistência ao desgaste foi o ferro fundido nodular GGG 60 com têmpera superficial. No entanto, o mesmo material, porém, com tratamento térmico de normalização, apresentou o pior desempenho. Isto deixa evidente que o tratamento térmico de têmpera foi fundamental para melhorar a resistência ao desgaste do material. Além do disco ter apresentado o menor desgaste, o GGG 60 temperado foi o material que menos afetou o pino de aço, fato que na aplicação prática representa menor desgaste dos apoios, além de menor desgaste das molas.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing and Materials; **“ASTM G99: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disc Apparatus”**, ASTM, 5 p., 2004.

Barros, L.Y.; **“Análise da superfície de Discos de Freio Automotivos Durante Frenagens”**, Monografia, 29 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

Bergantin R.; Maru, M.M.; Farias, M.C.M.; Padovese, L.R.; **“Dynamic Signal Analyses in Dry Sliding Wear Tests”**, ABCM, Vol XXV, nº 3, p. 285 – 292, 2003.

Blau, J.P.; **“Tribology: Friction, Lubrication and Wear Technology”**, ASM Handbook, v. 18, 20 p., 1995.

Both, G.B.; **“Caracterização e Avaliação Tribológica de Superfícies Resistentes ao Desgaste para Aplicação em Ferramentas de Conformação a Frio”**, Dissertação (mestrado em engenharia), 123 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

Castel, E.A.S.D.; **“Análise comparativa da distribuição radial de temperatura em disco de freio com material de fricção distintos através de termografia”**, Monografia, 26 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

Cunha, A.R.; **“Seleção de Material para Polias de Elevadores”**, Monografia, 20 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

Eyre, T.S.; Maynard, D.; **“Surface aspect of unlubricated metal-to-metal wear”**, Wear, 18, p. 301 – 310, 1971.

Ferrer, C.; Pascual, M.; Busquets, D.; Rayón E.; **“Tribological study of Fe-Cu-Cr-graphite alloy and cast iron railway brake shoes by pin-on-disc technique”**, Wear, 268, p. 784 – 789, 2009.

Neis, P. D.; Ferreira, N. F.; da Silva, F.P.; **“Comparision between methods for measuring wear in brake friction materials”**, Wear, 319, p. 191 – 199, 2014.

Neis, P. D.; **“Projeto e Construção de um Tribômetro com Controle Independente da Temperatura do Disco”**, Tese (doutorado em engenharia), 130 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

Oliveira, C.G.; Silva, I.P.P.; **“Os estudos tribológicos no ensino de engenharia mecânica”**, Revista de Ensino de Engenharia, v. 34, n. 2, p. 3-10, 2015.

Prasad, B.K.; **“Sliding Wear Response of a Grey Cast Iron: Effects of Some Experimental Parameters”**, Tribology International, 44, p. 660 – 667, 2011.

Silva, F.P.; **“Usinagem de Espuma de Poliuretano e Digitalização Tridimensional para Fabricação de Assentos Personalizados para Pessoas com Deficiência”**, Tese (doutorado em engenharia), 192 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

Takeuchi, E.; **“The Mechansim of Wear of Spheroidal Graphite Cast Iron in Dry Sliding”**, Wear, 19, p. 267 – 276, 1971.

## ANEXO A – INCERTEZAS DE MEDIÇÕES DO TRIBÔMETRO

As incertezas de medição do tribômetro utilizado neste trabalho foram determinadas por Neis, 2012. Segundo ele, as incertezas relacionadas a medição do torque e da força são avaliadas como sendo a combinação das incertezas dos dispositivos utilizados para a medição. A incerteza dos dispositivos que medem o torque e a força são calculadas em função do fundo de escala, tornando a incerteza combinada para essas grandezas constantes para toda a faixa de medição.

As incertezas foram calculadas para o intervalo de confiança de 95% e valem  $\pm 0,036$  Nm e  $\pm 12,75$  N para o torque e força, respectivamente.

