

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA E ESTUDO DE PARÂMETROS  
ASSOCIADOS À MEDIÇÃO DE ATRITO ESTÁTICO DE LONAS DE FREIO

por

Adriele Jacques Amaral

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 Engenharia Mecânica.

Porto Alegre, novembro de 2019

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

### CIP - Catalogação na Publicação

Amaral, Adriele Jacques  
Desenvolvimento de uma Metodologia e Estudos de  
Parâmetros Associados à Medição de Atrito Estático de  
Lonas de Freio / Adriele Jacques Amaral. -- 2019.  
26 f.  
Orientador: Patric Daniel Neis.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2019.

1. atrito estático. 2. tribologia . 3. freios de  
estacionamento. 4. lonas de freio. I. Neis, Patric  
Daniel, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Adriele Jacques Amaral

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA E ESTUDO DE PARÂMETROS  
ASSOCIADOS À MEDIÇÃO DE ATRITO ESTÁTICO DE LONAS DE FREIO

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

Prof. Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Patric Daniel Neis

Comissão de Avaliação:

Prof./Prof<sup>ª</sup>. Patric Daniel Neis

Prof./Prof<sup>ª</sup>. Ney Francisco Ferreira

Prof./Prof<sup>ª</sup>. Fabiano Disconzi Wildner

Porto Alegre, novembro de 2019

Agradeço à minha família, principalmente à minha mãe, pois sem o seu apoio e suporte, eu não teria conseguido superar as dificuldades encontradas pelo caminho.

Agradeço ao meu amor, Diogo Buneder, pelo companheirismo, carinho, força e também pela orientação.

Ao meu orientador Patric Neis, pela paciência em me auxiliar, quando nem eu mesma sabia o que era preciso ser analisado ou arrumado, e ao Jean Poletto, por toda a orientação ao longo desse estudo. Obrigada a vocês dois pelos “puxões de orelha” e pela identificação daqueles erros que eu deixava passar.

À equipe LATRIB, em especial ao Gustavo Gehlen, pelas ideias e pelas realizações das inúmeras microscopias e ensaios e ao Guilherme Catusso pelo suporte.

À equipe Fras-le: ao Rafael Paini, pela sugestão do tema; ao Diego Masotti, pelo suporte e orientação; ao Daniel Matté, por todo apoio e conhecimento químico; ao Carlos Selles, pela formulação das amostras; à Juliana Favero e ao Diego Severo pelo apoio com os cálculos e ao laboratório piloto, pela confecção dos corpos de prova.

O auxílio de todos vocês foi muito importante na elaboração deste trabalho.

*“Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil – e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos”*

*Albert Einstein*

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2019

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA E ESTUDO DE  
PARÂMETROS ASSOCIADOS À MEDIÇÃO DE ATRITO ESTÁTICO DE  
LONAS DE FREIO

**Adrielle Jacques Amaral**  
adri\_ele@hotmail.com

**Resumo.**

*No ramo da tribologia, um parâmetro importante que deve ser analisado em materiais aplicados nos freios de estacionamento é o atrito estático. Porém, poucos estudos a respeito são encontrados na literatura. O objetivo desse trabalho consiste em desenvolver uma metodologia para medição de atrito estático em amostras de lonas de freio atritadas contra um disco de ferro fundido cinzento. Para isso, são utilizados: um tribômetro do tipo pino-sobre-disco, um scanner tridimensional, um estereoscópio, um microscópio, além da técnica de segmentação de superfícies para caracterização da morfologia dos platôs de contato. Nesse estudo analisa-se o atrito estático, a topografia (rugosidade) e morfologia da superfície (platôs). Métodos estatísticos (testes de Anderson-Darling e de Kruskal-Wallis e correlação de Spearman) são empregados com a finalidade de determinar a existência de diferenças significativas entre formulações de materiais de fricção avaliadas e estabelecer correlações entre os parâmetros analisados. Os resultados encontrados indicam que a correlação entre atrito estático e rugosidade é inconclusiva. A correlação obtida entre o atrito e o percentual de platôs pode ser considerada estatisticamente forte para um dos materiais analisados. Em relação ao atrito estático, a análise estatística demonstra que a metodologia desenvolvida é capaz de determinar diferenças significativas entre formulações.*

**Palavras-chave:** atrito estático, tribologia, freios de estacionamento, lonas de freios

**Abstract.**

*In the field of tribology, an important parameter that must be analyzed in parking brakes materials is static friction. However, few studies about this subject are found in the literature. The objective of this study is to develop a methodology for static friction measurement in brake lining samples rubbed against a gray cast iron disc. For this, a pin-on-disk tribometer, a three-dimensional scanner, a stereoscope, a microscope and a surface segmentation technique to characterize the contact plateau morphology of the analyzed surfaces are used. This study analyzes static friction, topography (roughness) and surface morphology (plateaus). Statistical methods (Anderson-Darling and Kruskal-Wallis tests and Spearman correlation) are employed to determine the existence of significant differences between formulations of friction materials evaluated and to establish correlations between the analyzed parameters. The results indicate that the correlation between static friction and roughness is inconclusive. The correlation between the friction and the number of plateaus can be considered statistically strong for one of the analyzed materials. Regarding static friction, statistical analysis demonstrates that the developed methodology is able to determine significant differences between formulations.*

**Keywords:** static friction, tribology, parking brake, lining.

## 1. INTRODUÇÃO

Sistemas de freio possuem elevada importância em veículos automotores, visto que estão associados à segurança de motoristas, passageiros e pedestres (ISHAK et al., 2016). Os sistemas de freio podem ser classificados como freios de serviço e/ou de estacionamento, de acordo com a função que exercem (LIMPERT, 1992). Quando atuam como freios de serviço, eles são responsáveis pela desaceleração do veículo. Já na condição de freio de estacionamento, a principal função é manter os veículos parados enquanto estacionados (ISHAK et al., 2016).

Um dos principais componentes dos sistemas de freio é o material de fricção. No que diz respeito à sua composição, existem mais de 2000 diferentes componentes que podem ser utilizados (BLAU, 2001). Para os materiais destinados a freios de estacionamento, os fabricantes costumam acrescentar modificadores de atrito nas formulações, a fim de aumentar o coeficiente de atrito estático dos materiais. Além de existirem muitas possibilidades de formulações, o desenvolvimento dos materiais de fricção ainda ocorre de maneira empírica, baseado no conhecimento adquirido através da tentativa e erro (BAKLOUTI et al., 2015). Para a avaliação desses materiais, diversos tipos de teste são realizados, como por exemplo, testes de bancada, em dinamômetros e em veículos, simulando diversas condições de operação. Nesses testes, são avaliados o coeficiente de atrito, os mecanismos de desgaste e a presença de ruído (RUSNAK et al., 1970).

No caso específico dos freios de estacionamento, um parâmetro chave que deve ser analisado é o atrito estático (HUANG et al., 2017). No entanto, apesar da importância do entendimento desse parâmetro, existem poucos estudos relacionados ao atrito estático em materiais de fricção (ŚCIESZKA et al., 1996). Aliado a isso, algumas montadoras e fabricantes de materiais de fricção optam por selecionar ou aprovar materiais baseados apenas nos valores de torque estático, obtidos em testes realizados em dinamômetros. Muitas das normas regulamentadoras especificam requisitos de aprovação de material que devem ser cumpridos com relação aos freios de estacionamento (como a força mínima necessária na alavanca do freio), mas não determinam a metodologia que deve ser empregada nos ensaios. Dessa maneira, montadoras e fabricantes de materiais de fricção costumam adotar procedimentos próprios. De acordo com Pacheco (2018), ensaios mais realistas (como, por exemplo, em dinamômetros) tendem a ter custos mais altos do que os realizados em subsistemas (como, por exemplo, tribômetros). O alto custo associado a ensaios mais fidedignos é um entrave ao desenvolvimento de materiais de fricção. Esse fato reforça ainda mais a necessidade de se desenvolver uma metodologia de ensaio para avaliação de atrito estático que possa ser realizada em subsistemas menos complexos e que sirva para selecionar materiais de fricção de maneira rápida e eficiente.

O Laboratório de Tribologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul atua nas áreas de pesquisa envolvendo atrito e desgaste e conta com um tribômetro do tipo pino-sobre-disco desenvolvido por Neis (2012) para a avaliação de materiais de fricção. No presente estudo, propõe-se a utilização deste equipamento com o objetivo de elaborar uma metodologia de medição do atrito estático de amostras de lonas de freio aplicadas em freio de estacionamento. Os objetivos secundários incluem: avaliação de diferenças no coeficiente de atrito estático em diferentes materiais e busca por correlação do atrito estático com parâmetros de superfície morfológicos e topográficos, como quantidade de platôs e rugosidade, respectivamente.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

### 2.1. Histórico do estudo de atrito

De acordo com Popova et al. (2015), os primeiros estudos do atrito documentados foram desenvolvidos por Leonardo da Vinci, em 1699, os quais ficaram conhecidos como as Leis do Atrito a Seco. Posteriormente, segundo Jianping et al. (2004), Amontons formulou as duas leis do atrito: (i) a força de atrito é proporcional a carga normal e (ii) independe da área de contato aparente. De acordo

com o autor, para Amontons, o atrito independia da rugosidade da superfície. Posteriormente, Coloumb contribui com a terceira lei incluindo que o atrito cinético independe da velocidade de deslizamento. Para Popova (2015), Coulomb também havia concluído que a força de atrito não apresentava dependência com variações nas superfícies e na área de contato aparente.

## 2.2. Caracterização de superfície: Platôs

Durante o contato entre o material de fricção e o disco, ocorre a formação das partículas de desgaste (*debris*) na superfície do material de atrito. A distribuição desigual dos *debris* e a compactação deles durante o contato ocasionam os chamados platôs, que podem ser diferenciados em primários e secundários. Os primários são formados durante as primeiras frenagens, a partir do desgaste dos picos mais elevados que permanecem do material de atrito sem ser arrancados durante o contato. Já os secundários são formados a partir da compactação dos *debris* e dependem das forças normal e de cisalhamento durante o contato (ERIKSON, 2000).

