



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Caracterização Físico-Tribológica De Materiais De Travagem

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projecto

Autor

José Pedro Santos Dias Marques

Orientadores

Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho

Doutor Pedro Alexandre de Almeida do Vale Antunes

Júri

Presidente Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes
Professor da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor João Miguel Maia Carrapichano
Professor do Instituto Politécnico de Coimbra

Orientador Doutor Pedro Alexandre de Almeida do Vale Antunes
Investigador auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Fevereiro, 2015

“O conhecimento une cada um consigo mesmo e todos com todos.”

José Saramago, em Diário de Notícias, 2009.

Aos meus pais.

Agradecimentos

Aos meus pais, por possibilitarem que me fossem proporcionados todos os momentos e conhecimentos vividos.

Aos meus irmãos, por me apoiarem desde o início.

Ao meu tio Belmiro, pela inspiração.

À minha namorada, Bárbara, pela força, dedicação e paciência.

Aos meus colegas e amigos, Gonçalo Mira e Alexandre Pires, por nos ajudarmos mutuamente e partilharmos momentos académicos e pessoais.

Ao Sr. Fernando, das Oficinas, pela ajuda e disponibilidade.

Aos meus orientadores, principalmente ao Doutor Pedro Vale Antunes, por ter sido quem me acompanhou mais de perto e me indicou o caminho a traçar, tornando-se um exemplo a seguir. Sem descurar, claro, o agradecimento ao Professor Doutor Amílcar Ramalho, pela simpatia, preocupação e por todos os excelentes e mais variados conhecimentos transmitidos.

Resumo

A finalidade dos travões é desacelerar o veículo, através da transformação da energia cinética em calor, dissipando para o meio através do atrito. Os materiais de travagem fazem parte integrante de veículos pesados ou ligeiros e, têm, por isso, requisitos específicos, tais como: a resistência à corrosão, peso reduzido, longa vida, baixo ruído, atrito estável, baixa taxa de desgaste, e uma relação aceitável entre custo e desempenho. Existem dois tipos de sistemas de travagem – travões de tambor/calços e travões de disco/pastilhas. De modo a atingir o desempenho necessário, a maior parte dos materiais de atrito não são constituídos por um único elemento ou composto, antes são materiais compósitos. Mais de 2000 materiais diferentes e suas variantes são actualmente usados em componentes comerciais para pastilhas de travão. No que diz respeito à sua função, os materiais de travagem são classificados em quatro categorias principais: matriz, conhecido como material de ligação, fibras, modificadores de atrito e materiais de enchimento/reforço [1]. A matriz é o núcleo do compósito pois tem a função de aglomerar firmemente todos os ingredientes, de modo a que cada um desempenhe a sua função de material de atrito. As fibras, por sua vez, são adicionadas para uma maior resistência, enquanto os modificadores de atrito são usados para manipular a gama de coeficiente de atrito desejado. Os materiais de enchimento/reforço pretendem manter o coeficiente de atrito numa gama elevada de temperaturas, e também, reduzir custos.

Os fabricantes de material de atrito reivindicam excelente resistência ao desgaste mas não dão garantias de uma determinada vida útil dos seus produtos, e, raramente publicam dados relativamente ao desgaste dos materiais por eles produzidos. Os ensaios à escala de material de travagem é muito demorado e muito custoso. Deste modo, existem inúmeros testes a escala reduzida que permitem a comparação, mais rápida, de diferentes formulações. Este tipo de equipamento não permite simular e obter resultados idênticos aos obtidos pelos materiais em serviço.

Para além da complexidade dos materiais de atrito para travagem, a sua caracterização mecânica e tribológica também é difícil. A presente dissertação tem, como objectivo principal, a caracterização mecânica e tribológica de quatro materiais de desgaste

de travagem - pastilhas - para veículos pesados, sendo estes o *ACERCHINA*, o *ATV 55*, o *FRASLE FLE1749* e o *JURID FF29*. Para o efeito foi usado um equipamento a uma escala reduzida que permitiu variar os parâmetros que mais influenciam a travagem, e, controlar a temperatura e a força de atrito das pastilhas em estudo. Nos ensaios tribológicos foram usadas três velocidades de travagem e três forças normais. Como *outputs* foram obtidas as temperaturas das pastilhas e a força de atrito ao longo do ensaio. O desgaste de cada conjunto de pastilhas ensaiado foi determinado através de pesagem. A comparação do desempenho das formulações foi realizada através da representação gráfica de força e coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento, bem como os volumes de desgaste de todas as condições e materiais. Por forma a complementar a caracterização tribológica, e para auxiliar a compreensão dos resultados, foram determinados os valores de dureza, densidade e o módulo de elasticidade para várias temperaturas.

As amostras ensaiadas foram também observadas através de microscopia óptica e microscopia electrónica de varrimento.

Genericamente, observou-se, para todos os materiais, que o volume de desgaste, para a mesma pressão, sofria um aumento quando a velocidade de escorregamento aumentava. O volume desgastado aumentava ainda mais quando se mantinha a velocidade e se aumentava a pressão. Em alguns materiais, mas apenas em algumas condições de ensaios, ocorreu uma diminuição abrupta da força de atrito e conseqüentemente diminuição da temperatura da pastilha. Outros materiais registaram um ruído agudo na maior parte dos ensaios. No que concerne às propriedades mecânicas, o módulo de elasticidade de todas as pastilhas diminuiu com o aumento da temperatura. Com o aumento da dureza das pastilhas verifica-se um aumento do desgaste específico [mg/MJ].

As formulações com melhor desempenho foram: o *JURID* no coeficiente de atrito, por registar valores mais elevados; o *ATV* na temperatura, por dissipar melhor a energia térmica; e o *FRASLE* no volume de desgaste, por ter valores mais reduzidos de desgaste volúmico e o único dentro dos valores de referência do desgaste específico.

Palavras-chave: Pastilhas de Travão, Ensaio Tribológico, Desgaste Específico, Módulo de Elasticidade.

Abstract

The main purpose of brakes is to decelerate vehicles, by dissipating the kinetic energy into heat to the environment through friction. Braking materials are an integral part of heavy or light vehicles, and therefore have specific requirements, such as corrosion resistance, low weight, long life, low noise, stable friction, low wear rate, and an acceptable relation between cost and performance. There are two types of braking systems - brake drum/shoes and brake disc/pads. In order to achieve the required performance, most of the friction material are not constituted by a single element or compound, but by several components, they are composite materials. More than 2000 different variants of materials are currently used in commercial components for brake pads. With regard to its function, brake materials are classified into four major categories: matrix or binder material, fibers, friction modifiers, and fillers/reinforcements. Binder is the heart of a system which binds the ingredients firmly so that they can perform the desired function in the friction materials. Fibers in combination are added mainly for strength, while friction modifiers are used to manipulate the desired range of friction. Fillers/reinforcements are intended to maintain the friction coefficient in a high temperature range and also reduce costs.

Friction material manufacturers claim excellent wear resistance but do not guarantee a certain life span of their products, and, rarely publish data regarding the wear of the materials they produce. Braking material test to scale are time consuming and very expensive. Thus, there are numerous small scale tests which allow a faster and inexpensive comparison between different formulations. This type of equipment cannot simulate and obtain results identical to those obtained for the materials in service.

In addition to the complexity of brake friction material its tribological and mechanical characteristics is also problematic. The main objective of the present work is the mechanical and tribological characterization of four braking wear materials - pads - for heavy vehicles. Regarding this objective, a small scale tribometer was used to allow a parametric study on braking, and to control pads temperature and the friction force. In the tribological tests were used three sliding speeds and three normal forces. Pads temperature and friction force were the outputs of the tests. Wear volumes for each set of pads tested was

determined by weighing. The performance comparison of formulations was done by plotting the friction force versus slip distance, and the evaluation of material removed by wear of all wear conditions and material formulation. In order to complement the tribological characteristics, and aid the understanding of the results, hardness values and density were determined. The elastic modulus was determined for various temperatures.

The test samples were also observed in an optic microscope and a scanning electron microscope.

Generally, all materials have an increase in wear volume, for the same normal pressure, when the sliding speed increases. A bigger amount of volume was worn when, at constant sliding speed, the normal pressure increased. Some materials, for determined test conditions, have a clear decrease of the friction force and consequently decreasing in pads temperature. Other materials squealed in most tests. For what mechanical properties concerns, the elastic modulus of all the pads decreased with increasing temperature. An increase in pads hardness presented an increase in specific wear [mg/MJ].

The formulations with best performances were: *JURID* in friction coefficient, for the higher achieved values; *ATV* in temperature, due to dissipate the thermal energy better than the other formulations; and *FRASLE* for volume wear, for being the one with the lowest values of volume worn during the tests and the only one to keep its values within the ideal in specific wear.

Keywords Brake Pads, Tribological Test, Specific Wear, Elastic Modulus

Índice

Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas	x
Simbologia e Siglas	xi
Simbologia.....	xi
Siglas	xii
1. Introdução.....	1
2. Revisão bibliográfica.....	3
2.1. Evolução dos Materiais de Atrito	3
2.2. Materiais de Atrito	7
2.3. Caracterização tribológica	10
2.4. Caracterização mecânica.....	12
3. Materiais, equipamentos e técnicas experimentais.....	15
3.1. Materiais Usados.....	15
3.2. Equipamentos e técnicas experimentais	17
3.2.1. Sistema Mecânico de Simulação de Travagem	17
3.2.2. Ensaio de Dureza Brinell, HB	26
3.2.3. Ensaio do Módulo de Elasticidade	28
3.2.4. Densidade, ρ	30
4. Apresentação e análise de resultados.....	32
4.1. Ensaio tribológicos.....	32
4.2. Dureza Brinell.....	47
4.3. Módulo de elasticidade	48
4.4. Densidade.....	49
5. Conclusões e trabalhos futuros	50
5.1. Conclusões	50
5.2. Trabalhos futuros	52
Referências bibliográficas	53
ANEXO A	55
ANEXO B	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Sistema de travagem de: a) disco; b) tambor (sem cobertura exterior).....	7
Figura 2.2 Gráfico do desgaste específico em função da temperatura do tambor/disco [4].	11
Figura 3.1 Superfície polida da pastilha <i>ACERCHINA</i> (visualizado no microscópio óptico).....	15
Figura 3.2 Superfície polida da pastilha <i>ATV 55</i> (visualizado no microscópio óptico).	16
Figura 3.3 Superfície polida da pastilha <i>FRASLE FLE1749</i> (visualizado no microscópio óptico).....	16
Figura 3.4 Superfície polida da pastilha <i>JURID FF29</i> (visualizado no microscópio óptico).	16
Figura 3.5 Amostras de material de travagem (A) aplicados em ambos os suportes.	17
Figura 3.6 Sistema acoplado a torno mecânico onde é realizado ensaio tribológico.	18
Figura 3.7 Ponto de aplicação de carga nas pastilhas durante o ensaio tribológico.	18
Figura 3.8 Condições pressão-velocidade de ensaio tribológico.....	19
Figura 3.9 Placa de aquisição de dados que serve de <i>interface</i> para aquisição dos sinais produzidos na célula de carga e no termístor.	19
Figura 3.10 Célula de carga montada no sistema de ensaio tribológico.	20
Figura 3.11 Termístor usado no ensaio tribológico.....	21
Figura 3.12 Termopar usado no ensaio tribológico.....	21
Figura 3.13 Termístor aplicado no interior da pastilha.	24
Figura 3.14 Gráfico de auxílio no cálculo do trabalho da força de atrito.....	25
Figura 3.15 Ensaio de dureza em face não polida.	27
Figura 3.16 Ensaio de dureza a 490 N, com uma esfera de 10mm, durante 60s.....	27
Figura 3.17 Faixas de corrector aplicado na face de ensaio para melhor visualização e cálculo.	27
Figura 3.18 Medição das indentações através do uso no microscópio óptico com mesa micrométrica.....	28
Figura 3.19 Esfera de 4 mm aplicado na extremidade de um corpo flexível para auxílio no ensaio do módulo de elasticidade.....	29
Figura 3.20 Ensaio do módulo de elasticidade à temperatura ambiente.	30
Figura 3.21 Montagem para o ensaio do módulo de elasticidade na mufla a temperaturas mais elevadas.....	30

Figura 3.22 Sistema de pesagem de amostra: a) a seco; b) submerso.	31
Figura 4.1 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento. .	32
Figura 4.2 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.....	33
Figura 4.3 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento. .	34
Figura 4.4 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.....	34
Figura 4.5 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento. .	35
Figura 4.6 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.....	35
Figura 4.7 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento. .	36
Figura 4.8 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.....	36
Figura 4.9 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento. .	37
Figura 4.10 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.....	37
Figura 4.11 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.	38
Figura 4.12 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.....	38
Figura 4.13 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.	39
Figura 4.14 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.....	39
Figura 4.15 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.	40
Figura 4.16 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.....	40
Figura 4.17 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.	41
Figura 4.18 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.....	41
Figura 4.19 Volume de desgaste para as várias velocidades e pressões das pastilhas: a) <i>ACERCHINA</i> ; b) <i>ATV 55</i>	42
Figura 4.20 Volume de desgaste para as várias velocidades e pressões das pastilhas: a) <i>FRASLE FLE1749</i> ; b) <i>JURID FF29</i>	42
Figura 4.21 Aproximação linear na influência da dureza no desgaste específico. Valores do ensaio a 4 m/s e 0,5 MPa.....	44
Figura 4.22 Aproximação linear da relação entre a dureza e a densidade de todos os materiais.	44
Figura 4.23 Imagens de microscópio óptico de varrimento das superfícies de material de travagem: a) <i>ACERCHINA</i> a 6 m/s e 0,5 MPa; b) <i>ATV 55</i> a 12 m/s e 0,7 MPa....	45

Figura 4.24 Imagens de microscópio óptico de varrimento das superfícies de material de travagem: a) <i>FRASLE FLE1749</i> a 6 m/s e 0,5 MPa; b) <i>JURID FF29</i> a 12 m/s e 0,7 MPa	46
Figura 4.1 Valores médios do módulo de elasticidade para os vários materiais em função da temperatura.	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 Valores de temperatura usados para ensaio do módulo de elasticidade.	29
Tabela 4.1 Resultados gerais do desgaste específico [mg/MJ].	43
Tabela 4.2 Coeficientes de atrito médio de cada material em cada ensaio.	44
Tabela 4.3 Dureza Brinell e desvio padrão relativos aos 5 ensaios para cada material.	47
Tabela 4.4 Valores de ensaio de densidade.	49

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

- b – largura do provete
 D – diâmetro da esfera
 d – diâmetro da indentação
 d_E – distância de escorregamento
 d_d – diâmetro do disco de travão
 $desg_{esp}$ – desgaste específico
 $desg_{mas}$ – desgaste de massa
 E – módulo de elasticidade
 E_C – energia cinética
 F_a – força de atrito
 F_C – força aplicada na célula de carga
 f_f – frequência fundamental
 F_N – força normal
 h - profundidade da indentação
 HB – dureza Brinell
 k – constante de rigidez das molas
 k_{eq} – constante de rigidez equivalente
 L – comprimento do provete
 l_i – comprimento livre das molas
 m – massa
 m_a – massa aparente do corpo
 m_C – massa do corpo a seco
 S – dimensão da indentação
 S_C – sinal emitido pela célula de carga
 T_1 – factor de correcção
 t_b – espessura do provete

t_e – tempo de ensaio

V – volume

v – velocidade

v_e – velocidade de ensaio

W_{F_a} – trabalho da força de atrito

ε – deformação

μ – coeficiente de atrito

ρ – densidade

ρ_C – densidade do corpo

ρ_F – densidade do fluído

σ – tensão longitudinal

Siglas

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

SEM – *Scanning Electron Microscopy*

ASTM – American Society for Testing and Materials

1. INTRODUÇÃO

Em todos os objectos que, como um veículo, estejam em movimento, existe uma dada energia cinética, E_C , dependente da massa, m , e da velocidade, v .

$$E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (1.1)$$

Para desacelerar ou parar o veículo, a energia cinética, que o fazia mover-se, terá que ir para algum lado. Esta energia será, assim, dissipada sob a forma de calor, durante o processo de travagem. Deste modo, e aplicando este princípio aos automóveis, além do motor, os principais e mais usados sistemas de travagem são: travagem por disco e pastilhas, e travagem por tambor e calços, sendo que, de forma geral, se usam pastilhas no disco dianteiro e calços no eixo traseiro. As pastilhas e os calços de travão de um automóvel são dos elementos mais importantes, senão mesmo os mais importantes, no sistema de travagem, pois são eles os intermediários entre o movimento das rodas, que estão em constante rotação, e a carroçaria, com a qual estão solidários. Praticamente desde o aparecimento dos automóveis que estes materiais, as pastilhas e os calços, têm estado presentes, pelo que, ao longo dos anos, e com o acumular das exigências da condução segura, vários estudos e modificações têm sido realizados, de modo a obter materiais cada vez mais eficientes e, se possível, mais económicos e com poucos inconvenientes para a saúde pública.

Sendo possível produzir estes materiais com vários tipos de elementos e inúmeras combinações entre eles, e num mundo em que a competição industrial é cada vez maior, cada produtor faz os possíveis por obter as melhores combinações, no mínimo tempo possível, sem divulgar os resultados nem componentes e processos usados. Esta falta de partilha faz com que os materiais não evoluam tanto como poderiam e cada produtor desenvolve os seus próprios estudos para tentar acompanhar a concorrência.

A finalidade deste estudo é sujeitar quatro materiais, fornecidos por uma empresa, a *Auto Travões Viseu – Recondicionamento de Travões e Embraiagens, Lda*, a

testes que os caracterizem mecânica e tribologicamente. Esta mesma empresa, a qual é a única a produzir as suas próprias formulações em Portugal, tem interesse em saber e comparar o comportamento do seu material, *ATV 55*, relativamente aos restantes. Para isso, foi necessário submeter estes materiais a diversos testes mecânicos, por forma a obter valores das seguintes propriedades: dureza, módulo de elasticidade e densidade. No que diz respeito ao comportamento no ensaio tribológico, os parâmetros obtidos foram o volume de desgaste, a temperatura e o coeficiente de atrito.

Após a obtenção desses valores, foi feita uma comparação entre os materiais para se poderem retirar ilações qualitativas de cada um, sendo indicados os materiais com melhor desempenho em cada área: coeficiente de atrito, temperatura e desgaste. Quanto ao coeficiente de atrito, o *JURID* foi o material com melhor desempenho, por registar valores mais elevados. Relativamente à temperatura, o *ATV* foi o que melhor se comportou, por dissipar melhor a energia térmica. E finalmente, no que respeita ao volume desgastado, o *FRASLE* foi o melhor material, por ter valores mais reduzidos de desgaste volúmico e o único dentro dos valores de referência do desgaste específico.

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos. O primeiro trata a introdução ao tema.

No segundo capítulo é tratada a revisão bibliográfica dos materiais de travagem, para clarificar quais os conhecimentos obtidos até aos dias de hoje.

No terceiro capítulo são apresentados os materiais, equipamentos e técnicas usadas durante todo o estudo, desde a preparação até à realização de cada ensaio.

No quarto capítulo, podem ser observados os resultados, tal como a sua análise detalhada.

Finalmente, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões de todo o estudo, e possíveis melhoramentos a realizar em trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE MATERIAIS DE TRAVAGEM

Os sistemas de travagem de um veículo são constituídos por um componente, que geralmente se desgasta a uma taxa mais elevada, e um outro componente, solidário com o eixo de rotação, que serve como superfície para criar atrito e reduzir a velocidade a que o veículo se desloca. Os materiais de atrito têm vindo a sofrer sucessivas alterações desde a altura em que surgiram, de modo a obter composições cada vez mais eficazes. Para verificar o desempenho de cada composição, são realizados vários ensaios mecânicos, que permitem obter parâmetros como o módulo de elasticidade, a densidade e a dureza, e também ensaios tribológicos, nos quais se pode obter o coeficiente de atrito e o volume de desgaste.

