



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Medição do atrito de escorregamento através da energia dissipada em sistemas vibratórios

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

Autor

Nelson Marco Xavier Trindade

Orientador

Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho

Júri

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

Vogais Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho
Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra
Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Professora Doutora Cândida Maria dos Santos Pereira
Malça
Professora Adjunta do Instituto Politécnico de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2011

“Só sabemos com exactidão, quando sabemos pouco;
à medida que vamos adquirindo conhecimentos,
instala-se a dúvida”.

Johann Wolfgang von Goethe

Aos meus Pais e Irmãos.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao distinto Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho, por todos os conhecimentos que me transmitiu, paciência, disponibilidade e boa disposição que sempre demonstrou.

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

Gostaria de agradecer a todos os Professores, que foram meus Docentes ao longo deste trajecto, pelos conhecimentos que me transmitiram e por contribuírem na minha formação enquanto técnico e homem.

Gostaria de recordar os Professores Doutores José Manuel de Oliveira Costa Castanho e Nuno Ferreira Rilo que, infelizmente, já não se encontram entre nós.

Por último, gostaria de agradecer aos meus Pais e Irmãos pela força, motivação e dedicação que sempre me demonstraram, especialmente nos momentos mais complicados.

A todos um sincero Muito Obrigado.

Resumo

O motivo deste trabalho consistiu no estudo das potencialidades de um novo método, desenvolvido no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), para a determinação do coeficiente de atrito. A base do método consiste na avaliação da energia dissipada pelo atrito durante a vibração livre de um sistema mecânico, tendo como princípio de funcionamento a vibração de um pêndulo com movimento horizontal.

A determinação do coeficiente de atrito é realizada por análise inversa; ou seja, é determinado pela comparação da curva do movimento, isto é, do gráfico deslocamento-tempo, obtida experimentalmente, com a equação clássica do movimento em parâmetros concentrados com um grau de liberdade, utilizando como critério de qualidade o coeficiente de correlação linear de *Pearson*.

Os objectivos principais desta dissertação podem resumir-se a: verificação dos princípios e da aplicabilidade do método; validação dos resultados obtidos e identificação das limitações da técnica.

Para avaliar as potencialidades da técnica, procedeu-se à análise de vários materiais com comportamento tribológico distinto: dois pares de materiais metal-metal; dois pares de materiais cerâmico-cerâmico e dois pares de materiais metal-elastómero.

A validação da técnica e do procedimento de análise inversa foi realizada pela comparação com resultados obtidos aplicando uma técnica diferente, no caso a técnica de deslizamento unidireccional com carga crescente – *Load-Scanner* –, verificando-se semelhança do comportamento quer quanto aos resultados do atrito, quer no que respeita à sensibilidade à rodagem quer quanto a defeitos superficiais.

Concluiu-se que a técnica e o procedimento de análise inversa podem ser aplicados a materiais com diferentes comportamentos tribológicos; no entanto, a análise de materiais com comportamento viscoelástico requer que o modelo de análise inversa seja cuidadosamente analisado e melhorado.

Palavras-chave: Atrito, Vibração, Análise inversa, Tribologia

Abstract

The aim of the present work was to study the ability of a new method, recently developed in the DEM, to assess the coefficient of friction. The method is based in the evaluation of the energy dissipated by friction during the free vibration of a mechanical device working as a pendulum with horizontal vibration movement.

The coefficient of friction determination is performed by inverse analysis. Therefore the movement curve, i.e., by displacement – time chart experimentally obtained, is compared to the classic equation of lumped mass movement using Pearson's coefficient as a quality correlation criterion.

The main objectives of this work can be summarized as: verification of the principles and the applicability of the method, validation of the results obtained the new method, and identification of the limitations and advantages of the new technique.

To evaluate this technique's potential, the analysis of various materials with different tribological behavior were performed, namely: two pairs of materials metal-metal, two pairs of materials ceramic-ceramic, and two pairs of materials metal-elastomer.

In order to validate both the technique and the inverse analysis procedure, a comparison was performed between the obtained results and those resulting by the application of an alternative technique with unidirectional sliding with increasing load, the Load-Scanner technique. The behaviors regarding friction, sensitivity to the running-in, and surface defects were comparable.

The research work allows concluding that the technique and the procedure of inverse analysis can be applied to materials with different tribological behaviors. However, the analysis of materials with viscoelastic behavior requires that the inverse analysis model will be carefully understood and improved.

Keywords Friction, Vibration, Inverse analysis, Tribology

Índice

Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	ix
Simbologia e Siglas	x
Simbologia.....	x
Siglas.....	xi
1. Motivação	1
1.1. Definições.....	3
1.2. Nota histórica.....	3
2. Revisão Bibliográfica.....	7
2.1. Princípios de medição do atrito	7
2.1.1. Dispositivos de medição de ângulo	8
2.1.2. Dispositivos de medição de força.....	9
2.1.3. Dispositivos baseados na avaliação da energia dissipada por atrito.....	11
2.2. Problemas com as soluções actuais, lacunas do conhecimento.....	16
2.2.1. Problemas devidos ao movimento.....	16
2.2.2. Problemas devidos ao atrito.....	17
2.2.3. Lacunas dos dispositivos baseados na medição de energia.....	18
2.3. Objectivos.....	18
3. Fundamentação Teórica e Características do Modelo Experimental.....	19
3.1. Princípio de funcionamento e considerações teóricas	19
3.2. Sistema de medida	21
3.2.1. Calibração do sistema de medida	21
3.3. Constantes físicas do sistema	22

3.3.1.	Determinação da rigidez da mola	23
3.3.2.	Caracterização da dissipação de energia do sistema	23
3.4.	Protocolo experimental.....	26
4.	Aplicação do Modelo Experimental.....	30
4.1.	Materiais	30
4.2.	Condições de ensaio	31
4.3.	Valores de atrito.....	31
5.	Validação do Modelo Experimental.....	40
5.1.	Validação do procedimento pela técnica Load-Scanner.....	40
5.2.	Mecanismos de atrito.....	43
6.	Conclusão	47
7.	Referências Bibliográficas	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Factores que influenciam o atrito (Budinski, 2007).....	2
Figura 2. Compilação de valores de coeficiente de atrito de diferentes publicações.	2
Figura 3. Plano Inclinado (Esquema básico de medição de atrito).	9
Figura 4. Aparelho comercial de medição de atrito por plano inclinado (Blau, 2009).	9
Figura 5. Ensaio de escorregamento: a) Unidireccional; b) Alternativo (Budinski, 1992).	10
Figura 6. Ensaio de desgaste alternativo: a) Comportamento ideal; b) Observação real (Blau, 2009).	11
Figura 7. Dispositivo de movimento rotativo unidireccional.	12
Figura 8. Evolução do deslocamento ao longo do tempo num dispositivo do tipo freio de inércia.	13
Figura 9. Esquema do mecanismo utilizado em Rigaud, <i>et al.</i> (2010).	13
Figura 10. Coeficiente de atrito d_k , linearmente dependente da velocidade (Rigaud, et al. 2010).	14
Figura 11. Decrescimento da energia: a) real b) aproximado (Rigaud, et al. 2010).	15
Figura 12. Diagrama do corpo livre dos mecanismos representados na Figura 5.	16
Figura 13. Evolução da força transmitida à fundação em função da razão de frequências.	17
Figura 14. Tribómetro em estudo.	19
Figura 15. Sistema massa-mola-amortecedor sujeito a atrito de <i>Coulomb</i>	20
Figura 16. Voltagem lida no osciloscópio em função do deslocamento aplicado no corpo 1.	22
Figura 17. Deslocamento horizontal medido em função da força aplicada no corpo 1.	23
Figura 18. Deslocamento do sistema em vibração livre.	24
Figura 19. Valores dos primeiros 19 picos positivos.	25
Figura 20. Comparação da resposta experimental do sistema com a resposta obtida por via teórica.	25
Figura 21. Trabalho realizado pela força de amortecimento nos primeiros 19 ciclos.	26

Figura 22. Curva típica do movimento do sistema em vibração livre com atrito; par de materiais AL2024-AL6082, $F_N=0.2N$	27
Figura 23. Comparação típica da curva teórica com a curva obtida experimentalmente; par de materiais AL2024-AL6082, $F_N=0.2N$	28
Figura 24. Evolução típica da correlação entre a curva teórica e a curva experimental em função do valor do coeficiente de atrito; par de materiais AL2024-AL6082, $F_N=0.2N$	28
Figura 25. Fluxograma do procedimento de determinação do coeficiente de atrito.	29
Figura 26. Evolução do atrito para diferentes condições de carga; Esfera AL2024 – Plano AL6082.	32
Figura 27. Coeficiente de atrito AL2024-AL6082.	33
Figura 28. Coeficiente de atrito 100Cr6-AISI P20.	34
Figura 29. Evolução do atrito para diferentes condições de carga, Al_2O_3 -Vidro.	35
Figura 30. Superfície do plano do par Al_2O_3 -Vidro: a) vista a 1.5x; b) vista a 2.5x; c) vista a 4x.	35
Figura 31. Coeficiente de atrito Al_2O_3 -Vidro.	36
Figura 32. Coeficiente de atrito Al_2O_3 - Al_2O_3	37
Figura 33. Comparação da resposta real do sistema com a resposta obtida por via teórica, 100Cr6-NBR.	38
Figura 34. Comparação da resposta real do sistema com a resposta obtida por via teórica, 100Cr6-Látex.	38
Figura 35. Evolução da força de atrito com o aumento da força normal, AL2024-AL6082.	40
Figura 36. Força de atrito em função da força normal, AL2024-AL6082.	41
Figura 37. Evolução da força de atrito com o número de passagens, em função da força normal, AL2024-AL6082.	41
Figura 38. Evolução e valor do coeficiente de atrito com o número de passagens, AL2024-AL6082.	42
Figura 39. Comparação da evolução e dos valores de atrito obtidos pelo modelo experimental com os obtidos pela da técnica <i>Load- Scanner</i> ; AL2024-AL6082.	43
Figura 40. Observação por microscopia electrónica de varrimento da superfície das amostras utilizadas para as diferentes condições de carga, Esfera AL2024 – Plano AL6082.	44