## 2.3. Composição de materiais de fricção

Com relação à composição química, os componentes dos materiais de fricção com aplicação em freios são classificados de acordo com a função que exercem, conforme Tab.1 (BLAU, 1996). É importante lembrar que, por se tratar de um compósito, as formulações de lonas de freio possuem geralmente mais de um componente que exercem a mesma função.

Tab. 1- Funções e exemplos de componentes utilizados em lonas (Adaptação de BLAU, 1996)

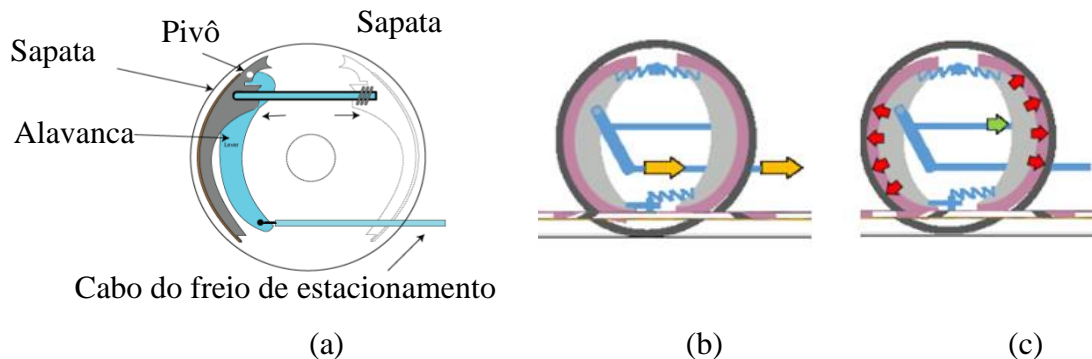
Componente	Principais Funções	Exemplo
Abrasivos	Aumento do atrito e controle de formação de filme no disco.	Sílica
Fibras	Aumento de rigidez e de resistência mecânica.	Fibra de vidro
Aglutinantes	Promoção da adesão entre os componentes químicos.	Resina fenólica
Cargas	Preenchimento e redução custos.	Pó de borracha
Modificadores de atrito	Aumento de resistência ao desgaste, através do controle das propriedades abrasivas dos materiais.	Cobre e latão

## 2.4. Freios de estacionamento a tambor

Nos freios de estacionamento a tambor, as sapatas pressionam as lonas de freio contra o tambor de maneira radial, impedindo o movimento das rodas. O acionamento é feito por um cabo que, ao ser tracionado, provoca o pressionamento das sapatas contra o tambor, através de uma alavanca (LIMPERT, 1992). A Fig. 1 ilustra o funcionamento do freio.



Figura 1 - Funcionamento de um sistema de freio de estacionamento acionado por cabo: (a) representação esquemática; (b) representação do acionamento no cabo; (c) modo de atuação da pressão exercida nas lonas (Adaptação de PIGEONS, 2014; FREE ASE STUDY GUIDES, 2019)



## 2.5. Normas de aprovação em freios de estacionamento

Poucos são os procedimentos encontrados para ensaios em freios de estacionamento como, por exemplo, a metodologia definida no procedimento normatizado FMVSS 135 (Federal Motor Vehicle Safety Standards). Essa norma de segurança entrou em vigor a partir de 1960 nos EUA, determinando os requisitos que deveriam ser atendidos pelos fabricantes de veículos e de itens produzidos para este mercado (NHATSA, 2010). No caso de freios de estacionamento, ela determina que o sistema de freio do veículo deve ser suficiente para manter ele parado (em todas as direções) durante um intervalo de tempo de cinco minutos com uma força manual de  $400\text{ N}$ , aplicada pelo condutor, sobre a alavanca do freio de mão. Esse procedimento deve ser realizado em uma rampa com inclinação de  $20^\circ$ .

No Brasil, o anexo III da resolução do CONTRAN nº 663, de 2017, determina que os freios de estacionamento dos veículos automotores pesados (veículos com peso bruto total acima de  $3856\text{ kg}$ ) devem ser capazes de manter o veículo completamente parado em um aclave ou declive de  $12\%$ . Na literatura, é comum as normas regulamentadoras descreverem as inclinações em valores percentuais. Nesse caso, de acordo com Silveira (2013), a relação percentual é dada pela razão entre o cateto vertical e o cateto adjacente ao ângulo de inclinação.

Na maior parte dos casos, as normas para freios de estacionamento determinam os pré-requisitos de aprovação de um sistema de freio veicular (como, por exemplo, a força necessária na alavanca pelo condutor) sem determinar exatamente como os ensaios poderiam ser reproduzidos em dinamômetros comerciais ou em tribômetros.

Para se adequar a esses critérios de aprovação sem ter de reproduzir inúmeros ensaios em veículos, montadoras e fabricantes de materiais de fricção elaboram procedimentos próprios de ensaio em dinamômetros ou tribômetros. Portanto, testes em veículos costumam ser destinados principalmente a casos de aprovação de material. Um exemplo de procedimento de teste em dinamômetro determina que, para uma força aplicada no cabo do freio de estacionamento de  $1000\text{ N}$ , o torque mínimo no tambor para manter o veículo estacionado deve ser  $4350\text{ Nm}$ .

## 2.6. Atrito estático em materiais de fricção

Segundo Ścieska (1996), poucos estudos são encontrados na literatura relacionados a materiais de fricção e a atrito estático. Devido a isso, o próprio autor realizou ensaios de atrito estático em lonas de freio utilizando uma máquina de ensaios de tração adaptada. Nos ensaios, amostras de lonas eram fixadas em um calíper e atritadas contra uma chapa de aço carbono. Como resultado, o autor determinou a existência de uma relação do atrito estático com quatro fatores: tempo de aplicação de carga (*dwell time*); temperatura de contato entre o par tribológico; rugosidade da superfície das lonas e taxa de incremento de carga.

## 2.7. Outros estudos relacionados a medição de atrito estático

Apesar dos poucos estudos relacionados ao atrito estático em materiais de fricção, é possível encontrar estudos em outros pares tribológicos. Esses estudos podem servir de referência para determinar quais parâmetros são importantes de serem considerados na elaboração da metodologia proposta nesse trabalho.

### 2.7.1. Experimento de Sato (1997)

Sato (1997) utilizou um sistema de transmissão de forças com uma polia e um tambor para determinar o perfil do atrito (estático e dinâmico) entre diferentes tipos de papel. O papel era preso a um tambor de metal que rotacionava com o auxílio de um peso morto. As forças aplicadas eram mensuradas através de uma célula de carga. Como resultado, o autor determina que o histórico de aplicações exerce grande influência no valor do coeficiente de atrito estático nesses tipos de materiais (papel versus papel).

### 2.7.2. Experimento de Kasen (2013)

Corpos de prova poliméricos foram atritados contra uma placa de vidro em um tribômetro linear. Como resultado, observou-se que o tempo de permanência de contato aumenta o coeficiente de atrito estático. Isso acontece, segundo o autor, devido a um aumento na área de contato provocado pela fluência do corpo de prova. Como consequência, isso tende a alterar a rigidez de contato e também as forças necessárias para ocorrer o deslizamento do material. Este estudo reforça a necessidade de se buscar a existência de correlações entre a área de contato e o atrito estático.

### 2.7.3. Conclusões a respeito dos estudos em outros tipos de materiais

A partir dos resultados obtidos nesses experimentos, foi possível perceber que pode existir uma relação entre o atrito estático e o tempo de permanência de contato, a taxa de incremento da carga, a temperatura (ŚCIESKA, 1996), a quantidade de deslizamentos (ou medições) (SATO, 1997) e a rugosidade da superfície dos corpo de provas (KASEN, 2013). Desta maneira, estudos relacionados ao atrito estático em materiais de fricção devem buscar estabelecer correlações com esses parâmetros.

## 3. METODOLOGIA

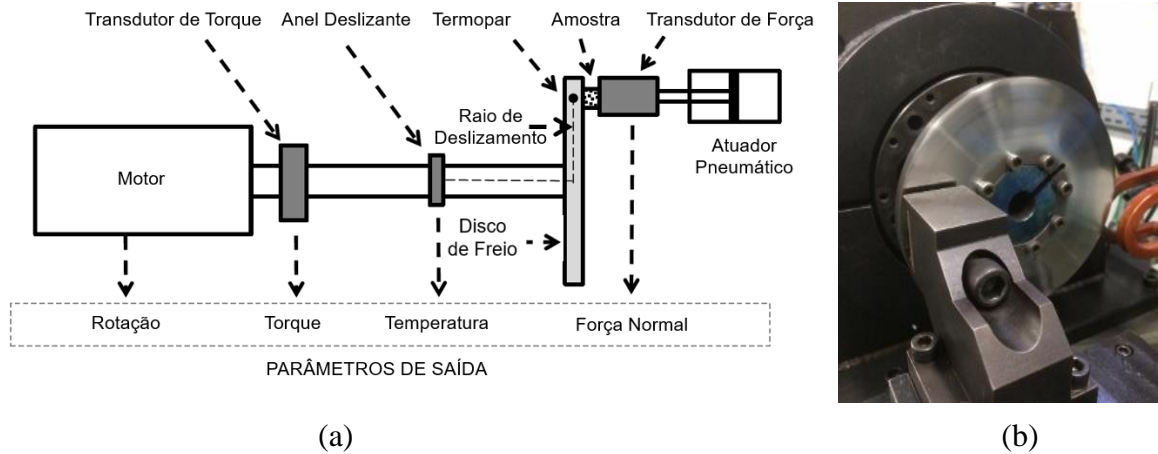
### 3.1. Tribômetro

O equipamento utilizado nos ensaios é o tribômetro pertencente ao LATRIB (Figura 2). Nesse tribômetro, o corpo de prova (material de fricção) é pressionado contra o disco de freio pela força exercida por um atuador pneumático. O coeficiente de atrito é obtido por medição indireta, ou seja, é calculado utilizando-se a Equação 1.

