



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Caracterização mecânica e tribológica de materiais de atrito

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

Mechanical and tribological characterization of friction materials

Autor

Pedro Guilherme de Jesus Silva Santos

Orientadores

Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho

**Professor Doutor Pedro Alexandre de Almeida do Vale
Antunes**

Júri

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

Vogais Professor Doutor Mário António Simões Correia
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria

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

Coimbra, Setembro, 2016

À minha mãe pelo incentivo e compreensão.

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Doutor Pedro Vale Antunes e ao Professor Doutor Amílcar Ramalho pela orientação, conhecimentos transmitidos e pela disponibilidade prestada, durante a realização deste trabalho.

Agradeço ao Mestre Miguel Esteves pela ajuda e disponibilidade prestada.

Resumo

Os materiais de atrito desempenham um importante papel no sistema de travagem. Assim sendo, para que cumpram com eficácia a sua função, devem, entre outras características, ter um coeficiente de atrito estável e dar resposta a diferentes situações de aplicação, nomeadamente, pressão aplicada, temperatura, velocidade e humidade. Devem ainda possuir outros requisitos, tais como, resistência a contaminações líquidas, resistência ao calor e estabilidade térmica, baixa taxa de desgaste e não provocar danos no disco.

As pastilhas e os calços de um veículo são elementos essenciais no sistema de travagem, visto que são responsáveis por uma travagem que se deseja eficiente e segura, e por isso, alvo de uma grande evolução ao longo dos tempos.

No fabrico das pastilhas de travão é utilizada frequentemente uma extensa gama de diferentes materiais, com inúmeras possibilidades de combinação, que cumprem funções específicas.

Os métodos de ensaio que têm sido desenvolvidos para testar tribologicamente os materiais de atrito são muitos e a sua evolução é uma constante.

Devido a limitações que alguns métodos apresentam, têm sido feitos estudos para determinar o grau de correlação entre os resultados dos testes obtidos em laboratório e os obtidos em veículos reais, concluindo-se que não há testes de laboratório que de uma forma consistente forneçam dados que se correlacionem com os obtidos em situação de serviço. Por outro lado, estes ensaios são muito demorados e de elevado custo, tendo sido desenvolvidos, para este tipo de pesquisas, de forma independente e a menor escala, outro tipo de testes que, dependendo dos parâmetros que se pretendem avaliar, podem ser instrumentalizados para esse fim.

No presente estudo submetemos seis materiais a ensaios, sendo estes, BREKA, COMERCIAL 70-30, PESADO, 50-20, PLACAS, 55-30.

Todos os materiais foram caracterizados mecanicamente, mas só foi possível caracterizar tribologicamente os materiais PLACAS, BREKA e COMERCIAL 70-30, por falta de amostras suficientes dos restantes materiais.

Para realizar os ensaios tribológicos para cada material, foram utilizadas três pressões diferentes e para cada pressão foram efetuados três ensaios de duração diferente.

Os ensaios tribológicos foram efetuados numa máquina denominada *Friction Assessment Screening Test (F.A.S.T)*, tendo sido substituídas algumas peças originais e feitas adaptações de modo a permitir a obtenção dos dados de forma digital. Como *outputs* foram obtidos a força normal, a força de atrito e a temperatura da pastilha. O desgaste de cada pastilha foi determinada através de pesagem. A comparação do desempenho das formulações foi realizada através da representação gráfica da força de atrito e coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento, assim como a massa de desgaste de todos os materiais sujeitos a ensaio. Foi ainda feita, para auxiliar a compreensão de resultados obtidos, a caracterização mecânica dos materiais e determinados os valores de módulo de elasticidade dinâmico, módulo de elasticidade estático, dureza e resistência à flexão/tenacidade.

Genericamente, verificou-se um aumento do desgaste com o aumento da pressão aplicada ao provete e com o aumento da distância de escorregamento, como era expectável.

Todos os materiais apresentaram valores de desgaste específico no intervalo que é tomado como referência (40 mg/MJ a 100 mg/MJ) na classificação do material de atrito como aceitável.

Relativamente ao desgaste volúmico e desgaste específico, os materiais PLACAS e COMERCIAL 70-30 tiveram valores de desgaste muito semelhantes para todos os tipos de ensaios. O material BREKA, pelo contrário distingue-se dos outros dois por apresentar valores de desgaste muito inferiores.

Quanto ao coeficiente de atrito, o material que apresentou maior coeficiente de atrito foi o PLACAS e o material que apresentou o menor coeficiente de atrito, foi o BREKA.

No que toca às propriedades mecânicas, o módulo de elasticidade de todos os materiais de atrito diminuiu com o aumento da temperatura.

Palavras-chave: Materiais de atrito, Ensaio tribológico, Módulo de elasticidade, Coeficiente de atrito, Desgaste específico.

Abstract

Friction materials play an important role in the braking system. Therefore, to fulfill effectively its function, it should, among other characteristics, have a stable friction coefficient and respond well to different application situations in particular applied pressure, temperature, velocity and humidity. They must also have other requirements such as resistance to liquid contamination, good heat resistance and thermal stability, low wear rate and not cause damage to the disk.

The pads and shoes of a vehicle are essential elements in the braking system, as they are responsible for braking which desired to be efficient and secure, and therefore the target of a major evolution over time.

In the manufacture of brake pads is often used a wide range of different materials with numerous combination possibilities, which fulfill specific functions.

The test methods that have been developed to tribologically test friction materials are many and its evolution is a constant.

Due to limitations of some methods, studies have been made to determine the degree of correlation between the test results obtained in the laboratory and results obtained in vehicles, it has been concluded that there are no laboratory tests that consistently provide data that has any correlation with those obtained in vehicles. Moreover, these tests are time consuming and costly, leading to the development of other independent subscale tests, that can have different control and instrumentation depending on the parameters wished to evaluate.

In the present study we submitted six materials to testing, which are, BREKA, COMMERCIAL 70-30, PESADO, 50-20, PLACAS, 55-30.

All materials were characterized mechanically, but it was only possible to characterize the tribologically materials PLACAS, BREKA and COMMERCIAL 70-30, due to the lack of sufficient samples of other materials.

To perform tribological tests for each material were used three different pressures and for each pressure were performed three different length tests.

The tribological tests were performed on a machine called Friction Assessment Screening Test (F.A.S.T), which has had some original parts replaced and adjustments made to allow data acquisition in digital form. As outputs the normal force, the frictional force and the temperature were acquired. The wear of each pad was determined by weighing. A comparison of the performance of the formulations was done by plotting the frictional force and coefficient of friction along the sliding distance as well as the wear volume of all the material under testing. To assist in understanding the results obtained, it was also done a mechanical characterization of all materials and determined the values of dynamic elasticity modulus, hardness and flexural strength/toughness.

Generally, there was an increased wear with increasing pressure applied to the test piece and with increasing sliding distance, as was expected.

All materials showed specific wear values within a range which is taken as reference (40 mg / MJ and 100 mg / MJ) to classify the friction material as acceptable.

For the volumetric and specific wear, PLACAS e COMERCIAL 70-30 materials had very similar wear values for all types of tests. The BREKA material, on the other hand is distinguished from the other two by having much lower wear values.

As for the coefficient of friction, the material with the highest coefficient of friction was the PLACAS and the material had the lowest coefficient of friction was BREKA.

With respect to the mechanical properties, the modulus of elasticity of all the friction materials decreased with increasing temperature.

Keywords Friction Materials, Tribological test, Young modulus, Coefficient of friction, Specific wear

Índice

Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE MATERIAIS DE ATRITO.....	3
2.1. Evolução dos materiais de atrito	3
2.2. Materiais de atrito	7
2.3. Caracterização tribológica	10
2.4. Caracterização mecânica.....	14
3. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS.....	17
3.1. Materiais e condições de ensaio.....	17
3.2. Caracterização Mecânica	21
3.2.1. Ensaio dinâmico do módulo de elasticidade.....	21
3.2.2. Ensaio de flexão em 3 pontos	22
3.2.3. Ensaio de dureza Brinell.....	24
3.3. Caracterização tribológica	26
3.3.1. Equipamento de desgaste - <i>Friction Assessment Screening Test (F.A.S.T)</i> ..	26
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	33
4.1. Caracterização mecânica.....	33
4.1.1. Módulo de elasticidade dinâmico	33
4.1.2. Resistência à flexão	34
4.1.3. Dureza Brinell.....	35
4.2. Ensaio tribológicos	36
4.2.1. Morfologia das superfícies de desgaste	47
5. CONCLUSÕES	50
5.1. Caracterização mecânica.....	50
5.1. Caracterização tribológica	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema tridimensional com corte transversal de um sistema tribológico constituído por uma pastilha de travão orgânica e um disco [18].	13
Figura 3.1 Superfície do material BREKA.	18
Figura 3.2 Superfície do material COMERCIAL 70-30.	18
Figura 3.3 Superfície do material PESADO.	18
Figura 3.4 Superfície do material 50-20.	19
Figura 3.5 Superfície do material PLACAS.	19
Figura 3.6 Superfície do material 55-30.	19
Figura 3.7 Ensaio tribológicos realizados para cada material.	20
Figura 3.8 Montagem do ensaio do módulo de elasticidade na mufla para temperaturas mais elevadas.	21
Figura 3.9 Montagem utilizada para a realização dos ensaios de flexão dos materiais de atrito.	23
Figura 3.10 Ensaio de dureza	24
Figura 3.11 Fotografia da indentação provocada no material PESADO.	25
Figura 3.12 Máquina <i>F.A.S.T.</i>	26
Figura 3.13 Peças responsáveis por transmitir a força normal ao braço: a) peça original; b) peça substituta.	27
Figura 3.14 Pormenor da ligação aparafusada com a célula de carga responsável pela medição da carga normal aplicada ao braço.	28
Figura 3.15 Peças responsáveis por transmitir a força de atrito ao êmbolo da válvula de fricção: a) peça original; b) peça substituta.	28
Figura 3.16 Plano aproximado do braço de carga, com a montagem da célula de carga responsável por medir a força de atrito.	29
Figura 3.17 Desenho esquemático da posição de contacto da pastilha com o disco.	29
Figura 4.1 Valores médios do módulo de elasticidade para os vários materiais em função da temperatura.	34
Figura 4.2 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.	36
Figura 4.3 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.	37
Figura 4.4 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.	38
Figura 4.5 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.	38
Figura 4.6 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.	39

Figura 4.7 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento. .	40
Figura 4.8 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento ..	40
Figura 4.9 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância do escorregamento. .	41
Figura 4.10 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.	42
Figura 4.11 Massa de desgaste do material PLACAS para os vários tipos de ensaio.....	42
Figura 4.12 Massa de desgaste do material BREKA para os vários tipos de ensaio.....	43
Figura 4.13 Massa de desgaste do material COMERCIAL para os vários tipos de ensaio.	44
Figura 4.14 Massa de desgaste versus produto da pressão com a distância de escorregamento.....	45
Figura 4.15 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.....	46
Figura 4.16 Fotografia da superfície de desgaste do material PLACAS.....	48
Figura 4.17 Fotografia da superfície de desgaste do material BREKA.....	48
Figura 4.18 Fotografia da superfície de desgaste do material COMERCIAL.....	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 Valores da temperatura usados nos ensaios de módulo de elasticidade.	22
Tabela 4.1 Propriedades obtidas através do ensaio de flexão.....	35
Tabela 4.2 Média e desvio padrão da Dureza Brinell para cada material.	36
Tabela 4.3 Tabela dos coeficientes de atrito.....	45
Tabela 4.4 Resultados do desgaste específico [mg/MJ].	46
Tabela 4.5 Desgaste relativo entre os materiais de desgaste utilizados para as condições de ensaio.....	47

1. INTRODUÇÃO

Numa sociedade assente numa economia global, como a atual, onde os meios de transportes assumem um papel preponderante no quotidiano das pessoas, e onde as mesmas têm de enfrentar, frequentemente, situações inesperadas e inusitadas nas suas deslocações faz sentido, que se invista no estudo dos materiais que são usados no sistema de travagem de um qualquer veículo sujeito a movimento.

A crescente necessidade de produção de materiais de atrito mais eficazes e seguros, num mercado cada vez mais competitivo e exigente, sujeito aos condicionalismos impostos nos regulamentos governamentais, nomeadamente os que dizem respeito à saúde pública e, mais abrangente, em virtude do aumento do mercado automóvel nos países em desenvolvimento, justificam este tipo de estudos.

Os materiais de atrito desempenham um papel importante no sistema de travagem. Estes materiais convertem a energia cinética de um veículo em movimento em energia térmica, por atrito, durante o processo de travagem. As pastilhas e os calços de um veículo são então os elementos cruciais no sistema de travagem na medida em que são responsáveis por uma travagem que se pretende eficiente e segura.

No presente estudo submetemos seis materiais, cedidos pela empresa *Auto Travões Viseu – Recondicionamento de Travões e Embraiagens, Lda*, a ensaios que permitissem a sua caracterização mecânica e tribológica. Esta empresa, que é a única a produzir as suas próprias formulações em Portugal, manifestou interesse neste estudo. Para tal, foi necessário submeter os diferentes materiais a diversos testes mecânicos e foram determinadas as seguintes propriedades: dureza, rigidez, resistência à flexão/tenacidade. No que diz respeito aos ensaios tribológicos os parâmetros avaliados foram: a massa de desgaste, o desgaste específico e o coeficiente de atrito.

Após o trabalho experimental foi feita uma análise dos resultados para se tirarem ilações do comportamento de cada um dos materiais em estudo, sendo indicados os materiais com melhor desempenho em cada área. Quanto ao coeficiente de atrito o material PLACAS foi aquele que apresentou o maior valor. No que respeita ao desgaste dos materiais sujeitos a diferentes pressões, o material BREKA foi o que apresentou valores mais reduzidos de

desgaste volúmico e desgaste específico. No entanto, tal como os outros materiais, apresentou valores de desgaste específico dentro do intervalo, que é tomado como referência, na classificação do material de atrito como aceitável.

No que diz respeito à estrutura, a presente dissertação está dividida em cinco capítulos. No primeiro é feita a introdução ao tema.

No segundo capítulo é feito o enquadramento teórico das matérias que foram investigadas fundamentando a sua relevância na revisão bibliográfica.

No terceiro capítulo são apresentados os materiais, os equipamentos e os procedimentos metodológicos utilizados na obtenção dos dados, desde a preparação até à realização de cada ensaio.

No quarto capítulo são apresentados os resultados, os processos de tratamento da informação recolhida, a interpretação e discussão dos resultados.

No quinto e último capítulo são feitas algumas reflexões conclusivas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE MATERIAIS DE ATRITO

O processo de travagem de um veículo é baseado no contacto entre dois corpos, um em rotação (tambor ou disco) e o outro estacionário (calço ou pastilha) de modo a desacelerar ou parar o veículo. Neste processo, os dois corpos têm um comportamento tribológico que depende das suas propriedades intrínsecas e da sua composição.

Os materiais de atrito, comumente designados por pastilhas ou calços, têm vindo a sofrer uma grande evolução ao longo dos tempos que se refletiu na obtenção de composições cada vez mais eficazes e capazes de dar resposta às sucessivas exigências.

A evolução registada foi o resultado de inúmeros estudos feitos ao longo dos tempos com o objetivo de testar materiais de atrito em diferentes parâmetros, de forma a caracterizá-los tribologicamente e mecanicamente. Na base desta evolução esteve a procura por materiais que cumprissem determinados objetivos: uma boa relação custo-desempenho, boa resistência ao desgaste, um bom coeficiente de atrito independentemente das condições de serviço e uma redução dos impactos negativos na saúde pública.

2.1. Evolução dos materiais de atrito

Qualquer veículo deve possuir um sistema de travagem com o objetivo de garantir desaceleração até à paragem, mantendo-o estacionário ou simplesmente conservando velocidade constante.

Não só para dar respostas às novas exigências para os quais eram concebidos, mas também fruto da própria evolução dos meios de transporte e dos processos de fabrico, os materiais de atrito sofreram uma grande evolução ao longo dos tempos.

Numa fase inicial do desenvolvimento dos transportes e com a utilização dos cavalos como tração, a madeira, o couro e o pelo de camelo foram usados como material de fricção de modo a abrandar ou parar as carroças ou diligências. Estes materiais quando foram utilizados nos primeiros carros revelaram-se pouco eficazes uma vez que ardiam quando

sobreaquecidos [1]. De referir, contudo, que nos dias de hoje muitos materiais de travagem ainda contêm componentes à base de fibras vegetais.

Com o aparecimento das locomotivas a vapor, no início do século XIX, e devido às elevadas massas em deslocamento e às elevadas velocidades alcançadas por estes veículos, novos materiais de travagem tiveram que ser introduzidos, como o ferro e o aço.