Figura 41. a) Morfologia do plano utilizado na técnica <i>Load-Scanner</i> ao fim da 4ª passagem; b)Evolução da força de atrito em função do aumento da força normal, Esfera AL2024 – Plano AL6082.	45
Figura 42. Pormenor a amarelo da Figura 41 a).....	46

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Diferenças no método de medição do atrito.	8
Tabela 2. Características do modelo experimental.	26
Tabela 3. Propriedades dos materiais em estudo.	30
Tabela 4. Condições ambientais dos ensaios.	31
Tabela 5. Coeficiente de atrito para diferentes condições de carga; Esfera AL2024 – Plano AL6082.	32
Tabela 6. Coeficiente de atrito para diferentes condições de carga; Esfera 100Cr6 – Plano AISI P20.	33
Tabela 7. Coeficiente de atrito para diferentes condições de carga; Esfera AL ₂ O ₃ – Plano Vidro.	34
Tabela 8. Coeficiente de atrito para diferentes condições de carga; Esfera Al ₂ O ₃ – Plano Al ₂ O ₃	37

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

c – Amortecimento

E – Módulo de elasticidade; Energia

F – Força

F_a – Força de atrito

F_N – Força normal

I – Inércia

k – Constante de rigidez mola

m – Massa

r – Raio

R_a – Rugosidade média aritmética

R_{RMS} – Rugosidade média quadrática

R_z – Rugosidade pico a pico

t – Tempo

T_a – Tempo médio de período

W – Trabalho

x – Deslocamento

X – Posição

\dot{x} – Velocidade

\ddot{x} – Aceleração

θ – Ângulo

μ – Coeficiente de atrito

μ_s – Coeficiente de atrito estático

μ_k – Coeficiente de atrito cinético

ξ – Coeficiente de amortecimento adimensional

ω – Frequência angular

ω_a – Frequência própria de vibração amortecida

ω_n – Frequência natural

Siglas

ANSI – American National Standards Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FRUSA – Financial Recovery USA

IMF – International Monetary Fund

ISO – International Organization for Standardization

MIT – Massachusetts Institute of Technology

PIB – Produto Interno Bruto

1. MOTIVAÇÃO

Mesmo com o desenvolvimento científico e tecnológico verificado desde os anos 1900s, estima-se que as perdas devidas ao atrito e desgaste de materiais têm um impacto da ordem de 6% do PIB nos países desenvolvidos (MIT 2011). Tomando como referência a economia dos EUA, a valores actuais as perdas anuais podem ascender a mais de 870 biliões de dólares (IMF 2011). Não só a nível económico, mas também devido a uma crescente preocupação da diminuição do consumo energético, quer a nível de projecto quer a nível de sistemas de produção, obriga a que os engenheiros disponham e utilizem os mais actuais conhecimentos no domínio do atrito, desgaste e lubrificação. Isto leva a que, o estudo e o aprofundamento do conhecimento do comportamento tribológico dos materiais, seja de materiais já utilizados em aplicações industriais ou no desenvolvimento de novos materiais, seja imperativo.

Ao longo dos anos foram desenvolvidas várias técnicas de medição do atrito com vários propósitos, desde técnicas para a simulação do contacto tribológico de uma determinada máquina ou mecanismo, como para quantificar e avaliar a viscosidade de lubrificantes, com o objectivo de estimar a eficiência da sua aplicabilidade, até a técnicas cujo objectivo é investigar a natureza/origem do atrito.

Contudo, a estimativa do atrito é influenciada por um vasto leque de factores, ilustrados na Figura 1. Este facto leva a que os valores do atrito sejam caracterizados por uma reprodutibilidade em intervalos da ordem de 20 a 30 % (Budinski, 1992). Esta discrepância é ainda maior quando se comparam os resultados obtidos por diferentes técnicas, Figura 2. Esta dispersão de resultados está em concordância com a observação de Feynman *et al.*, (2005), que referiu que “As tabelas que apresentam os valores de coeficiente de atrito de "aço no aço" ou de "cobre no cobre" e afins, são todas falsas, porque ignoram os factores que realmente determinam μ ”. Um dos factores que “realmente determina μ ” é o modo como é medido.



Figura 1. Factores que influenciam o atrito (Budinski, 2007).

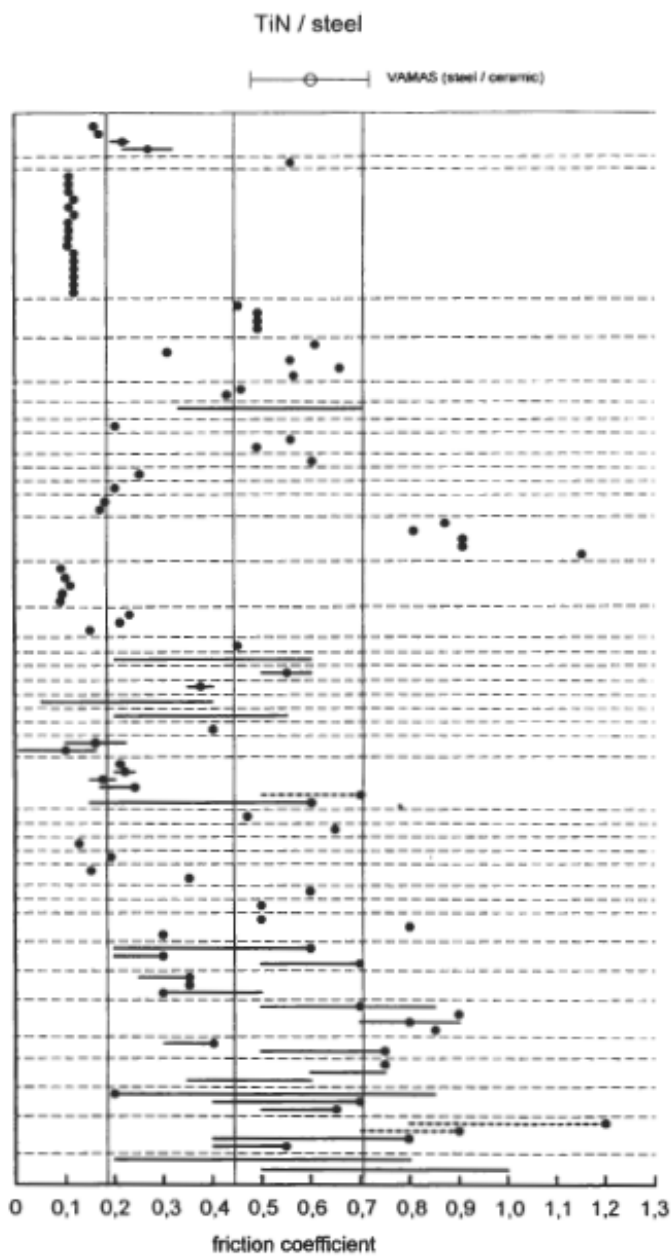


Figura 2. Compilação de valores de coeficiente de atrito de diferentes publicações.

Este trabalho visa estudar as potencialidades de um novo método, desenvolvido no DEM, para a determinação do coeficiente de atrito, baseado na energia dissipada por atrito em sistemas vibratórios, tendo como princípio de funcionamento a vibração de um pêndulo com movimento horizontal.

1.1. Definições

Etimologicamente a palavra Tribologia deriva dos termos Gregos “*tribos*” que significa esfregar, friccionar, e “*logos*” que significa estudo. Isto leva a que a tradução literal do grego seja “estudo do atrito”. No entanto, o termo tribologia foi proposto por *Peter Jost* em 1966 para a ciência que estuda os fenómenos relacionados com o atrito, a lubrificação, o contacto e o desgaste (Popov, 2010).

Atrito, do latim “*attritu*”, é a resistência que todos os corpos opõem ao mover-se uns sobre os outros; fricção; que tem atrição (Dicionário da Língua Portuguesa, 2010)

Segundo a norma ASTM G 40 – 01:

- **Força de atrito** - é uma força tangencial que ocorre na interface de dois corpos, quando um deles se move, ou tende a mover-se, em relação ao outro, em oposição à acção de uma força externa.
- **Coefficiente de atrito** – é a relação adimensional entre a força de atrito, F_a , existente entre dois corpos, e a força normal, F_N , que os comprime.

$$\mu = \frac{F_a}{F_N} \quad (1)$$

- **Coefficiente de atrito estático** – é o coeficiente de atrito correspondente ao atrito de força máxima que deve ser superada para iniciar o movimento entre dois corpos a nível macroscópico.
- **Coefficiente de atrito cinético** – é o coeficiente de atrito em condições de movimento relativo entre dois corpos a nível macroscópico.

1.2. Nota histórica

Os primeiros estudos, de que há registo, sobre o movimento relativo entre dois corpos, foram realizados por *Leonardo Da Vinci* (Sec. XV). Na sua obra *Codex Madrid I* (1495), *Da Vinci* descreve o rolamento de esferas, a composição de uma liga de baixo

atrito, bem como a sua análise experimental dos fenómenos de atrito e desgaste (Popov 2010). Ele foi o primeiro a formular as primeiras “leis fundamentais do atrito” (habitualmente atribuídas ao físico francês *Guillaume Amontons* (1699)), onde concluía que:

- 1) A força de atrito é proporcional à força normal, ou carga normal;
- 2) A força de atrito é independente da área da superfície de contacto.

