



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Reforço de pastilhas de travão com aparas de aço**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

## **Brake pads reinforcement with steel ships**

**Autor**

**Camilo José Sousa e Silva**

**Orientador**

**Professora Doutora Maria Teresa Freire Vieira**

**Coorientador**

**Mestre Hélder Xavier Borges da Silva**

**Júri**

**Presidente**

**Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar**  
**Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**

**Vogais**

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

**Antunes**

**Investigador da Universidade de Coimbra**

**Orientador**

**Professora Doutora Maria Teresa Freire Vieira**

**Professora Catedrática da Universidade de Coimbra**

---

**Coimbra, Setembro, 2016**

## Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios sem os quais não se teria tornado uma realidade. A todos eles deixo aqui o meu sincero agradecimento,

...à Professora Doutora Teresa Vieira pela disponibilidade em todo o desenvolvimento do meu trabalho, pela orientação, oportunidade e compreensão em todos os momentos.

...ao Xavier Silva pela paciência, disponibilidade e recetividade a qualquer desafio, foi uma ajuda muito importante nesta etapa final.

...ao “Projeto nº 30289 – X-NANO – valorização de aparas metálicas” e à Moldes RP pelo fornecimento das aparas metálicas e acesso a informação fundamental.

...aos colegas de laboratório pelo bom ambiente de companheirismo e por contribuírem com os seus conhecimentos sempre que possível.

...aos meus amigos por toda a preocupação, motivação e por estarem sempre presentes apesar da distância, eles sabem quem são.

...aos meus pais e irmãs pelo apoio ao longo dos anos, pela motivação, por tornarem possível este meu objetivo e principalmente por compreenderem as minhas falhas e momentos mais difíceis ao longo do meu percurso académico.

...e à Dalila por todo o apoio e força transmitida, pela motivação constante, e principalmente pela tua presença incondicional. Nunca esquecerei. Muito obrigado.

## Resumo

A produção de resíduos sólidos é um dos problemas da humanidade. Com o crescimento urbano e da densidade populacional, a produção de resíduos passou a ser um problema de ordem ambiental. Esta dissertação é um estudo que tenta valorizar resíduos provenientes de veículos em fim de vida e da indústria dos moldes, introduzindo-os num novo ciclo produtivo, o dos materiais de fricção.

Este trabalho pretende compreender a influência relativa de aditivos metálicos (aços AISI 420 e H13) no comportamento tribológico de pastilhas de travagem, que são produzidas a partir de resíduos de fragmentação de veículos em fim de vida.

Diversas pastilhas de travagem com aditivos foram produzidas, testadas e avaliadas quanto ao seu coeficiente de atrito e taxa de desgaste. A inclusão das aparas metálicas na formulação das pastilhas de travagem não provocou variações significativas no seu coeficiente de atrito. Contudo, a presença dos aditivos contribuiu para um decréscimo da taxa de desgaste das pastilhas de travagem. A adição de aparas do aço AISI 420 conduziu, em média, a uma maior redução da taxa de desgaste, apesar de não apresentar uma relação linear entre o “teor de aditivo vs taxa de desgaste”. As pastilhas com aparas do aço AISI H13 demonstraram uma diminuição da taxa de desgaste com o aumento do teor de aditivo.

**Palavras-chave:** Veículos em Fim de Vida, Pastilhas de Travagem, Aparas, Taxa de desgaste, Coeficiente de atrito, Aço AISI 420, Aço AISI H13.

## Abstract

The production of solid residues it is one of the humanity problems. With the growing of urban areas and population density, the residue production has become an environmental problem. This dissertation is a study which tries to value residues from end-of-life vehicles and mold industry, introducing them in a new productive cycle, friction materials.

This work intends to understand the relative influence of metallic additives (AISI 420 and H13 Steels) in the tribological behavior of brake pads, which were produced from fragmentation residues of end-of-life vehicles.

Diverse brake pads with additives were manufactured, tested and evaluated with respect to friction coefficient and wear rate. The metallic chips inclusion in the brake pad formulation did not produce significant variations in the friction coefficient. However, the presence of additives contributed to the decrease of wear rate of the brake pads. The addition of AISI 420 steel chips lead to, in average, a higher reduction of wear rate, even though it did not present a linear relation between “additive content vs wear rate”. The brake pads with AISI H13 steel chips shown a decrease of wear rate with the increase of additive content.

**Keywords:** End-of-Life Vehicles, Brake Pads, Chips, Wear rate, Friction coefficient, AISI 420 Steel, AISI H13 Steel.

## Índice

Índice de Figuras .....	v
Índice de Tabelas .....	vi
Siglas .....	vii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA .....	3
2.1. Revisão bibliográfica .....	3
2.2. Gestão de veículos em fim de vida .....	6
3. CASO DE ESTUDO .....	8
3.1. Fragmentação dos veículos em fim de vida .....	8
3.2. Caracterização da mistura .....	9
3.2.1. Composição física dos resíduos de sucata .....	9
3.2.2. Evolução mássica da mistura base com a temperatura .....	10
3.3. Aparas de aço AISI 420 e de aço AISI H13 .....	12
3.4. Pastilhas de travagem de automóveis .....	13
4. METODOLOGIA .....	15
4.1. Preparação da matéria-prima .....	15
4.2. Processamento das pastilhas de travagem .....	16
4.3. Comparação das pastilhas de travagem .....	17
4.3.1. <i>Pin-on-disk</i> .....	17
4.3.2. <i>Friction Assessment Screening Test (FAST)</i> .....	19
5. RESULTADOS .....	21
5.1. Processamento das pastilhas de travagem .....	21
5.2. Variação do teor de resina .....	23
5.2.1. Coeficiente de atrito e desgaste .....	24
5.3. Variação do teor de aditivos .....	27
5.3.1. Coeficiente de atrito e desgaste .....	28
6. CONCLUSÕES .....	33
6.1. Sugestões para trabalhos futuros .....	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	35

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Difratoograma de Raios X da mistura base (Xavier, 2016). .....	9
Figura 3.2. Difratoograma de Raios X da mistura base (Vicente, 2016). .....	10
Figura 3.3. Análise Termogravimetria (Vicente, 2016). .....	11
Figura 3.4. Análise Termogravimetria da Resina (Xavier, 2016). .....	11
Figura 4.1. Moinho de esferas <i>Fritsch Pulverisette 6</i> . .....	16
Figura 4.2. Equipamento <i>Metkon Digipress</i> . .....	16
Figura 4.3. Duas pastilhas produzidas por conformação. ....	17
Figura 4.4. Esquema ilustrativo da técnica <i>pin-on-disk</i> (Yoshihara et al., 2008). ....	18
Figura 4.5. Equipamento <i>Pin-on-disk</i> . .....	19
Figura 4.6. Equipamento FAST. ....	20
Figura 5.1. Variação do coeficiente de atrito com o tempo. ....	22
Figura 5.2. Variação do peso de cada pastilha após o ensaio FAST. ....	23
Figura 5.3. Coeficiente de atrito ao longo do tempo ( <i>pin-on-disk</i> ) a temperaturas de 50°C (a), 100°C (b), 150°C (c) e 200°C (d). .....	25
Figura 5.4. Variação do coeficiente de atrito com o tempo. ....	26
Figura 5.5. Variação de peso de cada pastilha após FAST. ....	27
Figura 5.6. Coeficiente de atrito ao longo do tempo ( <i>pin-on-disk</i> ) a temperaturas de 50°C (a), 100°C (b), 150°C (c) e 200°C (d). .....	29
Figura 5.7. Valor médio do coeficiente de atrito em função da temperatura. ....	30
Figura 5.8. Variação do coeficiente de atrito com o tempo. ....	31
Figura 5.9. Variação de massa de cada pastilha provocada pelo ensaio FAST. ....	31

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química do aço AISI 420 (Matweb, 2016). .....	12
Tabela 3.2. Composição química do aço AISI H13 (Matweb, 2016). .....	12
Tabela 5.1. Parâmetros de conformação testados.....	21
Tabela 5.2. Parâmetros externos registados no ensaio de cada pastilha.....	22
Tabela 5.3. Composição das pastilhas com variação do teor de resina. ....	24
Tabela 5.4. Parâmetros externos registados para cada pastilha. ....	26
Tabela 5.5. Composição das pastilhas de travagem com aditivos.....	28

## **SIGLAS**

*AISI – American Iron and Steel Institute*

*APA – Agência Portuguesa do Ambiente*

*ASTM – American Society for Testing and Materials*

*DL – Decreto-Lei*

*DRX – Difração de Raios X*

*FAST – Friction Assessment Screening Test*

*SAE – Society of Automotive Engineers*

*TG – Termogravimetria*

*VFV – Veículos em Fim de Vida*

## 1. INTRODUÇÃO

A produção de resíduos sólidos é um dos problemas da humanidade. Com o crescimento urbano e a densidade populacional, a produção de resíduos passou a ser um problema de ordem ambiental. Em simultâneo, o aumento da população e do consumo de recursos têm consequentemente incrementado a produção de resíduos agravando assim o problema. A sociedade tem procurado melhorar e otimizar os métodos de gestão de resíduos privilegiando sempre a prevenção e a redução de resíduos, passando pela reutilização, reciclagem ou valorização energética, e como última alternativa a deposição em aterro. O objetivo é sempre diminuir os impactes ambientais da atividade humana.

A indústria automóvel tem acompanhado o aumento do consumo com o aumento de vendas, que consequentemente incrementam a produção de resíduos, assim que os veículos chegam ao seu final de vida útil. Devido ao grande volume que estes representam, a reutilização e reciclagem de resíduos são fundamentais neste setor. A reutilização consiste em utilizar novamente um produto para a mesma função ou para uma função distinta. A reciclagem consiste em transformar um resíduo numa matéria-prima para o fabrico de um novo produto.

A reciclagem de Veículos em Fim de Vida (VfV) tem evoluído ao longo dos anos e a taxa de reciclagem dos veículos tem acompanhado esse crescimento. Esta dissertação é um estudo que tenta valorizar resíduos provenientes da indústria automóvel, introduzindo-os num novo ciclo produtivo, que será o dos materiais de fricção, mais concretamente das pastilhas de travagem. O sistema de travagem é um dos elementos fundamentais de um veículo, visto que é responsável pela redução da velocidade, conferindo a devida segurança aos passageiros. É nele que se inserem as pastilhas de travagem que representam um dos elementos mais importantes para o dimensionamento do sistema.

Assim, pretende-se reaproveitar resíduos de baixo valor económico valorizando-os para produzir um produto de valor superior. A utilização eficiente de recursos e a diminuição de produção de resíduos decrescem os impactes ambientais associados à atividade humana. Então, além deste processo constituir um benefício ambiental também o é a nível económico e energético, pelo que apresenta várias vertentes motivadoras.

A presente dissertação tem como objetivo analisar a influência relativa de aditivos no comportamento tribológico de pastilhas de travagem produzidas a partir de resíduos de sucata. Os aditivos testados serão as aparas de aço AISI 420 e de aço AISI H13 provenientes da indústria dos moldes, onde são consideradas um subproduto de valor económico reduzido.

O trabalho está dividido em 4 capítulos, para além da introdução e conclusão. Inicialmente é exposto o enquadramento do problema, através da revisão do estado da arte da reciclagem de veículos em fim de vida e de estudos relacionados com pastilhas de travagem. No capítulo 3 é apresentado o caso de estudo onde é descrita a proveniência e características de todos os materiais utilizados ao longo do processo. No capítulo 4 e 5 é apresentada, respetivamente, a metodologia adotada e os principais resultados.