A incerteza que diz respeito a medição da velocidade de rotação do tribômetro também é função do fundo de escala dos equipamentos, sendo, desta forma, constante para toda a faixa de trabalho. O valor da incerteza combinada e expandida para a velocidade de rotação é de  $\pm 1,4$  rpm (intervalo de confiança de 95%).

O coeficiente de atrito ( $\mu$ ) é calculado utilizando a equação A.1. Visto que é um valor obtido indiretamente através de outras grandezas medidas, sua incerteza é calculada através da combinação das incertezas de força, torque e raio. Neis, 2012, calculou a incerteza para os valores típicos de força e torque resultante durante ensaios no tribômetro, e estão mostradas na Tabela A.1.

$$\mu = \frac{T}{F \cdot r} \quad (\text{A.1})$$

Onde T é o torque medido no eixo [Nm], F a força normal [N], e r o raio de aplicação da força [m] e  $\mu$  o coeficiente de atrito [adimensional].

Tabela A.1 – Incerteza (%) do coeficiente de atrito para a combinação de torque e força (adaptado de Neis, 2012).

		Faixa de torque [Nm]									
		1	2	3	4	5	10	15	20	30	45
Faixa da força normal [N]	50	$\pm 29,07$	$\pm 27,28$								
	100	$\pm 16,34$	$\pm 14,54$	$\pm 13,94$	$\pm 13,64$						
	200	$\pm 9,98$	$\pm 8,18$	$\pm 7,58$	$\pm 7,28$	$\pm 7,10$					
	300	$\pm 7,87$	$\pm 6,06$	$\pm 5,46$	$\pm 5,16$	$\pm 4,98$	$\pm 4,61$				
	400	$\pm 6,81$	$\pm 5,01$	$\pm 4,40$	$\pm 4,10$	$\pm 3,92$	$\pm 3,55$	$\pm 3,43$			
	500	$\pm 6,18$	$\pm 4,38$	$\pm 3,77$	$\pm 3,47$	$\pm 3,28$	$\pm 2,92$	$\pm 2,80$	$\pm 2,73$		
	1000	$\pm 4,92$	$\pm 3,12$	$\pm 2,51$	$\pm 2,21$	$\pm 2,02$	$\pm 1,65$	$\pm 1,53$	$\pm 1,47$	$\pm 1,40$	
	1500	$\pm 4,50$	$\pm 2,70$	$\pm 2,10$	$\pm 1,79$	$\pm 1,61$	$\pm 1,24$	$\pm 1,11$	$\pm 1,05$	$\pm 0,98$	$\pm 0,94$
	2000	$\pm 4,29$	$\pm 2,49$	$\pm 1,89$	$\pm 1,59$	$\pm 1,40$	$\pm 1,03$	$\pm 0,90$	$\pm 0,84$	$\pm 0,78$	$\pm 0,73$
	2500	$\pm 4,17$	$\pm 2,37$	$\pm 1,77$	$\pm 1,46$	$\pm 1,28$	$\pm 0,91$	$\pm 0,78$	$\pm 0,72$	$\pm 0,65$	$\pm 0,61$