Da Vinci foi também o primeiro a introduzir o termo “coeficiente de atrito”, tendo afirmado que a resistência do atrito de um corpo era aproximadamente $\frac{1}{4}$ do valor do seu peso.

Mais tarde, o físico francês *Guillaume Amontons* (1699), desconhecendo o trabalho de *Da Vinci*, reescreveu as leis de atrito de *Da Vinci* e publicou a sua teoria onde afirmava que o atrito era originado pelas rugosidades existentes nas superfícies dos corpos. *Amontons* defendia que o atrito era provocado pela existência de picos numa superfície que contactavam com os vales da superfície adjacente, levando-o a acreditar que a força de atrito era a força necessária para puxar os picos dos vales até eliminar a interferência existente.

O matemático Suíço *Leonard Euler* trabalhou com a ideia de que o atrito provém da conjugação entre pequenas irregularidades triangulares e que o coeficiente de atrito é igual ao gradiente dessas irregularidades. Com base na sua teoria, foi o primeiro a formular matematicamente as leis de atrito seco. É-lhe ainda atribuída a autoria da utilização do símbolo grego μ para representar o coeficiente de atrito (Popov, 2010). *Euler* ajudou também na clarificação e distinção entre atrito estático e cinético: colocou um bloco num plano, e, inclinando-o lentamente até o bloco iniciar o movimento, concluiu que o coeficiente de atrito cinético é menor que o atrito estático.

Mais tarde, *Augustin Coulomb* (1781), Engenheiro Militar Francês, contribuiu, de forma notável, para o estudo do atrito, ao analisar e quantificar de forma muito precisa o atrito seco entre corpos em função da natureza dos materiais, extensão da superfície, pressão normal (carga), da duração de tempo que permaneceram nas superfícies em contacto ("tempo de repouso"), da velocidade de escorregamento, da humidade atmosférica e temperatura.

Na tentativa de explicar a origem do atrito, *Coulomb* usou a mesma ideia que *Euler* usara, que o atrito era provocado pelo bloqueio de asperezas existentes nas superfícies, mas acrescentou uma outra contribuição, a que hoje se chama de adesão (e a que ele

chamou de coesão). Ele descobriu, também, que o atrito estático cresce com a quantidade de tempo que o objecto permaneceu parado. *Coulomb* com o seu trabalho conseguiu, assim, confirmar as leis de *Amontons* e acrescentar uma terceira lei:

- 3) O atrito de escorregamento é independente da velocidade de escorregamento¹.

O Inglês *Samuel Vince* (1784), defendia a visão de que o atrito estático era provocado pela coesão e adesão, ou seja, era a soma do atrito cinético com uma parcela devida à adesão ($\mu_s = \mu_k + \text{adesão}$).

Em 1883, o Russo *Nikolai Pavlovich Petrov* apresenta os estudos experimentais, sobre mancais de rolamentos, onde mostrava que das características de um óleo, apenas uma, a viscosidade, tem um papel importante no atrito de rolamento. *Petrov* reutiliza o termo “atrito” para caracterizar a lubrificação hidrodinâmica, demonstrando que, a força do atrito de rolamento é proporcional à velocidade, à área de contacto e à viscosidade do lubrificante.

Reynolds em 1886, publicou uma equação diferencial que descreve o aumento de pressão numa película de óleo, estabelecendo a base para o cálculo do atrito em sistemas de lubrificação hidrodinâmica. Segundo a sua teoria, também chamada de teoria da lubrificação hidrodinâmica, o coeficiente de atrito tem uma ordem de grandeza $\mu \approx h/L$, onde h é a espessura da película de lubrificação e L é o comprimento do contacto tribológico.

Nos meados do século XX, *Bowden* e *Tabor* (1950) recuperam a ideia de *Coulomb*, sobre o facto de a adesão ser um possível mecanismo de atrito, ao alertar para a importância da rugosidade das superfícies dos corpos em contacto. Eles verificaram que a área de contacto real é uma percentagem muito pequena da área de contacto aparente, pois mesmo as superfícies com o melhor polimento têm cristas, vales, pico e depressões. A área de contacto real é apenas aquela onde existe contacto entre as asperezas, e que depende da rugosidade e da força normal. À medida que aumenta a força normal, o número de asperezas em contacto, assim como a área média de contacto, aumentam. Isto conduz a que a força do atrito dependa da área de contacto real, um argumento mais satisfatório do que intuitivamente a lei de *Amontons-Coulomb* permite.

¹ Nem sempre as leis de atrito são obedecidas, principalmente quando ocorre escorregamento em ambiente extremo, como a altas velocidades e numa ampla gama de cargas nominais

Bowden e Tabor argumentaram que dentro destas asperezas todos os fenómenos de atrito ocorrem, no entanto, através da análise da deformação plástica das asperezas; defendiam que, o atrito de escorregamento era provocado pela forte aderência (provocada pela deformação plástica dos picos e por soldaduras microscópicas que se dão a frio) que ocorre nas regiões em contacto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo dos anos, e com diferentes propósitos, foram devolvidas várias técnicas de medição de atrito. O critério de selecção da técnica a utilizar para determinar o coeficiente de atrito deve ter em mente algumas considerações (Blau, 2009), tais como:

- Compreender a finalidade para a qual os dados são necessários;
- Estar ciente dos pontos fortes e das limitações da técnica a utilizar;
- Reconhecer que o atrito é uma característica do tribossistema e não das propriedades fundamentais do material (um determinado conjunto de materiais pode ter resultados diferentes quanto testados em diferentes sistemas tribológicos).

2.1. Princípios de medição do atrito

A determinação do atrito pode ser feita utilizando a máquina/mecanismo real, abordagem geralmente impraticável, isolando componentes específicos da máquina/mecanismo, ou testes laboratoriais que permitem ter uma estimativa precisa embora menos realística. Em relação a estes últimos, várias organizações desenvolveram testes padrão para a medição do coeficiente de atrito, adaptados às necessidades de cada grupo. Uma dessas organizações é a *American Standard for Testing Materials (ASTM)*, que na norma por ela proposta, G 115-04, é possível consultar os testes por ela recomendados. Outras, como a *American National Standards Institute (ANSI)* e a *International Organization for Standardization (ISO)*, também desenvolveram testes padrão para o atrito.

É boa prática, sempre que possível, quando um material em estudo está sob jurisdição de um determinado organismo de normalização sejam utilizadas as normas propostas por essa organização, já que, a utilização de testes padronizados aumentam a probabilidade de produzir e reproduzir resultados válidos, quando comparados com outros testes não normalizados. Por exemplo, a indústria de filmes fotográficos frequentemente adopta as normas ANSI e ISO. Estes testes foram agrupados e, posteriormente, aprovados pelos representantes de diversos sectores da indústria.

Dentro deste vasto conjunto de técnicas de medição de atrito podem classificar-se em termos de gama de carga, gama velocidade, atmosfera em que funcionam, movimento (alternativo vs. unidireccional), movimento rotativo ou linear, forma do contacto (conforme vs. contraconforme), etc. No entanto, a principal diferença reside na forma como se mede o coeficiente de atrito, isto é visível analisando a Tabela 1.

Tabela 1. Diferenças no método de medição do atrito.

Medição do atrito	Tipo de teste	Coefficiente de atrito
Ângulo	<ul style="list-style-type: none"> Plano inclinado (Figura 3). 	μ_s e μ_k
Força	<ul style="list-style-type: none"> Unidireccional (Figura 5 a); Alternativo (Figura 5 b); Pino disco. 	μ_s e μ_k
Energia	<ul style="list-style-type: none"> Freio de inércia (Figura 7). 	μ_k

2.1.1. Dispositivos de medição de ângulo

Um dos sistemas mais simples e populares, para medir o coeficiente de atrito é ilustrado na Figura 3. Este dispositivo de construção simples e barata, desenhado por *Leonardo da Vinci* há mais de 500 anos, constitui a base para vários dos testes da actualidade, havendo inclusive versões comerciais, Figura 4.

A medição do coeficiente de atrito consiste, simplesmente, em aumentar o ângulo de inclinação do plano, θ (o ângulo é medido utilizando um transferidor ou um dispositivo similar), até o objecto começar a deslizar pelo plano inclinado. A tangente do ângulo para a qual o corpo começa a deslizar, $\tan \theta$, é o coeficiente de atrito estático.

$$\mu = \tan \theta \quad (2)$$

O atrito cinético é determinado colocando o corpo a deslizar manualmente, se o objecto parar, o ângulo de inclinação é insuficiente. Se o ângulo de inclinação é o correcto, o que acontece quando o corpo desliza a uma velocidade constante, a tangente desse ângulo é o coeficiente de atrito cinético. Este tipo de teste tem a vantagem de dispensar a necessidade de conhecer a massa do objecto em repouso. No entanto, devido à natureza da função tangente e à concepção do dispositivo de inclinação, para ângulos baixos pode ser difícil diferenciar materiais que apresentem baixos valores de coeficiente de atrito. Apesar de esta técnica permitir estimar o coeficiente de atrito cinético, os dados variam de acordo

com o juízo da “uniformidade” da velocidade de escorregamento, levando a que raramente seja utilizada para esse fim.

