



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# Implementação de metodologias experimentais para estudar o comportamento de travões de bicicleta

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

**Autor**

**Miguel António Xavier Coimbra**

**Orientadores**

**Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho**

**Engenheiro Rodrigo Antunes**

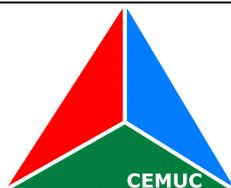
**Júri**

**Presidente** Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro  
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho  
Professor da Universidade de Coimbra  
Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra  
Eng<sup>o</sup> Rodrigo Trindade Simões de Sousa Antunes  
Engenheiro Mecânico da SRAMPORT

**Colaboração Institucional**

---



Centro de Engenharia Mecânica  
da Universidade de Coimbra

**SRAM**<sup>®</sup>

SRAMPORT<sup>®</sup>

**Coimbra, Janeiro, 2013**

Mechanics is the paradise of the mathematical sciences because by means of it one comes to the fruits of mathematics. (Leonardo da Vinci, 1452±1519)

Aos génios de outros tempos

## Agradecimentos

Quero agradecer à Universidade de Coimbra, por me ter dado a forte base para construir o meu futuro.

Espero um dia ter uma base de conhecimentos tão abrangente como o Senhor Professor Doutor Amílcar Ramalho, para poder tornar-me o engenheiro projetista que sempre ambicionei. Agradeço o tempo que investiu a transmitir-me as qualidades de um engenheiro mecânico.

Agradeço à empresa SRAM em geral por integrar o projeto desta tese num tema tão motivante como é o ciclismo de estrada competitivo, e ao Eng<sup>o</sup> Rodrigo Antunes particularmente, pela cooperação e disponibilidade total.

Agradeço aos meus colegas, e espero que este espírito académico perdure neste nosso departamento!

Agradeço ao meu pequeno grupo de bons amigos, pela motivação.

Agradeço à minha família que sempre me apoiou e ensinou a dar o meu melhor. Especialmente ao meu pai, que foi uma valiosa ajuda e a minha tia Bé pela sua boa disposição em todos os momentos.

Agradeço muito à Joana por ser pura inspiração.

## **Abstract**

This thesis is focused on the performance and durability of the caliper braking system that equips road cycling competition bikes, specifically on the contact stage. Test results regarding this materials are not published, therefore theory was based on friction fundamental books and experimentation was adapted from aluminum rims testing.

A pin-on-disc automated test was setup measuring friction force and wear volume. The results for friction, wear and surface morphology observation allowed to reach conclusions about wear mechanisms involved. The domain of validity of Archard's uniform law was identified and it was possible to characterize wearing-in phenomenon.

## **keywords**

Friction, wear, bicycle, braking, composite, pin-on-disc.

## Resumo

Esta dissertação centra-se no estudo do desempenho e durabilidade do sistema de travagem das rodas em material compósito usadas em competição de ciclismo de estrada, especificamente no contacto do calço com o aro. Pretende-se principalmente conhecer a influência das condições de uso sobre a travagem. Procedeu-se assim a um estudo paramétrico variando numa série de ensaios a velocidade de escorregamento e noutra série de ensaios a força normal. Estudou-se também a influência do contacto molhado em situação de chuva.

Não há publicações sobre a experimentação destes materiais, pelo que se baseou a teoria em livros sobre fundamentos de atrito e adotou-se um método de ensaio semelhante àquele usado para testes de aros de alumínio.

Configurou-se um ensaio pino-disco automatizado em laboratório com medição da força de atrito e volume de desgaste. Os resultados de atrito, desgaste e observação da morfologia das superfícies de desgaste no calço permitiram tirar conclusões acerca dos mecanismo de desgaste verificados nas condições de ensaio. Identificou-se o domínio de aplicação da lei de desgaste uniforme de Archard e caracterizou-se o fenómeno de *wearing-in*.

Este trabalho contou com uma saudável parceria entre a empresa SRAMPORT® e o departamento de Eng<sup>a</sup> Mecânica da Universidade de Coimbra.

## palavras chave

Atrito, desgaste, bicicleta, travagem, compósito, pino-disco.



---

## Índice

1. INTRODUÇÃO.....	4
2. ESTADO DA ARTE .....	8
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
3.1. Abordagem à problemática dos ensaios.....	14
3.2. Descrição do ensaio .....	15
3.3. Descrição do programa em Labview .....	16
3.4. Caracterização dos materiais .....	20
3.4.1. Descrição do disco compósito fabricado.....	20
3.4.2. Descrição do material do pino.....	21
3.5. Procedimento .....	21
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	25
4.1. Análise dos dados de atrito .....	26
4.2. Análise dos resultados de desgaste .....	32
4.3. Morfologia das superfícies de desgaste .....	37
4.3.1. Apresentação das imagens de Microscopia eletrónica de varrimento.....	37
4.3.2. Análise global das imagens de microscopia eletrónica de varrimento.....	44
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49
Anexo A Tabelas de dados .....	50
ANEXO B Programa de labview .....	69
ANEXO C EQUIPAMENTO USADO .....	71

## Índice de figuras

Figura 1.1 Karin Thürig competindo com rodas ZIPP .....	4
Figura 1.2 Componentes reais alvo de estudo nesta dissertação .....	5
Figura 1.3 Disco compósito fabricado para o ensaio e porta pinos onde se montará o pino extraído do calço de travão.....	6
Figura 1.4 Calços Zipp Flash Pro montados em travões <i>caliper</i> SRAM .....	6
Figura 3.1 disco no banco de ensaios .....	15
Figura 3.2 Esquema do ensaio pino-disco .....	15
Figura 3.3 Janela frontal de apresentação.....	17
Figura 3.4 Fluxograma da programação por blocos .....	18
Figura 3.5 Onda quadrada .....	18
Figura 3.6 Secção reta da placa de compósito.....	20
Figura 3.7 Superfície polida do disco compósito .....	20
Figura 3.8 Laboratório de desgaste no CEMUC .....	22
Figura 3.9 Banco de ensaios usado.....	22
Figura 4.1 Estudo da influência da força normal - contacto seco.....	26
Figura 4.2 <i>Wearing-in</i> no estudo da influência da força normal - contacto seco .....	28
Figura 4.3 Estudo da influência da velocidade - contacto seco.....	28
Figura 4.4 <i>Wearing-in</i> no estudo da influência da velocidade - contacto seco .....	29
Figura 4.5 Estudo da influência da força normal - contacto molhado.....	30
Figura 4.6 <i>Wearing-in</i> no estudo da influência da força normal - contacto molhado .....	30
Figura 4.7 Estudo da influência da velocidade - contacto molhado.....	31
Figura 4.8 <i>Wearing-in</i> no estudo da influência da velocidade - contacto molhado .....	32
Figura 4.9 Taxa de desgaste a seco.....	32
Figura 4.10 Taxa de desgaste em molhado .....	32
Figura 4.11 Gráfico Energia-Volume dos ensaios de contacto seco .....	34
Figura 4.12 Gráfico Energia-Volume dos ensaios de contacto molhadas.....	34
Figura 4.13 Coeficiente de atrito nos ensaios de contacto seco .....	35
Figura 4.14 Coeficiente de atrito nos ensaios de contacto molhado .....	35
Figura 4.15 Taxa de desgaste dos ensaios de contacto seco.....	35
Figura 4.16 Taxa de desgaste dos ensaios de contacto molhado.....	35
Figura 4.17 Seco, reduzida força normal 1 .....	37

---

Figura 4.18 Seco, reduzida força normal 2a .....	38
Figura 4.19 Seco, reduzida força normal 2b.....	38
Figura 4.20 Seco, reduzida força normal 3a.....	38
Figura 4.21 Seco, reduzida força normal 3b.....	38
Figura 4.22 Seco, reduzida força normal 4.....	38
Figura 4.23 Seco, condições intermédias 1 .....	39
Figura 4.24 Seco, condições intermédias 2 .....	39
Figura 4.25 Seco, condições intermédias 3a.....	39
Figura 4.26 Seco, condições intermédias 3b .....	39
Figura 4.27 Seco, elevada velocidade 1 .....	40
Figura 4.28 Seco, elevada velocidade 2a.....	40
Figura 4.29 Seco, elevada velocidade 3b .....	40
Figura 4.30 Molhado, reduzida força normal 1 .....	41
Figura 4.31 Molhado, reduzida força normal 2a .....	41
Figura 4.32 Molhado, reduzida f normal 2b.....	41
Figura 4.33 Molhado, reduzida força normal 3a.....	42
Figura 4.34 Molhado, condições intermédias 2.....	42
Figura 4.35 Molhado, condições intermédias 1 .....	42
Figura 4.36 Molhado, condições intermédias 2.....	43
Figura 4.37 Molhado, cond. intermédias 3.....	43
Figura 4.38 Molhado, cond. intermédias 4.....	43
Figura 4.39 Molhado, cond. intermédias 5.....	43
Figura 4.40 Molhado, elevada velocidade 1.....	44
Figura 4.41 Molhado, elevada velocidade 2.....	44

## 1. INTRODUÇÃO

Esta tese representa uma saudável colaboração da empresa SRAMPORT<sup>®</sup> com o departamento de Eng<sup>a</sup> Mecânica da Universidade de Coimbra.

A SRAMPORT<sup>®</sup> localizada em Portugal é responsável pelo projeto e fabrico das correntes de bicicleta comercializadas em todo o mundo pela SRAM<sup>®</sup> e pelo enraçamento e montagem final das rodas ZIPP<sup>®</sup>, entre outras funções como montagem de outros componentes fabricados no estrangeiro. O fabricante ZIPP<sup>®</sup> *Speed Weaponry* pertence ao grupo SRAM<sup>®</sup>.

A empresa norte americana SRAM<sup>®</sup> engloba neste momento várias marcas responsáveis pelo desenvolvimento e fabrico dos diferentes grupos de componentes, e cada uma das marcas é responsável pela constante evolução dos componentes que produz. Trata-se de um mercado exigente e competitivo e liderar a vanguarda da técnica exige trabalho de engenharia ao mais alto nível.



**Figura 1.1** Karin Thürig competindo com rodas ZIPP

Na busca pela otimização da bicicleta de competição de ciclismo em estrada o fabricante de rodas ZIPP<sup>®</sup> desenvolveu rodas com aro em material compósito reforçado com fibras de carbono. Alcançou-se uma redução de peso e de inércia das rodas e simultaneamente aumentou-se a resistência estrutural. Estas rodas são usadas em ciclismo de competição e têm de garantir um excelente desempenho. Pode ver-se na Figura 1.1 a atleta Karin Thürig a competir numa prova *Ironman* usando as descritas rodas com aro compósito. Apesar do seu reduzido peso, as rodas têm que ser resistentes pois a sua falha põe em risco o/a atleta.

Neste trabalho, estuda-se o comportamento do sistema de travagem usado atualmente em ciclismo de estrada (*caliper*) no contacto do calço com o aro. O comportamento do travão *caliper* sobre aro de alumínio é utilizado há vários anos e tem sido objeto de evoluções sucessivas. Esta tese pretende estudar o comportamento do travão *caliper* quando atua sobre o aro de compósito desenvolvido pela ZIPP® que está integrado em rodas de ciclismo de competição. Pretende-se caracterizar empiricamente o comportamento do sistema de travagem *caliper* sobre aros compósitos, usando calços adequados. Veja-se na Figura 1.2 um exemplo de montagem de rodas ZIPP® e travões e calços SRAM®.



**Figura 1.2** Componentes reais alvo de estudo nesta dissertação

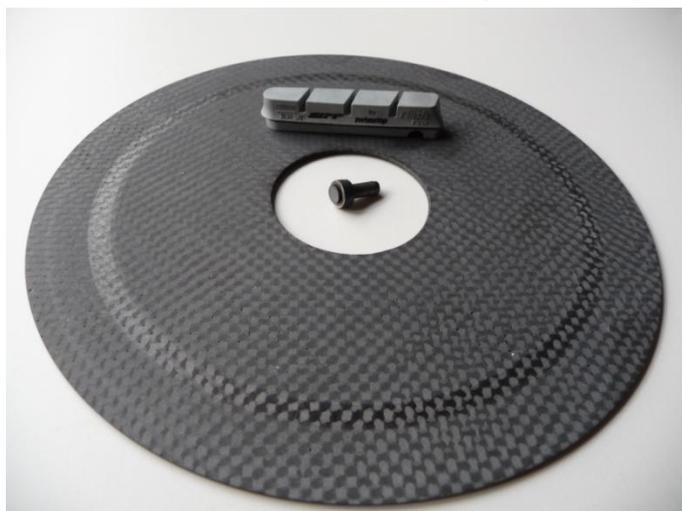
É um estudo interessante por não existir ainda investigação publicada nesta área. Mais ainda, a correta caracterização da travagem permite a melhoria futura do sistema e avaliação de desgaste do calço e possivelmente do aro e dá conhecimentos ao nível da segurança do equipamento.

O método escolhido para caracterização do sistema de travagem foi o ensaio em banco, especificamente o ensaio pino-disco. Metodicamente alterou-se um parâmetro de cada vez para avaliar a sua influência na travagem. Os parâmetros avaliados foram a velocidade de escorregamento, a força normal exercida pelo pino sobre o disco e a comparação da situação de travagem em seco e em molhado.

O banco de ensaios foi adaptado a partir de um equipamento pino-disco e sofreu evoluções até chegar à configuração apresentada no desenvolvimento do trabalho.

Veja-se a Figura 1.3 que mostra o pino, o disco e o calço. Foram fabricados discos em alumínio e discos em compósito com matriz de resina epoxídica reforçada com fibra de carbono. Foram extraídos pinos a partir de calços de travagem fabricados pela Swisstop® para a ZIPP®.

Este trabalho pretende estudar de forma científica o desempenho e a durabilidade do sistema de travagem roda ZIPP® em compósito - calço ZIPP® específico



**Figura 1.3** Disco compósito fabricado para o ensaio e porta pinos onde se montará o pino extraído do calço de travão



**Figura 1.4** Calços Zipp Flash Pro montados em travões *caliper* SRAM

para a roda em compósito. A Figura 1.4 mostra os calços montados nos travões *caliper*.

As variáveis estudadas são o coeficiente de atrito entre o pino e o disco e o volume perdido no pino. Estudou-se o efeito que a variação de velocidade e a variação de carga têm sobre estas variáveis. Todos estes ensaios foram efetuados em situação de tempo seco e molhado.

Procedeu-se a uma pesquisa de publicações na área de travagem sobre compósito de resina epoxídica reforçada com fibras de carbono.

Não foi possível nenhum estudo nesta área disponível para consulta nas bases de dados científicas.

Esta dissertação está dividida em 5 Capítulos:

Capítulo 1- Introdução

Inclui um enquadramento do estudo na realidade em que se insere, uma breve descrição do trabalho desenvolvido e uma explicação da sua relevância.

Capítulo 2 - Estado da arte

O estado da arte compreende o resultado de uma pesquisa aos trabalhos que estavam disponíveis para consulta nesta área da engenharia. Menciona também as obras consultadas e salienta qual a relevância de cada uma delas no desenvolvimento do trabalho.

### Capítulo 3 - Materiais e métodos

Inicia-se com uma rápida abordagem à problemática dos ensaios, enquadrando os ensaios desenvolvidos no leque de ensaios possível de serem efetuados. A descrição do ensaio explica no que consistiu a experiência, descrevendo em pormenor o banco de ensaios usado. A caracterização dos materiais descreve o par de materiais de contacto usados. O procedimento explica detalhadamente qual a metodologia de trabalho seguida em cada ensaio para garantir resultados válidos.

### Capítulo 4 - Apresentação e discussão de resultados

Este capítulo expõe e analisa os dados obtidos a partir dos ensaios realizados em banco. Neste capítulo apresentam-se os gráficos representativos dos dados obtidos da experimentação. Estão também presentes neste capítulo as imagens de microscopia eletrónica de varrimento observando detalhadamente a superfície de desgaste de 6 dos pinos ensaiados. Estas imagens permitem uma análise a um nível de detalhe extremamente profundo e permitem conhecer os diferentes mecanismos de falha do calço de travão em cada situação a que foi submetido.

### Capítulo 5 - Conclusões e trabalhos futuros

Neste capítulo resumem-se todas as conclusões fruto da análise dos resultados obtidos e das hipóteses propostas e consideradas. Este capítulo termina com uma sugestão de como este trabalho pode ter continuidade num futuro projeto de investigação.

## 2. ESTADO DA ARTE

O objetivo desta dissertação foi o estudo experimental de travões de bicicleta de estrada. Especificamente estudou-se o comportamento dos travões *caliper* a atuar sobre aros de roda em material compósito. Para elaborar um estudo de trabalhos prévios, pesquisaram-se nas bases de dados científicas os artigos que exploram este tema. É de constatar que existem numerosos trabalhos publicados na área de atrito e travagem. Quando o objeto de estudo são os veículos motorizados, existe uma quantidade muito grande de trabalhos que incidem sobre o estudo de travagem na indústria automóvel, por exemplo. Mas especificamente sobre travagem em bicicletas não foi encontrado nenhum trabalho concluído. Existe um artigo publicado que expõe o projeto completo para a construção de um banco de ensaios para travões de bicicleta, usando ou a bicicleta completa, ou os sistemas de travagem da bicicleta à escala real. Trata-se do artigo Oertel, C., Neuburger, H., Sabo, A. (2010), "Construction of a test bench for bicycle rim and disc brakes" [1], consultado na internet.

Este trabalho de dissertação tem por primeira base fundamental o manual Bhushan, B. (2001), "Modern Tribology Handbook", CRC Press [2]. Este livro deu as bases para o domínio suficiente da área da tribologia para poder prosseguir com o estudo sempre com rigor e correção científica. Analisar este livro obrigaria a uma revisão de toda a teoria que está na base de qualquer trabalho em tribologia e é demasiado abrangente para o âmbito desta dissertação. Foi também consultado o manual Johnson, K. L. (1985), "Contact Mechanics", Cambridge University Press [3]. É um livro muito menos geral e faz uma abordagem de formulação matemática a situações particulares encontradas em casos específicos que envolvem forças de atrito em situações de engenharia.

O manual Blau, P. J. (1995), "Friction Science and Technology: From Concepts to Applications" [4] foi o que se revelou mais específico para o trabalho apresentado nesta dissertação e que inspirou muito vincadamente todo o processo científico de investigação e análise de resultados. Por ter sido tão relevante para basear esta dissertação, de seguida vai-se descrever toda a informação relevante a esta dissertação presente neste manual.

[4], 43

Diz o autor Peter J. Blau que o atrito é fortemente influenciado pelo tribómetro em uso e não apenas uma característica obrigatoriamente ligada às propriedades intrínsecas do material testado. Como exemplo disto, explica que uma série de materiais, quando testados em diferentes tribómetros podem não ser sempre ordenados de forma igual. Esta citação é importante para o presente trabalho na medida em que é aprofundado o estudo experimental em apenas um tribómetro, logo temos que ter presente que se outro tribómetro fosse usado os resultados poderiam diferir.

Analisados todos os ensaios com geometria de contacto simplificada, foi seleccionado o tribómetro com o ensaio do tipo pino sobre disco rotativo por ser aquele que melhor simula o tipo de contacto que ocorre durante o funcionamento dos travões de aro no seu uso na bicicleta.