2.1. Evolução dos Materiais de Atrito

Dada a necessidade dos veículos possuírem sistemas que permitissem abrandar e parar o seu movimento, os mesmos sofreram variadas modificações na sua evolução ao longo do tempo. Inicialmente, era usado pele/couro para friccionar as rodas de madeira das carroças de modo a abrandar os veículos. Mais tarde, nos anos iniciais de 1800, foram desenvolvidos os comboios a vapor, os quais atingiam maiores velocidades, e tinham uma maior massa, o que implicaria mais carga a ser aplicada, logo novos materiais tiveram que ser introduzidos, neste caso o ferro e o aço. Posto isto, em 1878, o capitão D. Galton realizou testes para verificar a capacidade destes materiais [1].

No final do século XIX, surgiram então os primeiros automóveis, com uma baixa velocidade máxima. Estes possuíam uma alavanca que empurrava uma sapata contra a roda, promovendo a travagem. Com a evolução dos automóveis, os seus componentes tiveram que os acompanhar, o que no caso dos sistemas de travagem significou a produção de material em laboratório logo no ano de 1897, por parte de Herbert Froad, usando fibras de algodão e fios de latão, os quais tinham como elemento ligante soluções betuminosas, criado assim a *Ferodo Company*, empresa que perdurou até aos dias de hoje. Ao usar uma fibra natural

como o algodão, as propriedades tribológicas (coeficiente de atrito e desgaste) sofriam alterações prejudiciais ao desempenho, de forma abrupta, com a temperatura acima dos 150 °C, havendo como consequência a ruptura do material [1].

Uma década depois, de modo a colmatar essa fragilidade, fibras de amianto foram aplicadas, transformando-se na base fulcral de praticamente todos os materiais de atrito durante largos anos. Tinham inúmeras vantagens, como a sua facilidade de tecelagem, maior resistência mecânica, flexibilidade, resistência à temperatura, óptimas propriedades tribológicas e a vasta compatibilidade dos vários elementos ligantes, o que permitiu a estas fibras de amianto ou crisótilo serem conjugadas com outros materiais para melhorar a capacidade do produto, tal como o coeficiente de atrito. Este coeficiente, que acompanha a variação da força de atrito e depende, entre outros factores, da hidrofobicidade do material, tal como demonstra Lee *et al.* [2], é, geralmente, o parâmetro que define resumidamente um material de atrito. Designa também a capacidade de abrandar a velocidade a que roda o eixo, pois quanto maior for o seu valor mais eficaz vai ser a travagem. Por vezes, dependendo de outros factores, um maior coeficiente tem como consequência maiores quantidades de energia térmica transmitida ao disco e restantes componentes, piorando a situação em casos que a condutividade térmica seja elevada.

Mais tarde, começaram a ser testados materiais moldados, sendo Blume um dos pioneiros, realizando este método em 1926 [3]. A composição consistia em usar fibras de crisótilo mais curtas, partículas de latão em detrimento dos fios, borracha de asfalto e um carvão betuminoso cuja volatilidade fosse alta e emissão de partículas fosse baixa.

Já nos anos 30, dado o incremento de estudos na área, começaram a ser produzidas resinas mais flexíveis e com maior resistência ao calor. Também nesta época foram adicionadas camadas de borracha ao amianto e aos entrançados de algodão. Nos finais desta década era já possível laminar, dobrar e extrudir compostos de fibra de amianto e borracha. Permanecendo mais estabilizada a evolução destes materiais durante a época dos anos 40, talvez devido à guerra mundial originar novas prioridades na investigação, a mudança mais próxima ocorreu já na década de 1950, em que foi formulado um material composto por novas resinas ligadas a partículas metálicas, as quais eram constituídas maioritariamente por lã de aço e grafite, originando as pastilhas de base metálica que tiveram sucesso nas suas aplicações industriais e aeronáuticas.

A década em que talvez se deu mais ênfase e se despendeu mais recursos para investigar estes materiais foi a de 1960, o que se deveu, e muito, ao aparecimento do ramo automóvel e à necessidade de segurança na travagem. Já no início desta época se tentava encontrar substituto à altura do amianto, devido a ser um material esgotável e não existir um padrão de qualidade na sua aquisição, e tudo isto iria aumentar o preço de compra e venda. Foram então produzidos materiais para sistemas de travagem compostos por fibras minerais, metálicas, de vidro e no final da década usou-se também carvão e sintetizaram-se outro tipo de fibras. Estas últimas fibras, as quais eram designadas de semi-metálicas, tinham um desempenho mais elevado do que as de amianto, tendo em conta o coeficiente de atrito mas, tinham também as suas desvantagens, pois, ao serem compostas por elementos metálicos, a condução do calor era maior e era transferida mais energia para as pinças e para o líquido dos travões, o que poderia influenciar negativamente o processo de travagem. Sabendo tudo isto, no final dos anos 60, a sociedade já se preocupava com a possibilidade de o amianto ser prejudicial para a saúde pública e para o ambiente do planeta, pelo que algumas empresas deixaram de usar compostos com este material, continuando outras a usá-lo. Mais tarde, com a evolução do projecto e engenharia dos automóveis nos anos 80 e o aparecimento da tracção dianteira, em que as rodas eram de menor tamanho, os veículos mais aerodinâmicos e a velocidade máxima mais elevada, houve uma necessidade urgente de produzir novos materiais de travagem que fizessem frente à energia que era então gerada pelos automóveis, de forma a conseguir abrandá-los de forma eficiente. Com estas novas investigações, foi possível produzir materiais com menor condutividade térmica do que os semi-metálicos, mas, ainda assim, com um bom desempenho.

Os anos que se seguiram a 1990 marcaram um esforço por parte de todos os fabricantes em obter produtos com compostos não prejudiciais à saúde e ao ambiente. O objectivo era conseguir produzir materiais orgânicos que mantivessem as propriedades de atrito exigidas para uma boa segurança na sua aplicação, se possível de forma independente da temperatura de serviço, e que se desgastassem sem danificar a outra superfície de contacto. Com o avançar das investigações, foi possível obter materiais para sistemas de travagem com ainda melhores desempenhos e com menos inconvenientes ambientais, havendo, no entanto, fabricantes que continuaram a usar o amianto, sendo controlados por normas de segurança para garantir limites máximos de quantidade usada. O amianto é, por si só, um material altamente prejudicial, principalmente para quem trabalha em ambientes

em que a sua concentração é maior, tais como trabalhadores em oficinas, mas, outros dois constituintes que podem prejudicar a saúde de quem trabalha com estes materiais é o pó de Barite, facilmente encontrado nestes materiais [4]; e o antimónio, também usado em algumas composições, e sobre o qual já foram realizados estudos, de modo a reduzir o seu uso, tal como é o caso do estudo realizado por Uexküll [5]. Até há relativamente pouco tempo, existiam muitos materiais que continham ainda amianto na sua composição, o qual teve que ser retirado forçosamente devido a normas mais rigorosas que proibem o seu uso na maior parte do Mundo. Esta proibição veio trazer uma nova era dos materiais de travagem, em que, devido à necessidade de criar compostos com outros elementos, foi possível produzir materiais sem amianto que superaram em muito o desempenho dos que o continham. Outro componente sobre o qual existem estudos é o cobre, um poluente preocupante em parte devido à sua toxicidade. Todos os detritos provenientes do desgaste durante a travagem são responsáveis por cerca de 50 a 75% de todas as emissões para o ar provenientes de um veículo, segundo Van der Gon *et al.* [6].

Desde o início do séc. XXI que várias fibras têm sido estudadas e desenvolvidas, sendo as mais conhecidas as fibras de aramida, carbono, vidro, as celulósicas e as cerâmicas. Existem inúmeras possibilidades de formulações, e cada uma com o seu desempenho e comportamento durante o serviço, dependendo da quantidade de cada elemento.

Mais recentemente aplicou-se uma outra tecnologia à produção e desenvolvimento destes materiais, denominada de nanotecnologia, levando a que haja um cuidado muito mais pormenorizado em todo o processo. Uma das vantagens desta tecnologia é o facto de o material libertar 3 a 7 vezes menos detritos provenientes do desgaste [7].

Actualmente, todos os sistemas de travagem dos veículos têm como base um funcionamento semelhante: o condutor calca no pedal do travão e este movimento activa um pistão que vai pressionando o óleo dos travões para os calços e para as pastilhas. Na altura em que o óleo chega a estes locais, entra num outro cilindro e desta vez é o pistão que é pressionado. No caso das pastilhas, esta pressão é transferida para os suportes das mesmas e força-as a movimentarem-se contra os discos de travão, estando o conjunto demonstrado na Figura 2.1 a). Já nos calços, acontece o mesmo mas, desta feita, são estes a serem empurrados contra o tambor, Figura 2.1 b).



Figura 2.1 Sistema de travagem de: a) disco; b) tambor (sem cobertura exterior).

2.2. Materiais de Atrito

Dentro de cada tipo de material há inúmeras possibilidades de formulação, de acordo com a sua função, os materiais de travagem e aditivos podem classificar-se em [1]:

- Abrasivos – geralmente são fibras e podem ser classificadas como metálicas, minerais e cerâmicas e conter aço, cobre, latão, vidro, amianto, material orgânico, titanato de potássio e aramida, mais conhecida por *kevlar*;
- Materiais Ligantes - geralmente resinas de fenol-formaldeído modificadas, podem ser também baseadas em borracha. A taxa de desgaste com o uso da resina é menor do que com o uso da borracha [8];
- Reforço e Enchimento - materiais de baixo custo e que permitem manter a gama de coeficiente de atrito. Ex.: magnésio e óxido de crómio, argila com caulinite, pós metálicos, entre outros;
- Modificadores de atrito - entre estes componentes, os modificadores de atrito podem ser orgânicos ou não, e metálicos. O mais usado neste aspecto é a grafite, mas também é usado pó de caju, borracha e carbono preto.

O material de travagem ideal deve, entre outros factores, ter um coeficiente de atrito semelhante em qualquer condição de serviço (carga aplicada, temperatura, velocidade, modo de travagem, humidade, etc.), resistir ao calor, ter uma taxa de desgaste baixa, ter uma

estabilidade térmica elevada, produzir pouco ruído e não provocar desgaste no disco [9]. Além disto, é favorável que não ocorram vibrações, tais como aquelas que ocorrem a muito baixas velocidades e baixas cargas aplicadas, e são provocadas pela travagem a uma frequência entre 20 a 200 Hz [10].

Nos dias de hoje, os materiais de travagem estão divididos em quatro classes [4]:

● **Orgânicos**

Composição: Podem ou não conter amianto, sendo que as composições sem amianto são designadas de *Non Asbestos Organic* (NAO). Independentemente disso, são compostos por uma resina ligante, fibra e modificadores. As fibras que os compõem podem ser de vidro, metálicas, cerâmicas, de aramida (*Kevlar*), celulósicas, entre outras. As resinas que promovem a ligação dos componentes tendem a ser de borracha e de caju, um derivado da sua casca;

Vantagens: Travagem suave e silenciosa;

Desvantagens: Produzem muitos detritos, nos quais se pode encontrar o amianto, e têm uma vida útil baixa;

Aplicações: Veículos de passageiros e alguns de mercadorias.

● **Cerâmicos**

Composição: Elemento cerâmico para unir a argila, grãos de bronze e outros filamentos;

Vantagens: Boa relação durabilidade-atrito, travagem silenciosa devido à frequência debitada ser muito alta para o ouvido humano, e produzem poucos detritos;

Desvantagens: Baixa taxa de dissipação de calor, podendo afectar os restantes componentes do sistema de travagem, e são mais caros;

Aplicações: Frequentemente usados em carros de corrida.

● **Metálicos**

Composição: Os componentes básicos são cobre, ferro, aço e grafite, os quais são complementados por aditivos não-orgânicos para melhorar o desempenho;

Vantagens: Boa vida útil e relação custo-rendimento;

Desvantagens: Travagem ruidosa, elevada condução de calor, podendo o mesmo ser transmitido ao líquido de travões, afectando o desempenho do sistema, e dureza alta, o que provoca um maior desgaste no disco ou tambor [11];

Aplicações: As formulações com bronze sintetizado e mulite são usadas em carros de corrida e em ferroviários de alta velocidade. As que contêm ferro sintetizado com grafite têm mais aplicações no ramo dos calços de veículos de passageiros.

● **Semi-Metálicos**

Composição: Contêm uma fibra metálica, pequenos pedaços metálicos dispersos e uma resina fenólica a ligá-los. Podem conter também grafite, que geralmente ocupa 15% do peso;

Vantagens: Baratas e boa vida útil;

Desvantagens: Sendo constituídos maioritariamente por materiais metálicos, tem uma alta condução de calor, além de serem ruidosos e produzirem muitos detritos;

Aplicações: Veículos de passageiros e mercadorias, havendo mesmo formulações para travagens mais exigentes.

Tal como as pastilhas e os calços, também os discos e tambores têm vindo a sofrer alterações. Os discos têm uma maior taxa de arrefecimento, devido à sua maior área exposta e melhor geometria, mas são mais propensos a falhas por contaminação de partículas sólidas e líquidas. Por estas e outras razões, até recentemente os discos de travão eram usados no eixo dianteiro e os tambores no traseiro mas, com os avanços no estudo desta matéria, é já muito comum ver veículos com pastilhas em ambos os eixos.

O material usado geralmente na produção dos discos é o ferro fundido cinzento [12], o qual contém geralmente grafite do tipo A, com uma matriz perlítica e uma pequena quantidade de ferrite e carboneto. O tamanho e forma dos grãos de grafite têm também a sua influência no comportamento e taxas de desgaste do sistema, pelo que por vezes o ferro é humedecido na sua produção, por se saber que o ruído agudo que resulta após o uso de algumas formulações de pastilhas é atenuado, devido aos grãos de grafite de maior tamanho. No entanto, este ferro tem menos resistência ao desgaste e aumenta a taxa de desgaste de algumas pastilhas.

2.3. Caracterização tribológica

Dois dos parâmetros que caracterizaram tribologicamente os materiais de travagem são o coeficiente de atrito e o volume de desgaste.

De forma a obter o valor do coeficiente de atrito em laboratório, o material é geralmente ensaiado em dinamómetros de inércia, nos quais se tenta reproduzir o mais fielmente possível as condições de travagem. Também neste ensaio é possível obter a temperatura do disco ou pastilha, pressão aplicada, velocidade de rotação, distância de escorregamento, entre outros. Este coeficiente, cujo valor típico está entre 0,3 e 0,6 [1], é a razão entre a força de atrito existente entre a pastilha e o disco, F_a , e a força normal aplicada, F_N , ambas em Newton.

$$\mu = \frac{F_a}{F_N} \quad (2.1)$$

O desgaste de um material de travagem depende de vários factores, como a temperatura, a força aplicada, o estado do disco ou tambor, velocidade de escorregamento, historial de uso, ambiente externo, contaminações líquidas e sólidas, entre outros.

Para que o material possa ser classificado devidamente quanto ao seu desgaste, deve ser através da massa desgastada por trabalho de atrito (mg/MJ). Este desgaste tem uma taxa alta na rodagem inicial, tanto das pastilhas ou calços como dos discos ou tambores, devido a efeitos remanescentes da maquinaria na sua produção, sendo que só após este processo é que a taxa estabiliza.

No caso das pastilhas e calços, para serem de boa qualidade, os seus valores de desgaste deve estar entre os 40 e os 100 mg/MJ a baixas temperaturas [4], os quais

geralmente aumentam com o aumento da temperatura, tal como é demonstrado na Figura 2.2, com as comparações entre vários tipos de veículos: serviço leve (*Low Duty - LD*), serviço duro (*Hard Duty - HD*), equipamento original (*Original Equipment - OE*) e semi-metálico (*Semi-Metalllic - SM*).

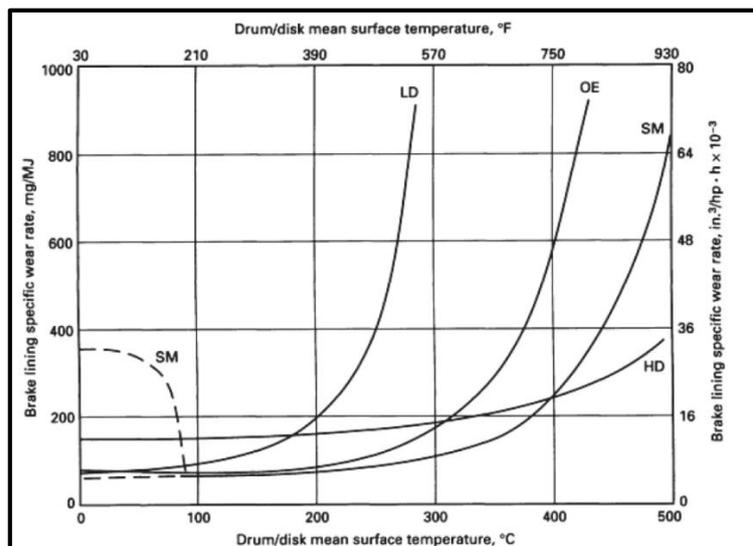


Figura 2.2 Gráfico do desgaste específico em função da temperatura do tambor/disco [4].

No caso dos semi-metálicos, nos instantes iniciais há uma camada de transferência para o disco, e até que essa camada se transfira completamente a taxa de desgaste é mais alta do que o normal.

Os materiais de classe orgânica variam muito pouco a taxa de desgaste com a força aplicada, já os semi-metálicos têm uma taxa muito mais alta do que o normal a cargas baixas. Quanto à velocidade de travagem, praticamente todos os tipos de materiais tendem a aumentar a taxa de desgaste com o aumento da velocidade, principalmente quando a temperatura inicial do disco ou do tambor forem mais altas. A velocidades muito baixas, menos de 2 m/s, a taxa é também mais elevada, mais nos semi-metálicos do que nos orgânicos. Ainda segundo Anderson [4], em 4 ensaios de paragem completa, a 160 km/h, o desgaste foi o mesmo do que em 500 ensaios de 50, 65, 100 e 130 km/h.

Durante o processo de travagem, é necessário ter em conta que o próprio desgaste e a acumulação de detritos na superfície da pastilha resultantes do processo podem provocar uma diminuição de atrito e, conseqüentemente, da taxa de desgaste. Este fenómeno, que é originado caso a travagem seja contínua e prolongada, é perigoso caso o material perca abruptamente a capacidade de criar atrito, não permitindo ao condutor um

aviso gradual para adaptar a condução. O que acontece é que o material de travagem necessita que seja aliviado de vez em quando para libertar os detritos da sua superfície de contacto e do disco ou tambor, e quando isto não acontece, esses mesmos detritos são pressionados contra a superfície e criam uma face polida, o que é uma condição que não favorece em nada o atrito. Na maior parte dos casos, mesmo com o uso contínuo, o atrito volta a aumentar e a diminuir alternadamente, mas em casos particulares só é possível voltar a criar uma face de atrito ao promover manualmente rugosidades na superfície, sendo muitas vezes usada uma lixa para o fazer.

O desgaste dos discos e dos tambores depende também de muitos factores, estando entre eles as suas composições, os componentes abrasivos das pastilhas ou dos calços, contaminação por poeira ou detritos da estrada e do ambiente, tamanho dos grãos de grafite, pelo que, num veículo ligeiro de passageiros, a taxa de desgaste ronda entre os 0,2 e 1 mg/MJ quando o sistema está livre de contaminações e ferrugem [4]. Em alguns casos, o disco têm uma capa protectora para prevenir estas mesmas contaminações, mas esta aplicação reduz também a taxa de arrefecimento por desviar o escoamento de ar da superfície de travagem.