## 2. ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA

Neste capítulo é elaborada uma compilação de algumas publicações relativas a materiais de fricção, mais concretamente de pastilhas de travagem. Posteriormente é apresentado o método que, com base em legislação, é utilizado em Portugal para a gestão de veículos em fim de vida.

### 2.1. Revisão bibliográfica

Devido à emergente preocupação com os riscos ambientais e de saúde, gerados por muitos materiais que a sociedade explora massivamente, urge procurar soluções para substituir materiais perigosos por outros, que sem ameaçar o ambiente, desempenhem a mesma função com a mesma eficácia.

Assim, Uexküll et al. (2005) questionaram se o uso de antimónio (Sb) nas pastilhas de travagem era um componente cancerígeno. O trissulfureto de antimónio ( $Sb_2S_3$ ) é utilizado como lubrificante em materiais de fricção. Em testes de difração de Raios X verificaram a presença de antimónio, tanto nas pastilhas de travagem como em amostras de poeiras resultantes de desgaste de pastilhas. O risco da emissão de antimónio para a saúde depende do tamanho das partículas e da sua solubilidade, sendo que em alguns testes mostraram que grande parte das partículas de antimónio emitidas são inaláveis e o trissulfureto de antimónio pode oxidar durante o processo de travagem, dando origem ao composto trióxido de antimónio ( $Sb_2O_3$ ) que é cancerígeno para o ser humano. Os autores concluíram que o antimónio nas pastilhas de travagem deve ser retirado devido ao risco que representa para a saúde humana.

Já Liew e Nirmal (2013), com o objetivo de estudar as diferentes propriedades tribológicas de possíveis novos materiais para pastilhas de travagem, com e sem amianto, testaram-nas a diferentes velocidades e pressões. Produziram pastilhas com amianto e sem amianto, e compararam-nas com uma pastilha comercial, utilizando o tribómetro *pin-on-disk*. Os resultados mostraram que os coeficientes de atrito de todos os materiais eram insensíveis ao aumento da velocidade e da pressão. As pastilhas (com e sem amianto) mantiveram o coeficiente de atrito estável a temperaturas elevadas, mas as pastilhas sem amianto

---

demonstraram possuir maior resistência ao desgaste. Assim, consideraram que o material sem amianto apresentava potencial para o fabrico de pastilhas de travagem.

Devido às preocupações ambientais e de saúde provocadas pelo uso de cobre em pastilhas de travagem, Hu et al. (2016) estudaram a possibilidade de utilizar um composto metálico como substituinte do cobre e ligas de cobre nas pastilhas de travagem. Através de testes em dinamómetro à escala real, eles concluíram que há a possibilidade de utilizar compostos metálicos como substitutos de cobre, de forma a produzir pastilhas livres deste elemento, com boa resistência térmica e baixo desgaste disco/pastilha.

Tentando aliar a reciclagem com inovação, Idris et al. (2015) investigaram a produção de um novo tipo de pastilhas de travagem, onde substituíram as fibras de amianto e a resina fenólica por resíduos de cascas de banana como aglutinante. Testaram as pastilhas quanto à sua morfologia, propriedades físicas, mecânicas e taxa de desgaste. Concluíram que o incremento em peso da nova resina (à base de resíduos de cascas de banana) provocou o aumento da resistência à compressão, da dureza e da densidade específica das pastilhas, assim como a diminuição da sua taxa de desgaste. Os autores indicam que os resíduos de cascas de banana podem ser um substituto das fibras de amianto na produção de pastilhas de travagem.

Lagel et al. (2016) utilizaram matérias-primas de fontes biológicas (taninos condensados e álcool furfúrico) para fabricar uma resina, posteriormente utilizada no processamento de pastilhas de travagem de automóveis. As pastilhas de travagem, baseadas nesta “resina verde”, demonstraram boas propriedades de travagem e de resistência ao desgaste, assim como uma resistência mecânica idêntica à das pastilhas de travagem comerciais. Testadas em escala real, quando submetidas a uma forte travagem, as pastilhas inovadoras registaram uma distância de travagem igual ou inferior à das pastilhas comerciais.

Ramousse et al. (2001), com o objetivo de possibilitar o desenvolvimento de pastilhas de travagem estáveis a altas temperaturas, estudaram os processos de decomposição físico-química que ocorrem quando uma pastilha de travagem é aquecida a temperaturas superiores a 1000°C. Os autores determinaram as temperaturas nas quais os elementos ligantes se decompõem e o carvão, a grafite e o ferro oxidam.

Nagesh et al. (2014) fabricaram várias pastilhas de travagem variando a percentagem em peso dos elementos de composições já existentes e produziram também

---

novas formulações com outros materiais de fricção. Para o processamento das pastilhas utilizaram a pulverometalurgia e posteriormente, após uma análise microestrutural, avaliaram o coeficiente de atrito, dureza, resistência ao corte e desgaste. As pastilhas de travagem contendo materiais com dureza elevada apresentaram menor taxa de desgaste, mas registaram um maior ruído durante a travagem.

Österle et al. (2014) utilizaram um tribómetro *pin-on-disk* modificado para determinar as propriedades tribológicas dos constituintes típicos de pastilhas de travagem. Registaram que lubrificantes sólidos, como a grafite, afetam consideravelmente o atrito e o desgaste dos óxidos de ferro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), enquanto a adição de nanopartículas rígidas provocam apenas pequenas alterações. Também concluíram que o dissulfureto de molibdénio ( $\text{MoS}_2$ ) desempenha um papel duplo podendo, segundo condições especiais, aumentar ou diminuir o coeficiente de atrito.

Xavier (2016) tentou analisar se é possível reaproveitar os resíduos originados pela fragmentação de veículos em fim de vida, utilizando-os como matéria-prima para materiais de fricção. Produziu pastilhas de travagem e usou como termo de comparação pastilhas de travagem comerciais. Concluiu que os resíduos da fragmentação de veículos em fim de vida têm potencial para fazerem parte da formulação de pastilhas de travagem, apesar de apresentarem um défice de estabilidade do atrito a temperaturas elevadas.

Usando como base o estudo do autor anterior, Vicente (2016) avaliou a influência do papel de aditivos específicos no comportamento tribológico de pastilhas de travão baseadas em sucata metálica não ferrosa. O aditivo utilizado foi a grafite obtida por reciclagem de eléctrodos de grafite usados em electroerosão (EDM). Os valores do coeficiente de atrito, da força de atrito e da taxa de desgaste das pastilhas, permitiram concluir que a adição de grafite aos resíduos metálicos não induz grandes variações no desempenho da pastilha de travagem no que concerne o seu coeficiente de atrito. No entanto, este aditivo alterou substancialmente a temperatura de atrito entre a pastilha de travagem e o disco. Com o aumento da presença do lubrificante sólido, foi registado um decréscimo significativo do desgaste.

O presente estudo pretende dar continuação ao trabalho realizado por Xavier (2016) utilizando resíduos provenientes da fragmentação de veículos em fim de vida como base de formulação de materiais de fricção. Na mistura base serão integrados outros materiais de forma a otimizar e viabilizar a sua utilização para a produção de pastilhas de

travagem. Os aditivos a testar serão aparas de acabamento de alta velocidade dos aços AISI 420 e AISI H13, com a intenção de aumentar a resistência ao desgaste e estabilidade a altas temperaturas.

## 2.2. Gestão de veículos em fim de vida

Veículos em fim de vida são genericamente considerados os que já não apresentam condições para circular por qualquer motivo, como acidente, avaria ou mau estado, e por isso chegaram ao fim da sua vida útil, passando a ser considerados resíduo (IMT, 2016).

Em Portugal os veículos em fim de vida são considerados um fluxo de resíduos especiais e por isso estão abrangidos por legislação específica. O Decreto-Lei n.º 196/2003, de 23 de Agosto, transpõe para a ordem jurídica nacional a Diretiva n.º 2000/53/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 18 de Setembro, e define as normas de gestão para criar circuitos de receção de VFV, o seu transporte, armazenamento e tratamento. Em seguida, estes resíduos especiais devem ir para reutilização, reciclagem ou outras formas de valorização, evitando, sempre que possível, medidas de eliminação como a deposição em aterro (APA, 2016).

Assim o Decreto-Lei n.º 196/2003, no artigo 2º, define algumas operações para uma adequada gestão de VFV, sendo importante referir as seguintes:

- **Centro de receção:** “a instalação destinada à receção e à armazenagem temporária de VFV, com o objetivo do seu posterior encaminhamento para desmantelamento”.
- **Desmantelamento:** “a operação de remoção e separação dos componentes de VFV, com vista à sua despoluição e à reutilização, valorização ou eliminação dos materiais que os constituem”.
- **Fragmentação:** “a operação de corte e ou retalhamento de VFV”.
- **Reciclagem:** “reprocessamento, no âmbito de um processo de produção, de materiais resultantes de VFV para o fim para que foram concebidos ou para outros fins, com exclusão da valorização energética”.
- **Reutilização:** “qualquer operação através da qual os componentes de VFV sejam utilizados para o mesmo fim para que foram concebidos”.

O Decreto-Lei n.º 196/2003, no seu artigo 5º, responsabiliza os proprietários e ou detentores de VFV pelo seu encaminhamento para um centro de receção ou para um operador de desmantelamento. Os fabricantes ou importadores de veículos são responsáveis por assegurar a receção de VFV nos centros de receção e nos operadores de desmantelamento. Os operadores passam a ser responsáveis por adotar medidas que privilegiem a reutilização dos componentes reutilizáveis e a valorização dos não passíveis de reutilização, com preferência pela reciclagem.

Todo o processo tem como objetivo a prevenção da produção de resíduos provenientes de veículos, o recurso a sistemas de reutilização, de reciclagem e a outras formas de valorização, com vista a reduzir a quantidade e a perigosidade dos resíduos a eliminar.

Em Portugal a gestão dos VFV é efetuada através de um sistema integrado. Neste sistema a responsabilidade dos fabricantes ou importadores de veículos pela gestão dos VFV é transferida para uma entidade gestora do sistema integrado, desde que se encontre devidamente licenciada para as funções. A entidade gestora do sistema integrado deve ser uma pessoa coletiva, sem fins lucrativos, sendo os seus resultados contabilísticos obrigatoriamente reinvestidos ou utilizados na sua atividade ou atividades conexas.

Para responder às exigências da legislação comunitária e nacional sobre gestão de VFV foi criada a Valorcar – Sociedade de Gestão de Veículos em Fim de Vida, Lda. A Valorcar é uma entidade privada, sem fins lucrativos, cujo capital social pertence em 95% à Associação Automóvel de Portugal (ACAP) e em 5% à Associação das Empresas Portuguesas para o Sector do Ambiente (AEPSA), tem como missão organizar a receção, o tratamento e a valorização dos VFV promovendo a melhoria do desempenho ambiental, económico e social da sua gestão em Portugal. Para o efeito, a Valorcar tem implementado um Sistema Integrado de Gestão de Veículos em Fim de Vida (SIGVFV) disponibilizando aos produtores ou importadores a possibilidade de cumprir com as suas obrigações e responsabilidades através de um sistema coletivo (Valorcar, 2016).

O principal objetivo da Valorcar é o de contribuir para que os objetivos nacionais de gestão de VFV e de Baterias de Veículos Usadas (BVU) sejam alcançados. Para tal, organizou uma rede de 87 centros de abate (Rede Valorcar), onde os proprietários/detentores de VFV e de BVU os podem entregar gratuitamente (Valorcar, 2015).