A norma [DIN Standard 50 322] divide os testes de desgaste em 6 categorias:

I. Ensaio à escala real no terreno

II. Testes ao componente real mas em banco de ensaios.

III. Teste a um conjunto de componentes em banco de ensaios

IV. Testes a uma versão em escala reduzida de um conjunto de componentes

V. Testes a triboelementos (por exemplo a máquina para testar engrenagens utilizaria engrenagens reais)

VI. Testes que reproduzem a geometria básica de contacto (por exemplo esfera no plano, ou rolo sobre plano)

O ensaio explorado neste trabalho é do tipo pino sobre disco rotativo e é, segundo a classificação DIN 50 322 do tipo VI - Testes que reproduzem a geometria básica de contacto.

De acordo com a [STLE] *Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, a designação correta do ensaio realizado neste trabalho é: *Pin-on-rotating disk (face loaded)* o que pode ser traduzido para língua portuguesa por: Pino sobre disco rotativo, atuação frontal.

Segundo a tabela de *Tribological Aspect Numbers*, o ensaio deste trabalho tem o código 3611. O que significa que a natureza do contacto é o escorregamento; a área de

contacto é do tipo área sobre área maior; a pressão de contacto é unidirecional; e o ângulo entre o pino e disco é exatamente 90°.

[4], 72

É importante salientar que o livro diz que um dos ensaios mais explorados em tribologia e para o qual existem mais dados publicados é o ensaio "pino sobre disco rotativo", atuação frontal. A extensa lista de dados apresentada no livro contém dados de combinações pino-disco do tipo aço-aço, alumina-aço, alumina-alumina, nitreto de silício-nitreto de silício, aço-nitreto de silício e nitreto de silício-aço. Não estão presentes dados deste ensaio realizado com materiais compósitos de fibra de carbono. Mesmo a pesquisa em bases de dados científicas por resultados de ensaios de polímero sobre compósitos de fibra de carbono foi infrutífera, não foram encontrados resultados deste tipo de ensaio disponíveis para consulta.

[4], 86

No capítulo do livro que estuda o atrito nos sistemas de travagem de veículos, o autor menciona uma conclusão que condiciona todo o trabalho desta dissertação. Diz Blau que é frequente estudar o desempenho de linhas de travagem de veículos através de ensaios em banco e a escala reduzida, ensaios do tipo pino sobre disco. Mas é muito importante notar que ao reduzir a escala e mudar a geometria do sistema, devido às diferenças na área de contacto, diferenças na dissipação de calor e diferenças na rigidez do sistema, os resultados obtidos a escala reduzida apesar de importantes, não podem ser diretamente extrapolados para o desempenho dos travões à escala real em utilização normal. Nesta dissertação seguiu-se esta importante indicação e conduziu-se a experimentação de forma a evitar a falha ou decaimento de performance de travagem por degradação térmica, como será explicado adiante.

[4], 105

O autor afirma que o atrito numa mesma superfície pode variar de um ponto para outro, podendo num mesmo ponto variar de um momento para outro. Pelo que atribuir apenas um valor de coeficiente de atrito e não uma gama de coeficiente de atrito pode ser demasiado simplificador.

Estas variações no coeficiente de atrito em condições idênticas são principalmente notórias em sistemas tribológicos não lubrificados como é o caso dos sistemas de travagem incluindo o sistema de travagem testado nesta dissertação.

Diz Blau que no caso de haver velocidade de escorregamento suficiente para produzir vibrações, então a força normal aplicada varia de instante para instante. O autor do livro defende que a melhor maneira de conhecer o coeficiente de atrito é monitorizar simultaneamente a força de atrito e a força normal.

Esta foi a abordagem que se tentou seguir nos dois primeiros sistemas de aplicação da força normal. Contudo os problemas que surgiram levaram à aplicação de uma força normal através do uso de massas calibradas, o que está explicado e justificado no capítulo 3.

Blau define 3 tipos de modos de contacto consoante o nível de interação entre superfícies antagonistas:

I - Em sistemas em que se verifica uma adequada lubrificação, são as teorias de lubrificação que ditam o comportamento do atrito.

II - No caso de a lubrificação ser inexistente ou insuficiente e houver efetivo contacto entre as duas superfícies, a estrutura da superfície e os 3<sup>os</sup> corpos são relevantes para o comportamento do atrito.

III . No caso de a lubrificação ser inexistente e as forças de corte resultantes do escorregamento não se traduzirem apenas na remoção de material pertencente à interface, essas forças são transmitidas à estrutura de fixação que suporta os corpos em interação e tem que se entrar em conta com as características da estrutura (por exemplo a sua rigidez e frequência natural de vibração)

O ensaio explorado nesta dissertação enquadra-se no contacto do tipo II.

[4], 119

Ao longo do livro, o autor defende que o coeficiente de atrito é uma característica de um par de materiais e não uma propriedade do material.

Quando duas superfícies iniciam um processo de escorregamento e há aplicação de força normal, o período inicial é marcado por uma acentuada flutuação no comportamento das forças envolvidas. Dá-se posteriormente uma transição para um comportamento notoriamente mais estável. Blau dedica um capítulo a este tema.

[4], 315

É importante definir três variáveis que são específicas para o fenómeno tribológico comumente chamado acamamento. *Breaking-in*, *running-in*, *wearing-in*. Especificamente, *Breaking-in* refere-se à transição para a estabilidade depois de um determinado tempo de escorregamento; *running-in* refere-se à transição depois de um certo número de ciclos de escorregamento; *wearing-in* refere-se à transição depois de uma determinada distância de escorregamento. Blau afirma que no início do escorregamento, as irregularidades de uma superfície atuam sobre as irregularidades da superfície antagonista e o desgaste é acelerado. À medida que a área de contacto real aumenta, a taxa de desgaste reduz-se.

[4], 340

O comportamento da força de atrito gerada ao longo do escorregamento continua a variar, mesmo depois de se ter dado a transição para a chamada estabilidade. Através da análise do coeficiente de atrito ao longo da distância de escorregamento pode-se tirar conclusões sobre o sistema analisado. Blau frisa que principalmente em sistemas não lubrificados, o coeficiente de atrito nunca estabiliza, variando facilmente ao longo de um mesmo ensaio, ou ao longo de ensaios nas mesmas condições entre valores máximos e mínimos com diferenças de até 50%. Daí ser importante estudar estatisticamente o fenómeno de atrito ao longo do tempo.

A. Ramalho, J.C. Miranda (2006), The relationship between wear and dissipated energy in sliding systems, *Wear* 260 361-367. [5]

Neste artigo encontraram-se teorias para a evolução do desgaste num sistema tribológico abaixo abordadas.

Segundo este artigo, a teoria clássica de desgaste, baseada no modelo de Archard, dita que:

$$V = K \frac{S N}{H} \quad (2.1)$$

Sendo V o volume de desgaste, S a distância de escorregamento, N a força normal e H a dureza. K é uma constante que representa o comportamento do material em

causa. Ora se  $K$  e  $H$  são ambos característicos do material, podem ser agrupados numa nova constante  $k$ , alterando a expressão para a seguinte fórmula:

$$V = k S N \quad (2.2)$$

Por sua vez o modelo de atrito de Coulomb estabelece que a força de atrito ( $F$ ) é proporcional à força normal

$$F = \mu N$$

$\mu$  representa o coeficiente de atrito.

Substituindo na equação anterior podemos inferir que:

$$V \propto F S$$

O produto  $F \cdot S$  representa o trabalho realizado pela força de atrito. Daí que esta seja considerada uma abordagem energética. No capítulo 4, esta abordagem foi um dos modos de análise dos dados experimentais obtidos.

## **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1. Abordagem à problemática dos ensaios**

Existem quatro níveis de ensaios possíveis: ensaios de materiais, ensaios em banco, ensaios de componentes e ensaios em campo.

Os ensaios de materiais são os mais simples mas apenas retiram conclusões sobre as propriedades dos materiais em jogo, nada dizem sobre o desempenho do grupo funcional. Os testes de dureza são um bom exemplo desta categoria de ensaios.

Os ensaios em banco são efetuados em laboratório e têm as variáveis associadas tais como as forças envolvidas ou a velocidade perfeitamente controladas pelo que permitem regra geral ter boa repetibilidade. É de salientar que são ensaios a uma escala diferente da real pelo que as conclusões a retirar não podem em regra ser extrapoladas diretamente para a aplicação real. A transponibilidade destes resultados para o projeto dos componentes depende fortemente da proximidade entre as variáveis de controlo do ensaio e as condições de solicitação do componente em serviço.

Os ensaios de componentes são efetuados também em laboratório. Usam componentes reais da máquina a testar em ambiente controlado para simular o seu uso no terreno. Comparativamente aos ensaios em banco apresentam menor repetibilidade devido à sua maior complexidade mas, por outro lado, apresentam resultados mais próximos da realidade por testarem o comportamento das peças a usar no protótipo. Tal como já foi referido, também neste caso, a transponibilidade dos resultados dos ensaios depende da proximidade das condições de solicitação. Todavia um teste de laboratório pretende obter resultados numa escala de tempo mais curta do que a correspondente ao caso real, o que requer o aumento da severidade das condições de solicitação. A experiência do investigador responsável pelo estudo é determinante para facilitar a obtenção de resultados úteis.

Os ensaios em campo são levados a cabo usando um protótipo, ou seja uma máquina à escala real em tudo igual à máquina que se pretende produzir. São ensaios extremamente morosos porque para serem realistas têm que cobrir um vasto leque de condições de uso e uma grande variedade de ambientes envolventes.

Salienta-se que o investimento que representam estes ensaios é sempre crescente desde os mais económicos ensaios de materiais aos extremamente onerosos ensaios em campo. No final do desenvolvimento do produto, antes da passagem à produção em série, é sempre importante levar a cabo ensaios de campo.

Daqui se conclui que um estudo estruturado deve seguir uma ordem lógica desde os ensaios mais básicos até aos mais complexos.

Na presente dissertação, seguiu-se esta lógica descrita. Procedeu-se a uma revisão bibliográfica sobre estudos prévios de ensaios de materiais relativos aos materiais em jogo. O grande enfoque desta dissertação de mestrado foi a montagem de um banco de ensaios adequado, a fabricação dos provetes à escala reduzida, a realização das baterias de ensaios (de forma automatizada), e a análise dos resultados obtidos.

### 3.2. Descrição do ensaio

O ensaio abordado neste trabalho é um ensaio pino-disco, constituído por um disco (ver Figura 3.1) em rotação em condições estacionárias (velocidade constante) sobre o qual atua um pino estático. Vê-se na Figura 3.2 o esquema do ensaio.

O disco em material compósito foi fabricado no departamento de Eng<sup>a</sup> Mecânica da Universidade de Coimbra e pretende simular o aro de material compósito que equipa

as rodas comercializadas pela ZIPP. O pino é composto por um cilindro de 4mm de diâmetro proveniente de calços de travagem cinzentos comercializados pela SRAM, fabricados pela Swisstop. O pino em NBR - *nitro butyl rubber* (material provável para o pino) é estruturalmente suportado por um porta-pinos metálico. Este porta-pinos está acoplado a um braço equipado com uma célula de carga para medir a força de atrito gerada. A força normal é aplicada por ação gravítica. Acoplam-se na extremidade de um cabo massas calibradas. Os valores de massa usados foram: 0,4 kg; 0,6 kg; 0,8 kg; 1,0 kg; 1,2 kg. Para mudar de vertical para horizontal a linha de ação da força, usa-se uma roldana.



Figura 3.1 disco no banco de ensaios

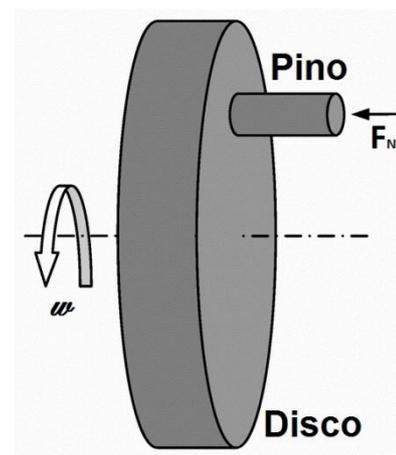


Figura 3.2 Esquema do ensaio pino-disco

A outra extremidade do cabo liga a um braço biarticulado ao centro para que a força aplicada seja transmitida sem sofrer alteração do seu valor.

### **3.3. Descrição do programa em Labview**

Um programa em Labview compreende dois níveis: a janela de programação por blocos que contém os objetos que levam a cabo as várias tarefas e estão dispostos e unidos de forma lógica; a janela frontal de apresentação que contém o grafismo que é apresentado ao utilizador incluindo as saídas programadas ao nível dos blocos.

Os objetivos de automatização do ensaio através do Labview foram: (a) uniformizar os ensaios no que respeita às variáveis de ensaio para garantir maior repetibilidade; (b) permitir a aquisição de dados em tempo real durante o ensaio, (c) otimizar o tempo ao permitir ao utilizador monitorizar o ensaio, enquanto desenvolve a pesquisa.

### Janela frontal de apresentação

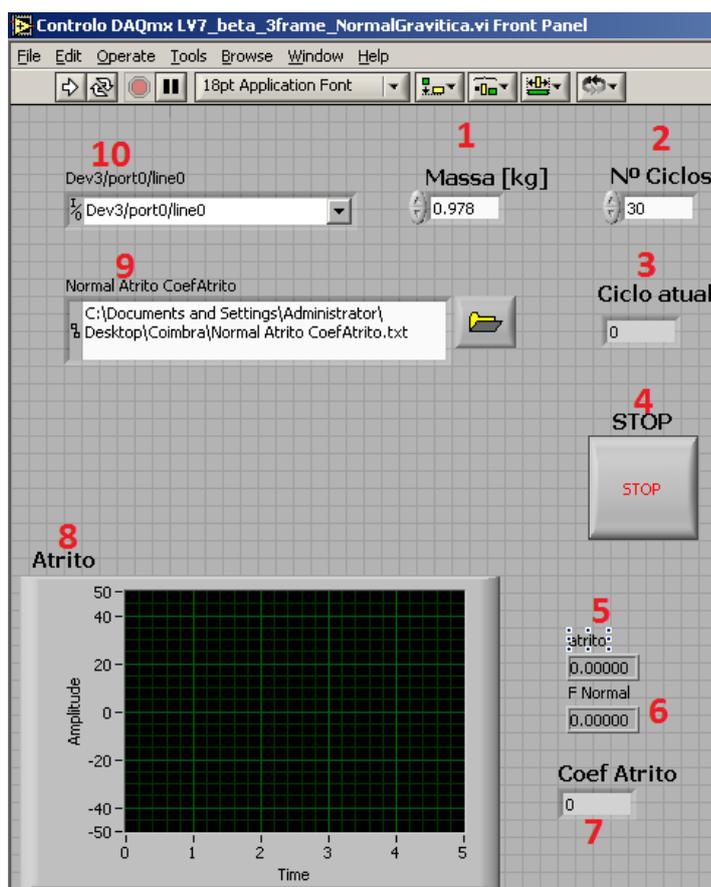


Figura 3.3 Janela frontal de apresentação

A Figura 3.3 mostra o aspeto que o programa tem para o utilizador.

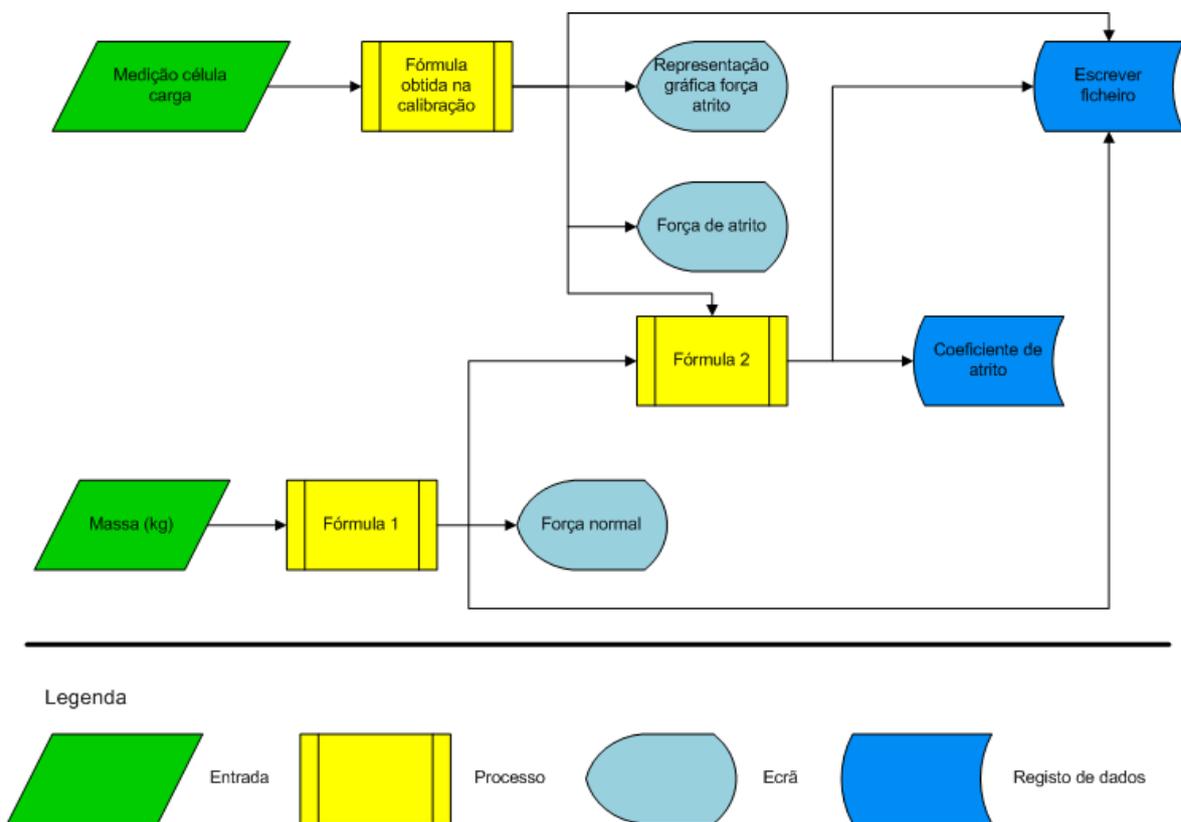
Legenda:

- 1 - Valor das massas calibradas suspensas
- 2 - Nº total de ciclos de travagem no ensaio
- 3 - Número do ciclo a ser efetuado
- 4 - Botão de paragem
- 5 - Força de atrito nessa travagem
- 6 - Força Normal nessa travagem
- 7 - Coeficiente de atrito
- 8 - Gráfico da força de atrito - tempo
- 9 - Ficheiro de destino dos dados
- 10 - Localização eletrónica do dispositivo de controlo e aquisição de dados

### Janela de programação por blocos

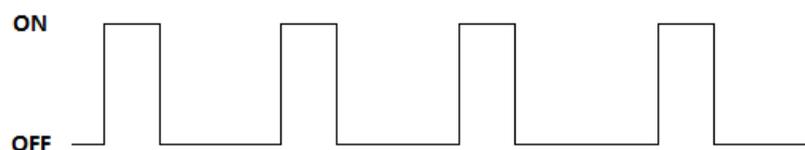
A programação por blocos que está na base deste programa é completamente original e foi desenvolvida no âmbito deste trabalho. No anexo B encontra-se um *print screen* da janela de blocos. Para mais fácil interpretação está apresentado na

Figura 3.4 um fluxograma simplificando essa programação por objetos.