2.4. Caracterização mecânica

De modo a caracterizar os materiais formulados, são vários os ensaios que podem ser introduzidos no estudo para complementar qualquer informação adicional, sendo que os ensaios mecânicos permitem, entre outros parâmetros, obter o módulo de elasticidade, a dureza e a densidade.

O módulo de elasticidade, ou de *Young*, E , é a unidade que descreve as propriedades elásticas de um sólido quando este sofre cargas de tracção ou compressão numa só direcção [13], demonstrando assim a capacidade que o material tem de aguentar aumentos ou diminuições de dimensões devido a essas mesmas cargas. Pode também ser descrito como a relação entre a tensão longitudinal, σ [N/mm²], e a deformação, ε [mm]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.2)$$

Segundo Ahmed [14], este parâmetro influencia o ruído agudo que por vezes se verifica após uma travagem contínua, pois quando mais rígido for maior a probabilidade de ocorrer o fenómeno. Mas além deste inconveniente, existem outras funções e consequências do valor do módulo de elasticidade, o qual depende de muitos factores, como a composição química, a microestrutura e os defeitos. Por estes motivos, sempre que se produzem novas formulações de material de travagem, são realizados procedimentos de diagnóstico do módulo de elasticidade, como é o caso de Chiariotti *et al.* [15]. Nesses procedimentos, o que se pretende é obter a primeira frequência de ressonância, também conhecida por frequência fundamental, e o valor do módulo pode ser obtido de várias formas, dinâmicas, estáticas, destrutivas ou não. Um método muito usado consta na norma ASTM C 1198-09 (2013) [16]. É um método dinâmico e não destrutivo, promovendo assim o uso posterior dos mesmos materiais e, se necessário, possibilita a repetibilidade do ensaio, além de o mesmo ser mais fiável, rápido e económico que um destrutivo, como é demonstrado por Haines *et al.* [17].

Dureza é a propriedade que um material tem de resistir à deformação plástica, por vezes também associada à capacidade de resistir à abrasão e ao corte. Não é uma propriedade intrínseca de um material que se possa designar através da massa, dimensões ou componentes, pelo que apenas pode ser obtida através de ensaios mecânicos. Estes ensaios, geralmente, são um de três tipos: *Rockwell*, *Vickers* e *Brinell*. Cada um tem as suas propriedades e procedimentos únicos. No caso da dureza que se deseja obter seja em Brinell, a norma usada é a ASTM E0010-01E01 [18].

Tal como no módulo de elasticidade, o ruído que se faz sentir durante o serviço também depende da dureza, pois quanto mais duro for um material maior a probabilidade de ocorrerem ruídos agudos.

Para obter os valores de dureza *Brinell* de um material, é então usada uma esfera de diâmetro, D , aplicando uma carga, F_N , normal à superfície, durante um tempo, t , criando assim uma indentação de diâmetro, d .

Sendo a equação base,

$$HB = \frac{F_N}{S} = \frac{F_N}{\pi D h} \quad (2.3)$$

Em que F_N [N] é a força aplicada, e S [mm²] a área da indentação, calculável pelo diâmetro da esfera, D [mm], e a sua profundidade, h [mm].

Como a profundidade da concavidade não é fácil de ser medida, existe a equação (2.4), que relaciona os diâmetros da esfera, D , e da concavidade, d , com a profundidade

$$h = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (2.4)$$

Como a leitura destes diâmetros é muito mais fiável, aplica-se esta equação na anterior,

$$HB = \frac{F_N}{\pi D \left[\frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \right]} \quad (2.5)$$

A densidade, na sua definição mais básica, é a relação entre a massa, m , e o volume de um corpo, V ,

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.6)$$

Parâmetro importante para o fabrico, pode também demonstrar se o material tem uma alta ou baixa durabilidade durante o processo de travagem, pois quanto mais denso for, ou seja, mais material no mesmo volume, mais vai demorar a remover esse material e a vida útil aumenta. É obtido através de vários métodos, mas o Princípio de Arquimedes [19], aplicado neste estudo, é geralmente o mais usado, aplicando a equação (2.7).

$$\rho_C = \frac{m_C}{m_C - m_a} \rho_F \quad (2.7)$$

Em que ρ_C é a densidade do corpo que se quer calcular, m_C [g] é a massa do corpo a seco, m_a [g] a massa aparente do corpo quando submerso no fluído, sendo neste caso água destilada, e ρ_F [g/mm³] é a densidade desse mesmo fluído à temperatura de ensaio.

3. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

3.1. Materiais Usados

Os materiais de desgaste usados no presente trabalho possuem propriedades físicas e mecânicas, designadas nos pontos posteriores, que diferem de acordo com cada formulação, devido às diferentes quantidades presentes de cada tipo de elemento (metálico, orgânico, lubrificante, abrasivo, entre outros).

Tal como referido anteriormente, os materiais de desgaste usados neste estudo foram fornecidos pela *Auto Travões Viseu*. Estes materiais são pastilhas de travão usados em veículos pesados:

- *ACERCHINA* – Origem: China (Figura 3.1)
- *ATV 55* – Origem: Portugal (Figura 3.2)
- *FRASLE FLE1749* – Origem: Brasil (Figura 3.3)
- *JURID FF29* – Origem: Alemanha (Figura 3.4)

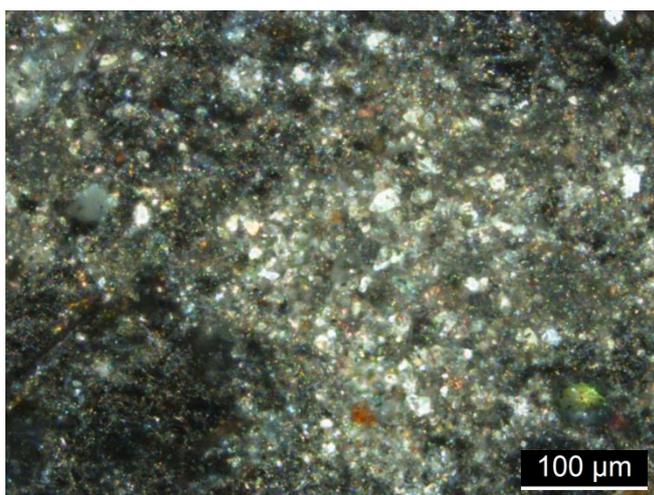


Figura 3.1 Superfície polida da pastilha *ACERCHINA* (visualizado no microscópio óptico).

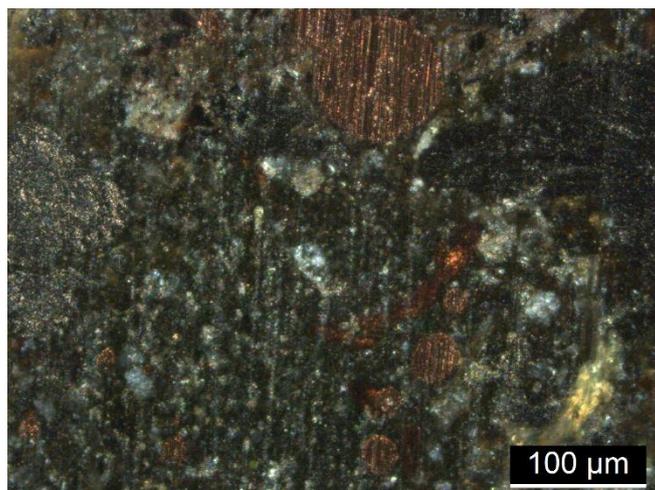


Figura 3.2 Superfície polida da pastilha *ATV 55* (visualizado no microscópio óptico).

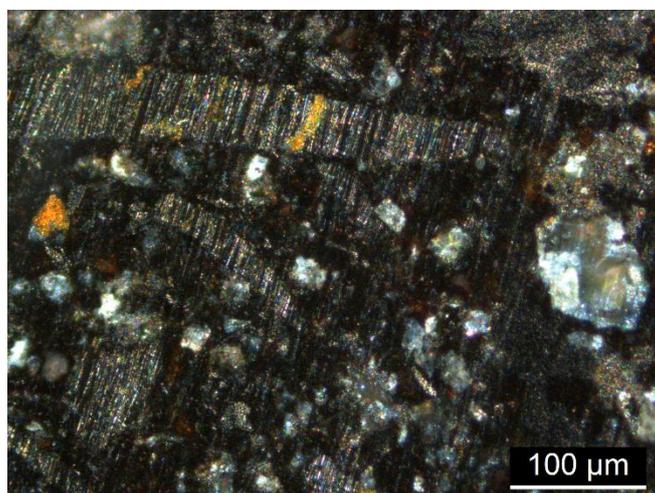


Figura 3.3 Superfície polida da pastilha *FRASLE FLE1749* (visualizado no microscópio óptico).

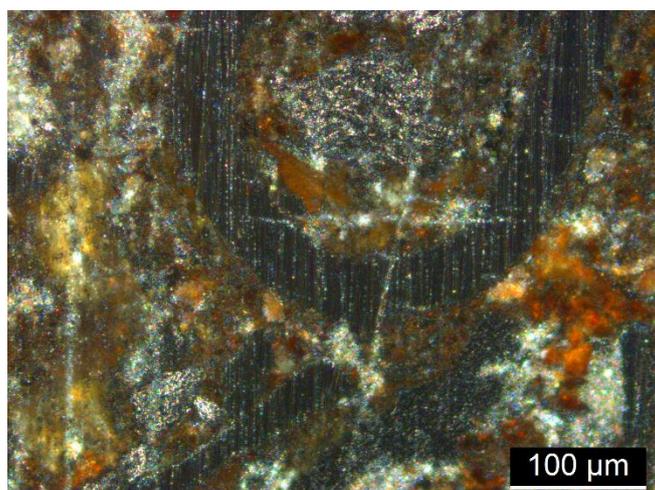


Figura 3.4 Superfície polida da pastilha *JURID FF29* (visualizado no microscópio óptico).

No caso em estudo, as amostras tinham uma superfície de contacto com uma dimensão aproximada de 15 x 15 [mm x mm], as quais eram aplicadas em suportes principais (1) e secundários (2), como é demonstrado na Figura 3.5.

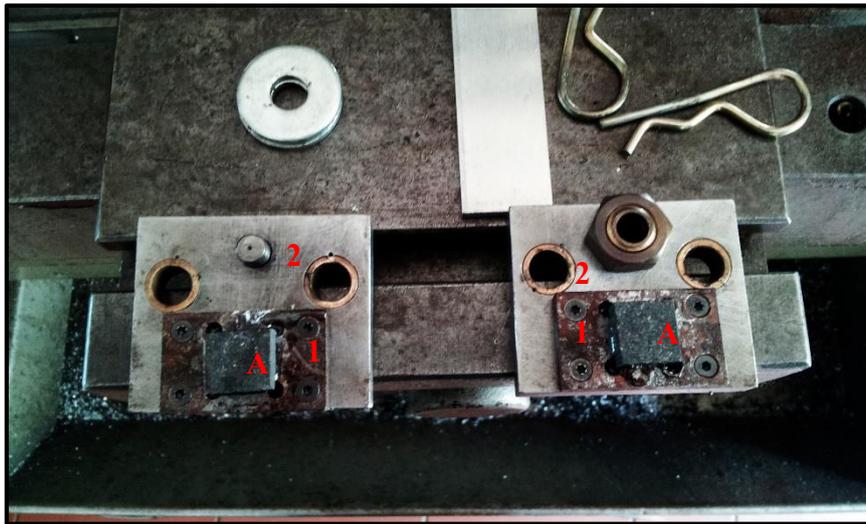


Figura 3.5 Amostras de material de travagem (A) aplicados em ambos os suportes.

3.2. Equipamentos e técnicas experimentais

3.2.1. Sistema Mecânico de Simulação de Travagem

Sistema usado para o único tipo de ensaio tribológico realizado, construído no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade de Coimbra, no qual foram simuladas as condições de travagem num automóvel, sendo a pressão aplicada por accionamento mecânico, ao contrário do accionamento hidráulico usado na aplicação real. Este sistema, visível na Figura 3.6, é composto basicamente por um eixo (1), um disco não ventilado (2) com diâmetro $d_d = 227$ mm, suportes principais e secundários das pastilhas e as respectivas guias (3), duas chumaceiras e respectivos suportes (4), e duas molas (5), que se podem ver numa maior perspectiva na Figura 3.7, cada uma com uma constante de rigidez $k = 7,8$ N/mm ($k_{eq} = 15,6$ N/mm) e um comprimento livre $l_i = 50$ mm. As pastilhas entram em contacto com o disco numa pista que está a 100 mm do eixo.

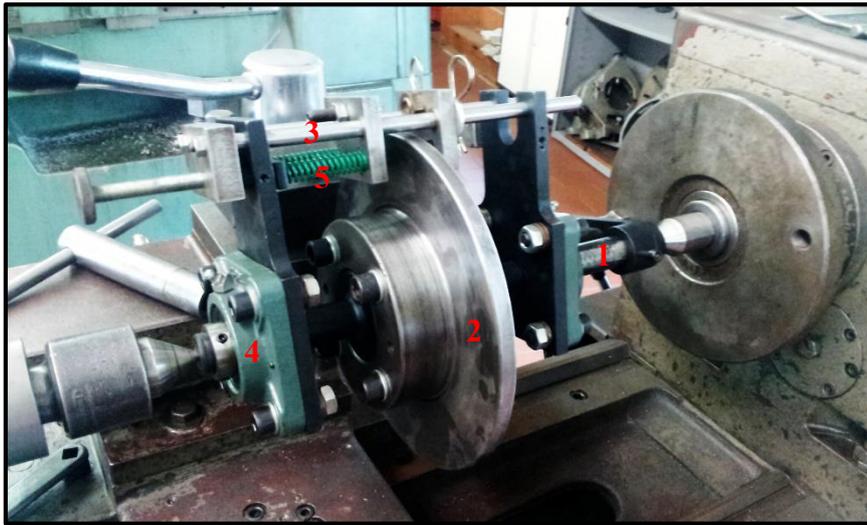


Figura 3.6 Sistema acoplado a torno mecânico onde é realizado ensaio tribológico.

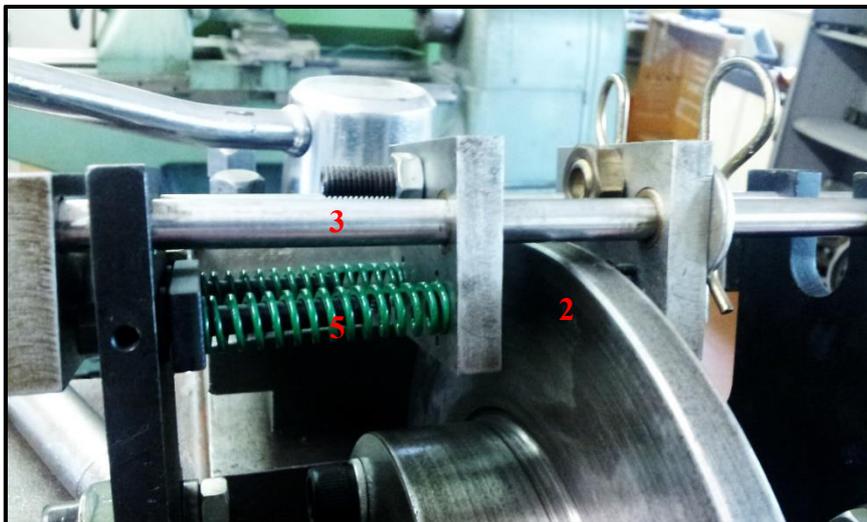


Figura 3.7 Ponto de aplicação de carga nas pastilhas durante o ensaio tribológico.

Para realizar os ensaios tribológicos para estes materiais, foram aplicadas várias condições de pressão e velocidade para cada material, como demonstra a Figura 3.8.

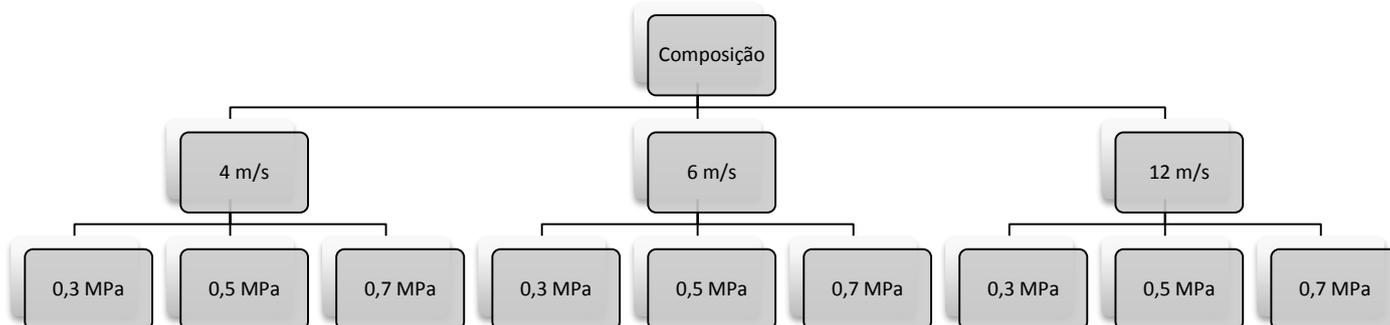


Figura 3.8 Condições pressão-velocidade de ensaio tribológico.

Para que se pudessem retirar dados do ensaio, foram usados uma célula de carga e um termistor para registar os dados de força de atrito e de temperatura na pastilha, respectivamente. Esses componentes são descritos abaixo.

Placa de Aquisição de Dados

Esta placa, designada por *PhidgetBridge* [20], é o dispositivo de *interface* entre os sensores de carga e de temperatura e o computador, e a sua função é condicionar os sinais dos sensores e digitalizar as respectivas saídas para que possam ser adquiridas e registadas através de um programa específico escrito em “*LabView*”. No caso do termistor, o sensor foi ligado em ponte de Wheatstone, montada na placa de circuito integrado, e visível a cor castanha na Figura 3.9.

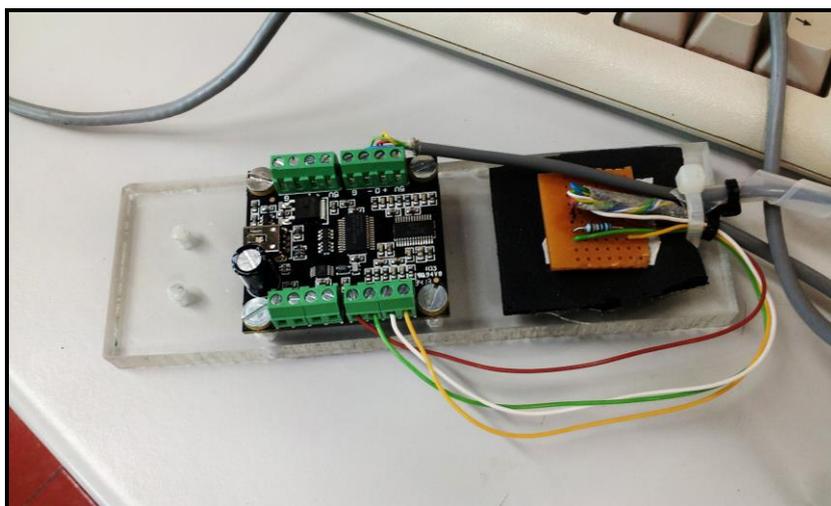


Figura 3.9 Placa de aquisição de dados que serve de *interface* para aquisição dos sinais produzidos na célula de carga e no termistor.