No final do século XIX surgiram os primeiros automóveis e com eles novos sistemas de travagem, que foram evoluindo acompanhando a própria evolução automóvel. No que diz respeito aos sistemas de travagem este impulso traduziu-se na produção de material em laboratório, tendo sido Herbert Froad, em 1897, o inventor dos primeiros materiais de atrito para travões compostos por algodão impregnado numa solução de betume [2]. Estes materiais foram utilizados, obtendo resultados aceitáveis nos carros da época bem como nas carroças puxadas a cavalo, contudo, devido à sua composição à base da fibra de algodão, quando sujeitos a temperaturas acima de 150 °C, perdiam as suas propriedades de atrito e partiam. Uma década depois, Herbert Froad veio resolver este problema com a introdução das fibras de amianto nestes materiais, matriz que se manteve durante décadas [3]. Tal como as fibras de algodão também as fibras de amianto eram fáceis de tecer, apresentando, além desta, outras vantagens como, maior resistência mecânica, maior resistência à temperatura, flexibilidade, boa compatibilidade com os diferentes materiais ligantes e ótimas propriedades tribológicas. A incorporação de latão e outros fios de metal vieram conferir maior resistência mecânica e aumentar o coeficiente de atrito [4].

No início da década de 20 do século XX dá-se uma alteração no processo fabrico dos materiais de travagem com fibras de amianto surgindo materiais moldados em substituição dos entrançados [2]. Relativamente ao processo original, que era baseado em fios de latão reforçados por um tecido de amianto e unidos por um composto de asfalto, o novo processo usava na mesma o amianto, mas as fibras eram mais curtas, os fios de latão foram substituídos por partículas de latão e o asfalto por um carvão betuminoso de elevada volatilidade e de baixas emissões de resíduos.

Na década de 30 começaram a surgir resinas mais flexíveis e com maior resistência ao calor abrindo caminho para novas aplicações. Paralelamente dá-se uma evolução nesta área, com o contributo da indústria da borracha, surgindo outros materiais que resultaram do empilhamento alternado dos entrançados de algodão e de amianto cobertos com um composto de borracha, obtendo-se materiais com diferentes espessuras.

Ao longo da década de 50 surgiram as primeiras pastilhas de base metálica que resultaram da implementação de uma nova composição feita à base de novas resinas que agregavam várias aparas metálicas, lã de aço e grafite. Estes avanços decorreram do sucesso que os materiais metálicos tiveram na indústria e aeronáutica.

Na década de 60 muitos fabricantes de materiais de travagem começaram a procurar novas alternativas, não só, por imposições que se prendiam com o avanço na conceção dos veículos automóveis e de sistemas de travagem que cumprissem as novas exigências, mas também, devido ao amianto ser um recurso esgotável e de qualidade variável. Simultaneamente a sociedade começou a questionar os efeitos do amianto na saúde pública, e em alternativa começaram-se a utilizar fibras de vidro e fibras de metal, surgindo os materiais de travagem semi-metálicos, que tiveram ampla utilização na época de 70. Estes materiais são normalmente considerados como um compromisso entre materiais de travagem orgânicos e metálicos sinterizados [5].

Na década de 80 o aparecimento de novos modelos de automóveis, com rodas mais pequenas, com configurações mais aerodinâmicas e de tração dianteira, levou a um aumento do calor gerado durante o processo de travagem. Este problema acrescido, no sistema de travagem, obrigou ao desenvolvimento de novos produtos com condutibilidades térmicas mais baixas comparativamente aos semi-metálicos, ainda assim com bom desempenho.

Na década de 90 surgiu uma nova tendência dos fabricantes de veículos e de materiais de travagem com o objetivo de substituir o teor de metais pesados destes materiais, nomeadamente, o antimónio, o sulfureto de chumbo, o dissulfeto de molibdénio, componentes de cobre e fibras de silício por compostos não tóxicos de maneira a reduzir o impacto negativo destes no ambiente e nos seres vivos. Estes novos produtos, feitos à base de material orgânico, não se desintegram a temperaturas elevadas, mantêm as condições de travagem ideais numa ampla gama de temperaturas, e têm boa resistência ao desgaste sem danificar as superfícies de contacto.

Este período constituiu um marco importante na evolução dos materiais de atrito, na medida em que, para além de estes terem melhores desempenhos, respondem às exigências da sociedade, que há muito reclamava sobre os efeitos nefastos na saúde e no ambiente de alguns componentes, nomeadamente, o amianto. De referir, contudo, que ainda são produzidos materiais com amianto, cuja manipulação obedece a normas de segurança

rígidas, claramente definidas em todos os países para produtos tóxicos e perigosos onde o amianto se inclui.

Em 2015 a *Toyota* divulgou um alerta para a venda ilegal de milhares de pastilhas de travões falsificadas contendo amianto que na origem foram projetadas para serem utilizadas nos modelos mais populares da marca vendidos na Austrália. O problema é tanto mais grave na medida em que estes materiais são impossíveis de rastrear e a importação *online* por distribuidores sem escrúpulos é difícil de combater. Segundo a mesma fonte, a *Toyota* não está só preocupada com a saúde dos mecânicos dos seus concessionários, mas também porque de cada vez que os travões são aplicados, poeiras de amianto são libertadas para atmosfera expondo o público em geral a este pó mortífero [6].

Estudos recentes têm demonstrado também que relativamente, ao ferro, ao cobre e ao manganês presentes nas partículas de desgaste do material de travagem, podem danificar as células dos pulmões por mecanismos que envolvem stresse oxidativo e aumento da resposta inflamatória. No que diz respeito ao cobre, este metal provoca ainda problemas gastrointestinais e respiratórios. O fígado e os rins são muito sensíveis à toxicidade deste metal, podendo numa situação de intoxicação mais aguda causar lesões hepáticas. A exposição ao antimónio pode provocar irritações na pele, problemas oculares, e vários problemas respiratórios, nomeadamente inflamação dos pulmões [7].

Estes problemas são mais graves nos meios urbanos onde a suspensão de partículas é maior devido, entre outros fatores, ao tráfego rodoviário ser mais intenso. Estudos feitos indicam que o desgaste dos travões contribui grandemente para o nível de PM_{10} (partículas com diâmetro aerodinâmico inferior a $10\ \mu m$). Estes factos têm requerido uma maior atenção por parte dos investigadores no sentido de melhorar os materiais de atrito no que toca à libertação de partículas por desgaste para a atmosfera [8].

Kutelia *et al.* [8] desenvolveu um novo material de atrito nano-poroso, introduzindo diatomite, cobre, barite e uma resina de fenol-formaldeído modificado como aglutinante. Os resultados obtidos mostraram que os materiais nano-porosos libertavam 3 a 7 vezes menos detritos para a atmosfera relativamente aos materiais convencionais.

2.2. Materiais de atrito

Por todo o mundo existem milhões de sistemas de travagem de atrito, especialmente no transporte rodoviário. Mais de 90% destes sistemas são constituídos por pastilhas de matriz polimérica *Polymer Matrix Composite (PMC)* em contacto com um disco de ferro fundido cinzento. No fabrico das pastilhas de travão podem ser utilizados frequentemente mais de 10 materiais diferentes, tais como, metais, fibras de aramida, borracha, materiais cerâmicos de enchimentos, lubrificantes sólidos, resina fenol-formaldeído, que cumprem funções distintas [9].

Cada tipo de material apresenta inúmeras possibilidades de combinação e de acordo com a sua função, os componentes aditivos podem-se classificar em:

- **Materiais Estruturais** – oferecem resistência mecânica. Geralmente são fibras de metais, de minerais e de material cerâmico sendo que o latão, o cobre, o aço, o vidro, o *kevlar*, o carbono, entre outros, são os mais utilizados.
- **Materiais Ligantes** – agregam diferentes componentes formando uma matriz termicamente estável. São geralmente resinas termoendurecíveis de fenol-formaldeído, muitas vezes misturadas com borracha para melhorar as propriedades de amortecimento.
- **Materiais de enchimento** – permitem reduzir o custo de produção. Os mais usados são: a mica, o magnésio, óxido de crómio, argila com caulinite, sulfato de bário, entre outros.
- **Materiais modificadores de atrito** – permitem de uma forma geral estabilizar o coeficiente de atrito e controlar as taxas de desgaste. Os mais usados são a grafite, alguns sulfuretos metálicos, pó de caju, a alumina e a sílica. Enquanto a grafite e os sulfuretos metálicos são usados para estabilizar o coeficiente de atrito a temperaturas elevadas, a alumina e a sílica permitem obter superfícies de contacto mais limpas pela remoção de óxidos de ferros e de películas indesejáveis [10].

É de referir que a classificação destes materiais nas categorias apresentadas sofre de alguma ambiguidade uma vez que alguns dos materiais poderiam ser inseridos em mais do que uma categoria, uma vez que cumprem mais do que uma função.

Os materiais de atrito desempenham um importante papel no sistema de travagem. Assim sendo, para que cumpram com eficácia a sua função, devem, entre outras características, ter um coeficiente de atrito estável e dar resposta a diferentes situações de aplicação, nomeadamente, pressão aplicada, temperatura, velocidade e humidade. Devem ainda possuir outros requisitos, tais como, resistência a contaminações líquidas, resistência ao calor e estabilidade térmica, baixa taxa de desgaste e não provocar danos no disco.

Dado existirem diversos materiais de travagem com diferentes composições, características e aplicações, torna-se necessário agrupá-los em classes:

• Orgânicos

Foram desenvolvidos como alternativa aos materiais com amianto, por isso são também designados por *Non Asbestos Organic (NAO)*.

Estes materiais são compostos por uma mistura de várias fibras agregadas por uma resina, frequentemente de borracha e de caju. As fibras mais frequentemente utilizadas são as de vidro, de lã mineral, de metal, de cerâmica, de aramida (*kevlar*), celulose e outros materiais orgânicos.

Apresentam como vantagens o facto de serem macios, provocarem uma baixa taxa de desgaste nos discos e produzirem menos poeira que os metálicos. São ainda ideais para uso em veículos ligeiros.

Apresentam como principal desvantagem uma baixa durabilidade que pode ser aumentada pela escolha adequada de constituintes inorgânicos que ao serem incorporados podem melhorar a resistência, a expansão térmica, e o coeficiente de atrito entre outras propriedades. O coeficiente de atrito baixa consideravelmente quando sobreaquecidos [11].

• Cerâmicos

Foram desenvolvidos como alternativa aos materiais orgânicos e semi-metálicos, por estes produzirem muito barulho e poeira e por, no contacto com os discos, serem menos agressivos que os semi-metálicos.

Estes materiais são compostos por materiais cerâmicos densos com fibras de cobre embutidas.

Apresentam como vantagens o facto de permitirem uma travagem silenciosa comparativamente aos semi-metálicos e um comportamento estável e consistente numa

ampla gama de temperaturas. Comparativamente aos orgânicos e semi-metálicos têm maior durabilidade.

Como desvantagens têm baixas taxas de dissipação de calor, podendo afetar os restantes componentes do sistema de travagem. Relativamente aos outros materiais, são os mais caros [12].

• **Metálicos**

Foram desenvolvidos para veículos de elevada potência. Estes materiais são compostos por bronze, cobre, ferro, mulite, sendo a maioria sinterizados em estado sólido com a incorporação de aditivos inorgânicos para obter um melhor desempenho. O ferro sinterizado com grafite, por exemplo, têm aplicações em travões para veículos pesados. Apresentam como vantagens uma elevada durabilidade, bom desempenho em pisos molhados, lamacentos ou empoeirados e registam um decréscimo do coeficiente de atrito para temperaturas mais elevadas comparativamente aos que têm resina como material ligante.

Como desvantagens estes materiais provocam travagens ruidosas, além de terem uma elevada condutibilidade térmica, o que pode afetar o desempenho do sistema de travagem ao transmitirem calor ao líquido dos travões. A elevada dureza destes materiais provoca ainda um maior desgaste no disco ou tambor [13].

• **Semi-metálicos**

Estes materiais apresentam uma maior versatilidade uma vez que agregam algumas vantagens comuns aos metálicos e aos orgânicos.

Estes materiais normalmente são compostos por metais (30 a 65%), designadamente, ferro, aço e cobre, lã de aço (10 a 25%), grafite (cerca de 15%), uma resina ligante (cerca de 10%) e o restante um pó de ferro poroso.

Apresentam a vantagem de garantir um melhor desempenho a altas temperaturas quando comparados com os materiais orgânicos, devido ao maior conteúdo metálico, sendo também mais resistentes à fadiga.

Como desvantagens estes materiais tendem a ser mais ruidosos e a provocar mais desgaste nos discos que os materiais orgânicos e cerâmicos. Requerem ainda um elevado período de rodagem até obterem coeficientes de atrito estáveis [12].

Segundo [11], os materiais semi-metálicos são considerados uma subcategoria dos materiais orgânicos, na medida em que na sua composição entram compostos orgânicos, nomeadamente grafite e resinas ligantes.

2.3. Caracterização tribológica

São muitos os métodos de ensaio que têm sido desenvolvidos para testar tribologicamente materiais de atrito e a sua evolução é uma constante [2]. De entre os testes de laboratório, os três abaixo descritos são os mais frequentemente usados.

A máquina *Friction Assessment Screening Test (F.A.S.T)* foi concebida para identificar rapidamente características tribológicas de amostras de materiais de atrito, com intuito de responder à necessidade de obtenção de um maior controlo de qualidade destes materiais. Apesar de ter sido concebida para este efeito, é frequentemente utilizada na triagem de materiais na fase inicial do seu desenvolvimento [11], mas segundo algumas fontes, esta máquina não replica a utilização na estrada [2].

A *Chase Machine* é uma máquina de teste de materiais de fricção, utilizada para executar o ensaio J661, que foi concebido pela *Society of Automotive Engineers (S.A.E)* e recomendado como um procedimento de teste de controlo de qualidade, sobretudo para testes de vigilância de controlo de qualidade periódica [11].

Esta prática foi revista em 1984, pela *S.A.E.*, que adverte ser inadequada para testes comparativos entre diferentes tipos ou classes de materiais de atrito [11]. Tsang *et al* um ano mais tarde, após uma comparação dos dados obtidos para os mesmos materiais através da máquina *Chase* e de um dinamómetro de inércia concluiu que os resultados dos testes efetuados eram incongruentes [2].

Testes desta natureza também podem ser feitos por um dinamómetro munido de um travão e acionado por um motor que simula a travagem de um veículo para uma grande inércia rotativa. A maioria só permite testar de cada vez um único conjunto de travão, mas quando apetrechado de condutas fechadas ajuda a controlar o fumo, o cheiro e acelera o

arrefecimento devido ao maior fluxo de ar, o que permite acelerar os testes, replicando mais fielmente as condições de estrada [11].

Existe uma grande variedade de tamanhos de dinamómetros de travão com inércias equivalentes a vários de tipos de veículos, desde motociclos a comboios. Devido à inexistência de dinamómetros padronizados, muitos deles são modelo único, o que inviabiliza a comparação dos resultados obtidos entre diferentes dinamómetros, mesmo tratando-se da mesma carga de inércia e da mesma combinação de materiais testados.

O dinamómetro de travão replica, de forma geral, as condições de travagem de um veículo, contudo, a influência das condicionantes de carácter ambiental tais como a poeira e a humidade não são consideradas. Sendo assim, o dinamómetro constitui um excelente engenho para testes de avaliação e triagem de materiais de atrito, porém não é suficiente para classificar todas as características destes materiais.[11]

Dado que os métodos referidos anteriormente apresentam limitações, têm sido feitos estudos para determinar o grau de correlação entre os resultados dos testes obtidos em laboratório e os obtidos em veículos reais, tendo-se chegado à conclusão que não há testes de laboratório que de uma forma consistente forneçam dados que se correlacionem com os resultados obtidos com um veículo real. Assim, estes não devem ser usados para antecipar o desempenho em situação real mas são de grande utilidade na investigação sobretudo no estudo de materiais de atrito com falhas de desempenho [11].

Outros tipos de testes, para além dos mencionados anteriormente, têm sido desenvolvidos de forma independente, de menor escala relativamente aos dinamómetros, para este tipo de pesquisas. Dependendo dos parâmetros que se pretendem avaliar, coeficiente de atrito, temperatura e vibração, estes testes podem ser instrumentalizados para esse fim. Aspectos como instabilidade termo-elástica, desgaste do material, formação de película entre superfícies de contacto podem ser estudadas recorrendo a este tipo de testes de menor escala. Uma das vantagens que apresentam relativamente aos restantes é o seu baixo custo, especialmente quando a quantidade de material a testar é reduzida ou quando os custos de fabrico de um modelo à escala real é demasiadamente caro [2].

Independentemente do método de ensaio utilizado e das diferentes características que lhes estão subjacentes, com menor ou maior eficácia, a uma escala menor ou maior, todos eles permitem fazer um estudo tribológico dos materiais de atrito, sendo que

os principais parâmetros que os caracterizam tribologicamente são o coeficiente de atrito, a massa e o volume de desgaste.

Quando um corpo rígido desliza sobre um outro corpo com uma velocidade v , desencadeia-se uma força de reação, F_a , chamada de atrito. Segundo Coulomb o coeficiente de atrito dinâmico, μ , é a razão entre a força de atrito, F_a , e a força normal exercida, N [14].

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

O coeficiente de atrito não é uma propriedade intrínseca do material em si, uma vez que depende do sistema tribológico no qual se inclui outro material, bem como as condicionantes ambientais.

Diversos estudos experimentais vieram demonstrar que o coeficiente de atrito bem como a taxa de desgaste variam em função de vários fatores como, a carga normal, a velocidade de escorregamento, a rugosidade das superfícies de fricção, a temperatura, a humidade relativa, as contaminações líquidas e sólidas, entre outras [15].