**Figura 3.4** Fluxograma da programação por blocos

Neste fluxograma da Figura 3.4 está apresentada toda a lógica processada em cada uma das  $n$  travagens do ensaio. Cada uma das  $n$  travagens tem um determinado tempo ON e um determinado tempo OFF. O objetivo era que o ensaio decorresse segundo uma onda quadrada como se vê na Figura 3.5.



**Figura 3.5** Onda quadrada

As entradas do programa são duas: o sinal elétrico recebido na placa de aquisição vindo da célula de carga da Força de atrito; e o valor de massa acoplada ao sistema, introduzido pelo utilizador.

O sinal elétrico da célula de carga é convertido de diferença de potencial para força através da fórmula que foi obtida na calibração do sistema.

O valor de massa introduzido pelo utilizador (kg) é multiplicado pela aceleração gravítica para se obter a Força Normal.

Tendo assim o valor de Força Normal e de Força de Atrito procede-se ao cálculo de coeficiente de atrito através da sua divisão (Lei de Coulomb).

Os parâmetros de ajuste do ensaio são (1) o número de ciclos, (2) o tempo ON, (3) o tempo OFF.

O número de ciclos e o tempo ON foram geridos de forma a tentar perfazer os 700m de travagem. Uma vez que existia ligeira discrepância entre o tempo ON programado e o verificado, a distância real de travagem diferiu sempre ligeiramente. Como será explicado adiante esta variação teve o seu erro minimizado pelo ajuste de distância percorrida com a introdução do número de rotações indicado no conta ciclos da máquina de ensaios.

O tempo ON representa o tempo de rotação do banco de ensaios. Variou entre 6s para os ensaios de maior velocidade e 9s para os ensaios a menor velocidade

O tempo OFF representa o tempo que o banco de ensaios fica sem movimento entre duas travagens consecutivas. Tem por objetivo evitar o efeito da degradação térmica em situação não realista devido à menor escala e diferentes proporções do banco de ensaios e da roda real da bicicleta.

A saída mais importante para os cálculos posteriores é a escrita de dados no ficheiro *Normal Atrito CoefAtrito*. Existem ainda algumas saídas para permitir em tempo real, enquanto decorre o ensaio, que o utilizador saiba os valores de força normal, força de atrito,  $\mu$  e veja a variação da força de atrito em apresentação gráfica em tempo real. Outra variável importante do programa de controlo e aquisição de dados, é o estado de um sinal digital que é utilizado para controlar os tempos de rotação e de paragem nos vários ciclos que integram um ensaio.

### 3.4. Caracterização dos materiais

#### 3.4.1. Descrição do disco compósito fabricado

O disco compósito usado nos ensaios foi fabricado no departamento de Eng<sup>a</sup> Mecânica da Universidade de Coimbra.

Começou-se por colocar manualmente (*hand lay-up*) 8 camadas de tecido de fibra de carbono. O tecido é de tipo Biaxial [0°/90°]. O módulo de Young é de 230 GPa, a gramagem é 196 g/m<sup>2</sup>. A referência do tecido usado é: *Carbon Fibre Cloth Fabric 3k Plain Weave 200gsm*. Durante a colocação do tecido, este foi sendo impregnado com uma mistura de 2/3 de resina e 1/3 de endurecedor. A resina termoendurecível epoxídica (Chemstone referência 520) é líquida, transparente e o seu  $\rho$  é igual a 1,16 g/cm<sup>3</sup>. O endurecedor (referência 523) é líquido, amarelo e a sua densidade é de 1 g/cm<sup>3</sup>. O ciclo de cura e de pós-cura foi de 8h à temperatura de 20°C.

A cura decorreu numa atmosfera controlada e isolada, em vácuo no interior de uma película plástica. A Figura 3.6 mostra um corte transversal que permite visualizar a secção reta da placa que foi cortada para obter a geometria do disco de 160 mm de diâmetro. São visíveis as camadas sobrepostas e é possível ver a sua ondulação.

A imagem da Figura 3.7 mostra o aspeto da superfície do disco acabado de polir. São visíveis nos pontos de cruzamento da malha de tecido alguns defeitos que em certos casos não estão totalmente impregnados de resina. Esses defeitos pontuais são cavidades cujos limites expostos atuam como arestas de corte sobre o calço de travão durante o ensaio. Analisou-se um segmento de aro proveniente de uma roda ZIPP e verificou-se que a principal diferença no aspeto era a menor densidade de defeitos. A obtenção de uma placa de melhor qualidade de construção implicaria maior investimento, o que pode ser ponderado num trabalho futuro.

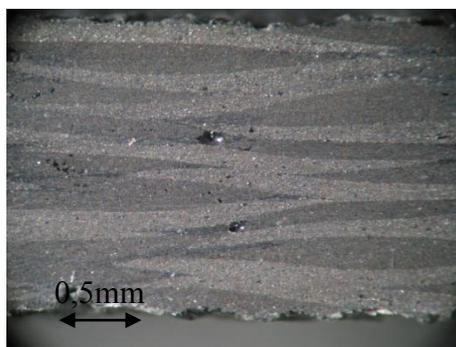


Figura 3.6 Secção reta da placa de compósito

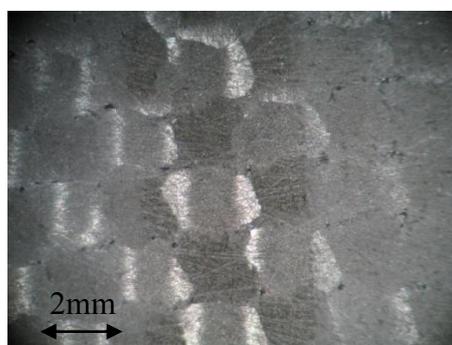


Figura 3.7 Superfície polida do disco compósito

### 3.4.2. Descrição do material do pino

O pino não foi submetido a análise química para se conhecer exatamente a sua composição mas supõe-se que a matriz seja um polímero do tipo NBR (*Nitro Butyl Rubber*). Contém reforços com geometria de fibras soltas.

Através da observação ao microscópio eletrónico de varrimento foi possível caracterizar o material dos calços. Essa análise consta do capítulo 4.

As fibras soltas apresentam uma forma alongada semelhante a um paralelepípedo de dimensões médias de 40µm de comprimento e espessura de 5 µm. As ligações químicas destas fibras soltas à matriz em que se inserem são fracas, possivelmente do tipo *Van der Waals*. São visíveis fibras mais curtas cujas dimensões e forma são irregulares. Provavelmente as fibras têm uma dimensão típica constante, mas a orientação em relação ao plano de observação produz esta variação aparente.

### 3.5. Procedimento

O procedimento experimental é importante não só para manter o rigor científico para obter resultados fidedignos, como é também importante para evitar os erros na preparação do ensaio que podem resultar na inutilização dos dados obtidos. Por exemplo, se todos os passos forem cumpridos menos o pesar do pino então não é possível no final do ensaio saber a massa inicial do pino pelo que se inutilizam os resultados, o que representa uma perda de tempo, e de recursos materiais. A necessidade do procedimento escrito resulta também da natureza do próprio método científico. De facto a experiência deve estar descrita de tal forma que possibilite a um qualquer investigador repetir a experiência para verificar os resultados.

O laboratório onde foi desenvolvida a parte experimental da dissertação está apresentado na Figura 3.8. Na Figura 3.9 vê-se em pormenor o banco de ensaios usado para o ensaio.



**Figura 3.8** Laboratório de desgaste no CEMUC



**Figura 3.9** Banco de ensaios usado

Tendo frisado a importância de seguir sempre o procedimento experimental, abaixo encontram-se descritas em pormenor todas as etapas a seguir para proceder à correta experimentação científica.

- I) Antes de iniciar o ensaio

a) Selecionar ficheiro destino

O programa em Labview escreve os dados na diretoria especificada pelo utilizador no painel frontal. A diretoria introduzida e o nome do ficheiro foi sempre: *Normal Atrito CoefAtrito*. O nome é uma referência às 3 colunas de informação relevante.

b) Regular tempo *ON*; Selecionar número de ciclos

Há a possibilidade de alterar alguns parâmetros no programa em Labview. Os dois parâmetros que são de extrema importância e que se alteraram de ensaio para ensaio foram o tempo de travagem e o número de ciclos no ensaio.

c) Repôr o conta ciclos a zero

Ao repor sempre a zero o conta ciclos no início de cada ensaio foi possível no final saber quantas rotações o disco tinha efetuado. Assim, na análise dos dados em *MS Excell* procedeu-se a uma correção da distância de travagem teórica que resultava do tempo programado, pela distância real que tinha sido ensaiada, assumindo-se que todos os ciclos duravam o mesmo tempo.

d) Regular o frequencímetro/Verificar posição do pino (raio)

Elaborou-se antes dos ensaios uma correspondência entre a regulação do frequencímetro e a velocidade angular induzida no banco de ensaios. Deste modo quando se procedia a um ensaio com determinada velocidade estabelecida sabia-se qual a regulação do frequencímetro e qual o raio de atuação do pino sobre o disco. O pino atuou sempre sobre uma pista nova no disco, os seja polida, lavada com água e seca antes do ensaio.

e) Pesar o pino

Pesar o pino antes de iniciar o ensaio é necessário para se poder calcular a massa perdida durante os ciclos de travagem. Trata-se de uma variável que se conhece integrada ao longo da distância percorrida nos ciclos de travagem compreendidos no ensaio.

II) Durante o ensaio

a) Verificar se o desgaste do pino é excessivo

É importante estar presente ao longo do ensaio e prestar atenção à evolução do desgaste do pino ao longo das sucessivas travagens. No caso de o desgaste ser tal que o porta pinos fica próximo do disco, então o ensaio é interrompido e consideram-se os dados recolhidos até então.

III) Após o ensaio

a) Guardar o ficheiro criado na diretoria apropriada (nome)

Para evitar sobreposição de dados, no final de cada ensaio o ficheiro criado sofreu sempre uma alteração no nome (acrescento de prefixo com data e número de ensaio) e foi transferido para uma outra pasta.

b) Pesar o pino/Registrar o número total de ciclos

Após o ensaio, o pino foi sempre retirado, pesado, catalogado e observado ao microscópio ótico. Os detritos (3<sup>os</sup> corpos) gerados foram também observados e foi confirmado serem provenientes do pino e nunca do disco. Na realidade, sempre que se observou o disco ao microscópio foi difícil distinguir as zonas atuadas pelo pino em relação à superfície original. A única alteração possível de observar foi a acumulação de detritos do pino acumulados nos defeitos do material compósito.

c) Observar ao microscópio ótico o pino e o disco

Procedeu-se a uma cuidada análise ao microscópio ótico para averiguar se haveria eventualmente desgaste no disco. Ao observar o pino notou-se em alguns ensaios a formação de uma película superficial de detritos.

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As duas variáveis de entrada dos ensaios são a força normal e a velocidade de escorregamento. Estabeleceram-se 5 valores para a força normal que foram ensaiados a uma determinada velocidade. Estabeleceram-se 4 valores de velocidade que foram ensaiados com uma determinada carga normal. Estes 9 ensaios foram levados a cabo em condições de contacto seco e em condições de contacto molhado.

As variáveis de saída analisadas foram a força de atrito ao longo do ensaio e a massa de calço de travão desgastada no final do ensaio. O volume desgastado foi calculado. O coeficiente de atrito é também uma variável de saída e foi calculado pelo quociente da força de atrito pela força normal (Lei de Coulomb). A distância de escorregamento alvo foi de 700m. Este valor surgiu dos ensaios iniciais pois era um valor que permitia ter um desgaste do material do calço de travão mensurável na maioria dos ensaios. Também se teve a preocupação de não procurar distâncias de travagem demasiado longas que tornariam mais moroso o processo de experimentação sem se obterem necessariamente melhores resultados. Isto porque os valores de coeficiente de atrito regra geral estabilizam a partir de uma distância relativamente curta, como se poderá constatar.

No anexo A encontram-se as tabelas de dados obtidas do Labview em cada ensaio. Cada uma das páginas representa os dados relativos a um ensaio típico realizado. De seguida vai proceder-se a uma clarificação da lógica da apresentação dos dados introduzidos, dos dados de calibração e dos dados de saída.

A primeira tabela de cada página do anexo apresenta, para cada uma das 32 travagens programadas em Labview, os valores força de atrito medidos pela célula de carga do banco de ensaios e o coeficiente de atrito que é calculado automaticamente. Pretende-se percorrer uma distância de cerca de 700m para o ensaio, no entanto existe uma flutuação na distância teórica programada e na distância realmente percorrida. A maneira de reduzir ao mínimo o erro que daí advém é o uso do valor de distância percorrida obtido pelo número de voltas contabilizado pelo conta voltas e tendo também em conta o raio (distância de atuação do centro do pino ao eixo).

A segunda tabela contém os valores medidos de massa antes e após o ensaio e o cálculo da sua variação. Note-se que para facilitar a leitura dos valores obtidos, as unidades da massa perdida são *mg* e as unidades de massa inicial e massa final são *g*. O último parâmetro calculado é importante para uniformizar os resultados para poder comparar ensaios com distâncias percorridas diferentes.

A terceira tabela apresenta os dados estatísticos mais relevantes para a análise do ensaio. Salienta-se que os dados estatísticos são relativos ao período mais estável da força de atrito depois do fenómeno de *wear in* ter acabado. O fenómeno de *wear in* deu-se ao longo de distâncias diferentes para os diferentes ensaios.

Separadamente apresenta-se o valor da energia dissipada nesse ensaio.

#### 4.1. Análise dos dados de atrito

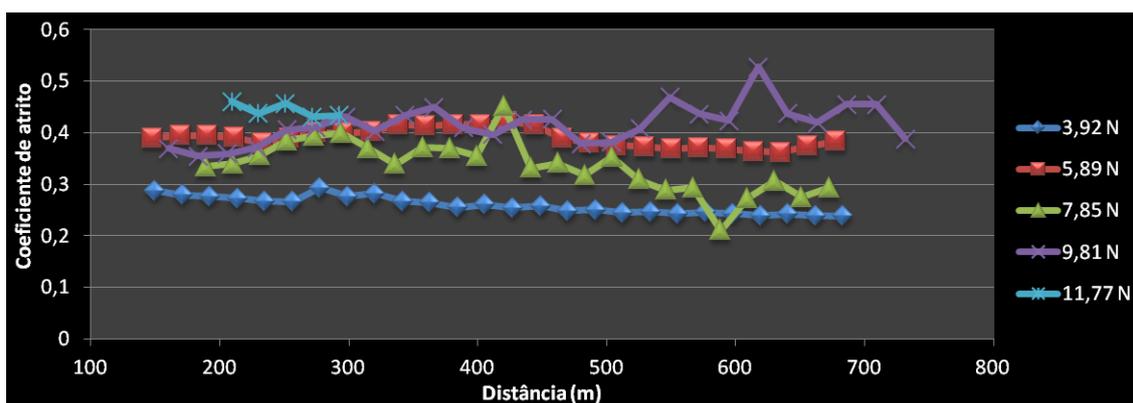


Figura 4.1 Estudo da influência da força normal - contacto seco

Note-se que o gráfico da Figura 4.1 representa todo o ensaio menos o período inicial de teste, período esse apresentado no gráfico da

Figura 4.2. Esta lógica é repetida para a análise posterior. Esse período inicial é afetado pelo fenómeno de *wearing-in* pelo que deve ser analisado em separado e não ser contabilizado para os dados estatísticos do ensaio. De facto, tal como reportado em Blau, P. J. (1995), "Friction Science and Technology: From Concepts to Applications", este período ocorre em condições instáveis e altamente não reprodutíveis.

Relativamente à Figura 4.1, esta série de ensaios tem o objetivo de avaliar qual o efeito que tem a variação da força normal aplicada em condições secas. Todos os 5 ensaios foram realizados à velocidade de 3,5 m/s, a carga variou de 3,92 N a 1,78 N.

Analisando o comportamento da força de atrito ao longo da distância de travagem do ensaio, pode-se dizer que para todos os ensaios, exceto o de 3,92 N, o

coeficiente de atrito foi aproximadamente o mesmo e tem o valor de 0,4. A média apresentada na tabela de análise estatística vem confirmar essa semelhança entre os ensaios. Quanto ao valor de 0,26 da média no ensaio de 0,4 kg pode-se supor a hipótese de que as oscilações no cabo que suspende a massa tenham sido mais significativas devido à menor inércia e que tal facto se tenha repercutido numa força normal aplicada menor no momento da aquisição de dados. Ainda assim esta hipótese é pouco provável por duas razões: este ensaio teve uma notável estabilidade de resultados; e o valor de força de atrito obtido para cada travagem é resultado de uma média de aquisições, o que dificultaria um desvio constante para um valor de coeficiente de atrito abaixo do esperado.

Analisando os ensaios de condições de força normal de 5,89 N até à força normal 9,81 N nota-se que o incremento da força normal resulta numa maior oscilação no coeficiente de atrito. Uma vez que a força normal foi considerada constante, essa oscilação no coeficiente de atrito representa necessariamente uma oscilação na força de atrito. Ainda assim, o facto de as linhas de tendência linear geradas sobre cada ensaio resultarem numa reta aproximadamente horizontal demonstra que o coeficiente de atrito é tendencialmente constante ao longo do ensaio - o que prova que já terminaram os fenómenos de *breakin-in*, *running-in*, *wearing-in*.

O ensaio de carga máxima produziu um desgaste extremamente acentuado, de tal modo que o ensaio teve que ser interrompido porque a altura do pino atingiu um nível crítico que arriscaria o contacto do porta-pinos com o disco. Tal facto levanta a hipótese de que a lei de desgaste uniforme apresentada no estado da arte não se adequa a este ensaio.

O período inicial é principalmente marcado pelo fenómeno de *wearing in*, o que significa que este comportamento não constante da força de atrito é ultrapassado ao final de uma determinada distância de travagem que foi de cerca de 150 m.

Na escala real, numa bicicleta em cenário de calços novos, seria de esperar que o *wearing in* se manifestasse durante uma maior distância. Tal dever-se-ia ao facto de que o calço de travão real tem maior área do que o pino e tem maior diferença na pressão de contacto de atuação em travagem de uma extremidade para a outra. A extremidade do calço com menor pressão de contacto demora mais tempo a estabilizar a força de atrito que exerce até todo o calço exercer um valor constante. Para a correta comparação com o comportamento dos componentes na estrada, seria necessário proceder a ensaios em campo.

No período de *wearing-in*, em todos os ensaios desta série revela-se um comportamento com tendência decrescente - ver

Figura 4.2. Tal pode dever-se ao facto de a área de contacto inicial ser menor, o que resulta numa maior pressão de contacto, no início. Essa área de contacto tende a manter-se constante a partir de uma determinada distância.