Célula de Carga

Para calibrar esta célula foram aplicados vários carregamentos estáticos. Deste modo, obteve-se a relação entre a força aplicada ao sensor e a voltagem apresentada no *software*. Esta célula foi usada para obter a força de atrito que era produzida entre as pastilhas e o disco durante o ensaio tribológico, através da fixação a uma barra solidária com o sistema de ensaio e que se encontra nivelada e à altura das pastilhas, tal como é exibido na Figura 3.10. Como estava conectada com a placa de aquisição de dados, os dados eram automaticamente registados desde o início até ao fim do ensaio.

A sua equação de conversão obtida foi

$$F_C = 171,6S_C - 13,685 \quad (3.1)$$

Sendo F_C [N] a força aplicada e S_C [mV] o sinal emitido pela célula.

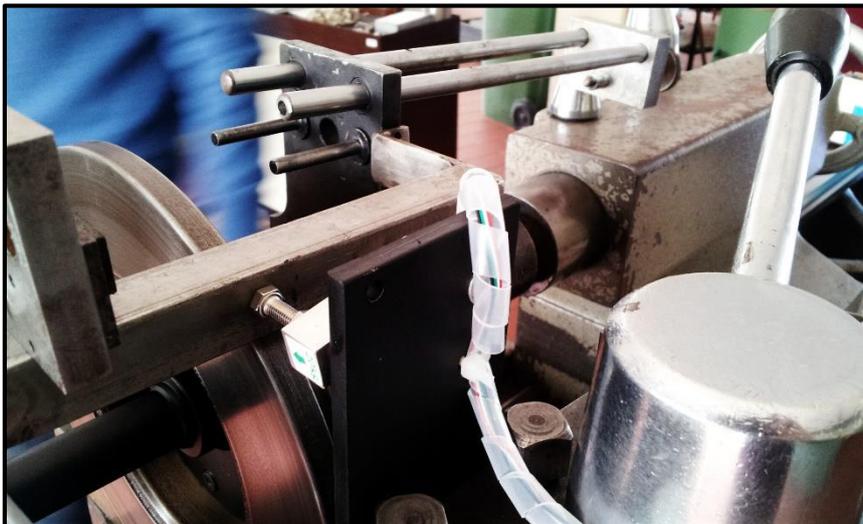


Figura 3.10 Célula de carga montada no sistema de ensaio tribológico.

Termístor

De modo a registar a temperatura que se fazia sentir nas pastilhas, foi introduzido um termístor [21], Figura 3.11, numa delas, depois de a furar até a 1,5 mm da superfície. Estando também ligado à placa de aquisição de dados, eram registados os valores ao longo do ensaio até cerca dos 300°C, limite máximo para o termístor usado.



Figura 3.11 Termístor usado no ensaio tribológico.

Termopar

Após os 300°C de limite do termístor, foi usado um termopar, Figura 3.12, por aguentar temperaturas mais elevadas. Não foi possível usar este dispositivo desde o início pois não estava ligado à placa de aquisição de dados, condição que não permitiu que o registo de dados a temperaturas mais elevadas fosse tão frequente, pelo que a leitura e registo da temperatura no termopar foram realizados com intervalos maiores entre cada um.

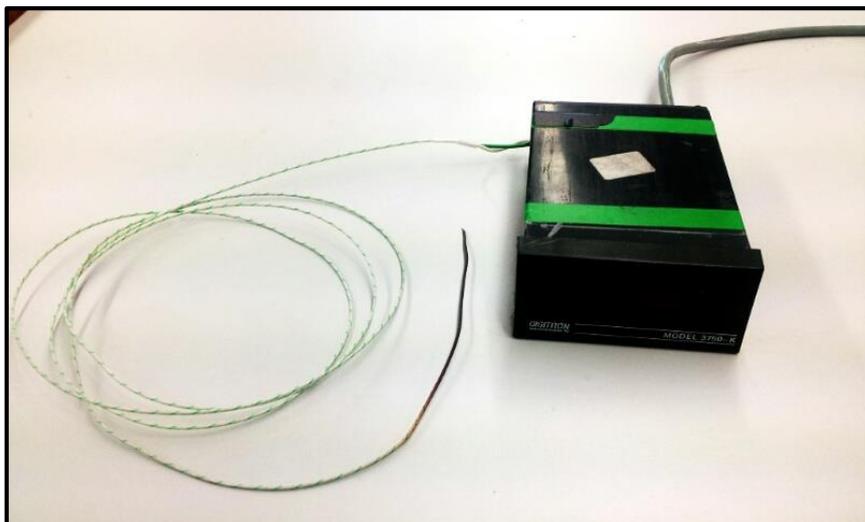


Figura 3.12 Termopar usado no ensaio tribológico.

Para realizar cada ensaio tribológico deste tipo, foi necessário seguir vários passos, desde a preparação até à pesagem final, para garantir a validade do mesmo, ainda que não tenha sido possível ensaiar todas as composições em todas as condições por falta de material. As duas composições que ficaram com ensaios incompletos foram o *ACERCHINA* e o *FRASLE FLE1749*.

Os procedimentos principais a seguir para cada conjunto de pastilhas foram os seguintes:

Preparação de Amostras

- ➊ Cortar provete do material em amostras e rectificar para uma área de contacto de 15 x 15 mm;
- ➋ Retirar restos remanescentes nos suportes principais de amostras anteriores, limpar e lixar o
- ➌ local de colagem da amostra no suporte;
- ➍ Preparar mistura de resina *Araldite*;
- ➎ Passar a base da amostra pela mistura;
- ➏ Colar a amostra no suporte principal de forma a que fique nivelado, apertando a superfície contra uma placa direita num torno de bancada;
- ➐ Curar o conjunto na mufla 8 horas a 45°C para que a resina polimerize;
- ➑ Retirar o conjunto do forno, furar com broca de diâmetro 3,25mm até 1,5mm da superfície de teste e retirar cola remanescente na base do suporte;
- ➒ Realizar pesagem

Pesagem

- ➓ Ligar a balança micro-analítica “*A&D GH-202*” e esperar até estabilizar e colocar valores em zero;
- ➔ Abrir porta da balança e colocar conjunto a pesar;
- ➕ Fechar porta, esperar que estabilize e registar valor;
- ➖ Realizar ensaio

Ensaio

- ① Limpar disco com álcool etílico de modo a retirar detritos remanescentes do ensaio anterior;
- ① Colocar termístor na amostra furada. Para que este permaneça fixo durante o ensaio, foi usada de fita de “*Teflon*”, tal como é exibido na Figura 3.13;
- ① Aparafusar amostras aos suportes secundários, Figura 3.5, e montar no sistema de ensaio;
- ① Ajustar velocidade para o ensaio;
- ① Ligar a aquisição de dados no PC através de *LabView*, e afastar o sistema da célula de carga cerca de um minuto para que a célula se calibre;
- ① Apertar molas até à pressão de ensaio, usando um paquímetro para ajustar o comprimento das molas ao valor de pressão desejado;
- ① Ligar torno e registar hora de início;
- ① Registar quaisquer valores adicionais necessários durante o ensaio e ter atenção à temperatura das chumaceiras e do termístor, de modo a não danificá-los;
- ① No fim do ensaio, desligar torno e continuar aquisição de dados com o sistema de ensaio mais uma vez afastado da célula de carga para que esta volte a calibrar;
- ① Parar aquisição de dados;
- ① Retirar amostras;
- ① Soprar amostras com ar comprimido para retirar detritos remanescentes;
- ① Realizar procedimento de pesagem;
- ① Separar amostras do suporte principal, cortando-as transversalmente sem danificar superfície de teste;
- ① Registar todos os valores obtidos e identificar amostras.

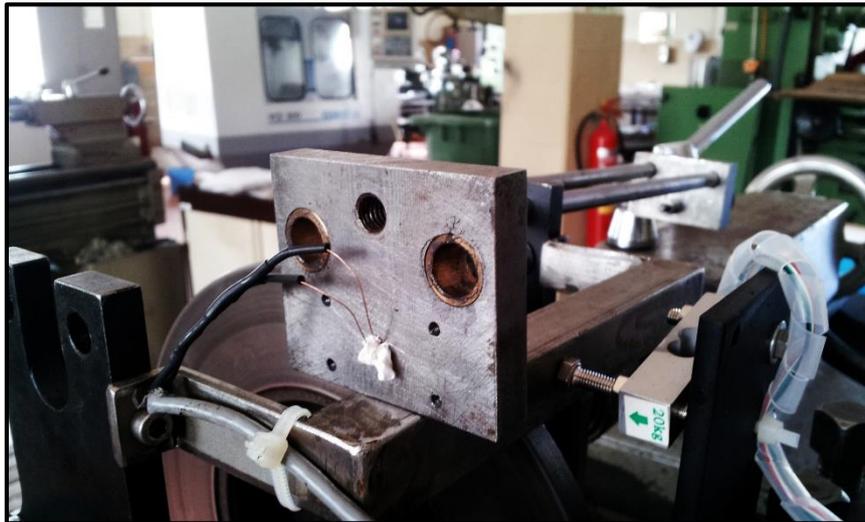


Figura 3.13 Termistor aplicado no interior da pastilha.

O tempo de duração foi ajustado para que a distância de escorregamento fosse a mesma em todos os casos, permitindo assim uma comparação válida entre as várias condições. Partindo da velocidade de ensaio, v_e [m/s], de 4 m/s, e sabendo que nesta condição o tempo de ensaio, t_e [s], era de 120 minutos, calculou-se a distância de escorregamento, d_E [m], do seguinte modo:

$$t_e = 120 \text{ min} = 7200 \text{ s}$$

$$v_e = 4 \text{ m/s}$$

$$d_E = t_e \cdot v_e \tag{3.2}$$

Aplicando a equação (3.2), obtém-se a distância de escorregamento:

$$d_E = 31667,3 \text{ m}$$

Ao saber a distância de escorregamento de controlo, aplicando a equação (3.2), obteve-se o tempo de ensaio para as restantes velocidades

6 m/s

$$t_e = 5323,9 \text{ s} = 88,7 \text{ min}$$

12 m/s

$$t_e = 2736,7 \text{ s} = 45,6 \text{ min}$$

Era muito improvável que a distância de escorregamento fosse exactamente a mesma em todos os ensaios, devido à paragem do ensaio ser realizada manualmente, mas admitiu-se que a diferença não invalidava a comparação dos resultados.

Após estes ensaios, foram calculados, de forma independente, os desgastes específicos, d_{esp} , em cada condição para cada material, sendo o resultado em unidades geralmente usadas para uma melhor percepção do desempenho, mg/MJ [4]. Para fazer este cálculo, tem que se relacionar o trabalho total realizado pela força de atrito num ensaio, W_{Fa} [J], e o desgaste de massa final, $desg_{mas}$ [g].

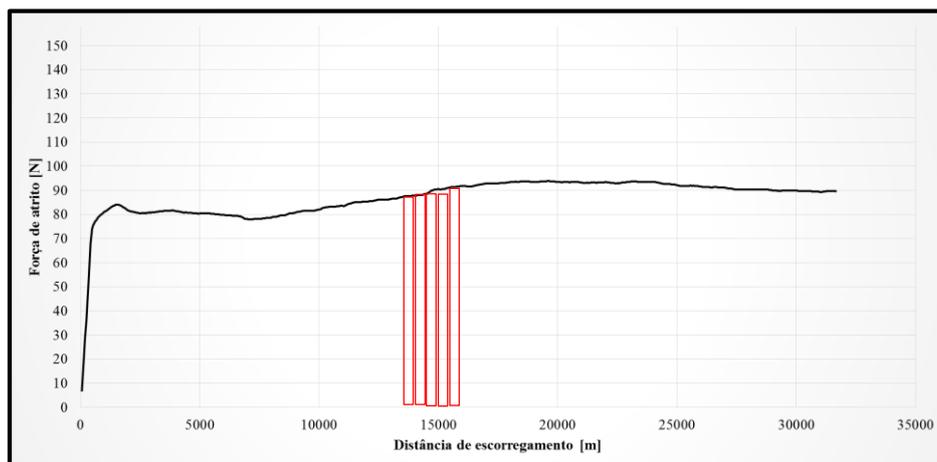


Figura 3.14 Gráfico de auxílio no cálculo do trabalho da força de atrito.

Como demonstrado na Figura 3.14, o cálculo do trabalho é feito por integração numérica usando a regra dos trapézios. Posto isto, usa-se a equação (3.3) para relacionar todos os valores elementares ao longo do ensaio, sendo F_a [N] a força de atrito registada.

$$W_{F_a} = \int F_a dx \quad (3.3)$$

Após obter o trabalho total em cada ensaio, divide-se o desgaste de massa por esse valor, ajustando para o resultado final ficar em mg/MJ, ou seja, multiplicar o desgaste, registado em gramas, por 10^3 , e dividir o trabalho, obtido em Joules, por 10^6 .

$$desg_{esp} = \frac{desg_{mas}}{W_{F_a}} \quad (3.4)$$

3.2.2. Ensaio de Dureza Brinell, *HB*

Neste ensaio foi usado um provete paralelepipedico de cada material de travagem, no qual foram realizados 5 ensaios na máquina “*Shimadzu AG-X*”, Figura 3.16, através do *software* respectivo, “*Trapezium X*”, sempre separados, partindo do centro de uma indentação, pelo menos por duas vezes e meia o diâmetro da concavidade, $2,5d$ [18], com seguintes os parâmetros:

- $F_N = 490 N$
- $D = 10 mm$
- $t = 60 s$

Para que a leitura das indentações fosse facilitada, foram colocadas faixas de corrector nos locais de ensaio, Figura 3.16 e Figura 3.17, que, após esse mesmo ensaio, foram raspadas para retirar o excedente, permanecendo mais destacada a indentação.

Após leitura do diâmetro, d , no microscópio óptico, Figura 3.18, foi usada a equação (2.5) para cada ensaio e definiu-se o valor médio de dureza para cada material.

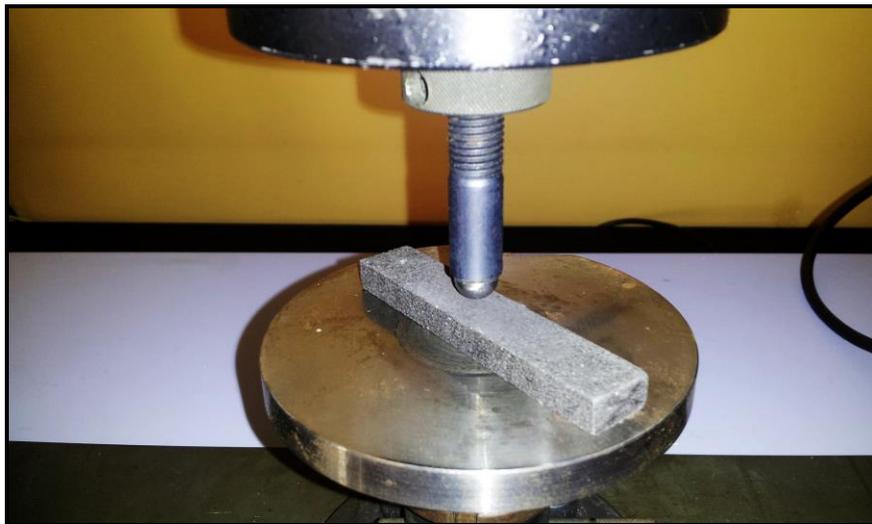


Figura 3.15 Ensaio de dureza em face não polida.



Figura 3.16 Ensaio de dureza a 490 N, com uma esfera de 10mm, durante 60s.

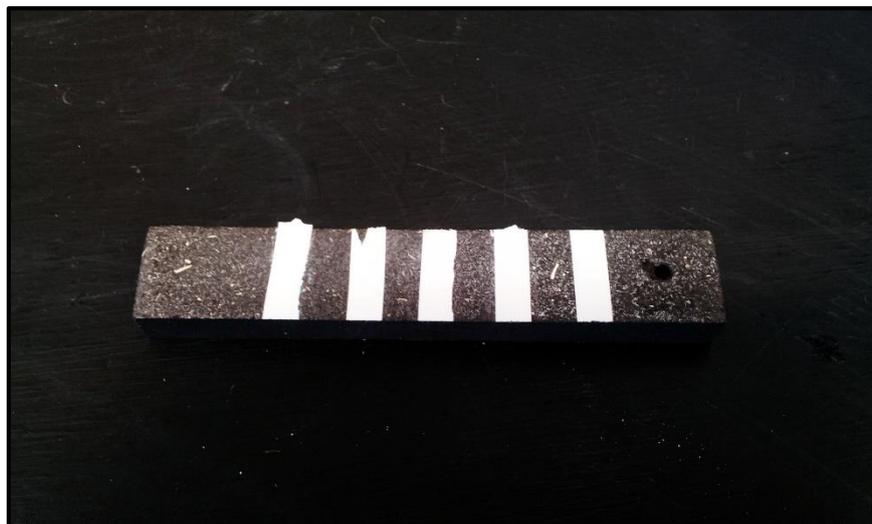


Figura 3.17 Faixas de corrector aplicado na face de ensaio para melhor visualização e cálculo.



Figura 3.18 Medição das indentações através do uso no microscópio óptico com mesa micrométrica.

3.2.3. Ensaio do Módulo de Elasticidade

A técnica utilizada designa-se por técnica de excitação por impulso e permite determinar o módulo de elasticidade a partir da frequência de vibração do modo fundamental de vibração em flexão. Neste ensaio, o que se pretendeu foi obter a frequência fundamental de ressonância para depois calcular o módulo de elasticidade de cada material. Para isto, foi colocado um transdutor piezoeléctrico em cada provete paralelepipedico de material de travagem para medir o deslocamento correspondente ao movimento vibratório. A aquisição de dados foi efectuada com um osciloscópio virtual, usando o *software* “PicoScope”. Cada provete foi suspenso em dois pontos, os pontos nodais para o modo de vibração em flexão, cada um a $0,224L$ de cada extremidade, sendo L o comprimento do provete. A vibração foi induzida por impacto produzido com martelo de impacto com massa muito reduzida, aproximadamente 7g, Figura 3.19.

Este processo foi realizado para a temperatura ambiente, Figura 3.20, enquanto que para as temperaturas mais elevadas teve que se alterar o modo de embate da esfera. Nestes casos, o provete foi colocado dentro da mufla, Figura 3.21, suspensa num furo à mesma distância da extremidade, e logo que a temperatura se encontrava no valor pretendido, a esfera embatia no provete após escorregar por um tubo que tinha uma extremidade no interior apontada ao provete e outra no exterior por onde se colocavam as esferas.

Cada material foi ensaiado para as temperaturas indicadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Valores de temperatura usados para ensaio do módulo de elasticidade.

Temperaturas de Ensaio			
≈ 20°C	50°C	100°C	150°C

Foram realizados 10 ensaios para cada temperatura e em cada provete. Após os mesmos, usando o *software* “Origin”, obteve-se a frequência fundamental de vibração através da transformada rápida de Fourier. Sabendo-se as dimensões e massas dos provetes, bem como a frequência do modo fundamental de flexão, calculou-se o módulo de elasticidade através da equação (3.5)

$$E = 0,9465 \left(\frac{m f_f^2}{b} \right) \left(\frac{L^3}{t_b^3} \right) T_1 \quad (3.5)$$

$$T_1 = \left[1 + 6,585 \left(\frac{t_b}{L} \right)^2 \right] \quad (3.6)$$

Em ambas as equações (3.5) e (3.6), m [g] é a massa do corpo, f_f a frequência fundamental em Hz, b [mm] a largura do provete, L [mm] o comprimento e t_b [mm] a espessura, sendo T_1 um factor de correção. Com as dimensões dos provetes em mm, obtém-se o módulo de elasticidade, E , em Pa.