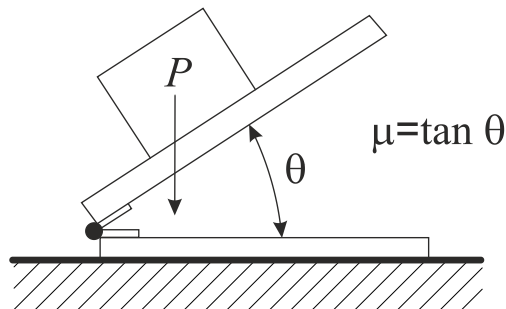


Figura 3. Plano Inclinado (Esquema básico de medição de atrito).

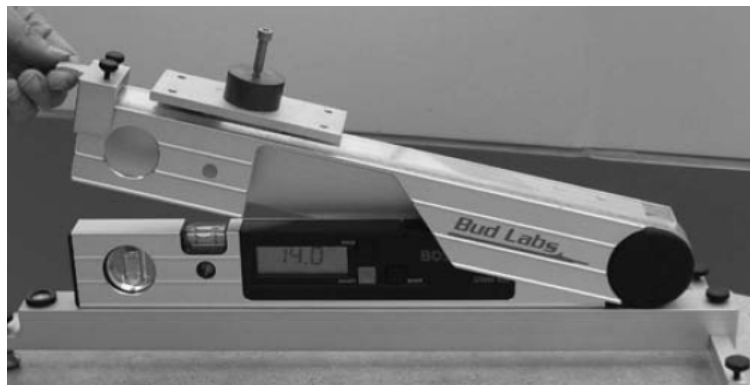


Figura 4. Aparelho comercial de medição de atrito por plano inclinado (Blau, 2009).

2.1.2. Dispositivos de medição de força

A grande maioria das técnicas indicadas na norma G 115 – 04 baseia-se no princípio de que “A medição do coeficiente de atrito envolve a medição de duas grandezas, a força necessária para iniciar e/ou manter o movimento, F , e a força normal, F_N ” (Ludema, 2001). Isto implica que o tribómetro tenha pelo menos um sistema de medição da força do atrito, por exemplo uma célula de carga (G 99 – 95a).

Além disso, ao contrário dos tribómetros de atrito estático, que caracterizam a resistência ao movimento iminente, os dispositivos de teste de atrito cinético incluem uma vasta gama de condições operacionais, que vão desde equipamentos com velocidade de escorregamento constante e unidireccional até máquinas com articulação, em que uma complexa série de acelerações, desacelerações e mudanças de direcção são impostas.

A Figura 5 ilustra duas das geometrias mais típicas dos tribómetros correntemente utilizados.

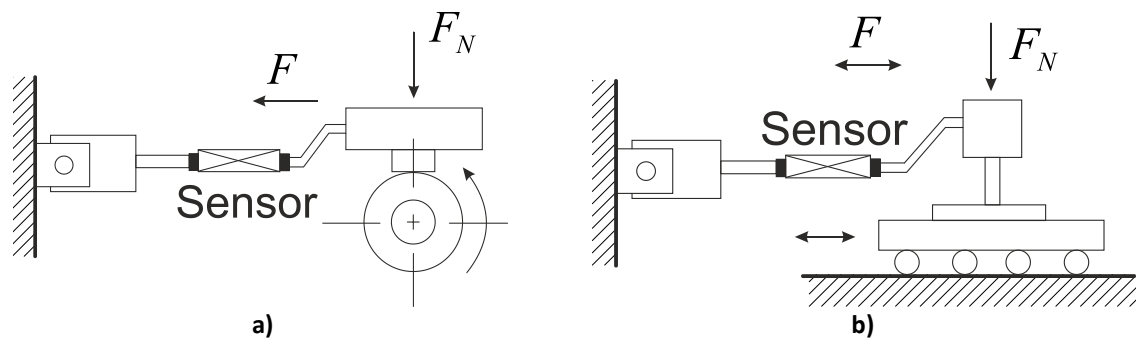


Figura 5. Ensaios de escorregamento: a) Unidireccional; b) Alternativo (Budinski, 1992).

O ensaio alternativo é muito popular e foi usado por *Bowden e Leben*, no final da década de 1930, para medir o atrito alternativo sob cargas baixas. Este tipo de teste é muito usado para testar materiais como revestimentos e lubrificantes, bem como para o estudo do contacto de anéis de pistão-cilindro. Além de quantificar o atrito permite estudar o comportamento dos materiais ao desgaste.

No caso ideal, o perfil de variação de força de atrito esperado é mostrado na Figura 6 a). O sinal da força F representa o sentido do escorregamento.

Quando ocorre a mudança de sentido, aparece um pico de força: esse pico de força é provocado por uma força estática pronunciada devido à inversão de sentido, é a chamada força de atrito estático, f_s . Após algum tempo de deslizamento, a força diminui, para um valor constante, essa é a força de atrito cinético, f_k .

No entanto, é bastante comum, principalmente em testes de atrito sem lubrificação em que o desgaste é significativo, observar pormenores de força de forma inesperada e assimétrica, conforme apresentado na Figura 6 b) levando a que às vezes não exista um pico claro no início/inversão do curso.

Muitas vezes as características de tais perfis podem ser semelhantes no mesmo sentido de escorregamento, mas diferentes em magnitude e forma no sentido oposto. As causas para tal assimetria nem sempre são óbvias, pois podem ocorrer devido às características do aparelho, a erros na calibração do sensor de atrito, ao comportamento do material, ou a uma combinação destes três factores.

Contudo, alguns autores, sustentam que este tipo de ensaio permite que se obtenha o atrito estático e cinético, como se tivessem sido realizadas experiências separadas, (Blau, 2009).

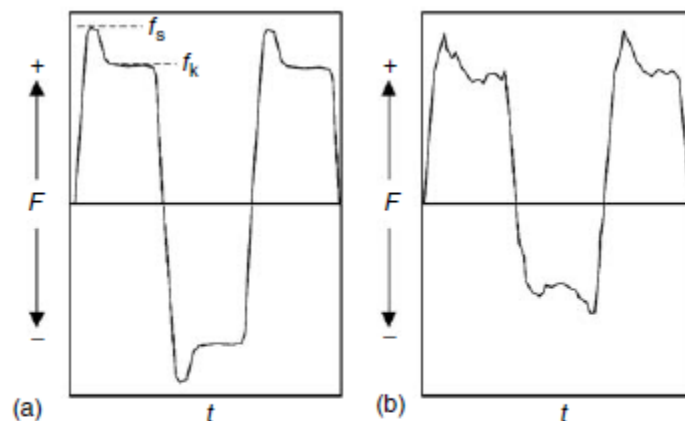


Figura 6. Ensaio de desgaste alternativo: a) Comportamento ideal; b) Observação real (Blau, 2009).

2.1.3. Dispositivos baseados na avaliação da energia dissipada por atrito

A energia dissipada por atrito, mais precisamente, o trabalho realizado pela força de atrito, durante o deslizamento corresponde a uma parcela importante na dissipação da energia no sistema e, como tal, deverá ter influência directa e significativa na resposta do sistema. De facto, existem muitos sistemas que do ponto de vista energético seriam conservativos desde que o atrito fosse desprezável. Nesses casos, o atrito pode ser associado à variação total de energia do sistema e pode dessa forma ser quantificado.

O trabalho realizado pela força de atrito, W_a , é obtido pelo integral da força de atrito ao longo do deslocamento:

$$W_a = \int F_a \cdot dx \quad (3)$$

2.1.3.1. Dispositivos de movimento rotativo unidireccional

Este género de dispositivos é muito usado no estudo de materiais para freios e embraiagens atendendo à semelhança, natureza e função deste tipo de componentes, Figura 7.

Ao contrário dos dispositivos anteriores, que medem o atrito de forma indirecta, ou seja, medem uma força que não é exactamente a força de atrito, mas sim uma equilibrante do sistema, neste tipo de dispositivo o atrito é determinado de forma directa, ou seja, é determinado pela consequência que ele provoca no movimento do disco, através da energia dissipada durante o processo. Assim, além de uma força de compressão, F , (esta

força pode ser controlada por pesos, molas ou outro sistema similar), é medida a variação da energia cinética ao longo do tempo.

O princípio de funcionamento consiste em colocar um disco a rodar, onde a inércia total das peças rotativas, I , é conhecida, com uma velocidade inicial, $\dot{\theta}$. Devido ao atrito existente entre o disco e o corpo que o comprime com uma determinada força, F , representado a cinzento na Figura 7, o disco vai desacelerando até parar.

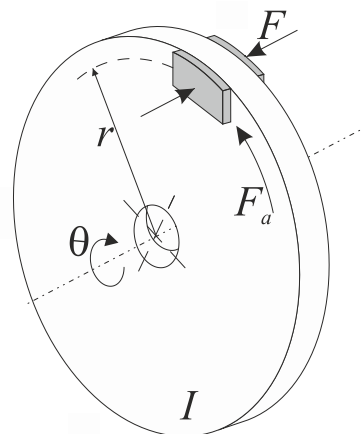


Figura 7. Dispositivo de movimento rotativo unidireccional.