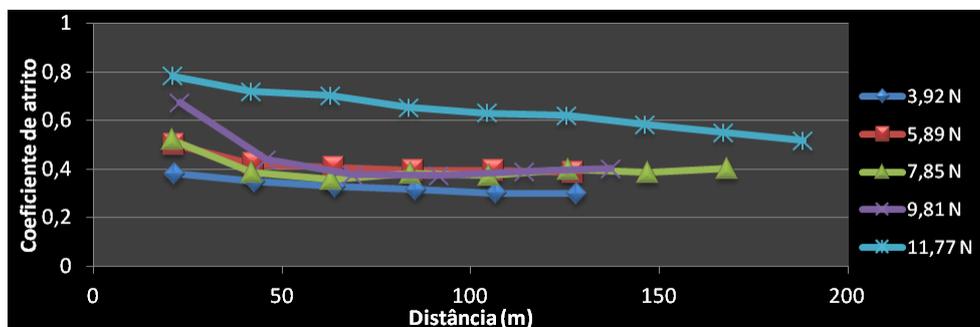


Figura 4.2 *Wearing-in* no estudo da influência da força normal - contacto seco

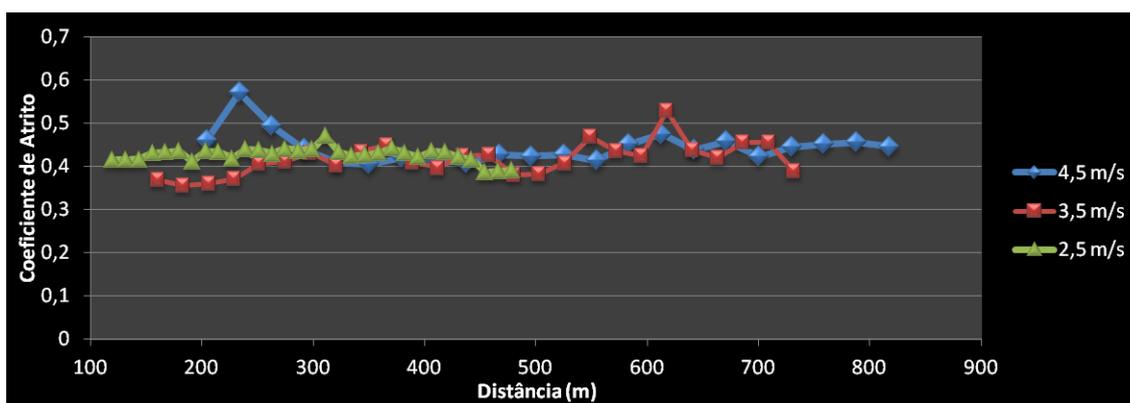


Figura 4.3 Estudo da influência da velocidade - contacto seco

Esta série de 4 ensaios pretende estudar o efeito da variação de velocidade desde 2,5m/s até 5,5 m/s, sempre com a carga de 9,81 N.

Pode dizer-se que o coeficiente de atrito é aproximadamente constante para as velocidades de 2,5; 3,5; 4,5 m/s e tem o valor de 0,42.

É de notar que existe uma grande diferença na taxa de desgaste do ensaio a 4,5m/s para o ensaio a 5,5 m/s, o qual foi interrompido ao fim de apenas 5 travagens devido ao acentuado desgaste. A Figura 4.3 é relativa ao estudo da influência da velocidade em contacto seco. Nesta figura são apresentados apenas 3 ensaios porque como foi dito, o de maior velocidade não ultrapassou o período de *wearing-in* e foi interrompido à distância de 170 m. A velocidade é determinante no valor da potência dissipada por

atrito. De facto, a potência dissipada por atrito pode ser calculada pelo produto da velocidade de escorregamento pela força de atrito. Atendendo a que ambos os materiais em contacto têm uma reduzida condutibilidade térmica, é de esperar que o aumento de velocidade origine um aumento significativo da temperatura. O aumento de temperatura terá como consequência uma variação das propriedades dos materiais e, provavelmente, existirá uma temperatura de transição de comportamento do material do calço de travão. O esclarecimento deste assunto merece um estudo dirigido à avaliação da influência da temperatura no atrito e no desgaste.

As linhas de tendência linear que resultam de qualquer um dos ensaios do gráfico da Figura 4.3 são horizontais provando a estabilidade da força de atrito durante o ensaio.

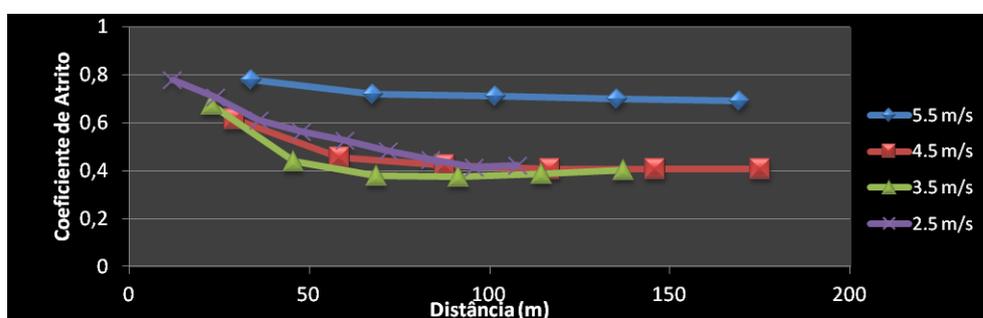


Figura 4.4 *Wearing-in* no estudo da influência da velocidade - contacto seco

O valor de coeficiente de atrito nestes ensaios é da mesma ordem de grandeza do valor encontrado no conjunto de ensaios anteriormente analisado na Figura 4.1. Esta constatação demonstra que o coeficiente de atrito tem uma variação muito pequena para velocidades de escorregamento compreendidas entre 2,5 e 4,5 m/s.

Quanto ao gráfico da Figura 4.4 relativo ao período afetado por *wearing-in*, tal como na série de ensaios anterior, o coeficiente de atrito apresenta uma tendência decrescente até estabilizar, o que se dá por volta dos 150m, variando consoante a velocidade imposta mas sem uma tendência definida que permita relacionar velocidade com período de *wearing-in*.

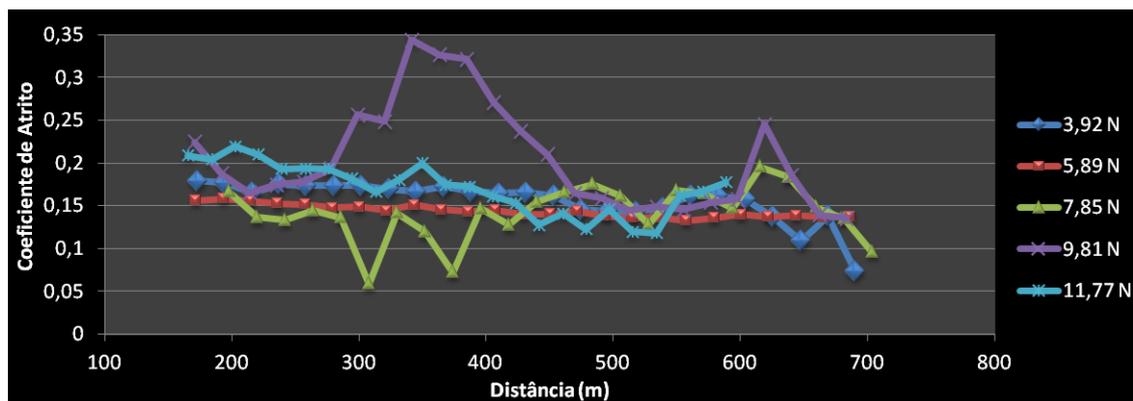


Figura 4.5 Estudo da influência da força normal - contacto molhado

O gráfico da Figura 4.5 refere-se aos 5 ensaios de 3,5 m/s e força normal entre 3,92 a 11,77 N em contacto molhado.

É notória uma grande oscilação nos resultados, muito mais acentuada que em condições semelhantes mas a seco na Figura 4.1. O ensaio de 9,81 N de força normal atingiu valores anormalmente altos de coeficiente de atrito em presença de água. Tal pode levar a supor que o ensaio tenha tido presença insuficiente de água no seu decorrer, entre a distância 350 e 400 m.

Os ensaios de menor força normal (3,92 e 5,89N) têm um comportamento mais estável, apresentando valores de  $\mu$  constantes de cerca de 0,15.

Analisando o período de *wearing-in* relativo a esta série de ensaios (Figura 4.6), nota-se uma aleatoriedade acentuada, o que não é de todo inesperado depois de lida a descrição de Blau, P. Por exemplo, o ensaio de 3,92 N de força normal iniciou-se com coeficiente de atrito baixo, que acabou por subir e estabilizar. Já o ensaio com 5,89 N de força normal iniciou-se com valores mais altos que o esperado e baixou, estabilizando totalmente a partir dos 150 m.

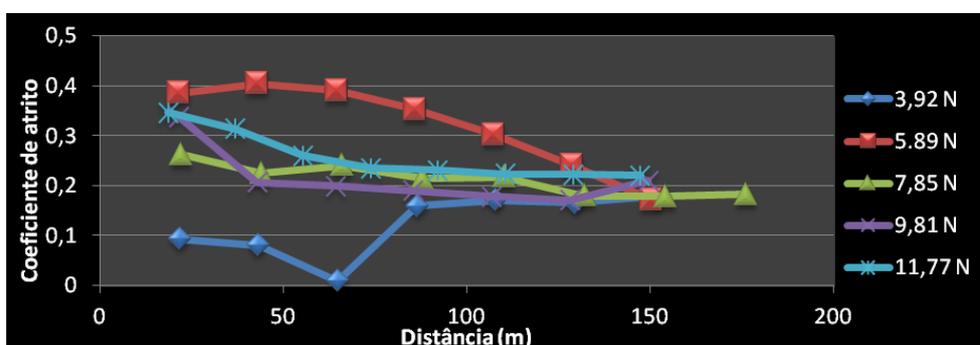


Figura 4.6 *Wearing-in* no estudo da influência da força normal - contacto molhado

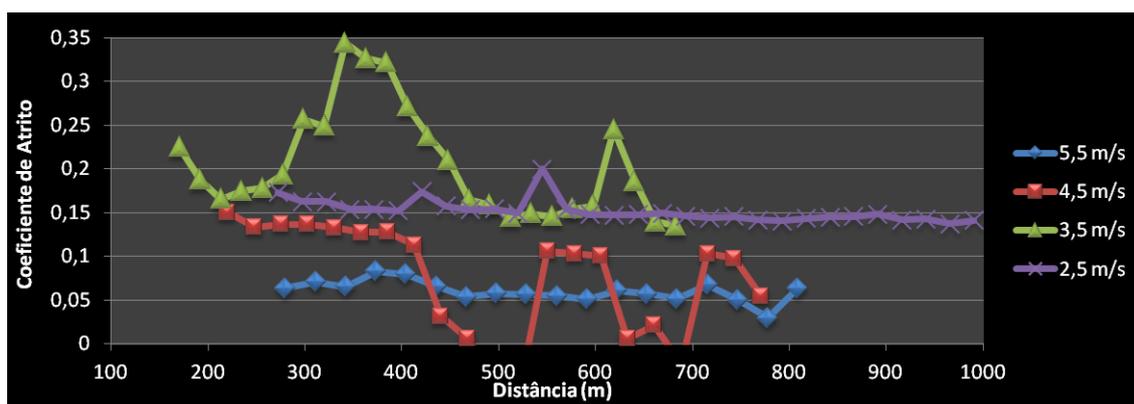


Figura 4.7 Estudo da influência da velocidade - contacto molhado

Esta série de ensaios apresentada na Figura 4.7 destinou-se a estudar o efeito da velocidade de escorregamento com contacto molhado. Assim, realizaram-se ensaios com valores de velocidades compreendidos entre 2,5 m/s e 5,5 m/s mantendo-se constante o valor da força normal, de 9,81 N.

Nota-se logo neste gráfico que o coeficiente de atrito no ensaio de 4,5m/s tem duas quebras atingindo valores ligeiramente abaixo de zero na distância 500m e 690m. A explicação que se propõe para estes valores negativos tem dois fatores: o fenómeno de habitualmente designado por hidroplanagem, que corresponde à ocorrência de lubrificação hidrodinâmica; e a margem de erro, por exemplo devido à assunção de força normal constante e igual resultante das massas suspensas. (Sem vibrações tal suposição não resulta na introdução de erro, mas no caso deste trabalho as vibrações eram de pequena amplitude mas não eram totalmente inexistentes). É impossível ter uma força de atrito negativa pois isso significaria que esta se desenvolveria no mesmo sentido do movimento, o que vai contra a definição.

Verifica-se uma tendência de redução do coeficiente de atrito nos dois ensaios de maior velocidade, o que se deve a hidroplanagem. A geometria plana do disco que reproduz a parede plana do aro das rodas em compósito é propícia ao fenómeno. No caso de aros de alumínio, o perfil da parede de travagem apresenta sulcos para o eficaz escoamento da água reduzindo o fenómeno que é perigoso no uso da bicicleta com este tipo de rodas em tempo de chuva.

O ensaio de 2,5 m/s foi prolongado para averiguar se haveria alguma outra transição não visualizável nos típicos 700 m de travagem. Tal transição ou variação não se verificou a nível do comportamento do atrito, sendo o coeficiente de atrito dos 700 m até ao final, próximo dos 1000 m, completamente estável.

O gráfico relativo ao período de *wearing-in* (Figura 4.8) não permite grandes ilações uma vez que o coeficiente de atrito dos vários ensaios foi bastante aleatório.

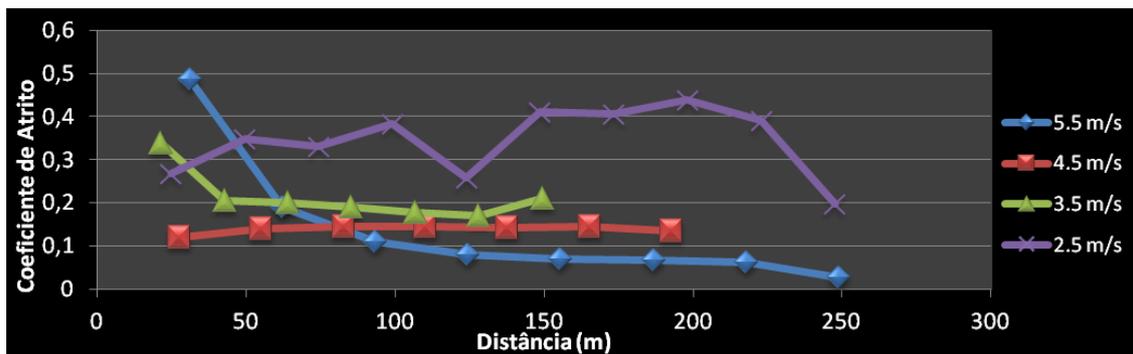


Figura 4.8 *Wearing-in* no estudo da influência da velocidade - contacto molhado

## 4.2. Análise dos resultados de desgaste

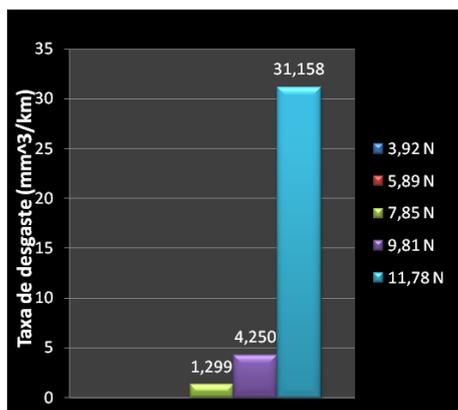


Figura 4.9 Taxa de desgaste a seco

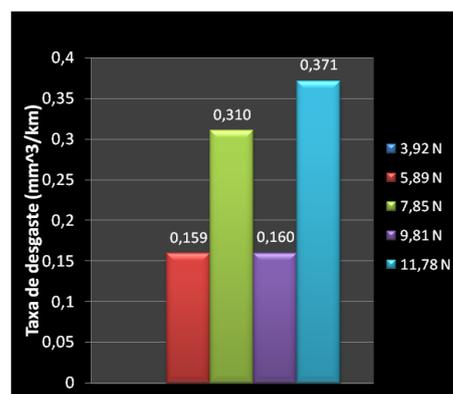


Figura 4.10 Taxa de desgaste em molhado

As figuras Figura 4.9 e Figura 4.10 mostram a taxa de volume desgastado pela distância percorrida, ensaio seco e ensaio molhado respetivamente. Ambas as séries foram efetuadas para as 5 cargas estabelecidas, de 3,92 a 11,77 N. Comparando ensaios equivalentes com contacto seco e molhado, esta taxa varia muito para elevadas velocidades. No caso dos ensaios de 7,85 N e 9,81 N o valor da taxa de desgaste varia uma ordem de grandeza da condição molhada para seca. No caso de carga 11,77 N, a relação de molhado para seco desta taxa apresenta uma discrepância de duas ordens de grandeza. Uma explicação é que no ensaio a seco, esta carga resulta em condições extremamente severas para o pino uma vez que as forças de atrito desenvolvidas são em média 5,2 N. Já no ensaio molhado, devido à lubrificação hidrodinâmica resultante da presença de água entre as superfícies antagonistas, o valor de força de atrito é em média 2 N. Esta diferença

associada ao facto de que o disco tem grande densidade de defeitos superficiais explicam em parte a diferença de desgaste nas duas condições testadas. No subcapítulo seguinte analisa-se a diferença de desgaste entre contacto seco e molhado, do ponto de vista de mecanismos de desgaste e chega-se a uma conclusão diferente.

É necessário tentar entender o fenómeno que é o comportamento da taxa de desgaste com a mudança de força normal em contacto molhado (Figura 4.10). Tem-se para a carga 5,89 N uma taxa de desgaste de cerca de 0,16 mm<sup>3</sup>/km; para a carga 7,85 N tem-se cerca do dobro: 0,30 mm<sup>3</sup>/km; para a carga 9,81 N o valor da taxa desce novamente para cerca de 0,16 mm<sup>3</sup>/km. Este comportamento aparentemente incompreensível pode ter duas razões. A primeira, e que deve ser descartada pelo rigor com que foi levada a cabo a experimentação seria a incorreta pesagem do pino ensaiado em molhado com a carga de 9,81 N. No caso improvável de o pino ter sido pesado sem estar completamente seco, então o baixo valor de massa desgastada e de taxa de desgaste com a distância seriam explicados. A segunda hipótese é o caso de se encontrar, na condição de 9,81 N em molhado, uma vizinhança de condição ótima. Ou seja, o desgaste seria contra a lógica, menos acentuado nesta vizinhança que em condições menos severas como a força normal 7,85N. Isto dever-se-ia ao facto de o material testado e todo o sistema entrarem num regime de funcionamento ideal que resultaria num desgaste anormalmente baixo. Para saber ao certo se esta teoria faz sentido, seria necessário proceder à experimentação com contacto molhado, à mesma velocidade de 3,5 m/s com várias cargas entre 7,85 e 11,77 N para avaliar os valores e averiguar se apresentam um mínimo nesta região.

Para uma análise dos gráficos anteriores (Figura 4.9 e Figura 4.10), será apresentada uma fórmula abordada anteriormente e uma nova obtida a partir da primeira.