Figura 3.19 Esfera de 4 mm aplicado na extremidade de um corpo flexível para auxílio no ensaio do módulo de elasticidade.



Figura 3.20 Ensaio do módulo de elasticidade à temperatura ambiente.



Figura 3.21 Montagem para o ensaio do módulo de elasticidade na mufla a temperaturas mais elevadas.

3.2.4. Densidade, ρ

Para obter a densidade real dos materiais ensaiados, usou-se o Princípio de Arquimedes, o qual consiste em pesar o corpo a seco, depois pesá-lo submerso num fluido, e, sabendo a densidade do fluido à temperatura de ensaio, calcula-se a densidade partindo da equação (2.7).

As etapas a seguir neste procedimento são:

- Através de um suporte construído para este efeito, Figura 3.22 a), prender a amostra a um arame, o qual está suspenso no suporte, e realizar procedimento de pesagem;
- Realizar o mesmo procedimento, mas desta vez com a amostra submersa em água destilada, Figura 3.22 b), sendo que o valor tem que ser registado o mais rápido possível pois a amostra absorve a água, aumentando o peso com o passar do tempo;

- Retirar amostra da água e envolvê-la em papel para absorver humidade;
- Registrar temperatura da água destilada usando o termopar, de modo a consultar a densidade da água à temperatura de ensaio (valores tabelados).



a)



b)

Figura 3.22 Sistema de pesagem de amostra: a) a seco; b) submerso.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Após realizar todos os ensaios, tribológicos e mecânicos, os resultados obtidos foram tratados e tabelados, de forma a perceber qual o material que melhor desempenho teve em cada área. No caso dos ensaios tribológicos, os resultados foram convertidos em gráficos para uma melhor observação do comportamento de cada material ao longo de cada condição de ensaio.

4.1. Ensaios tribológicos

Nos gráficos, da Figura 4.1 à Figura 4.18, são apresentados os resultados da evolução do coeficiente de atrito e da temperatura ao longo dos ensaios.

4 m/s – 0,3 MPa

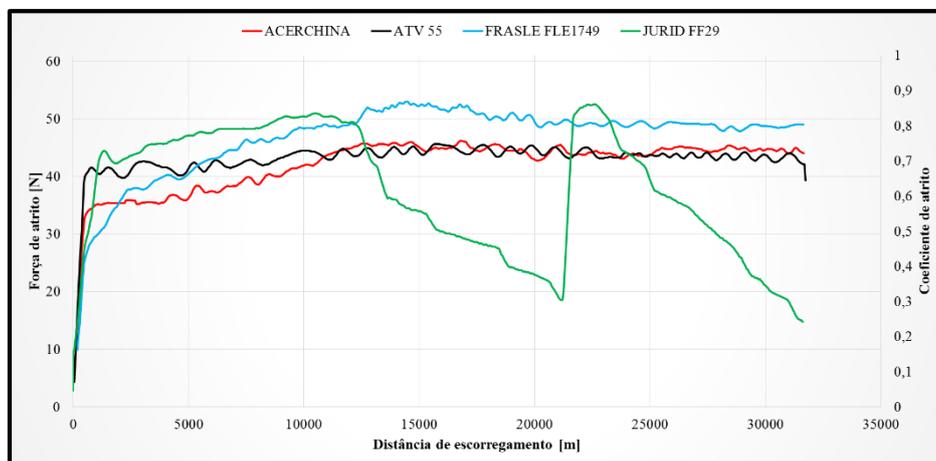


Figura 4.1 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.

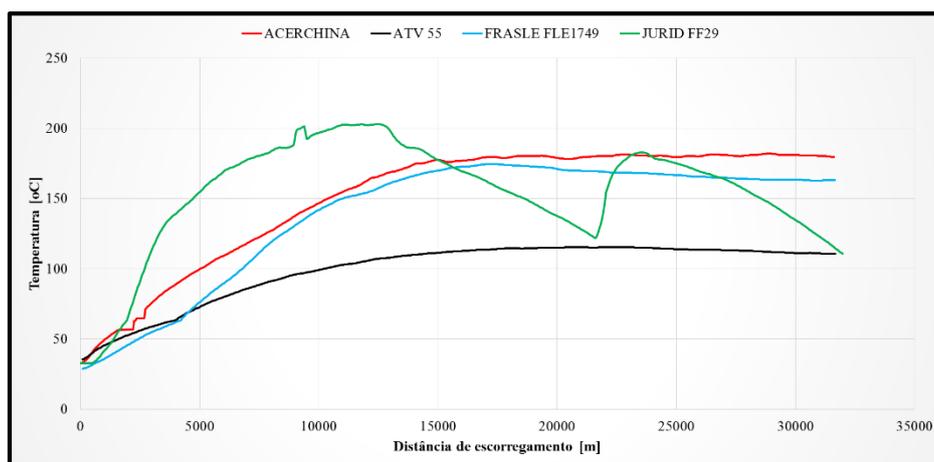


Figura 4.2 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.

As pastilhas *JURID* ficaram vidradas devido ao esforço contínuo de travagem e perderam atrito. Ao chegar a cerca dos 21000 m recuperaram-se os valores de atrito iniciais, provavelmente pela promoção da limpeza da superfície produzida por desgaste, e muito rapidamente se restabeleceu o processo de vidragem com uma progressiva perda de atrito até ao final do ensaio, como se verifica na Figura 4.1. Os restantes materiais tiveram um comportamento semelhante no que respeita ao coeficiente de atrito, estando o *FRASLE* no topo dos valores registados, enquanto o *ACERCHINA* e o *ATV* apresentaram os valores mais reduzidos. Ao contrário do comportamento do material *JURID*, os restantes apresentaram valores de atrito muito estáveis durante todo o ensaio, após um curto período de rodagem. Quanto à temperatura, Figura 4.2, as pastilhas *JURID* foram as que tiveram uma temperatura mais elevada, chegando aos 203 °C mas, também uma evolução mais atípica, devido à temperatura estar dependente do coeficiente de atrito. Logo, Quando houve a quebra no coeficiente de atrito, também se registou uma redução na temperatura. Nos outros materiais, o *ATV* foi o que registou menor temperatura, tendo atingido um máximo de 115 °C.

4 m/s – 0,5 MPa

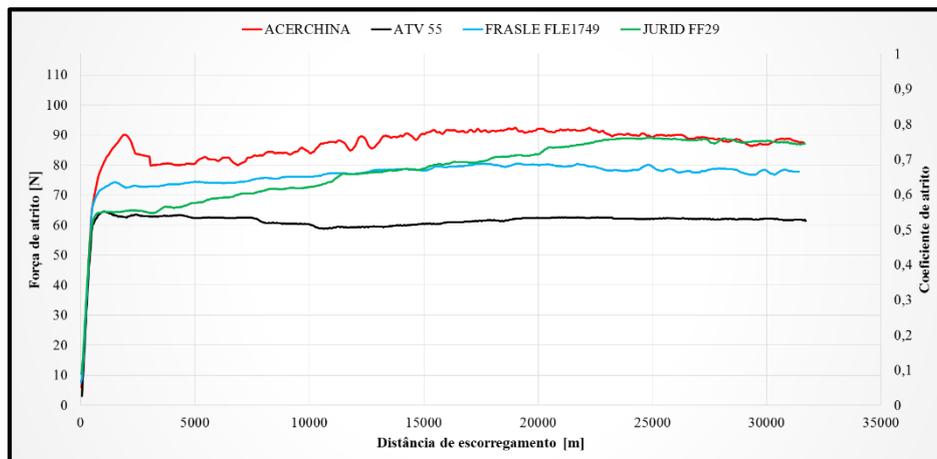


Figura 4.3 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.

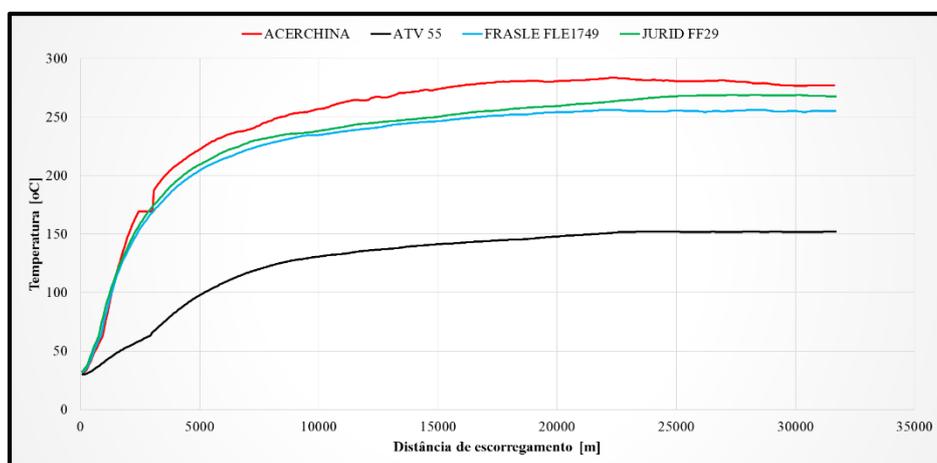


Figura 4.4 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.

Nesta condição de ensaio, todos os materiais tiveram um comportamento muito semelhante na evolução do coeficiente de atrito, Figura 4.3, e da temperatura, Figura 4.4, sendo que apenas o *ACERCHINA* teve menos estabilidade. Este mesmo material foi o que teve o coeficiente mais alto, ao contrário do *ATV*, com um coeficiente mais baixo. Os mesmos materiais são os que permanecem, respectivamente, com maior, 284 °C, e menor, 152 °C, temperatura máxima registada.

4 m/s – 0,7 MPa

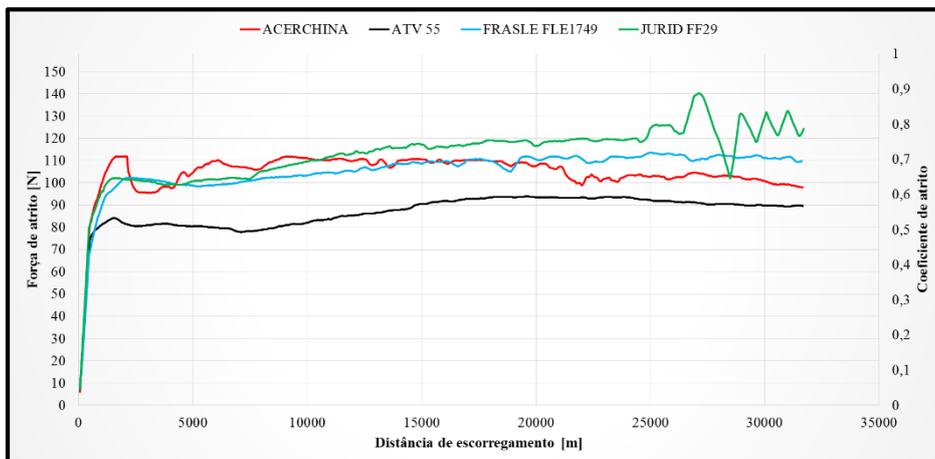


Figura 4.5 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.

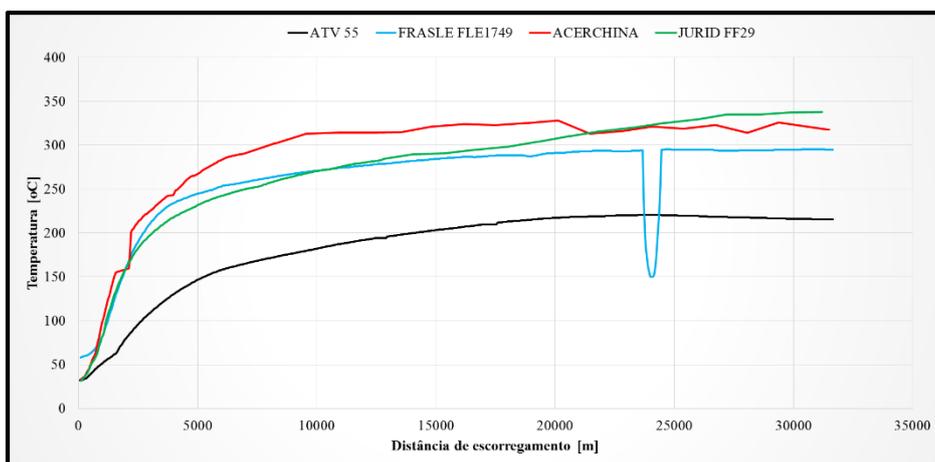


Figura 4.6 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.

Durante esta condição, apenas o *ATV* teve uma boa estabilidade de coeficiente de atrito, pois os restantes materiais tiveram pequenas variações, como é exibido na Figura 4.5, principalmente o *JURID* na fase final, aumentando e diminuindo o coeficiente de forma excessiva. Mais uma vez, o *ATV* registou uma menor temperatura, com um máximo de 221 °C, sendo que nesta ocasião foi o *JURID* o que atingiu a temperatura mais elevada, 338 °C. A descida e subida súbita da temperatura no *FRASLE*, a azul na Figura 4.6, é uma muito provável falha na emissão de sinal por parte do termistor.

6 m/s – 0,3 MPa

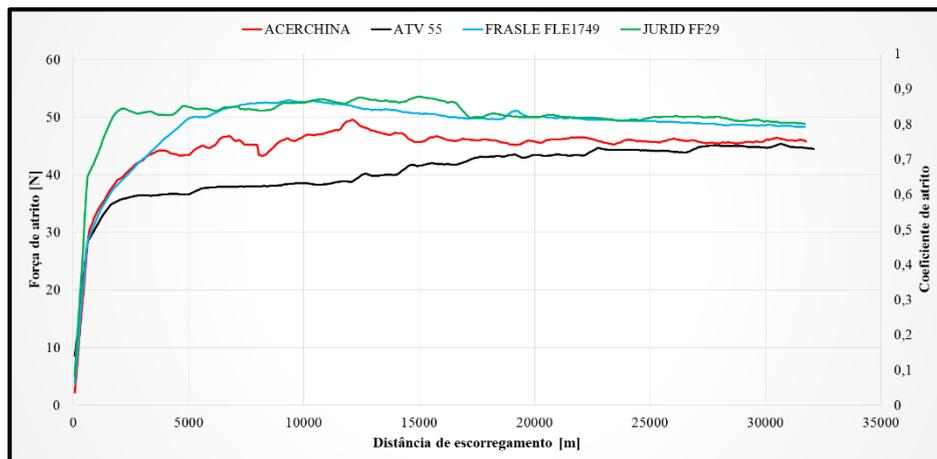


Figura 4.7 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.

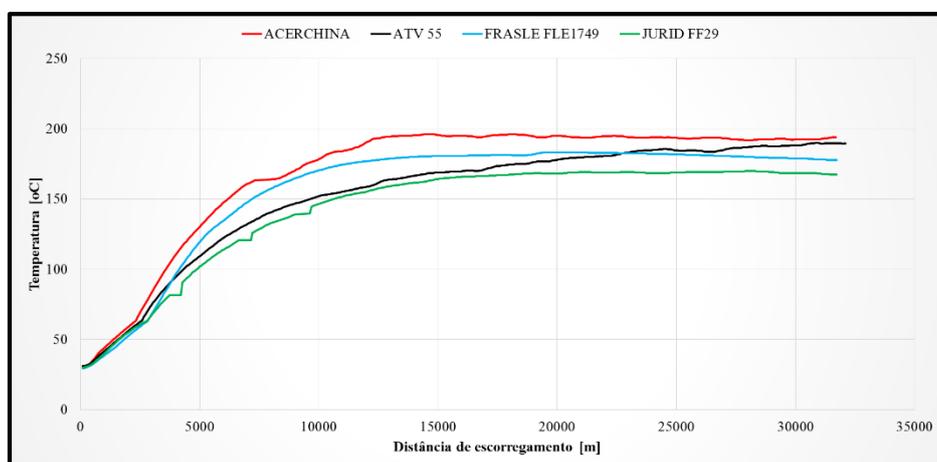


Figura 4.8 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.

O coeficiente de atrito, Figura 4.7, nos instantes finais dos ensaios é semelhante para todos os materiais, sendo o *FRASLE* o que sofreu menos variações ao longo do ensaio. O *ATV* teve o menor coeficiente de atrito atingido, ao contrário do *JURID* que atingiu o valor mais elevado. Ao contrário do que seria de esperar, devido ao seu coeficiente máximo registado, este mesmo material teve a temperatura máxima mais baixa, menos 26°C que o material com maior temperatura, o *ACERCHINA*, chegando aos 196 °C, como demonstra a Figura 4.8.

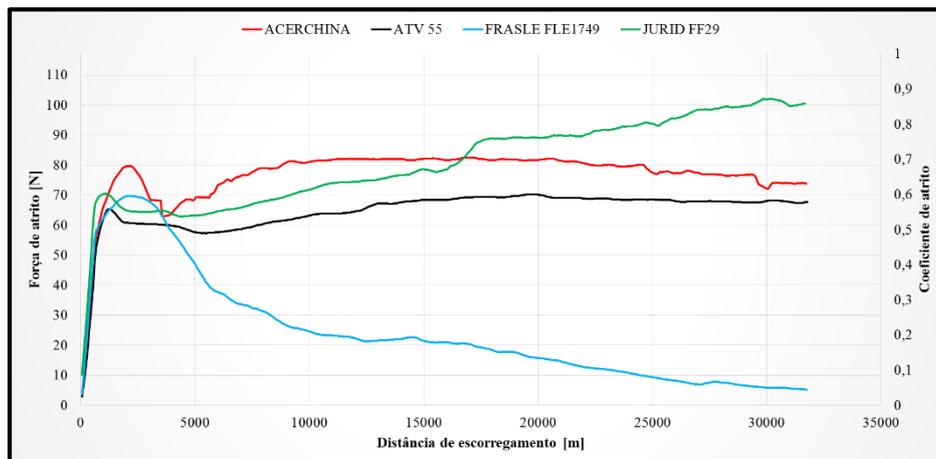
6 m/s – 0,5 MPa

Figura 4.9 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.

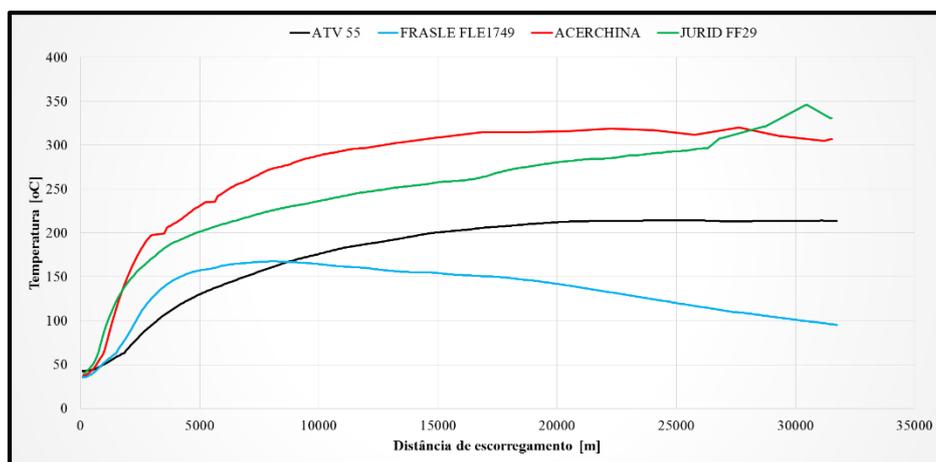


Figura 4.10 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.