Aproximando a curva do deslocamento em função do tempo a um polinómio de segundo grau, exemplificado na Figura 8, a desaceleração que o disco sofre, $\ddot{\theta}$, pode ser calculada pelo coeficiente C_3 do polinómio, pois:

$$C_3 = \frac{1}{2} \ddot{\theta} \quad (4)$$

Atendendo à segunda lei de *Newton* para movimentos de rotação, equação (5), é possível isolar o valor da força de atrito, e , a partir daí, calcular o valor do coeficiente de atrito desde que a força normal, F , seja conhecida.

$$\sum M = 2F_a r = I \ddot{\theta} \quad (5)$$

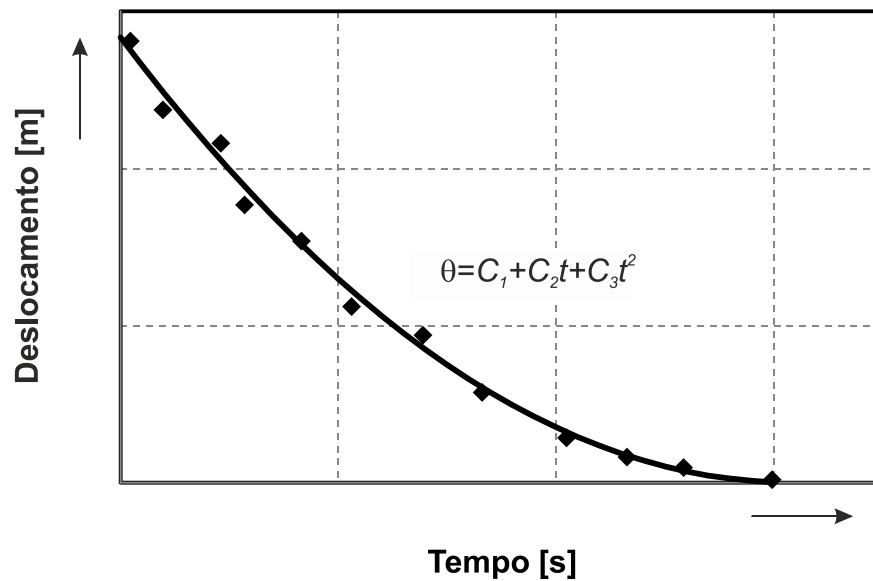


Figura 8. Evolução do deslocamento ao longo do tempo num dispositivo do tipo freio de inércia.

2.1.3.2. Dispositivos de movimento alternativo

Até a data, o único trabalho que se conhece enquadrável neste domínio foi realizado por uma equipa da *Ecole Centrale de Lyon*, (Rigaud, et al. 2010), onde desenvolveu um mecanismo baseado num pêndulo de movimento horizontal, que foi aplicado ao estudo do atrito em sistemas lubrificados, Figura 9.

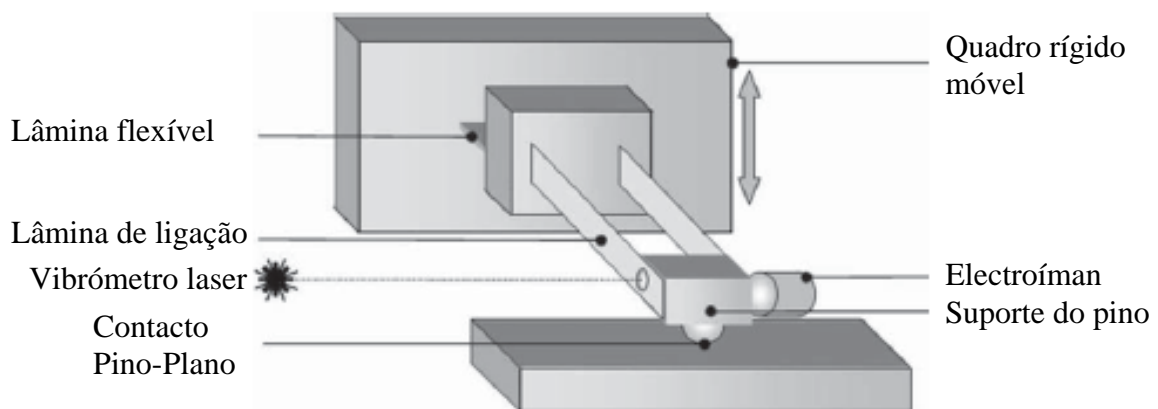


Figura 9. Esquema do mecanismo utilizado em Rigaud, et al. (2010).

A equação do movimento, que foi proposta para analisar a resposta em deslocamento de sistemas com contacto lubrificado, é expressa pela equação (6),

$$m\ddot{x}(t) + (c_0 + Nd_k)\dot{x}(t) + kx(t) = -\mu_k N \frac{|\dot{x}(t)|}{\dot{x}(t)} \quad (6)$$

onde, $x(t)$ representa a posição do sistema, m a massa, c_0 a constante de amortecimento em vibração livre sem contacto, k a constante de rigidez da mola e N a força normal. Neste modelo, o atrito é descrito por dois factores, Figura 10: um denominado por d_k que é um coeficiente linearmente dependente da velocidade, e o outro, denominado μ_k , é o coeficiente de atrito cinético que se considera não dependente da velocidade de escorregamento.

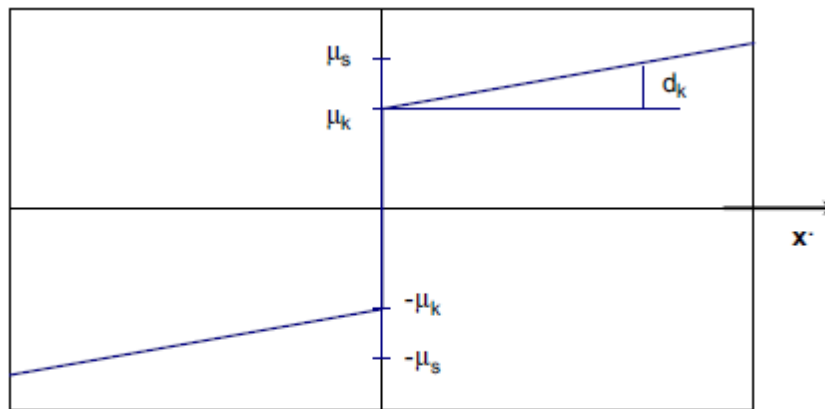


Figura 10. Coeficiente de atrito d_k linearmente dependente da velocidade (Rigaud, et al. 2010).

A curva do decaimento da energia do sistema em vibração livre e com o contacto lubrificado é dada pela equação (7),

$$E(\tau) = \frac{1}{2} (\Lambda e^{-\zeta\tau} - \Gamma)^2 \quad (7)$$

onde:

$$\Gamma = \frac{2\mu_k}{\pi\zeta}, \quad \Lambda = Y_0 + \Gamma, \quad (8)$$

e Y_0 é o deslocamento inicial, $Y_0 = y(\tau_0)^2$.

Como o amortecimento e o atrito viscoso dependem da velocidade, ζ é:

$$\zeta = \zeta_0 + \zeta_k, \quad \text{onde } \zeta_0 = \frac{c_0}{2\sqrt{km}}, \quad \text{e } \zeta_k = \frac{Nd_k}{2\sqrt{km}} \quad (9)$$

As irregularidades da curva do decaimento da energia, Figura 11 a), podem ser atenuadas utilizando a curva do decaimento médio da energia, Figura 11 b), que é

² O significado da simbologia utilizada nas equações (7) a (13) pode ser consultado Rigaud *et al.*, (2010).

definida como o integral da energia ao longo do tempo, isto é, entre o tempo inicial, τ , e o tempo até parar, T_f , equação (10):

$$\Pi(\tau) = \int_{\tau}^{T_f} E(\theta) d\theta \quad (10)$$

Sendo possível aproxima-la, ou seja, a curva aproximada do decrescimento médio da energia é dada pela expressão:

$$\Pi_{\text{app}}(\tau) = \frac{\Lambda^2}{4\zeta} e^{-2\zeta\tau} - \frac{\Lambda\Gamma}{\zeta} e^{-\zeta\tau} - \frac{\Gamma^2}{2} \tau + A \quad (11)$$

onde a constante A é:

$$A = \frac{\Gamma^2}{\zeta} \left(\frac{3}{4} - \ln\left(\frac{\Gamma}{\Lambda}\right) \right) \quad (12)$$

A Figura 11 mostra o decrescimento da energia real, Figura 11 a), e o aproximado, Figura 11 b).

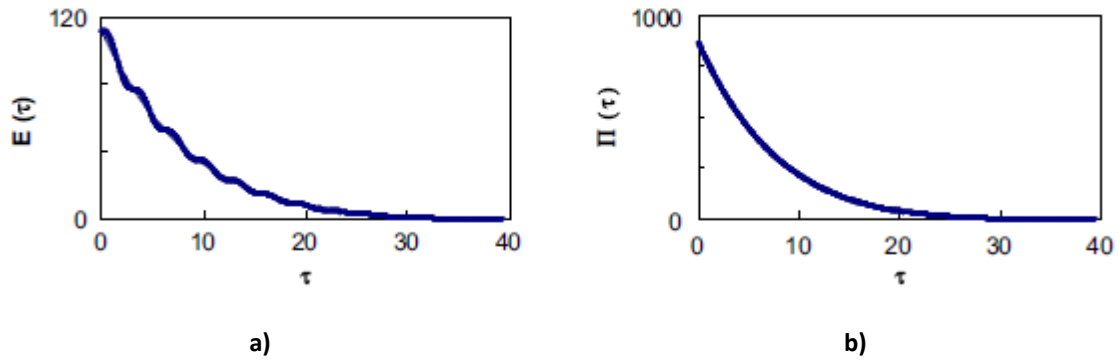


Figura 11. Decrescimento da energia: a) real b) aproximado (Rigaud, et al. 2010).

Não sendo totalmente explícito, é afirmado que ζ e μ_k são determinados pela comparação da curva do decrescimento da energia aproximada com a curva real de decrescimento de energia até que se verifique o menor erro possível (13).

$$\Delta\Pi = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Pi_{\text{experimental}} - \Pi_{\text{numérica}})^2} \quad (13)$$

2.2. Problemas com as soluções actuais, lacunas do conhecimento

As técnicas de medição de atrito descritas anteriormente possuem várias limitações e problemas. As técnicas que se baseiam na medição de ângulos têm limitações de carácter dinâmico. De facto, estas técnicas apenas permitem medir, com precisão, valores de atrito estático.