Começando pela equação

$$V \propto F S$$

pode-se passar para a forma

$$\frac{V}{S} \propto F$$

Ora os gráficos das figuras Figura 4.9 e Figura 4.10 têm em abcissas a força normal (discretizada) e em ordenadas o quociente do volume pela distância. Logo deveriam apresentar uma nítida tendência crescente. No gráfico Figura 4.10 em condição molhada, é difícil a perceção desta proporcionalidade pela possível vizinhança de condição ótima abordada anteriormente. Já no gráfico 4.9 em contacto seco, a proporcionalidade é

visualizável apesar de não parecer do tipo linear mas possivelmente potencial. O número de valores de força normal é insuficiente para estabelecer uma linha de tendência aceitável.

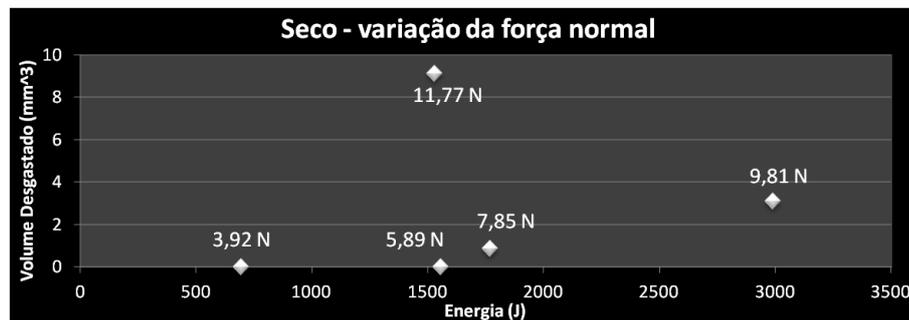


Figura 4.11 Gráfico Energia-Volume dos ensaios de contacto seco

O gráfico apresentado na figura Figura 4.11 mostra como se relaciona a energia dissipada com o volume desgastado nos ensaios de contacto seco. Em alguns pares de metais a relação energia-volume é linear, contudo este padrão não se verificou nestes ensaios, com materiais em teste. Os dois primeiros valores de carga (3,92 e 5,89 N) têm volume desgastado nulo. Os dois pontos seguintes no gráfico (7,85 e 9,81 N) fazem crer que se está perante uma tendência linear mas a verdade é que o ensaio de força normal 11,77 N sai fora do esperado porque tem um volume desgastado maior mas a energia dissipada foi menor devido à curta distância percorrida até ao desgaste completo do pino.

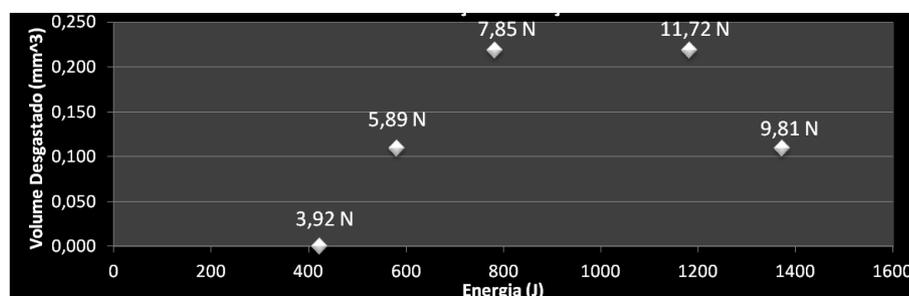
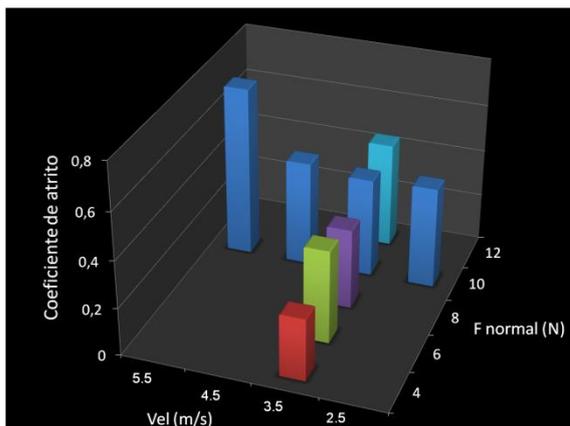


Figura 4.12 Gráfico Energia-Volume dos ensaios de contacto molhadas

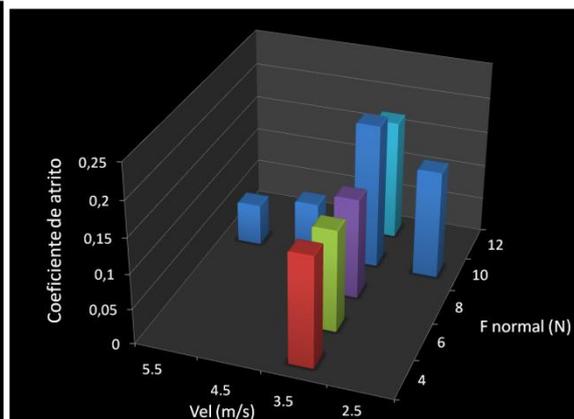
Quanto ao gráfico equivalente mas em condições molhadas, na Figura 4.12, vê-se que os três primeiros pontos apresentam tendência linear mas o ponto seguinte (9,81 N) destaca-se por ter uma energia associada muito maior que o anterior (7,85 N). Isto deve-se à diferença nos coeficientes de atrito que é de 0,20 no maior energia (9,81 N) e de 0,14 no de menor energia (7,85 N). Apesar de ter energia associada superior, tem um volume desgastado inferior. Esta combinação de maior força de atrito média e menor volume desgastado é inesperada. Os ensaios foram cumpridos com rigor, mas a única forma de verificar a autenticidade desta combinação seria repetir este ensaio, e possivelmente repetir toda esta série de ensaios. Olhando para o gráfico da Figura 4.5 vê-se que o

comportamento deste ensaio foi anormal uma vez que os valores de  $\mu$  tiveram grande subida na distância 350m. Isto poderia ser explicado pela presença insuficiente de água mas isso levaria a um volume de desgaste maior. Uma explicação possível é a possível limpeza da superfície do disco ter sido particularmente bem feita neste ensaio o que resultaria em maior coeficiente de atrito sem necessariamente maior desgaste, o que ainda assim é pouco credível. Outra possível explicação seria o facto de o ensaio ter decorrido não à velocidade alvo de 3,5m/s mas a uma velocidade abaixo, o que poderia ter resultado de erro humano ou desregulação própria do banco de ensaios. Uma velocidade mais reduzida aumentaria significativamente o atrito por ser menos sentido o fenómeno de hidroplanagem e contudo não aumentaria o desgaste por ser menor a velocidade.

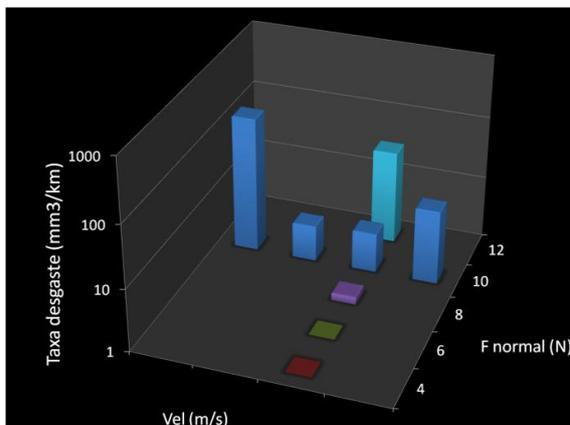
Analisando o ponto de força normal 11,77 N, vê-se que a energia cresceu por se ter desenvolvido maior força de atrito, contudo o desgaste foi semelhante ao sentido no ensaio de 7,85 N. O efeito de hidroplanagem afeta o mecanismo de desgaste alterando a lei do comportamento força de atrito - desgaste resultante.



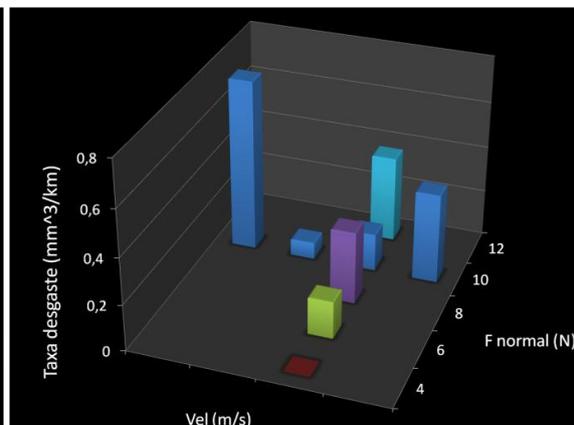
**Figura 4.13** Coeficiente de atrito nos ensaios de contacto seco



**Figura 4.14** Coeficiente de atrito nos ensaios de contacto molhado



**Figura 4.15** Taxa de desgaste dos ensaios de contacto seco



**Figura 4.16** Taxa de desgaste dos ensaios de contacto molhado

Na Figura 4.13 tem-se o gráfico relativo ao coeficiente de atrito em todos os ensaios secos. Vê-se que o coeficiente de atrito é, regra geral, constante. Pode-se dizer que praticamente não varia com a força normal (ensaios de velocidade = 3,5 m/s) e em termos de variação de velocidade, o único ensaio que se afasta dos 0,4 é o ensaio de velocidade máxima (5,5 m/s). Este ensaio teve desgaste muito acentuado e não houve distância suficiente de travagem no ensaio para que a força de atrito (e conseqüentemente o coeficiente de atrito) estabilizassem. Ainda assim parece que o coeficiente de atrito é maior neste ensaio porque poderá estar envolvido um mecanismo de desgaste diferente.

Na Figura 4.14 tem-se o gráfico do valor do coeficiente de atrito nos ensaios molhados. Nota-se que excetuando os ensaios de velocidade 4,5 m/s e 5,5 m/s, o coeficiente de atrito mantém-se para todos os ensaios entre 0,14 e 0,20. Ou seja, aproximadamente constante independentemente da força normal ou velocidade. Já para esses dois ensaios de maior velocidade, o coeficiente de atrito reduz-se para valores de cerca de 0,07. Esta redução dá-se partir de um patamar de velocidade que se localiza no intervalo ]3,5 ; 4,5] m/s. A razão da redução é o efeito de hidroplanagem.

Propõe-se para um projeto futuro a construção de aros em compósito com perfil semelhante ao que se encontra nos aros em alumínio.

A evolução da taxa de desgaste com o parâmetro força normal foi já analisada na Figura 4.9 e Figura 4.10. Nos casos de contacto seco, conclui-se que o aumento da força normal faz aumentar a taxa de desgaste, o que é mais notório para valores de força de 12 N, valor que faz aumentar fortemente esta taxa. Veja-se a Figura 4.15 relativa às taxas de desgaste nos ensaios de contacto seco. Analisemos a variação da taxa de desgaste com a influência da velocidade. Para a velocidade máxima de 5,5 m/s, a taxa de desgaste sobe para valores muito superiores a todos os outros ensaios (note-se a escala logarítmica no eixo vertical). Nos dois ensaios de 4,5 e de 5,5 m/s a taxa de desgaste teve valores aproximadamente semelhantes. Contudo, no ensaio de 2,5 m/s que foi prolongado por uma maior distância que o normal, vê-se um aumento da taxa de desgaste (mesmo sendo a taxa dividida pela distância) o que significa que se ultrapassou algum valor patamar de distância em termos de desgaste neste ensaio de 2,5 m/s ; 9,81 N. A jusante analisar-se-á do ponto de vista de morfologia superficial esta constatação para se poderem extrair conclusões.

Ao olhar para o gráfico da Figura 4.16 pode ver-se a taxa de desgaste dos ensaios realizados com presença de água. Os ensaios de 3,5 m/s com diversas cargas forma já analisados. Centrando atenções na variação da taxa com a velocidade. Nota-se de

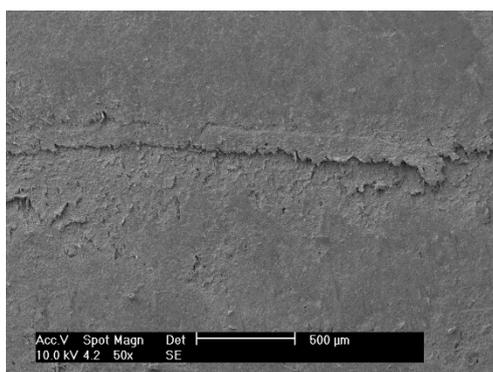
imediatamente que a taxa é significativamente maior para o ensaio de maior velocidade (5,5 m/s). No ensaio de velocidade 4,5 m/s a taxa é mais baixa que nos dois ensaios de baixa velocidade, pelo que se pode concluir que no intervalo [4,5 ; 5,5] m/s existe um patamar na taxa de desgaste que pode significar uma mudança no mecanismo de desgaste ou no tipo de lubrificação resultante da presença de água a esta velocidade.

### 4.3. Morfologia das superfícies de desgaste

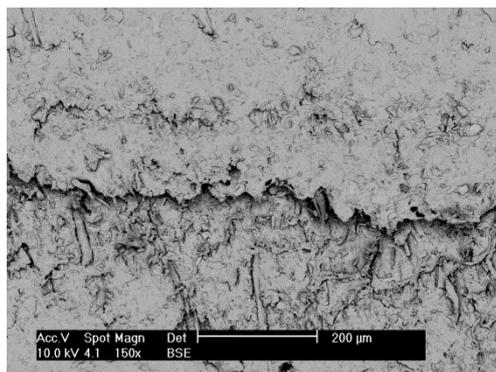
Com o objetivo de caracterizar o material constituinte do calço de travão cinzento comercializado pela SRAM e para avaliar o estado da superfície de desgaste após o ensaio recorreu-se ao microscópio eletrónico de varrimento do CEMUC (ver referência do equipamento no Anexo C). Observaram-se 6 pinos relativos a 6 ensaios: reduzida força normal, condições médias de velocidade e força normal, elevada carga; estas 3 situações em condições secas e estas 3 situações em condições molhadas.

#### 4.3.1. Apresentação das imagens de Microscopia eletrónica de varrimento

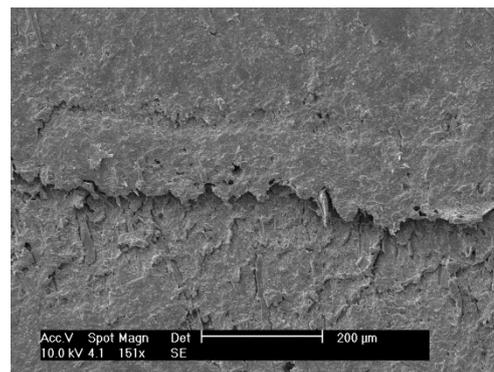
**Condição: 3,92N; 3,5m/s - contacto seco**



**Figura 4.17** Seco, reduzida força normal 1

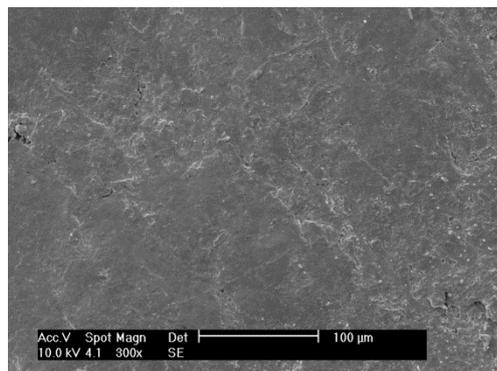


**Figura 4.18** Seco, reduzida força normal 2a

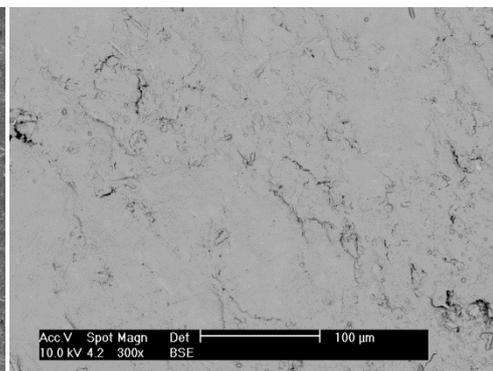


**Figura 4.19** Seco, reduzida força normal 2b

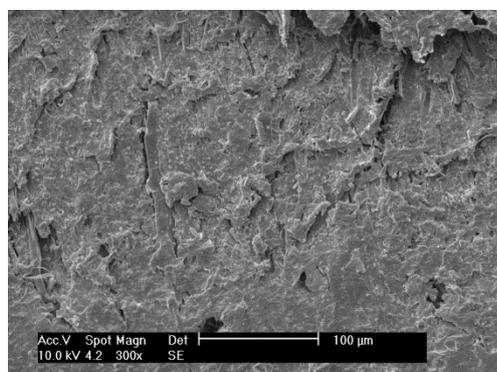
A imagem apresentada na Figura 4.17 mostra claramente duas zonas distintas. As imagens da Figura 4.18 e Figura 4.19 são ampliações da Figura 4.17. A metade superior está dividida da metade inferior. Na separação vê-se uma banda. A Figura 4.20 e a Figura 4.21 mostram em detalhe a região superior com ampliação 300x nos modos SE (eletrões secundários) e BSE (eletrões retrodifundidos). Pode ver-se que a metade superior é homogénea e contínua. Na Figura 4.22 vê-se em pormenor a metade inferior. Esta tem um aspeto rugoso, com relevos marcados mas sem falhas, toda a estrutura está bem unida.



