



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Estudo dos efeitos de acumulação de dano por desgaste**

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

**Autor**

**Tiago Pinho Silva**

**Orientadores**

**Professor João Carlos Cerejo Ayres Miranda**

**Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professor Doutor José António Martins Ferreira</b> <b>Professor Catedrático da Universidade de Coimbra</b>
<b>Vogais</b>	<b>Professor Doutor Mário António Simões Correia</b> <b>Professor do Instituto Politécnico de Leiria</b>
<b>Orientador</b>	<b>Professor João Carlos Cerejo Ayres Miranda</b> <b>Professor do Instituto Politécnico da Guarda</b>

**Coimbra, Setembro, 2014**

He who is not courageous enough to take risks will accomplish nothing in life.

Muhammad Ali

Aos meus pais e irmão

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor João Carlos Cerejo Ayres Miranda e Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho pela receptividade e colaboração na orientação desta tese, pelo estímulo, dedicação, apoio e orientação científica.

À Duritcast S.A. pelo varão de ferro fundido cinzento GJL 200 que cederam para a criação dos discos de ensaio.

Agradeço, também, a todos os membros que comigo partilharam o laboratório de Construções Mecânicas pelo bom ambiente de trabalho criado e ajuda sempre pronta.

Aos meus grandes amigos e companheiros de curso Norberto Ramos, Ricardo Domingos, Ricardo Silva, Rui Honório, João Amaro e Diogo Godinho pela amizade, apoio e ajuda que me deram ao longo do meu percurso académico.

À minha família que sempre me apoiaram incondicionalmente ao longo de todo o meu percurso académico.

A todos os outros aos quais não referi pessoalmente, um muito obrigado.

## Resumo

Atualmente, a equação de Archard é a mais utilizada no estudo do desgaste para cargas constantes. Esta equação permite determinar o volume de desgaste, a partir da carga normal aplicada e da distância percorrida. No entanto, a sua aplicabilidade para acumulação de dano não está comprovada. Torna-se assim numa excelente oportunidade o estudo da comparação e análise do efeito de dano por desgaste de cargas compostas com dano por cargas constantes.

Neste estudo foram efetuados vinte e cinco ensaios em que dezassete foram realizados com carga constante e oito com variação de carga ao longo do ensaio. Através destes mostrou-se, nesta dissertação, que a equação de Archard não é linear para ensaios compostos e ainda que a energia e o volume de desgaste também não são lineares. No entanto, o erro relativo associado é inferior comparado ao obtido pela equação de Archard.

Concluiu-se que na fase inicial dos ensaios, *running-in*, há uma grande instabilidade no atrito levando a um maior desgaste volúmico. Da análise de microscopia observou-se o estado das pistas pós-ensaio. Verificou-se que existem zonas com elevada fissuração no sentido do ensaio e que existem regiões onde a remoção de material ocorreu por arranque e não por deslize. Para além disso foram detetados *spots* metálicos provocados pela elevada variação da temperatura.

**Palavras-chave:** Desgaste, Archard, *Running-in*, Atrito, Modelos de desgaste.

## **Abstract**

Currently, the most used function in the study of wear for single loads is Archard's equation. This equation allows to determine the wear volume, from the applied normal load and the travelled distance. However its applicability for accumulated wear damage is unproven. Therefore the study to compare and analyze the effect of the wear damage of composite loads with single loads becomes an excellent opportunity.

In this study twenty five tests were performed in which seventeen were made with a constant load and eight with composite loads. Through these it was shown that the Archard's equation is not linear for composite loads and that the energy and the wear volume are not linear. However, the relative error associated is lower than the error in the Archard's equation.

In conclusion, in the initial part of the tests, running-in phase, there was a considerable instability in the friction leading to a bigger energetic expenditure. From the microscopy analysis, it was observed the state of the lanes after the tests. It has been found that there are areas with a high fissures in the test direction and that there are regions where the material removal occurred by pulling rather than sliding. Additionally metallic spots caused by high temperature variations were detected.

**Keywords** Wear, Archard, Running-in, Friction, Wear models.

## Índice

Índice de Figuras .....	v
Índice de Tabelas .....	vi
Simbologia.....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1. Equação de Archard.....	3
2.2. Desgaste.....	5
2.2.1. Mecanismos de desgaste.....	5
2.3. Efeito de rodagem.....	6
3. TRABALHO EXPERIMENTAL.....	8
3.1. Ensaio Disco-pino.....	8
3.1.1. Considerações teóricas e funcionamento do ensaio .....	9
3.1.2. Material utilizado.....	9
3.2. Procedimentos.....	11
3.3. Cálculo dos resultados .....	12
3.3.1. Volume de desgaste .....	12
3.3.2. Atrito.....	15
3.3.3. Energia.....	15
3.4. Ataque químico ao disco de ensaio.....	16
3.5. Microscopia das pistas de ensaio .....	17
4. TRATAMENTO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	18
4.1. Volume de desgaste do disco .....	18
4.1.1. Ensaios 5 N.....	18
4.1.2. Equação de Archard.....	20
4.1.3. Ensaios compostos.....	25
4.2. Energia do ensaio.....	32
4.3. Microscopia dos ensaios .....	34
4.4. Volume de desgaste da esfera .....	37
5. CONCLUSÃO.....	39
BIBLIOGRAFIA .....	41

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Fases do processo de rodagem. (Blau, 2009).....	7
Figura 3.1. Esquema de um ensaio <i>pin on disk</i> . ....	8
Figura 3.2. Medidor de rugosidade e localização das medições. ....	12
Figura 3.3. Dados não tratados e alinhamento da área de desgaste. ....	13
Figura 3.4. Dados tratados e área de desgaste. ....	13
Figura 3.5. Superfície de desgaste na esfera após um ensaio. ....	14
Figura 3.6. Força de atrito mediana. ....	15
Figura 3.7. Microscopia da superfície da pista de desgaste do ensaio de carga 7 N e distância 5000 m. ....	17
Figura 4.1. Volume de desgaste dos ensaios de 5 N. ....	18
Figura 4.2. Resultados dos ensaios 5 N. ....	19
Figura 4.3. Comparação dos resultados dos ensaios 5 N e 7 N. ....	19
Figura 4.4. Resultados dos ensaios 3, 5 e 7 N. ....	20
Figura 4.5. Volume de desgaste dos ensaios compostos. ....	25
Figura 4.6. Formas iniciais do comportamento do atrito. (Blau, 2009) ....	29
Figura 4.7. Atrito do ensaio 10. ....	30
Figura 4.8. Atrito do ensaio 22. ....	30
Figura 4.9. Volume de desgaste relativamente à evolução do atrito. ....	31
Figura 4.10 Volume de desgaste pela energia. ....	32
Figura 4.11. Riscos na superfície da pista de desgaste. ....	34
Figura 4.12. Superfície da pista de desgaste com material removido. ....	35
Figura 4.13. <i>Spots</i> metálicos na superfície da pista de desgaste. ....	35
Figura 4.14. Volume de desgaste da esfera. ....	38

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Volumes de desgaste do disco e da esfera.....	12
Tabela 4.1. Volume de desgaste dos ensaios das cargas aplicadas 3, 5 e 7 N.....	21
Tabela 4.2. Erro relativo dos ensaios iniciais em relação à equação de Archard.....	22
Tabela 4.3. Ensaios compostos para estudar a propriedade associativa.....	23
Tabela 4.4. Ensaios compostos para estudar a propriedade comutativa.....	24
Tabela 4.5. Volume de desgaste dos ensaios compostos.....	25
Tabela 4.6. Erro dos ensaios compostos em relação a equação de Archard.....	26
Tabela 4.7. Erro dos ensaios compostos em relação a função energética.....	33
Tabela 4.8. Volume de desgaste da esfera.....	37

## SIMBOLOGIA

$a$  – Raio da circunferência

$A$  – Área de desgaste

$E$  – Energia

$F_a$  – Força de atrito

$h$  – Altura de desgaste

$H$  – Dureza do material mais macio

$k$  – Taxa de desgaste específica

$K$  – Coeficiente de desgaste

$n_{ciclos}$  – Número de ciclos

$N$  – Carga normal

$v$  – Velocidade

$\hat{v}$  – Velocidade angular

$V$  – Volume de desgaste

$V_{esfera}$  – Volume de desgaste da esfera

$r$  – Raio da esfera

$r_{pista}$  – Raio da pista

$x$  – Distância de deslizamento

$\mu$  – Coeficiente de atrito

## 1. INTRODUÇÃO

O desgaste é um processo de perda progressiva de material a partir da superfície operacional de um corpo causado pelo movimento relativo da superfície. Este processo é um dos maiores desafios no cálculo do tempo de vida útil dos componentes mecânicos. A caracterização dos tipos de desgaste e a sua identificação prévia permite determinar com maior precisão o tempo de vida útil de um determinado componente.

Na engenharia, um dos objetivos vitais é desenvolver relações de desempenho entre todas as variáveis e parâmetros de um sistema, na forma matemática. Assim, também na tribologia deveriam existir equações para preverem taxas de desgaste. Infelizmente, as equações disponíveis são pouco esclarecedoras e não preveem a vida de um produto com fiabilidade. Muitos artigos têm sido escritos sobre o tema, mas com pouca relevância na direção para o desenvolvimento concreto de bons modelos de desgaste. (H.C. Meng, 1995)

Na sociedade atual são encontrados inúmeros exemplos de situações de desgaste, como por exemplo, na maquinaria fabril, automóveis, utensílios domésticos, próteses e em todos os mecanismos que tenham contacto entre duas superfícies, o que motiva a elaboração de estudos sobre danos provocados por desgaste. Neste sentido a elaboração de um estudo que permita determinar a viabilidade da equação de Archard para ensaios compostos é de elevada importância. De forma a colmatar esta carência, esta dissertação pretende reconhecer se a equação de Archard mantém ou não a sua linearidade em ensaios compostos.

O estudo dos efeitos de acumulação de dano por desgaste é o assunto central desta dissertação. Com este não se pretende melhorar a forma como estes são calculados, nem desenvolver um novo conceito de cálculo de acumulação de dano por desgaste. Pretende-se sim: (i) identificar as variáveis que influenciam o volume de desgaste; (ii) descrever e apresentar a equação de Archard, variante de Czichos e efeito de rodagem; (iii) apresentar as variáveis necessárias para a análise do estudo do efeito do dano; (iv) descrever e elaborar o método de ensaio para este estudo; (v) verificar a linearidade da equação de Archard para o estudo proposto; (vi) comparar a linearidade do gasto energético com o da equação de Archard; (vii) examinar o comportamento do atrito nos ensaios; e (viii) apresentar a microscopia das pistas de ensaio.

Esta dissertação encontra-se subdividida em 5 capítulos e neste primeiro capítulo pretende-se apresentar de uma forma breve o tema abordado, as principais motivações para a sua execução, os objetivos específicos e a estrutura desta dissertação.

No segundo capítulo, “Revisão bibliográfica”, efetua-se um breve enquadramento da equação de Archard e da variante de Czichos. Abordam-se, ainda, os diferentes tipos de desgaste e por fim apresenta-se o conceito de processo de rodagem, *running-in*, que é uma fase presente em todos os ensaios de deslizamento.

O terceiro capítulo, “Trabalho experimental”, é dedicado à explicação do método de ensaio, e faz uma resenha dos procedimentos e forma de obtenção de resultados. É efetuada uma breve apresentação do ensaio disco-pino com as suas considerações teórica e modo de funcionamento e é dado ênfase aos métodos de cálculo do volume de desgaste, atrito e energia. Nas duas últimas secções deste capítulo abordam-se o ataque químico ao disco de ensaio e a microscopia das pistas de ensaio.

No quarto capítulo, “Tratamento e discussão dos resultados”, são apresentados e discutidos os resultados sendo dadas algumas justificações para os comportamentos observados. Por fim, aborda-se uma alternativa ao estudo do volume de desgaste, utilizando a energia gerada pelo atrito em vez do volume de desgaste.