### 3. CASO DE ESTUDO

A presente dissertação tem como objetivo compreender a influência de aditivos metálicos (aparas de aço) no comportamento tribológico de pastilhas de travagem, que têm como matéria-prima resíduos de fragmentação de veículos em fim de vida.

Neste capítulo, inicialmente será exposto o processo de fragmentação de VFV que originará a matéria-prima para a mistura base das pastilhas de travagem a produzir. Para além da caracterização dos aditivos selecionados para o estudo, a mistura será analisada no que concerne a sua composição física e comportamento tribológico com o aumento de temperatura. Por fim, é abordada a temática das pastilhas de travagem.

#### 3.1. Fragmentação dos veículos em fim de vida

Após a receção dos veículos em fim de vida nos centros de abate, os veículos passam por processos de despoluição e desmantelamento originando as denominadas carcaças. As carcaças são enviadas para fragmentação onde são trituradas em pequenos pedaços por grandes moinhos de martelos.

Durante a trituração, as partículas de materiais de menor densidade e dimensão (espumas, terras, têxteis, borrachas, etc.) são aspiradas e separadas, dando origem aos resíduos leves de fragmentação.

De seguida, um eletroímã extrai os metais ferrosos que passam ainda por uma triagem manual para remover alguns materiais contaminantes. Os restantes materiais formam uma mistura a que se chama “fração pesada”, constituída por metais não ferrosos (cobre, alumínio, magnésio, etc.) e fragmentos de maior dimensão de plástico, borracha, madeira e outros.

A “fração pesada” é posteriormente submetida a diversos métodos de triagem que separam os metais não ferrosos dos restantes materiais que passam então a chamar-se “resíduos pesados de fragmentação”.

Os metais ferrosos e não ferrosos geralmente são fundidos em siderurgias e fundições enquanto os resíduos de fragmentação são depositados em aterro ou valorizados energeticamente através de coíncineração em fornos de cimento (Valorcar, 2015).

## 3.2. Caracterização da mistura

No presente estudo, a base de formulação das pastilhas de travagem são resíduos provenientes essencialmente da fração metálica não ferrosa da fragmentação de VFV. Os resíduos foram recolhidos de forma aleatória e devido à sua heterogeneidade foram caracterizados, sendo expectável a presença de materiais típicos da fração resultante (ligas de alumínio e de magnésio, cobre, ligas de cobre, chumbo).

Através da técnica de difração de Raios X (DRX), foram identificadas as fases cristalinas presentes no pó resultante da moagem da mistura base. A técnica de termogravimetria (TG) foi utilizada para conhecer a evolução mássica da mistura com a variação da temperatura.

### 3.2.1. Composição física dos resíduos de sucata

Utilizando técnica de difração de Raios X (DRX), Xavier (2016) identificou as fases presentes no pó resultante da moagem da mistura base. Analisando o difratograma, (Figura 3.1) o autor identificou a presença de fases cristalinas de cobre, alumínio, calcite e quartzo.

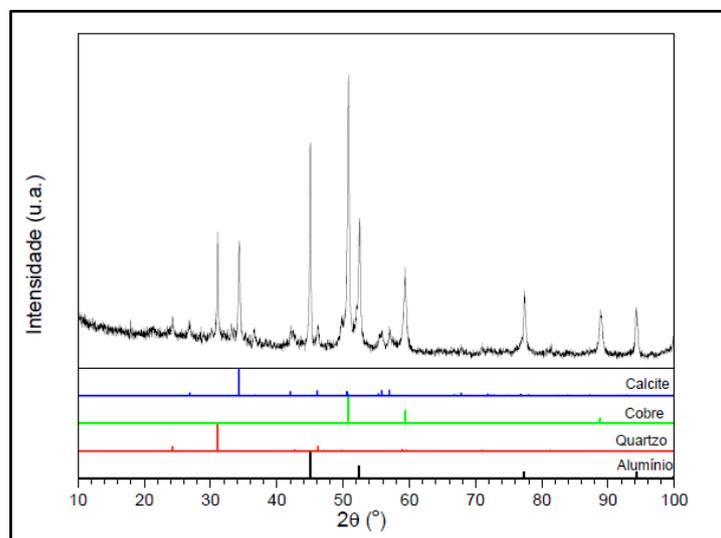


Figura 3.1. Difratograma de Raios X da mistura base (Xavier, 2016).

Mais tarde, Vicente (2016), noutra recolha de resíduos de sucata e através da mesma técnica (Figura 3.2), confirmou qualitativamente uma analogia clara com os resíduos recolhidos por Xavier (2016).

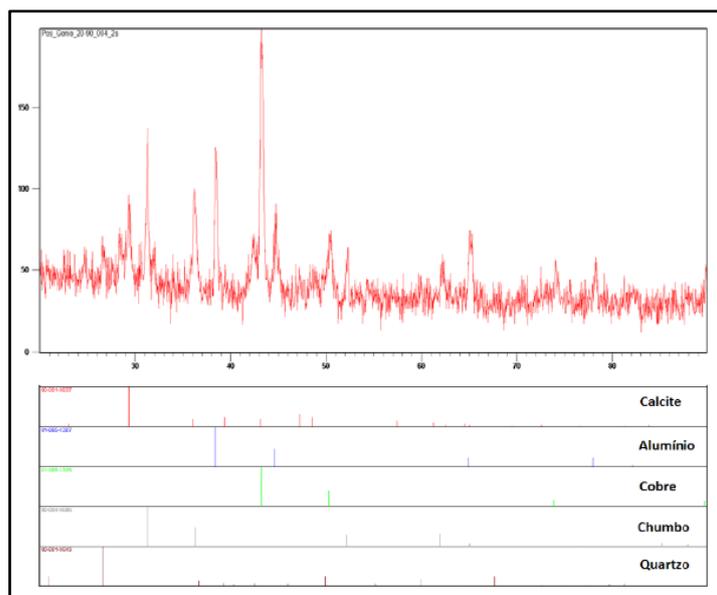


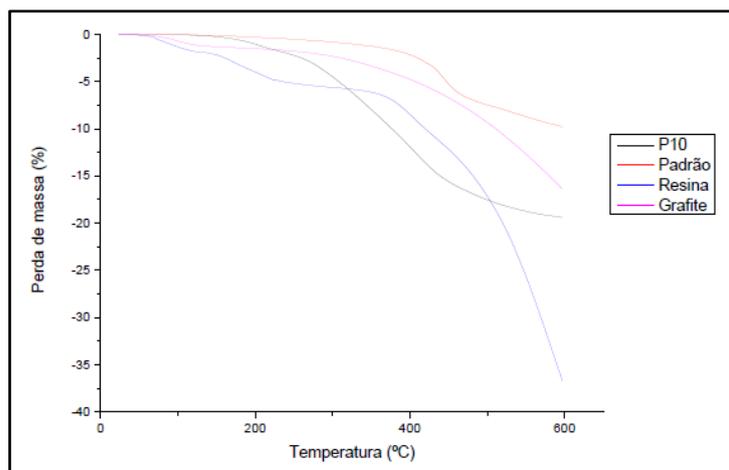
Figura 3.2. Difratoograma de Raios X da mistura base (Vicente, 2016).

### 3.2.2. Evolução mássica da mistura base com a temperatura

Com base na técnica de termogravimetria foi possível estudar a variação mássica da mistura base (fração de resíduos com resina) com o aumento da temperatura.

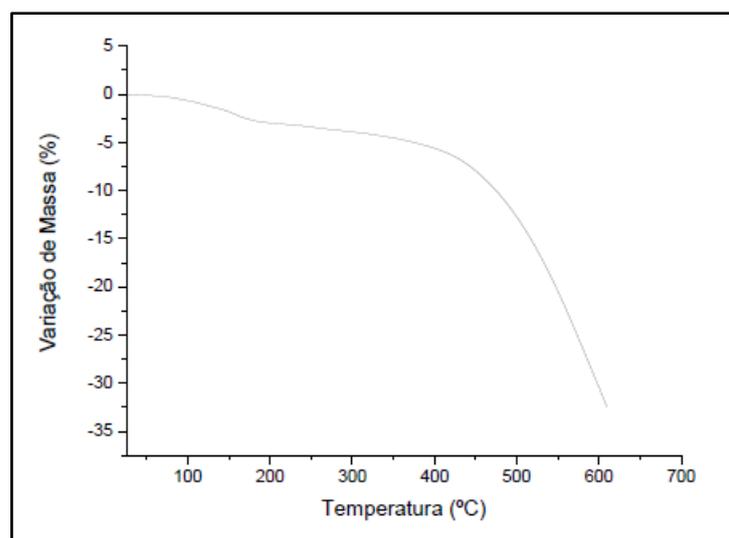
Xavier (2016) mostrou que a mistura perde cerca de 1% de massa até aos 100°C devido essencialmente à vaporização de água. A partir de 150°C há uma perda significativa de massa associada à degradação de matéria orgânica presente na mistura. Entre os 150°C e os 400°C foi registada uma perda de aproximadamente 20% de massa, que pode justificar-se pelo facto de grande parte da mistura ser constituída por matéria orgânica. A partir dos 800°C foi registado um aumento de massa devido à oxidação dos elementos metálicos presentes, como o alumínio.

Por seu turno, Vicente (2016), também através do método de termogravimetria, concluiu que até aos 200°C a mistura perdeu cerca de 2,5% de massa, possivelmente devido à matéria orgânica e água nela contida, e a partir dos 300°C também registou um decréscimo abrupto de massa de aproximadamente 20% (Figura 3.3).



**Figura 3.3.** Análise Termogravimetria (Vicente, 2016).

Quanto à resina, Xavier (2016), mostrou que esta não apresentava grande variação de massa (5%) até aos 400°C, mas entre os 400°C e os 600°C a resina tinha uma perda de massa de cerca de 30%, correspondendo ao início da sua degradação (Figura 3.4). Vicente (2016) também detetou cerca de 5% de variação de massa de resina até aos 250°C, e a partir dos 400°C atestou um decréscimo acentuado de resina atingindo no final do ensaio uma perda de aproximadamente 40%. Este mesmo autor também estudou uma pastilha padrão (comercializada) que apresentava uma perda de massa de cerca de 10% entre os 400°C e os 600°C.



**Figura 3.4.** Análise Termogravimetria da Resina (Xavier, 2016).

Esta informação acerca da variação de massa da mistura com o aumento da temperatura é fundamental para o processamento das pastilhas de travagem. Também é importante para entender o seu comportamento mecânico, durante utilização das pastilhas,

visto que durante as travagens a energia cinética é transformada em energia térmica que é dissipada sob a forma de calor.

### 3.3. Aparas de aço AISI 420 e de aço AISI H13

“Os resíduos industriais são um enorme problema para as empresas, e a indústria dos moldes não é exceção. Esta indústria na sua maioria utiliza tecnologias subtrativas, que produzem quantidades elevadas de resíduos (aparas metálicas) que são vendidas ao desbarato para serem refundidas. No entanto, este resíduo pode ser considerado um “minério de ferro com uma taxa de oxidação limitada à superfície”, não necessitando de ser novamente reprocessado por processos siderúrgicos” (Vieira, 2015).