Relativamente à taxa de desgaste é do conhecimento geral e em particular dos fabricantes de travões, que pastilhas novas têm um desempenho diferente quando comparadas com pastilhas após um período de rodagem, período esse necessário, até que um coeficiente de atrito da ordem de 0.3 a 0.5 seja alcançado. Este comportamento pode ser explicado devido à formação de uma película, usualmente designada de terceiro-corpo, entre as superfícies de contacto da pastilha e do disco. Esta película permite que baixas taxas de desgaste sejam mantidas a várias temperaturas e que o coeficiente de atrito se mantenha estável [9]. Do ponto de vista macroscópico, este comportamento é ainda uma consequência do ajustamento geométrico das duas superfícies de contacto ainda não idealmente planas no início do processo de rodagem. Para além disso, a rugosidade da superfície de contacto da pastilha vai reduzindo, aumentando a área de contacto e o coeficiente de atrito, até estabilizar [16].

As películas superficiais resultantes do atrito, que podem variar entre $0.5\mu\text{m}$ e $5\mu\text{m}$ de espessura, são de composição heterogénea e podem ajudar a estabilizar o comportamento tribológico, contudo a função principal na travagem é ainda considerada, por alguns especialistas, como controversa. Por esse facto, é frequente adicionar aditivos abrasivos aos materiais de atrito com o objetivo de “limpar” a superfície do disco e otimizar o que vulgarmente é designado por “grip” [17]. Cho *et al.* [16] sugeriu que o aumento do

coeficiente de atrito pode ser devido à remoção de camadas de detritos e óxidos das superfícies de contacto. Aditivos abrasivos da ordem de $100\mu\text{m}$ podem desempenhar a função de pontos de contacto principais e deste modo aumentar o coeficiente de atrito, como sugerido por Matejka *et al.* e Cho *et al.* [16].

Supõe-se que apenas os componentes de reforço da pastilha, nomeadamente fibras metálicas, servem como pontos de contacto primários enquanto os componentes incrustados em resina fenol-formaldeído e menos duros, como a grafite, são desgastados logo de imediato. O aumento progressivo do coeficiente de atrito durante a rotação inicial explica-se pela formação de pontos de contacto secundários formados pela compactação de terceiro-corpo [16]. Estes pontos de contacto primários e secundários são também designados de planaltos primários e planaltos secundários, por alguns investigadores, devido à sua topografia. Na Figura 2.1, e como já foi referido anteriormente, é visível o processo de formação de planaltos secundários que resultam da orientação do escorregamento e da acumulação de materiais menos resistentes ao desgaste ao entrar em contacto com os planaltos primários.

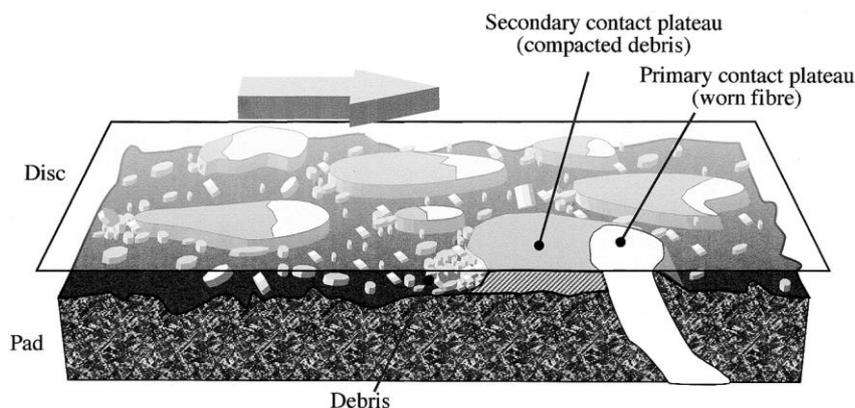


Figura 2.1 Esquema tridimensional com corte transversal de um sistema tribológico constituído por uma pastilha de travão orgânica e um disco [18].

O comportamento tribológico dos materiais de atrito é complexo e fortemente dependente da estrutura dos componentes que os constituem. Um estudo mais aprofundado das superfícies tribológicas e dos mecanismos desencadeados em diversas situações de aplicação facilita o desenvolvimento de sistemas de travagem mais eficazes bem como o desenvolvimento de sistemas de modelação numérica mais realistas.

2.4. Caracterização mecânica

São vários os ensaios mecânicos que podem ser usados para caracterizar os materiais. Neste estudo são usados três ensaios diferentes que permitem obter valores do módulo de elasticidade, resistência à flexão, tenacidade, trabalho à fratura e dureza.

O módulo de elasticidade ou de *Young*, E , é uma propriedade que descreve o comportamento elástico de um material quando este sofre cargas de compressão ou de tração numa só direção e corresponde ao declive da porção linear-elástica da curva tensão-deformação, podendo ser descrito entre a razão da tensão longitudinal σ , geralmente apresentado em GPa e a deformação ε , a deformação percentual.

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

O módulo de elasticidade está correlacionado com o ruído desencadeado durante o processo de travagem num travão de disco, sendo tanto maior quanto maior a rigidez do material de atrito. Este parâmetro também está relacionado com o grau de instabilidade do sistema de travagem.

Diminuir o índice de ruído é uma preocupação de alguns fabricantes de materiais de atrito. Nesse sentido, vários modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para analisar o efeito do módulo de elasticidade do disco e das pastilhas e de outros fatores como a espessura e a largura destas, no índice de ruído. Os resultados demonstraram que o aumento da espessura das pastilhas provocam uma redução do índice de ruído e do grau de instabilidade do sistema [19].

Para calcular o módulo de elasticidade são usados vários tipos de ensaios, dinâmicos, estáticos, destrutivos ou não destrutivos. O método que consta na norma da *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 1198-09 (2013) [20] é um método dinâmico e não destrutivo, muito usado, que permite o uso posterior dos materiais e possibilita a repetição do ensaio. Com este método pretende-se obter a frequência de ressonância, também conhecida por frequência fundamental de amostras adequadas (cilíndricas ou paralelepípedas), possibilitando a determinação do módulo de elasticidade do material.

Como cada amostra de material possui frequências de ressonância próprias, que dependem do módulo de elasticidade, da sua massa e geometria, o módulo de elasticidade

do material pode então ser calculado através da obtenção das frequências de ressonância da amostra, se a geometria e a massa da amostra forem conhecidas.

Outro método também usado para calcular o módulo de elasticidade, bem como a resistência à flexão, tenacidade e trabalho à fratura, é o ensaio de flexão em 3 pontos.

A resistência à flexão define a tensão, calculada a partir da fórmula de flexão necessária para quebrar um provete, como uma viga simples suportada próximo das extremidades, aplicando uma força a meio da linha fixa dos suportes [21].

O cálculo da resistência à flexão de um material de atrito de uma pastilha pode ser relevante, uma vez que pode representar a resistência da mesma à deformação sob tensões radiais [22].

A dureza é uma medida da resistência de um material à deformação plástica, associada por vezes à capacidade de resistência à abrasão e ao corte. Não é uma propriedade bem definida, uma vez que não existe uma conversão bem definida entre os diversos métodos e também devido às possíveis heterogeneidades da microestrutura dos materiais. Os ensaios mais comuns são: Rockwell, Brinell e Vickers, cada um com as suas especificidades.

O ensaio de dureza Brinell é apropriado no caso dos materiais de atrito devido à heterogeneidade destes e por permitir a obtenção de resultados consistentes. A norma usada neste caso é a ASTM E0010-01E01 [23].

Tal como para o módulo de elasticidade, o ruído desencadeado durante o processo de travagem num travão de disco também depende da dureza, pois quanto mais duro for o material maior é a probabilidade de ocorrência de ruídos agudos.

Na obtenção dos valores de dureza Brinell de um material é usada uma esfera de diâmetro, D , aplicando uma carga, F_N , normal à superfície durante um tempo, t , provocando um indentação de diâmetro, d .

Sendo a equa o base:

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

em que F_N [N]   a força aplicada, e S [mm²] a área de indenta o, calculada pelo diâmetro da esfera, D [mm], e a sua profundidade, h [mm].

Uma vez que a profundidade da concavidade não é fácil de ser medida existe a equação seguinte que relaciona os diâmetros da esfera, D , e da concavidade, d , com a profundidade.

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

Substituindo a equação (2.4) na equação (2.5) temos,

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

Equação que foi utilizada no cálculo da dureza Brinell dos materiais em estudo.

3. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

Atualmente mais de 2000 materiais diferentes são usados em materiais de atrito, que sujeitos a diferentes combinações dão origem a diferentes materiais com diferentes características e para diversas aplicações. Os materiais sujeitos a ensaios neste estudo são alguns exemplos disso.

Os equipamentos utilizados neste estudo são da propriedade do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra, onde decorreram os ensaios.

Relativamente às técnicas experimentais foram usados testes normalizados e sempre que necessário recorreu-se ao improviso.

3.1. Materiais e condições de ensaio

Os materiais usados neste trabalho, concebidos para sistemas de travagem diversos, foram fornecidos pela *Auto Travões Viseu – Recondicionamento de Travões e Embraiagens, Lda* e têm as seguintes designações:

- BREKA (Figura 3.1);
- COMERCIAL 70-30 (Figura 3.2);
- PESADO (Figura 3.3);
- 50-20 (Figura 3.4);
- PLACAS (Figura 3.5);
- 55-30 (Figura 3.6);

O material BREKA é usado em sistemas de travagem de guindastes, o material COMERCIAL 70-30 e o PLACAS, com a mesma formulação, são usados em calços para sistemas de travagem de tambor em carrinhas até 3000kg, o material PESADO é usado em

calços para sistemas de travagem em veículos pesados e os matérias 50-20 e 55-30 são utilizados em pastilhas.

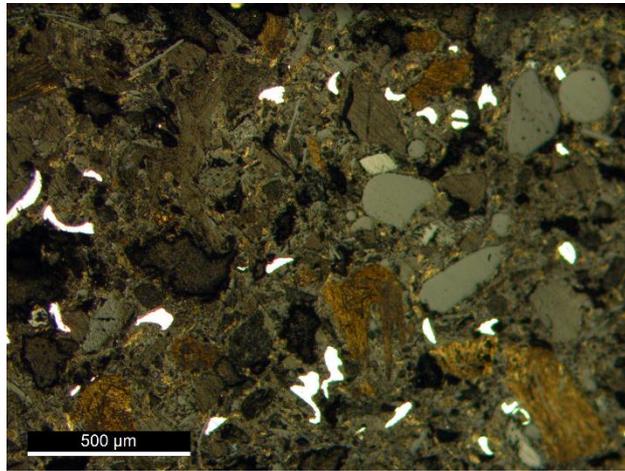


Figura 3.1 Superfície do material BREKA.

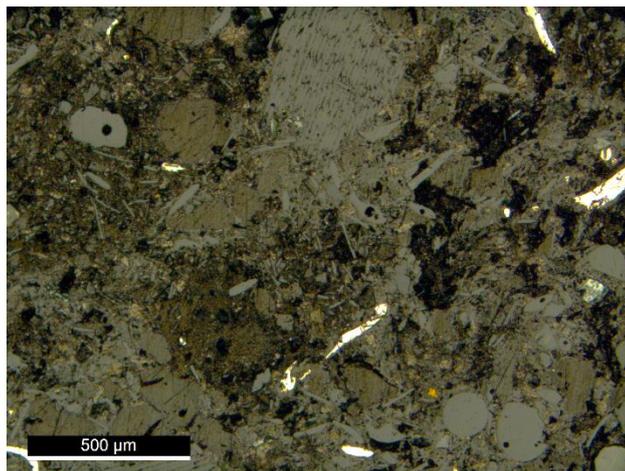


Figura 3.2 Superfície do material COMERCIAL 70-30.

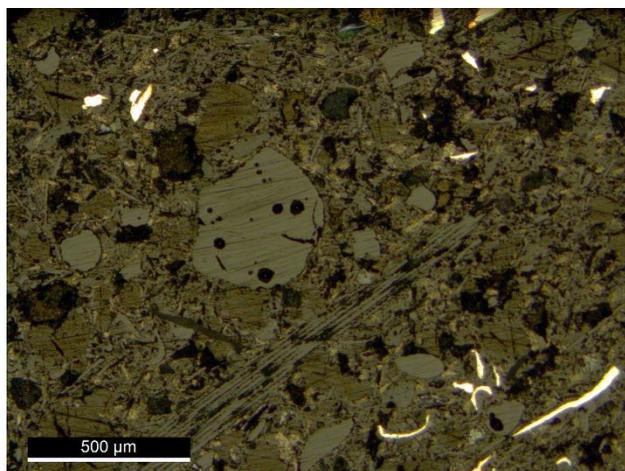


Figura 3.3 Superfície do material PESADO.

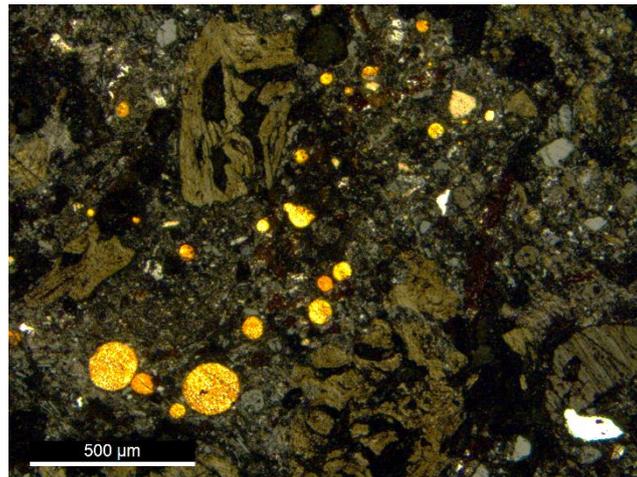


Figura 3.4 Superfície do material 50-20.

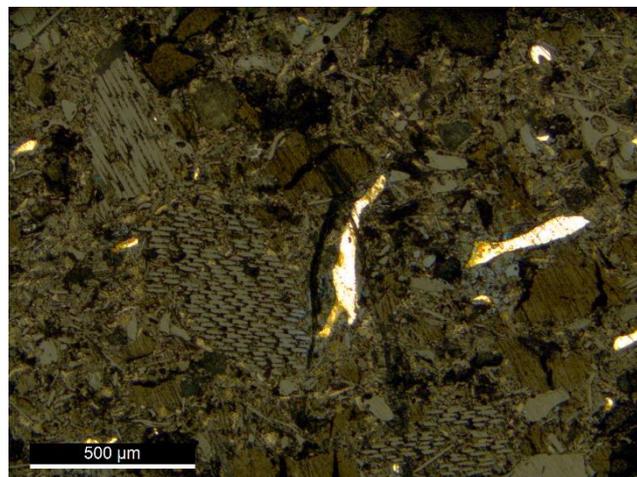


Figura 3.5 Superfície do material PLACAS.

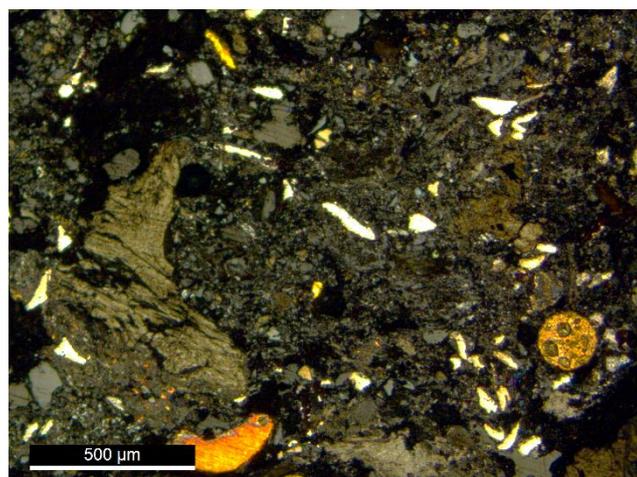


Figura 3.6 Superfície do material 55-30.

Todos os materiais foram caracterizados mecanicamente, mas só foi possível caracterizar tribologicamente os materiais PLACAS, BREKA e COMERCIAL 70-30, por falta de amostras suficientes dos restantes materiais.

Para realizar os ensaios tribológicos para cada material, foram utilizadas três pressões diferentes e para cada pressão foram efetuados três ensaios de duração diferente, como ilustra o esquema da Figura 3.7.

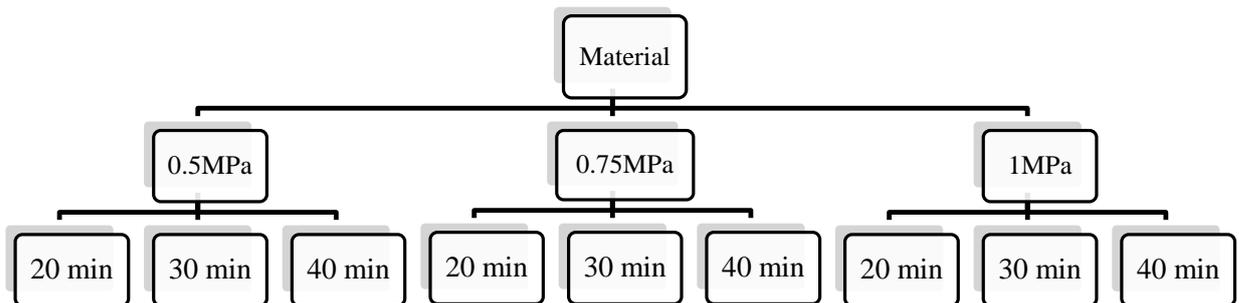


Figura 3.7 Ensaios tribológicos realizados para cada material.