Por último, no quinto capítulo, “Conclusão”, encontram-se resumidas as principais conclusões a que se chegou sobre o estudo dos efeitos de acumulação de dano por desgaste. Este capítulo termina com a enumeração de alguns aspetos a melhorar em trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um dos maiores desafios na resolução de problemas de desgaste é a antecipação dos tipos de desgaste a que os materiais ou componentes iriam ser sujeitos durante o seu tempo de vida útil. Torna-se assim de extrema importância efetuar uma identificação prévia dos tipos de desgaste a que eles serão sujeitos ao longo do tempo. Neste sentido a caracterização do desgaste deve ser efetuada de acordo com alguns fatores como o volume de desgaste, a carga aplicada, a dureza do material e a distância de deslizamento. A avaliação destes fatores permite estimar o comportamento do material/componente ao longo tempo e assim quantificar a sua influência na funcionalidade do material/componente.

Assim sendo, e devido à importância que o estudo do desgaste tem para esta dissertação, este capítulo é repartido da seguinte forma: equação de Archard, desgaste e o efeito de rodagem.

### 2.1. Equação de Archard

A equação de Archard (2.1), desenvolvida na década de 50 do século XX, é uma das leis de desgaste mais utilizadas nos dias de hoje. A sua grande utilização deve-se à sua simplicidade e capacidade de caracterizar o desgaste sob uma ampla variedade de condições.

A equação de Archard foi desenvolvida com as seguintes premissas:

- O contato local ocorre quando rugosidades interagem;
- A área de contato real é proporcional à carga normal;
- Cada contato de rugosidades individual é circular;
- A deformação das rugosidades nos metais é plástica;
- O contato modelado é isotérmico.

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

Nesta equação, o volume de desgaste ( $V$ ) é obtido multiplicando o coeficiente de desgaste ( $K$ ) pela carga normal ( $N$ ), a distância de deslizamento ( $x$ ) e a inversa da dureza do material mais macio ( $H$ ).

A equação de Archard é calibrada usando o coeficiente de desgaste adimensional ( $K$ ). Este coeficiente de desgaste representa todos os fatores exceto carga normal, distância de deslizamento e dureza do material. No entanto, tem sido visto como tendo diferentes probabilidades ou efeitos, tal que:

- Archard considerava-o como a probabilidade de uma partícula de desgaste ser formada a partir de qualquer interação de rugosidade existente;
- Pode ser considerado como a fração de volume total plasticamente deformado;
- Tem sido utilizado para representar a fração de energia que contribui para o desgaste;
- Pode representar o número de ciclos de carga à fadiga até à rotura.

(Podra P., 1997)

A variante de Czichos, equação utilizada neste estudo, que provém da equação de Archard, introduz uma taxa de desgaste específica ( $k$ ), que substitui o coeficiente de desgaste ( $K$ ). Esta nova taxa de desgaste específica ( $k$ ) (equação (2.2)), assimila as propriedades do coeficiente de desgaste ( $K$ ) e da dureza ( $H$ ) pois ambos revelam as respostas do material ao desgaste a que esteve exposto.

$$k = \frac{K}{H} \quad (2.2)$$

Assim, em vez de utilizar a equação de Archard, será usada a variante de Czichos, equação (2.3).

$$V = k \cdot N \cdot x \quad (2.3)$$

(A. Ramalho, 2006)

O motivo pelo qual foi escolhida a equação de Archard para este estudo foi pela sua linearidade. Sendo esta linear podemos explorar as propriedades comutativa e aditiva associadas a estas equações e assim teremos um estudo mais exaustivo e verificaremos a aplicabilidade da mesma.

## **2.2. Desgaste**

O desgaste é a perda progressiva de material a partir da superfície operacional de um corpo causado pelo movimento relativo da superfície. No sentido mais generalizado o desgaste pode ser classificado como moderado ou severo.

No desgaste moderado, o processo ocorre nas camadas superficiais exteriores, as superfícies permanecem suaves e são geralmente cobertas por superfícies de óxidos gerados durante a fricção. Deste tipo de desgaste resultam pequenos detritos na pista, com dimensões de alguns nanómetros. No desgaste severo, as superfícies são seriamente deformadas e os detritos de desgaste consistem em partículas com dimensões até algumas centenas de micrómetros.

Esta classificação baseada no tamanho dos detritos de desgaste é a mais simples, sendo usual utilizar uma classificação mais tradicional em que o desgaste é classificado pelo movimento relativo ou o mecanismo de desgaste. (A. Ramalho, 2006)

### **2.2.1. Mecanismos de desgaste**

O desgaste é provocado por vários mecanismos e reações sendo eles: desgaste adesivo, desgaste difusivo, desgaste abrasivo, desgaste por corte, desgaste por deformação, desgaste por fadiga, desgaste por deslizamento, desgaste ao impacto, desgaste químico, desgaste corrosivo, desgaste por oxidação, desgaste térmico, cavitação e erosão. (H.C. Meng, 1995)

Uma vez que neste estudo o mecanismo de desgaste considerado foi o de abrasão, na subsecção seguinte este será descrito com maior pormenor.

### **2.2.1.1. Abrasão**

Desgaste por abrasão é descrito como uma combinação de corte, falha por fadiga e transferência de material. (H.C. Meng, 1995)

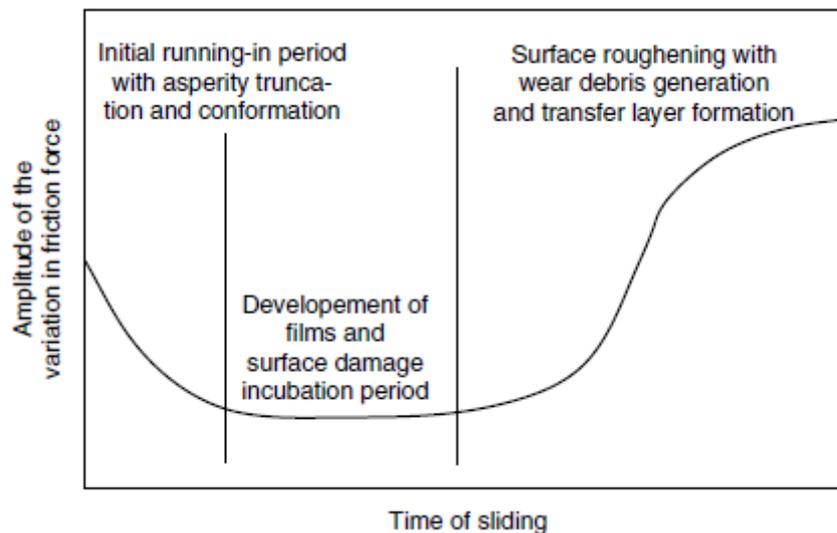
O desgaste abrasivo é normalmente classificado de acordo com o tipo e o ambiente de contato. O tipo de contato determina o modo de desgaste abrasivo, existindo dois modos, desgaste a dois corpos e desgaste a três corpos. O primeiro ocorre quando os grãos ou partículas duras removem material da superfície oposta. A analogia é comum ao do material a ser removido ou deslocado por corte ou à operação de arar. Enquanto que o desgaste a três corpos ocorre quando as partículas não são limitadas, e estão livres para rolar e deslizar entre as superfícies. O meio de contacto determina se o desgaste é classificado como aberto ou fechado. Ao contrário do corte fechado, um ambiente de contacto aberto ocorre quando as superfícies estão suficientemente deslocadas uma da outra para serem independentes. (ASM Handbook Committee, 2002)

## **2.3. Efeito de rodagem**

O efeito de rodagem, mais conhecido por *running-in*, é uma fase presente em todos os ensaios de deslizamento. Durante esta fase, na maioria das máquinas, as superfícies são suavizadas pelo desgaste e deformação plástica, o que leva a uma melhor conformidade, redução das concentrações de tensões e uma maior lubrificação. Um outro mecanismo que ocorre é a formação de películas de proteção ao desgaste, como as que são formadas frequentemente nas arestas de ferramentas de corte. (ASM Handbook Committee, 2002)

O efeito de rodagem pode ser muito importante em alguns sistemas de deslizamento, como também em sistemas de rolamentos e engrenagens. Durante esta fase as superfícies de contacto conformam-se entre elas de tal forma que a carga é distribuída de modo mais favorável ao longo das superfícies. Durante o *running-in*, a taxa de desgaste pode ser relativamente alta, por isso esta fase deveria ser curta em comparação com o tempo de vida dos materiais. (Bhushan, 2000)

Durante esta fase, a força de atrito tem valores bastante altos, no entanto, é instável e não mantém qualquer regularidade.



**Figura 2.1.** Fases do processo de rodagem. (Blau, 2009)

Como pode ser observado na Figura 2.1 o processo de rodagem está dividido em três secções. A primeira por uma secção onde a rodagem faz o desgaste das rugosidades. A segunda por uma secção onde se formam filmes e se dá o período de incubação de danos superficiais. A terceira fase em que a superfície começa a desgastar formando detritos de desgaste e formam-se camadas de transferência de material. Após esta última fase, o ensaio entra numa zona estável, podendo existir uma nova zona de variação de atrito no fim do tempo de vida do componente quando quebra.

### 3. TRABALHO EXPERIMENTAL

Este trabalho experimental foi realizado de forma a perceber se a sobreposição de cargas em ensaios de desgaste *pin on disk* altera a quantidade de volume de desgaste num material ou se este se mantém constante. Nestas próximas secções irá ser detalhado o ensaio, os procedimentos e as formas como foram obtidos os resultados.

#### 3.1. Ensaio Disco-pino

Os testes de desgaste e atrito são efetuados com um equipamento designado por *pin on disk*, que permite determinar a força de atrito e o desgaste entre duas superfícies. O princípio de funcionamento do equipamento utilizado nos ensaios, ilustrado na Figura 3.1, consiste em usar uma ponta esférica que é carregada contra a superfície a testar com uma força pré-determinada. Este sistema está ligado a um pino montado sobre um braço rígido, que funciona como um sistema de alavanca, tendo na outra extremidade um fio plástico com pesos, de modo a definir a força imposta e reduzir ao mínimo a transmissão das vibrações para os mesmos (Budinski, 2007). Na extremidade do pino existe um acelerómetro que obtém os dados do movimento do pino, neste caso correspondentes ao atrito criado entre os dois corpos.

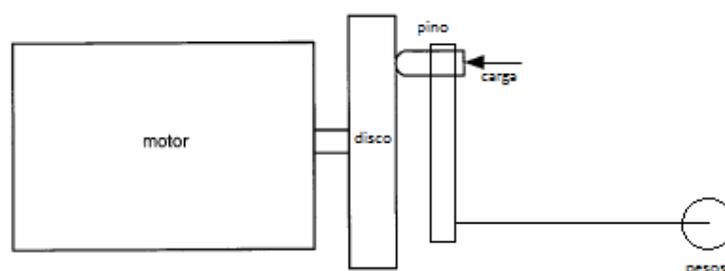


Figura 3.1. Esquema de um ensaio *pin on disk*.

### 3.1.1. Considerações teóricas e funcionamento do ensaio

Os ensaios realizados neste estudo têm como base pressupostos teóricos e algumas restrições impostas de modo a conseguir perceber o que uma certa variável altera num certo mecanismo.

Uma dessas restrições impostas nestes ensaios foi manter a velocidade constante com um valor de 0,5 m/s. Esta imposição, num ensaio de pino-disco, leva a que a velocidade angular varie com a distância ao centro do disco. Por este motivo, foi necessário calcular a velocidade angular ( $\hat{v}$ ), específica para cada um dos ensaios. Esta foi obtida multiplicando a velocidade ( $v$ ) por 60 a dividir por  $2\pi$  multiplicando pelo raio da pista ( $r_{pista}$ ) (equação (3.1)).

$$\hat{v} = \frac{v \times 60}{2\pi \times r_{pista}} [rpm] \quad (3.1)$$

### 3.1.2. Material utilizado

Os materiais utilizados para os ensaios de desgaste foram ferro fundido cinzento GJL 200 para os discos e Aço duro 100CR6 para as esferas. A escolha destes materiais permitiu que o desgaste fosse maior no disco do que na esfera, por ter uma dureza superior, possibilitando ir de encontro às intenções deste estudo. Outro motivo da sua escolha foi minimizar a adesão nos ensaios. Nas próximas subsecções serão detalhadas as características de cada um deles.