$$\mu = \frac{T}{rF} \quad (1)$$

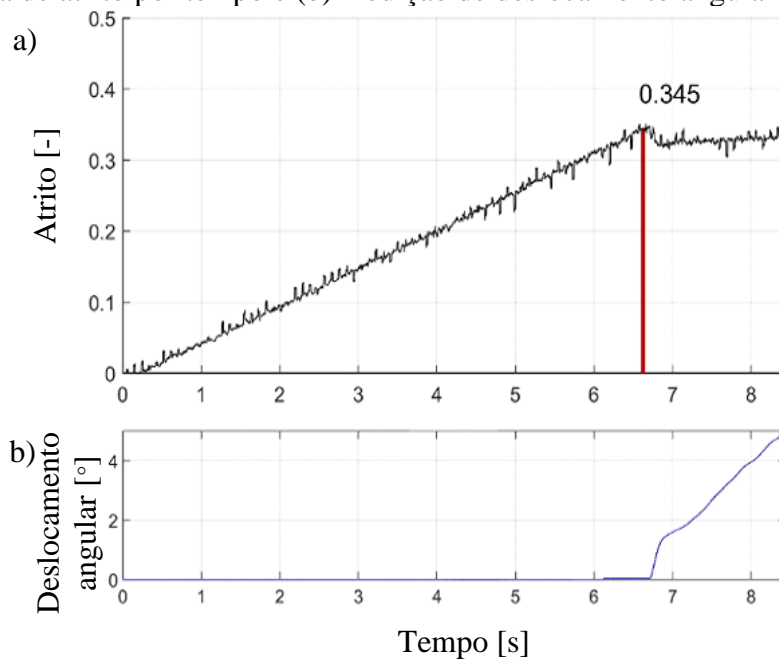
onde T representa o torque frenante (Nm), F é a força normal (N), r é o raio de deslizamento (m) e  $\mu$  é o coeficiente de atrito (*adimensional*).

Figura 1 – Tribômetro utilizado nos ensaios: (a) representação esquemática (Adaptação de BUNEDER, 2019); (b) corpo de prova sendo pressionado contra disco de freio



Nos ensaios de atrito estático do presente estudo, a força normal é aplicada pelo atuador pneumático, ocasionando o pressionamento da amostra de lona contra o disco, o qual está em repouso. Após a aplicação da carga, o servo-motor do tribômetro impõe gradualmente uma velocidade de rotação de  $0,5 \text{ rpm}$  sobre o eixo, ao qual está acoplado o disco. Em um rápido período de tempo, o torque do eixo do tribômetro é incrementado, na tentativa de fazer o disco girar na rotação especificada. No instante exato em que ocorre movimento relativo entre o disco e a amostra de lona, acontece também a transição estático-dinâmico do atrito. Um encoder conectado ao tribômetro detecta o deslocamento angular do eixo e, no momento que este chega a  $5^\circ$ , o ensaio é finalizado. O coeficiente de atrito estático é determinado no ponto de transição estático-dinâmico, no limiar do movimento do disco. Este ponto coincide com a primeira inflexão na curva de atrito mostrada na Figura 2.

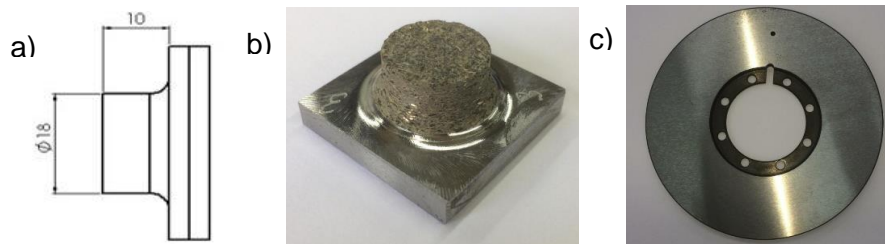
Figura 2 – Curva típica do ensaio, ilustrando a obtenção do atrito estático em cada aplicação: (a) curva de atrito por tempo e (b) medição de deslocamento angular pelo encoder



### 3.2. Materiais utilizados

Os pares tribológicos utilizados nos ensaios são discos de ferro fundido cinzento e três formulações de lonas de freio (Figura 4). Foram utilizadas três amostras de cada formulação de acordo com a Tab. 2. Os discos utilizados foram lixados com lixas de granulometria 180, 240, 320, 600 e 1200, respectivamente, e então limpos com uma solução aquosa de álcool e éter antes do início de cada teste. Com o procedimento, garantiu-se que a rugosidade média dos discos – medida em cinco ângulos diferentes – estivesse abaixo de  $0,20 \mu\text{m}$ .

Figura 4 – Corpos de prova utilizados nos ensaios: (a) dimensional da amostra de lona de freio; (b) amostra de lona de freio; (c) disco de ferro fundido cinzento



Tab. 2 – Amostras de lonas empregadas no presente estudo

Formulação	Quantidade	Nomenclatura das amostras	Fibras (% em massa)	Aglutinantes (% em massa)	Cargas (% em massa)
v24	3	v24.1, v24.2 e v24.3	0,30	0,51	0,19
v25	3	v25.1, v25.2 e v25.3	0,16	0,54	0,30
v28	3	v28.1, v28.2 e v28.3	0,24	0,61	0,15

### 3.3. Procedimento de ensaio

Os procedimentos de ensaio para cada amostra (medições, microscopias, macroscopias e *scanner*) são mencionados na Tab. 3. Para três amostras (v24.1, v25.1 e v28.1), optou-se também por realizar mais uma microscopia (além das descritas na Tab. 3). Isso foi feito para caracterizar as superfícies das amostras após o primeiro contato tribológico. O procedimento foi realizado apenas para essas três amostras em função da demora em realizar cada microscopia.

A força normal utilizada nos ensaios ( $200 \text{ N}$ ) equivale à pressão exercida pela lona contra um tambor de 9" de diâmetro e 90 mm de largura, quando a tração no cabo do freio de estacionamento é de  $1000 \text{ N}$ .

Tab. 3- Procedimento de ensaio realizado no presente estudo

Procedimento	Força	Pressão de contato	Velocidade de rotação inicial	Velocidade de rotação final
<i>Scanner</i> , microscopia e macroscopia				
201 medições				
Microscopia e macroscopia	200 N	0,8 MPa	0 rpm	0,5 rpm
200 medições				
<i>Scanner</i> , microscopia e macroscopia				

### 3.4. Análises morfológicas e topográficas do material de fricção

Técnicas ópticas e computacionais foram empregadas para análise das superfícies dos materiais, conforme Tab. 4. A análise topográfica foi realizada através de parâmetros de rugosidade – rugosidade média (Ra), desvio médio quadrático (Rq), curtose (Rku) e fator de assimetria (Rsk) – os quais foram obtidos do processamento, via MATLAB, dos dados provenientes do *scanner*. A determinação do percentual de platôs no material de atrito, que compõe a análise morfológica, foi realizada através do processamento de imagens utilizando o método de segmentação de imagens de Otsu, previamente descrito por Barros (2015). As macroscopias realizadas no estereoscópio permitem análises visuais de heterogeneidade das amostras e modificações de superfícies após os ensaios.

Tab. 4- Descrição de equipamentos utilizados para caracterização das superfícies das amostras

Equipamento	Marca	Ampliação da lente	Análise
<i>Scanner</i> tridimensional	Tecnodrill	25x	Topográfica
Microscópio Axio Lab.A1	Zeiss	25x	Morfológica
Estereoscópio Stemi 508	Zeiss	6,3x	Macroscópica

### 3.5. Ferramentas estatísticas para análise de resultados

A fim de realizar uma análise estatística dos resultados, foram utilizados os Testes de Hipóteses de Anderson-Darling, para verificar a normalidade dos dados, e o de Kruskal-Wallis, para estabelecer se existem diferenças significativas entre as amostras.

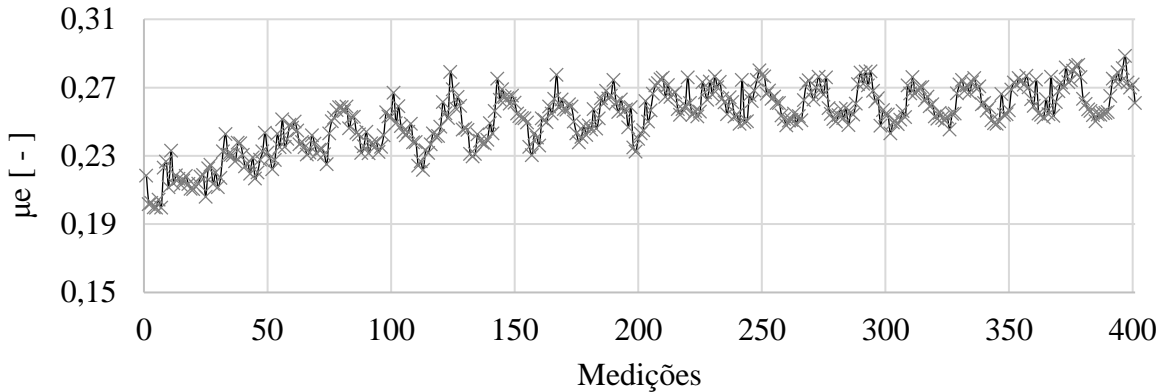
Posteriormente, a correlação de Postos de Spearman foi empregada para determinar a existência de correlações entre as variáveis mensuradas. Para utilizar esse parâmetro, é necessário, primeiramente, identificar a existência de correlação entre os dados, o que é indicado pelo cálculo do p-valor. No caso, o p-valor precisa ser menor do que 0,05 (para um nível de significância de 95%). Existindo correlação, calcula-se o  $\rho$  de Spearman, onde:  $\rho < 0,4$  corresponde a uma correlação fraca;  $0,4 < \rho < 0,6$  indica uma correlação moderada;  $0,6 < \rho < 0,79$  resulta em uma correlação forte;  $\rho > 0,8$  equivale a uma correlação extremamente forte (STATSTUTOR, 2019). Todos os cálculos estatísticos foram realizados nos softwares Microsoft Excel e Minitab.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Determinação do coeficiente de atrito estático dos materiais