As distâncias de escorregamento, para os ensaios de 20, 30 e 40 minutos, correspondem a, respetivamente, 8600 m, 12900 m e 17200 m.

Os ensaios tribológicos foram realizados todos à mesma velocidade de escorregamento, 7,17 m/s, contrariando o estipulado inicialmente, consequência da impossibilidade de utilização de um variador de frequência, por este criar um campo magnético que interferia com o sistema de aquisição de dados. Esta decisão foi tomada após a realização de várias tentativas para que o sistema munido do variador de frequência funcionasse como o idealizado, que lamentavelmente se provaram ineficazes.

A área dos provetes usados nos ensaios tribológicos é de 161,29 mm², uma vez que os provetes são quadrados e têm 12,7 mm de lado. Então, para garantir as pressões de 0.5 MPa, 0.75 MPa e 1 MPa, as forças normais necessárias nas pastilhas são 80,6 N, 121 N e 160,3 N, respetivamente.

3.2. Caracterização Mecânica

3.2.1. Ensaio dinâmico do módulo de elasticidade

O método utilizado para calcular o módulo de elasticidade denomina-se técnica de excitação por impulso e consta na norma ASTM C 1198-09 [20]. O ensaio consiste em provocar uma vibração, através de um impacto ligeiro num provete com massa, dimensões e geometria bem definidas, neste caso um paralelepípedo. Foi ainda necessário determinar a colocação do provete, munido de um transdutor piezoelétrico colado numa das suas faces, tendo sido pendurado na vertical e preso por um fio a um suporte, Figura 3.8.

Para os ensaios à temperatura ambiente usou-se, para provocar o impacto, um corpo flexível com uma esfera de metal com aproximadamente 7g de massa colada numa das extremidades.

Para os ensaios a temperaturas mais elevadas teve que se alterar o método para provocar o impacto. Neste caso, foi utilizada uma esfera que escorregava através de um tubo que penetrava na mufla e cuja extremidade estava apontada para o provete.

Para a aquisição do sinal foi utilizado o *software* “Pico Scope”.

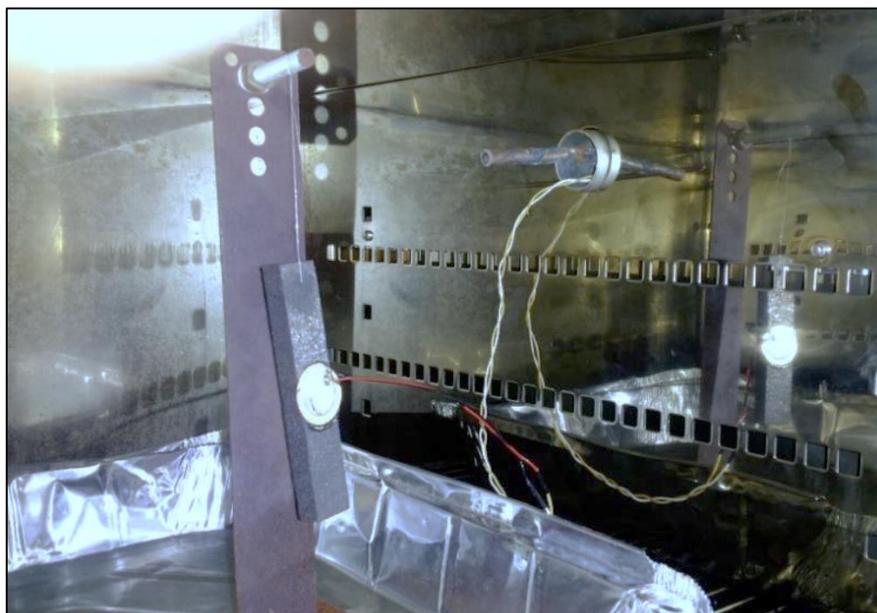


Figura 3.8 Montagem do ensaio do módulo de elasticidade na mufla para temperaturas mais elevadas.

Cada material foi ensaiado 10 vezes a temperaturas diferentes, indicadas na Tabela 3.1, sendo necessário para cada ensaio estabilizar a temperatura da mufla.

Tabela 3.1 Valores da temperatura usados nos ensaios de módulo de elasticidade.

Temperaturas de ensaio [°C]			
≈22	50	100	150

O tratamento dos dados foi feito com auxílio ao programa “*Origin*” e através do qual se obteve a frequência fundamental de vibração usando a transformada rápida de Fourier.

Conhecendo as dimensões dos provetes e as suas massas é possível, através da equação (3.1), determinar o módulo de elasticidade para cada material:

$$E = 0.94565 \left(\frac{m f_f}{b} \right) \left(\frac{L^3}{t} \right) T_1 \quad (3.1)$$

em que m [g] é a massa do provete, f_f é a frequência fundamental em Hz, b [mm] é a largura do provete, L [mm] o comprimento, t é a espessura e T_1 é um fator de correção.

3.2.2. Ensaio de flexão em 3 pontos

Para o cálculo do módulo de elasticidade também se recorreu a um teste normalizado para a tensão de rotura de materiais constituídos por pós metálicos pela ASTM, designado B528 [21].

O teste efetuado consiste em submeter o provete, que se encontra apoiado nas extremidades, a uma força crescente aplicada no meio do mesmo, deformando-o em “V”, como visto na Figura 3.9. Através deste ensaio é possível calcular o módulo de elasticidade do material ensaiado, a resistência à flexão, o trabalho à fratura e a tenacidade.

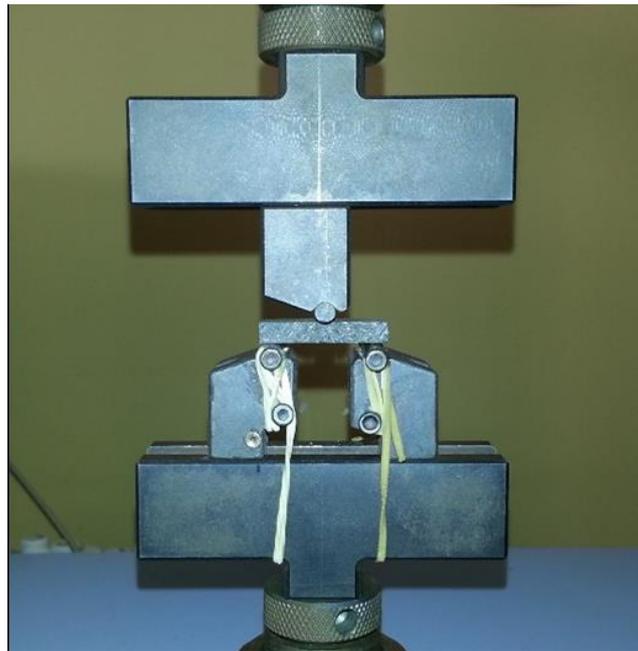


Figura 3.9 Montagem utilizada para a realização dos ensaios de flexão dos materiais de atrito.

Os provetes foram cortados para um comprimento de 31,7 mm e os apoios onde assentam estão afastados entre si 25,4 mm.

Para calcular o módulo de elasticidade, E , e a resistência à flexão, σ_f , foram usadas as equações (3.2) e (3.3) respetivamente.

$$E = \frac{L^3 * m_f}{4 * b * t^3} \quad (3.2)$$

$$\sigma_f = \frac{3 * F_m * L}{2 * b * t^2} \quad (3.3)$$

em que L é a distância entre apoios, m_f é o declive da porção reta da curva Força/Deslocamento, b é largura do provete, t é a espessura e F_m é a força máxima suportada pelo provete.

Para o cálculo do trabalho à fratura, U , e da tenacidade, T , usaram-se as equações (3.4) e (3.5) respetivamente:

$$U = \int_0^{x_f} F dx \quad (3.4)$$

$$T = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma d\varepsilon \quad (3.5)$$

em que ε_f é deslocamento máximo quando se dá a fratura do provete, F é a força aplicada ao provete e σ a tensão na superfície do mesmo.

Este teste foi especificamente criado para caracterizar materiais frágeis de modo que resultados de 0.5 mm de deflexão se considerem questionáveis.

Os ensaios foram realizados na máquina “*Shimadzu AG- X*” com o auxílio ao *software* “*Trapezium X*”, através do qual se estabeleceram as condições de ensaio de 5000 N de carga máxima e velocidade de 0,5 mm por minuto.

3.2.3. Ensaio de dureza Brinell

Neste ensaio, que consta na norma ASTM E0010-01E01 [23], foi usado um provete paralelepípedo de cada material de travagem, tendo sido realizadas 5 indentações para cada um, separadas, pelo menos a uma distância equivalente a duas vezes e meia o diâmetro da esfera indentadora, Figura 3.10. Os ensaios foram realizados na máquina “*Shimadzu AG-X*” através do *software* “*Trapezium X*”.



Figura 3.10 Ensaio de dureza

Para a realização do teste foram utilizados os seguintes parâmetros:

$$F_N = 490 \text{ N}$$

$$D = 10 \text{ mm}$$

$$t = 60 \text{ s}$$

Em que F_N é a força aplicada ao provete, D é o diâmetro da esfera, e t é o tempo em contacto com o provete.

Para facilitar a medição do diâmetro da indentação os provetes foram previamente polidos, para que se pudessem obter imagens mais nítidas da indentação no microscópio ótico, Figura 3.11.

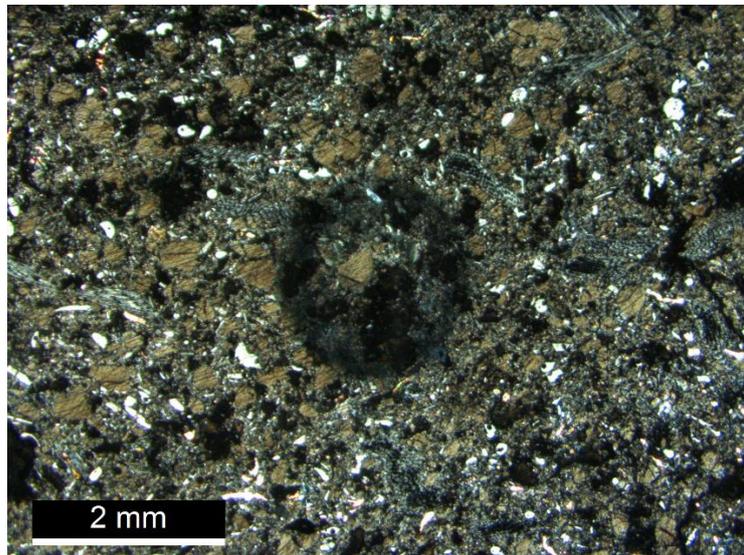


Figura 3.11 Fotografia da indentação provocada no material PESADO

Após a medição do diâmetro da indentação, d , através da utilização do *software* “ImageJ” para tratar a imagem obtida pelo microscópio ótico, usou-se a equação (3.6) para cada ensaio, e calculou-se o valor médio da dureza para cada material.

$$HB = \frac{F_N}{\pi D \left[\frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \right]} \quad (3.6)$$

3.3. Caracterização tribológica

3.3.1. Equipamento de desgaste - *Friction Assessment Screening Test (F.A.S.T)*

Os ensaios tribológicos foram efetuados numa máquina denominada *Friction Assessment Screening Test (F.A.S.T)* representada na Figura 3.12, concebida pelo departamento científico da *Ford Motor Company* com o objetivo de testar tribologicamente materiais de atrito para travões e embraiagens.

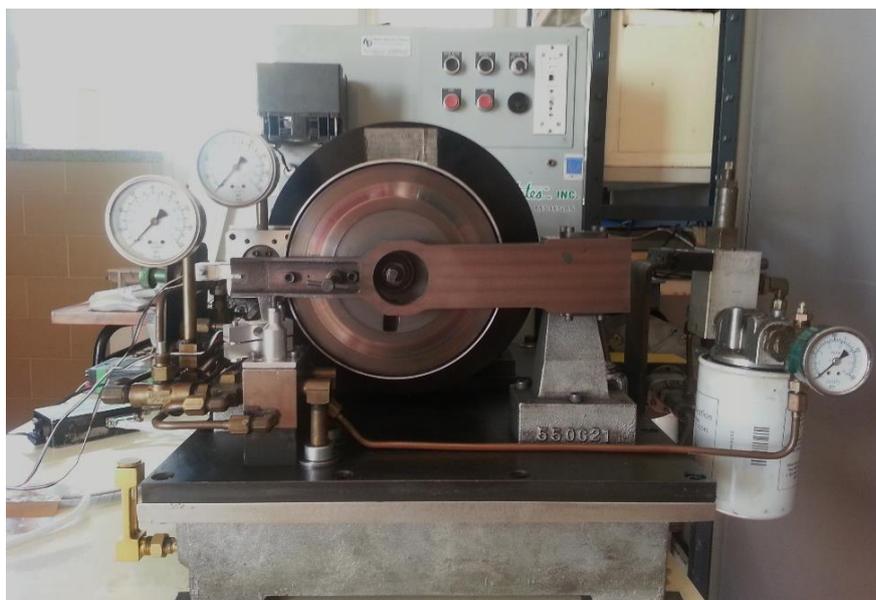


Figura 3.12 Máquina F.A.S.T.

Os principais elementos constituintes desta máquina são o motor elétrico, que tem acoplado ao seu veio de rotação um disco em ferro fundido cinzento, o braço de carga, o sistema hidráulico, as válvulas de controlo e o reservatório de óleo.

Esta máquina possui também um sistema de aquisição de dados, contudo, não foi utilizado, por se preferir fazer a aquisição de forma mais fidedigna e digital através de células de carga.

O motor elétrico integrante desta máquina entrega uma potência de 1 cavalo, tem 6 polos e a sua velocidade a plena carga é de 1000 rpm.

O disco tem cerca de 18 cm de diâmetro e o centro geométrico do espécime contacta com o disco a uma distância de 6,86 cm (2.7 polegadas) do seu centro, portanto, tendo em conta as características do motor referidas anteriormente, e devido ao contacto do espécime com o disco, a velocidade linear de escorregamento do espécime é ligeiramente inferior a 7,17 m/s, a velocidade nominal neste ponto.

A máquina *F.A.S.T* foi desenhada para efetuar dois tipos de ensaios diferentes, designadamente; ensaio a força normal constante e ensaio a força de atrito constante. Para isso faz uso de um sistema hidráulico, responsável por aplicar uma carga normal à pastilha de forma constante, ou variável, no caso de ensaios a força de atrito constante.

A extremidade do lado direito do braço de carga, na posição de carga, ou seja, quando o espécime se encontra em contacto com o disco, como na Figura 3.12, comporta-se como um apoio fixo, permitindo apenas a rotação em torno da direção perpendicular ao disco. Na outra ponta do braço, a uma distância de 28,58 cm (11.25 polegadas), como pode ser visto na Figura 3.17, é fixada, através de uma ligação aparafusada, uma célula de carga em substituição de uma simples haste original roscada na ponta, Figura 3.13 a), que transmite a pressão hidráulica ao braço. Assim, através desta célula de carga, visível em pormenor na Figura 3.13 b) e incorporada na máquina na Figura 3.14 é possível fazer a aquisição em tempo real e de forma digital do valor da força exercida pelo sistema hidráulico na extremidade do braço.

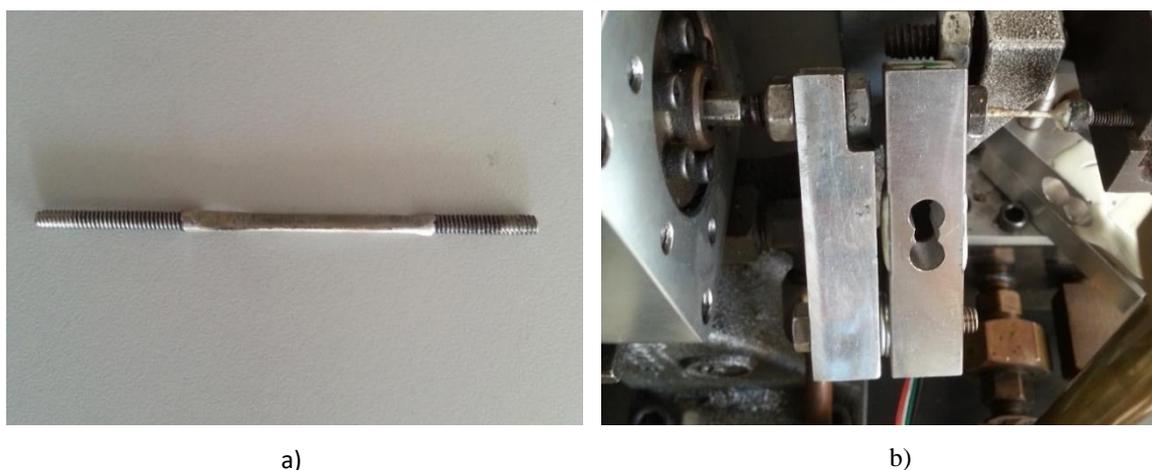


Figura 3.13 Peças responsáveis por transmitir a força normal ao braço: a) peça original; b) peça substituta.