#### 3.1.2.1. Disco

O ferro fundido cinzento GJL 200, material dos discos de ensaio, inclui na sua composição química 3,10 - 3,40 % de Carbono (C), 1,90 - 2,30 % de Silício (Si), 0,60 - 0,90 % de Manganês (Mn),  $\leq 0,15$  % de Fósforo (P) e  $\leq 0,15$  % de Enxofre (S).

A resistência de um ferro fundido cinzento varia com o tamanho da secção de fundição por causa dos efeitos de solidificação, e a sua força de compressão é de três a quatro vezes a força de tração devido aos planos de fraqueza criados pelos flocos de grafite. Este

tipo de ferro tende a ser frágil em comparação com o aço, mas é extremamente rígido e sofre pouca flambagem antes da fratura, dando-lhe boas propriedades de amortecimento.

Os flocos de grafite têm um efeito lubrificante, sendo um ótimo material para realizar ensaios de desgaste e também mais fácil e rápido de maquinar. Um dos seus inconvenientes é a grande dificuldade de soldadura.

O ferro fundido cinzento tem uma grande aplicabilidade em áreas residenciais e industriais. Pode ser usado para a produção de peças fundidas de carga moderada como em caixas, facas, camas, mesas, rodas, blocos de motores, e pode também ser utilizado para fazer fundições capazes de suportar maiores cargas de tensão ou resistência à corrosão, tais como cilindros, engrenagens, *pistons*, caixas de velocidade, placas de acoplamento, entre outros. Em suma, o ferro fundido cinzento tem uma ampla gama de aplicações uma vez que é fácil de maquinar e tem baixos custos, comparando com os aços. (Dandong Foundry, s.d.)

O ferro fundido cinzento GJL 200 tem uma microdureza de 206,1 Hv, medição efetuada no microdurometro *Struers Duramin* com uma carga de 2Kg aplicada durante 15s.

### **3.1.2.2. Esfera**

O aço duro 100Cr6, material das esferas, também conhecido como Aço Crômio 100Cr6, é um aço martensítico ligado com baixo teor em crômio. A sua composição química base é formada por 0,95 - 1,10 % de Carbono (C), 0,15 - 0,35 % de Silício (Si), 0,20 - 0,40 % de Manganês (Mn),  $\leq 0,030$  % de Fósforo (P),  $\leq 0,030$  % de Enxofre (S), 1,35 - 1,65 % de Crômio (Cr),  $\leq 0,40$  % de Níquel (Ni) e  $\leq 0,10$  % de Molibdênio (Mo). (Steel Grades, 2011)

O aço 100Cr6 tem uma elevada dureza, resistência ao desgaste e acabamento superficial. A sua aplicação é bastante diversificada, podendo ser utilizado para fazer rolamentos de esferas de precisão, componentes para automóveis (freios, direção, transmissão), bicicletas, latas de *spray*, eletrodomésticos, guias para gavetas, engates rápidos, mecanismos para fechaduras, patins, canetas, bombas, rodas giratórias, instrumentos de medição, válvulas e parafusos de recirculação de esferas. As esferas utilizadas nos ensaios têm um diâmetro de 10 mm e uma dureza de 848 Hv.

### 3.2. Procedimentos

Para realizar os ensaios foram seguidos um conjunto de procedimentos que se encontram descritos a seguir:

- i. Colocar o disco no torno e prendê-lo;
- ii. Colocar no suporte da esfera uma superfície lisa e sem ensaios da esfera;
- iii. Colocar o suporte da esfera no local indicado;
- iv. Limpar a esfera e o disco com álcool;
- v. Colocar a esfera à distância pretendida;
- vi. Colocar as barras de ensaio do suporte da esfera paralelas e trancar o torno;
- vii. Ajustar a frequência de funcionamento;
- viii. Definir o tempo de ensaio;
- ix. Colocar os pesos;
- x. Criar um ficheiro para guardar as medições do acelerómetro e célula de carga;
- xi. Iniciar o ensaio.

Após os ensaios, o modo de proceder para não perder dados nem afetá-los foi o seguinte:

- i. Destrancar o torno;
- ii. Retirar o suporte da esfera;
- iii. Limpar com álcool;
- iv. Medir o diâmetro da marca de desgaste;
- v. Tirar foto à marca;
- vi. Retirar a esfera do suporte;

### 3.3. Cálculo dos resultados

De modo a extrair os resultados pretendidos dos dados recolhidos foram necessários vários métodos de cálculo, análise de gráficos e medições. Nas próximas subsecções serão explicados pormenorizadamente todos os passos efetuados para obter os resultados pretendidos.

#### 3.3.1. Volume de desgaste

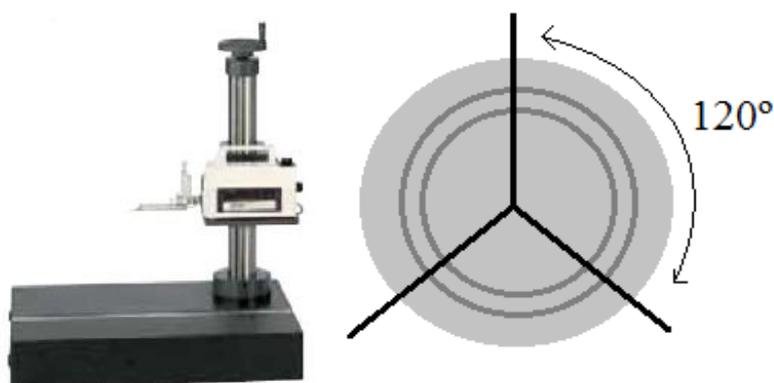
O volume de desgaste dos dois componentes do ensaio, o disco e a esfera (Tabela 3.1), foram adquiridos por diferentes métodos que serão descritos nas subsecções seguintes.

**Tabela 3.1.** Volumes de desgaste do disco e da esfera.

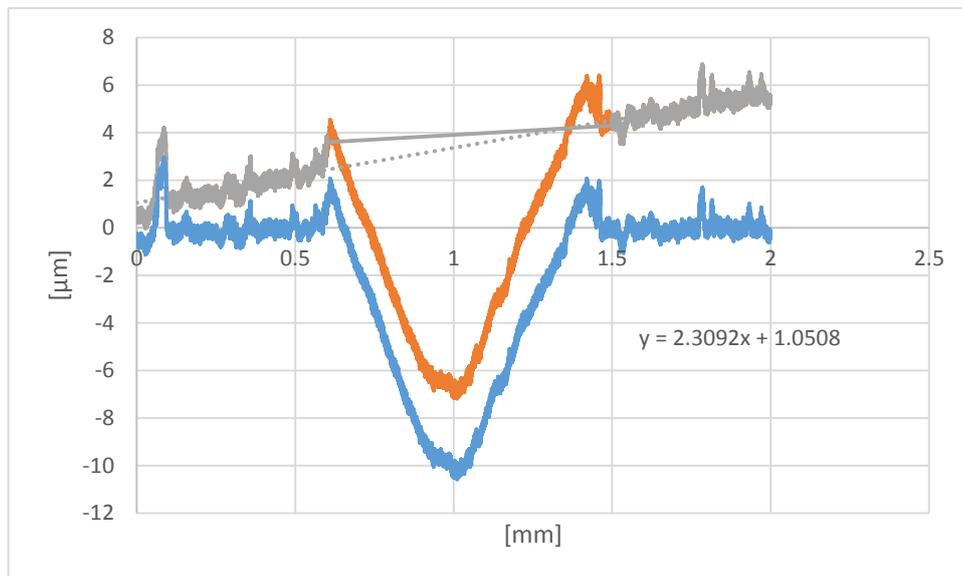
Ensaio	Área [µm]	Perímetro [mm]	Volume [mm]	Esfera-x [mm]	Esfera-y [mm]	h	Vesfera	r pista	Carga	Distância	N.x
D1L3F	-5.576427654	131.9468915	0.790566963	1.191	1.15	0.034252127	0.01838663	21	5	76451	50437.36
	-5.865588614			1.175	1.158					0.131947	
	-6.532646599			Média	10087.47						
	5.991554289			1.1685							

##### 3.3.1.1. Disco

Inicialmente através do medidor de rugosidade portátil da marca *Mitutoyo*, modelo *SurfTest- SJ-500/P Series 178* (Figura 3.2), foi calculada a rugosidade das pistas de desgaste em 3 pontos diferentes para cada ensaio, separados aproximadamente por 120°. Com os dados retirados, criou-se um gráfico (Figura 3.3) e selecionaram-se os pontos que não representavam a área de desgaste. Com estes pontos calculou-se a equação para alinhar o gráfico com os eixos criados pelo *excel* e assim colocar a área de desgaste abaixo do eixo das abcissas.



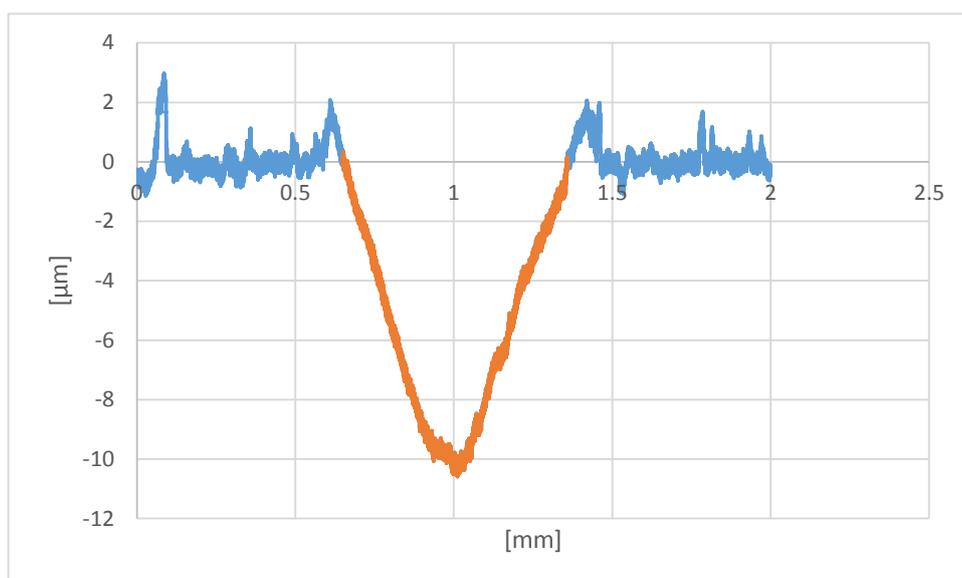
**Figura 3.2.** Medidor de rugosidade e localização das medições.



**Figura 3.3.** Dados não tratados e alinhamento da área de desgaste.

Num novo gráfico (Figura 3.4), usando os dados já tratados, selecionaram-se os valores abaixo do eixo, ou seja, valores de ordenada negativa entre os pontos de início e fim da área de desgaste ( $A$ ), e procedeu-se ao cálculo da mesma através da equação (3.2)

$$A = \sum 0.5 \frac{y_i + y_j}{x_j - x_i} [\mu m^2] \quad (3.2)$$



**Figura 3.4.** Dados tratados e área de desgaste.

Calculando a área de desgaste para todas as medições efetuadas em cada ensaio, calculou-se a média das mesmas obtendo assim a média da área de desgaste do ensaio. A distância de deslizamento ( $x$ ), calculou-se através do número de ciclos ( $n_{ciclos}$ ) e do raio da pista de ensaios ( $r_{pista}$ ) (equação (3.3)) e calculou-se o volume de desgaste através da área de desgaste e da distância (equação (3.4)).

$$x = n_{ciclos} \times 2\pi \cdot r_{pista} [m] \quad (3.3)$$

$$V = A \cdot x \cdot 10^{-3} [mm^3] \quad (3.4)$$

### 3.3.1.2. Esfera

O volume de desgaste da esfera foi calculado através de medições efetuadas no “*toolmakers Microscope*”, o que permitiu a medição de distâncias e utilizando esta funcionalidade mediu-se a ordenada e a abcissa do desgaste criado na esfera, que por norma teve uma forma aproximadamente circular (Figura 3.5).