Como é possível verificar pela Figura 4.9, as pastilhas *FRASLE* ficaram vidradas a cerca de 2500 m e nunca mais recuperaram atrito. Ainda assim, registaram um maior coeficiente máximo do que as pastilhas *ATV*, mas menos do que as *JURID*, principalmente após o aumento a partir dos cerca de 17000 m. Na temperatura, Figura 4.10, foi onde se fez notar o pouco tempo em que existiu maior atrito, pois o *FRASLE* registou a temperatura mais baixa, chegando aos 168 °C, em contraste com o *JURID*, com a mais alta, 320 °C.

6 m/s – 0,7 MPa

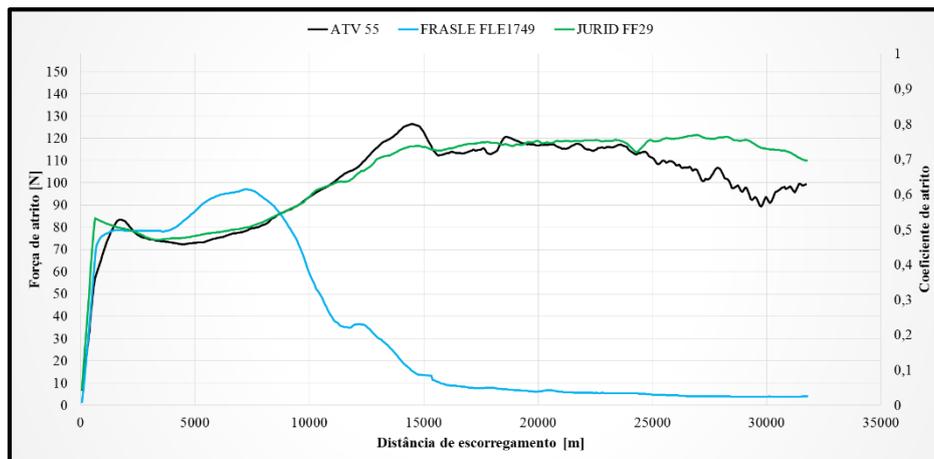


Figura 4.11 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.

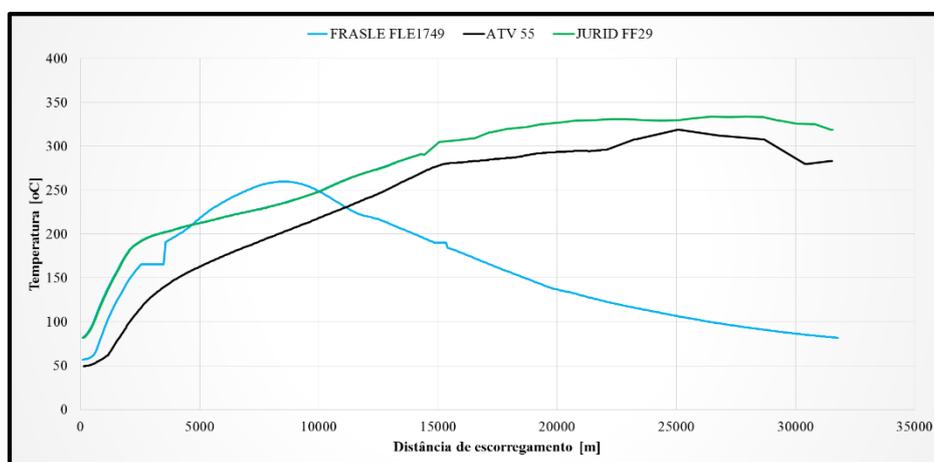


Figura 4.12 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.

Nesta condição, e nas restantes posteriores, as pastilhas *ACERCHINA* já não foram ensaiadas por falta de material.

Mais uma vez, as pastilhas *FRASLE* ficaram vidradas, fenómeno visível pelo decréscimo do coeficiente de atrito na Figura 4.11, neste caso a cerca dos 7500 m, voltando a criar atrito por volta dos 12500 m, nunca mais recuperando, sendo por isso as que registaram um coeficiente e uma temperatura mais baixos, 260 °C. Excepcionalmente, as pastilhas *ATV* tiveram o valor mais elevado de coeficiente de atrito, mas também registaram uma evolução muito inconstante. No entanto, a evolução térmica deste material e a do *JURID*, Figura 4.12, são semelhantes, sendo este último o material que atingiu maior temperatura, 334 °C.

12 m/s – 0,3 MPa

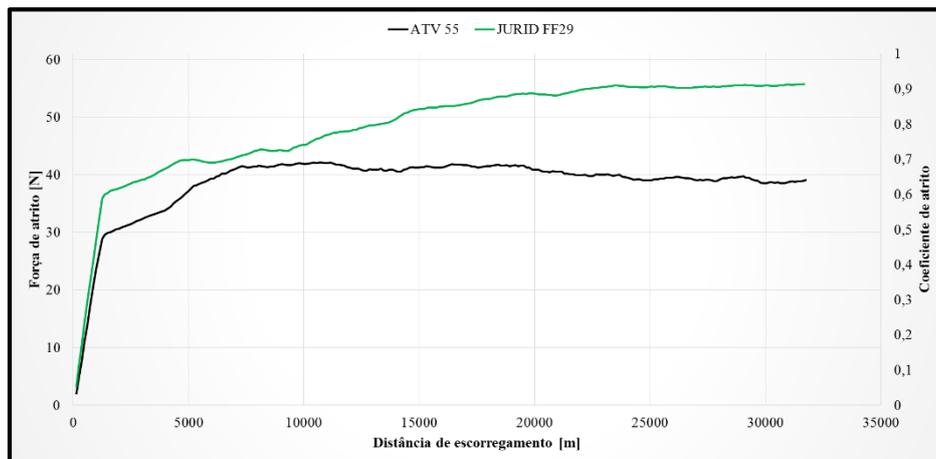


Figura 4.13 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.

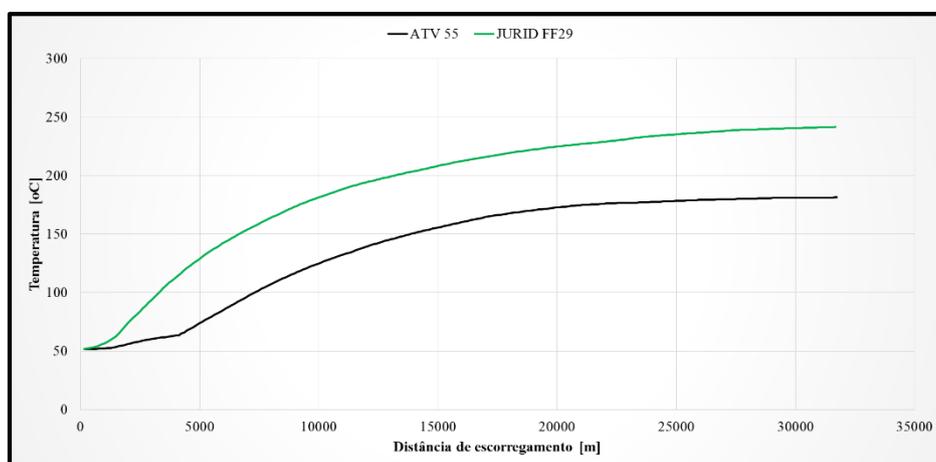


Figura 4.14 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.

Deste ensaio em diante, apenas os materiais *JURID* e *ATV* foram ensaiados, também devido a falta de material *FRASLE*.

Como demonstra a Figura 4.13, até cerca dos 4000 m, ambos os materiais têm um comportamento semelhante, no que toca ao coeficiente de atrito, sendo que a partir daí se aproximam os dois e, mais tarde, a rondar os 10000 m, há um afastamento permanente até ao fim do ensaio, sendo que o *JURID* tem sempre um coeficiente mais elevado do que o *ATV*, relação também visível na evolução da temperatura, Figura 4.14, em que o *ATV* se mantém com valores mais baixos, 181 °C, enquanto o *JURID* alcança uma temperatura mais alta, 242 °C.

12 m/s – 0,5 MPa

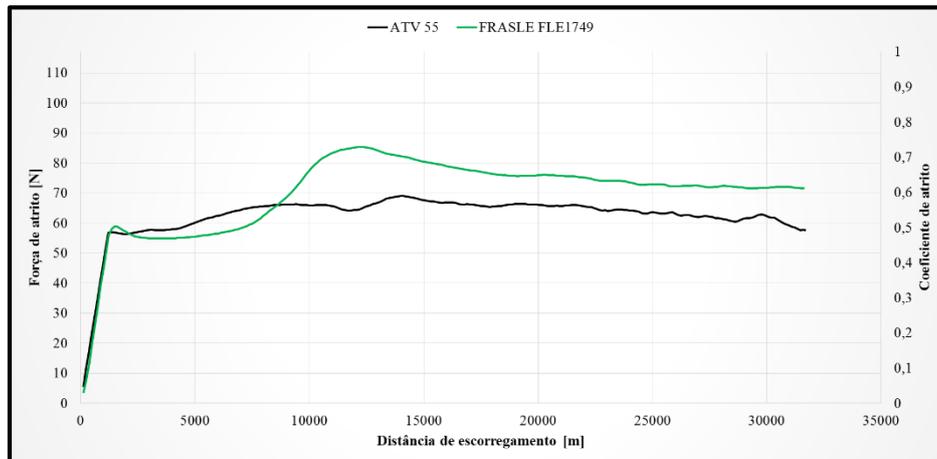


Figura 4.15 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.

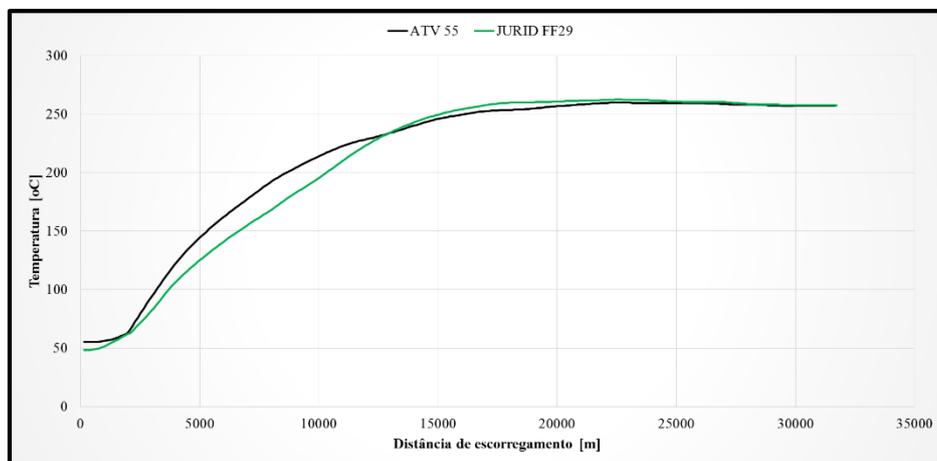


Figura 4.16 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.

Nesta condição, o *ATV* evolui de forma mais constante e estável do que o *JURID*, tanto no coeficiente de atrito, Figura 4.15, como na temperatura, Figura 4.16. No entanto, o maior coeficiente recai novamente sobre o *JURID*, assim como a temperatura, mas, neste último campo, por muito pouco, pois apenas são separados por 3°C.

12 m/s – 0,7 MPa

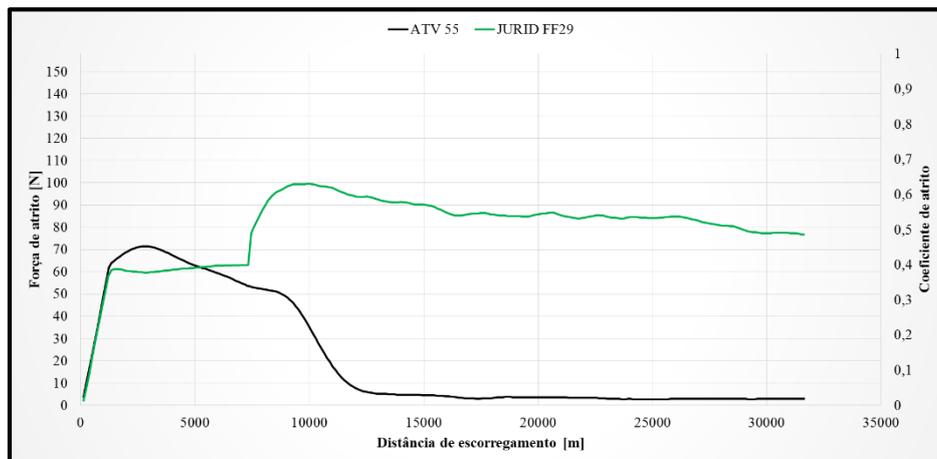


Figura 4.17 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.

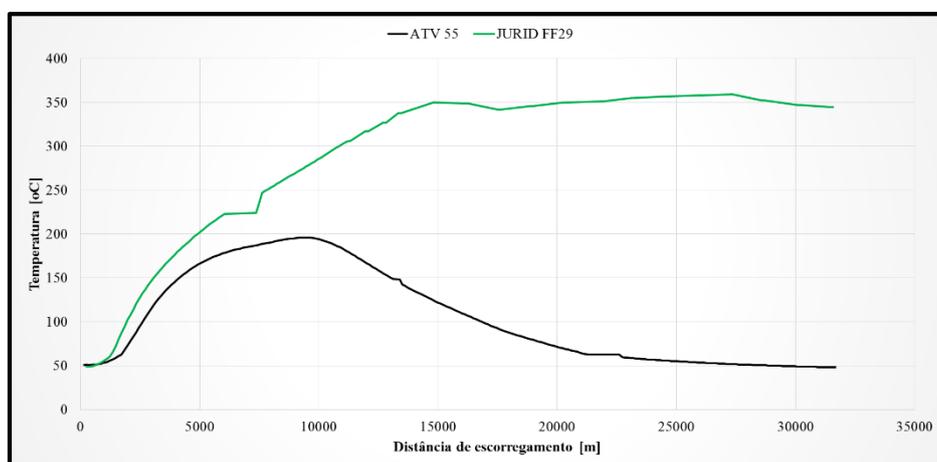


Figura 4.18 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.

Ambos os materiais perderam coeficiente de atrito com o tempo, como se verifica na Figura 4.17, tendo as pastilhas *ATV* chegado mesmo a vidrar, perdendo o atrito, quase por completo, desde os 12500 m. Como tal, o valor mais baixo tanto do coeficiente como da temperatura máxima, 196 °C, cabe ao *ATV*. Quanto à temperatura, Figura 4.18, *JURID* foi o único material que teve um comportamento dentro do normal, passando os 350 °C.

Após cada ensaio, foram pesadas as amostras para registar o desgaste volúmico provocado pelo processo. Os gráficos tridimensionais, Figura 4.19 e Figura 4.20, demonstram a forma como cada material se desgastou em cada condição.

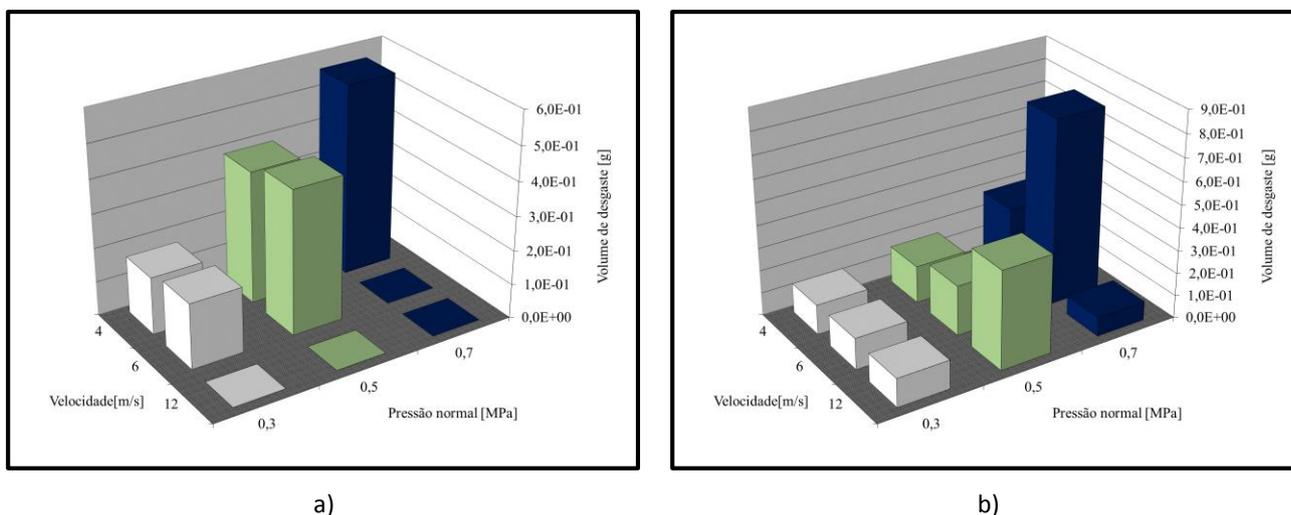


Figura 4.19 Volume de desgaste para as várias velocidades e pressões das pastilhas: a) ACERCHINA; b) ATV 55.

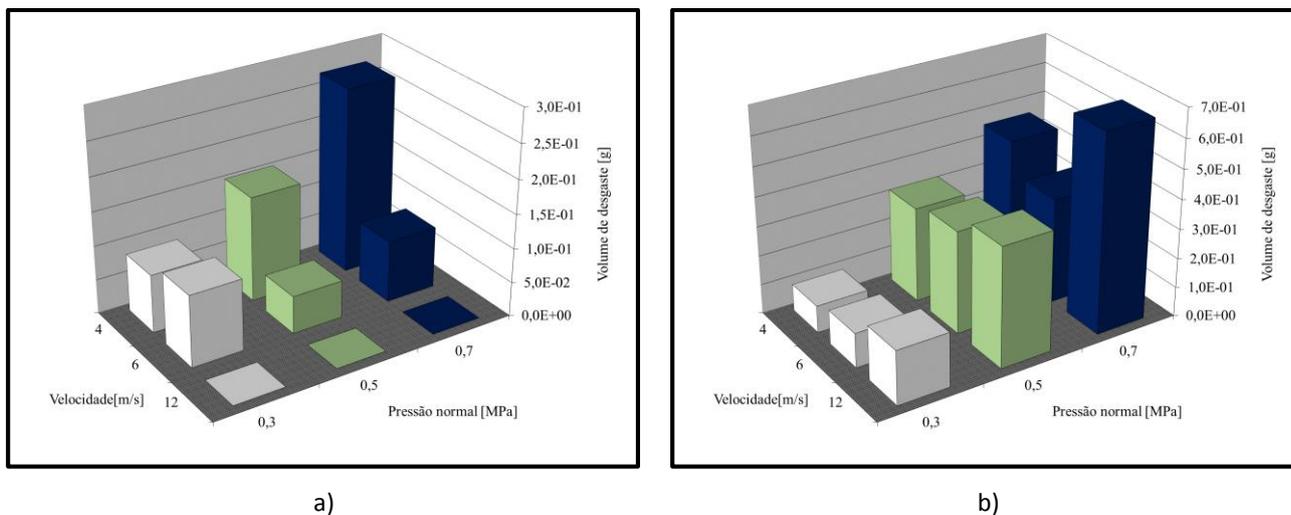


Figura 4.20 Volume de desgaste para as várias velocidades e pressões das pastilhas: a) FRASLE FLE1749; b) JURID FF29.

Nos primeiros dois casos, Figura 4.19, o material ACERCHINA tem uma maior variação positiva com o aumento de pressão do que com o aumento de velocidade, sendo que a mudança para uma velocidade mais alta apenas aumenta ligeiramente o volume desgastado. O mesmo acontece para as pastilhas ATV, mas, apenas a 0,3 MPa, pois a 0,5 MPa há um maior desgaste quando se passa para a velocidade máxima e a 0,7 MPa o desgaste é ainda maior a uma velocidade média. Já na velocidade e pressão mais elevadas, o desgaste volúmico é quase nulo pois nesta condição o material perdeu atrito nos instantes iniciais.