Figura 3.14 Pormenor da ligação aparafusada com a célula de carga responsável pela medição da carga normal aplicada ao braço.

Também se substituiu a peça original responsável por transmitir a força de atrito ao êmbolo da válvula de atrito, visível na Figura 3.15 a), por uma célula de carga, que cumpre o propósito da preterida além de também permitir a aquisição do valor desta força, visível em pormenor na Figura 3.15 b), e incorporada na máquina, Figura 3.16. De referir que devido à configuração da máquina e limitações de espaço, foram experimentadas várias soluções que se revelaram inadequadas, tendo-se optado pela referida anteriormente.

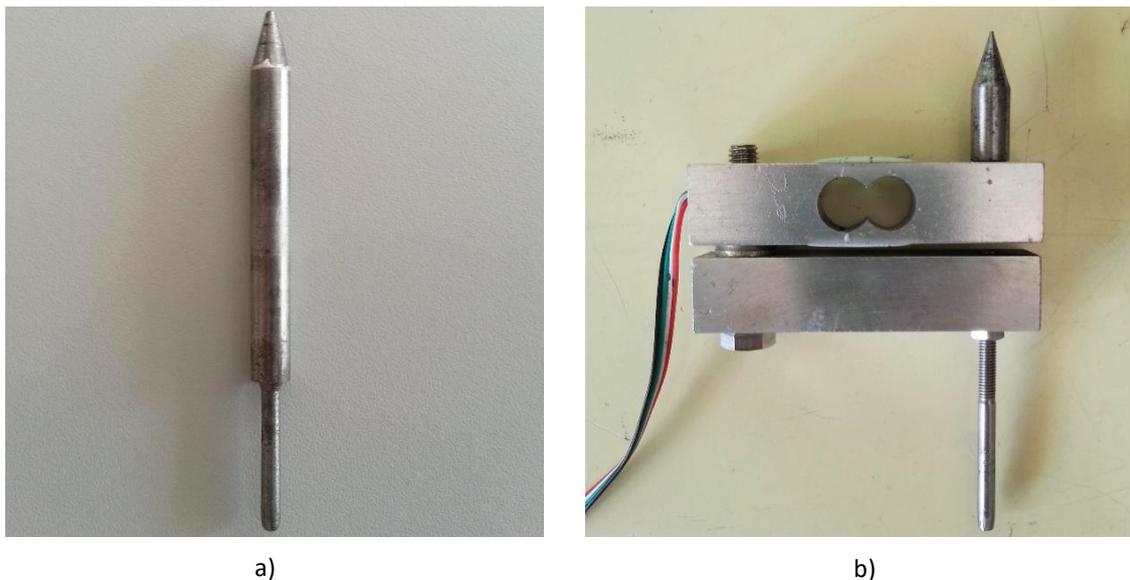


Figura 3.15 Peças responsáveis por transmitir a força de atrito ao êmbolo da válvula de fricção: a) peça original; b) peça substituta

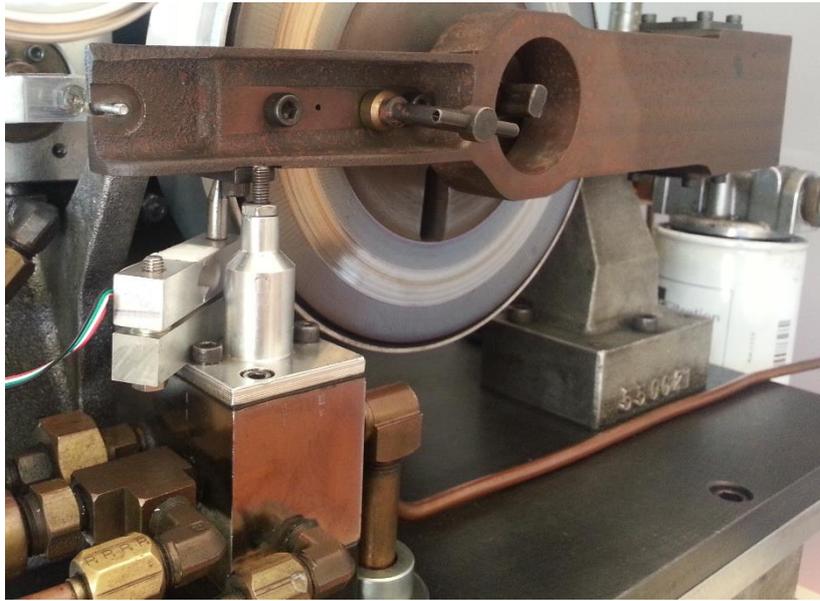


Figura 3.16 Plano aproximado do braço de carga, com a montagem da célula de carga responsável por medir a força de atrito.

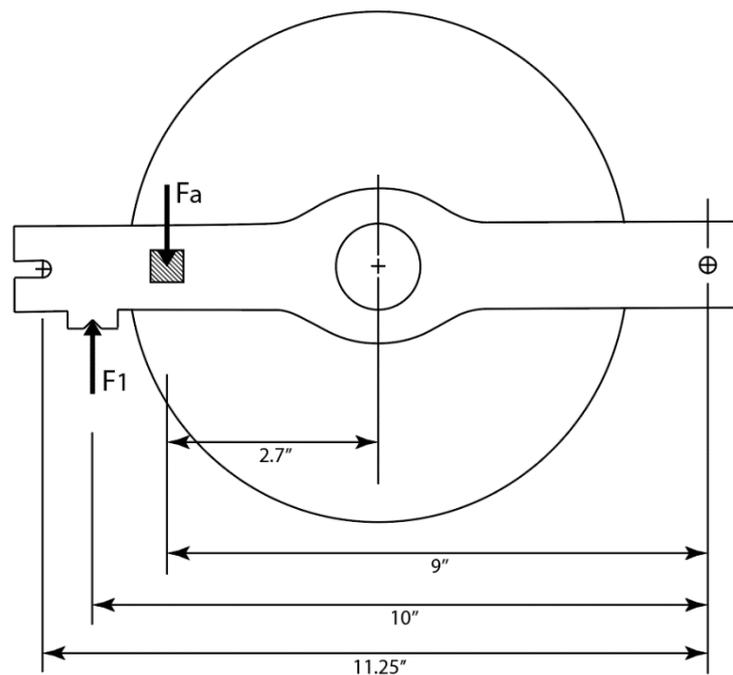


Figura 3.17 Desenho esquemático da posição de contacto da pastilha com o disco.

Como as forças medidas não são as forças exercidas na pastilha, é necessário calcular as forças efetivamente aplicadas ao sistema, com base nas cargas medidas nas células de carga. Portanto, sendo o somatório dos momentos relativos à extremidade apoiada

do braço igual a zero, é possível calcular a força normal e de atrito que atuam na pastilha através de um equilíbrio de momentos.

Calculando, primeiramente, para o caso da força de atrito temos:

$$-F_1 * 10 + F_a * 9 = 0 \Leftrightarrow F_a = 1.11 * F_1 \quad (3.7)$$

em que F_1 é a força medida na célula de carga de atrito e o F_a é a força de atrito na pastilha, como se pode observar na Figura 3.17.

Procedendo de igual forma para a força normal temos:

$$-F_2 * 11.25 + N * 9 = 0 \Leftrightarrow N = 1.25 * F_2 \quad (3.8)$$

em que F_2 é a força medida na célula de carga da força normal e N é a força normal na pastilha.

Como já foi referido anteriormente, para fazer a aquisição das forças normal e de atrito faz-se uso de duas células de carga, porém, neste ensaio, também foi utilizado um termopar para registar as temperaturas da pastilha ao longo dos ensaios. Para isso foi inserido um termopar no braço de carga, através de um furo alinhado com um outro feito na pastilha, o que permitiu a aquisição do valor da temperatura, Figura 3.16.

Para realizar cada ensaio tribológico foi necessário seguir vários passos, desde a preparação até à pesagem final, para garantir as mesmas condições de ensaio em todos eles.

Os procedimentos principais a seguir para cada ensaio foram os seguintes:

• Preparação das amostras

- Cortar provete do material em amostras quadradas com 12,7 mm de lado e 4,7 mm de altura;
- Retificar as amostras de modo a que a face que contacta com o braço seja paralela à face que contacta com o disco;
- Furar as amostras no centro de modo a que o final do furo se encontre a 1,5 mm da face de contacto;

• Pesagem

- Ligar a balança micro-analítica “A&D GH-202” e esperar até estabilizar e colocar valores a zero;
- Abrir porta da balança e colocar amostra;
- Fechar porta. Esperar que estabilize e registar valor;
- Realizar ensaio;

• Ensaio

- Desapertar a porca que prende o braço à célula de carga que mede a força normal;
- Afastar o braço do disco e colocá-lo na posição de inserção de espécime;
- Limpar disco com acetona de modo a retirar detritos remanescentes do ensaio anterior;
- Desapertar o manípulo de aperto do braço de carga;
- Inserir provete;
- Apertar manípulo de aperto do braço de carga, assegurando que o espécime fica fixo;
- Levantar o braço, pousá-lo sobre a célula de carga de atrito, garantindo contacto com uma pequena depressão na face inferior do braço;
- Apertar a célula de carga da força normal à extremidade do braço, de maneira a que espécime contacte com o disco;
- Pressionar o braço de carga contra o disco e verificar visualmente se o espécime contacta de forma plana com o disco;
- Colocar termopar através do furo no braço de carga de modo a que penetre na amostra até ao fundo do furo;
- Rodar a válvula C aproximadamente um quarto de volta desde a posição de aperto completo;
- Fechar completamente a válvula B;
- Virar o manípulo da válvula E para a posição OFF;
- Pressionar os botões pretos identificados por HYDRAULIC START e DRIVE MOTOR;
- Ligar a aquisição de dados do PC através de *Labview*;

- Virar lentamente o manípulo da válvula E para a posição ON para aproximar o braço do disco e progressivamente aumentar a carga aplicada;
- Após o término do ensaio, fazer a descarga, virando o manípulo da válvula E para a posição OFF;
- Desapertar porca que prende a extremidade do braço à célula de carga;
- Retirar amostra e realizar o procedimento de pesagem;

Para cada ensaio foi calculado o desgaste específico, sendo os resultados apresentados em mg/MJ para melhor percepção do desempenho de cada material. Para calcular esta grandeza efetua-se a razão entre o desgaste do provete e o trabalho total realizado pela força de atrito nesse ensaio, como demonstrado na equação (3.9).

$$desg_{esp} = \frac{desg}{W_{Fa}} \quad (2.9)$$

Para calcular o trabalho realizado pela força de atrito ao longo do ensaio, W_{Fa} , foi usada a regra dos trapézios que corresponde à integração de F_a ao longo do gráfico F_a versus deslocamento durante o tempo do ensaio.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

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

4.1. Caracterização mecânica

4.1.1. Módulo de elasticidade dinâmico

Na Figura 4.1 apresentam-se os resultados do módulo de elasticidade de cada material para as quatro temperaturas ensaiadas. Para todos os materiais verifica-se uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura. Os materiais PLACAS, BREKA, COMERCIAL 70-30 e 55-30, foram os que apresentaram maior linearidade na diminuição do módulo de elasticidade com o aumento de temperatura, sendo que o material PLACAS foi o que revelou maior valor de coeficiente de correlação linear.

O material BREKA apresentou o maior valor do módulo de elasticidade para todas as temperaturas sujeitas a ensaio, contudo, foi o material que demonstrou o decréscimo mais acentuado nesta propriedade com o aumento de temperatura, Figura 4.1.

Os materiais BREKA, PLACAS e COMERCIAL 70-30 sofreram uma redução de cerca de 30% (respetivamente, 32%, 35% e 34%) no módulo de elasticidade, da temperatura de 22 °C para 150 °C. Os materiais 50-20 e 55-32 sofreram uma redução de 22% e 20% respetivamente. O material PESADO foi o que registou uma redução mais acentuada no valor de 42%.

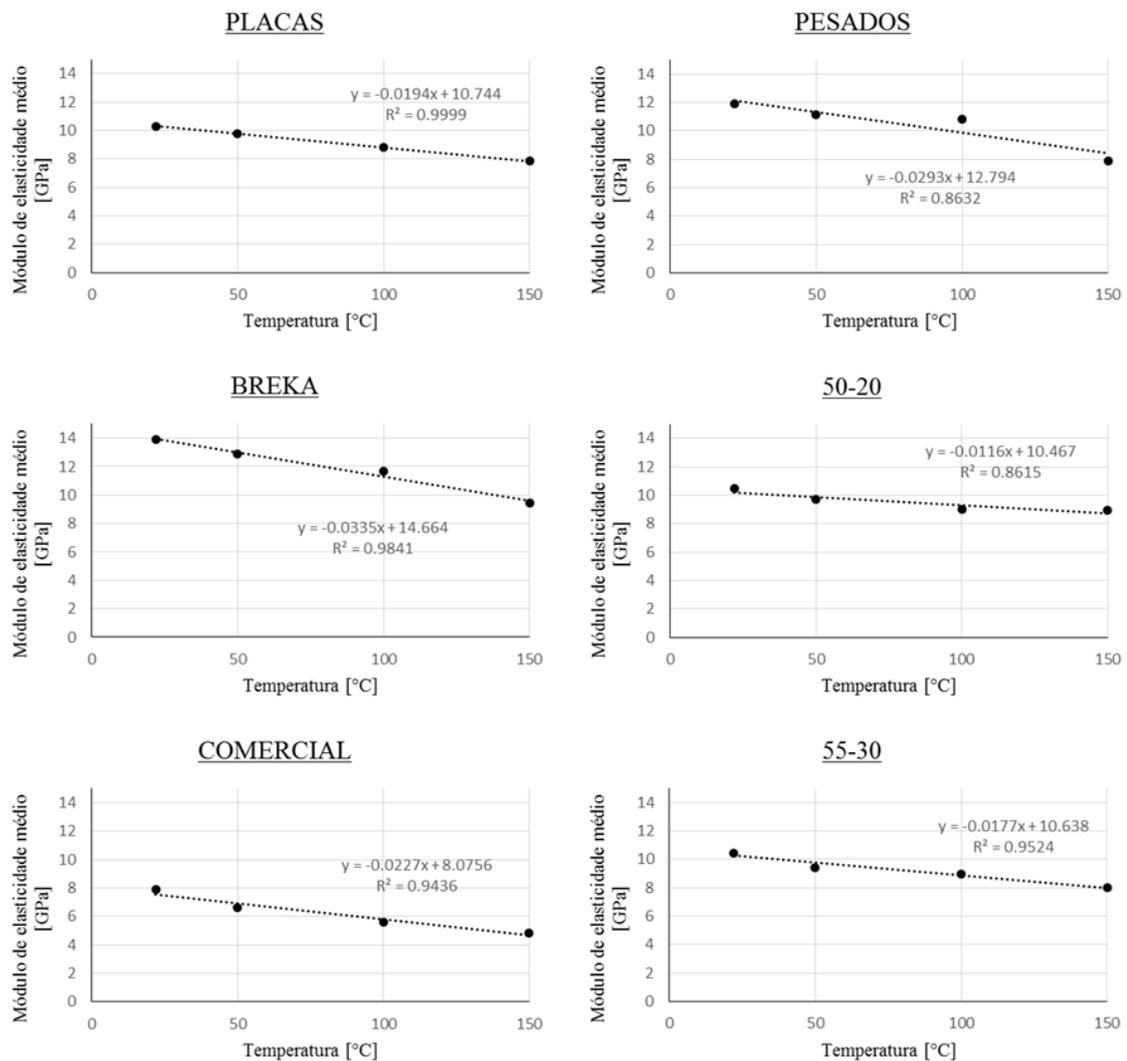


Figura 4.1 Valores médios do módulo de elasticidade para os vários materiais em função da temperatura.

4.1.2. Resistência à flexão

Tabela 4.1 estão representados por ordem decrescente, os resultados do módulo de elasticidade dinâmico (E_D), por forma a permitir a comparação com os resultados do módulo de elasticidade estático (E_E). Na mesma tabela estão ainda representados os resultados da resistência à flexão, σ_f , o trabalho à fratura e a tenacidade, calculados através do ensaio de flexão em 3 pontos.

Tabela 4.1 Propriedades obtidas através do ensaio de flexão.

	E_D [GPa] Dinâmico	E_E [GPa] Estático	σ_f [MPa]	Trabalho à fratura [J/m ²]	Tenacidade [N/mm]
Breka	13.89	9.55	55.87	636.62	4.60
Pesado	11.92	7.95	63.32	681.63	3.94
55-30	10.46	4.32	21.25	164.98	1.28
50-20	10.45	3.46	24.52	346.22	1.99
Placas	10.31	6.51	54.55	733.85	4.28
Comercial	7.91	2.73	31.00	539.84	3.19

Apesar de se verificar uma grande disparidade entres os valores do módulo de elasticidade dinâmico e estático nos diferentes materiais, esta situação não é invulgar uma vez o módulo de elasticidade estático pode ser inferior a metade, ou mais de metade, relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico [24].

É possível verificar que, à exceção do PLACAS, os materiais que apresentam um valor mais elevado no módulo de elasticidade dinâmico são aqueles que apresentam um maior valor no módulo de elasticidade estático.