**Figura 4.20** Seco, reduzida força normal 3a

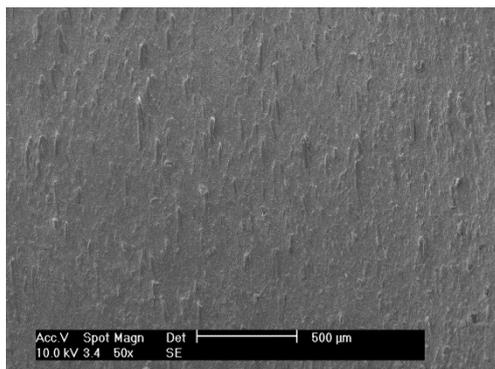


**Figura 4.21** Seco, reduzida força normal 3b

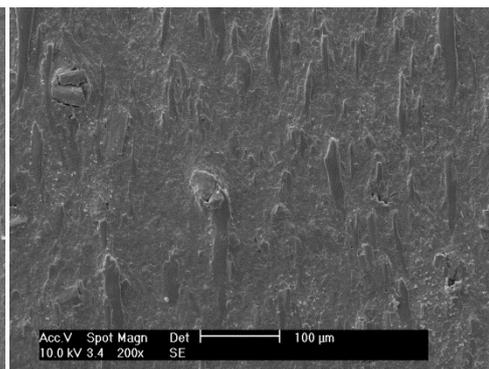


**Figura 4.22** Seco, reduzida força normal 4

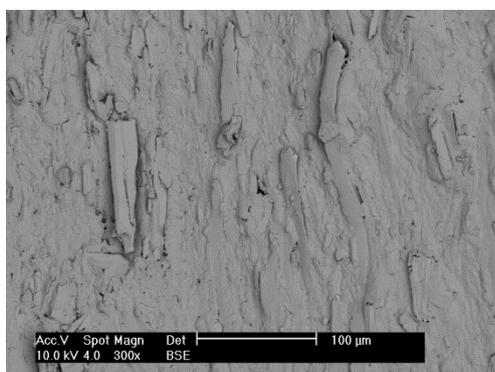
**Condição 9,81N; 3,5 m/s contacto seco**



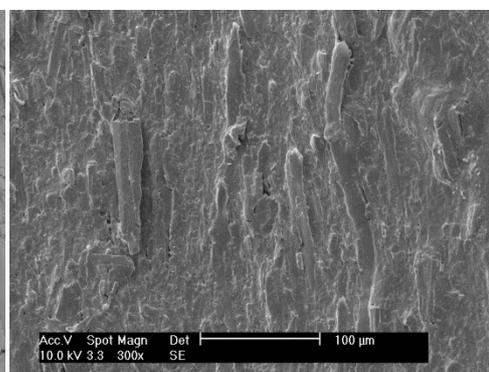
**Figura 4.23** Seco, condições intermédias 1



**Figura 4.24** Seco, condições intermédias 2



**Figura 4.25** Seco, condições intermédias 3a

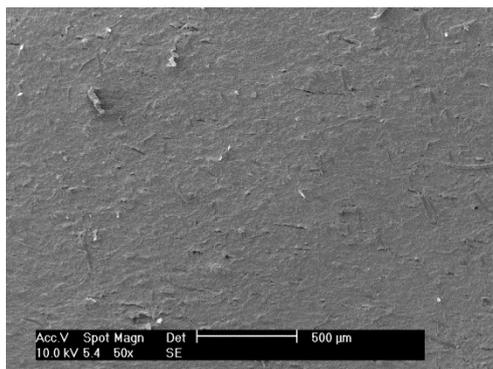


**Figura 4.26** Seco, condições intermédias 3b

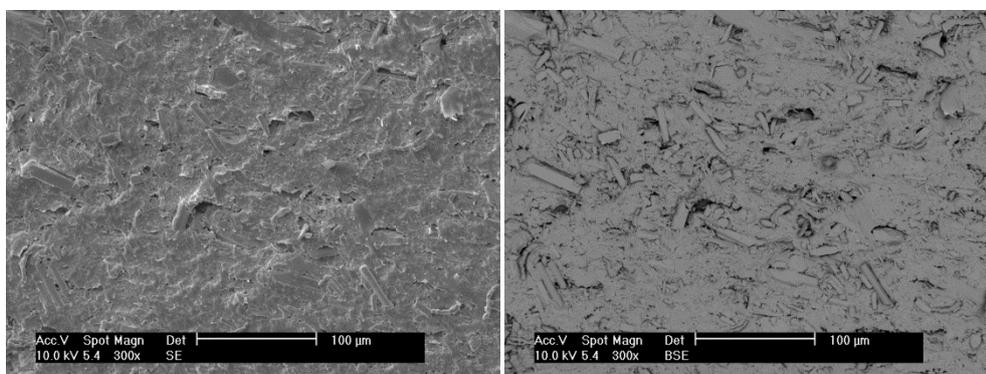
Toda a superfície deste pino apresentava o mesmo tipo de morfologia. A imagem da figura Figura 4.24 é ampliada na imagem da Figura 4.24. Ambas mostram uma base marcada pela presença de estruturas alongadas dispostas de forma organizada e orientada segundo a direção vertical.

A Figura 4.25 e a Figura 4.26 mostram como os corpos alongados se encontram em alguns locais fraturados. Os seus contornos estão mal ligados ao meio em que se inserem, uma vez que é visível a sua fronteira com cor mais escura.

**Condição 9,8N; 4,5 m/s contacto seco**



**Figura 4.27** Seco, elevada velocidade 1



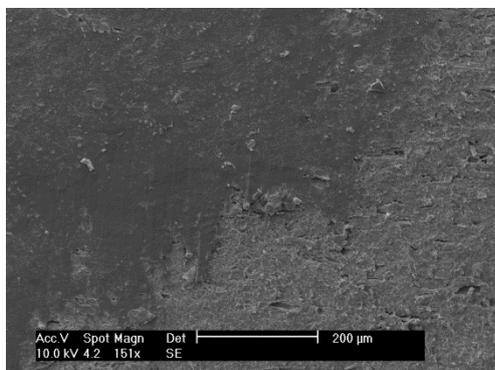
**Figura 4.28** Seco, elevada velocidade 2a

**Figura 4.29** Seco, elevada velocidade 3b

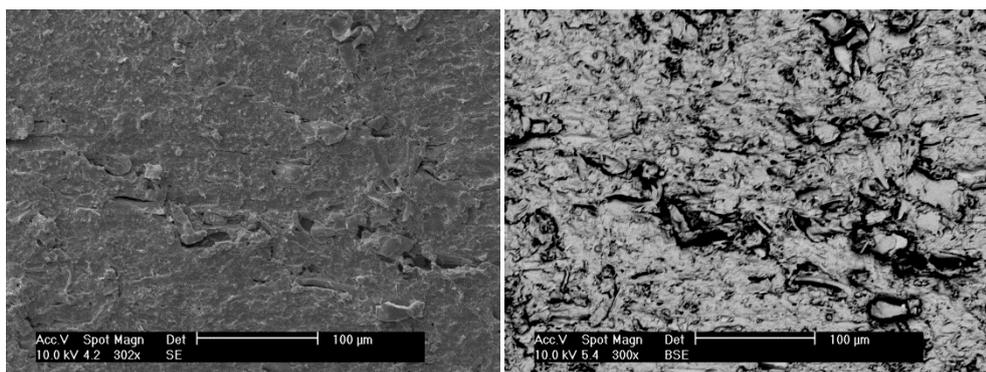
A Figura 4.27 mostra o aspeto que tem a superfície deste pino observado. São visíveis linhas de corte horizontais de cerca de 200µm de largura na superfície do pino. Estas linhas são paralelas entre si. A Figura 4.28 e a Figura 4.29 mostram corpos que parecem ter todos dimensões semelhantes mas orientações desordenadas.

### Condição 4 N; 3,5 m/s contacto molhado

A Figura 4.30 mostra duas zonas distintas divididas por uma linha diagonal. A metade acima e do lado esquerdo tem cor mais escura e superfície mais lisa. Já a metade inferior e do lado direito tem relevo mais marcado.



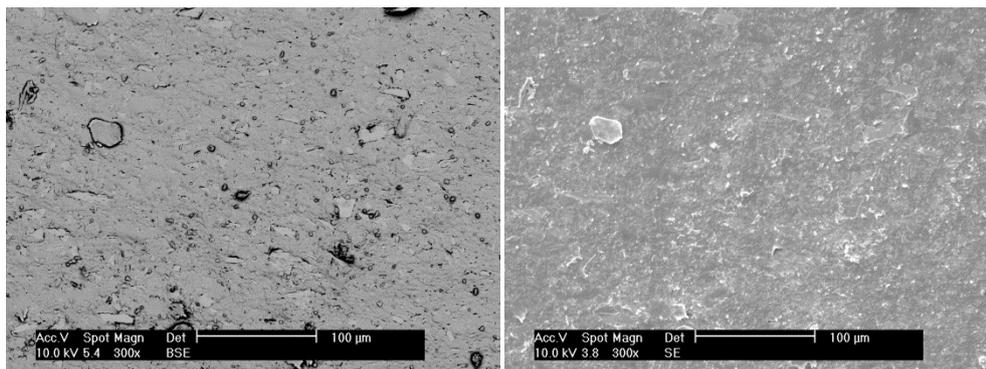
**Figura 4.30** Molhado, reduzida força normal 1



**Figura 4.31** Molhado, reduzida força normal 2a

**Figura 4.32** Molhado, reduzida f normal 2b

Na Figura 4.31 e Figura 4.32 tem-se uma aproximação da zona do lado esquerdo. É de referir a presença de estruturas distintas da base em que se inserem. Estas estruturas estão dispostas sem orientação preferencial pelo que apresentam dimensões distintas. Estão (as estruturas) bem ligadas à base em que se encontram inseridas uma vez que os seus contornos não estão nitidamente marcados.

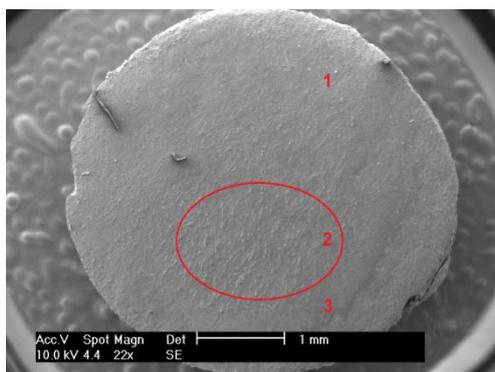


**Figura 4.33** Molhado, reduzida força normal 3a

**Figura 4.34** Molhado, condições intermédias 2

A Figura 4.33 e Figura 4.34 mostram o lado direito. Vêm-se pequenas placas descontínuas pousadas sobre a superfície.

#### **Condição 10N; 3,5 m/s contacto molhado**

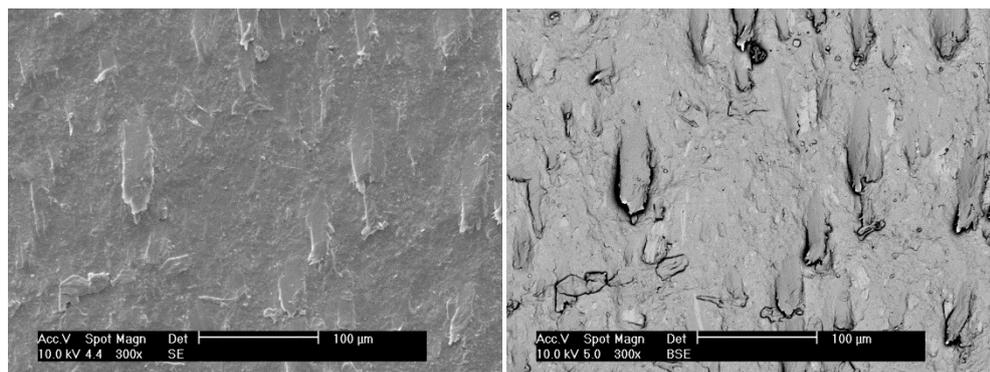


**Figura 4.35** Molhado, condições intermédias 1

A Figura 4.35 mostra a totalidade do pino ensaiado. Marcou-se na figura as 3 zonas distintas na morfologia da superfície.

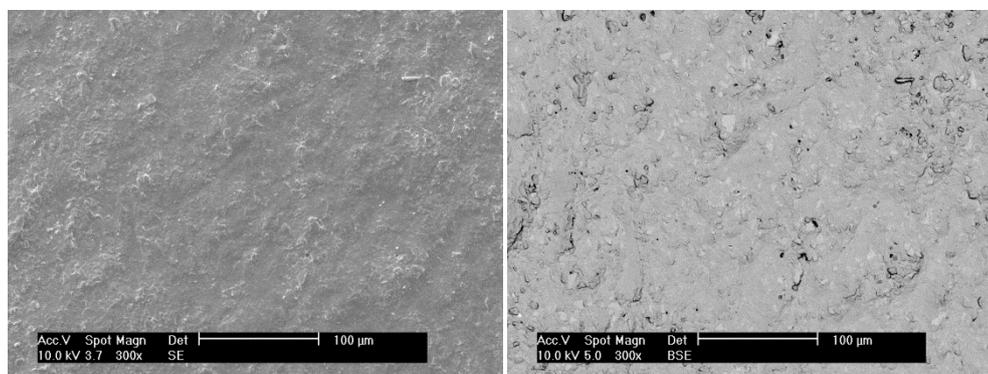
A Figura 4.36 e Figura 4.37 são pormenores da zona 2. Vêm-se estruturas orientadas com os contornos pouco nítidos no limite superior.

A Figura 4.38 e a Figura 4.39 são pormenores da zona 1 e mostram uma estrutura razoavelmente lisa, composta por relevos pouco marcados.



**Figura 4.36** Molhado, condições intermédias 2

**Figura 4.37** Molhado, cond. intermédias 3



**Figura 4.38** Molhado, cond. intermédias 4

**Figura 4.39** Molhado, cond. intermédias 5

### **Condição 10N; 4,5 m/s contacto molhado**

A Figura 4.40 e a Figura 4.41 mostram a morfologia encontrada na superfície deste pino ensaiado. Veem-se estruturas com alguma tendência para se orientar na direção vertical. Os seus limites são, em algumas zonas, difusos. Veem-se outras estruturas de dimensões maiores que as descritas e forma por vezes circular. Estas segundas estruturas têm os limites bem definidos.

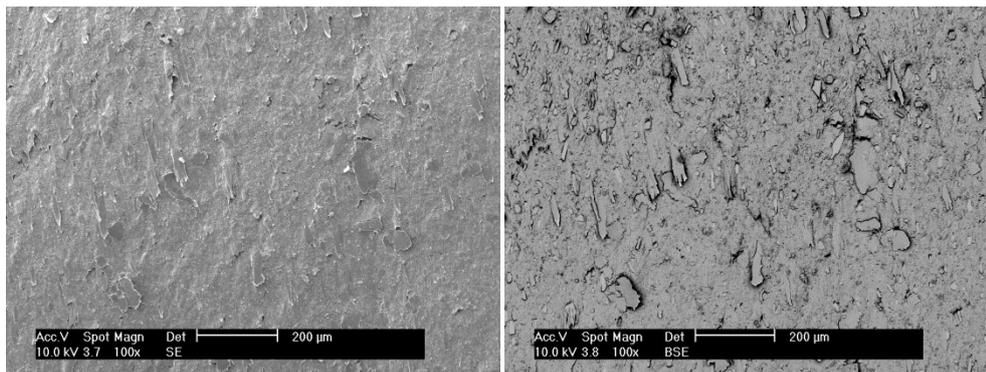


Figura 4.40 Molhado, elevada velocidade 1

Figura 4.41 Molhado, elevada velocidade 2

### 4.3.2. Análise global das imagens de microscopia eletrónica de varrimento

Na condição de baixa carga (3,92 N) tanto em seco como molhado, verificou-se a existência de duas zonas separadas. Tanto no contacto molhado como no contacto seco com a força normal aplicada de 3,92 N, a zona de morfologia lisa e mais escura trata-se de uma camada de detritos que pertenciam ao pino, foram arrancados e compactados entre a superfície do pino e do disco. O facto de o material de desgaste não se perder explica os resultados de massa perdida nula para estes ensaios. A zona que apresenta cor mais clara e morfologia mais irregular trata-se da morfologia do material num estado praticamente inalterado: as fibras de reforço (corpos alongados descritos anteriormente) ainda estão ligadas à matriz e apresentam orientação aleatória.

Verificou-se nos ensaios de contactos seco e molhado com condições intermédias (9,8 N; 3,5m/s) que houve reorientação das fibras de reforço. Esta reorientação deve-se à ação de do disco sobre o pino e só se verifica para esta velocidade e carga. No ensaio de contacto seco, as fibras fraturaram-se e o filme protetor (camada de detritos) foi arrancado. Já nestas condições de velocidade e carga mas na situação de contacto molhado, o filme protetor manteve-se intacto em certas zonas e as fibras não estavam arrancadas da matriz. Conclui-se que o desgaste no ensaio molhado é sempre muito mais suave e existe estabilização parcial do filme. Este facto está em acordo com os dados de desgaste que indicam menor desgaste nos ensaios com contacto molhado.

Nos ensaios de 4,5 m/s contacto seco, quando se menciona os cortes lineares perpendiculares à direção de escorregamento, estes são indicativos das tensões de corte que

se fizeram sentir no local. Estas zonas, durante o ensaio, deviam ser regiões onde se formavam rolos de detritos que eram de seguida removidos. Este é um mecanismo de desgaste muito acelerado.

No caso dos ensaios em que não se notava a presença de filme protetor à superfície, isto significava que este tinha sido criado e devido às severas condições de força e velocidade, tinha sido removido (parcial ou totalmente). A taxa de remoção desta camada/filme dita a taxa de desgaste do pino.

Nos ensaios de 9,81 N; 3,5 m/s, constata-se que em contacto seco, não se tem a presença do filme que se encontra no ensaio equivalente de contacto molhado. Logo, ou a presença de água estabiliza a formação do filme criado a partir de detritos ou então a redução da força de atrito pela lubrificação hidrodinâmica com a água entre as superfícies faz com que a força de atrito seja tão baixa que não arranque o filme formado à superfície

Em contacto seco, quando se passa de 3,5 m/s para 4,5 m/s com a mesma força normal (9,81 N), as fibras que se reorientavam e fraturavam, passam a apresentar muito menor mobilidade e fratura. Com isto se conclui que o aumento de velocidade faz alterar a resposta viscoelástica do material do calço de travão. Com o aumento da velocidade de escorregamento o material do calço de travão apresentou menor deformação.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Considera-se para os efeitos de experimentação, que o banco de ensaios configurado em conjugação com a metodologia empregue permitem obter resultados importantes ao nível de atrito e desgaste. Não é possível nesta configuração a escala reduzida obter resultados acerca da degradação térmica pelo que esta foi evitada.

Estudou-se o contacto de calços de travão específicos em atuação sobre um disco compósito num ensaio do tipo pino-disco. Consideraram-se 5 valores para a força normal (3,92 ; 5,89 N; 9,81 N; 11,77 N) que foram ensaiados à velocidade de 3,5 m/s. Estabeleceram-se 4 valores de velocidade (5,5 m/s; 4,5 m/s; 3,5 m/s; 2,5 m/s) que foram ensaiados com a força normal de 9,81 N. Estes ensaios foram levados a cabo em condições de contacto seco e molhado.

Em contacto seco, a força de atrito envolvida não é influenciada pela velocidade até 5,5 m/s, velocidade a partir da qual se apresenta um mecanismo de desgaste diferente que faz aumentar o coeficiente de atrito gerado no contacto, comparativamente com os ensaios a velocidades inferiores.

Em contacto seco, a força normal aplicada não exerce influência sobre a força de atrito desenvolvida, pelo que o coeficiente de atrito é independente da força normal na gama testada.

Em contacto molhado, verifica-se o efeito de hidroplanagem para as velocidades de 4,5 e 5,5 m/s - reduzindo significativamente a força de atrito gerada. A velocidade crítica para este fenómeno ser sentido localiza-se acima dos 3,5 m/s.

Em contacto molhado, não se pode concluir uma relação da força normal aplicada com a força de atrito gerada.

A taxa de desgaste com a distância de travagem, em contacto seco tem um patamar limite de velocidade a partir da qual apresenta valores anormalmente elevados.

Esta velocidade localiza-se entre os 4,5 e os 5,5 m/s.

A lei de desgaste uniforme proposta por Archard pode verificar-se para forças normais inferiores a 9,81 N. Mas para a força normal de 11,77 N este material não segue esta lei. Isto porque o mecanismo de desgaste se altera entre estes dois valores de força normal.

A taxa de desgaste com a distância de travagem em contacto molhado apresenta um desgaste muito acentuado para a velocidade de 5,5 m/s apesar do baixo coeficiente de atrito desenvolvido devido à hidroplanagem. Nas restantes velocidades testadas, esta taxa aumentou com a redução de velocidade devido à maior força de atrito gerada à medida que se reduzia a velocidade de escorregamento.