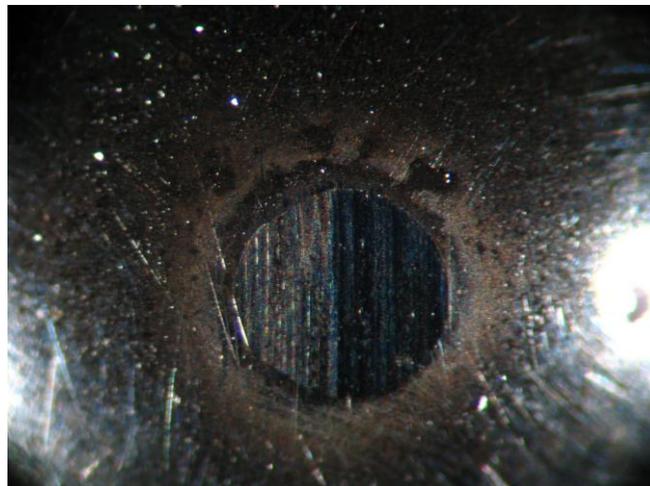


Figura 3.5. Superfície de desgaste na esfera após um ensaio.

Foram feitas sempre 2 medições em cada eixo de forma a reduzir o erro das medições, usando estas para calcular uma média do raio da circunferência ( $a$ ). Com o raio da circunferência calculou-se a altura de desgaste ( $h$ ) (equação (3.5)) e com a altura procedeu-se então ao cálculo do volume de desgaste da esfera ( $V_{esfera}$ ) (equação (3.6)).

$$h = r - \sqrt{r^2 - a^2} \quad (3.5)$$

$$V_{esfera} = \frac{\pi h}{6} (3a^2 + h^2) \quad (3.6)$$

### 3.3.2. Atrito

Para calcular o atrito usaram-se os dados recolhidos através do acelerómetro nos ensaios, formando documentos de texto com esses dados. De forma a reduzir a discrepância entre os pontos e perceber melhor a forma da evolução do atrito, calculou-se uma média móvel utilizando 21 pontos do atrito, representado na Figura 3.6.

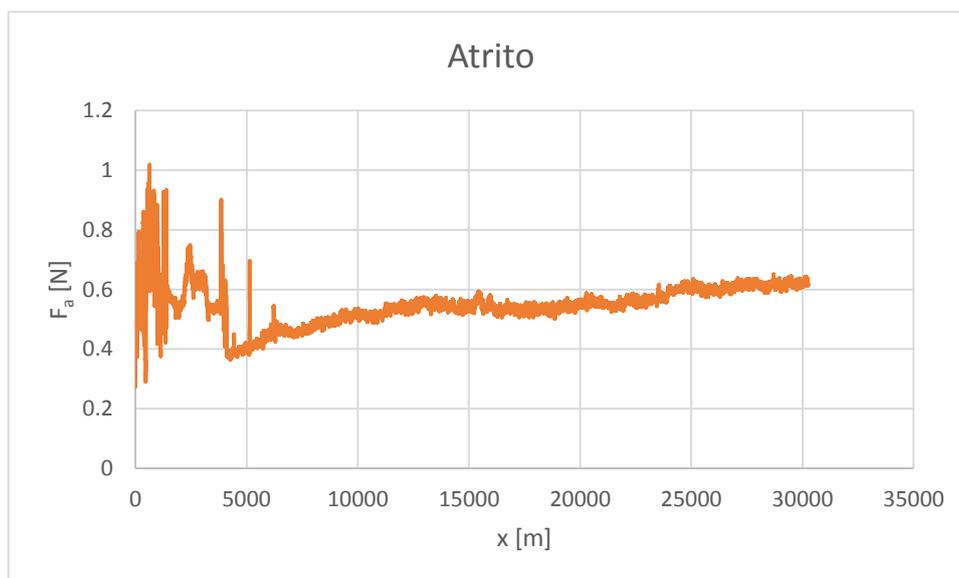


Figura 3.6. Força de atrito mediana.

### 3.3.3. Energia

O cálculo da energia dos ensaios foi efetuado através da equação

$$E = \bar{F}_a \cdot x [J] \quad (3.7)$$

Na equação (3.7) a energia ( $E$ ) é obtida através da multiplicação do somatório das forças de atrito ( $\bar{F}_a$ ) pela distância do ensaio ( $x$ ).

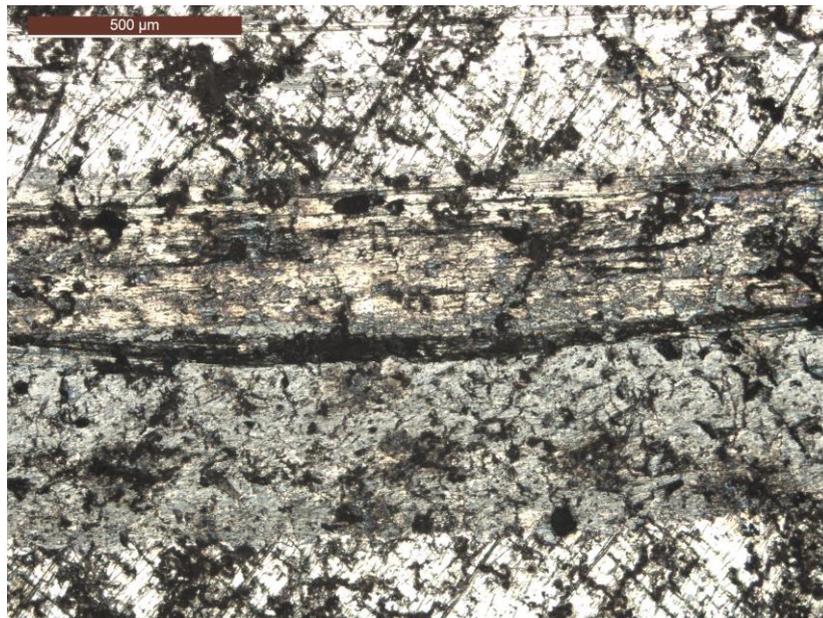
### 3.4. Ataque químico ao disco de ensaio

De modo a verificar se houve alterações na estrutura do disco, realizou-se um ataque químico a uma parte do disco cortado. Foi adotado o seguinte procedimento para a realização da análise metalográfica:

- i. Cortar as amostras com dimensões previamente estabelecidas;
- ii. Identificar cada uma das amostras;
- iii. Limpar as arestas das amostras em moldes para que fiquem com um diâmetro adequado ao tamanho da amostra em resina a frio;
- iv. Proceder à montagem das amostras em moldes com um diâmetro adequado ao tamanho da amostra em resina a frio;
- v. Realizar a lixagem das amostras utilizando lixas de granulometria 320 mesh, 600 mesh e 1000 mesh;
- vi. Proceder ao polimento das amostras, utilizando uma pasta de 6 micrómetros de granulometria, com uma mistura de lubrificante e pó diamante até ficar sem riscos;
- vii. Lavar a amostra com água e detergente e depois com álcool e secar;
- viii. Proceder ao ataque químico das amostras com uma mistura de Nital a 2%.  
(Vander Voort, 1984)

### 3.5. Microscopia das pistas de ensaio

A microscopia das pistas de ensaio (Figura 3.7) foi realizada para se perceber o estado das mesmas e que tipo de alterações ocorreram. Para tal, foi utilizado o microscópio ótico Zeiss, modelo Axiotech.



**Figura 3.7.** Microscopia da superfície da pista de desgaste do ensaio de carga 7 N e distância 5000 m.

## 4. TRATAMENTO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O estudo dos efeitos de acumulação de dano por desgaste carece do cálculo de várias variáveis em consequência do método utilizado. As variáveis principais são o volume de desgaste do disco, a energia e o atrito. Neste sentido, devido à sua importância e pelo facto do objetivo principal desta dissertação ser o estudo do efeito de dano de desgaste em ensaios compostos, neste capítulo são tratados e discutidos os dados obtidos em cada ensaio. Assim este capítulo encontra-se subdividido da seguinte forma: volume de desgaste do disco, energia do ensaio, atrito, volume de desgaste da esfera, e microscopia dos ensaios.

### 4.1. Volume de desgaste do disco

Inicialmente, iriam-se fazer ensaios de desgaste com 3 N, 5 N, 7 N. Optou-se começar pelos ensaios de 5 N pois trata-se de uma carga intermédia e assim os próximos ensaios servirão para verificar o que acontece quando a carga é superior ou inferior.

#### 4.1.1. Ensaios 5 N

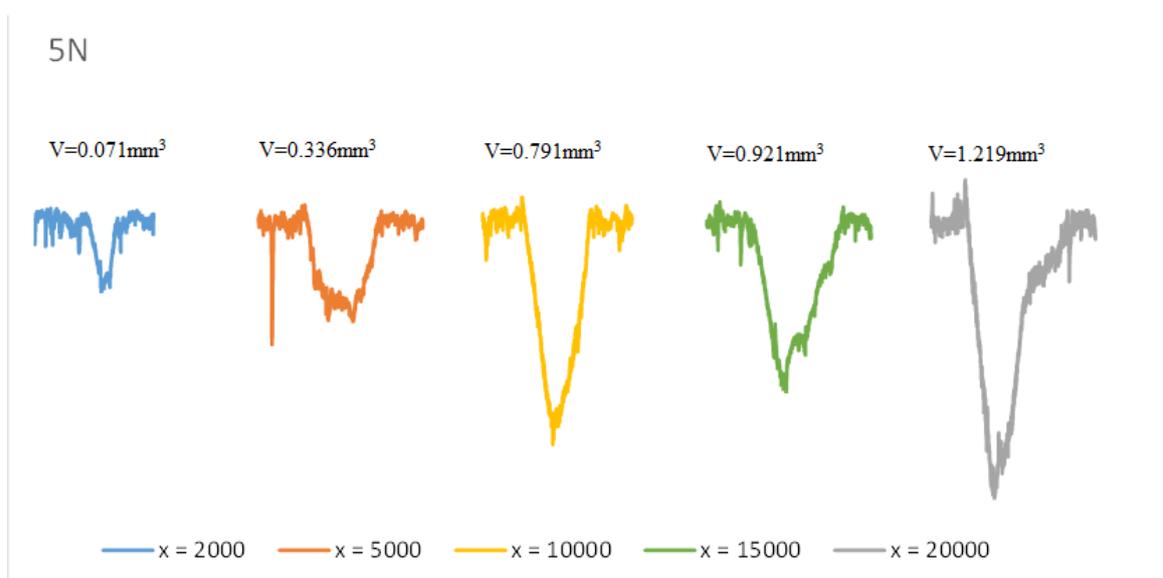


Figura 4.1. Volume de desgaste dos ensaios de 5 N.

Após ter realizado os ensaios iniciou-se o tratamento dos mesmos. Começou-se por relacionar o volume de desgaste com a distância de cada ensaio (Figura 4.2).