Os resíduos utilizados como aditivos no presente estudo foram as seguintes aparas de ligas ferrosas, resultantes de acabamento a alta velocidade:

- Aço inoxidável martensítico AISI-SAE 420 (M333).
- Aço ferramenta de trabalho a quente AISI-SAE H13 (1.2344) temperado.

A escolha recaiu sobre estes aços por serem de ampla utilização na indústria dos moldes, onde são geradas elevadas quantidades de um subproduto (apara metálica) de baixo valor económico que pode ser valorizado. Assim, é possível valorizar resíduos produzidos introduzindo-os num novo ciclo produtivo. Estes dois aços têm diferentes elementos de liga (Tabela 3.1 e Tabela 3.2) e diferentes propriedades.

**Tabela 3.1.** Composição química do aço AISI 420 (Matweb, 2016).

Elemento	C	Si	Mn	Cr	P	S	Fe
% pd	≥ 0,15	≤ 1,0	≤ 1,0	13,0	≤ 0,04	≤ 0,03	restante

**Tabela 3.2.** Composição química do aço AISI H13 (Matweb, 2016).

Elemento	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Fe
% pd	0,32 - 0,45	1,0	1,0	5,13 - 5,25	1,33 - 1,40	0,80 - 1,20	restante

As aparas dos aços mencionados são materiais com características técnicas e económicas de elevada potencialidade. A elevada dureza, resistência a altas temperaturas e ao desgaste são características, apresentadas pelos aços selecionados, interessantes para a aplicação em pastilhas de travagem.

Com a adição de aparas na formulação das pastilhas de travagem é esperado um aumento da resistência estrutural das pastilhas, conferindo-lhes uma maior resistência ao desgaste e a altas temperaturas.

### 3.4. Pastilhas de travagem de automóveis

O sistema de travagem é um elemento fundamental de qualquer veículo, visto que é responsável pela redução da velocidade. Nesse sistema de travagem um dos componentes mais importantes é a pastilha de travagem que, juntamente com o disco de travagem, formam um par de atrito com características tribológicas que concedem o atrito necessário para a desaceleração do veículo.

Durante a travagem, a energia cinética da velocidade e massa do veículo, é transformada em energia térmica. Este calor gerado na interface de fricção é idealmente dissipado pela pastilha e pelo disco de travagem (Blau, 2001).

De forma a ser possível obter um material com características ideais, as pastilhas de travagem são constituídas por diversos materiais. Cada tipo de material tende a desempenhar uma função, e dependendo das percentagens de cada um, as características das pastilhas podem variar (Xavier, 2016; Neis, 2008; e Chan, 2004):

- **Materiais estruturais:** conferem resistência mecânica à pastilha; normalmente são utilizadas fibras de carbono, vidro e metálicas, etc.
- **Modificadores de atrito:** os lubrificantes conferem a estabilidade do coeficiente de atrito e o controlo da taxa de desgaste da pastilha, principalmente para as elevadas temperaturas decorrentes de travagem. Também reduzem o ruído e a vibração provocada na interface da fricção (pastilha/disco). Os abrasivos aumentam o coeficiente de atrito e ajudam a remover camadas de óxidos de ferro que já existem ou se formam na superfície do disco.
- **Carga:** melhora a resistência e a dissipação térmica da pastilha. É um material incorporado para preencher os espaços e reduzir os custos de produção. São frequentemente materiais metálicos, cerâmicos ou materiais orgânicos. Podem também ser adicionados componentes à base de borracha para melhorar as propriedades de amortecimento e reduzir as vibrações

- **Ligantes:** mantêm a integridade estrutural da pastilha quando sujeita a tensões mecânicas e térmicas.

Quanto à sua classificação, as pastilhas de travagem são ordenadas consoante os materiais que as compõem e na literatura encontram-se várias classificações diferentes, dependendo dos autores. Segundo a Coperol (empresa distribuidora de pastilhas de travagem em Portugal), as pastilhas de travagem podem ser divididas em quatro tipos: orgânicas, sintéticas, semimetálicas e metálicas (Xavier, 2016).

No presente estudo serão utilizadas e produzidas pastilhas de travagem orgânicas, visto que os resíduos provenientes da fragmentação dos VFV, para além das fases cristalinas anteriormente identificadas (Figura 3.1 e Figura 3.2), apresentam um elevado teor de materiais orgânicos.

Elementos metálicos como o alumínio e cobre, identificados na fração de resíduos, têm um papel importante nos materiais de fricção. Normalmente são adicionados à composição das pastilhas de travagem sob a forma de fibras; a morfologia e a dureza dos elementos metálicos podem afetar o atrito e o desgaste das pastilhas de travagem (Jang et al, 2004).

O cobre e as suas ligas são muito usados na indústria dos materiais de atrito para manter o coeficiente de atrito a elevadas temperaturas. Isto deve-se ao facto do cobre aumentar a condutividade térmica das pastilhas de travagem, incrementando a resistência ao *fade*. (Xavier, 2016). O *fade* é o termo utilizado para a perda de eficiência de travagem com o aumento da temperatura, ou seja, ocorre quando o sobreaquecimento provoca uma redução abrupta do coeficiente de atrito.

Assim, a adição de cobre permite combater os fenómenos de *fade*, visto que ao aumentar a condutividade térmica da pastilha, a energia térmica gerada na interface de atrito sob a forma de calor será mais facilmente dissipada. Esta adição deve ser feita de forma controlada, evitando que o calor se possa expandir a todo o sistema através dos suportes das pastilhas.

Cada vez que o travão é ativado, promovendo o contacto entre o par pastilha/disco, regista-se desgaste em ambos os corpos. A taxa de desgaste, além de depender do tipo de materiais do par corpo/contracopo, é influenciada também pela temperatura gerada, pelo tempo de travagem e força aplicada.

## 4. METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos todos os procedimentos e técnicas experimentais utilizadas no decorrer do estudo. Após efetuar a recolha dos resíduos de sucata resultantes da fragmentação de VFV, a metodologia deste trabalho divide-se em duas partes principais. Inicialmente efetua-se o processamento das pastilhas, e posteriormente verifica-se o comportamento tribológico das pastilhas de travagem (coeficiente de atrito e desgaste).

Tendo em conta que todos os equipamentos têm calibração independente e os resultados dependem da atividade do operador, as diferentes pastilhas foram ensaiadas sempre nos mesmos equipamentos e em iguais condições, apenas ficando sujeitas a possíveis pequenas alterações da temperatura ambiente e humidade relativa.

### 4.1. Preparação da matéria-prima

A obtenção da mistura base é resultante da transformação de uma fração de resíduos de sucata provenientes da fragmentação de VFV. Essa transformação é essencialmente o resultado de um processo de moagem.

A moagem dos resíduos resultantes da fragmentação de VFV foi realizada utilizando um moinho de esferas *Fritsch Pulverisette 6* (Figura 4.1).

Estes resíduos de VFV foram submetidos a uma moagem com a duração de 90 minutos (4 ciclos de 15 minutos com intervalos de 10 minutos, sendo o sentido de rotação alternado entre cada ciclo) a uma velocidade de 300 rotações por minuto (rpm). Posteriormente foram peneirados num crivo de 100 mesh para a remoção das aparas grosseiras.



Figura 4.1. Moinho de esferas *Fritsch Pulverisette 6*.

## 4.2. Processamento das pastilhas de travagem

Para o processamento das pastilhas de travagem foi utilizado o equipamento *Metkon Digipress* (Figura 4.2). Este equipamento permite processar materiais através de uma prensagem com temperatura controlada (conformação).

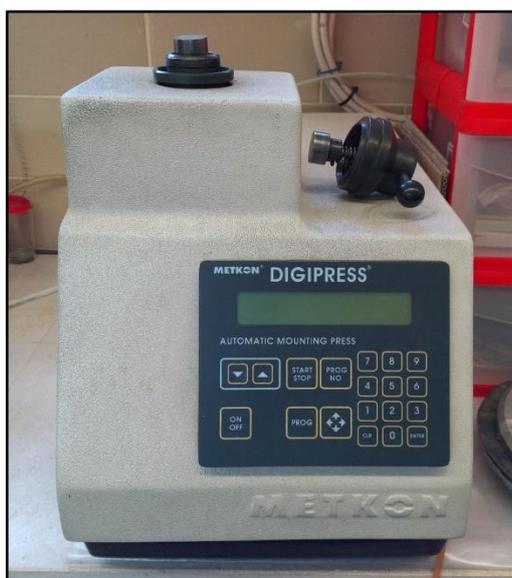


Figura 4.2. Equipamento *Metkon Digipress*.

Inicialmente foi misturada a resina e os pós produzidos na fase da moagem. A mistura foi homogeneizada utilizando um moinho de esferas *Fritsch Pulverisette 6* (Figura 4.1), durante 5 minutos a 300 rpm.

Com a mistura base foram produzidas várias pastilhas de travagem com diferentes condições de pressão e temperatura. Para além disso foram produzidas pastilhas com percentagens de resina diferentes. Todas elas foram produzidas no mesmo molde com uma secção de 196 mm<sup>2</sup> (14 mm × 14 mm) e uma altura aproximada de 5 mm. É possível observar duas das pastilhas processadas na Figura 4.3.



Figura 4.3. Duas pastilhas produzidas por conformação.

### 4.3. Comparação das pastilhas de travagem

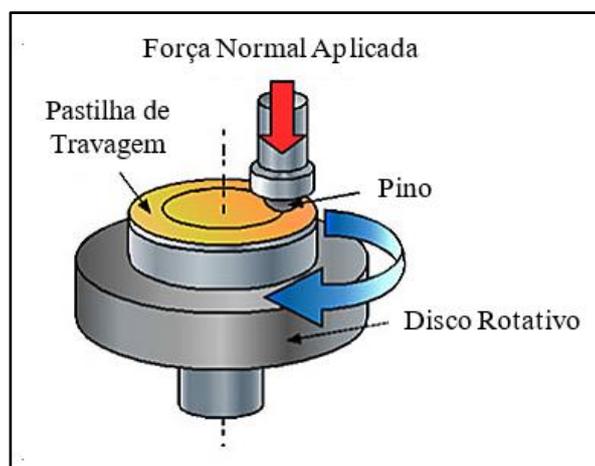
As pastilhas de travagem são principalmente avaliadas pelo seu comportamento tribológico. Estas foram submetidas a ensaios para comparar o seu comportamento em termos de desgaste e coeficiente de atrito. Todas as pastilhas de travagem produzidas foram submetidas às técnicas de estudo posteriormente descritas, assim como, uma pastilha de travagem Padrão (existente no mercado) e uma pastilha produzida a partir da mistura base utilizada no estudo de Xavier (2016).

#### 4.3.1. *Pin-on-disk*

A técnica *pin-on-disk* é um teste utilizado para compreender o comportamento tribológico dos materiais e é definida pela norma ASTM G99-05. A técnica permite analisar

o coeficiente de atrito e o desgaste entre duas superfícies sujeitas a fricção, sendo possível variar parâmetros como a velocidade, a carga aplicada ou a temperatura.

O sistema consiste num pino estacionário, que sob a influência de uma carga aplicada, exerce força sobre um disco rotativo onde é fixado o material a estudar. O material em estudo, em movimento rotacional, em contacto com o pino provoca desgaste dos materiais devido ao atrito. É possível medir a resistência à força e posteriormente estimar o coeficiente de atrito.