As técnicas de medição de força têm o inconveniente de não determinar exactamente a força de atrito. Ao medir uma força que é equilibrante da força de atrito, não se está só a medir o atrito; está-se a medir um conjunto de efeitos difíceis de descortinar, entre eles, efeitos dinâmicos (devidos à instabilidade provocada pela vibração da máquina e devido à variação do atrito).

2.2.1. Problemas devidos ao movimento

O diagrama de corpo livre de um dispositivo que se utilize para a medição de força, como qualquer um dos mecanismos ilustrados na Figura 5, tem a forma típica apresentada na Figura 12.

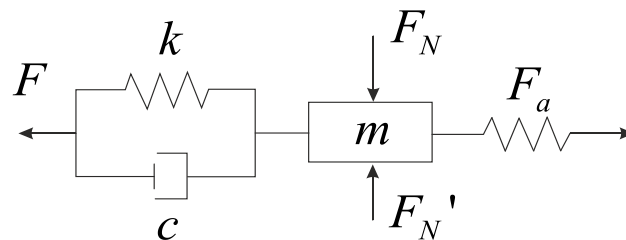


Figura 12. Diagrama do corpo livre dos mecanismos representados na Figura 5.

A força transmitida à fundação é dada pela equação (14) e a variação da amplitude da força transmitida é função da frequência da força aplicada, F_a , e a sua variação tem a forma apresentada na Figura 13.

$$\frac{F}{F_a} = \sqrt{\frac{1 + (2\xi\beta)^2}{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}}, \text{ onde } \beta = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (14)$$

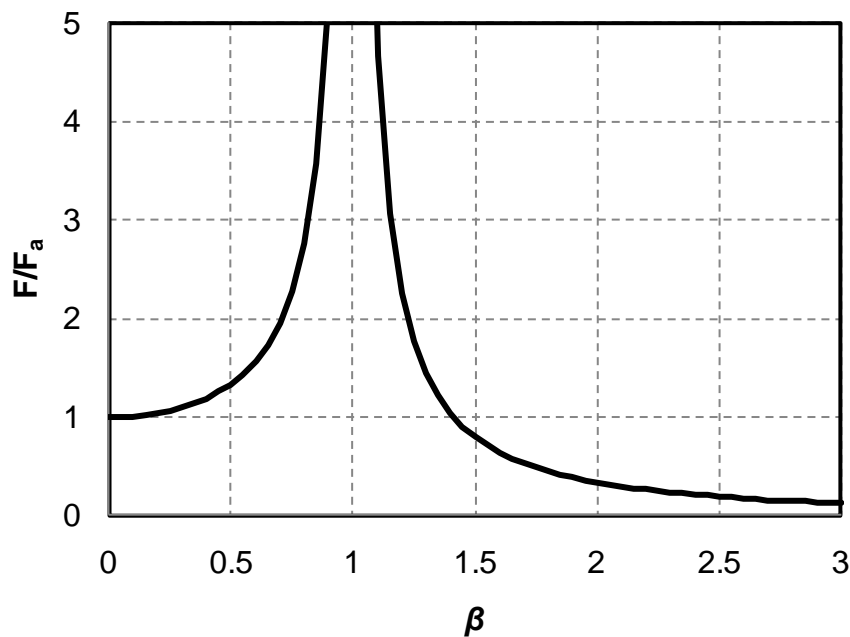


Figura 13. Evolução da força transmitida à fundação em função da razão de frequências.

Facilmente se constata que, a força medida pelo sensor, habitualmente células de carga, pode não ser a real. Pode ser sobrestimada, quando a frequência de excitação é próxima da frequência natural do sistema, $\beta \approx 1$, ou subestimada, quando a frequência de excitação é muito superior à frequência natural, $\beta \gg 1$.

Assim, só se tem a certeza que se está a medir o atrito correctamente para uma gama de frequências muito baixa, quando β é muito próximo de zero.

2.2.2. Problemas devidos ao atrito

Como as superfícies são rugosas a área de contacto real não é contínua, mas sim o somatório de um elevado número de pequenas áreas discretas. Assim, é de esperar que a força de atrito varie significativamente ao longo do tempo. Além da descontinuidade induzida pela rugosidade, os próprios materiais, pela sua natureza polifásica e policristalina, induzem variações instantâneas da força de atrito. Este fenómeno é ainda mais amplificado, em testes de atrito sem lubrificação, onde o processo de desgaste dá origem ao aparecimento de partículas.

Pelo exposto, os sistemas baseados na medição instantânea de força são susceptíveis de apresentar desvios significativos em relação aos valores reais. Os sistemas baseados na energia integram os efeitos instantâneos, mas o seu efeito é suavizado porque

o domínio de integração estende-se a um tempo muito superior à duração dos eventos elementares.

2.2.3. Lacunas dos dispositivos baseados na medição de energia

Os dispositivos de freio de inércia não permitem estudar situações de movimento alternativo e de variação de aceleração.

O dispositivo de movimento alternativo, apresentado na secção 2.1.3.2, foi apenas aplicado a sistemas com contacto lubrificado não tendo sido apresentados resultados em sistemas com contacto seco. Apesar de ser um sistema de construção simples, a instrumentação que foi utilizada é dispendiosa. A própria determinação do coeficiente de atrito não é clara, já que o lubrificante utilizado era de viscosidade conhecida (glicerol), e a necessidade de determinar duas variáveis, uma dependente da velocidade, ζ , e a outra não, μ_k , não é de todo imediata.

2.3. Objectivos

Face ao descrito, nesta tese, será utilizado um tribómetro que tem como princípio de funcionamento um sistema de pêndulo com movimento horizontal, semelhante ao utilizado em 2.1.3.2. A selecção deste equipamento foi motivada pela facilidade de construção, possibilidade de utilizar amostras pequenas, facilidade de utilização e rapidez de caracterização de um material.

O objectivo da presente dissertação é a medição do atrito de escorregamento, de dois corpos em contacto, através da análise do movimento vibratório de um pêndulo com movimento horizontal, tendo como princípios:

1. Verificar os princípios e a aplicabilidade da técnica experimental;
2. Verificar a aplicabilidade do método de análise inversa;
3. Validação dos resultados obtidos;
4. Identificar as limitações da técnica.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E CARACTERÍSTICAS DO MODELO EXPERIMENTAL

3.1. Princípio de funcionamento e considerações teóricas

O tribómetro utilizado tem como princípio de funcionamento um sistema de pêndulo com movimento horizontal, conforme ilustra a Figura 14. Este sistema é composto por um corpo 1, de massa, m , contendo na superfície inferior um suporte para a introdução de um provete esférico. A força normal provocada pelo corpo 1, sobre o plano, é controlada pela posição do contrapeso 4 que se desloca sobre um fuso roscado. O corpo 1 é ligado à articulação 3, por duas lâminas dispostas paralelamente. A deformação elástica sofrida pelas lâminas é medida utilizando dois extensómetros colados, um em cada lâmina, ligados em meia ponte de *Wheatstone*.

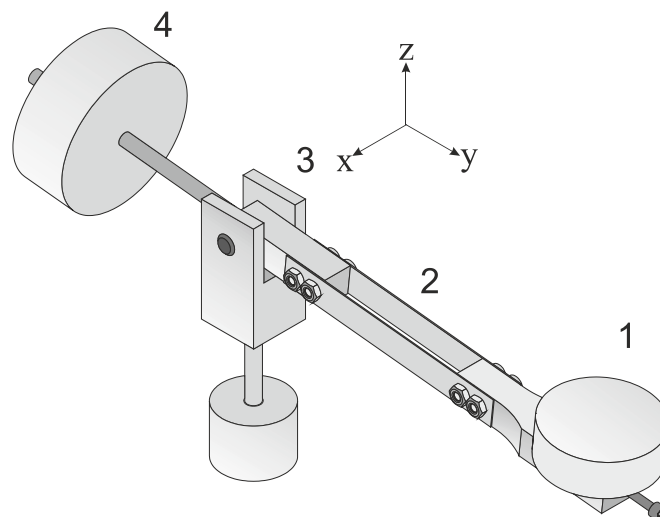


Figura 14. Tribómetro em estudo.

A Figura 15 representa um sistema vibratório massa-mola-amortecedor de parâmetros concentrados com um grau de liberdade que pode ser utilizado para avaliar a resposta dinâmica do pêndulo ilustrado na Figura 14.

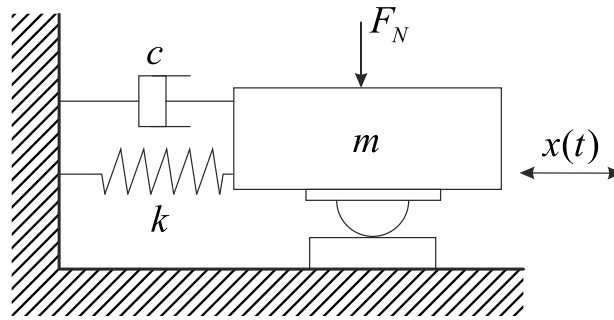


Figura 15. Sistema massa-mola-amortecedor sujeito a atrito de *Coulomb*.

A equação que rege o movimento do sistema mostrado na Figura 15 em vibração livre amortecida, desprezando o atrito no contacto entre o pino e o plano, é dada pela equação (15):

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (15)$$

onde, $x(t)$ representa a posição do sistema, em relação à posição de equilíbrio, m a massa, c a constante de amortecimento e k a constante de rigidez da mola.