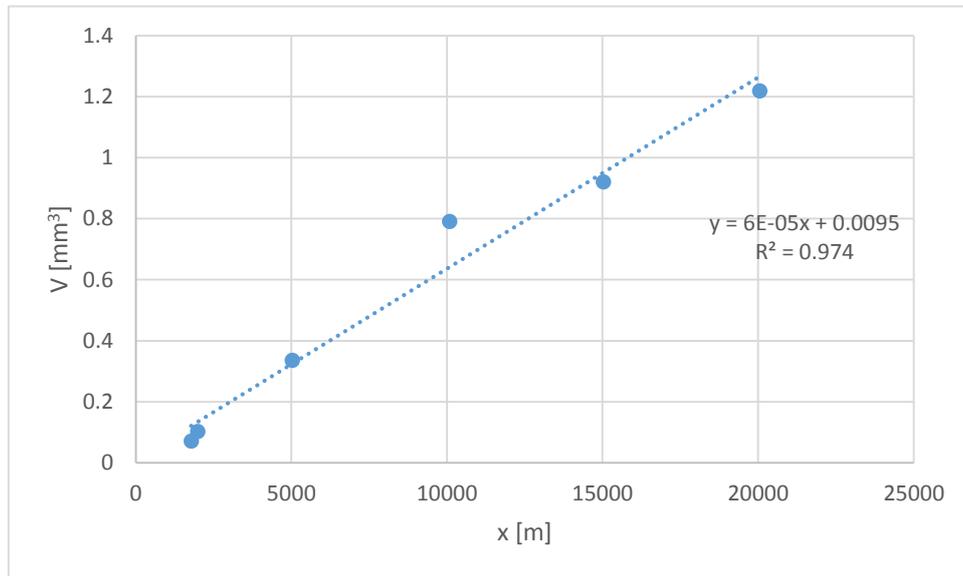


Figura 4.2. Resultados dos ensaios 5 N.

Os resultados dos ensaios de 5 N adequam-se a uma função linear. Teoricamente, os ensaios de 7 N criariam uma equação superior a de 5 N.

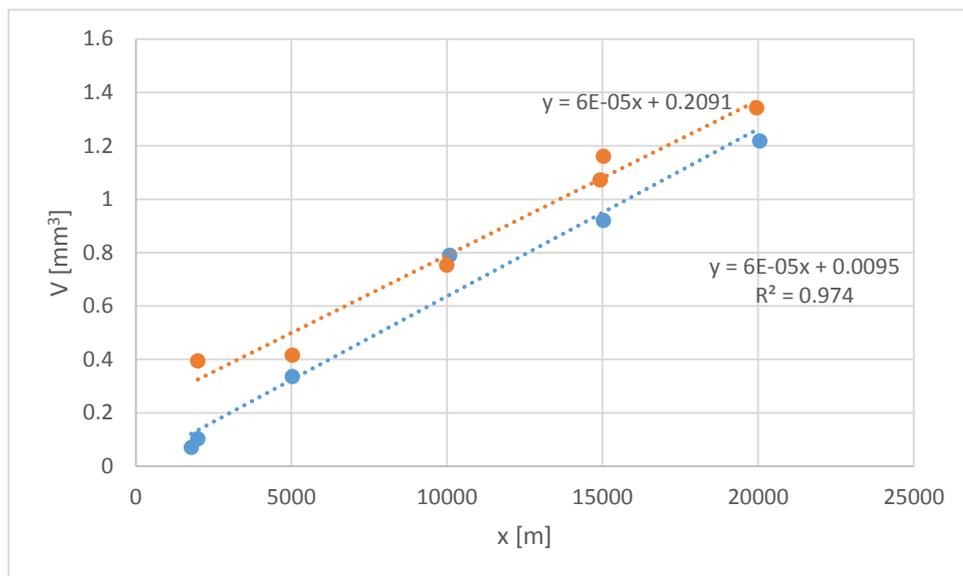


Figura 4.3. Comparação dos resultados dos ensaios 5 N e 7 N.

Como é observado na Figura 4.3, os resultados da série de 7 N são superiores aos da série de 5 N, confirmando a linearidade da alteração da distância de deslize para uma carga constante.

#### 4.1.2. Equação de Archard

Tendo confirmado a linearidade da equação de Archard quanto à variação da distância para 5 e 7 N, o passo seguinte seria fixar a distância e proceder a uma variação da carga. Será que a linearidade da equação de Archard continua a confirmar-se?

Apesar do estudo, não ter sido intensivo, dos poucos pontos adquiridos que tinham a mesma distância de ensaio levam a concluir-se que a linearidade também se mantém para esta situação. Por estes motivos, utilizou-se a equação de Archard para o estudo.

A equação de Archard continua a tratar-se de uma equação linear que expressa uma relação de proporcionalidade direta entre o volume de desgaste e o produto da carga normal pela distância ( $N.x$ ), conforme a equação (2.3). O significado algébrico da taxa de desgaste específica aparece assim naturalmente como a constante que regula aquela proporcionalidade.

A partir do Figura 4.4 consegue-se retirar a função que será a equação de Archard.

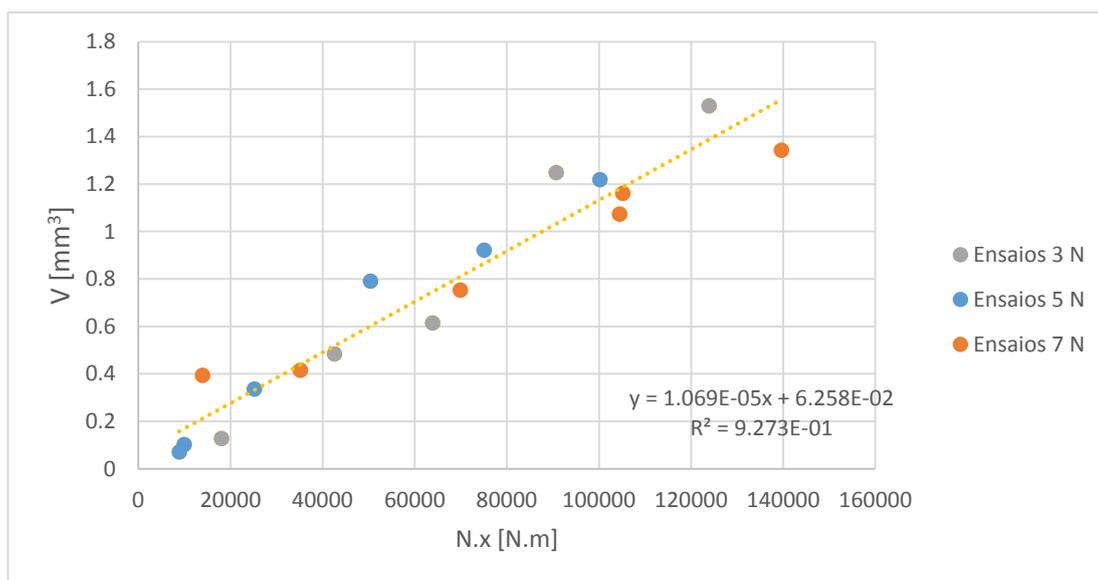


Figura 4.4. Resultados dos ensaios 3, 5 e 7 N.

**Tabela 4.1.** Volume de desgaste dos ensaios das cargas aplicadas 3, 5 e 7 N.

Ensaio	Carga aplicada [N]	N.x [N.m]	Volume [mm <sup>3</sup> ]
1	3	90764.853	1.248
2		42609.647	0.483
3		63898.581	0.614
4		18097.835	0.127
5		123927.932	1.530
6	5	8903.588	0.071
7		25169.812	0.336
8		50437.359	0.791
9		100271.343	1.219
10		75120.098	0.921
11	7	9970.473	0.102
12		13937.946	0.394
13		35198.153	0.416
14		69912.588	0.753
15		139626.728	1.342
16		104474.229	1.073
17		105201.696	1.160

Sabendo que o volume de desgaste está representado nas ordenadas e a carga e distância nas abcissas, o declive da recta corresponderá a taxa de desgaste específica ( $k$ ) (equação (4.1)).

$$Y = 1,069 \times 10^{-5} X \Leftrightarrow V = k(N.x) \quad (4.1)$$

Através do cálculo da média e do desvio padrão desta equação, pode-se chegar à conclusão que, assumindo uma confiança de 85%, os resultados estariam num intervalo de confiança entre ] 9.52E-06; 1.19E-05[. De facto o intervalo é tão pequeno que graficamente é difícil tirar ilações conclusivas.

O erro criado pelos ensaios é um erro pequeno, como se pode observar na Tabela 4.2, pois foram estes os dados utilizados para criar a função.

**Tabela 4.2.** Erro relativo dos ensaios iniciais em relação à equação de Archard.

Ensaio	Carga aplicada [N]	$V_{\text{previsto}}$ [mm <sup>3</sup> ]	Erro	Erro relativo	%
1	3	0.095	0.277	0.286	28.6
2		0.269	0.028	0.061	6.1
3		0.539	-0.069	-0.101	10.1
4		1.072	-0.066	-0.344	34.4
5		0.803	0.205	0.155	15.5
6	5	0.107	-0.024	-0.256	25.6
7		0.149	0.067	0.249	24.9
8		0.376	0.251	0.466	46.6
9		0.747	0.147	0.137	13.7
10		1.493	0.118	0.147	14.7
11		1.117	-0.004	-0.041	4.1
12		1.125	0.245	1.648	164.8
13	7	0.970	0.040	0.105	10.5
14		0.455	0.006	0.008	0.8
15		0.683	-0.150	-0.101	10.1
16		0.193	-0.044	-0.039	3.9
17		1.325	0.036	0.032	3.2

Sendo a equação de Archard uma equação linear tem as propriedades das funções lineares. Algebricamente, é legítimo assumir que a equação verifica as propriedades associativa e comutativa. Obviamente que no presente caso a verificação da demonstração destas propriedades ultrapassa largamente o interesse algébrico. Quanto à propriedade associativa pretende-se sobretudo verificar qual o erro esperado quando se aplica a equação de Archard em situações de carga variável que possam ser descritas pela adição sucessiva de diferentes casos de carga. Enquanto que no que se refere à propriedade comutativa o que se pretende é verificar os desvios introduzidos por efeitos não lineares, especialmente devidos à deformação local elasto-plástica com os inerentes efeitos de encruamento.

#### 4.1.2.1. Propriedade associativa

As funções lineares têm a propriedade associativa, ou seja, a soma da função linear aplicada a pontos com vários valores da variável independente é igual ao valor que resulta aplicando a mesma função linear à correspondente soma da variável independente, equação (4.2).

$$f(a) + f(b) + \dots + f(n) = f(a + b + \dots + n) \quad (4.2)$$

Assim sendo, para estudar esta propriedade foram feitos ensaios compostos em degraus, ou seja, foram aplicados sucessivamente vários binómios carga normal e distância de deslizamento, quantificando-se o resultado da operação, ou seja o volume de desgaste, apenas no final após terem sido aplicados todos os casos de carga. Os ensaios escolhidos para estudar esta propriedade foram os referidos na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3.** Ensaios compostos para estudar a propriedade associativa.