**Figura 4.4.** Esquema ilustrativo da técnica *pin-on-disk* (Yoshihara et al., 2008).

Para avaliação e controlo de qualidade de materiais de fricção está estabelecida a norma SAE J661. Esta norma indica que a pressão vertical aplicada sobre o pino deve ser de  $1 \text{ N/mm}^2$  e os ensaios respeitaram este parâmetro. Também refere que o disco (onde neste caso está fixa a pastilha travagem) deve rodar a uma velocidade de 6 m/s. O equipamento utilizado não permite atingir uma velocidade do disco de 6 m/s, sendo que os ensaios foram realizados a uma velocidade de aproximadamente 0,15 m/s (velocidade máxima permitida pelo equipamento).

De forma a respeitar a norma, antes de cada ensaio foi medida a área de contacto entre o pino e a pastilha de travagem. A área de contacto considerada foi a área de desgaste do pino antes do ensaio, medida através de microscópio ótico.

Tendo em conta que o coeficiente de atrito depende do par de materiais a estudar, o pino utilizado para na técnica *pin-on-disk* foi produzido a partir da maquinagem de um disco de travagem comercial (ferro fundido cinzento).

As pastilhas de travagem foram testadas a temperaturas de 50°C, 100°C, 150°C e 200°C, com ensaios de aproximadamente 20 minutos de duração, tempo selecionado de modo a garantir que a temperatura de ensaio fosse uniforme.

Na Figura 4.5 está fotografado o equipamento *pin-on-disk* utilizado, onde 1 é a célula de carga responsável pela medição da força de atrito, 2 é o termopar utilizado para monitorizar a temperatura durante o ensaio, 3 é a célula de carga da força normal e 4 são as pistolas de aquecimento responsáveis por fornecer calor ao sistema.



Figura 4.5. Equipamento *Pin-on-disk*.

#### 4.3.2. *Friction Assessment Screening Test (FAST)*

Para avaliar e caracterizar o desempenho em termos de desgaste dos materiais de fricção foi utilizado o tribómetro *Friction Assessment Screening Test (FAST)*, modelo *Greening 1120*. Este equipamento foi desenvolvido pela Ford Motor e tenta simular um processo real de um sistema de travagem. Ao contrário da técnica *pin-on-disk*, no FAST, o disco de travagem tem movimento de rotação a velocidade constante enquanto a pastilha de travagem está fixa. Este equipamento permite realizar dois tipos de ensaios básicos: ensaios a força normal constante e ensaios a força de atrito constante.

Foram realizados, para todas as pastilhas de travagem, ensaios em modo de pressão aplicada constante (200 kPa), tiveram a duração de 40 minutos e foi medida a pressão de atrito de 2 em 2 minutos com recurso aos manómetros de pressão hidráulica. A velocidade de rotação do disco de travagem foi fixada pelo equipamento sendo de 6,8 m/s.

O coeficiente de atrito foi obtido em função do fator de geometria do equipamento fornecido pelos fabricantes, recorrendo à equação 4.1 (Greening),

$$\text{Coeficiente de atrito} = 0,193 \times \frac{\text{Pressão de atrito}}{\text{Pressão de carga}} \quad (4.1)$$

onde, 0,193 é o fator de geometria do equipamento, sendo as pressões de atrito e de carga expressas em psi.

O desgaste sofrido pelas pastilhas de travagem foi obtido através da diferença de massa causada pelo ensaio efetuado e para isso foi medida a massa de cada pastilha antes e imediatamente após cada teste.

Na Figura 4.6 está representado o equipamento FAST utilizado, onde 1 é a válvula de controlo da pressão aplicada (para ensaios de força de atrito constante), 2 a válvula de controlo da pressão normal aplicada, 3 o braço de suporte da pastilha de travagem, 4 o disco de fricção (ferro fundido cinzento), 5 o manómetro da pressão de fricção, 6 o manómetro da pressão normal e 7 o controlador de corrente elétrica.

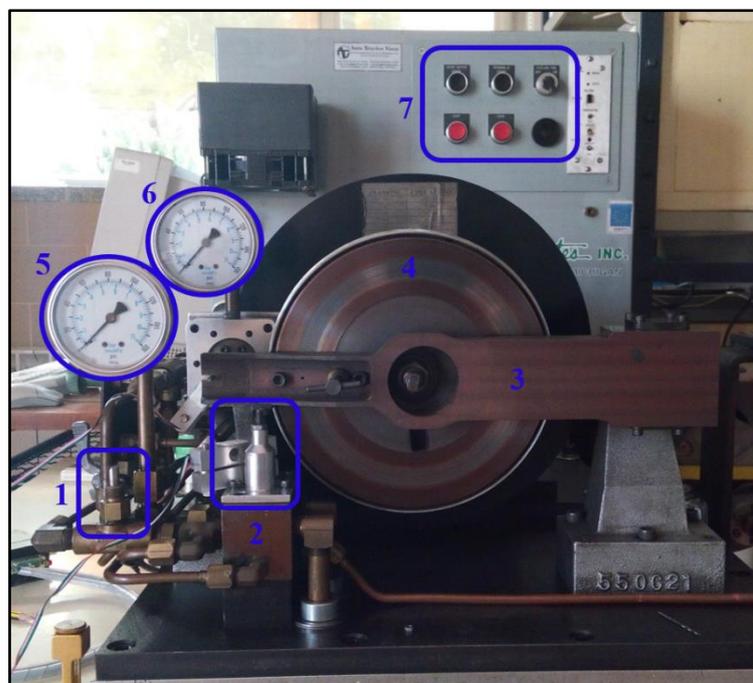


Figura 4.6. Equipamento FAST.

## 5. RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados do estudo realizado. Inicialmente são expostos os relativos à otimização do processo de conformação e ao teor de resina a usar para a produção das pastilhas de travagem. De seguida é descrito o comportamento tribológico de pastilhas com diferentes teores de aditivos.

### 5.1. Processamento das pastilhas de travagem

Para estabelecer as condições de conformação padrão, foram produzidas diferentes pastilhas de travagem variando a pressão e temperatura de processamento (Tabela 5.1). Para avaliar os efeitos relativos dos parâmetros de conformação foi fixada a composição das pastilhas em que o teor de resina era de 5%.

**Tabela 5.1.** Parâmetros de conformação testados.

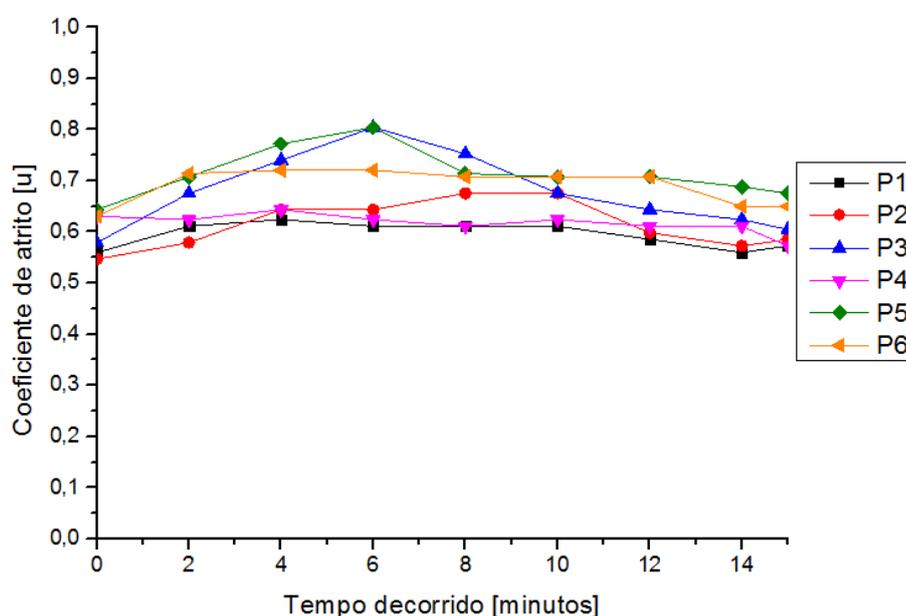
PASTILHA (5% resina)	PARÂMETROS DE CONFORMAÇÃO	
	Pressão (kPa)	Temperatura (°C)
<b>P1</b>	20 000	180
<b>P2</b>	20 000	210
<b>P3</b>	20 000	150
<b>P4</b>	15 000	180
<b>P5</b>	15 000	150
<b>P6</b>	15 000	210

Para testar as condições de conformação das pastilhas produzidas foi utilizado apenas o equipamento FAST. Nos diferentes ensaios não se registaram significativas variações da temperatura ambiente e da humidade relativa, pelo que se considera que estes fatores externos não influenciaram os resultados (Tabela 5.2).

**Tabela 5.2.** Parâmetros externos registados no ensaio de cada pastilha.

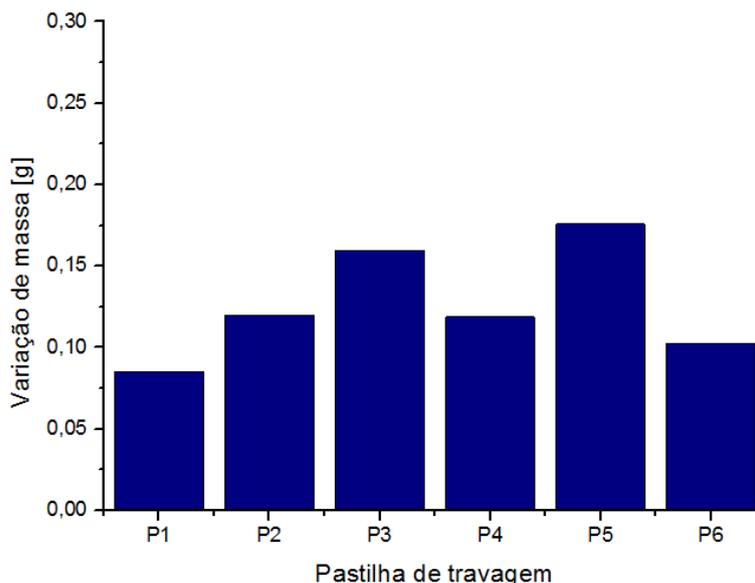
PARÂMETROS EXTERNOS	PASTILHA					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Temperatura (°C)	19	21	21	20	21	22
Humidade relativa (%)	50	50	58	44	40	39

Em relação ao coeficiente de atrito, a Figura 5.1 apresenta os valores do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio, após os testes no FAST.

**Figura 5.1.** Variação do coeficiente de atrito com o tempo.

As pastilhas P3 e P5 destacam-se no período inicial pelos valores de coeficiente de atrito serem aproximadamente 0,8. Apesar disso, com o decorrer do ensaio e aumento da temperatura, os coeficientes de atrito destas pastilhas decrescem para valores de aproximadamente 0,65, próximos das restantes pastilhas. Estas variações de coeficiente de atrito demonstram a pouca estabilidade do material, o que não é benéfico. As restantes pastilhas de travagem (P1, P2, P4 e P6), embora não tenham registado valores de coeficientes de atrito tão elevados como a P3 e P5, demonstraram maior estabilidade e uma gama de valores aceitáveis para o pretendido.

O comportamento ao desgaste, avaliado pela variação de massa da pastilha provocada pelo ensaio FAST, está patente na Figura 5.2.



**Figura 5.2.** Variação do peso de cada pastilha após o ensaio FAST.

As pastilhas P3 e P5 destacam-se por maior taxa de desgaste. Entre as restantes pastilhas (P1, P2, P4 e P6), a pastilha de travagem P1 é que a apresenta melhor desempenho.