## APÊNDICE A – GRÁFICOS DE FORÇA, TORQUE E COEFICIENTE DE ATRITO

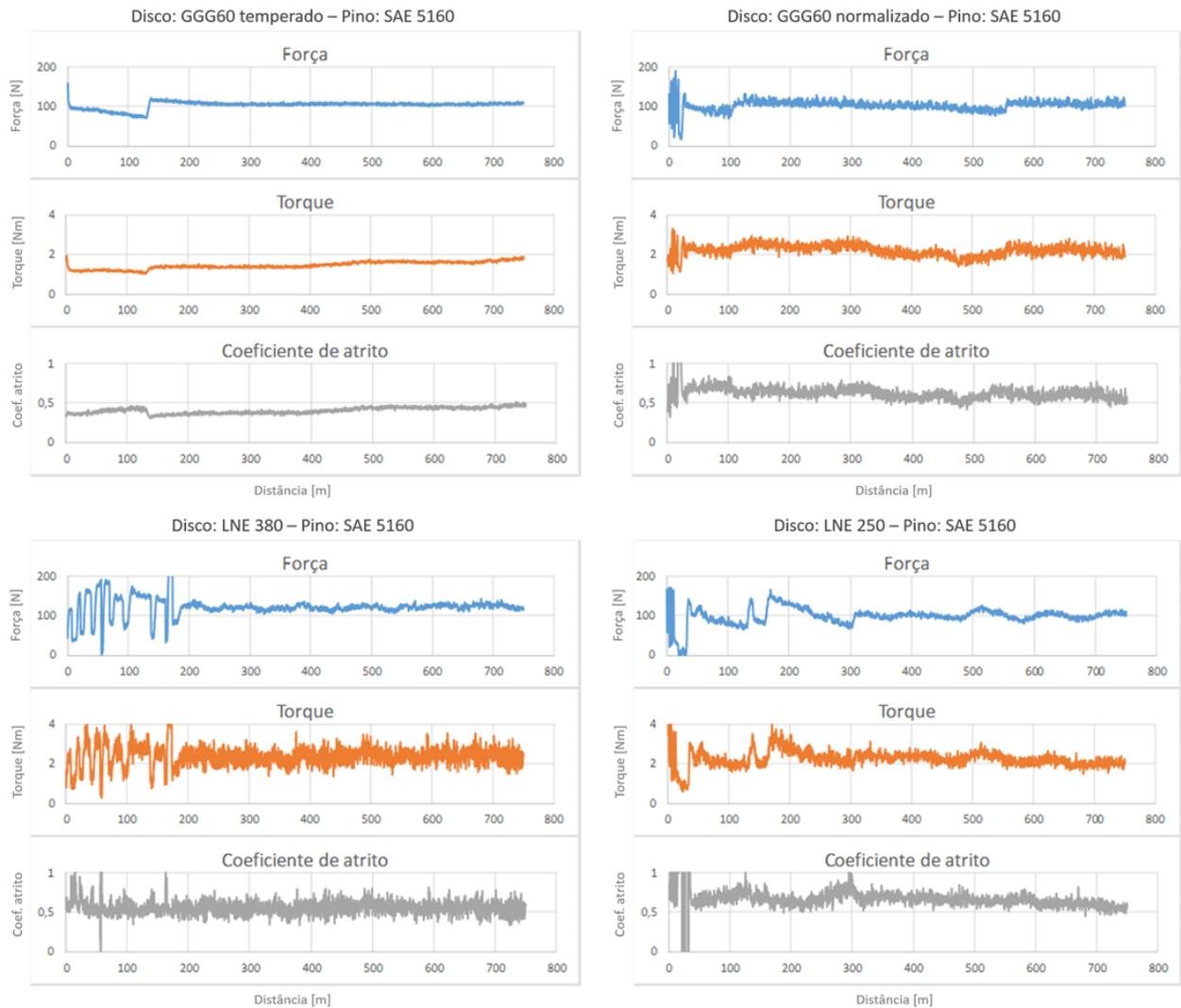


Figura A.1 – Gráfico para ensaios realizados com pino de aço SAE 5160 e força de 100N.

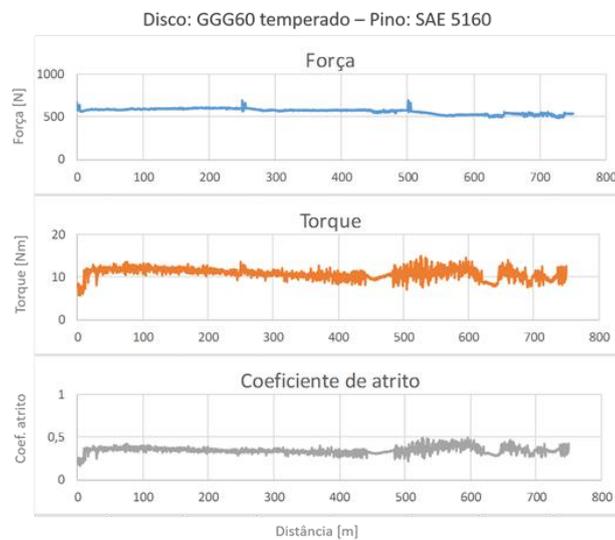


Figura A.2 – Gráfico para ensaio realizado com pino de aço SAE 5160 e força de 600N.