Ensaio	Carga aplicada [N]	Distância percorrida x [m]
18	2	3150
	6	3150
19	3	8800
	5	8700
20	3	3300
	4	4000
	5	4000
	6	4000
21	2	5300
	3	5400
	4	5300
	5	5200
	6	5200
22	1	3400
	2	3400
	3	3400
	4	3300
	5	3300
	6	3300

#### 4.1.2.2. Propriedade comutativa

Outra propriedade verificada pelas funções lineares é a comutativa, ou seja, a soma dos resultados da função aplicada em vários pontos é a mesma independentemente da ordem pela qual foram somados.

$$f(a) + f(b) + \dots + f(n) = f(n) + f(a) + \dots + f(b) \quad (4.3)$$

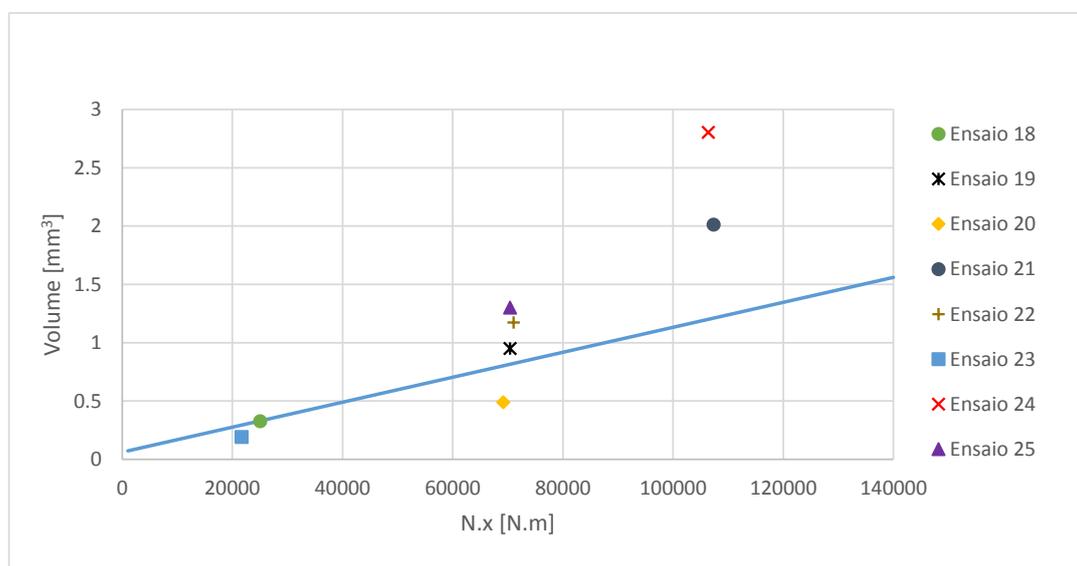
$$f(a+b+\dots+n) = f(b+n+\dots+a) \quad (4.4)$$

De modo a estudar também esta propriedade, aos ensaios definidos para a propriedade associativa, adicionaram-se outros ensaios identificados na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4.** Ensaios compostos para estudar a propriedade comutativa.

Ensaio	Carga normal N [N]	Distância percorrida x [m]
23	6	3150
	2	3150
24	6	5200
	5	5200
	4	5300
	3	5400
	2	5300
25	6	3300
	5	3300
	4	3300
	3	3400
	2	3400
	1	3400

### 4.1.3. Ensaio compostos



**Figura 4.5.** Volume de desgaste dos ensaios compostos.

Como se pode observar na Figura 4.5, o volume de desgaste dos ensaios compostos (Tabela 4.5), na sua maioria, não verifica a equação linear aproximada pelos ensaios anteriormente realizados. De facto o erro relativo dos ensaios compostos que se apresentam na Tabela 4.6 é significativamente superior ao que foi verificado pelos ensaios realizados mantendo constantes as condições de contacto ao longo de todo o teste (Tabela 4.2).

Após verificarmos a sua clara diferença calculou-se o erro destes ensaios de modo a perceber o comportamento destes em relação à equação de Archard.

**Tabela 4.5.** Volume de desgaste dos ensaios compostos.

Ensaio	Carga [N]	Volume [mm³]	N.x [N.m]
18	2;6	0.325	25091.62
19	3;5	0.948	70438.06
20	3;4;5;6	0.488	69211.72
21	2;3;4;5;6	2.010	107390.45
22	1;2;3;4;5;6	1.172	71061.85
23	6;2	0.190	21708.35
24	6;5;4;3;2	2.802	106445.97
25	6;5;4;3;2;1	1.299	70420.58

Tendo sido necessário calcular o erro destes resultados em relação à equação inicial.

**Tabela 4.6.** Erro dos ensaios compostos em relação a equação de Archard.

Ensaio	Carga [N]	$V_{\text{previsto}}$ [mm <sup>3</sup> ]	Erro	Erro relativo	%
18	2;6	0.268	0.057	0.212	21.2
19	3;5	0.753	0.195	0.259	25.9
20	3;4;5;6	0.740	-0.252	-0.340	34
21	2;3;4;5;6	1.148	0.862	0.751	75.1
22	1;2;3;4;5;6	0.760	0.412	0.543	54.3
23	6;2	0.232	-0.042	-0.180	18
24	6;5;4;3;2	1.138	1.664	1.463	146.3
25	6;5;4;3;2;1	0.753	0.546	0.725	72.5

Destes resultados pode-se concluir que, referente à propriedade associativa, o erro é maior nos ensaios com mais binómios de  $N.x$  somados, ou seja, com um número superior de parcelas elementares. Comparando o erro relativo dos ensaios compostos (Tabela 4.6) com os de carga constante (Tabela 4.2) verifica-se que o erro associado aos de cargas compostas é aproximadamente o dobro dos de cargas constantes. Pela observação da Tabela 4.2, que mostra os ensaios de carga constante, é possível verificar que, os ensaios 11, 14 e 17 são os que apresentam menor erro relativo. No entanto, os ensaios 4, 8 e 12 são os que apresentam maior erro relativo e consequentemente um volume de desgaste superior ao previsto. Verifica-se ainda que o ensaio 14 é o que se aproxima mais da função de Archard, obtendo um valor de erro relativo desprezável (0,8 %), ou seja, um volume de desgaste real aproximado do previsto.

Comparando a Tabela 4.6 e 4.2 verifica-se que o erro relativo dos ensaios de carga composta é em média superior ao dos ensaios de carga constantes. Observa-se também que apenas dois ensaios, 20 e 23, obtiveram um volume de desgaste real inferior ao previsto. Constata-se que o erro relativo tende a aumentar com o aumento das cargas aplicadas, ou seja, os ensaios de carga constante tem um erro relativo menor e os de carga composta maior.

A verificação da propriedade comutativa pode fazer-se comparando ensaios onde a ordem de aplicação das várias parcelas foi alterado, isto é, de acordo com a designação da Tabela 4.6, compararam-se as condições dos ensaios 18 e 23, 21 e 24, 22 e 25. Verifica-se que, com exceção dos ensaios 18 e 23, quando as várias cargas são aplicadas de forma crescente o erro é menor do que se se iniciar o ensaio com as cargas mais elevadas.

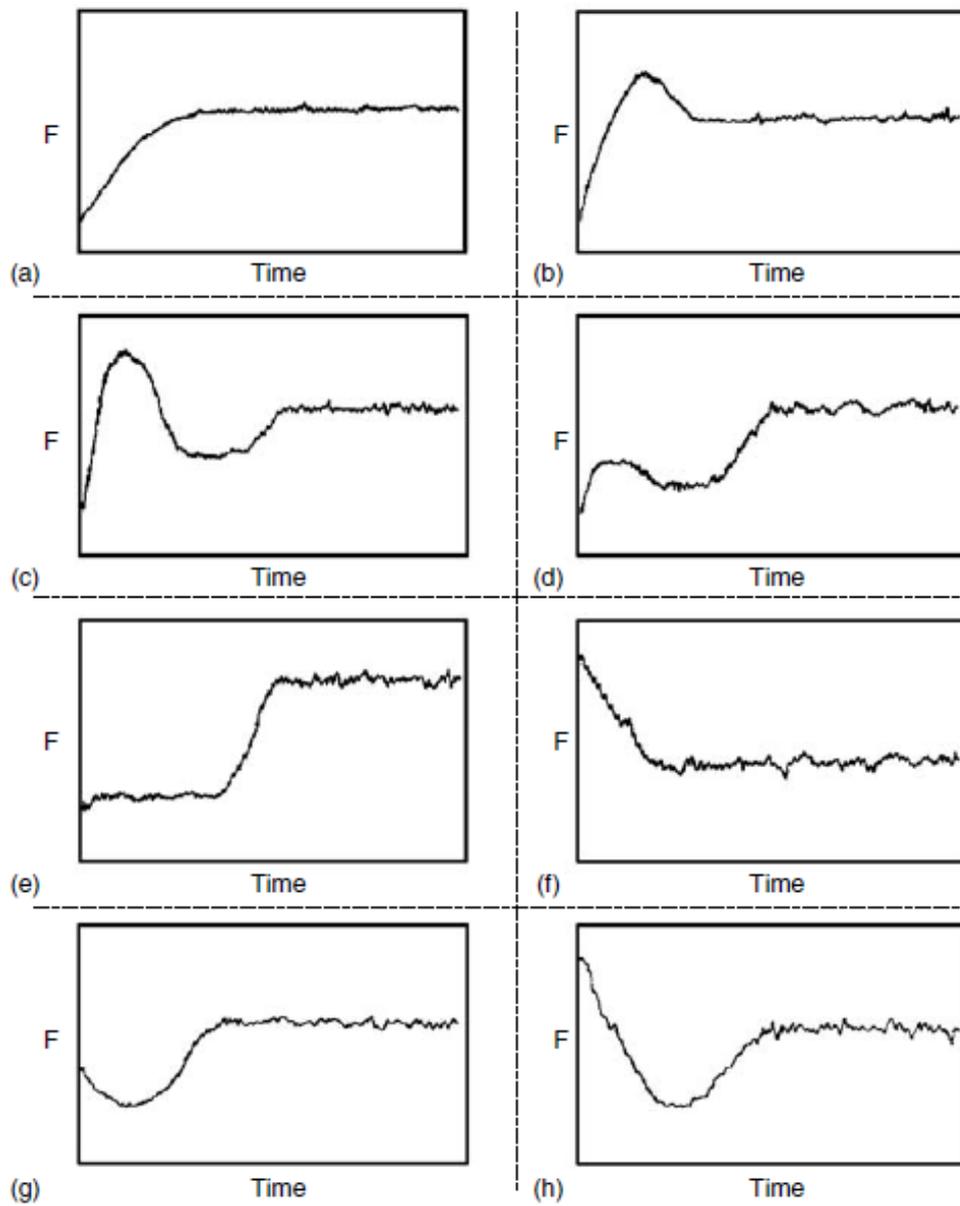
Fazendo agora uma análise mais detalhada das comparações dos ensaios, iniciemos pela comparação dos ensaios com mais parcelas: ensaios 22 e 25. Nestes ensaios o erro calculado foi positivo em ambos, indicando que o volume de desgaste real foi superior ao previsto. Comparando os erros, 0,412 para o ensaio 22 e 0,546 para o 25, podemos observar que o erro do ensaio onde as parcelas estão dispostas por ordem decrescente é mais elevado do que o ensaio onde as cargas foram aplicadas de modo crescente, a diferença de erro entre estes dois ensaios foi de 0,134, um valor próximo do valor do erro médio para os ensaios contínuos.

Os ensaios 21 e 24 tiveram o mesmo comportamento que o par anterior. O erro calculado foi positivo em ambos e o erro do ensaio onde as parcelas estão dispostas por ordem decrescente é mais elevado do que o ensaio onde as cargas foram aplicadas de modo crescente. Comparando os erros calculados, 0,862 para o ensaio 21 e 1,664 para o 24, o valor do erro do ensaio 24 foi praticamente o dobro do erro do ensaio 21 fazendo com que a diferença de erro entre estes seja de 0,803, um valor muito superior ao do maior ensaio constante, ensaio 1.

A comparação dos ensaios 18 e 23, tendo o erro do ensaio com as parcelas dispostas de forma crescente sido maior que o do decrescente, não aparenta trazer dados que alterem o padrão de que ensaios com parcelas aplicadas numa sequência decrescente tenham um maior erro que se aplicadas numa sequência crescente. Esta exceção poderá ter sido originada devido a vários fatores como o número de binómios ser apenas dois, fazendo com que estes ensaios estejam muito próximos dum ensaio contínuo, incluindo o erro obtido. O binómio associado do ensaio e volume de desgaste têm valores relativamente baixos. A grande diferença entre as duas cargas, uma de 2 N e a outra de 6 N, faz com que a segunda tenha uma relevância muito maior no processo de desgaste independentemente da sua localização. Finalmente, o valor do erro absoluto, de 0,099, calculado pela diferença entre estes ensaios, é um valor próximo do erro médio dos ensaios contínuos.