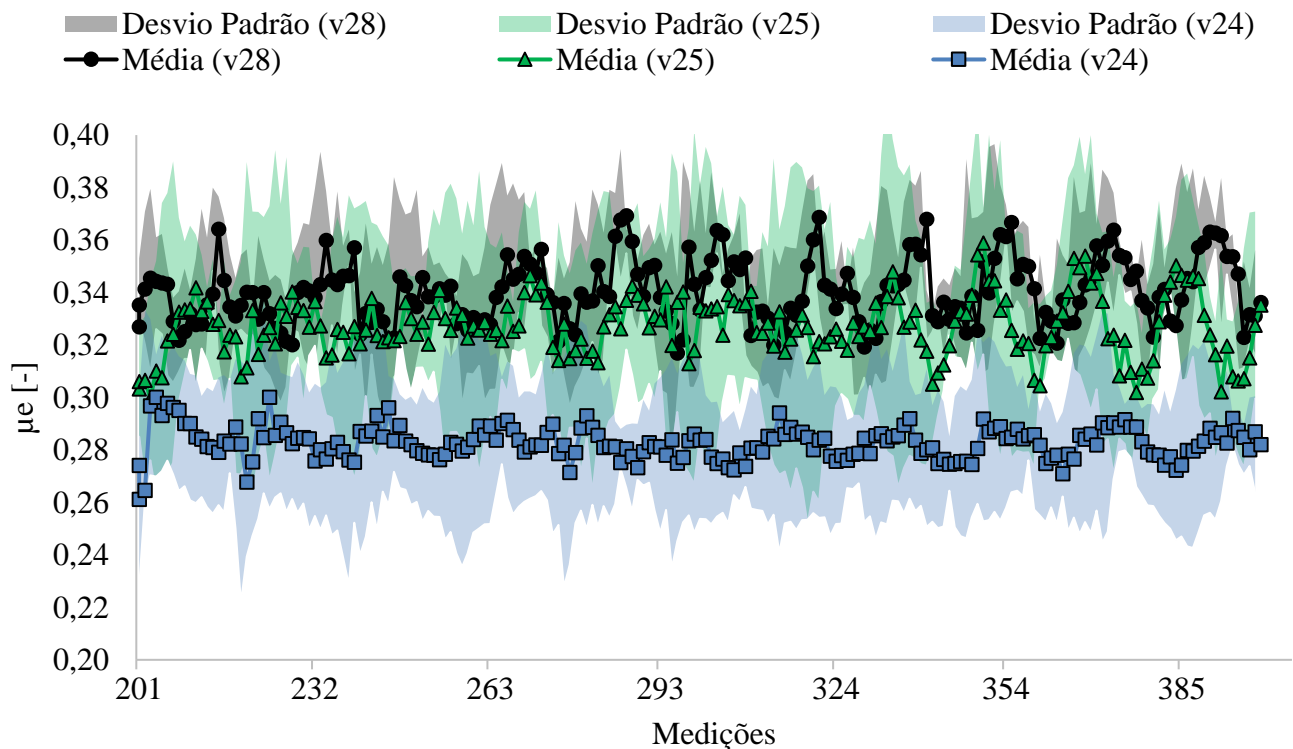
As 401 medições do coeficiente de atrito estático ( $\mu_e$ ) obtidas para um dos materiais (v24.1) são apresentadas na Figura 5. Observa-se, visualmente, que após um determinado número de medições ocorre a convergência do valor do atrito. A partir disso, foi realizada uma análise de convergência para cada amostra. Para esta avaliação, determinou-se que o coeficiente de atrito converge quando a variação entre o coeficiente de atrito médio acumulado e o atrito de cada medição for menor do que 0,01. Essa análise foi realizada para todos os materiais e determinou-se que são necessárias (no mínimo) 200 aplicações para que todas as amostras convirjam. Então, optou-se por descartar os primeiros 201 dados de cada amostra e foram consideradas as medições restantes (202 à 400) para o cálculo do coeficiente de atrito estático médio de cada amostra.

Figura 5 – Coeficiente de atrito estático obtido para as 401 aplicações para o material v24.1



Todos os 401 valores de coeficiente de atrito estático para todas as amostras são apresentados no Apêndice B (Figura B.1). O coeficiente de atrito estático médio e o desvio padrão para cada formulação em cada medição é apresentado na Figura 6. É possível perceber que o material v24 possui a média inferior aos outros dois materiais e que o v28 possui a maior média. Porém, em algumas medições o material v25 possui o valor do atrito estático maior do que o v28.

Figura 6 – Coeficiente de atrito estático médio de cada formulação e o desvio padrão em cada uma das últimas duzentas medições medição para: (a) v24; (b) v25 e (c) v28



A partir dos dados da Figura 6, obtém-se os valores de atrito estático médios para cada formulação (Tab. 5). Se apenas os valores médios forem considerados, o material v28 apresenta o atrito estático mais elevado. Em uma situação de seleção de lonas, na qual se busca um coeficiente de atrito estático mais alto a fim de garantir um estacionamento sem ocorrência de deslizamentos, esse material (v28) deveria ser escolhido, visto que apresenta o maior coeficiente de atrito estático médio e um dos menores desvios-padrão.

Tab. 5- Coeficiente de atrito estático máximo, mínimo, médio e desvio padrão para cada formulação nas 200 aplicações

<b>Coeficiente de atrito estático</b>			
	v24	v25	v28
Máximo	0,34	0,40	0,40
Mínimo	0,21	0,25	0,27
Média	0,28	0,33	0,34
Desvio Padrão	0,02	0,03	0,02

A partir do teste de Anderson-Darling, determina-se, na Tab. 6, se os dados de atrito estático aderem ou não a uma distribuição normal. Isso é necessário para definir qual ferramenta estatística empregar na análise de significância.

Tab. 6- Resultado do Teste de Anderson-Darling para determinar se as distribuições aderem a uma normal

<b>Teste de Anderson-Darling</b>		
Formulação	p valor	Com 95% de significância:
v24	< 0,05	Não adere a uma distribuição normal
v25	< 0,05	Não adere a uma distribuição normal
v28	0,06	Inconclusivo

Visto que duas das três formulações não aderem a uma distribuição normal, optou-se por utilizar o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis (Tab. 7). Como resultado, é possível afirmar com 95% de significância que existem diferenças significativas entre a formulação v24 e as demais. Aliado à análise das médias (Tab. 5), isso significa que essa formulação possui um nível de atrito que pode ser considerado menor do que os medidos nos demais materiais (v25 e v28).

Tab. 7- Teste de Kruskal-Wallis para comparação de formulações

<b>Teste de Kruskal-Wallis</b>		
Comparativo entre formulações	p-valor	Com 95% de significância:
v24 vs. v28	0,002	Diferenças significativas entre formulações
v25 vs. v28	0,496	Resultado inconclusivo
v24 vs. v25	0,004	Diferenças significativas entre formulações

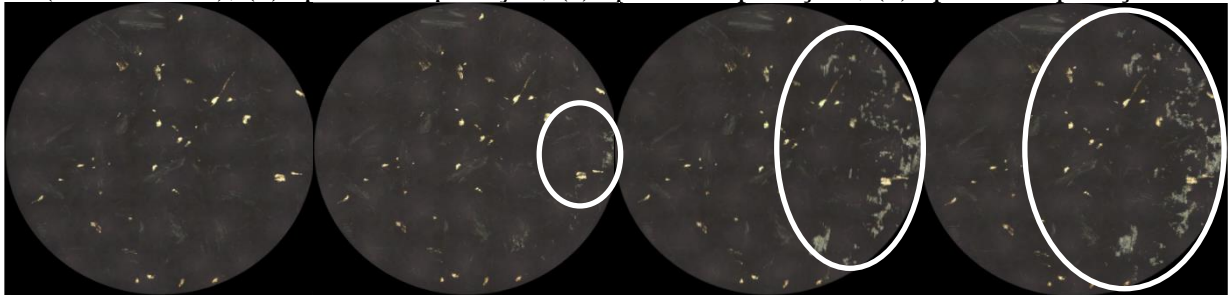
A partir desses resultados, percebe-se que o procedimento de ensaio empregado é capaz de determinar diferenças significativas entre a formulação v24 e as demais (v25 e v28). Entretanto, também percebe-se que ao utilizar apenas os valores médios de coeficiente de atrito estático (Tab. 5) para diferenciar e selecionar materiais não é adequado, pois pode ser cometido o erro de inferir que um material possui um atrito estático mais elevado do que outro, quando, estatisticamente, eles podem não ser diferentes. Dessa maneira, utilizar testes de hipótese para analisar os resultados é uma maneira mais confiável de se analisar os resultados.

#### 4.2. Análise de percentual de platôs

À medida que se aumentou o número de repetições de ensaio (ou de medições), foi possível observar um aumento visível da região de contato entre amostra e disco – isto é, na quantidade de platôs – conforme é percebido nas microscopias das superfícies das amostras v24.1 feitas durante o

ensaio (Figura 7). Também é possível perceber uma tendência de concentração da distribuição dos platôs no lado direito da amostra (observado nas microscopias de todos os corpos de prova), o que pode ser um indicativo de o atuador estar pressionando predominantemente o lado direito das amostras. Esse fenômeno também foi observado, visualmente, na comparação entre as macroscopias iniciais e finais das amostras, as quais podem ser observadas no apêndice A (Figuras A.1 e A.2). Nessas figuras (A.1 e A.2), a região de contato aparece em tons mais escuros, indicando que ali houve maior contato entre os corpos de prova e o disco.