A solução da equação diferencial da equação (15), ou seja, a resposta do sistema em vibração livre é dada pela expressão (16), onde X_0 representa a posição inicial, ω_n a frequência natural do sistema, ζ o factor de amortecimento e ϕ uma constante de fase.

$$x(t) = X_0 e^{-\zeta\omega_n t} \cos(\omega_n t + \phi) \quad (16)$$

A frequência natural, ω_n , é dada pela expressão (17), enquanto a frequência natural amortecida, ω_a , pode ser calculada pela equação (18).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (17)$$

$$\omega_a = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (18)$$

Se o atrito no ponto de contacto não for desprezável, a equação do movimento contém mais um termo dissipativo correspondente à força de atrito, conforme descreve a equação (19), onde, μ representa o coeficiente de atrito, considerando o modelo de *Coulomb*, e F_N é a força normal de contacto.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -\mu F_N \frac{|\dot{x}(t)|}{\dot{x}(t)} \quad (19)$$

A equação (19) admite a solução analítica (20). Todavia a complexidade desta expressão não permite obter de forma explícita o valor do coeficiente de atrito.

$$x(t) = \left(X_i - \mu \frac{F_N}{k} \frac{|\dot{x}(t)|}{\dot{x}(t)} \right) e^{-\xi \omega_n (t-t_i)} \left[\cos(\omega_a (t-t_i)) + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\omega_a (t-t_i)) \right] + \mu \frac{F_N}{k} \frac{|\dot{x}(t)|}{\dot{x}(t)} \quad (20)$$

onde $t=t_i=t_{i-1}+i(\pi/\omega_a)$ e $X_i=x(t_i)$ $i=1, 2, \dots, n$.

Assim, optou-se por realizar a integração da equação (19) por via numérica. No âmbito deste trabalho a integração foi feita recorrendo ao programa comercial Mathcad®, com o método de integração numérica de *Adams-Bashforth* implícito e com um passo de integração igual à taxa de aquisição do sinal, ou seja, com um incremento de tempo 1ms.

3.2. Sistema de medida

Qualquer deslocamento aplicado no corpo 1 provoca uma determinada deformação elástica nas lâminas. Para monitorizar essa deformação elástica utilizaram-se dois extensómetros resistivos, um em cada lâmina, e ligados em meia ponte de *Wheatstone*, cujo sinal é amplificado com um amplificador Vishay® com ganho 500x, conectados a um osciloscópio digital Pico® ADC-100.

3.2.1. Calibração do sistema de medida

Sabendo que a deformação elástica nas lâminas é directamente proporcional ao deslocamento aplicado no corpo 1, a calibração do sistema foi realizada tendo como princípio, a aplicação de uma sucessão de deslocamentos conhecidos no copo 1 e o registo do sinal de saída no osciloscópio, Figura 16.

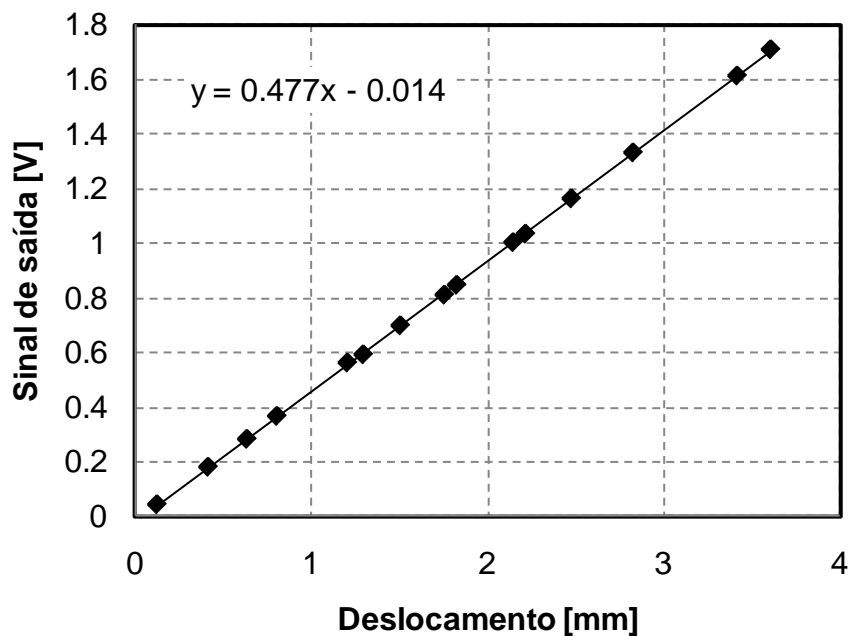


Figura 16. Voltagem lida no osciloscópio em função do deslocamento aplicado no corpo 1.

A sensibilidade do sistema de aquisição de sinal é obtida pela inclinação da recta que melhor descreve a tendência dos resultados, Figura 16. No caso, 0.477 V/mm, com um índice de linearidade de 99.1 %.

3.3. Constantes físicas do sistema

O corpo 1 possui uma rigidez elevada, quando comparada com as lâminas de ligação, sendo possível afirmar que está sujeito apenas a movimento de corpo rígido, isto é, possui rigidez infinita. Visto isto, admitiu-se que toda a massa do sistema se encontra concentrada no corpo 1, com as lâminas a possuírem massa desprezável e que quando sujeitas a cargas de flexão segundo a direcção x funcionam como uma mola de rigidez k . As forças de restituição e de dissipação são realizadas essencialmente pelas lâminas, quando o sistema se move em vibração livre sem atrito, levando a que se tivesse considerado que as lâminas se assemelham a um sistema mola-amortecedor. Esta simplificação, permite a formulação do problema físico num modelo matemático de parâmetros concentrados com um grau de liberdade.

3.3.1. Determinação da rigidez da mola

Para determinar a rigidez do sistema, utilizou-se um fio, uma roldana, um conjunto de massas previamente pesadas e um comparador.

Prendeu-se uma das extremidades do fio ao corpo 1, passou-se o fio pela roldana, garantindo que o fio entre a roldana e o corpo 1 se encontrava perfeitamente horizontal, e na outra extremidade suspenderam-se massas de forma sucessiva. O deslocamento provocado pela acção das massas no corpo 1 foi medido utilizando um comparador. O resultado do deslocamento horizontal medido em função da força aplicada é mostrado na Figura 17.

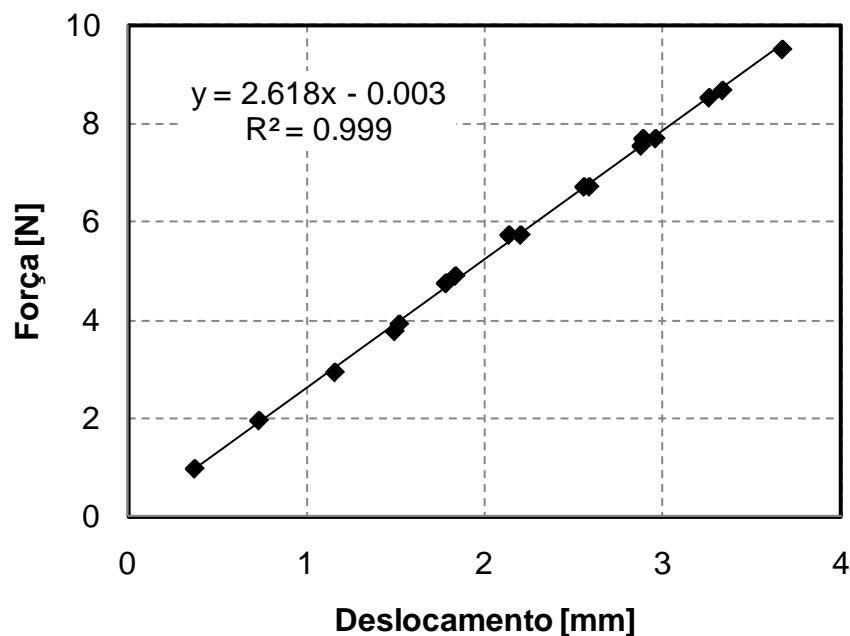


Figura 17. Deslocamento horizontal medido em função da força aplicada no corpo 1.

A linha de tendência da Figura 17 mostra que o comportamento das molas é bastante linear, com um índice de correlação linear de *Pearson* de 0.999, e a rigidez do conjunto das duas molas apresentou o valor de 2.618 N/mm.

3.3.2. Caracterização da dissipação de energia do sistema

A resposta do sistema em vibração livre é mostrada na Figura 18, tendo sido adquirida com uma taxa de aquisição de 1000 Hertz. A resposta é caracterizada por uma vibração com frequência constante e cuja amplitude decresce exponencialmente com o número de ciclos. Estas características permitem inferir que a dissipação de energia ocorre

fundamentalmente na forma viscosa. Assim, a equação do movimento correspondente à vibração livre pode ser modelizada por um sistema sub-amortecido em vibração livre, cuja lei do movimento é dada pela equação (21).