Estes resultados vêm mostrar que a aplicação de uma lei linear de desgaste é uma forma simplista, que apesar de simplificar o cálculo conduz a erros não desprezáveis. No geral o erro parece ser tanto mais elevado quanto maior é o número de parcelas consideradas para as condições de ensaio. Este facto parece substanciar que o processo de rodagem para adaptação das superfícies quando se alteram as condições de contacto não é desprezável. Isto é, o modelo linear será razoavelmente aplicado após o processo de rodagem, quanto maior for a influência deste período em todo o ensaio, maior dificuldade haverá em aplicar modelos lineares. Nos ensaios com condições variáveis, o efeito da fase de rodagem, que afeta os períodos imediatamente posteriores à variação das condições de ensaio, tem uma influência que parece ser proporcional ao número de variações de condição de ensaio que ocorreram.

Na Figura 4.6 podemos observar oito formas do comportamento inicial do atrito. Nos ensaios disco-pino realizados o atrito teve um comportamento semelhante ao gráfico b). Este tipo de comportamento do atrito representa ensaios onde a taxa de desgaste inicial é alta até as rugosidades mais salientes se desgastarem e a superfície tornar-se mais macia.



**Figura 4.6.** Formas iniciais do comportamento do atrito. (Blau, 2009)

Começou-se por ver o atrito num ensaio com carga constante, o ensaio de carga de 7N, e uma distância de 20000m (Figura 4.7).

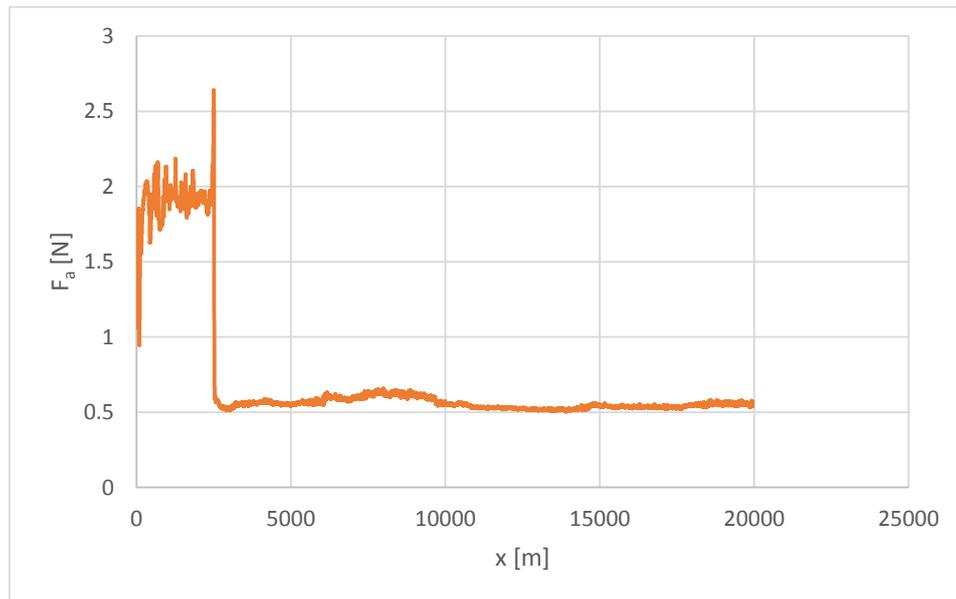


Figura 4.7. Atrito do ensaio 10.

Na Figura 4.7 pode-se observar que até cerca dos 2500 m a força de atrito é bastante alta e com grandes variações, sendo esta a fase do processo de rodagem. Após o final desta fase a força de atrito estabiliza em valores próximos de 0,5 N e mantém-se constante até ao fim do ensaio. Como foi constatado, o processo de rodagem aparenta ser uma altura onde ocorre um maior volume de desgaste por distância percorrida que no resto do ensaio. Assim, os ensaios compostos (Figura 4.8) tiveram uma grande dificuldade em adaptar as superfícies devido a alteração constante da carga, resultando o erro observado.

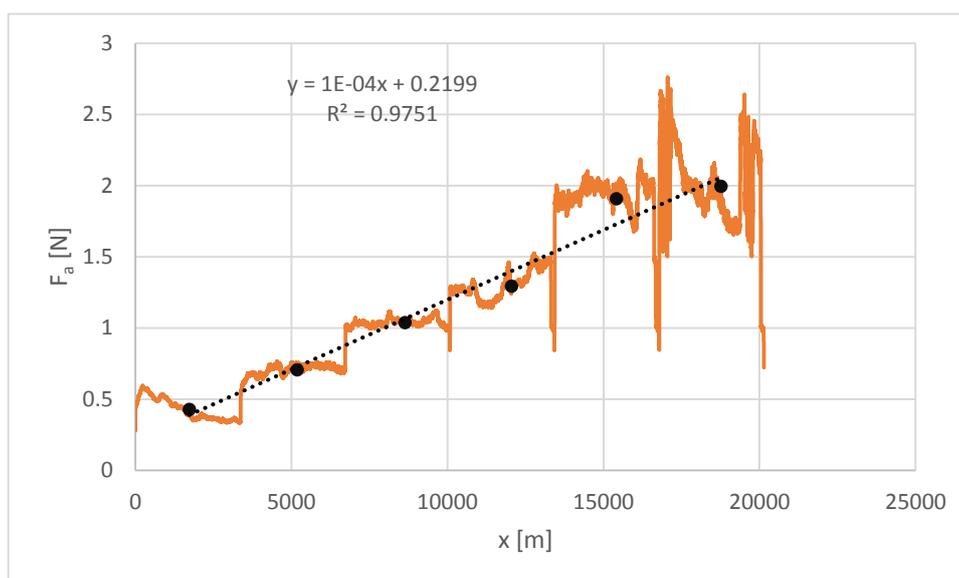
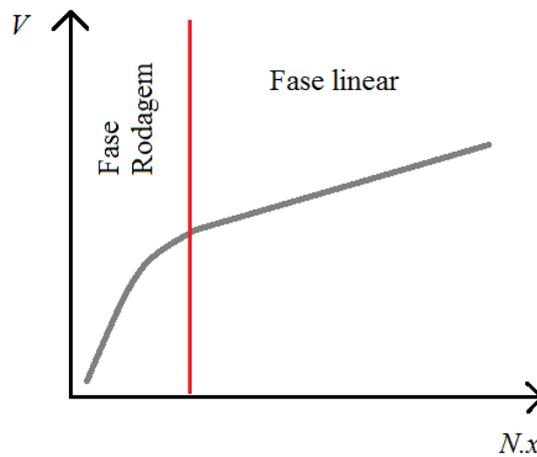


Figura 4.8. Atrito do ensaio 22.

A única forma de anular os efeitos do processo de rodagem, é o ensaio ter uma zona estável longa o suficiente, ou seja, comparativamente à totalidade do ensaio o processo de rodagem ser apenas uma pequena parte duma extensa zona estável. Como se observou na Figura 2.1, o processo de rodagem termina com um desgaste tipicamente abrasivo, altura em que este estabiliza, surgindo então uma fase que obedece a linearidade descrita pela equação de Archard (Figura 4.9).



**Figura 4.9.** Volume de desgaste relativamente à evolução do atrito.

## 4.2. Energia do ensaio

Devido ao estudo do volume de desgaste dos ensaios através da equação de Archard não ter resultados favoráveis decidiu-se fazer um estudo semelhante mas usando a energia gerada pelo atrito em vez do volume de desgaste.

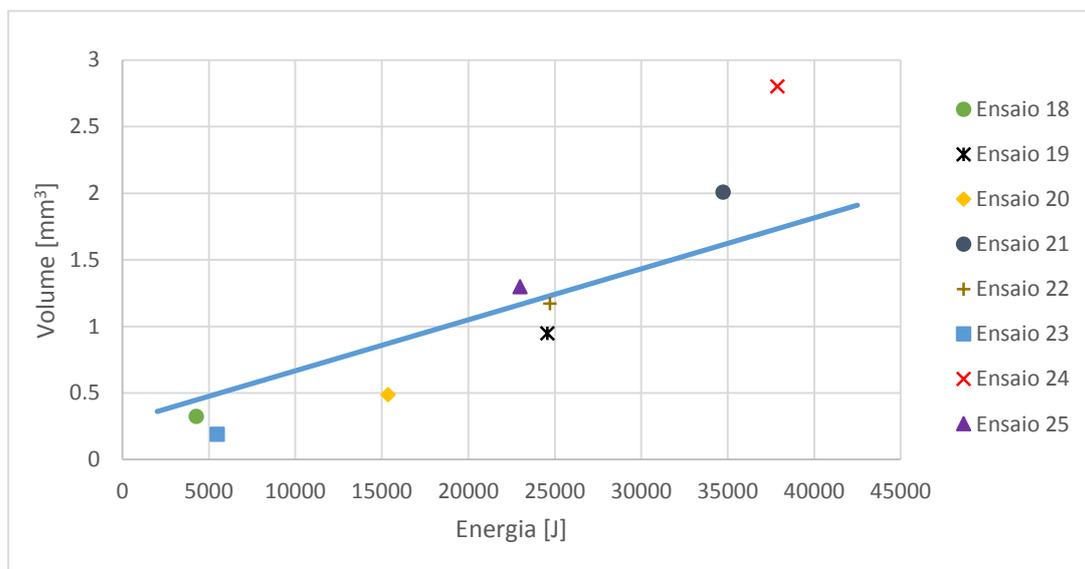


Figura 4.10 Volume de desgaste pela energia.

Através da observação da Figura 4.10, constatou-se que nos ensaios o volume de desgaste não é diretamente proporcional à energia. Verifica-se que os ensaios 21, 24 e 25 apresentam um volume de desgaste superior ao previsto, sendo estes ensaios com grande variação de cargas, contrastando com os restantes ensaios que têm valores bastante próximos ou inferiores ao volume previsto. Este facto deve-se essencialmente ao material do disco. Teoricamente a energia utilizada para desgastar uma certa quantidade de volume é constante, no entanto o material a ser desgastado não o é. Desta forma, a energia necessária para o desgaste vai variando quando as características físicas do material sofrem alterações. Assim, o cálculo do volume de desgaste através da energia (equação (4.5)) não terá um declive ( $m$ ) constante, impossibilitando o cálculo de ensaios compostos através do mesmo.

$$V = m.E \quad (4.5)$$

As alterações provenientes do comportamento do material criam erro no cálculo do volume de atrito por energia gasta. Seria de esperar que os ensaios com mais variações de carga teriam um maior erro mas como se observa na Tabela 4.7, ensaios como o 18 e o 24, com uma e quatro variações de carga, respetivamente, têm ambos um erro relativo superior a 90%. No entanto o ensaio 19 com apenas uma variação de carga, tal como o 18, tem um erro relativo inferior a 1%.