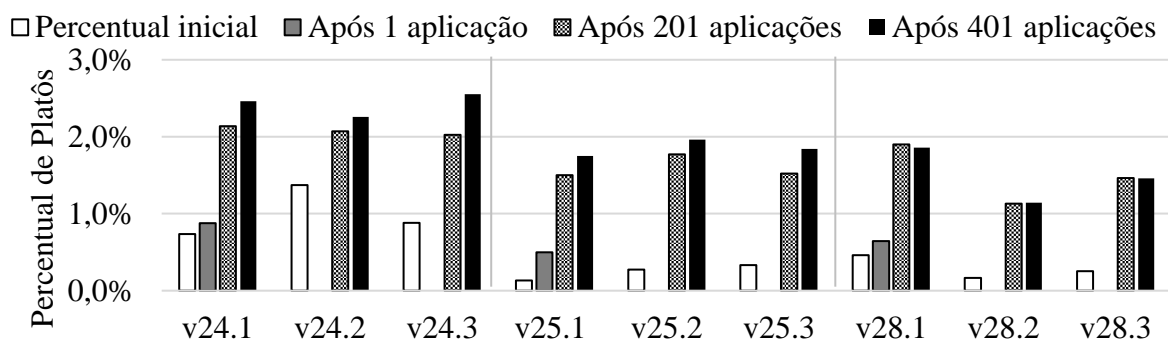
Figura 7 – Microscopias da amostra v24.1, evidenciando os platôs em branco para: (a) amostra nova (não ensaiada); (b) após uma aplicação; (c) após 201 aplicações; (d) após 401 aplicações



O percentual de platôs sobre a área nominal das amostras, obtido através do processamento das imagens, é apresentado na Fig. 8. É importante lembrar que a medição após 1 aplicação foi realizada apenas para as amostras v24.1, v25.1 e v28.1.

Percebe-se que o material que apresentou os valores mais baixos de coeficiente de atrito estático, v24 (Tab. 5), também apresentou os maiores percentuais de platôs (Fig. 8). Ainda na Figura 8, percebem-se diferenças entre os percentuais iniciais das amostras (gráfico branco), o que pode ser um indicativo de diferenças na distribuição dos componentes dentro dos corpos de prova como, por exemplo, fibras. Essa heterogeneidade dos materiais de fricção pode ser vista nas macroscopias da Figura A.1, no apêndice A. Ainda sobre o percentual inicial, como esse valor foi determinado antes de ocorrer o contato, estima-se que os platôs encontrados possam ter sido ocasionados devido ao processo de usinagem durante a confecção das amostras.

Figura 8 – Percentuais de platôs (inicial, após 1 aplicação, após as 201 aplicações e após as 401 aplicações) obtidos para as nove amostras



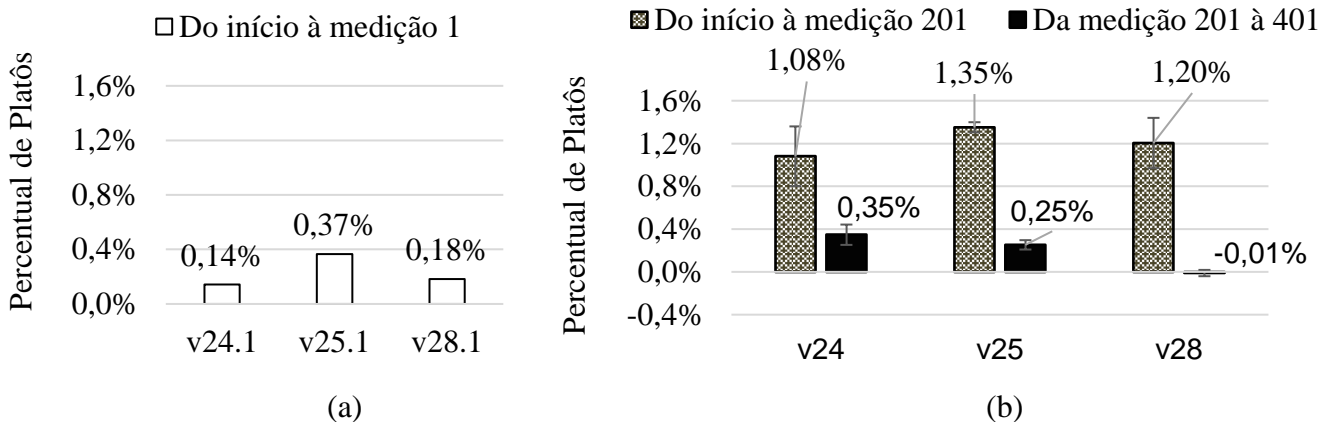
Em relação às variações percentuais de platôs, é possível perceber uma variação desigual entre os materiais após a primeira medição, conforme Fig. 9(a). Visto que todas as amostras foram submetidas às mesmas condições de ensaio, isso pode indicar que o aumento do percentual de platôs pode estar relacionado não apenas com os parâmetros de ensaio (como, por exemplo, pressão ou quantidade de aplicações), mas também com as características da formulação e com a homogeneidade da amostra.

As maiores variações percentuais de platôs, por sua vez, ocorrem do início à aplicação 201 para todas as amostras, como visto na Fig. 9(b). Observa-se também que, para o material v28, não houve



variação percentual da aplicação 201 à 401. Isso coincide com o fato desse material possuir o maior coeficiente de atrito médio nas últimas 200 aplicações.

Figura 9 – Variação percentual de platôs: (a) do início à medição 1 para as amostras v24.1, v25.1 e v28.1 e (b) para média das amostras v24, v25 e v28 nas primeiras e 201 medições e nas últimas 200.

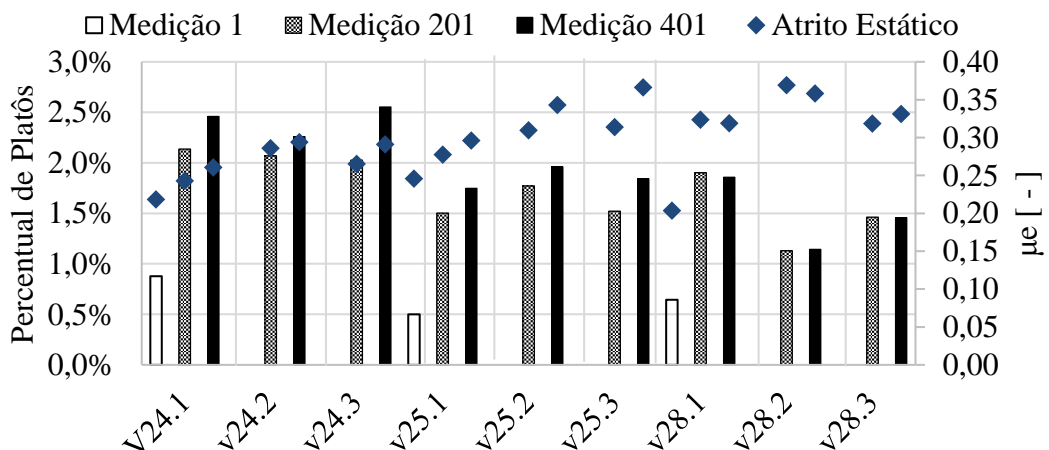


Logo, observa-se que o material que apresentou o maior aumento percentual nas últimas 200 medições (v24) também apresentou o atrito estático médio mais baixo, enquanto que o com maior atrito estático médio (v28) não apresentou aumento na variação do percentual de platôs. Esse resultado corrobora a necessidade de se buscar estabelecer correlações entre atrito estático e o aumento percentual de platôs.

### 4.3. Correlações entre atrito e percentual de platôs

Ao se analisar o coeficiente de atrito estático e a quantidade de platôs (Fig. 10), aparentemente percebe-se uma tendência em aumentar o atrito estático (marcador losango azul) com o aumento do percentual de platôs (gráfico de barras).

Figura 10 – Atrito estático ( $\mu_e$ ) representado pelo marcador losango e percentuais de platôs representados pelos gráficos de barras para cada uma das medições



Entretanto, apesar da aparente relação entre o aumento do coeficiente de atrito com o aumento da concentração de platôs, ao se aplicar a correlação de postos de Spearman (considerando-se todas as amostras), não se identifica correlação (p-valor menor do que 0,05). Isso pode ser observado na Tab. 10. Porém, quando se consideram os dados das amostras do material v25 isoladamente, uma correlação muito forte ( $\rho$  de Spearman maior que 0,8) é detectada. Para os materiais v24 e v28, não é identificada correlação (p-valor menor do que 0,05).

Tab. 10- Correlação de postos de Spearman entre atrito estático e percentual de platôs para: todos os materiais, amostras do material v24, v25 e v28

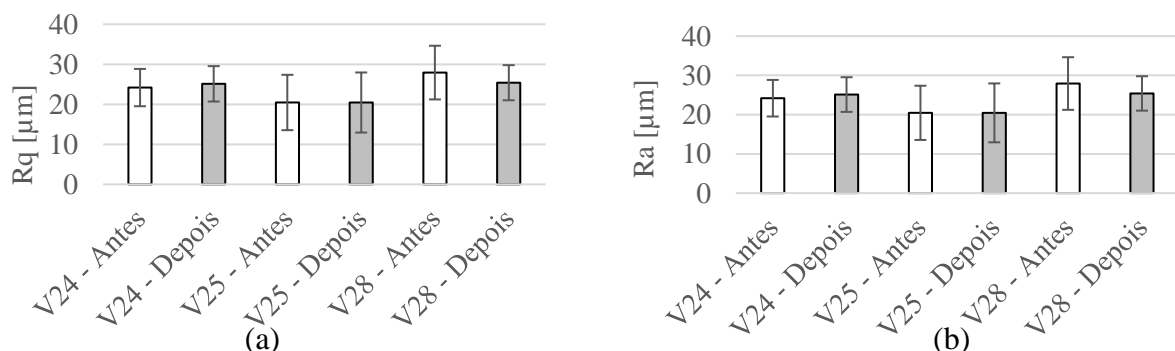
Comparativo entre formulações	p-valor	$\rho$ de Spearman	Com 95% de significância
Todos os materiais	0,819	-0,053	Não há correlação
Amostras do material v24	0,215	0,536	Não há correlação
Amostras do material v25	0,014	0,857	Correlação muito forte
Amostras do material v28	0,819	-0,107	Não há correlação

A partir desses resultados, é possível inferir que, apesar de não existir correlação quando todos os materiais são analisados, o fato de um dos materiais apresentar correlação muito forte ( $\rho$  de Spearman  $> 0,8$ ) pode indicar a possibilidade de existir uma correlação entre o coeficiente de atrito estático e o percentual de platôs e que, talvez, isso possa ser percebido estatisticamente caso se aumente o número de amostras dos outros materiais. Um dos aspectos interessantes desse resultado é o fato de que, na época em que Amontons e Coulomb postularam as leis do atrito, eles determinaram uma independência entre a área de contato aparente e o coeficiente de atrito, porém os parâmetros como área real de contato e rugosidade não foram considerados nesses estudos (POPOVA; POPOV, 2015). O resultado encontrado reforça a necessidade de se buscar um entendimento completo acerca da relação entre a área de contato real e o atrito dos materiais.