Quanto à tenacidade e ao trabalho à fratura os materiais que apresentaram menores valores foram o 55-30 e o 50-20, o que se deve provavelmente à textura mais quebradiça destes materiais, visível a olho nu.

Quanto à tensão de rotura, o material PESADO foi o que apresentou maior valor, o que poderá ser explicado pela sua maior composição em fibras, facto observado ao microscópio ótico.

4.1.3. Dureza Brinell

Depois de calculados os valores de dureza para cada ensaio, foram calculados a média e o desvio padrão (DP) para cada material, como pode ser visto na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Média e desvio padrão da Dureza Brinell para cada material.

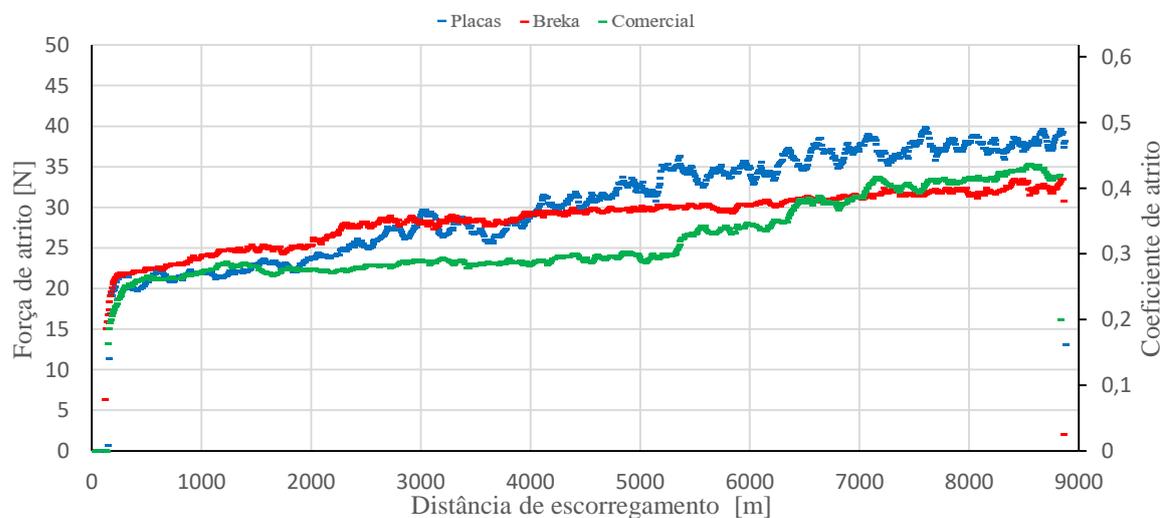
	Dureza Brinell Média [MPa] (DP)
PLACAS	222.51 (21.54)
BREKA	224.25 (21.23)
COMERCIAL	142.23 (21.94)
PESADOS	184.85 (20.57)
50-20	139.42 (12.66)
55-30	104.45 (6.38)

O material BREKA é o que apresenta a maior dureza relativamente aos restantes materiais. O material 55-30 apresenta o menor desvio-padrão, facto que se pode atribuir ao número menor de ensaios efetuados por falta de material.

4.2. Ensaio tribológicos

Nos gráficos das Figuras 4.2 a 4.10 são representadas as evoluções da força de atrito e do coeficiente de atrito de três materiais diferentes: PLACAS, BREKA e COMERCIAL 70-30, para cada condição de ensaio.

0.5 MPa 8600 m

**Figura 4.2** Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.

A pastilha PLACAS apresentou um comportamento mais instável em relação às outras pastilhas, na medida em que a evolução da força de atrito, embora crescente como nos outros materiais, deu-se de forma mais oscilante, como se pode verificar na Figura 4.2.

Quanto à pastilha BREKA, esta apresentou uma evolução do coeficiente de atrito crescente e estável, revelando menos oscilações que os outros materiais, Figura 4.2.

A pastilha do material COMERCIAL 70-30 apresentou um comportamento estável com uma tendência crescente menor que os restantes materiais até aos 5000 m, aumentando depois consideravelmente até ao final do ensaio, atingindo valores próximos de coeficiente de atrito dos restantes materiais, Figura 4.2.

0.5 MPa 12900 m

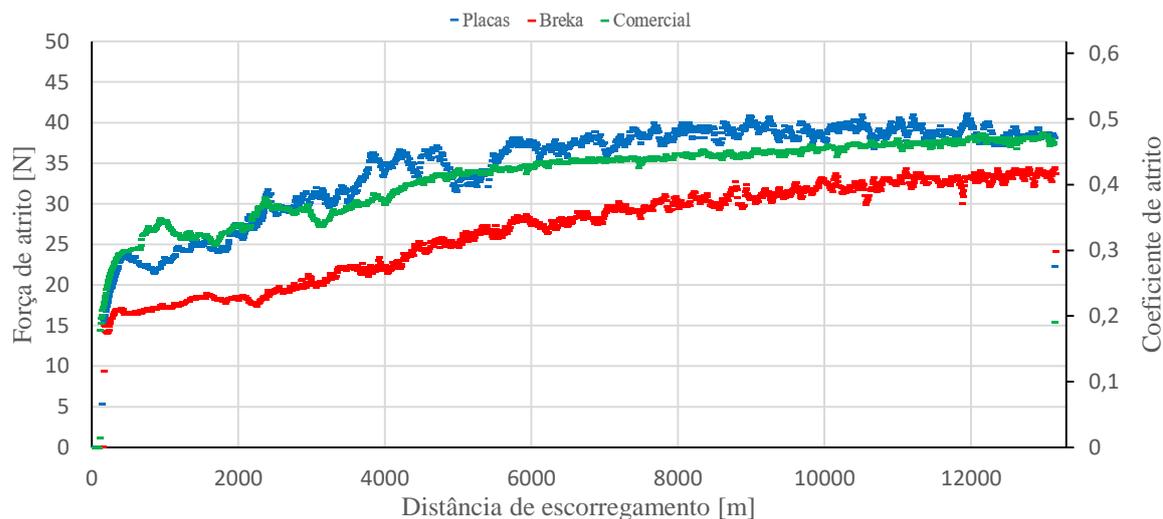


Figura 4.3 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.

Similarmente ao observado no ensaio de 8600 m para a pressão de 0,5 MPa, Figura 4.2, o material que apresentou maiores valores de coeficiente de atrito e maior instabilidade foi o material PLACAS, Figura 4.3.

Como o ensaio foi mais prolongado é possível verificar que os valores do coeficiente de atrito tendem a estabilizar a partir dos 12000 m.

O material BREKA foi o que apresentou menor coeficiente de atrito no decorrer de todo o ensaio.

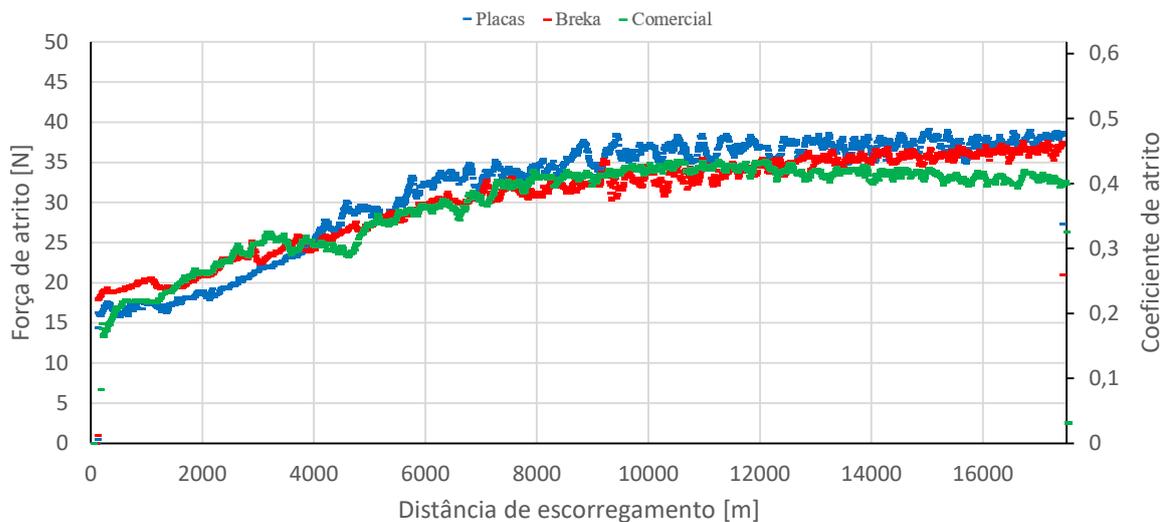
0.5 MPa 17200 m

Figura 4.4 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.

Mais uma vez, é possível verificar que a pastilha do material PLACAS é aquela que apresenta maior coeficiente de atrito, Figura 4.4.

A pastilha do material BREKA é a única que apresenta tendência crescente até ao final do ensaio, enquanto a pastilha do material PLACAS revela uma nítida tendência para a estabilização e a pastilha do material COMERCIAL 70-30 uma propensão para a diminuição do coeficiente de atrito após os 12000 m, Figura 4.4.

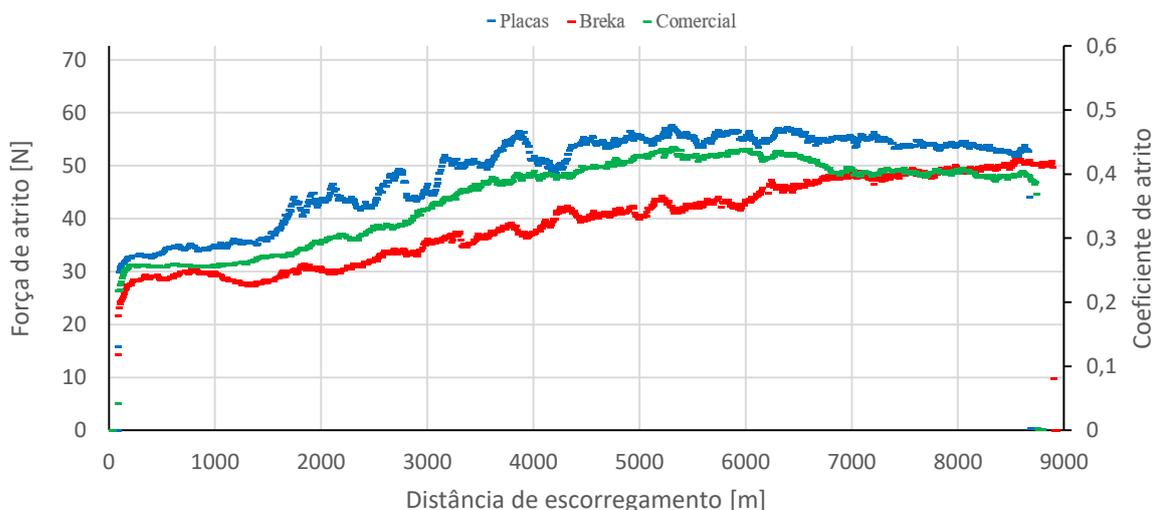
0.75 MPa 8600 m

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

Contrariamente ao constatado nos ensaios a 0.5 MPa para esta distância de escorregamento, os materiais PLACAS e COMERCIAL 70-30 apresentam uma ligeira diminuição do coeficiente de atrito na fase final do ensaio. Para além disto os três materiais manifestaram um comportamento progressivamente mais linear a partir dos 6500 m, o que pode ser atribuído ao ajustamento geométrico da pastilha à superfície do disco e à criação de uma camada de detritos resultante do desgaste dos provetes que atua como estabilizador do coeficiente de atrito, Figura 4.5.

0.75 MPa 12900 m

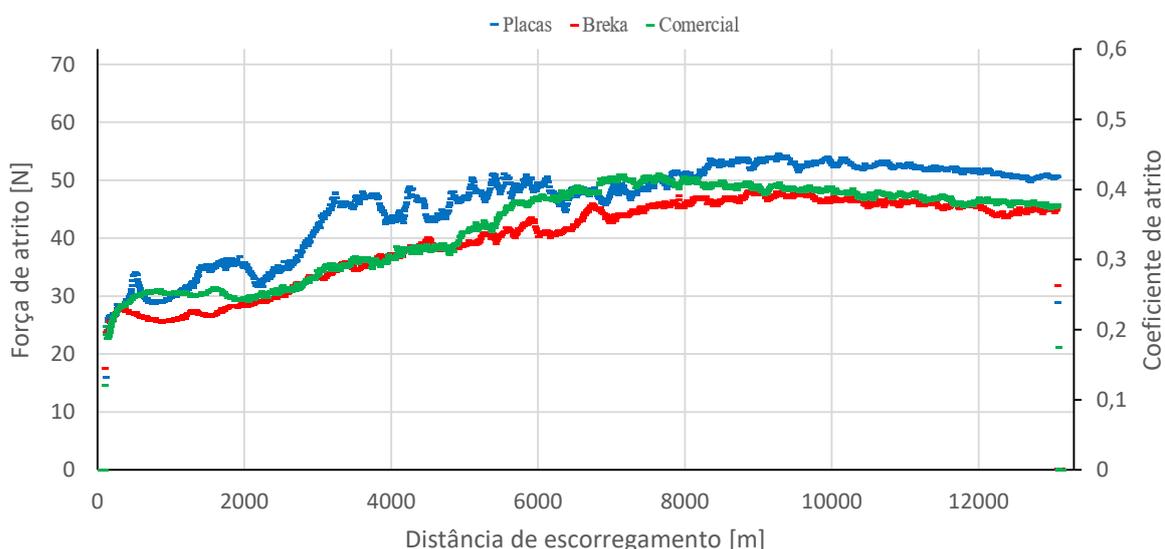


Figura 4.6 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.

Nestes ensaios, Figura 4.6, é possível observar que as curvas dos três materiais começam a evidenciar menos variações abruptas por volta dos 6500 m, tal como nos ensaios de 8600 m de distância de escorregamento à pressão de 0.75 MPa, Figura 4.5. Também é notório um decréscimo ligeiro do coeficiente de atrito para os três materiais a partir dos 9000 m.

O material PLACAS dos três materiais é aquele que apresenta uma evolução mais irregular desde o início do ensaio até aos 6000 m.

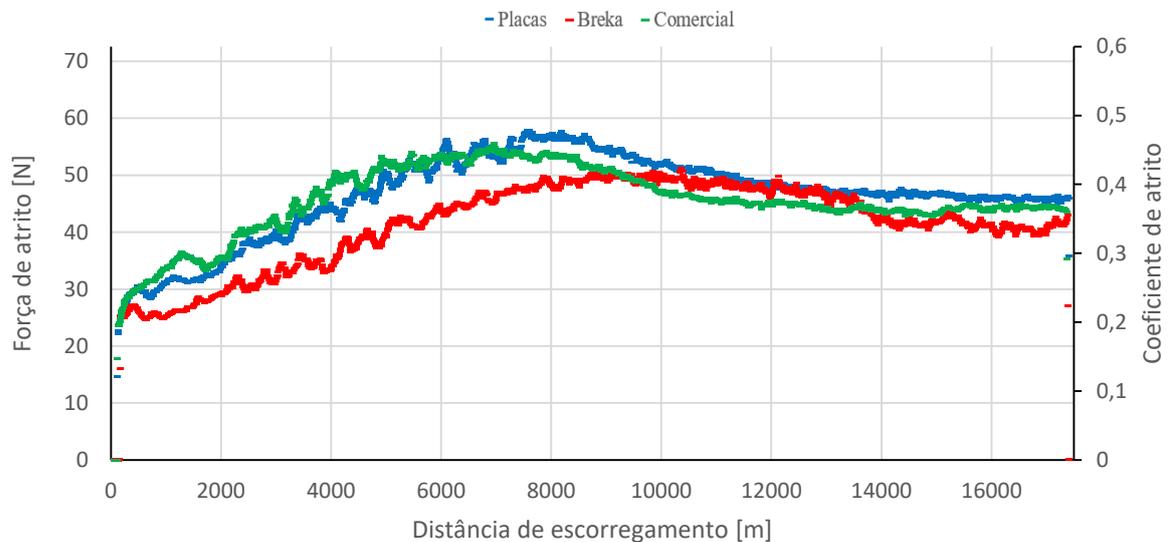
0.75 MPa 17200 m

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

Os resultados presentes no gráfico da Figura 4.7 vêm corroborar a análise feita relativamente ao gráfico da Figura 4.6, na medida em que se verifica a mesma tendência decrescente do coeficiente de atrito a partir de 8000 m para os materiais PLACAS e COMERCIAL 70-30. Verifica-se também uma estabilização dos valores do coeficiente de atrito para estes materiais, enquanto o coeficiente de atrito do material BREKA continua em decréscimo até ao final do ensaio.