**Tabela 4.7.** Erro dos ensaios compostos em relação a função energética.

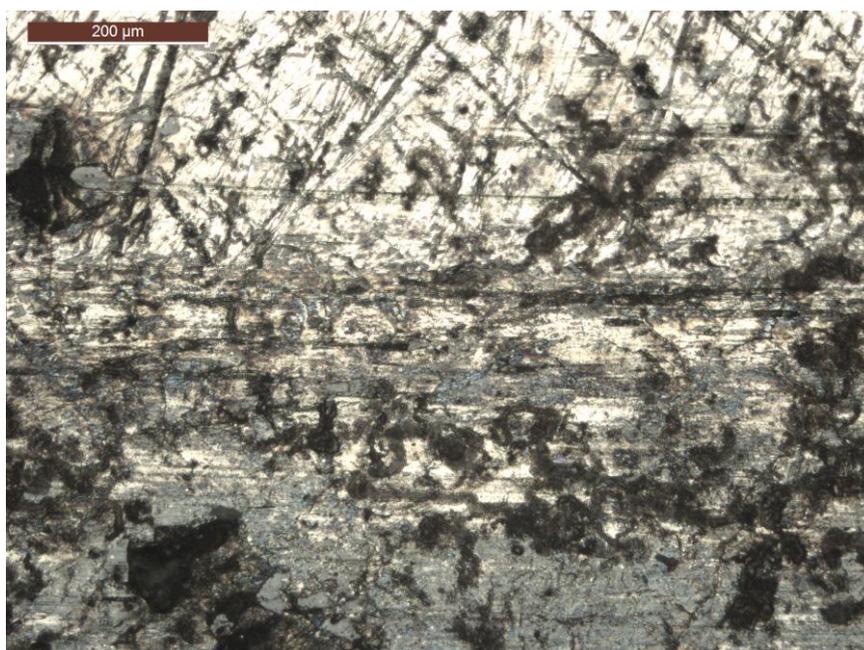
Ensaio	Carga [N]	$V_{\text{previsto}}$ [mm <sup>3</sup> ]	Erro	Erro relativo	%
18	2;6	0.164	0.161	0.979	97.9
19	3;5	0.942	0.006	0.007	0.7
20	3;4;5;6	0.589	-0.101	-0.172	17.2
21	2;3;4;5;6	1.331	0.678	0.510	51
22	1;2;3;4;5;6	0.948	0.224	0.237	23.7
23	6;2	0.211	-0.020	-0.097	9.7
24	6;5;4;3;2	1.452	1.350	0.930	93
25	6;5;4;3;2;1	0.882	0.417	0.473	47.3

Destes resultados pode-se concluir que o erro dos ensaios é independente da adição de cargas, sendo o fator que influencia a energia gasta apenas a superfície do material. Isto torna a previsão de volume de desgaste através da energia inválido. De notar, que apesar de o erro dos resultados ser relevante, tem valores inferiores aos calculados para a equação de Archard. Isso leva a concluir que através deste método conseguem-se obter melhores resultados.

### 4.3. Microscopia dos ensaios

A microscopia das pistas de ensaio surgiu como forma de observar o estado do material nas pistas após a realização dos ensaios. Através das imagens recolhidas pelo microscópio ótico Zeiss, observaram-se algumas propriedades que alteraram o consumo energético nos ensaios.

Na Figura 4.11, é de notar a fissuração da superfície desgastada, principalmente na zona inferior, vê-se que as fissuras estão alinhadas com a direção do ensaio foi realizado, as fissuras da zona superior, no entanto, estão dispersadas em várias direções, o que leva a que estes já estariam no disco desde o processo de lixagem.



**Figura 4.11.** Riscos na superfície da pista de desgaste.

A Figura 4.12 mostra uma zona com uma grande quantidade de material removido. Nota-se que grande parte do material removido nesta secção ocorre por um processo de adesão ou impacto arrancando partículas de material pelas fronteiras de grão. Retirando assim aglomerados de material em vez da normal perda de material por desgaste.



**Figura 4.12.** Superfície da pista de desgaste com material removido.

Para obter pormenores mais específicos na Figura 4.13 a ampliação utilizada foi superior há das anteriores. Desta forma é possível ver em pormenor duas zonas com uma cor azul metálica, insinuando que o material será predominantemente metálico, a criação destes spots deveu-se provavelmente a uma alteração da temperatura muito elevada nestas zonas em específico.



**Figura 4.13.** Spots metálicos na superfície da pista de desgaste.

Com estas figuras do estado das pistas de ensaio podemos observar alguns fatores que contribuíram para a alteração do gasto energético. No entanto, não se sabe em concreto de que forma os afetaram, se aumentaram ou diminuíram a energia gasta é uma incógnita. A falta de prosseguimento da forma como alteram os ensaios foi por esta ser uma área que já não é abrangida pelo estudo da tese.

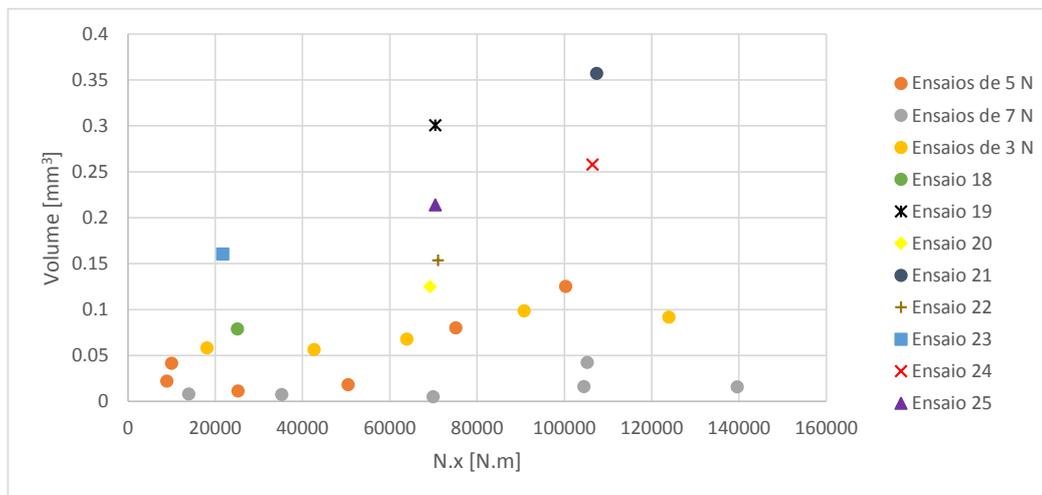
#### 4.4. Volume de desgaste da esfera

A esfera, tal como o disco, sofreu desgaste nos ensaios. Este desgaste foi calculado através do método descrito no capítulo 3 (3.3.1. Volume de desgaste). Tal como no disco, foi calculado o volume de desgaste da esfera ( $V_{\text{esfera}}$ ) (Tabela 4.8).

**Tabela 4.8.** Volume de desgaste da esfera.

Ensaio	$V_{\text{esfera}}$
1	0.022
2	0.012
3	0.018
4	0.125
5	0.080
6	0.041
7	0.008
8	0.007
9	0.005
10	0.016
11	0.016
12	0.042
13	0.099
14	0.057
15	0.068
16	0.058
17	0.092
18	0.079
19	0.301
20	0.125
21	0.357
22	0.154
23	0.161
24	0.258
25	0.214

O volume de desgaste da esfera, ao contrário do que seria de esperar, não tem valores regulares. Como se pode ver na Figura 4.14, não é possível encontrar nenhuma linearidade.



**Figura 4.14.** Volume de desgaste da esfera.

Os resultados obtidos no volume de desgaste da esfera em termos algébricos não têm qualquer resolução. Os resultados aparentemente aleatórios possivelmente tiveram origem na vibração do ensaio. Como foi possível observar na secção anterior (4.2 Atrito) o atrito nos ensaios afeta o volume de desgaste do disco, tendo o mesmo efeito no volume de desgaste da esfera. Este efeito poderá ser ainda maior na esfera devido à vibração fazer com que a esfera, durante a fase de rodagem, em vez de deslizar pelo disco, como pretendido, tenha um contacto intermitente.

## 5. CONCLUSÃO

O estudo dos efeitos da acumulação de dano por desgaste numa superfície permite verificar se a função para o cálculo do desgaste é ou não linear. É portanto de elevada importância efetuar um estudo que verifique se a associação de cargas influencia o volume de desgaste e conseqüentemente a linearidade da função. Neste sentido, o objetivo principal desta dissertação é a comparação e análise do efeito de dano por desgaste de cargas compostas com dano por desgaste de cargas únicas. Através de ensaios laboratoriais procedeu-se ao estudo da função de desgaste.

Após a pré-definição da velocidade, carga a aplicar, distância percorrida e distância da pista ao centro do disco para cada ensaio procedeu-se ao estudo dos mesmos. Para tal, foram definidos vinte e cinco casos de estudo: dezassete com apenas uma carga aplicada e oito com variação de carga ao longo do ensaio, de modo a determinar o número de ciclos, a rugosidade e o atrito. Com a distância da pista ao centro do disco determinou-se o perímetro de cada pista e com o perímetro e o número de ciclos obteve-se a distância real. Foi ainda calculada a área de desgaste através da rugosidade permitindo posteriormente obter o valor do volume. Através destes dados é possível concluir se a equação de Archard é linear ou não.

Nesta dissertação mostra-se que a equação de Archard assume características de linearidade para ensaios com apenas uma carga mas não mantém as propriedades para ensaios compostos. Verificou-se que nos ensaios compostos o erro é maior nos ensaios com mais adições de binómios de  $N.x$  e quando estes são impostos de forma decrescente. Através dos resultados concluiu-se ainda que a taxa de desgaste específico não é linear, assim tornando a equação de Archard, como função linear, inviável para ensaios compostos.

Devido à equação de Archard não ser linear procedeu-se ao estudo da energia, procurando uma relação de linearidade entre esta e o volume de desgaste. Para tal utilizou-se os ensaios de carga única, de modo a obter uma função, e comparou-se, posteriormente, com os ensaios compostos. Verificou-se através dos resultados que a energia e o volume de

desgaste não são lineares, mas que o erro relativo associado é bastante inferior do obtido na equação de Archard.

Pelo facto de não existir linearidade nem utilizando o binómio  $N.x$  nem a energia, procedeu-se à análise do atrito e da microscopia de modo a justificar a não linearidade. Da análise ao atrito foi possível verificar que este é linear com a carga, ou seja, com o aumento da carga aumenta o atrito e vice-versa. Na fase inicial dos ensaios, *running-in*, verificou-se que o gasto energético é superior pois existe uma flutuação na força de atrito. Esta flutuação detectou-se em todos os ensaios, como por exemplo, no ensaio dez, esta fase durou até aos 2500 m. Este processo de rodagem faz com que a fase inicial do ensaio não tenha um comportamento linear, ainda mais para ensaios compostos que entraram num processo de rodagem para cada carga.

Através da análise da microscopia dos ensaios observou-se em cada um o estado da pista pós-ensaio. Verificou-se que em certas zonas das pistas existe uma elevada fissuração no sentido do ensaio e, para além disso, notou-se que existem zonas onde a remoção do material ocorreu por arranque e não por deslize. Em algumas regiões das pistas foram encontrados *spots* térmicos predominantemente metálicos devido ao efeito da elevada variação da temperatura.

Em futuros trabalhos será interessante fazer ensaios compostos em zonas diferentes das estudadas nesta dissertação, de modo a definir o comportamento da equação de Archard e da energia para um maior número de amostras. Para além disso, seria interessante estudar a microestrutura do disco nas zonas das pistas de ensaio e comparar com o material base. Por fim, propõe-se o estudo da influência das partículas formadas durante o ensaio e a sua contribuição para alteração das condições de ensaio.

## BIBLIOGRAFIA

- A. Ramalho, J. M. (2006). The relationship between wear and dissipated energy in sliding systems. *Wear*, pp. 361-367.
- ASM Handbook Committee. (2002). *ASM Handbook. Friction, Lubrication and Wear Technology*. U.S.A.: ASM International.
- Bhushan, B. (2000). *Modern Tribology Handbook, Volume one*. CRC Press.
- Blau, P. (2009). *Friction Science and Technology*. Taylor & Francis Group.
- Budinski, K. G. (2007). *Guide to Friction, Wear and Erosion Testing*. ASTM International.
- Dandong Foundry. (s.d.). Obtido de Dandong Foundry - Grey Iron, Ductile Iron Steel castings in China: <http://www.iron-foundry.com/en-gjl-200.html>
- H.C. Meng, K. L. (1995). Wear models and predictive equations: their form and content. *Wear*, pp. 443-457.
- Podra P., A. S. (1997). Wear Simulation with the Winkler Surface Model. *Wear*, pp. 79-85.
- Steel Grades. (2011). Obtido de Steel Grades The steel grade sharing platform: <http://www.steel-grades.com/Steel-Grades/Tool-Steel/100cr6.html>
- Vander Voort, G. (1984). *Metallography: Principles*. McGraw-Hill Book Co.