#### 4.4. Correlações entre atrito e rugosidade

A partir dos dados de coordenadas obtidos no scanner tridimensional foi possível realizar uma imagem topográfica da superfície. O processamento, em MATLAB, dessas imagens permitiu que a topografia fosse subdividida em diferenciais radiais, tornando possível o cálculo dos valores médios de rugosidade média (Ra) e desvio quadrático médio (Rq) de toda a superfície das amostras, antes e após os ensaios (Fig. 11). Percebe-se que existe pouca variação entre antes e após os ensaios, além do fato de o desvio padrão ser bastante elevado. Assim, como visto por Poletto (2018), não foi possível distinguir os materiais através do valor Rq.

Figura 11 – Rugosidades (a) Ra e (b) Rq das amostras antes e após os ensaios, medidas por meio de processamento das imagens do *scanner* 3D



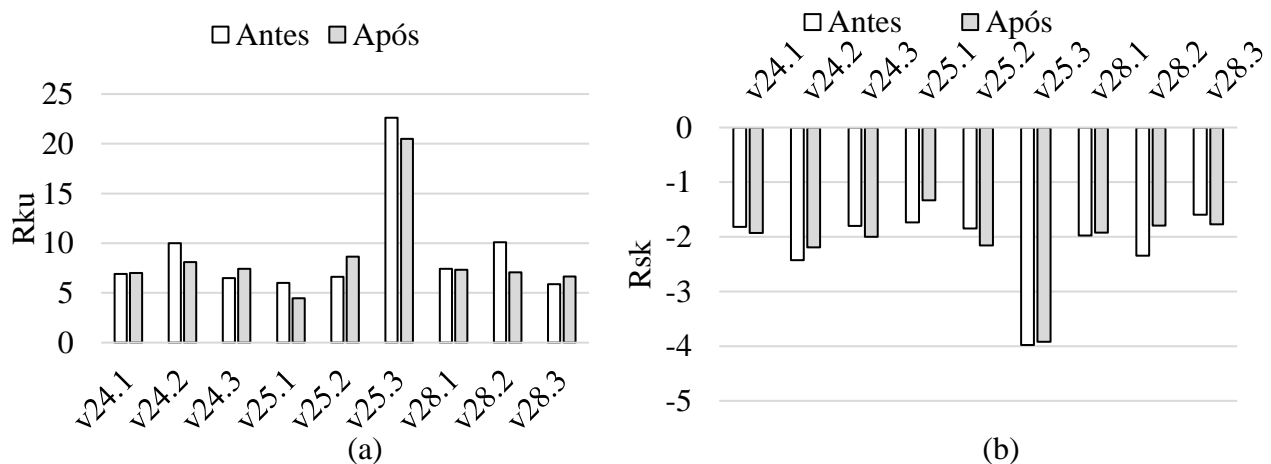
A fim de determinar se existem diferenças significativas entre as rugosidades médias (Ra) das amostras, realizou-se o teste de Kruskal-Wallis (Tab. 11). O resultado foi inconclusivo. Desta maneira, não se pode afirmar que existem ou não diferenças significativas entre os materiais ou se há variação significativa entre as rugosidades antes e após os ensaios.

Tab. 11- Teste de significância de Kruskal-Wallis para determinar diferenças de rugosidade das superfícies medidas antes e após os ensaios

Teste de Kruskal-Wallis		
Comparativo entre formulações	p-valor	Com 95% de significância:
Todas (antes) vs. todas (depois)	0,433	Inconclusivo
v24 antes vs. v24 depois	0,368	Inconclusivo
v25 antes vs. v25 depois	0,368	Inconclusivo
v28 antes vs. v28 depois	0,368	Inconclusivo

Ao se analisar os valores de curtose (Rku) dos materiais (Figura 12 (a)), percebe-se que todos os valores são maiores do que três (distribuição leptocúrtica), logo os picos e os vales tendem a ser mais agudos. Com um fator de assimetria (Rsk) menor do que zero, pode-se inferir que a amostra possui uma quantidade de vales maior do que picos (BOMTEMPO, 2018). Logo, como todas as amostras apresentam vales profundos antes e após os ensaios. Isso pode ser uma possível explicação de por que houve pouca variação entre o aumento do percentual de contato de platôs mesmo após 401 aplicações. Nesse caso, com pouca variação na topografia e morfologia, pode-se explicar os resultados encontrados para o teste de correlação entre atrito estático e platôs.

Figura 12 – Curtose (Rku) (a) e Fator de assimetria (Rsk) (b) das amostras antes e após os ensaios, medidas por meio do *scanner* tridimensional



A partir desse resultado, optou-se por analisar os histogramas de altura das asperezas das pastilhas (Fig. 13), com o objetivo de determinar se existem variações na distribuição das asperezas explicadas pela formação e remoção de picos após as 401 aplicações. Conforme observado na Fig. 13, as distribuições são assimétricas negativas e, portanto, apresentam poucos picos. Além disso, existem diferenças consideráveis entre os materiais: o material v28 (em preto) possui uma distribuição mais achatada do que os demais. Isso pode indicar que existe uma maior variação na profundidade dos vales desse material.

Ao se comparar as distribuições antes e após os ensaios, observa-se pouca variação. Logo, pode-se estimar que 401 aplicações não foram suficientes para alterar significativamente a topografia das superfícies, ou seja, o histórico de deslizamentos não foi suficiente para ocasionar uma deformação plástica das asperezas durante o contato. Isso pode ser observado na topografia da amostra v28.3 (Fig. 14), a qual ainda apresenta uma superfície bastante rugosa após o contato. Uma possível explicação para esse comportamento é a hipótese de que os platôs observados sejam platôs elásticos – também

chamados de *elastic highlands*. Tal estrutura de platôs foi descrita por Neis et al. (2017) como sendo formada por materiais com propriedades mecânicas elásticas e podendo ser constatada até mesmo após frenagens consideradas severas. Um fato interessante é que, nesse estudo, os autores destacam que essas estruturas apresentam pequenas regiões de contato de platôs, o que coincide com o pequeno percentual constatado na Figura 9(b) para o material v28. Entretanto, esses platôs deveriam contribuir significativamente para a força de atrito. O fato de o material v28 ter apresentado um dos coeficientes de atrito elevado reforça a ideia de que para estudos futuros seria interessante realizar testes de microdureza para confirmar se o comportamento observado realmente corresponde aos de platôs elásticos. Dessa maneira, o aumento do atrito estático indicaria um comportamento oposto ao que foi encontrado pelos autores para o atrito dinâmico.

Figura 23 - Histogramas de altura dos corpos de prova antes (linha tracejada) e após (linha contínua) os ensaios para os materiais: (a) v24, (b) v25 e (c) v28

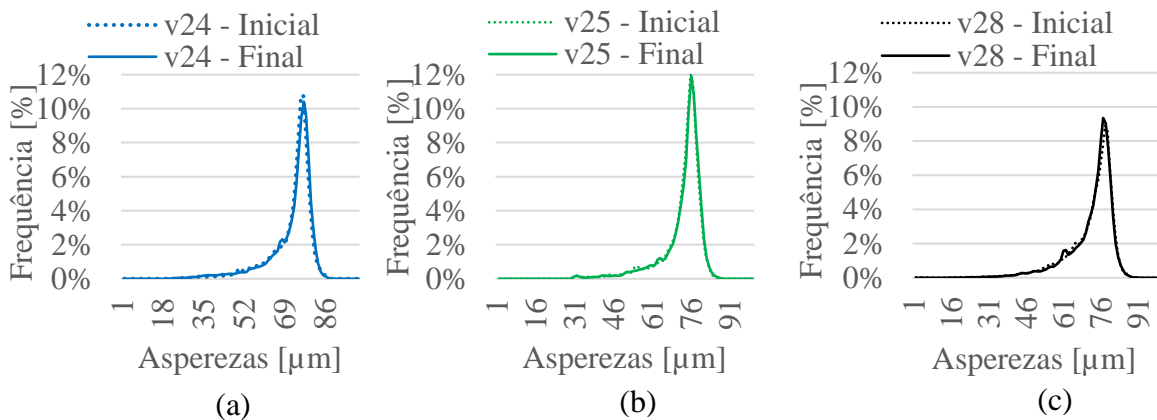
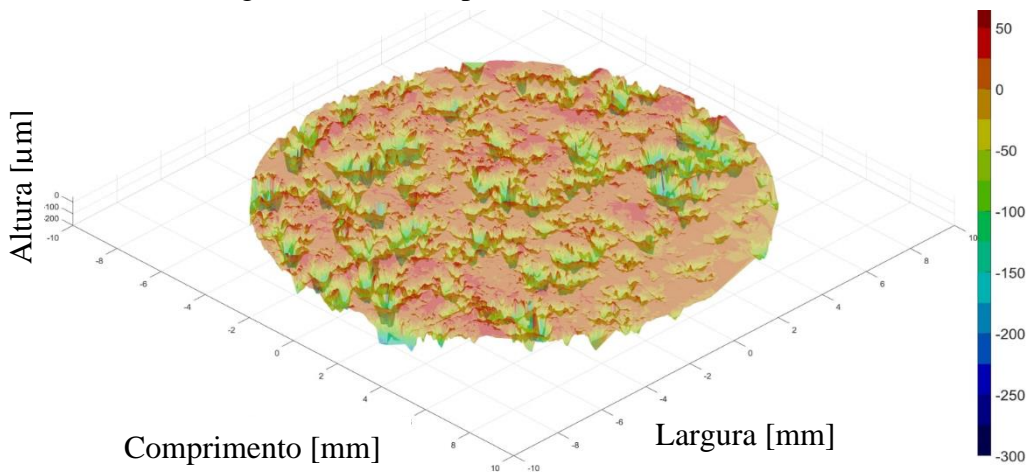