Analisando o período de *wearing-in* nota-se na maioria dos ensaios, especialmente naqueles realizados em contacto seco, um decréscimo de coeficiente de atrito durante este período inicial. Isto deve-se à reduzida área de contacto no início do ensaio. Devido ao desgaste esta área aumenta e o coeficiente de atrito estabiliza. Comparando este período de *wearing-in* em contacto seco e molhado conclui-se que apresenta maior aleatoriedade nos ensaios de contacto molhado.

Em condições de fraca solicitação de travagem (força normal e velocidade reduzidas) acumula-se um filme de detritos havendo assim desgaste nulo. Este filme aumenta de espessura até atingir uma altura crítica, a partir da qual se destaca resultando numa perda de massa de desgaste pontual.

Através da observação da morfologia da superfície de desgaste dos pinos ensaiados, conclui-se que a presença de água no contacto reduz a força de atrito e estabiliza o filme composto por detritos compactados.

O método de desgaste por acumulação do filme protetor é um mecanismo de desgaste que resulta em menor volume perdido.

Quando este filme é permanentemente acumulado e removido está-se perante um novo mecanismo de desgaste, mais severo que o anterior.

O terceiro mecanismo de desgaste, o que resulta em maior perda de massa para o calço é o arrancamento de rolos de material do pino.

Este trabalho alcançou os objetivos propostos de configurar e ensaiar em laboratório a escala reduzida a travagem de bicicletas de ciclismo com rodas de aro compósito para conhecer o seu desempenho e durabilidade.

Contudo nenhum trabalho experimental é isolado e pode sempre ser continuado e melhorado. Nesta lógica, põe-se a importante questão: Será que se está a simular realmente o uso normal, ou será que esta solicitação mais severa (no laboratório) leva à degradação do componente por um mecanismo de falha diferente?

Para se responder com rigor científico a esta questão seria necessário comparar a observação dos pinos de calços de travagem ensaiados em laboratório, com a observação dos calços de travagem degradados com o uso normal da bicicleta na estrada.

Esta etapa não foi levada a cabo, pelo que fica aqui referenciada para um trabalho futuro que complementaria o trabalho iniciado nesta dissertação de mestrado integrado.

O fabricante ZIPP - Speed Weaponry afirma que as rodas 303 Firecrest Tubular são adequadas e seguras para uso em Cyclocross (CX). Trata-se de uma competição com bicicletas semelhantes às bicicletas de estrada mas preparadas para enfrentar pistas com piso de terra e lama e com alguns obstáculos. Tal afirmação significa que estas rodas têm grande resistência mecânica a impactos e significa que a sua travagem de calço sobre o aro é eficiente mesmo na presença de terra e lama. (Os travões usados em Cyclocross são do tipo *cantilever* e não *caliper*, o que muda pouco para efeitos de ensaio uma vez que a sua atuação é bastante semelhante sobre o aro).

Sugere-se assim que para um trabalho futuro se proceda ao mesmo ensaio pino sobre disco apresentado neste ensaio, mas se introduza a nova variável: presença de contaminantes no disco. Pode ser um trabalho interessante uma vez que a travagem de cantilever sobre aro de carbono ainda é utilizada devido ao baixo peso comparativamente ao tipo de travagem que possivelmente será introduzido na sua substituição: a travagem com discos por atuação hidráulica.

Propôs-se no capítulo 4 que fosse projetado um aro compósito com geometria adequada ao escoamento de água. Surge contudo o problema de não se poder aplicar o mesmo método de fabricação que nos aros de alumínio que são provavelmente maquinados para criação dos sulcos.

Para um estudo futuro seria interessante medir a temperatura no calço durante as travagens de maior carga ou maior velocidade para poder avaliar se a temperatura introduz mecanismos de desgaste mais severo ou induz coeficientes de atrito mais elevados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Oertel, C., Neuburger, H., Sabo, A. (2010), " Construction of a test bench for bicycle rim and disc brakes", Acedido em 8 de Outubro de 2012, no Web site: Sensor products inc. Tactile pressure experts, em: [http://www.sensorprod.com/news/white-papers/2010-03\\_ctb/wp\\_ctb-2010-03.pdf](http://www.sensorprod.com/news/white-papers/2010-03_ctb/wp_ctb-2010-03.pdf)

[2] Bhushan, B. (2001), "Modern Tribology Handbook", CRC Press

[3] Johnson, K. L. (1985), "Contact Mechanics", Cambridge University Press

[4] Blau, P. J. (1995), "Friction Science and Technology: From Concepts to Applications"

[5] A. Ramalho, J.C. Miranda (2006), The relationship between wear and dissipated energy in sliding systems, *Wear* 260 361-367.

[6] <http://www.theroaddiaries.com/pictures-videos/>

[7] <http://www.zipp.com>

[8] <http://www.theroaddiaries.com/2011/10/09/sram-athletes-set-fastest-bike-splits-in-kona/>

## **ANEXO A      TABELAS DE DADOS**

Contato: Seco

Força Normal: 3,92 N

Velocidade: 3,5 m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	21,4	3,92	1,50	0,383
2	42,7	3,92	1,36	0,348
3	64,1	3,92	1,29	0,329
4	85,4	3,92	1,24	0,317
5	106,8	3,92	1,18	0,301
6	128,1	3,92	1,17	0,297
7	149,5	3,92	1,13	0,287
8	170,8	3,92	1,10	0,280
9	192,2	3,92	1,09	0,277
10	213,5	3,92	1,07	0,273
11	234,9	3,92	1,05	0,267
12	256,2	3,92	1,04	0,266
13	277,6	3,92	1,15	0,293
14	298,9	3,92	1,09	0,277
15	320,3	3,92	1,11	0,282
16	341,6	3,92	1,05	0,267
17	363,0	3,92	1,04	0,265
18	384,3	3,92	1,00	0,255
19	405,7	3,92	1,02	0,261
20	427,0	3,92	1,00	0,254
21	448,4	3,92	1,01	0,258
22	469,7	3,92	0,98	0,249
23	491,1	3,92	0,98	0,250
24	512,4	3,92	0,96	0,244
25	533,8	3,92	0,97	0,247
26	555,2	3,92	0,95	0,243
27	576,5	3,92	0,96	0,246
28	597,9	3,92	0,95	0,243
29	619,2	3,92	0,94	0,240
30	640,6	3,92	0,95	0,242
31	661,9	3,92	0,94	0,239
32	683,3	3,92	0,94	0,238
33	21,4	3,92	1,50	0,383
34	42,7	3,92	1,36	0,348
35	64,1	3,92	1,29	0,329
36	85,4	3,92	1,24	0,317

Distância Total (m)	683,3
Mi (g)	1,7010
Mf (g)	1,7010
M Perdida (mg)	0,0
M perd/dist (mg/km)	0,0000
Vperdido (mm <sup>3</sup> )	0,000
Vperd/dist (mm <sup>3</sup> /km)	0,000

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	1,0176	0,2593
Desv. Pad.	0,0641	0,0163
I.C. 95%	0,0226	0,0058

Energia (J)	695
-------------	-----

Contato: Seco

Força Normal: 5,89 N

Velocidade: 3,5m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	21,2	5,89	2,95	0,501
2	42,3	5,89	2,47	0,420
3	63,5	5,89	2,40	0,408
4	84,7	5,89	2,32	0,395
5	105,9	5,89	2,31	0,393
6	127,0	5,89	2,26	0,384
7	148,2	5,89	2,30	0,390
8	169,4	5,89	2,32	0,395
9	190,6	5,89	2,33	0,395
10	211,7	5,89	2,30	0,391
11	232,9	5,89	2,24	0,380
12	254,1	5,89	2,30	0,391
13	275,3	5,89	2,36	0,401
14	296,4	5,89	2,35	0,400
15	317,6	5,89	2,37	0,402
16	338,8	5,89	2,45	0,417
17	359,9	5,89	2,43	0,413
18	381,1	5,89	2,45	0,416
19	402,3	5,89	2,45	0,417
20	423,5	5,89	2,49	0,422
21	444,6	5,89	2,44	0,415
22	465,8	5,89	2,29	0,389
23	487,0	5,89	2,24	0,381
24	508,2	5,89	2,21	0,376
25	529,3	5,89	2,20	0,374
26	550,5	5,89	2,17	0,369
27	571,7	5,89	2,18	0,371
28	592,9	5,89	2,17	0,369
29	614,0	5,89	2,14	0,364
30	635,2	5,89	2,13	0,362
31	656,4	5,89	2,20	0,375
32	677,5	5,89	2,26	0,383

Distância Total (m)	677,5
Mi (g)	1,7144
Mf (g)	1,7144
M Perdida (mg)	0,0
M perd/dist (mg/km)	0,0000
Vperdido (mm <sup>3</sup> )	0,000
Vperd/dist (mm <sup>3</sup> /km)	0,000

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	2,2991	0,3906
Desv. Pad.	0,1079	0,0183
I.C. 95%	0,0380	0,0065

Energia (J)	1558
-------------	------

Contato: Seco

Força Normal: 7,85 N

Velocidade: 3,5m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	21,0	7,85	4,08	0,520
2	42,0	7,85	3,03	0,386
3	63,0	7,85	2,79	0,355
4	84,0	7,85	3,00	0,382
5	105,0	7,85	2,94	0,375
6	126,0	7,85	3,12	0,397
7	147,1	7,85	3,02	0,385
8	168,1	7,85	3,14	0,400
9	189,1	7,85	2,63	0,335
10	210,1	7,85	2,67	0,340
11	231,1	7,85	2,79	0,355
12	252,1	7,85	3,02	0,384
13	273,1	7,85	3,09	0,394
14	294,1	7,85	3,14	0,400
15	315,1	7,85	2,90	0,369
16	336,1	7,85	2,66	0,339
17	357,1	7,85	2,92	0,371
18	378,1	7,85	2,90	0,370
19	399,1	7,85	2,79	0,355
20	420,1	7,85	3,54	0,451
21	441,2	7,85	2,60	0,332
22	462,2	7,85	2,67	0,341
23	483,2	7,85	2,49	0,318
24	504,2	7,85	2,77	0,353
25	525,2	7,85	2,42	0,309
26	546,2	7,85	2,27	0,289
27	567,2	7,85	2,30	0,293
28	588,2	7,85	1,65	0,211
29	609,2	7,85	2,14	0,273
30	630,2	7,85	2,41	0,306
31	651,2	7,85	2,16	0,275
32	672,2	7,85	2,31	0,294

Distância Total (m)	672,2
Mi (g)	1,7054
Mf (g)	1,7038
M Perdida (mg)	1,6
M perd/dist (mg/km)	0,0024
Vperdido (mm <sup>3</sup> )	0,873
Vperd/dist (mm <sup>3</sup> /km)	1,299

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	2,6347	0,3357
Desv. Pad.	0,4017	0,0512
I.C. 95%	0,1414	0,0180

Energia (J)	1771
-------------	------

Contato: Seco

Força Normal: 9,81N

Velocidade: 3,5 m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	22,9	9,81	6,61	0,674
2	45,7	9,81	4,30	0,438
3	68,6	9,81	3,71	0,378
4	91,5	9,81	3,66	0,373
5	114,4	9,81	3,81	0,388
6	137,2	9,81	3,95	0,403
7	160,1	9,81	3,62	0,369
8	183,0	9,81	3,48	0,355
9	205,8	9,81	3,53	0,360
10	228,7	9,81	3,65	0,372
11	251,6	9,81	3,98	0,406
12	274,4	9,81	4,03	0,411
13	297,3	9,81	4,23	0,431
14	320,2	9,81	3,96	0,403
15	343,1	9,81	4,26	0,434
16	365,9	9,81	4,41	0,449
17	388,8	9,81	4,02	0,410
18	411,7	9,81	3,89	0,397
19	434,5	9,81	4,17	0,425
20	457,4	9,81	4,18	0,426
21	480,3	9,81	3,72	0,379
22	503,2	9,81	3,75	0,382
23	526,0	9,81	4,00	0,408
24	548,9	9,81	4,60	0,469
25	571,8	9,81	4,28	0,436
26	594,6	9,81	4,16	0,424
27	617,5	9,81	5,18	0,528
28	640,4	9,81	4,29	0,437
29	663,3	9,81	4,12	0,420
30	686,1	9,81	4,47	0,456
31	709,0	9,81	4,46	0,455
32	731,9	9,81	3,81	0,388

Distância Total (m)	731,9
Mi (g)	1,7006
Mf (g)	1,6949
M Perdida (mg)	5,7
M perd/dist (mg/km)	0,0078
Vperdido (mm <sup>3</sup> )	3,111
Vperd/dist (mm <sup>3</sup> /km)	4,250

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	4,0871	0,4166
Desv. Pad.	0,3744	0,0382
I.C. 95%	0,1318	0,0134

Energia (J)	2991
-------------	------

Contato: Seco

Força Normal: 11,77 N

Velocidade: 3,5 m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	20,9	11,77	9,22	0,784
2	41,8	11,77	8,48	0,720
3	62,7	11,77	8,26	0,702
4	83,6	11,77	7,68	0,653
5	104,5	11,77	7,43	0,631
6	125,3	11,77	7,31	0,621
7	146,2	11,77	6,88	0,584
8	167,1	11,77	6,50	0,552
9	188,0	11,77	6,09	0,517
10	208,9	11,77	5,42	0,461
11	229,8	11,77	5,16	0,438
12	250,7	11,77	5,38	0,457
13	271,6	11,77	5,07	0,431
14	292,5	11,77	5,11	0,434

Distância Total (m)	292,5
Mi (g)	1,7092
Mf (g)	1,6925
M Perdida (mg)	16,7
M perd/dist (mg/km)	0,0571
Vperdido (mm <sup>3</sup> )	9,113
Vperd/dist (mm <sup>3</sup> /km)	31,158

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	5,2293	0,4442
Desv. Pad.	0,1621	0,0138
I.C. 95%	0,0881	0,0075

Energia (J)	1529
-------------	------

Contato: Seco

Força Normal: 9,81 N

Velocidade: 5,5 m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	33,8	9,81	7,67	0,781
2	67,7	9,81	7,05	0,719
3	101,5	9,81	6,97	0,711
4	135,3	9,81	6,87	0,700
5	169,2	9,81	6,79	0,692

Distância Total (m)	169,2
Mi (g)	1,7199
Mf (g)	1,6735
M Perdida (mg)	46,4
M perd/dist (mg/km)	0,2743
Vperdido (mm <sup>3</sup> )	25,321
Vperd/dist (mm <sup>3</sup> /km)	149,671

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	7,0705	0,7207
Desv. Pad.	0,3467	0,0353
I.C. 95%	0,3398	0,0346

Energia (J)	1196
-------------	------

Contato: Seco

Força Normal: 9,81N

Velocidade: 4,5 m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	29,2	9,81	6,03	0,614
2	58,4	9,81	4,47	0,455
3	87,6	9,81	4,14	0,423
4	116,7	9,81	3,99	0,406
5	145,9	9,81	4,00	0,407
6	175,1	9,81	4,00	0,408
7	204,3	9,81	4,52	0,461
8	233,5	9,81	5,61	0,571
9	262,7	9,81	4,84	0,493
10	291,9	9,81	4,31	0,439
11	321,0	9,81	4,02	0,410
12	350,2	9,81	3,97	0,404
13	379,4	9,81	4,12	0,420
14	408,6	9,81	4,10	0,418
15	437,8	9,81	3,99	0,407
16	467,0	9,81	4,19	0,427
17	496,2	9,81	4,15	0,423
18	525,3	9,81	4,18	0,426
19	554,5	9,81	4,06	0,414
20	583,7	9,81	4,43	0,451
21	612,9	9,81	4,65	0,474
22	642,1	9,81	4,29	0,437
23	671,3	9,81	4,49	0,457
24	700,4	9,81	4,14	0,422
25	729,6	9,81	4,35	0,444
26	758,8	9,81	4,42	0,451
27	788,0	9,81	4,46	0,455
28	817,2	9,81	4,37	0,446

Distância Total (m)	817,2
Mi (g)	1,7105
Mf (g)	1,7049
M Perdida (mg)	5,6
M perd/dist (mg/km)	0,0069
Vperdido (mm <sup>3</sup> )	3,056
Vperd/dist (mm <sup>3</sup> /km)	3,740

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	4,3473	0,4432
Desv. Pad.	0,3596	0,0367
I.C. 95%	0,1356	0,0138

Energia (J)	3553
-------------	------

Contato: Seco

Força Normal: 9,81N

Velocidade: 3,5 m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	22,9	9,81	6,61	0,674
2	45,7	9,81	4,30	0,438
3	68,6	9,81	3,71	0,378
4	91,5	9,81	3,66	0,373
5	114,4	9,81	3,81	0,388
6	137,2	9,81	3,95	0,403
7	160,1	9,81	3,62	0,369
8	183,0	9,81	3,48	0,355
9	205,8	9,81	3,53	0,360
10	228,7	9,81	3,65	0,372
11	251,6	9,81	3,98	0,406
12	274,4	9,81	4,03	0,411
13	297,3	9,81	4,23	0,431
14	320,2	9,81	3,96	0,403
15	343,1	9,81	4,26	0,434
16	365,9	9,81	4,41	0,449
17	388,8	9,81	4,02	0,410
18	411,7	9,81	3,89	0,397
19	434,5	9,81	4,17	0,425
20	457,4	9,81	4,18	0,426
21	480,3	9,81	3,72	0,379
22	503,2	9,81	3,75	0,382
23	526,0	9,81	4,00	0,408
24	548,9	9,81	4,60	0,469
25	571,8	9,81	4,28	0,436
26	594,6	9,81	4,16	0,424
27	617,5	9,81	5,18	0,528
28	640,4	9,81	4,29	0,437
29	663,3	9,81	4,12	0,420
30	686,1	9,81	4,47	0,456
31	709,0	9,81	4,46	0,455
32	731,9	9,81	3,81	0,388

Distância Total (m)	731,9
Mi (g)	1,7006
Mf (g)	1,6949
M Perdida (mg)	5,7
M perd/dist (mg/km)	0,0078
Vperdido (mm3)	3,111
Vperd/dist (mm3/km)	4,250

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	4,0871	0,4166
Desv. Pad.	0,3744	0,0382
I.C. 95%	0,1318	0,0134

Energia (J)	2991
-------------	------

Contato: Seco

Força Normal: 9,81 N

Velocidade: 2,5 m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	12,0	9,81	7,63	0,778
2	23,9	9,81	6,93	0,707
3	35,9	9,81	6,00	0,612
4	47,8	9,81	5,53	0,564
5	59,8	9,81	5,16	0,526
6	71,7	9,81	4,74	0,483
7	83,7	9,81	4,37	0,446
8	95,7	9,81	4,05	0,413
9	107,6	9,81	4,13	0,421
10	119,6	9,81	4,08	0,416
11	131,5	9,81	4,08	0,416
12	143,5	9,81	4,08	0,416
13	155,4	9,81	4,23	0,431
14	167,4	9,81	4,24	0,433
15	179,4	9,81	4,27	0,435
16	191,3	9,81	4,03	0,411
17	203,3	9,81	4,27	0,435
18	215,2	9,81	4,24	0,433
19	227,2	9,81	4,11	0,419
20	239,1	9,81	4,32	0,440
21	251,1	9,81	4,29	0,437
22	263,1	9,81	4,22	0,430
23	275,0	9,81	4,33	0,441
24	287,0	9,81	4,28	0,436
25	298,9	9,81	4,31	0,439
26	310,9	9,81	4,62	0,471
27	322,8	9,81	4,25	0,434
28	334,8	9,81	4,17	0,425
29	346,8	9,81	4,19	0,427
30	358,7	9,81	4,22	0,431
31	370,7	9,81	4,34	0,442
32	382,6	9,81	4,23	0,431
33	394,6	9,81	4,14	0,422
34	406,5	9,81	4,27	0,435
35	418,5	9,81	4,25	0,433
36	430,4	9,81	4,13	0,421
37	442,4	9,81	4,08	0,416
38	454,4	9,81	3,80	0,387
39	466,3	9,81	3,81	0,388
40	478,3	9,81	3,84	0,391