Na Figura 4.20 a), é possível verificar que há aumento significativo quando se aumenta a velocidade com uma pressão de 0,3 MPa, o que não acontece nas pressões mais altas, pois nestas, mais uma vez, o material perdeu atrito, não se desgastando tanto. No entanto, tal como se registou no comportamento do *ACERCHINA*, há um maior aumento de desgaste volúmico quando se aumenta a pressão do que quando se aumenta a velocidade, algo que se só se verifica à velocidade de 4 m/s neste caso devido à perda de atrito quando o material foi testado a 6 m/s. No caso do *JURID*, há uma semelhança no modo como se comporta em relação aos restantes materiais, pois o desgaste volúmico varia mais com o aumento de pressão do que com o aumento de velocidade, excepto a 6 m/s, em que há um valor quase igual para 0,5 e 0,7 MPa.

Após os ensaios tribológicos, foi calculado então o desgaste específico de cada material em cada ensaio, usando para isso as equações (3.3) e (3.4), e os valores de desgaste incluídos no anexo B.

Tabela 4.1 Resultados gerais do desgaste específico [mg/MJ].

	4 m/s			6 m/s			12 m/s		
	0,3 MPa	0,5 MPa	0,7 MPa	0,3 MPa	0,5 MPa	0,7 MPa	0,3 MPa	0,5 MPa	0,7 MPa
<i>ACERCHINA</i>	126,6	142,1	170,3	134,4	173,3	*	*	*	*
<i>ATV 55</i>	96,1	84,8	106,8	105,1	106,9	257,9	102,2	218,5	125,7
<i>FRASLE FLE1749</i>	57,6	63,7	81,7	68,2	71,1	84,4	*	*	*
<i>JURID FF29</i>	77,2	129,9	128,2	73,5	136,1	108,3	119,2	184,2	267,3

*a ensaios que não puderam ser realizados por falta de material.

Através da Tabela 4.1, é possível verificar o elevado desgaste específico que se faz sentir no *ACERCHINA*, sendo maior que os restantes e estando até acima do limite máximo ideal, 100 mg/MJ. O único que se mantém dentro dos limites é o *FRASLE*, nunca baixando dos 40 mg/MJ e nunca passando o máximo ideal. O *ATV* tem valores semelhantes em alguns ensaios, mas por duas vezes ultrapassa os 200 mg/MJ. Quanto ao *JURID* tem apenas dois ensaios nos quais se encontra dentro dos limites ideais.

O valor da dureza pode também indicar o modo como um material se pode desgastar, ou dar indícios se esse material é mais ou menos denso. Tal como demonstram os gráficos nas Figura 4.21 e Figura 4.22, reproduzidos com os valores de todos os materiais, quanto mais duro for um material maior vai ser o seu desgaste específico. O contrário

acontece com a densidade, pois um valor elevado de dureza pode significar um valor baixo de densidade.

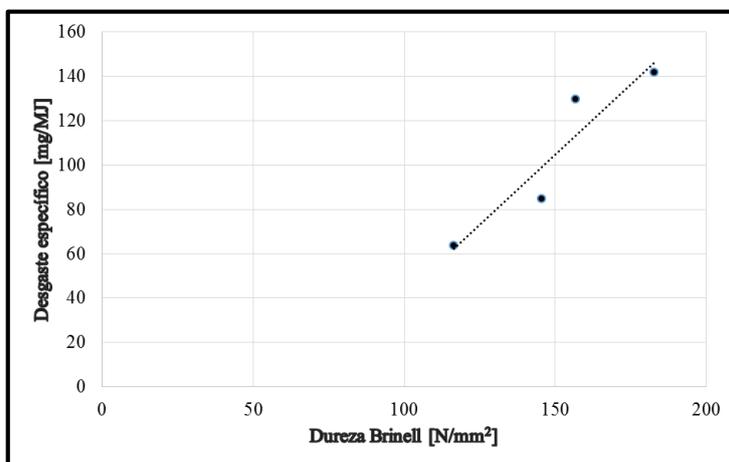


Figura 4.21 Aproximação linear na influência da dureza no desgaste específico. Valores do ensaio a 4 m/s e 0,5 MPa.

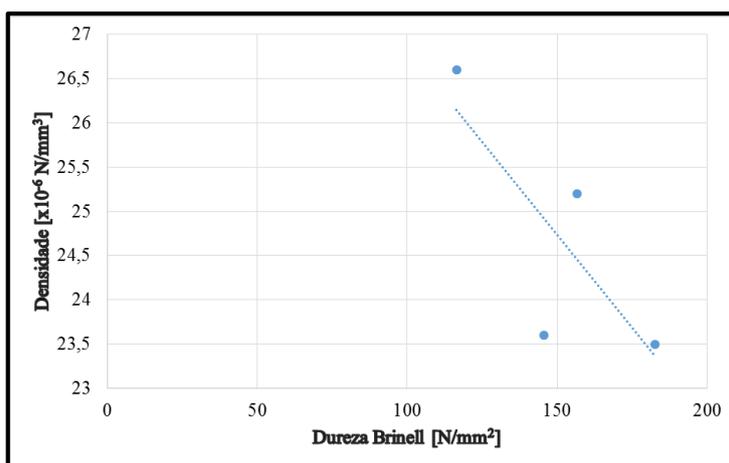


Figura 4.22 Aproximação linear da relação entre a dureza e a densidade de todos os materiais.

No que diz respeito ao coeficiente de atrito, os valores médios em cada ensaio são os exibidos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Coeficientes de atrito médio de cada material em cada ensaio.

	4 m/s			6 m/s			12 m/s		
	0,3 MPa	0,5 MPa	0,7 MPa	0,3 MPa	0,5 MPa	0,7 MPa	0,3 MPa	0,5 MPa	0,7 MPa
ACERCHINA	0,7	0,75	0,67	0,76	0,67	*	*	*	*
ATV 55	0,71	0,53	0,56	0,68	0,56	0,64	0,65	0,54	0,12
FRASLE FLE1749	0,79	0,66	0,68	0,82	0,19	0,2	*	*	*
JURID FF29	0,63	0,68	0,73	0,84	0,7	0,66	0,82	0,61	0,52

*a ensaios que não puderam ser realizados por falta de material.

Como se verifica na Tabela 4.2, pela cor acastanhada, em ensaios que não ocorram anormalidades, o *ATV* é o material que geralmente apresenta coeficientes de atrito mais baixos, excepto no 1º ensaio, no qual o *JURID* tem o valor mais baixo. Quanto ao coeficiente mais elevado, a cor verde, no primeiro e segundo ensaio cabe ao *FRASLE* e ao *ACERCHINA*, respectivamente. Nos restantes ensaios, o *JURID* foi o material que melhor coeficiente de atrito registou.

Microscópio electrónico de varrimento

Foram visualizadas e obtidas imagens através de um microscópio electrónico de varrimento, de modo poder comparar as superfícies dos materiais após os ensaios de maior carga e velocidade de cada material.

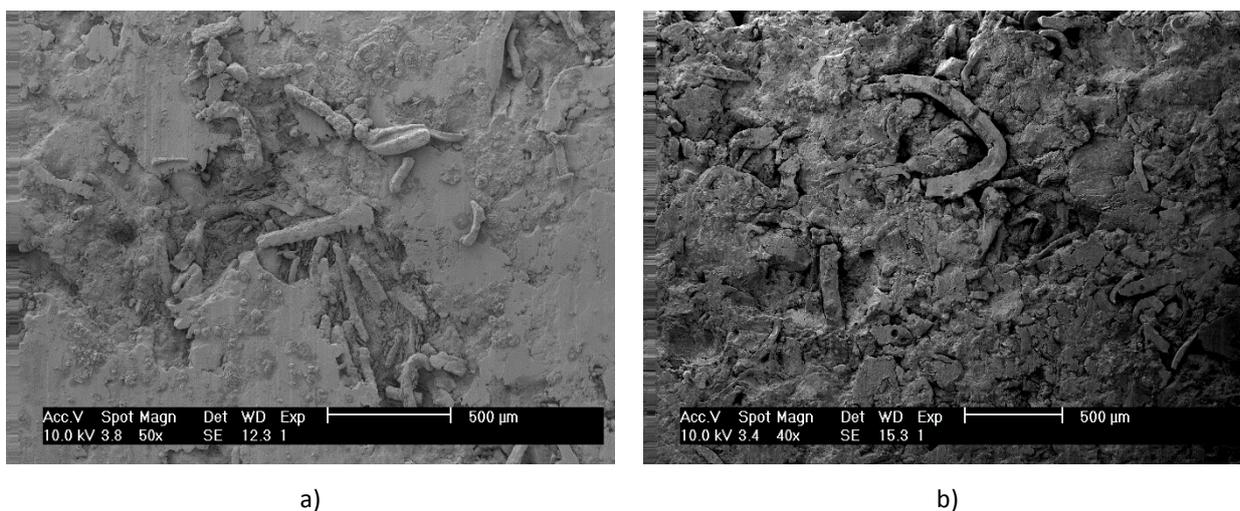


Figura 4.23 Imagens de microscópio óptico de varrimento das superfícies de material de travagem: a) *ACERCHINA* a 6 m/s e 0,5 MPa; b) *ATV 55* a 12 m/s e 0,7 MPa

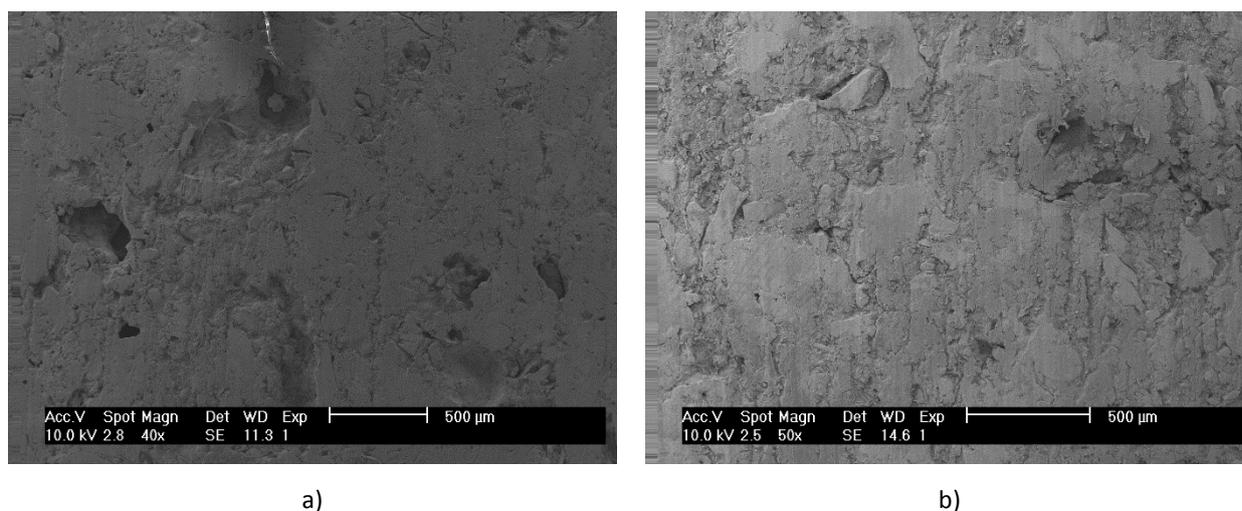


Figura 4.24 Imagens de microscópio óptico de varrimento das superfícies de material de travagem: a) *FRASLE FLE1749* a 6 m/s e 0,5 MPa; b) *JURID FF29* a 12 m/s e 0,7 MPa

As superfícies da Figura 4.23 são semelhantes uma à outra, assim como o são as da Figura 4.24, sendo que estas últimas, mesmo após um ensaio em que o material é sujeito a um esforço maior, a superfície mantém-se homogénea, enquanto os materiais *ACERCHINA* e *ATV* parecem desintegrar-se mais e haver uma quebra na sua matriz de base, o que pode influenciar o bom desempenho de um destes materiais num processo de travagem.

Foram também visualizados todos os materiais através de um microscópio óptico, mas as imagens retiradas pouco conseguem transmitir acerca do material, devido à dificuldade de identificar quais os componentes visualizados.

4.2. Dureza Brinell

A Tabela 4.3 resume os valores médios dos ensaios, cujos valores individuais podem ser visualizados nas tabelas do anexo A.

Tabela 4.3 Dureza Brinell e desvio padrão relativos aos 5 ensaios para cada material.

	Brinell Média [MPa] (Desvio-padrão)
<i>ACERCHINA</i>	182,6 (20,6)
<i>ATV 55</i>	145,5 (12,7)
<i>FRASLE FLE1749</i>	156,7 (12,7)
<i>JURID FF29</i>	116,4 (25,8)

No que respeita à dureza, o material que apresentou o valor mais elevado foi o *ACERCHINA*, um valor cerca de 57% mais elevado que o material menos duro, o *JURID FF29*.

4.3. Módulo de elasticidade

Na Figura 4.25 apresentam-se os resultados referentes ao efeito da temperatura

no módulo de elasticidade.

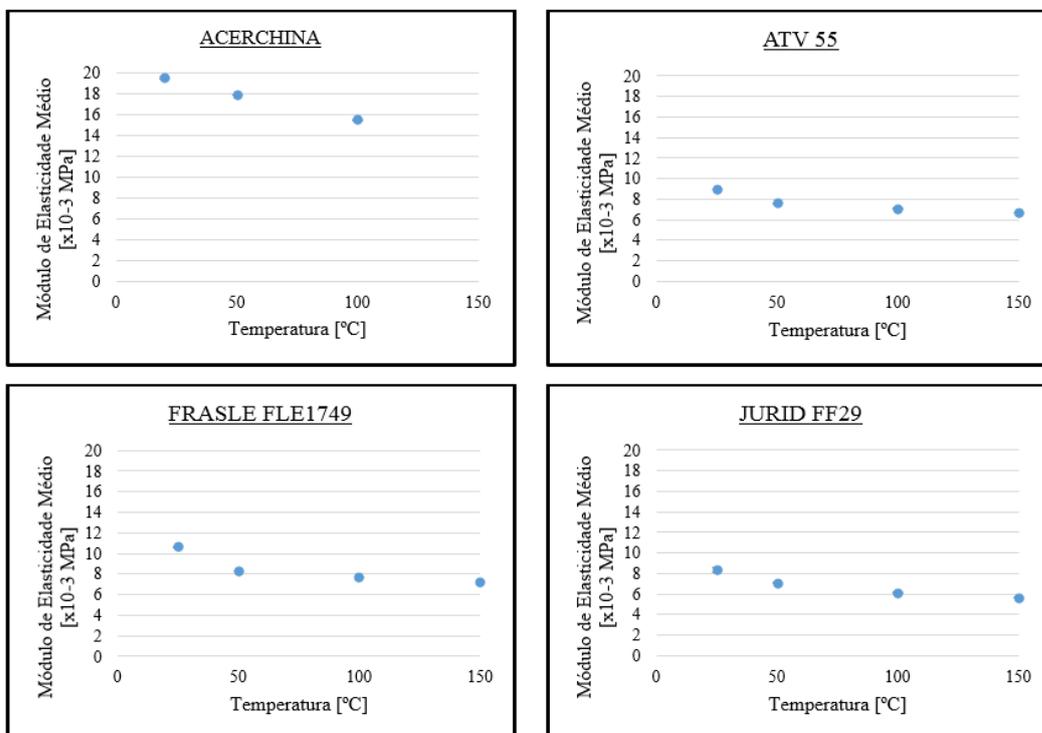


Figura 4.25 Valores médios do módulo de elasticidade para os vários materiais em função da temperatura.

Quanto ao módulo de elasticidade, todos os materiais têm um decréscimo do mesmo à medida que se aumenta a temperatura. Apenas o *ACERCHINA* tem um valor muito diferente dos restantes materiais. A variação do seu módulo de elasticidade relativamente aos *ATV 55* e o *JURID FF29* foi de mais de 200% para ambos.

Entre a temperatura ambiente e 50 °C há uma diminuição entre cerca de 8%, no *ACERCHINA*, e 22,3%, no *FRASLE FLE1749*. Depois, na transição para os 100 °C, diminuem entre 6,5%, no *ATV 55*, e 13,9%, no *JURID FF29*. Na última transição, em que o *ACERCHINA* não foi ensaiado devido a uma falha no sistema de aquisição e também no sensor, a diminuição é mais semelhante entre os materiais, permanecendo entre os 5,1%, no caso do *FRASLE FLE1749*, e 7,7%, no caso do *JURID FF29*.

4.4. Densidade

Através da medição da temperatura do fluido usado, é possível obter a sua densidade. Como a temperatura medida foi de 20,2 °C para água destilada, a densidade do fluido, ρ_F , é igual a:

$$\rho_F(20,2\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,9978\text{ g/cm}^3 = 9,7884 \times 10^{-6}\text{ N/mm}^3$$

Usando a equação (2.7), obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Valores de ensaio de densidade.

	<i>ACERCHINA</i>	<i>ATV 55</i>	<i>FRASLE FLE1749</i>	<i>JURID FF29</i>
Peso do corpo [x10 ⁻³ N]	56,9	53,5	62,0	63,2
Peso aparente [x10 ⁻³ N]	33,2	31,3	39,2	38,6
Peso específico [x10 ⁻⁶ N/mm ³]	23,5	23,6	26,6	25,2

Neste caso, o material mais denso é o *FRASLE FLE1749*, enquanto o *ACERCHINA* é o menos denso, cuja diferença para o *FRASLE* é de cerca de 13%.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Depois de observar os resultados obtidos e analisar profundamente todos valores e desempenhos dos materiais em cada parâmetro específico de caracterização, foram retiradas conclusões sobre qual o material que melhor se comportava em cada caso e qual a provável explicação para isso.

Após todo o estudo, foi visível a necessidade da obtenção de outros parâmetros, como a condutividade térmica, e do melhoramento dos componentes dos vários ensaios.

5.1. Conclusões

Tal como foi referido no início deste estudo, apenas foi possível testar tribologicamente dois materiais em todas as condições de pressão e velocidade, o *ATV 55* e o *JURID FF29*, sendo que para os restantes não foi fornecida quantidade suficiente. Além deste ensaio tribológico, foram também realizados ensaios de dureza, do módulo de elasticidade e da densidade para complementar os resultados obtidos e podê-los explicar de forma mais eficiente e real. No módulo de elasticidade, o qual diminui com o aumento da temperatura, também não foi possível ensaiar o *ACERCHINA* a 150° C devido a falhas no equipamento de aquisição.

Coeficiente de atrito - Em alguns casos, durante o ensaio tribológico, as pastilhas produziram um barulho contínuo agudo, acontecendo este fenómeno maioritariamente com condições de cargas e velocidades mais elevadas. Durante esta ocorrência, dependendo do material, a força de atrito podia ou não diminuir, alterando também o coeficiente de atrito por este estar inerente àquela força.

Um dos casos em que não perde atrito mesmo com o ruído é o *ACERCHINA*, o qual provocou este ruído em praticamente todos os ensaios e nunca teve uma diminuição drástica do coeficiente de atrito, o que pode ser devido ao facto de este ser o material composto por mais elementos vítreos, mais duros e susceptíveis a provocar este fenómeno. Os elevados valores de dureza Brinell e do módulo de elasticidade deste material contribuem também para que ocorra mais facilmente [14]. Já noutros casos, como do *JURID FF29*,

Figura 4.1, do *FRASLE FLE1749*, Figura 4.9 e Figura 4.11, e do *ATV 55*, Figura 4.17, existe perda contínua de atrito, sendo que apenas no caso do *JURID FF29* voltou a reaver esse atrito, ainda que por instantes.