Figura 14 - Topografia da amostra v28.3 após o ensaio, evidenciando uma superfície bastante rugosa, mensurada pelo scanner tridimensional



#### 4.5. Correlações entre atrito e número de aplicações

Em relação aos resultados de correlação entre o atrito estático e o número de aplicações (Tab. 12), percebe-se que não existe correlação ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) quando a análise é realizada para cada material individualmente. No entanto, existe uma correlação moderada quando todos os dados são analisados ( $\rho$  de Spearman  $> 0,4$ ). Isso significa que um aumento no número de aplicações tende a aumentar o valor do coeficiente de atrito estático. Esse comportamento pode estar relacionado ao observado por

Sato (1997). Em seus estudos, o autor percebeu que existe uma relação entre a quantidade de deslizamentos com o atrito estático do par tribológico.

Tab. 12- Correlação de postos de Spearman para correlação entre atrito e número de aplicações

<b>Correlação Atrito versus número de aplicações</b>			
Comparativo entre formulações	p-valor	$\rho$ de Spearman	Com 95% de significância:
Todos os materiais	0,012	0,539	Correlação moderada
Amostras do material v24	0,083	0,694	Não há correlação
Amostras do material v25	0,083	0,694	Não há correlação
Amostras do material v28	0,296	0,463	Não há correlação

## 5. CONCLUSÕES

Como conclusões desse estudo, pode-se afirmar que: (i) o método adotado para medição de atrito estático é capaz de determinar diferenças estatísticas significativas entre formulações; (ii) existe uma correlação muito forte entre o aumento do atrito estático e a formação de platôs para um dos materiais analisados. Possivelmente, com o aumento do número de ensaios para mais amostras e/ou mais microscopias talvez essa correlação possa ser observada para as outras formulações; (iii) a correlação entre rugosidade e atrito é inconclusiva estatisticamente e todas as amostras apresentaram vales profundos desde o início dos ensaios; (iv) uma correlação moderada é observada entre o aumento do atrito estático e o aumento do número de aplicações.

Para estudos futuros, pode-se sugerir a investigação da relação do atrito estático com o aumento de temperatura das lonas. As relações entre efeitos de assentamento de superfície no material de fricção, aumento no número de aplicações e do número de microscopias durante os ensaios também podem auxiliar – em trabalhos futuros – em uma melhor avaliação entre a correlação do atrito estático com platôs e rugosidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASE, **Drum parking brakes**. Disponível em: <<https://www.freeasestudyguides.com/drum-parking-brake.html>>. Acesso em: 20 nov. 2019.
- BAKLOUTI, M. et al. **Brass in brake linings: key considerations for its replacement**. Journal of Engineering Tribology, pp 487-497, 2016.
- BARROS, L. **Análise da superfície de discos de freio automotivo durante frenagens**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso – UFRGS, Porto Alegre, 2015.
- BLAU, P.J. **Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives**. OAK Ridge National Laboratory. Technical Report, 2001
- BOMTEMPO, GV **Análise da rugosidade em amostras fabricadas por manufatura aditiva metálica e tipos de roscas para aplicações em implantodontia**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – UFU, Uberlândia, 2018.
- BRASIL. CONTRAN. Resolução nº 663, de 2017. **Requisitos necessários para circulação de Combinações de Veículos de Carga (CVC)**, Brasília, DF.
- BUNEDER, D. **Desenvolvimento e validação de metodologia para estimativa do coeficiente de atrito em um tribômetro**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – UFRGS, Porto Alegre, 2018.
- DUANJIE, L. **Static coefficient of friction measurement using tribometer**. 2014.
- ERIKSON, M. **Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal**. Uppsala: The Angstrom laboratory, 2000.
- FREE ASE STUDY GUIDES. **Drum parking brakes**. Disponível em: <<https://www.freeasestudyguides.com/drum-parking-brake.html>>. Acesso em: 20 nov. 2019.
- DUANJIE, L. **Static coefficient of friction measurement using tribometer**. 2014.
- JIANPING, G. et al. **Frictional Forces and Amontons' Law: From the Molecular to the Macroscopic Scale**. J. Phys, vol. 108, 2004.
- ISHAK, M.R. et al. **Brake torque analysis of fully mechanical parking brake system: theoretical and experimental approach**. Measurement, pp 487-497, 2016.
- LIMPERT, R. **Brake design and safety**. 3 ed. Society of Automotive Engineers, 1992.
- NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION. NHTSA: **Quick reference guide to federal motor vehicle safety standards and regulations**. 2010.
- NEIS, P.D. **Projeto e construção de um tribômetro com controle independente da temperatura do disco**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – UFRGS, Porto Alegre, 2012.
- NEIS, P.D. FERREIRA, N.F. FEKETE, G. MATOZO, L.T. MASOTTI, D. **Towards a Better Understanding of the structures existing on the surface of brake pads**. Tribology International, 2017.
- PACHECO, B. **Projeto preliminar de tribômetro linear recíproco**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – UFRGS, Porto Alegre, 2018.
- PIGEONSBLUE. **Drum brakes**. Disponível em: <<https://pigeonsblue.com/2014/04/25/drum-brakes/>>. Acesso em: 20 nov. 2019.
- POLETTI, J.C. **Desenvolvimento de um experimento com controle de excitação para análise da contribuição de materiais de fricção sobre vibrações induzidas na superfície de um disco de freio**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFRGS, Porto Alegre, 2018.
- POPOVA, E. POPOV, V. **The research works of Coloumb and Amontons and generalized laws of friction**. Friction, v. 3, pp 183-190, 2015.
- RUSNAK, R. M. SPURGEON, W. M. ALDRICH, F. W. **Friction material testing**. SAE International, v. 79, pp 1944-1952, 1970.
- SATO, J. et al. **Measurement of the friction of paper by the strip-on-drum method**. Tribology International, v. 30, pp 633-640, 1997.

ŚCIESKA, S.F. et al. **The importance of static friction characteristics of brake friction couple, and methods of testing.** Materials Science and Engineering, pp 137-148, 1996.

SILVEIRA, F.L. **Como usar o ângulo em percentagem.** Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=como-usar-o-angulo-em-percentagem>> Acesso em: 04 out. 2019.

STATSTUTOR. **Spearman's correlation.** Disponível em: <<http://www.statstutor.ac.uk/resources/uploaded/spearmans.pdf>> Acesso em: 04 out. 2019.

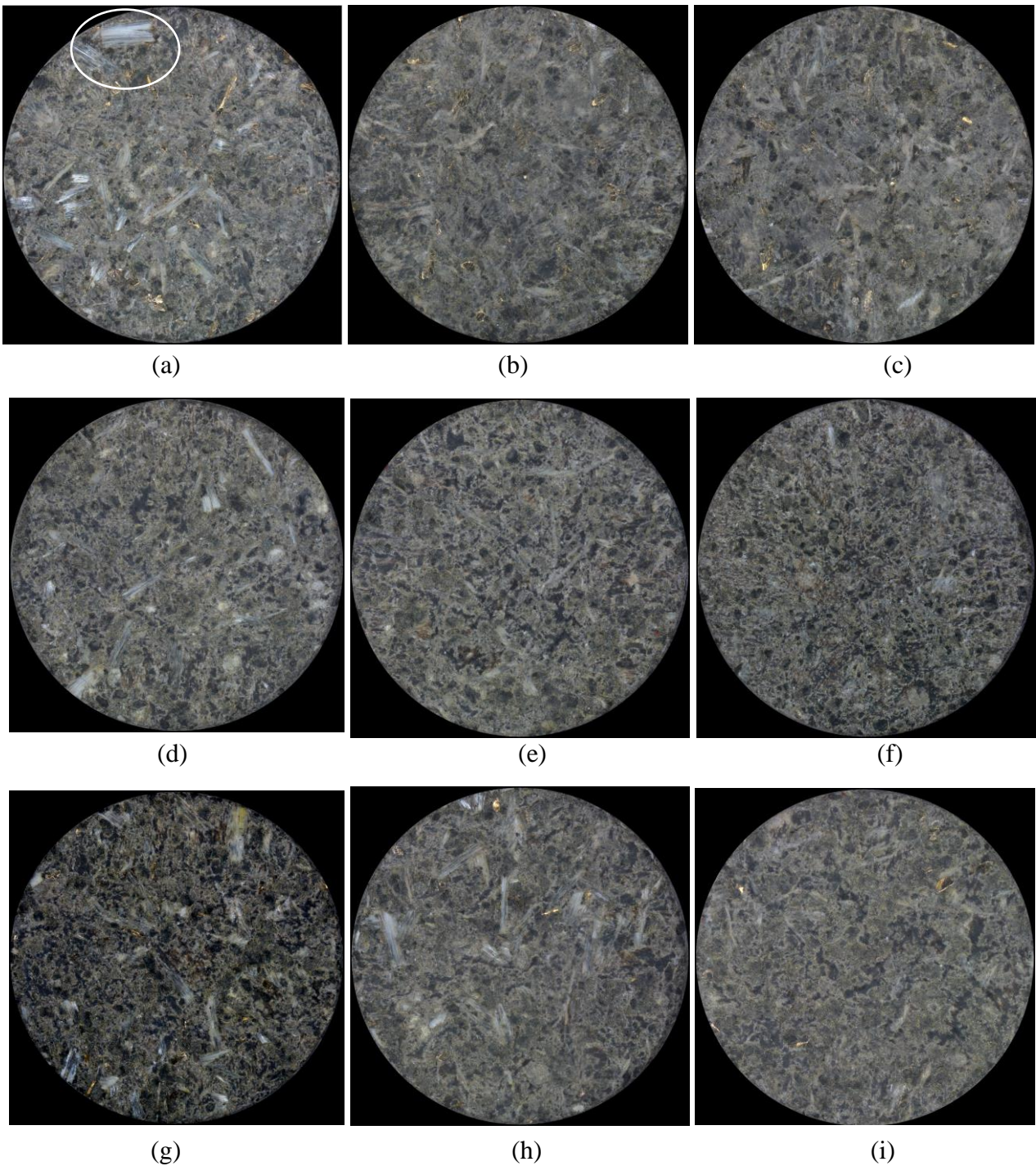
KASEM, H. ETSION, I. **Experimental study of the effect of dwell time and normal load on static friction in creeping elastic-plastic polymer spherical contact.** Wear, v. 309, pp 139-145, 2013.