Distância Total (m)	478,3
Mi (g)	1,7049
Mf (g)	1,6915
M Perdida (mg)	13,4
M perd/dist (mg/km)	0,0280
Vperdido (mm3)	7,312
Vperd/dist (mm3/km)	15,289

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	4,1846	0,4266
Desv. Pad.	0,1626	0,0166
I.C. 95%	0,0510	0,0052

Energia (J)	2001
-------------	------

Contato: Molhado

Força Normal: 3,92 N

Velocidade: 3,5 m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	21,6	3,92	0,37	0,093
2	43,2	3,92	0,32	0,080
3	64,7	3,92	0,04	0,009
4	86,3	3,92	0,62	0,159
5	107,9	3,92	0,67	0,171
6	129,5	3,92	0,65	0,166
7	151,1	3,92	0,70	0,179
8	172,6	3,92	0,70	0,179
9	194,2	3,92	0,70	0,177
10	215,8	3,92	0,65	0,165
11	237,4	3,92	0,69	0,175
12	258,9	3,92	0,68	0,174
13	280,5	3,92	0,68	0,173
14	302,1	3,92	0,68	0,174
15	323,7	3,92	0,67	0,170
16	345,3	3,92	0,65	0,167
17	366,8	3,92	0,68	0,173
18	388,4	3,92	0,65	0,167
19	410,0	3,92	0,64	0,164
20	431,6	3,92	0,65	0,166
21	453,2	3,92	0,64	0,162
22	474,7	3,92	0,57	0,146
23	496,3	3,92	0,56	0,144
24	517,9	3,92	0,56	0,143
25	539,5	3,92	0,58	0,148
26	561,0	3,92	0,64	0,162
27	582,6	3,92	0,63	0,162
28	604,2	3,92	0,62	0,157
29	625,8	3,92	0,54	0,137
30	647,4	3,92	0,43	0,109
31	668,9	3,92	0,54	0,138
32	690,5	3,92	0,29	0,074

Distância Total (m)	690,5
Mi (g)	1,7060
Mf (g)	1,7060
M Perdida (mg)	0,0
M perd/dist (mg/km)	0,0000
Vperdido (mm3)	0,000
Vperd/dist (mm3/km)	0,000

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	0,6127	0,1561
Desv. Pad.	0,0928	0,0237
I.C. 95%	0,0327	0,0083

Energia (J)	423
-------------	-----

Contato: Molhado

Força Normal: 5,89 N

Velocidade: 3,5 m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	21,5	5,89	2,27	0,385
2	42,9	5,89	2,38	0,404
3	64,4	5,89	2,30	0,391
4	85,8	5,89	2,08	0,353
5	107,3	5,89	1,78	0,303
6	128,7	5,89	1,41	0,240
7	150,2	5,89	1,01	0,172
8	171,6	5,89	0,92	0,156
9	193,1	5,89	0,93	0,159
10	214,5	5,89	0,92	0,156
11	236,0	5,89	0,90	0,153
12	257,4	5,89	0,89	0,152
13	278,9	5,89	0,87	0,148
14	300,3	5,89	0,88	0,149
15	321,8	5,89	0,85	0,144
16	343,3	5,89	0,89	0,151
17	364,7	5,89	0,86	0,145
18	386,2	5,89	0,84	0,143
19	407,6	5,89	0,85	0,145
20	429,1	5,89	0,82	0,140
21	450,5	5,89	0,83	0,141
22	472,0	5,89	0,85	0,144
23	493,4	5,89	0,81	0,138
24	514,9	5,89	0,80	0,136
25	536,3	5,89	0,80	0,136
26	557,8	5,89	0,78	0,133
27	579,2	5,89	0,80	0,136
28	600,7	5,89	0,82	0,140
29	622,1	5,89	0,81	0,137
30	643,6	5,89	0,82	0,139
31	665,0	5,89	0,80	0,137
32	686,5	5,89	0,81	0,138

Distância Total (m)	686,5
Mi (g)	1,6957
Mf (g)	1,6955
M Perdida (mg)	0,2
M perd/dist (mg/km)	0,0003
Vperdido (mm <sup>3</sup> )	0,109
Vperd/dist (mm <sup>3</sup> /km)	0,159

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	0,8462	0,1438
Desv. Pad.	0,0435	0,0074
I.C. 95%	0,0153	0,0026

Energia (J)	581
-------------	-----

Contato: Molhado

Força Normal: 7,85 N

Velocidade: 3,5 m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	22,0	7,85	2,06	0,262
2	44,0	7,85	1,76	0,225
3	66,0	7,85	1,89	0,241
4	88,0	7,85	1,68	0,214
5	110,0	7,85	1,71	0,217
6	132,0	7,85	1,41	0,179
7	154,0	7,85	1,40	0,178
8	176,0	7,85	1,43	0,182
9	198,0	7,85	1,30	0,166
10	220,0	7,85	1,07	0,136
11	241,9	7,85	1,04	0,133
12	263,9	7,85	1,13	0,144
13	285,9	7,85	1,07	0,136
14	307,9	7,85	0,46	0,059
15	329,9	7,85	1,11	0,142
16	351,9	7,85	0,94	0,120
17	373,9	7,85	0,57	0,072
18	395,9	7,85	1,15	0,147
19	417,9	7,85	1,00	0,127
20	439,9	7,85	1,21	0,155
21	461,9	7,85	1,30	0,166
22	483,9	7,85	1,38	0,175
23	505,9	7,85	1,27	0,161
24	527,9	7,85	1,01	0,128
25	549,9	7,85	1,32	0,168
26	571,9	7,85	1,29	0,164
27	593,9	7,85	1,15	0,147
28	615,9	7,85	1,53	0,195
29	637,9	7,85	1,44	0,184
30	659,9	7,85	1,17	0,148
31	681,8	7,85	1,06	0,135
32	703,8	7,85	0,75	0,096

Distância Total (m)	704
Mi (g)	1,7219
Mf (g)	1,7215
M Perdida (mg)	0,4
M perd/dist (mg/km)	0,0006
Vperdido (mm <sup>3</sup> )	0,218
Vperd/dist (mm <sup>3</sup> /km)	0,310

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	1,1134	0,1419
Desv. Pad.	0,2542	0,0324
I.C. 95%	0,0895	0,0114

Energia (J)	784
-------------	-----

Contato: Molhado

Força Normal: 9,81N

Velocidade: 3,5 m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	21,3	9,81	3,32	0,338
2	42,7	9,81	2,02	0,206
3	64,0	9,81	1,96	0,200
4	85,4	9,81	1,87	0,190
5	106,7	9,81	1,75	0,178
6	128,1	9,81	1,68	0,171
7	149,4	9,81	2,06	0,210
8	170,8	9,81	2,20	0,225
9	192,1	9,81	1,84	0,187
10	213,5	9,81	1,62	0,165
11	234,8	9,81	1,71	0,175
12	256,2	9,81	1,75	0,178
13	277,5	9,81	1,89	0,193
14	298,9	9,81	2,52	0,257
15	320,2	9,81	2,44	0,249
16	341,6	9,81	3,38	0,344
17	362,9	9,81	3,20	0,326
18	384,2	9,81	3,15	0,321
19	405,6	9,81	2,66	0,271
20	426,9	9,81	2,33	0,237
21	448,3	9,81	2,06	0,210
22	469,6	9,81	1,62	0,165
23	491,0	9,81	1,56	0,159
24	512,3	9,81	1,42	0,145
25	533,7	9,81	1,46	0,149
26	555,0	9,81	1,43	0,146
27	576,4	9,81	1,51	0,154
28	597,7	9,81	1,55	0,158
29	619,1	9,81	2,40	0,245
30	640,4	9,81	1,82	0,186
31	661,8	9,81	1,37	0,140
32	683,1	9,81	1,33	0,135

Distância Total (m)	683,1
Mi (g)	1,7063
Mf (g)	1,7061
M Perdida (mg)	0,2
M perd/dist (mg/km)	0,0003
Vperdido (mm <sup>3</sup> )	0,109
Vperd/dist (mm <sup>3</sup> /km)	0,160

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	2,0087	0,2048
Desv. Pad.	0,6065	0,0618
I.C. 95%	0,2135	0,0218

Energia (J)	1372
-------------	------

Contato: Molhado

Força Normal: 11,77 N

Velocidade: 3,5 m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	18,4	11,77	4,08	0,347
2	36,8	11,77	3,69	0,314
3	55,2	11,77	3,06	0,260
4	73,6	11,77	2,76	0,235
5	92,0	11,77	2,72	0,231
6	110,4	11,77	2,63	0,223
7	128,8	11,77	2,62	0,222
8	147,2	11,77	2,59	0,220
9	165,6	11,77	2,46	0,209
10	184,0	11,77	2,41	0,205
11	202,4	11,77	2,58	0,219
12	220,8	11,77	2,47	0,210
13	239,2	11,77	2,27	0,193
14	257,6	11,77	2,28	0,194
15	276,0	11,77	2,28	0,193
16	294,4	11,77	2,14	0,182
17	312,8	11,77	1,96	0,166
18	331,2	11,77	2,12	0,180
19	349,6	11,77	2,35	0,200
20	368,0	11,77	2,06	0,175
21	386,4	11,77	2,03	0,172
22	404,8	11,77	1,90	0,161
23	423,2	11,77	1,80	0,153
24	441,6	11,77	1,50	0,128
25	460,0	11,77	1,66	0,141
26	478,4	11,77	1,44	0,123
27	496,9	11,77	1,72	0,146
28	515,3	11,77	1,41	0,120
29	533,7	11,77	1,39	0,118
30	552,1	11,77	1,90	0,162
31	570,5	11,77	1,96	0,167
32	588,9	11,77	2,09	0,178

Distância Total (m)	588,9
Mi (g)	1,7229
Mf (g)	1,7225
M Perdida (mg)	0,4
M perd/dist (mg/km)	0,0007
Vperdido (mm <sup>3</sup> )	0,218
Vperd/dist (mm <sup>3</sup> /km)	0,371

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	2,0078	0,1706
Desv. Pad.	0,3649	0,0310
I.C. 95%	0,1285	0,0109

Energia (J)	1182
-------------	------

Contato: Molhado

Força Normal: 9,81N

Velocidade: 5,5 m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	31,1	9,81	4,77	0,486
2	62,2	9,81	1,87	0,190
3	93,3	9,81	1,09	0,111
4	124,4	9,81	0,77	0,079
5	155,5	9,81	0,69	0,070
6	186,7	9,81	0,67	0,069
7	217,8	9,81	0,62	0,063
8	248,9	9,81	0,26	0,026
9	280,0	9,81	0,63	0,064
10	311,1	9,81	0,69	0,071
11	342,2	9,81	0,64	0,065
12	373,3	9,81	0,81	0,083
13	404,4	9,81	0,78	0,080
14	435,5	9,81	0,65	0,066
15	466,6	9,81	0,53	0,054
16	497,7	9,81	0,56	0,058
17	528,9	9,81	0,55	0,056
18	560,0	9,81	0,54	0,055
19	591,1	9,81	0,50	0,051
20	622,2	9,81	0,60	0,061
21	653,3	9,81	0,56	0,057
22	684,4	9,81	0,50	0,051
23	715,5	9,81	0,66	0,067
24	746,6	9,81	0,50	0,051
25	777,7	9,81	0,29	0,030
26	808,8	9,81	0,62	0,064

Distância Total (m)	808,8
Mi (g)	1,7204
Mf (g)	1,7193
M Perdida (mg)	1,1
M perd/dist (mg/km)	0,0014
Vperdido (mm <sup>3</sup> )	0,600
Vperd/dist (mm <sup>3</sup> /km)	0,742

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	0,5722	0,0583
Desv. Pad.	0,1370	0,0140
I.C. 95%	0,0482	0,0049

Energia (J)	463
-------------	-----

Contato: Molhado

Força Normal: 9,81 N

Velocidade: 4,5 m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	27,5	9,81	1,18	0,120
2	55,0	9,81	1,37	0,139
3	82,6	9,81	1,42	0,145
4	110,1	9,81	1,43	0,145
5	137,6	9,81	1,39	0,142
6	165,1	9,81	1,42	0,145
7	192,6	9,81	1,32	0,135
8	220,2	9,81	1,47	0,150
9	247,7	9,81	1,31	0,134
10	275,2	9,81	1,34	0,137
11	302,7	9,81	1,34	0,137
12	330,2	9,81	1,30	0,133
13	357,8	9,81	1,25	0,127
14	385,3	9,81	1,26	0,128
15	412,8	9,81	1,11	0,113
16	440,3	9,81	0,31	0,032
17	467,8	9,81	0,06	0,006
18	495,4	9,81	-0,33	-0,033
19	522,9	9,81	-0,42	-0,043
20	550,4	9,81	1,04	0,106
21	577,9	9,81	1,01	0,103
22	605,4	9,81	0,98	0,100
23	633,0	9,81	0,06	0,006
24	660,5	9,81	0,21	0,021
25	688,0	9,81	-0,22	-0,023
26	715,5	9,81	1,01	0,103
27	743,0	9,81	0,96	0,098
28	770,6	9,81	0,53	0,054

Distância Total (m)	770,6
Mi (g)	1,7201
Mf (g)	1,7200
M Perdida (mg)	0,1
M perd/dist (mg/km)	0,0001
Vperdido (mm <sup>3</sup> )	0,055
Vperd/dist (mm <sup>3</sup> /km)	0,071

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	0,7422	0,0757
Desv. Pad.	0,6227	0,0635
I.C. 95%	0,2192	0,0223

Energia (J)	572
-------------	-----

Contato: Molhado

Força Normal: 9,81N

Velocidade: 3,5 m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	21,3	9,81	3,32	0,338
2	42,7	9,81	2,02	0,206
3	64,0	9,81	1,96	0,200
4	85,4	9,81	1,87	0,190
5	106,7	9,81	1,75	0,178
6	128,1	9,81	1,68	0,171
7	149,4	9,81	2,06	0,210
8	170,8	9,81	2,20	0,225
9	192,1	9,81	1,84	0,187
10	213,5	9,81	1,62	0,165
11	234,8	9,81	1,71	0,175
12	256,2	9,81	1,75	0,178
13	277,5	9,81	1,89	0,193
14	298,9	9,81	2,52	0,257
15	320,2	9,81	2,44	0,249
16	341,6	9,81	3,38	0,344
17	362,9	9,81	3,20	0,326
18	384,2	9,81	3,15	0,321
19	405,6	9,81	2,66	0,271
20	426,9	9,81	2,33	0,237
21	448,3	9,81	2,06	0,210
22	469,6	9,81	1,62	0,165
23	491,0	9,81	1,56	0,159
24	512,3	9,81	1,42	0,145
25	533,7	9,81	1,46	0,149
26	555,0	9,81	1,43	0,146
27	576,4	9,81	1,51	0,154
28	597,7	9,81	1,55	0,158
29	619,1	9,81	2,40	0,245
30	640,4	9,81	1,82	0,186
31	661,8	9,81	1,37	0,140
32	683,1	9,81	1,33	0,135

Distância Total (m)	683,1
Mi (g)	1,7063
Mf (g)	1,7061
M Perdida (mg)	0,2
M perd/dist (mg/km)	0,0003
Vperdido (mm <sup>3</sup> )	0,109
Vperd/dist (mm <sup>3</sup> /km)	0,160

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	2,0087	0,2048
Desv. Pad.	0,6065	0,0618
I.C. 95%	0,2135	0,0218

Energia (J)	1372
-------------	------

Contato: Seco

Força Normal: 9,81 N

Velocidade: 2,5 m/s

Nº travagem	Distância (m)	Normal	F. Atrito (N)	CoefAtrito
1	24,8	9,81	2,62	0,267
2	49,5	9,81	3,41	0,348
3	74,3	9,81	3,24	0,330
4	99,0	9,81	3,76	0,383
5	123,8	9,81	2,53	0,257
6	148,6	9,81	4,04	0,412
7	173,3	9,81	3,99	0,407
8	198,1	9,81	4,31	0,440
9	222,8	9,81	3,85	0,392
10	247,6	9,81	1,94	0,198
11	272,3	9,81	1,70	0,173
12	297,1	9,81	1,60	0,163
13	321,9	9,81	1,60	0,163
14	346,6	9,81	1,51	0,154
15	371,4	9,81	1,51	0,154
16	396,1	9,81	1,49	0,152
17	420,9	9,81	1,71	0,174
18	445,7	9,81	1,55	0,158
19	470,4	9,81	1,50	0,153
20	495,2	9,81	1,51	0,154
21	519,9	9,81	1,47	0,149
22	544,7	9,81	1,96	0,200
23	569,5	9,81	1,51	0,154
24	594,2	9,81	1,45	0,148
25	619,0	9,81	1,44	0,147
26	643,7	9,81	1,45	0,148
27	668,5	9,81	1,46	0,149
28	693,2	9,81	1,44	0,146
29	718,0	9,81	1,41	0,144
30	742,8	9,81	1,43	0,145
31	767,5	9,81	1,39	0,142
32	792,3	9,81	1,38	0,141
33	817,0	9,81	1,41	0,143
34	841,8	9,81	1,42	0,145
35	866,6	9,81	1,43	0,146
36	891,3	9,81	1,46	0,149
37	916,1	9,81	1,39	0,141
38	940,8	9,81	1,40	0,143
39	965,6	9,81	1,34	0,137
40	990,4	9,81	1,38	0,141

Distância Total (m)	990,4
Mi (g)	1,7210
Mf (g)	1,7203
M Perdida (mg)	0,7
M perd/dist (mg/km)	0,0007
Vperdido (mm <sup>3</sup> )	0,382
Vperd/dist (mm <sup>3</sup> /km)	0,386

Estatística	F. Atrito (N)	CoefAtrito
Média	1,5037	0,1533
Desv. Pad.	0,7224	0,0736
I.C. 95%	0,2267	0,0231

Energia (J)	1489
-------------	------

## **ANEXO B PROGRAMA DE LABVIEW**



## **ANEXO C EQUIPAMENTO USADO**

- Banco de ensaios: Torno Einhell 6Z017403; Frequencímetro OMRON SysDrive3GJV
- Placa de aquisição de dados digital/analógica 14bit National Instruments - NI USB-6009
- Foto-tacómetro digital RS163-5348
- Microscópio eletrônico de varrimento (Philips XL30 TMP)
- Microscópio ótico Nikon SMZ-10 associado a máquina fotográfica digital Cannon PowerShot A620
- Balança analítica AND GH-202 - resolução 0,0001mg