As pastilhas *JURID* foram as que registaram um coeficiente de atrito mais elevado na maioria dos ensaios, como se pode confirmar pela Tabela 4.2.

Temperatura - A temperatura é algo que depende e muito da força de atrito, pois é este atrito entre a pastilha e o disco que gera a energia que é convertida em calor. Daí que quando a pastilha vibra e perde o atrito, a temperatura vai sendo cada vez mais baixa, e quando é criado atrito, a temperatura aumenta.

Posto isto, as pastilhas, idealmente, devem conseguir conduzir esse calor para o exterior [1], de modo que não exista uma temperatura excessiva no sistema, o que poderia provocar um mau funcionamento nos restantes componentes adjacentes ou até no líquido de travões.

Neste estudo, as pastilhas que melhor parecem dissipar a energia térmica são as *ATV 55*, ainda que o coeficiente de atrito também seja geralmente mais baixo que as restantes, e as que dissipam pior as *JURID FF29* e as *ACERCHINA*.

Desgaste – Relativamente ao desgaste, o *ACERCHINA* é o que apresenta valores mais elevados na maior parte dos ensaios, enquanto o *FRASLE FLE1749* é o que menos material perde durante o ensaio.

Um dado que pode influenciar o desgaste parece ser a densidade, Tabela 4.4, pois o *FRASLE FLE1749*, sendo o mais denso, é o que se desgasta menos e o *ACERCHINA*, menos denso, tem maior desgaste.

Como foi referido no sub-capítulo 2.3, os valores ideais, no que toca a desgaste específico, devem estar entre 40 e 100 mg/MJ [4]. No caso dos materiais estudados, apenas o *FRASLE FLE1749* se manteve entre esses valores em todas as condições de ensaio. O *ACERCHINA* esteve sempre acima dos valores referidos, o *ATV 55* aumentou de forma excessiva em três casos de pressões mais elevadas e o *JURID FF29* apenas se manteve dentro dos limites em dois ensaios com a pressão mais baixa. Analisando a Figura 4.19 e a Figura 4.20, é possível dizer que o desgaste volúmico dos materiais de travagem em estudo são mais influenciados pela pressão do que pela velocidade, e a junção de altas cargas e velocidades desgasta o material a uma taxa muito elevada.

Nesta área, o melhor material foi o *FRASLE FLE1749*.

5.2. Trabalhos futuros

Em trabalhos posteriores, nos quais se use este sistema mecânico de simulação de travagem, devem ser melhorados alguns aspectos:

- Parafusos de aperto dos suportes principais aos secundários com maior diâmetro e melhor aperto, por forma a não ocorrer desaperto involuntário durante o ensaio;
- Dispositivo de aquisição de temperatura com maior limite máximo, se possível acima dos 400°C;
- Melhoramento da aquisição de dados, pois neste estudo ocorriam falhas aleatórias;
- Placa de suporte da célula de carga mais rígida para não absorver tantas cargas, sendo essas cargas completamente absorvidas pela célula;
- Medição da condutividade térmica dos materiais de travagem.

É fundamental para o estudo saber quais os componentes e as suas quantidades na microestrutura, de modo a poder justificar os resultados obtidos. Como a maior parte dos produtores não fornece essa informação, os resultados explicam-se apenas com referências exteriores e com os resultados dos ensaios efectuados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Blau, Peter J. (2001) “Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives”, *Energy*, vol. 27.
- [2] Jang, H e Lee, W. K. (2013) “Moisture effect on velocity dependence of sliding friction in brake friction materials”, *Wear*, vol. 306, no. 1–2, pp. 17–21.
- [3] “Manual Técnico de la Pastilla de Freno,” pp. 1–75.
- [4] Anderson, A. E. (1992) “ASM Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology”, *Technology*, vol. 18.
- [5] Braungart, M., Doyle, R., Skerfving, S. e Uexküll, O. (2005) “Antimony in brake pads-a carcinogenic component?”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 13, pp. 19–31.
- [6] Denier van der Gon, H., Hulskotte, J., Schaap, M. e Visschedijk, A. (2007) “A revised estimate of copper emissions from road transport in UNECE-Europe and its impact on predicted copper concentrations”, *Atmospheric Environment*, vol. 41, pp. 8697–8710.
- [7] Gventsadze, D., Gventsadze, L., Kutelia, E., Olander, L., Olofsson, U., Tsursumia, O. e Wahlström, J. (2011) “A pin-on-disc investigation of novel nanoporous composite-based and conventional brake pad materials focussing on airborne wear particles”, *Tribology International*, vol. 44, pp. 1838–1843.
- [8] Saffar, A e Shojaei, A. (2012) “Effect of rubber component on the performance of brake friction materials”, *Wear*, vol. 274–275, pp. 286–297.
- [9] Jaafar, T. R., Kasiran, R. e Selamat, M. S. (2012) “Selection of Best Formulation for Semi-Metallic Brake Friction Materials Development”, *Powder Metallurgy*, pp. 1–31.
- [10] Hwang, H. J., Jang, H., Kim, S. S. e Shin, M. W. (2011) “Friction and vibration of automotive brake pads containing different abrasive particles”, *Wear*, vol. 271, no. 7–8, pp. 1194–1202.
- [11] Jansson, A., Olander, Olofsson, U., Söderberg, A. e Wahlström, L. J. (2010) “A pin-on-disc simulation of airborne wear particles from disc brakes”, *Wear*, vol. 268, pp. 763–769.
- [12] Maluf, O. e Milan, M T. (2004) “Development of Materials for Automotive Disc Brakes”, *Minerva*, vol. 4, no. 2, pp. 149–158.
- [13] “Young’s Modulus”, Disponível online em: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/654186/Youngs-modulus>.

-
- [14] Ahmed, I. (2012) “Analysis of disc brake squeal using a ten-degree-of-freedom model”, *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 3, no. 8, pp. 142–155.
- [15] Chiariotti, P., Martarelli, M., Santolini, C. e Tomasini, E. P. (2013) “Diagnostic procedure on brake pad assembly based on Young modulus estimation” *Measurement Science and Technology*, vol. 1457.
- [16] Mazali, I. O. (2010) “Determinação da densidade de sólidos pelo método de Arquimedes”, no. 1, pp. 1–11.
- [17] “ASTM C 1198 - 09 (2013),” vol. 15, pp. 1–8.
- [18] Haines, D., Herbé, C. e Leban, J.M. (1996) “Determination of Young’s modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods”, *Wood Science and Technology*, vol. 30, pp. 253–263.
- [19] “ASTM E0010-01E01”, pp. 1–32, 2014.
- [20] “Phidget Bridge 4 Inputs”, Disponível online em: http://www.phidgets.com/docs/1046_User_Guide#Measuring_Resistive_Thermal_Devices_.28RTD.29.
- [21] “Data Sheet Termistor”

ANEXO A

Os materiais de travagem foram todos sujeitos a 5 ensaios em diferentes pontos para obter a dureza Brinell, os valores de cada ensaio encontram-se descritos abaixo.

Tabela A. 1 Resultados dos 5 ensaios de dureza Brinell do *ACERCHINA*.

<i>ACERCHINA</i>					
Tamanho médio [mm]	1,70	1,91	1,94	1,82	1,88
Dureza Brinell [MPa]	216,22	169,53	164,37	187,19	175,79

Tabela A. 2 Resultados dos 5 ensaios de dureza Brinell do *ATV 55*.

<i>ATV 55</i>					
Tamanho médio [mm]	1,95	1,99	2,15	2,10	2,13
Dureza Brinell [MPa]	162,16	155,73	133,64	140,50	135,36

Tabela A. 3 Resultados dos 5 ensaios de dureza Brinell do *FRASLE FLE1749*.

<i>FRASLE FLE1749</i>					
Tamanho médio [mm]	2,03	1,95	1,94	2,11	1,91
Dureza Brinell [MPa]	149,30	163,34	163,77	137,96	169,09

Tabela A. 4 Resultados dos 5 ensaios de dureza Brinell do *JURID FF29*.

<i>JURID FF29</i>					
Tamanho médio [mm]	2,44	2,46	2,33	2,46	1,95
Dureza Brinell [MPa]	103,51	101,80	113,04	101,80	161,83

ANEXO B

Os valores de desgaste de massa no final de cada ensaio serviram como auxílio no cálculo do desgaste específico.

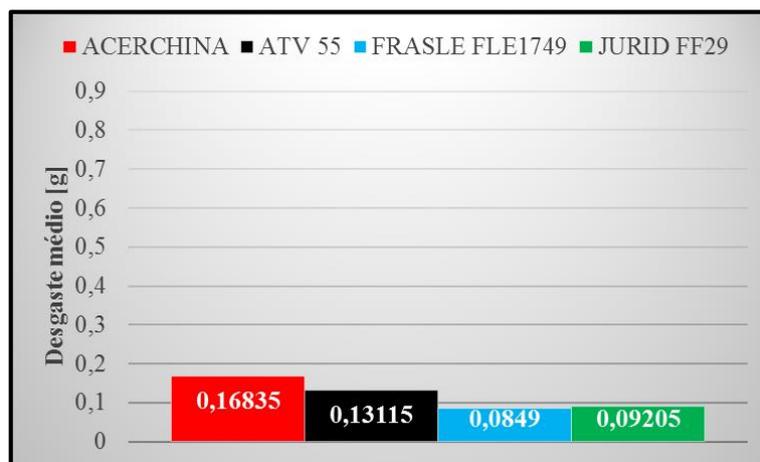


Figura B. 1 Resultados do desgaste no ensaio tribológico para 4 m/s e 0,3 MPa.

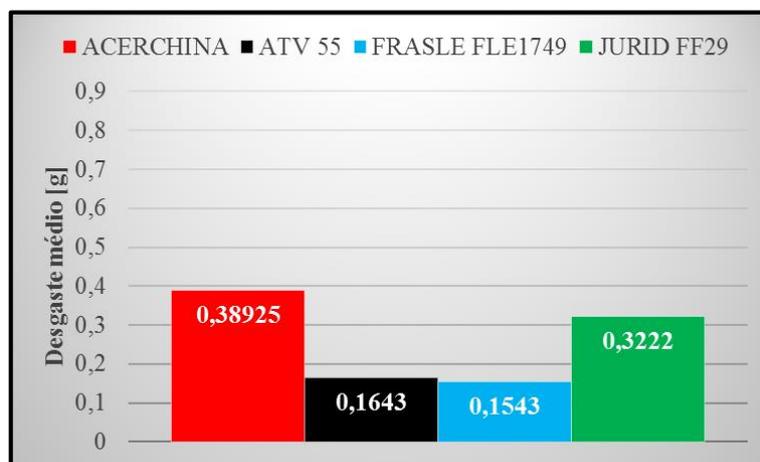


Figura B. 2 Resultados do desgaste no ensaio tribológico para 4 m/s e 0,5 MPa.

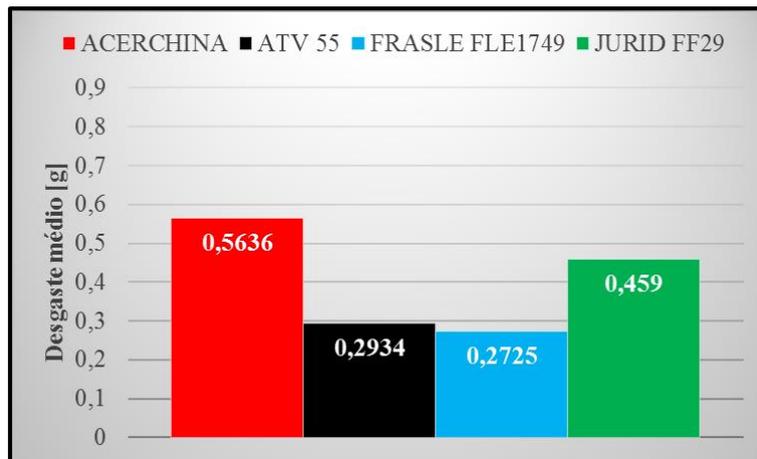


Figura B. 3 Resultados do desgaste no ensaio tribológico para 4 m/s e 0,7 MPa.

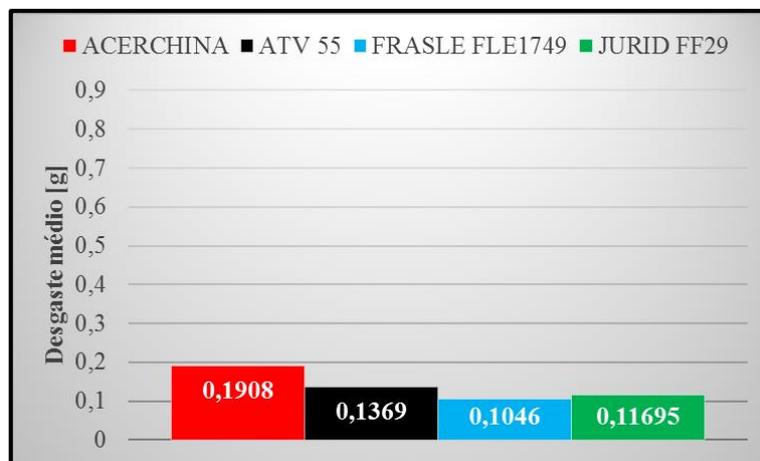


Figura B. 4 Resultados do desgaste no ensaio tribológico para 6 m/s e 0,3 MPa.

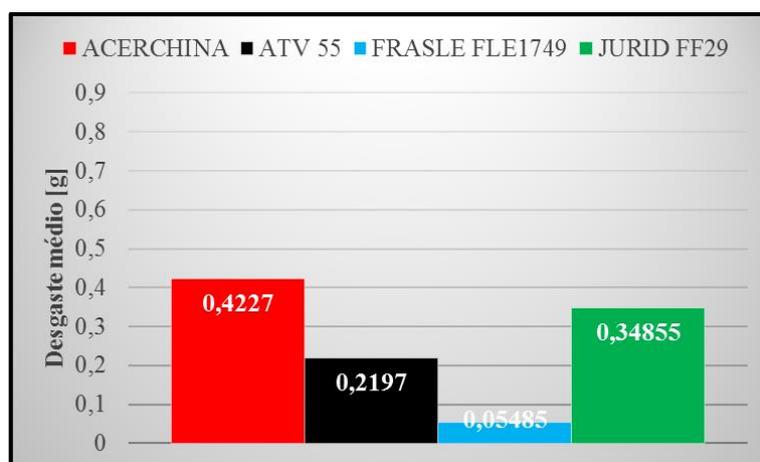


Figura B. 5 Resultados do desgaste no ensaio tribológico para 6 m/s e 0,5 MPa.

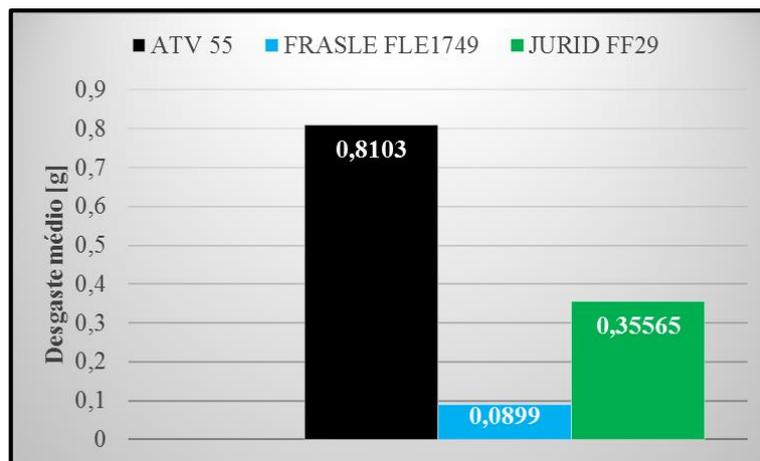


Figura B. 6 Resultados do desgaste no ensaio tribológico para 6 m/s e 0,7 MPa.

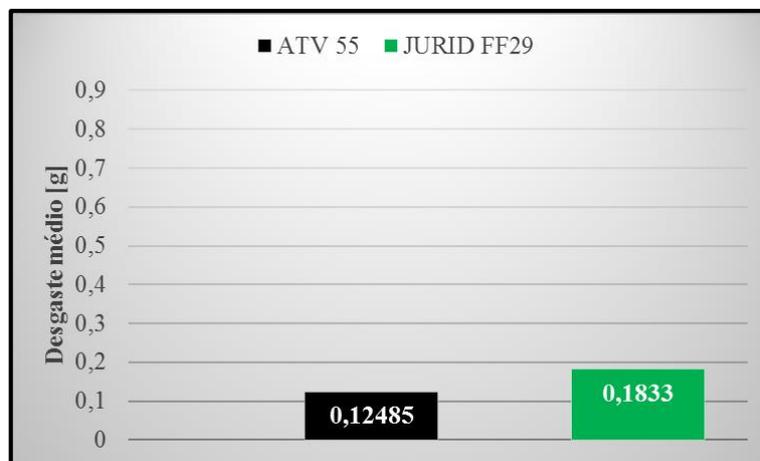


Figura B. 7 Resultados do desgaste no ensaio tribológico para 12 m/s e 0,3 MPa.

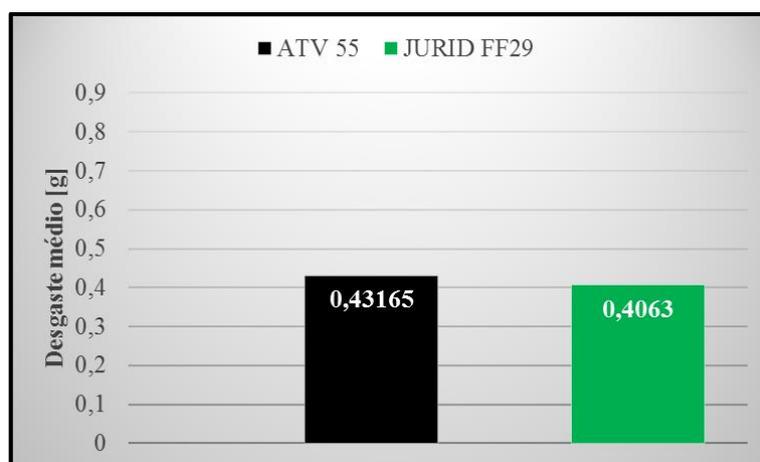


Figura B. 8 Resultados do desgaste no ensaio tribológico para 12 m/s e 0,5 MPa.

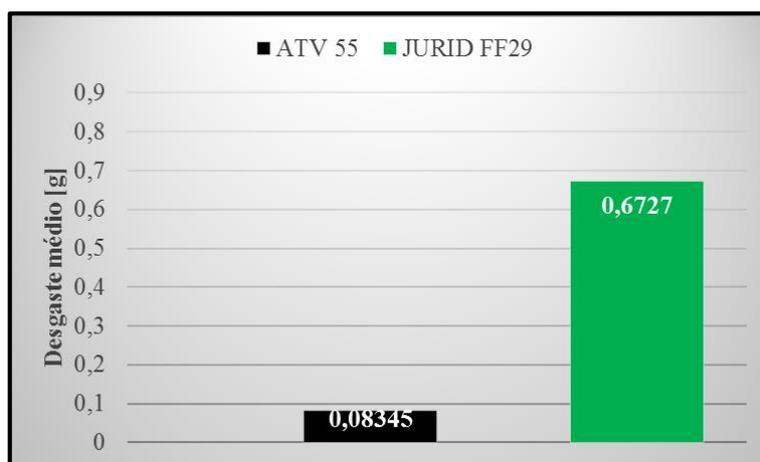


Figura B. 9 Resultados do desgaste no ensaio tribológico para 12 m/s e 0,7 MPa.