Analisando os resultados, as pastilhas P3 e P5 são as que apresentam valores menos adequados. Estes podem estar associados ao facto de serem as duas pastilhas com temperatura de processamento mais baixa (150°C). Esta temperatura pode não ser suficiente para atingir o ponto de amolecimento da resina (aproximadamente 150°C, (Figura 3.3 e Figura 3.4)), não garantindo uma correta agregação do material.

A pastilha P1 é a que revela maior estabilidade do coeficiente de atrito e menor taxa de desgaste. Assim, os seus parâmetros de conformação (20 000 kPa, 180°C) foram os seleccionados para o processamento das pastilhas no decorrer do estudo. A pastilha P1 apresenta um valor de temperatura de processamento mais baixo que as pastilhas P2 e P6. Este é um ponto a seu favor na medida em que permite reduzir a energia e os custos durante o seu processamento.

Após esta otimização dos parâmetros de conformação das pastilhas, o estudo prosseguiu com a análise do efeito da variação do teor de resina nas pastilhas.

## 5.2. Variação do teor de resina

Para a otimização do teor de resina a utilizar na produção das pastilhas de travagem, foram processadas pastilhas com diferentes percentagens deste polímero (Tabela

5.3). Para testar as pastilhas produzidas nesta fase recorreu-se ao tribómetro *pin-on-disk* e FAST. Para efeito de comparação de resultados, também foram realizados ensaios para uma pastilha padrão (existente no mercado) e para uma pastilha processada com outra resina (Xavier, 2016).

**Tabela 5.3.** Composição das pastilhas com variação do teor de resina.

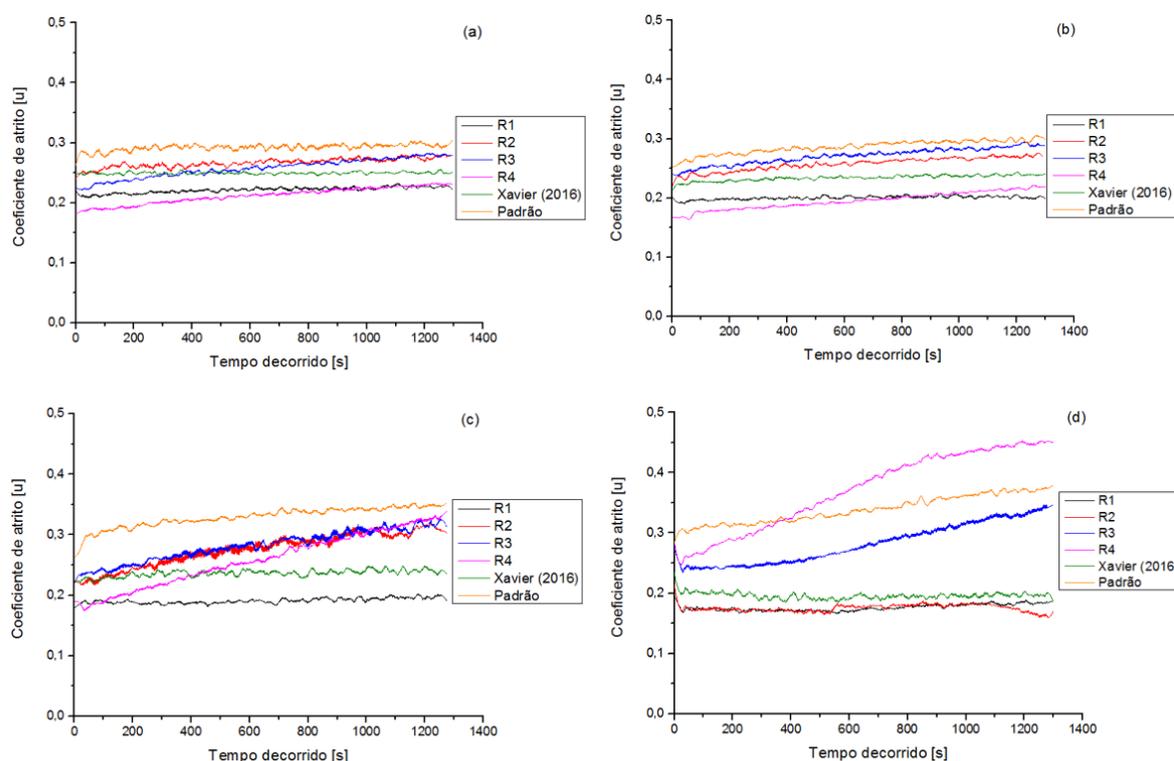
<b>COMPOSIÇÃO DAS PASTILHAS</b>		
<b>Pastilha</b>	<b>Sucata (%)</b>	<b>Resina (%)</b>
<b>R1</b>	97,5	2,5
<b>R2</b>	95,0	5,0
<b>R3</b>	82,5	7,5
<b>R4</b>	90,0	10,0

### **5.2.1. Coeficiente de atrito e desgaste**

#### **5.2.1.1. *Pin-on-disk***

Com o objetivo de estudar o coeficiente de atrito das várias pastilhas a diferentes temperaturas, recorreu-se inicialmente a ensaios *pin-on-disk*.

Os gráficos (a), (b), (c) e (d) registam os resultados de ensaios a temperaturas de 50°C, 100°C, 150°C e 200°C, respetivamente.



**Figura 5.3.** Coeficiente de atrito ao longo do tempo (*pin-on-disk*) a temperaturas de 50°C (a), 100°C (b), 150°C (c) e 200°C (d).

Dos resultados pode constatar-se que a temperaturas baixas (50°C e 100°C) os coeficientes de atrito de todas as pastilhas apresentam um comportamento similar, menor do que o da pastilha Padrão, mas todas têm um comportamento estável ao longo do tempo.

Para temperaturas da ordem de 150°C e 200°C as pastilhas R1 e R2 (com menor teor de resina) apresentam um coeficiente de atrito bastante inferior ao da pastilha Padrão, mas continuam a registar um comportamento estável ao longo do tempo. Já as pastilhas R3 e R4 (com maior teor de resina), na gama de temperaturas mais elevadas, apresentam maiores valores de coeficiente de atrito, sendo possível detetar um incremento ao longo do tempo. Estas pastilhas contêm maior percentagem de resina e, visto que esta apresenta um ponto de amolecimento próximo dos 150°C (Figura 3.3 e Figura 3.4), esta evolução do coeficiente de atrito pode justificar-se pela penetração do pino na superfície da pastilha, aumentando a área de contacto.

#### 5.2.1.2. FAST (*Friction Assessment Screening Test*)

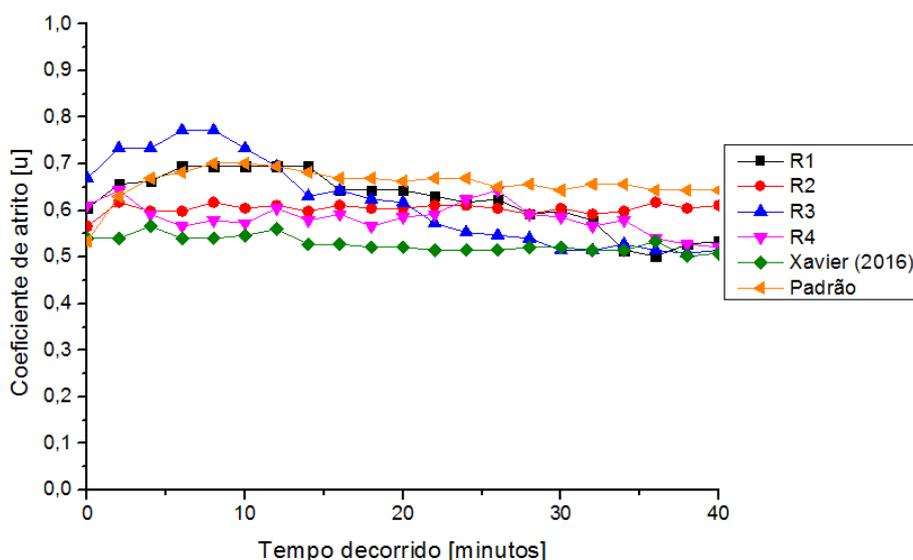
O equipamento FAST foi posteriormente utilizado para relacionar os valores de coeficiente de atrito com os medidos no equipamento *pin-on-disk* e estudar o comportamento ao desgaste das pastilhas de travagem produzidas.

Na Tabela 5.4 estão compilados os parâmetros externos a que cada pastilha esteve sujeita durante o ensaio.

**Tabela 5.4.** Parâmetros externos registados para cada pastilha.

PARÂMETROS EXTERNOS	PASTILHA					
	R1	R2	R3	R4	Xavier (2016)	Padrão
Temperatura (°C)	22	20	20	22	20	20
Humidade relativa (%)	36	48	38	48	43	38

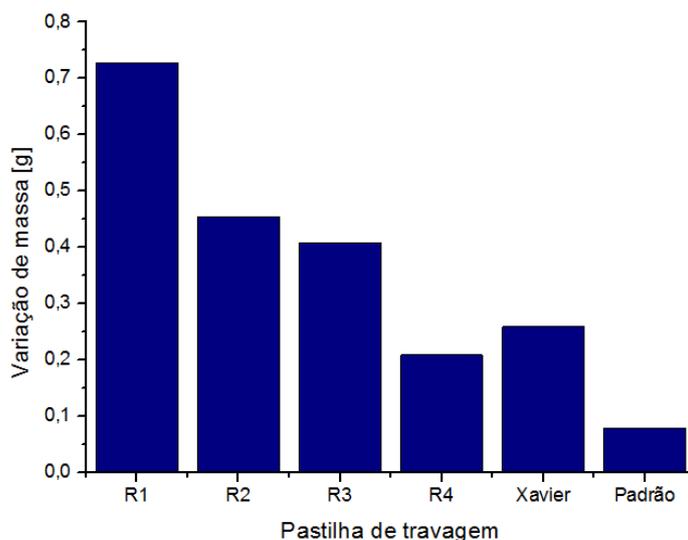
Em termos de coeficiente de atrito, a Figura 5.4 demonstra os resultados dos ensaios no equipamento FAST.



**Figura 5.4.** Variação do coeficiente de atrito com o tempo.

Numa fase inicial todas as pastilhas apresentam aproximadamente os mesmos valores de coeficiente de atrito. Com o decorrer do ensaio e consequente aumento da temperatura do sistema, o coeficiente de atrito da maior parte das pastilhas apresenta um ligeiro decréscimo que se pode justificar pelo fenómeno de *fade*.

Juntamente com a pastilha Padrão, a pastilha R2 foi a que apresentou valores mais elevados de coeficiente de atrito, realçando-se o seu comportamento estável durante o ensaio, demonstrando pouca variação do coeficiente de atrito, mesmo com o aumento de temperatura (Figura 5.5.).



**Figura 5.5.** Variação de peso de cada pastilha após FAST.

Na generalidade as pastilhas em estudo apresentam maior taxa de desgaste do que a pastilha Padrão. A pastilha R1 (baixo teor de resina) foi a que claramente apresentou maior taxa de desgaste, que pode dever-se a uma mais fácil desagregação dos materiais constituintes. As pastilhas R4 e Xavier (2016) foram as que apresentaram menor taxa de desgaste, contudo com menor coeficiente de atrito. A taxa de desgaste das pastilhas R2 e R3 foi semelhante.