## APÊNDICE A

### A.1. Macroscopias inicial das amostras

A heterogeneidade dos materiais de fricção é visualmente perceptível nas macroscopias das superfícies das amostras, conforme Figura A.1. Por exemplo, na Figura A1 (a), é possível perceber que a amostra v24.1 possui uma possível fibra na parte superior que não está presente nas amostras v24.2 e v24.3.

Figura A.1 – Macroscopia (antes dos ensaios) para as amostras: (a) v24.1, (b) v24.2, (c) v24.3, (d) v25.1, (e) v25.2, (f) v25.3, (g) v28.1, (h) v28.2 e (i) v28.3

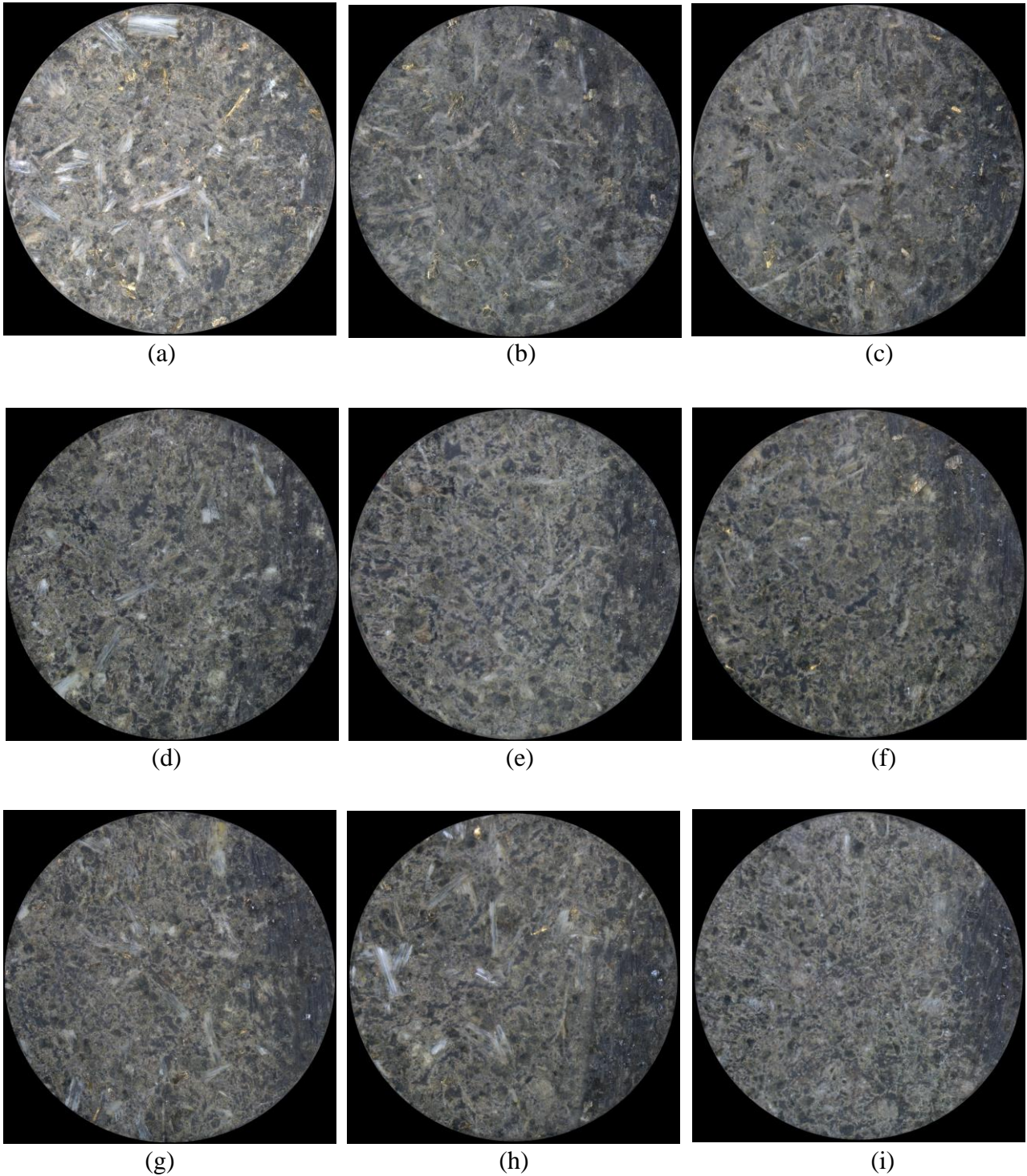




## A.2. Macroscopias final das amostras

Conforme discutido anteriormente, todas as amostras apresentaram uma concentração maior de platôs no lado direito. Isso pode ser percebido em todas as macroscopias das amostras após o término das aplicações (Fig. A.2) devido ao fato da superfície estar mais escura no lado direito do que no restante da amostra.

Figura A.2 - Macroscopia (após dos ensaios) para as amostras(a) v24.1, (b) v24.2, (c) v24.3, (d) v25.1, (e) v25.2, (f) v25.3, (g) v28.1, (h) v28.2 e (i)v28.3



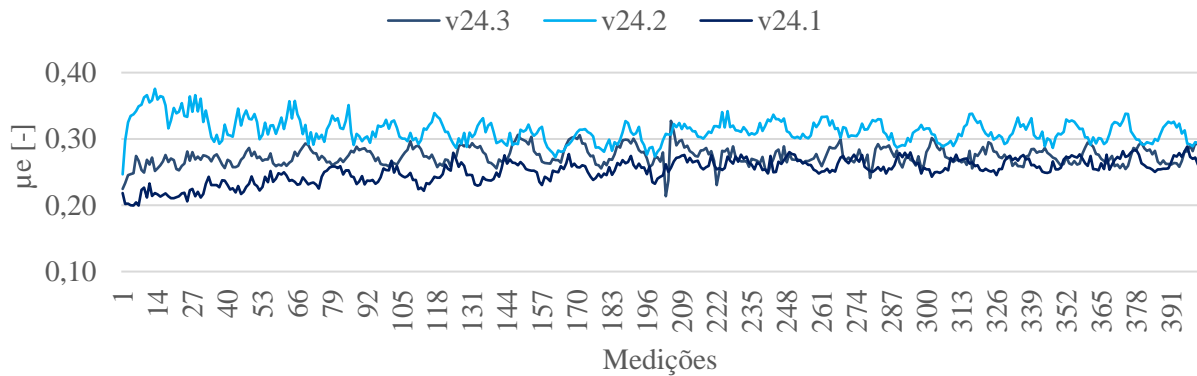
## APÊNDICE B

### B.1. Atrito estático para todas as amostras nas 401 medições

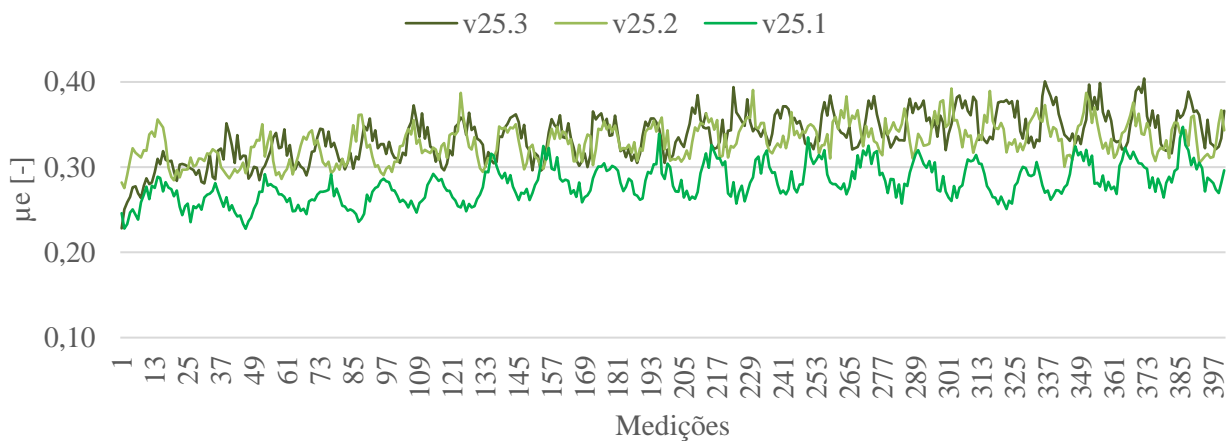
Os 401 valores de coeficiente de atrito estático para todas as amostras são apresentadas na Figuras B1.

Figura B.1 – Atrito estático para cada uma das 401 medições para as amostras dos materiais: (a) v24, (b) v25 e (c) v28.

A)



B)



C)