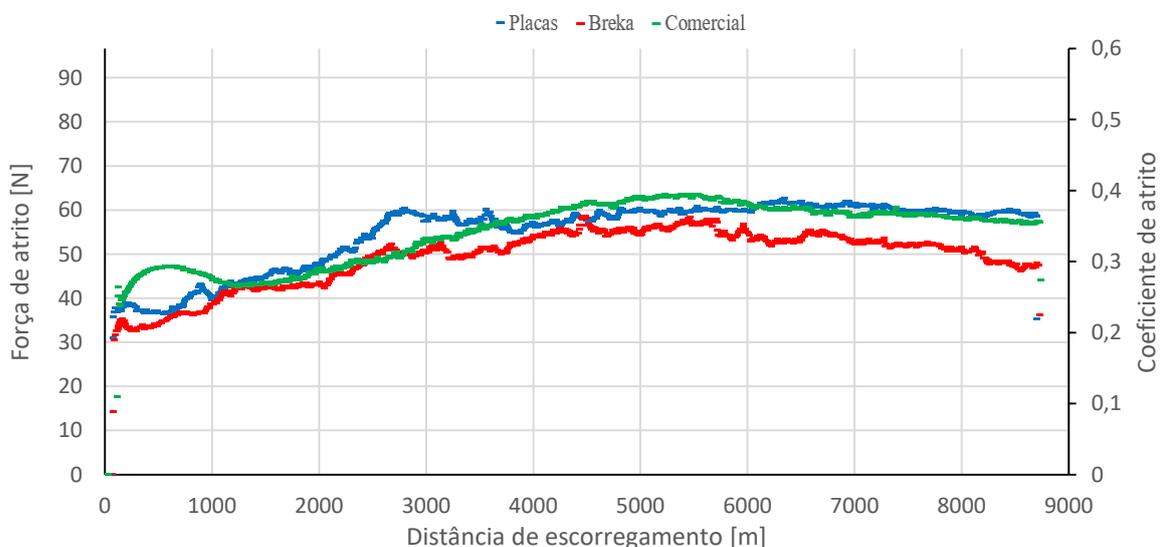
1 MPa 8600 m

Figura 4.8 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento

Na Figura 4.8, os três materiais revelam comportamentos muito idênticos à exceção do material BREKA que apresenta um decréscimo do coeficiente de atrito mais acentuado a partir de 5500 m. Esta tendência surge mais precocemente que nos ensaios para as pressões de 0.5 MPa e 0.75 MPa para a mesma distância de escorregamento, Figura 4.2 e Figura 4.5.

1 MPa 12900 m

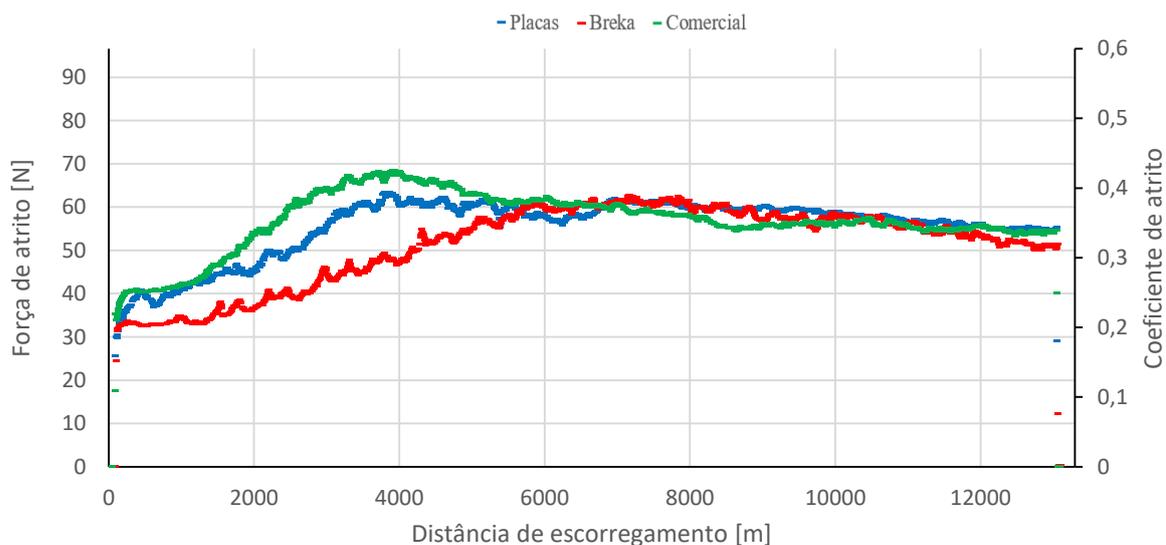


Figura 4.9 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância do escorregamento.

Para a condição de ensaio de 1 MPa e 12900 m de distância de escorregamento, Figura 4.9, os três materiais apresentaram diferenças na evolução do coeficiente de atrito até aos 5500 m, tendo estabilizado e apresentando depois valores semelhantes até ao final do ensaio.

Os materiais PLACAS e COMERCIAL 70-30 registaram um aumento rápido do coeficiente de atrito até aos 4000 m de escorregamento, o material BREKA registou também um aumento mas não tão acentuado e até aos 6000 m, distância a partir da qual todos os materiais registam coeficientes de atrito muito idênticos.

1 MPa 17200 m

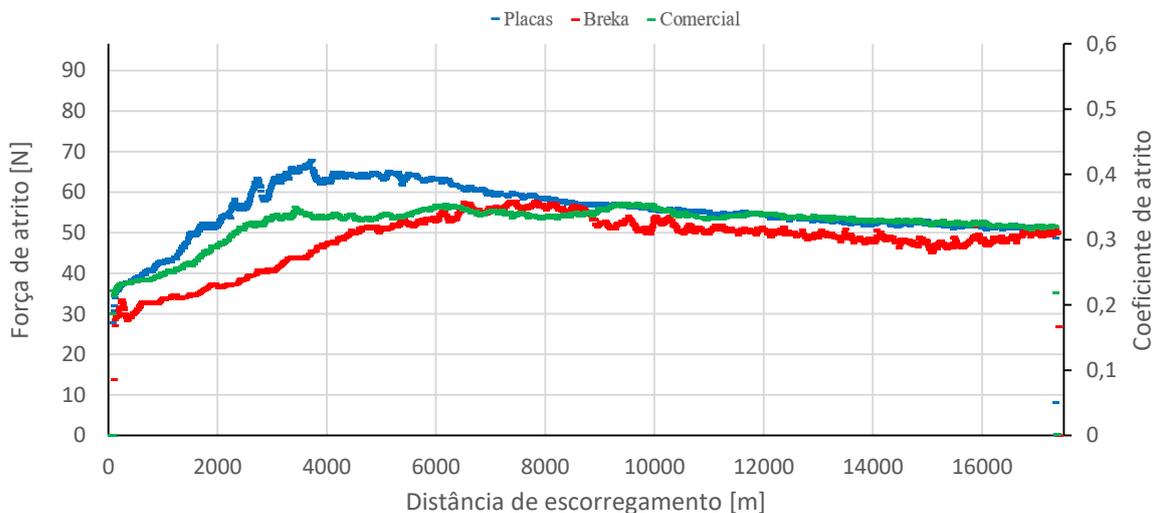


Figura 4.10 Resultados do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento.

Similarmente ao gráfico da Figura 4.9, os três materiais tiveram diferentes evoluções do coeficiente de atrito até aos 8000 m, tendo estabilizado depois até ao final do ensaio. A partir dos 9000 m verifica-se que os materiais PLACAS e COMERCIAL 70-30 registam um coeficiente de atrito igual até ao final do ensaio, sendo que o material o material BREKA também não se afasta muito dos anteriores.

Após cada ensaio, foram pesados os provetes para registar o desgaste volúmico para cada ensaio. Os gráficos tridimensionais, Figura 4.11, Figura 4.12, Figura 4.13 demonstram a forma como cada material se desgastou em cada condição.

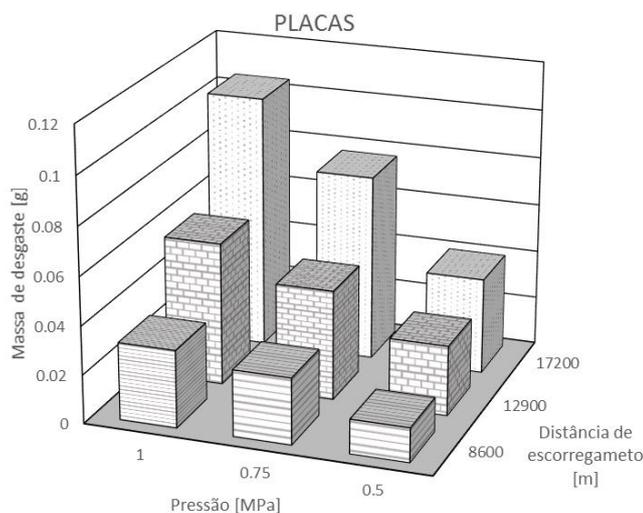


Figura 4.11 Massa de desgaste do material PLACAS para os vários tipos de ensaio.

A massa de desgaste do material PLACAS para a pressão de 0.75MPa relativamente à pressão de 0.5MPa foi superior em 94%, 57% e 94% para as distâncias de 8600 m, 12900 m e 17200 m, respetivamente. Para a massa de desgaste para 1 MPa relativamente à pressão de 0.75MPa foi superior em 17%, 31% e 36% para as distâncias de escorregamento de 8600 m, 12900 m, 17200 m, respetivamente.

Para a distância de escorregamento de 12900 m a massa de desgaste do material PLACAS foi, relativamente à distância de 8600 m, superior em 104%, 66% e 85% para as pressões de 0.5 MPa, 0.75 MPa e 1MPa. A massa de desgaste para a distância de 17200 m relativamente à distância de 12900 m foi superior em 37%, 70% e 78% para as pressões de 0.5 MPa, 0.75 MPa, e 1MPa, respetivamente.

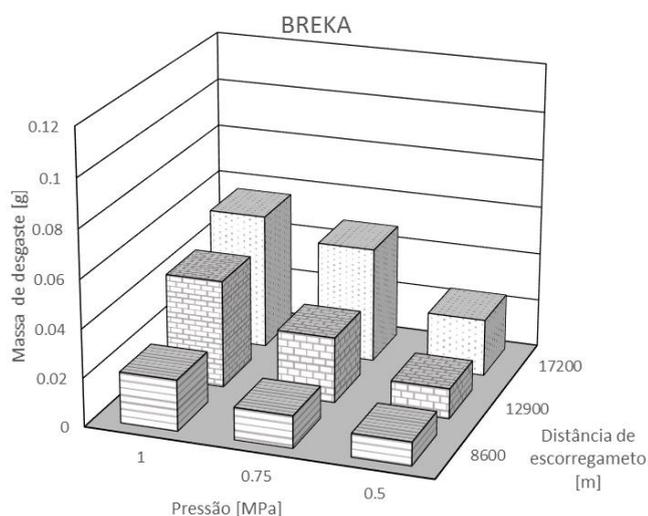


Figura 4.12 Massa de desgaste do material BREKA para os vários tipos de ensaio.

A massa de desgaste do material BREKA para a pressão de 0.75 MPa relativamente à pressão de 0.5 MPa foi superior em 37%, 116% e 102% para as distâncias de 8600 m, 12900 m e 17200 m, respetivamente. Para a massa de desgaste para 1 MPa relativamente à pressão de 0.75 MPa foi superior em 59%, 64% e 18% para as distâncias de escorregamento de 8600 m, 12900 m, 17200 m, respetivamente.

Para a distância de escorregamento de 12900 m a massa de desgaste do material PLACAS foi, relativamente à distância de 8600 m, superior em 29%, 104% e 110% para as pressões de 0.5 MPa, 0.75 MPa e 1 MPa. A massa de desgaste para a distância de 17200 m relativamente à distância de 12900 m foi superior em 88%, 75% e 110% para as pressões de 0.5 MPa, 0.75 MPa, e 1 MPa, respetivamente.

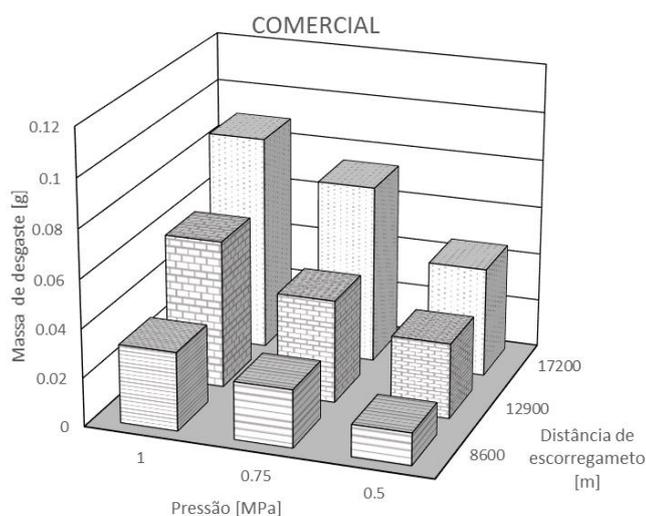


Figura 4.13 Massa de desgaste do material COMERCIAL para os vários tipos de ensaio.

A massa de desgaste do material COMERCIAL 70-30 para a pressão de 0,75 MPa relativamente à pressão de 0,5 MPa foi superior em 80%, 37% e 64% para as distâncias de 8600 m, 12900 m e 17200m, respetivamente. Para a massa de desgaste para 1 MPa relativamente à pressão de 0,75 MPa foi superior em 36%, 44% e 21% para as distâncias de escorregamento de 8600 m, 12900 m, 17200 m, respetivamente.

Para a distância de escorregamento de 12900 m a massa de desgaste do material PLACAS foi, relativamente à distância de 8600 m, superior em 134%, 78% e 89% para as pressões de 0,5 MPa, 0,75 MPa e 1 MPa. A massa de desgaste para a distância de 17200 m relativamente à distância de 12900 m foi superior em 45%, 74% e 46% para as pressões de 0,5 MPa, 0,75 MPa, e 1 MPa, respetivamente.

De um modo geral é possível concluir através da análise dos gráficos das figuras 4.11, 4.12 e 4.13, que existe um aumento do desgaste com o aumento da pressão aplicada ao provete e com o aumento da distância de escorregamento, como era expectável, sendo essa evolução não proporcional, uma vez que o aumento percentual do desgaste para pressões de 0,75 MPa relativamente às pressões de 0,5 MPa foi maior do que o aumento percentual do desgaste para as pressões de 1 MPa relativamente às pressões de 0,75 MPa.

Os materiais PLACAS e COMERCIAL 70-30 tiveram valores de desgaste muito semelhantes para todos os tipos de ensaios. O material BREKA, pelo contrário distingue-se dos outros dois por apresentar valores de desgaste muito inferiores.

Na Figura 4.14 está representado a relação da massa de desgaste dos três materiais para todas as condições de ensaio e o produto da pressão aplicada ao provete com a distância de escorregamento.

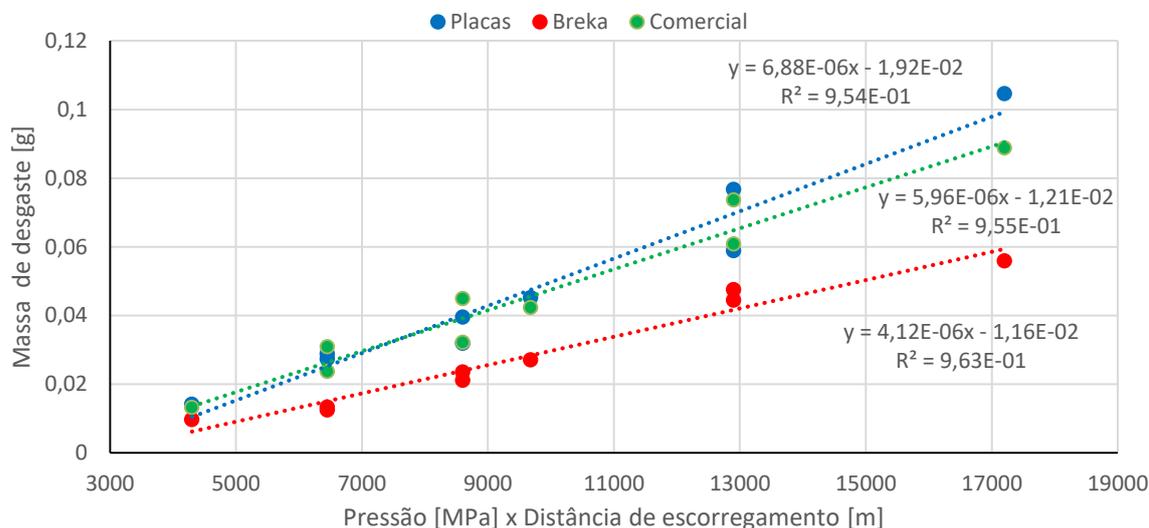


Figura 4.14 Massa de desgaste versus produto da pressão com a distância de escorregamento

Através da análise do gráfico da Figura 4.14 é possível verificar que os materiais PLACAS e COMERCIAL apresentam declives aproximados, o que vem corroborar o que atrás foi exposto, isto é, têm um comportamento ao desgaste muito semelhante. Quanto ao material BREKA, o declive é menos acentuado que o dos outros materiais, o que bem visível na Figura 4.14.

Na Tabela 4.3 estão representados os coeficientes de atrito médios dos três materiais para todas as condições de ensaio.

Tabela 4.3 Tabela dos coeficientes de atrito

	8600m			12900m			17200m		
	0.5MPa	0.75MPa	1MPa	0.5MPa	0.75MPa	1MPa	0.5MPa	0.75MPa	1MPa
PLACAS	0.36	0.40	0.34	0.42	0.38	0.35	0.39	0.38	0.35
BREKA	0.32	0.32	0.30	0.32	0.33	0.32	0.37	0.34	0.30
COMERCIAL	0.31	0.36	0.34	0.40	0.35	0.35	0.37	0.38	0.32

Através da análise da Tabela 4.3 é possível concluir que o material que apresentou maior coeficiente de atrito foi o PLACAS e que o material que apresentou o menor coeficiente de atrito, exceto num ensaio, foi o BREKA.