Na Figura 5.5 constata-se que o aumento do teor de resina diminuiu consideravelmente a taxa de desgaste das pastilhas. Esta adição deve ser feita de forma equilibrada, na medida em que, maiores quantidades de resina levam a fenómenos de instabilidade do coeficiente de atrito a temperaturas elevadas. Assim, deve-se procurar ter numa pastilha o equilíbrio entre a resistência ao desgaste e a estabilidade do atrito.

Analisando os resultados, a percentagem de resina selecionada para prosseguir o estudo foi de 5% (R2). Apesar de não apresentar a melhor taxa de desgaste, a pastilha R2 foi a que demonstrou maior estabilidade de coeficiente de atrito em ambos os ensaios.

Após esta otimização do teor de resina das pastilhas, o estudo prosseguiu pela análise do efeito da variação do teor de aditivos metálicos nas pastilhas.

### 5.3. Variação do teor de aditivos

O coeficiente de atrito, o desgaste e a temperatura de fricção são fatores que podem ser influenciados durante a utilização de um sistema de travagem.

O objetivo passa por obter pastilhas de travagem com coeficiente de atrito estável ao longo do tempo nas várias gamas de temperatura, com a menor taxa de desgaste possível, aumentando o seu tempo de vida útil.

A adição de aparas de aço na formulação das pastilhas de travagem pode funcionar como material estrutural, visto que apresentam características que aumentam a resistência mecânica da pastilha, sendo expectável que reduzam a taxa de desgaste da mistura base. Estas aparas metálicas adicionadas também podem aumentar a condutividade térmica das pastilhas de travagem, modificando o seu comportamento a temperaturas mais elevadas.

Foram produzidas pastilhas com diferentes teores de aparas resultantes de acabamento a elevada velocidade de corte dos aços tratados termicamente (AISI 420 e H13), para determinar a melhor percentagem de aditivo a utilizar (Tabela 5.5).

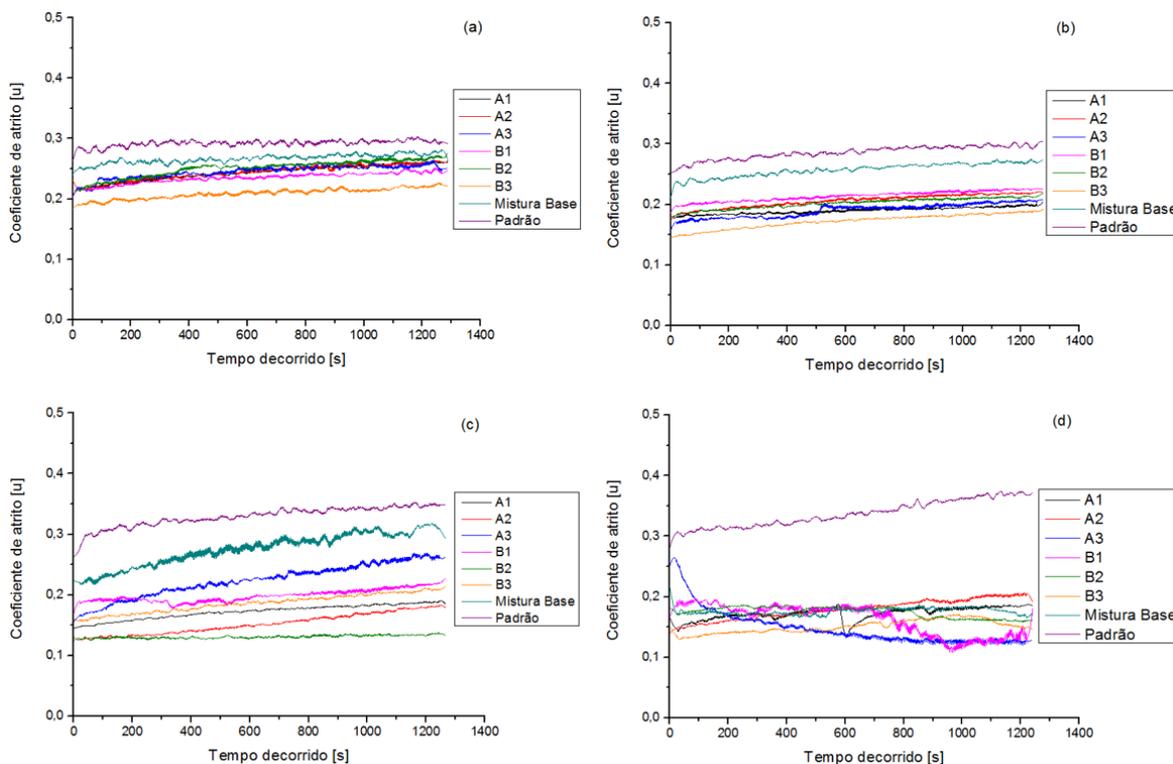
**Tabela 5.5.** Composição das pastilhas de travagem com aditivos.

<b>COMPOSIÇÃO DAS PASTILHAS COM ADITIVOS</b>			
<b>Pastilha</b>	<b>Sucata (%)</b>	<b>Resina (%)</b>	<b>Apara de acabamento de aço</b>
<b>A1</b>	92,5	5,0	2,5% Aço AISI 420
<b>A2</b>	90,0		5,0% Aço AISI 420
<b>A3</b>	87,5		7,5% Aço AISI 420
<b>B1</b>	92,5		2,5% Aço AISI H13
<b>B2</b>	90,0		5,0% Aço AISI H13
<b>B3</b>	87,5		7,5% Aço AISI H13

### **5.3.1. Coeficiente de atrito e desgaste**

#### **5.3.1.1. Pin-on-disk**

A utilização do tribómetro *pin-on-disk* permitiu avaliar os coeficientes de atrito das várias pastilhas a temperaturas de 50°C, 100°C, 150°C e 200°C (Figura 5.6).



**Figura 5.6.** Coeficiente de atrito ao longo do tempo (*pin-on-disk*) a temperaturas de 50°C (a), 100°C (b), 150°C (c) e 200°C (d).

Dos resultados pode constatar-se que a temperaturas baixas (50°C e 100°C) o coeficiente de atrito de todas as pastilhas apresenta um comportamento semelhante. No geral as pastilhas registam menor coeficiente de atrito do que a pastilha Padrão, mas todas têm um comportamento estável ao longo do tempo.

A 150°C, apesar de todas as pastilhas continuarem a apresentar um coeficiente de atrito estável ao longo do tempo, regista-se a maior diferença do valor de coeficiente de atrito entre a pastilha Padrão e as restantes. As pastilhas Mistura Base e A3 (7,5% aço AISI 420) destacam-se das demais pelos valores elevados de coeficiente de atrito.

Para temperaturas mais elevadas (200°C) a tendência anteriormente referida é reforçada. Apesar das pastilhas de travagem produzidas com aditivos aparentarem ser estáveis ao longo do tempo, os valores de coeficiente de atrito são bastante inferiores ao da pastilha Padrão.

Na Figura 5.6 não é possível perceber uma relação direta entre o teor de aparas de aço e o coeficiente de atrito, assim como, não existe uma diferença significativa entre os dois tipos de aço.

A Figura 5.7 mostra os valores médios do coeficiente de atrito registados em função da temperatura.

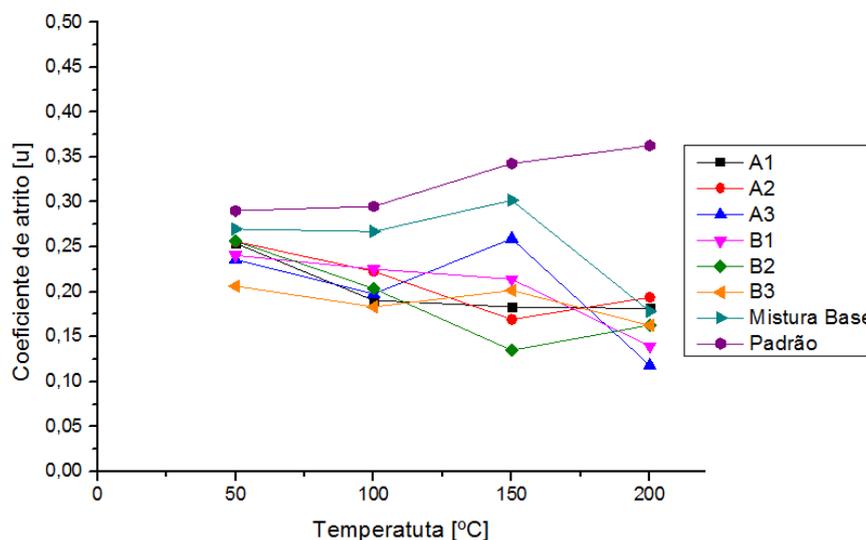
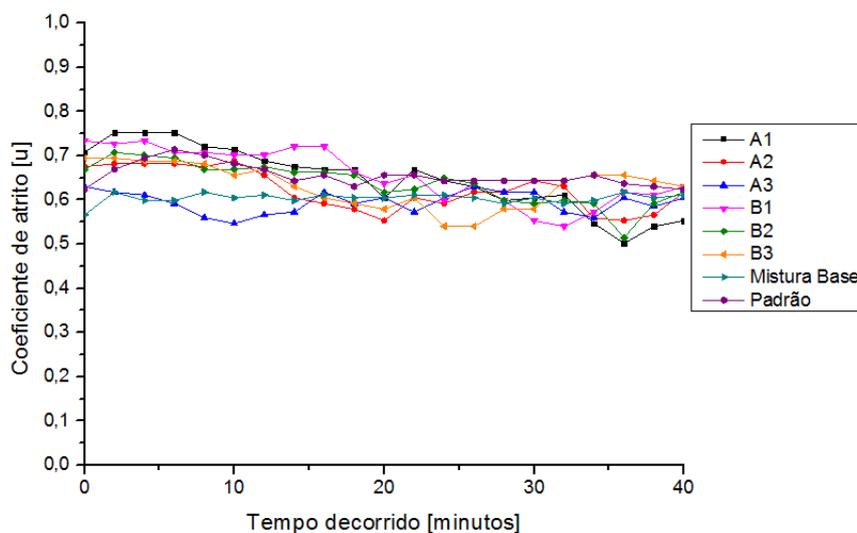


Figura 5.7. Valor médio do coeficiente de atrito em função da temperatura.

No intervalo de temperaturas de 50°C até 100°C, as pastilhas apresentam valores de coeficiente de atrito semelhantes. A partir dos 100°C a pastilha Padrão mostra um aumento do coeficiente de atrito, enquanto as restantes pastilhas revelam um comportamento oposto. A Figura 5.7 vem confirmar que não existe uma diferença significativa entre as pastilhas com diferentes tipos e teores de aparas metálicas. Todas as pastilhas apresentam tendência a diminuir o coeficiente de atrito com o aumento da temperatura (*fade*).

### 5.3.1.2. FAST (*Friction Assessment Screening Test*)

Os ensaios com a técnica FAST foram realizados em condições de temperatura inicial do disco semelhantes: temperatura ambiente e humidade relativa de aproximadamente de 50%. A Figura 5.8 mostra a variação do coeficiente de atrito ao longo do ensaio FAST.