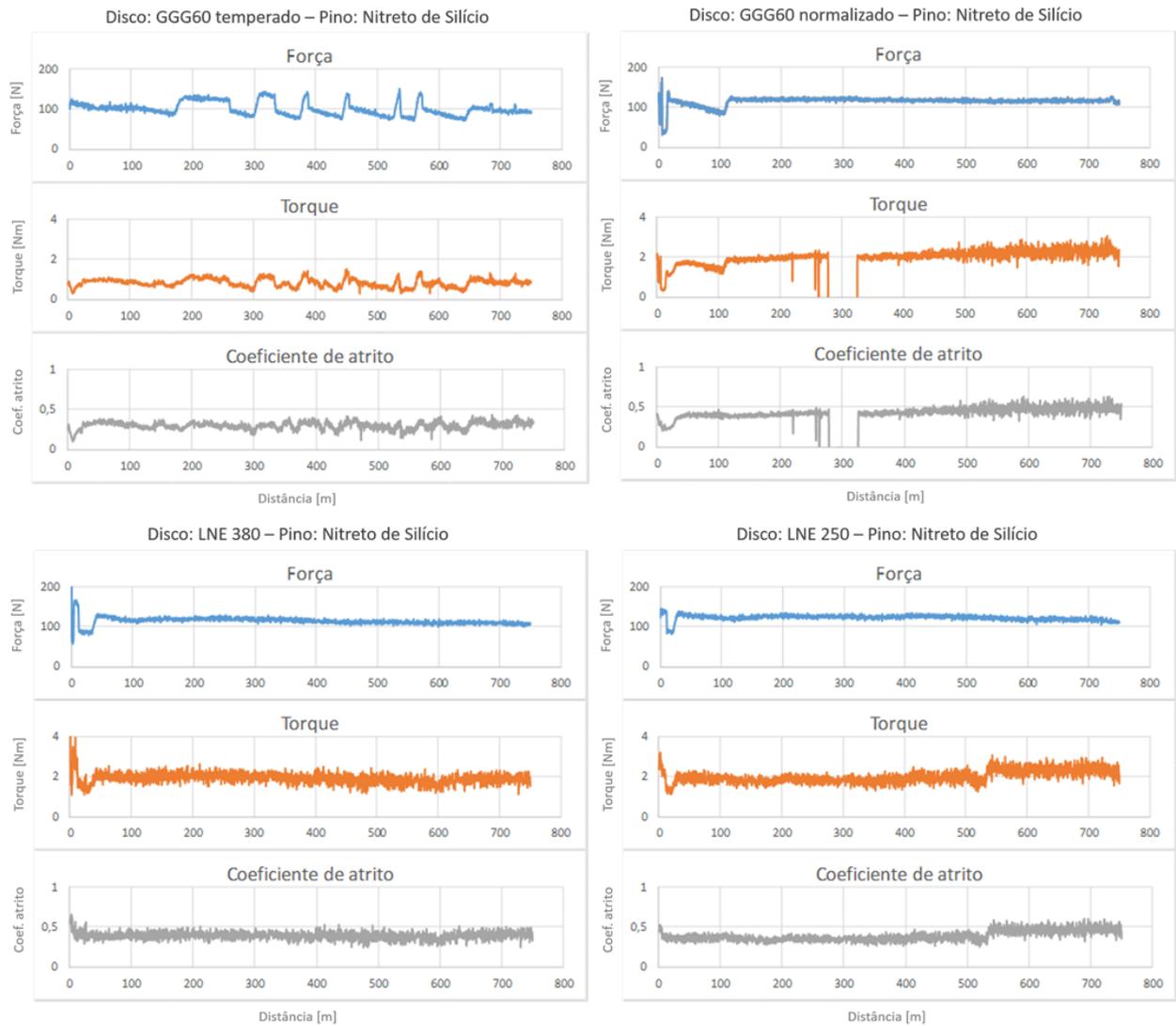


Figura A.3 - Gráfico para ensaios realizados com pino de nitreto de silício e força de 100N.