No que diz respeito à temperatura, na Figura 4.15 está representada a evolução da mesma ao longo dos ensaios a 1 MPa para a distância de escorregamento de 17200 m. Tendo em conta que estes resultados são muito semelhantes aos obtidos para os ensaios a diferentes pressões e a diferentes distâncias de escorregamento, optou-se por apresentar apenas os que estão representados na Figura 4.15, uma vez que a temperatura aumentou de uma forma quase linear com o aumento da distância de escorregamento e independentemente das variações da força de atrito.

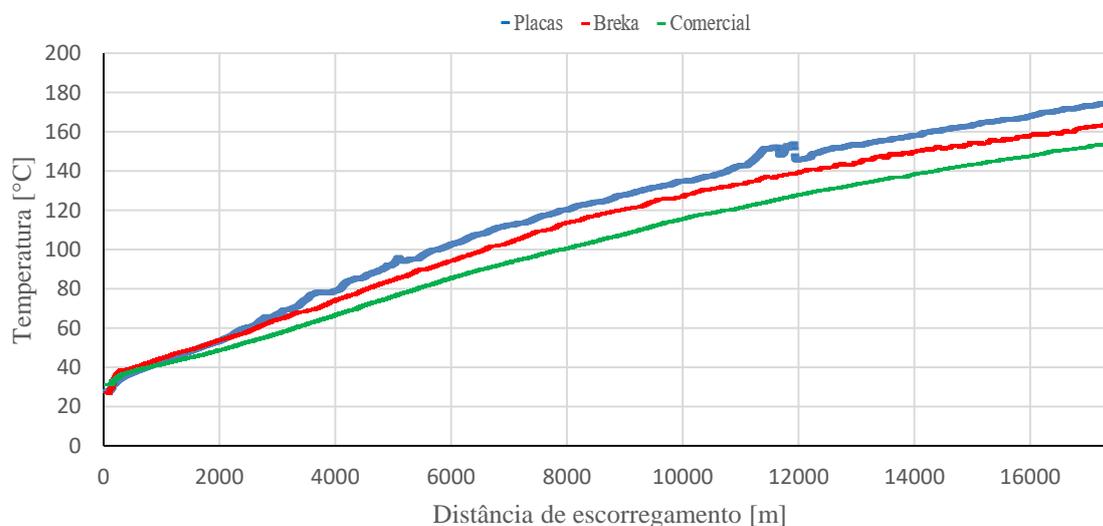


Figura 4.15 Resultados da temperatura registada dentro da pastilha ao longo da distância de escorregamento.

Após a realização dos ensaios tribológicos, foi calculado então o desgaste específico de cada material em cada ensaio, usando para isso a equação (2.9).

Através da análise da Tabela 4.4 é possível inferir que o material que apresenta menores valores de desgaste específico é o material BREKA e que os materiais PLACAS e COMERCIAL 70-30 apresentam algumas semelhanças entre si.

Tabela 4.4 Resultados do desgaste específico [mg/MJ].

	8600m			12900m			17200m		
	0.5MPa	0.75MPa	1MPa	0.5MPa	0.75MPa	1MPa	0.5MPa	0.75MPa	1MPa
PLACAS	56.21	65.16	67.35	63.89	75.69	81.87	72.29	95.38	109.31
BREKA	41.02	38.34	49.54	36.02	52.35	66.72	44.74	66.56	60.91
COMERCIAL	61.65	62.06	67.99	71.21	77.56	82.57	87.14	93.84	98.29

Os materiais PLACAS e COMERCIAL 70-30 apresentam valores de desgaste específico entre 40 mg/MJ e 100 mg/MJ, intervalo que é tomado como referência na classificação do material de atrito como aceitável [11]. Já o material BREKA registra valores abaixo desta gama, apresentando somente valores fora do intervalo para pressões de 0.75 MPa e distância de 8600 m e para a pressão de 0.5 MPa e distância de 12900 m.

Para melhor entender a influência da variação da pressão para cada distância de escorregamento, no desgaste de cada material, foi elaborada a Tabela 4.5, que apresenta o quociente dos desgastes relativos das pressões de 0.75 MPa e 1 MPa em relação à pressão de 0.5 MPa.

Tabela 4.5 Desgaste relativo entre os materiais de desgaste utilizados para as condições de ensaio.

	8600m			12900m			17200m		
	0.5MPa	0.75MPa	1MPa	0.5MPa	0.75MPa	1MPa	0.5MPa	0.75MPa	1MPa
PLACAS	1.00	1.16	1.20	1.00	1.18	1.28	1.00	1.32	1.51
BREKA	1.00	0.93	1.21	1.00	1.45	1.85	1.00	1.49	1.36
COMERCIAL	1.00	1.01	1.10	1.00	1.09	1.16	1.00	1.08	1.13

Através da análise da Tabela 4.5 verifica-se que o material COMERCIAL 70-30 foi aquele que manifestou menor variação do desgaste específico com o aumento da pressão.

Também é possível observar na Tabela 4.5 que o material BREKA registou um aumento significativo do desgaste específico com o aumento da pressão, especialmente para a distância de escorregamento de 12900 m, em que o desgaste para a pressão de 1 MPa foi 85% superior, relativamente ao desgaste para a pressão de 0.5 MPa.

4.2.1. Morfologia das superfícies de desgaste

Foram observadas as superfícies de desgaste dos três materiais sujeitos a ensaio por forma a melhor perceber os mecanismos de desgaste, Figura 4.16, 4.17 e 4.18.

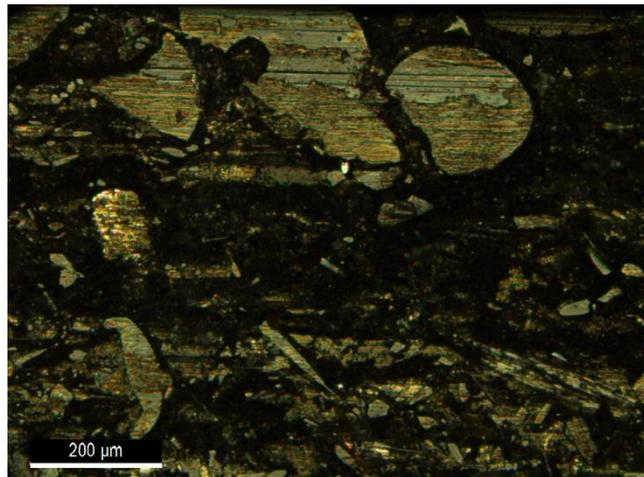


Figura 4.16 Fotografia da superfície de desgaste do material PLACAS.

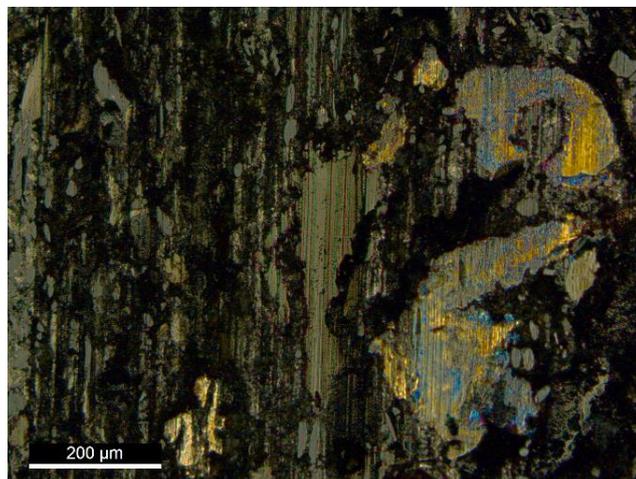


Figura 4.17 Fotografia da superfície de desgaste do material BREKA.

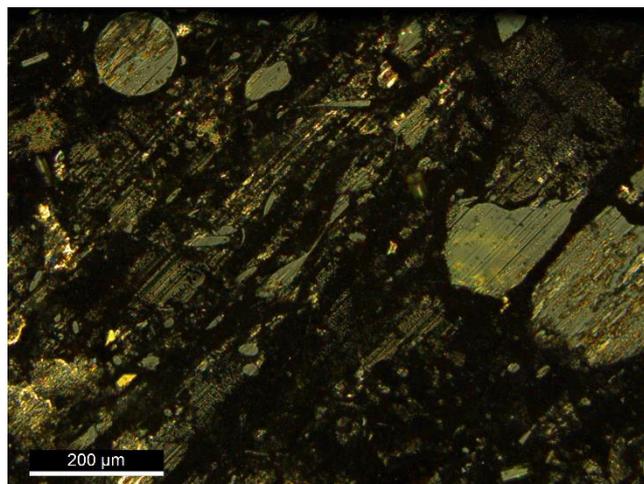


Figura 4.18 Fotografia da superfície de desgaste do material COMERCIAL.

Nas Figura 4.16, 4.17 e 4.18 são visíveis pontos de contacto primários com marcas da abrasão, em concreto, traços com orientação retilínea, resultantes da orientação de escorregamento e da desintegração de algumas partículas responsáveis por este efeito na superfície de contato. Contudo, este método não foi totalmente esclarecedor dos mecanismos envolvidos no desgaste dos materiais de atrito, pelo que seria necessário a observação destas superfícies através de microscopia eletrónica de varrimento. Este procedimento não foi efetuado por falta de tempo útil.

5. CONCLUSÕES

Após o tratamento dos resultados obtidos e analisados detalhadamente os valores e desempenhos dos materiais sujeitos a ensaios, foram tecidas algumas conclusões sobre o comportamento de cada um dos materiais, em cada parâmetro específico de caracterização.

Tal como foi referido no início deste estudo foram submetidos seis materiais a ensaios de modo a permitir a sua caracterização mecânica e tribológica. No que diz respeito à caracterização mecânica foram determinadas as seguintes propriedades; dureza, rigidez, resistência à flexão/tenacidade. No que diz respeito aos ensaios tribológicos foram avaliados os parâmetros: a massa de desgaste, o desgaste específico e o coeficiente de atrito.

5.1. Caracterização mecânica

Módulo de elasticidade dinâmico – Como era expetável verificou-se uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura em todos os materiais, Figura 4.1. Conclui-se ainda que o material BREKA foi o que apresentou o maior valor do módulo de elasticidade para todas as temperaturas sujeitas a ensaio, contudo, foi o material que demonstrou o decréscimo mais acentuado nesta propriedade com o aumento de temperatura.

Módulo de elasticidade estático – Apesar de se verificar uma grande disparidade entres os valores do módulo de elasticidade dinâmico e estático nos diferentes materiais, conclui-se que à exceção do PLACAS, os materiais que apresentam um valor mais elevado no módulo de elasticidade dinâmico são aqueles que apresentam um maior valor no módulo de elasticidade estático, Tabela 4.1.

Dureza – Depois de calculados os valores de dureza para cada ensaio e a média e desvio padrão para cada material, concluiu-se que o material PLACAS é o que apresenta maior grau de dureza.

5.1. Caracterização tribológica

Massa de desgaste – No que diz respeito a este parâmetro, os materiais PLACAS e COMERCIAL 70-30 tiveram valores de desgaste muito semelhantes para todos os tipos de ensaios. O material BREKA, pelo contrário distingue-se dos outros dois por apresentar valores de desgaste muito inferiores. Concluiu-se também que, de um modo geral, existe um aumento do desgaste com o aumento da pressão aplicada ao provete e com o aumento da distância de escorregamento, como era expectável, sendo essa evolução não proporcional, uma vez que o aumento percentual do desgaste para pressões de 0.75 MPa relativamente às pressões de 0.5 MPa foi maior do que o aumento percentual do desgaste para as pressões de 1MPa relativamente às pressões de 0.75 MPa, Figuras 4.11, 4.12 e 4.13.

Desgaste específico – Tal como para a massa de desgaste, também para o desgaste específico foi o material BREKA que apresentou menores valores, relativamente aos materiais PLACAS e COMERCIAL 70-30, que neste parâmetro específico apresentaram valores semelhantes entre si.

Os materiais PLACAS e COMERCIAL 70-30 apresentaram valores de desgaste específico entre 40 mg/MJ e 100 mg/MJ, intervalo que é tomado como referência na classificação do material de atrito como aceitável [11]. Já o material BREKA regista valores abaixo desta gama, apresentando somente valores fora do intervalo para pressões de 0.75 MPa e distância de 8600 m, e para a pressão de 0.5 MPa e distância de 12900 m, Tabela 4.1.

Concluiu-se ainda que o material COMERCIAL 70-30 foi aquele que manifestou menor variação do desgaste específico com o aumento da pressão, Tabela 4.2. e que o material BREKA registou um aumento significativo do desgaste específico com o aumento da pressão, especialmente para a distância de escorregamento de 12900 m, em que o desgaste para a pressão de 1 MPa foi 85% superior, relativamente ao desgaste para a pressão de 0.5 MPa.

Coefficiente de atrito – Relativamente a este parâmetro, o material que apresentou maior coeficiente de atrito foi o PLACAS e o material que apresentou o menor coeficiente de atrito, foi o BREKA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. Gilles, *Automotive Chassis: Brakes, Suspension, and Steering - Tim Gilles - Google Books*. 2005.
- [2] P. J. Blau, “Compositions , Functions , and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives,” *Energy*, vol. 27, no. September, p. 38, 2001.
- [3] a. O. a. Ibhadode and I. M. Dagwa, “Development of asbestos-free friction lining material from palm kernel shell,” *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 30, no. 2, pp. 166–173, 2008.
- [4] B. Reseña, H. Sobre, and L. A. Fricción, “Capítulo 4 pastillas de freno 1.,” pp. 21–36, 1987.
- [5] J. Bijwe, “Composites as friction materials: Recent developments in non-asbestos fiber reinforced friction materials? a review,” *Polym. Compos.*, vol. 18, no. 3, pp. 378–396, Jun. 1997.
- [6] J. Dowling, “Toyota has issued a warning about thousands of counterfeit brake pads containing deadly asbestos,” *news.com.au*, 01-Nov-2015.
- [7] R. Ciudin, P. C. Verma, S. Gialanella, and G. Straffelini, “Wear debris materials from brake systems: environmental and health issues,” vol. 191, pp. 1423–1434, 2014.
- [8] J. Wahlström, D. Gventsadze, L. Olander, E. Kutelia, L. Gventsadze, O. Tsurtsunia, and U. Olofsson, “A pin-on-disc investigation of novel nanoporous composite-based and conventional brake pad materials focussing on airborne wear particles,” *Tribol. Int.*, vol. 44, no. 12, pp. 1838–1843, 2011.
- [9] W. Österle and I. Urban, “Friction layers and friction films on PMC brake pads,” *Wear*, vol. 257, no. 1–2, pp. 215–226, 2004.
- [10] M. Eriksson, F. Bergman, and S. Jacobson, “On the nature of tribological contact in automotive brakes,” *Wear*, vol. 252, no. 1–2, pp. 26–36, 2002.
- [11] Anderson, A. E. (1992) "ASM Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology", vol 18
- [12] “What Are The Best Brake Pads? Ceramic vs. Semi-Metallic.” Acedido em 5 de

- setembro de 2016, em: <http://www.autoanything.com/brakes/the-best-brake-pads-ceramic-or-metallic.aspx>.
- [13] Blake Pankratz, “Brake Pads - A break down of what you need to know - Pinkbike.” Acedido em 5 de setembro de 2016, em: <http://www.pinkbike.com/news/brake-pad-information-2009.html>.
- [14] G. P. Ostermeyer, “Friction and wear of brake systems,” *Forsch. im Ingenieurwes.*, vol. 66, no. 6, pp. 0267–0272, 2001.
- [15] M. Djafri, M. Bouchetara, C. Busch, and S. Weber, “Effects of humidity and corrosion on the tribological behaviour of the brake disc materials,” *Wear*, vol. 321, pp. 8–15, 2014.
- [16] W. Österle and A. I. Dmitriev, “Functionality of conventional brake friction materials - Perceptions from findings observed at different length scales,” *Wear*, vol. 271, no. 9–10, pp. 2198–2207, 2011.
- [17] P. J. Blau and J. C. McLaughlin, “Effects of water films and sliding speed on the frictional behavior of truck disc brake materials,” *Tribol. Int.*, vol. 36, no. 10, pp. 709–715, 2003.
- [18] M. Eriksson and S. Jacobson, “Tribological surfaces of organic brake pads,” *Tribol. Int.*, vol. 33, no. 12, pp. 817–827, 2000.
- [19] I. Ahmed, “Analysis of disc brake squeal using a ten-degree-of-freedom model,” *Multicr. Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 8, pp. 142–155, 2011.
- [20] “ASTM C 1198-09,” vol. 15, pp. 1–8, 2013.
- [21] “ASTM B 528 – 99”, pp 1-4.
- [22] S. P. Singh, “Analysis of Brake-Pad Friction Material Formulation,” no. 8, pp. 6–13, 2015.
- [23] “ASTM E0010-01E01,” pp. 1–32, 2014.
- [24] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 4th ed., vol. 1. BH, 2015.