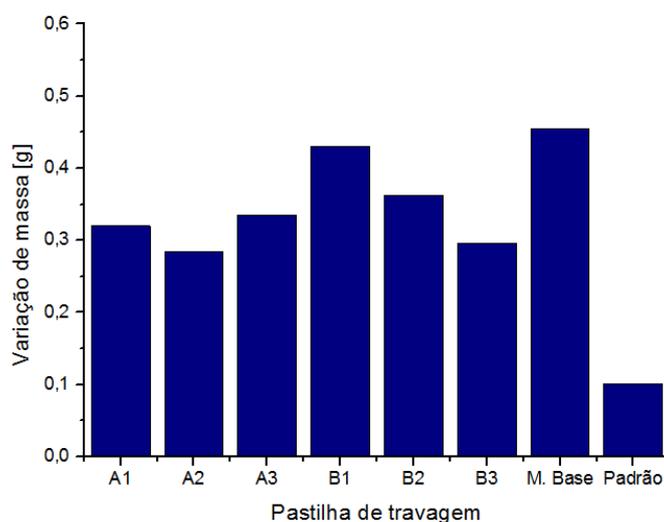
**Figura 5.8.** Variação do coeficiente de atrito com o tempo.

Nos 5 minutos iniciais do ensaio, as pastilhas registaram um aumento do coeficiente de atrito, devido ao aumento da área de contacto do par de fricção, que pode justificar-se pela fase de adaptação entre a pastilha e o disco.

A pastilha Padrão apresenta o comportamento mais estável ao longo do ensaio, além de ser a que no geral regista valores de coeficiente de atrito mais elevados.

As restantes pastilhas revelam comportamentos semelhantes, apesar de apresentarem valores de coeficiente de atrito aceitáveis (comparativamente com a pastilha Padrão), no entanto demonstram alguma instabilidade ao longo do ensaio.

No comportamento ao desgaste, avaliado pela variação de massa da pastilha provocada pelo ensaio FAST, os resultados estão patentes na Figura 5.9.



**Figura 5.9.** Variação de massa de cada pastilha provocada pelo ensaio FAST.

Na Figura 5.9 a pastilha Padrão apresenta menor taxa de desgaste do que as restantes pastilhas, assim como se destaca que a pastilha Mistura Base é a que regista maior desgaste.

Entre as pastilhas com aparas de aço AISI 420, apesar da variação do teor de aditivo, o desgaste registado foi semelhante. As pastilhas com aparas de aço AISI H13 apresentaram uma diminuição da taxa de desgaste com o aumento do teor de aditivo. Em média, o desgaste das pastilhas com adição de aço AISI 420 é menor do que o das pastilhas com aço AISI H13.

Com o objetivo de comparar o comportamento relativo dos dois aços utilizados, procurou-se avaliar a dureza das aparas metálicas, mas devido ao seu tamanho reduzido não foi possível obter uma conclusão satisfatória.

Em suma, a adição de aparas de aços AISI 420 e H13 não parecem ter proporcionado grande alteração ao nível do coeficiente de atrito registado. Contudo, o aumento do teor de aditivo reduziu a taxa de desgaste das pastilhas. Enquanto o aço AISI 420 é algo inconclusivo na relação “teor de aço vs taxa de desgaste”, o aço AISI H13 demonstra uma diminuição da taxa de desgaste com o aumento do teor de aditivo.

## 6. CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como objetivo analisar a influência relativa de aditivos no comportamento tribológico de pastilhas de travagem produzidas a partir de resíduos de sucata de veículos em fim de vida. O estudo incidiu mais concretamente na influência de aparas de aço de acabamento de alta velocidade de aços tratados - AISI 420 e de aço AISI H13, provenientes da indústria dos moldes, onde são consideradas um subproduto de valor económico reduzido.

Para análise do comportamento tribológico das pastilhas produzidas foram utilizadas dois tribómetros: *Pin-on-disk* e FAST. Os mesmos ensaios foram realizados numa pastilha Padrão (comercial).

Em primeiro lugar, foram otimizados os parâmetros de conformação, com pastilhas processadas a várias temperaturas e pressões.

O teor de resina na formulação das pastilhas de travagem foi igualmente variado, corroborando outros autores que demonstraram que a resina tem um papel fundamental como ligante dos vários materiais da composição. Quando sujeita a elevadas temperaturas a resina degrada-se, registando-se a desagregação dos materiais e perda de estabilidade do coeficiente de atrito das pastilhas de travagem. Apesar de não apresentar a melhor taxa de desgaste, a pastilha com 5% de resina foi a que demonstrou maior estabilidade de coeficiente de atrito em ambos os ensaios realizados. Conclui-se que se a resina for o único material ligante na formulação, a percentagem a utilizar deve ser inferior a 7,5%, visto que as pastilhas com percentagens de resina mais elevadas (7,5% e 10%) demonstraram comportamento viscoelástico e instabilidade, principalmente às mais elevadas temperaturas de ensaio.

No comportamento das pastilhas com aditivos (aparas de aço AISI 420 e de aço AISI H13) não se registou melhoramentos em relação ao coeficiente de atrito das pastilhas de travagem. Todavia, todas as amostras revelaram uma diminuição de taxa de desgaste relativamente à pastilha sem qualquer aditivo, mas as pastilhas de travagem comerciais foram as que apresentaram em média menor desgaste. Não foi possível encontrar uma relação entre o teor de aditivo e a diminuição da taxa de desgaste de aço AISI 420. Nas

pastilhas com aparas de aço AISI H13 pode dizer-se que com o aumento do teor de aditivo se verifica uma diminuição da taxa de desgaste.

Assim, os comportamentos tribológicos das pastilhas produzidas com base em resíduos de sucata de veículos em fim de vida, com ou sem os aditivos testados, não são equiparáveis ao comportamento tribológico da pastilha comercial. Não obstante, a incorporação de aparas de aços, como as utilizadas nesta dissertação, podem ser um complemento para a melhoria da formulação de pastilhas de travagem.

### **6.1. Sugestões para trabalhos futuros**

As duas técnicas utilizadas nesta dissertação para a avaliação do comportamento tribológico das pastilhas de travagem, apesar de possibilitarem a comparação entre várias pastilhas diferentes, não permitem verificar se são cumpridas as normas exigidas para a comercialização dos materiais de fricção. Sugere-se a utilização de outras técnicas que possibilitem um estudo mais completo.

O reduzido tamanho das amostras de pastilhas de travagem que são testadas, pode abrir lugar à ocorrência de resultados dúbios, devido a uma elevada heterogeneidade da superfície das pastilhas, então, testes de comportamento tribológico com maior área de contacto do par disco/pastilha, trariam maior representatividade.

Para melhorar o comportamento tribológico das pastilhas testadas sugere-se que sejam adicionados materiais complementares, ao nível de modificadores de atrito, tentando incrementar o coeficiente de atrito das pastilhas, que continuou a ser deficiente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Portuguesa do Ambiente (APA) (2016), “Veículos em Fim de Vida”. Acedido em 17 de Agosto de 2016, em: [www.apambiente.pt](http://www.apambiente.pt)
- ASTM G99-05 (2016). “Standart Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus”. ASTM International, Estados Unidos da América.
- Blau, P. (2001), “Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives”, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee.
- Chan, D., Stachowiak, W. (2004), “Review of automotive brake friction materials”, School of Mechanical Engineering, Australia, 953-966.
- Decreto-Lei n.º 196/2003 de 23 de Agosto. “Diário da Republica n.º194 – 23 de Agosto de 2003 – I Série-A”. Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente. Lisboa.
- Diretiva 2000/53/CE de 18 de Setembro de 2000. “Jornal Oficial da Comunidades Europeias”. Parlamento Europeu e do Conselho.
- Godinho, S. C. (2012). “Consolidação de aparas metálicas por explosivos”. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente na especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Greening, “Instruction Manual F.A.S.T. Machine (Friction Assessment Screening Test)”.
- Hu, B., Luk, S., Filip, P., (2016), “Friction and Wear Responses with Metallic Composite Materials to Replace Copper and Copper Alloys in Brake Pad Formulations”, Brake Colloquium & Exhibition - 34th Annual, North American Hoganas, North America.
- Idris, U. D., Aigbodion, V. S., Abubakar, I. J., Nwoye, C. I. (2015), “Eco-friendly asbestos free brake-pad: Using banana peels” em Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 27, 185-192.
- Instituto Mobilidade e dos Transportes, I.P. (IMT) (2016), “Veículos em Fim de Vida – VFV”. Acedido em 17 de Agosto de 2016, em: [www.imt-ip.pt](http://www.imt-ip.pt)
- Jang, H., Ko, K., Kim, S.J., Basch, R.H., Fash, J.W. (2004), “The effect of metal Fibers on the friction performance of automotive brake friction materials”, Wear, An International Journal on the Science Technology of Friction, Lubrication and Wear, 256, 406-414.
- Lagel, M., Hai, L., Pizzi, A., Bass, M., Delmotte, L., Abdalla, S., Al-Marzouki, F. (2016), “Automotive brake pads made with a bioresin matrix”, Industrial Crops and Products, volume 85, 372-381.
- Liew, K., Nirmal, U. (2013), “Frictional performance evaluation of newly designed brake pad materials”, Faculty of Engineering and Technology, Multimedia University, Malaysia.

- Matweb. Acedido em 20 de Agosto de 2016, em: [www.matweb.com](http://www.matweb.com)
- Nagesh, S., Siddaraju, C., Prakash, S., & Ramesh, M., (2014), “Characterization of Brake Pads by Variation in Composition of Friction Materials”, International Conference on Advances in Manufacturing and Materials Engineering, volume 5, 295-302.
- Neis, P. (2008), “Projeto e Construção de um Tribômetro para estudos relacionados a materiais de fricção veiculares”, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre.
- Norma SAE J661 (1958), “Brake Lining Quality Control Test Procedure”. The Engineering Society for Advanced Mobility Land Sea Air Space. American National Standard.
- Österle, W., Deutsch, C., Gradt, T., Orts-Gil, G., Schneider, T., Dmitriev, A.I., (2014), “Tribological screening tests for the selection of raw materials for automotive brake pad formulations”, Tribology International, volume 73, 148-155.
- Ramousse, S., Hoj, J. W., Sorensen, O. T. (2001), “Thermal Characterization of Brake Pads”, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 64, 933-943.
- Uexküllä, O, Staffan S., Doylec R., Braungartd, M. (2005), “Antimony in brake pads- a carcinogenic component?” em Journal of Cleaner Production, volume 13, Janeiro, 19-13.
- Valorcar (2015), “Guia de Desmantelamento de Veículos em Fim de Vida”, disponível online no Web site da entidade na biblioteca de documentos, acedido em 18 de Agosto de 2016 em [www.valorcar.pt](http://www.valorcar.pt)
- Valorcar (2016), Informação sobre a empresa disponibilizada no Web site da entidade. Acedido a 18 de Agosto de 2016, em: [www.valorcar.pt](http://www.valorcar.pt)
- Vicente, P., (2016) “Influência do papel de aditivos no comportamento tribológico de pastilhas de travão baseadas em sucata metálica não ferrosa”, Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente na especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Vieira, M. T., Godinho, S., Farinha, A. R., Fidélis, Rosa, N. H., (2015), “Aparas Metálicas: de Resíduo a Matéria-prima”, Inovação, Portugal, 38-41.
- Xavier Silva, H. (2016), “Poderão os resíduos de automóveis ser utilizados como matéria-prima para materiais de fricção”. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente na especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Yoshihara, S., Tsuda, S. e Iriyama Y. (2008), “Effect of DLC Coating on Deep Drawability of AZ31Magnesium Alloy Sheet” em Proceedings of the 25th International Manufacturing Conference, Dept of Material and Environment Technology, University of Yamanashi, Division of Interdisciplinary Sciences, University of Yamanashi, 22-29.