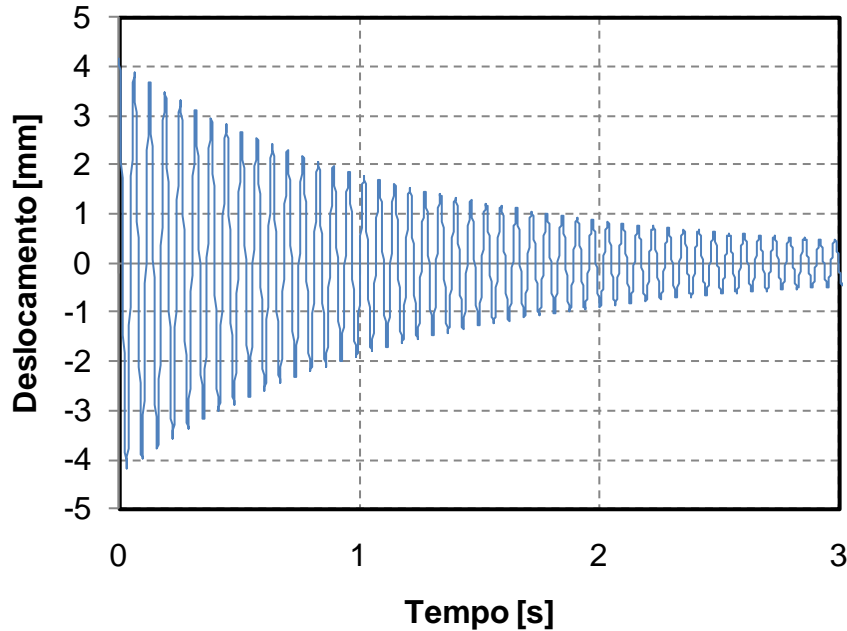


Figura 18. Deslocamento do sistema em vibração livre.

$$x(t) = X_0 e^{-\xi \omega_n t} \cos(\omega_n t + \phi) \quad (21)$$

A frequência natural amortecida ω_a , pode ser calculada pela expressão (22) em função do período médio, T_a , medido directamente do gráfico do deslocamento apresentado na Figura 18.

$$\omega_a = \frac{2\pi}{T_a} \quad (22)$$

Analisando o tempo médio entre os primeiros 19 picos positivos da Figura 19, verificou-se que a frequência natural amortecida do sistema é de $\omega_a = 98.575 \text{ rad/s}^2$.

Se a equação (21) for escrita exclusivamente para os valores de pico máximo obtêm-se a equação (23).

$$x(t) = x e^{-\xi \omega_n t} \quad (23)$$

Atendendo às constantes da regressão exponencial ajustada pelos máximos, conforme ilustrado na Figura 19, extrai-se o valor do factor de amortecimento $\xi = 0.00817$ e da frequência própria de vibração $\omega_n = 98.575 \text{ rad/s}^2$.

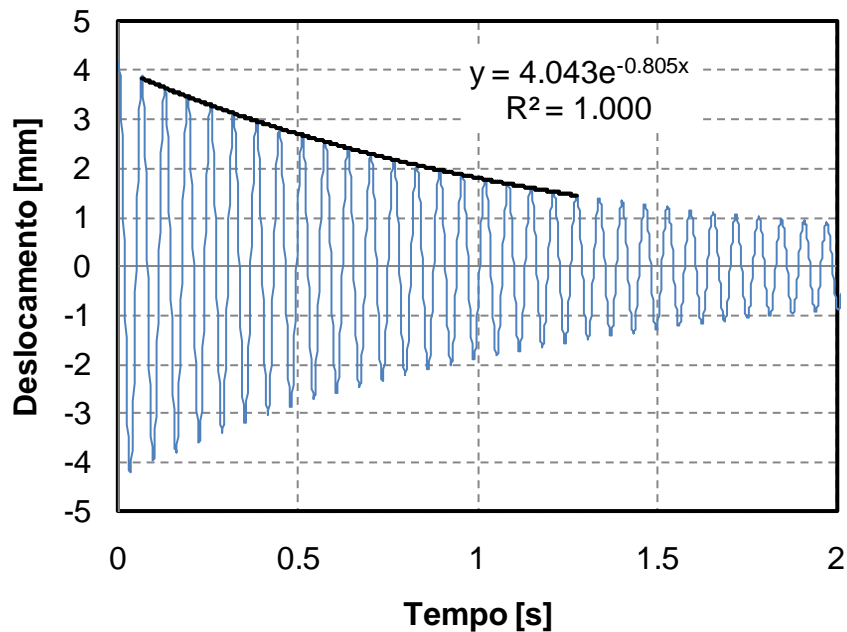


Figura 19. Valores dos primeiros 19 picos positivos.

Conhecendo a frequência própria de vibração e a rigidez, é possível calcular a massa equivalente do sistema, tendo sido obtido o valor $m=0.269$ kg.

Substituindo os valores anteriores na equação (21) obteve-se uma correlação de 0.994 entre a curva da resposta obtida por via teórica com a obtida por via experimental. A comparação dos resultados é mostrada na Figura 20.

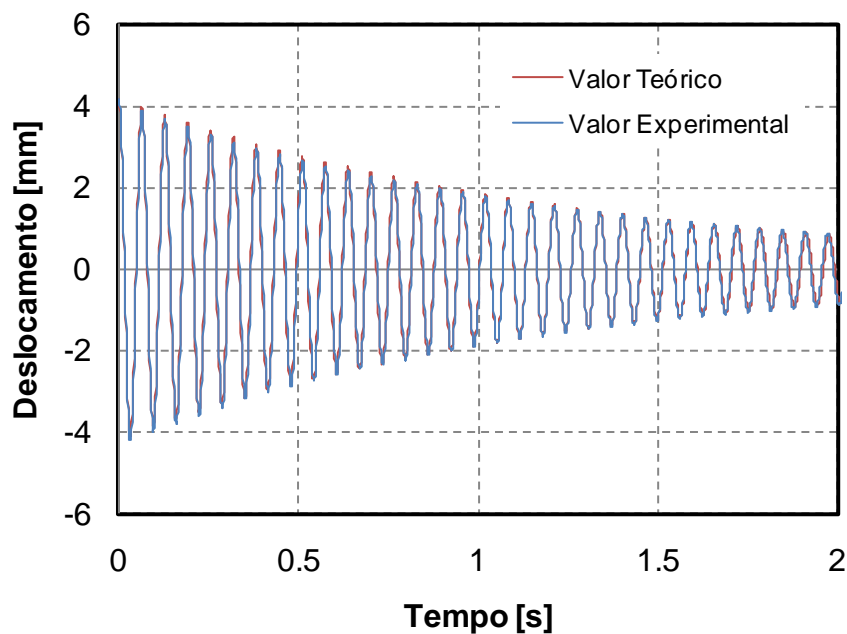


Figura 20. Comparação da resposta experimental do sistema com a resposta obtida por via teórica.

Utilizando a expressão (3) a evolução do trabalho da força de amortecimento do sistema nos primeiros 19 ciclos é mostrada na Figura 21.

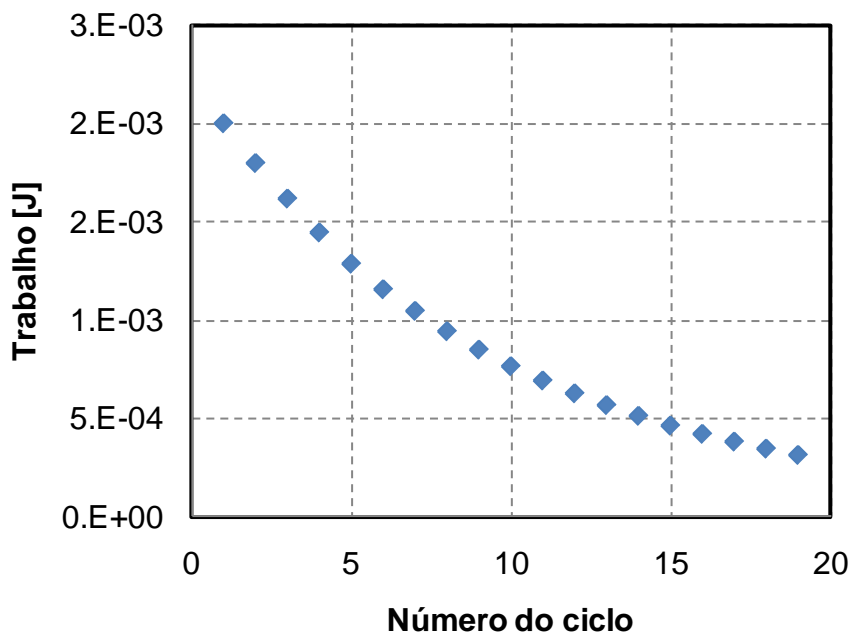


Figura 21. Trabalho realizado pela força de amortecimento nos primeiros 19 ciclos.

Pelo exposto, as constantes características do modelo experimental foram completamente identificadas e estão resumidas na Tabela 2.

Tabela 2. Características do modelo experimental.

m	c	k	ω_n
[kg]	[N.s/m]	[N/m]	[rad/s ²]
0.269	0.43	2618	98.575

3.4. Protocolo experimental

Para minimizar os erros introduzidos por variações do procedimento de ensaio, foi definido um protocolo que a seguir se descreve:

- 1) Fixação do provete esférico no suporte do corpo 1 e a fixação do plano no porta-provetes fixo;
- 2) Limpeza das superfícies de contacto dos provetes com toalhete humedecido em álcool etílico;

3) Ajustamento da força normal desejada, no caso para os valores de 0.2, 0.3, 0.5 e 0.7 N. (Os valores de carga são ajustados deslocando a massa de tara ao longo do fuso e medidos no mostrador da balança);

4) Anotação das condições ambientais do meio envolvente (humidade relativa e temperatura).

5) Aplicação de um deslocamento inicial, por deslocação manual da posição do corpo 1. Esta operação deve ser feita de forma cuidadosa mantendo o contacto entre os provetes;

6) Iniciação da aquisição do sinal de deslocamento ao longo do tempo e libertação do sistema, dando início ao movimento de vibração livre com dissipação de energia por atrito;

7) Análise do gráfico de variação do deslocamento com o tempo para definição das condições iniciais do movimento. No presente estudo optou-se por ajustar o início do tempo a um ponto de deslocamento inicial máximo, logo com velocidade inicial nula, Figura 22;

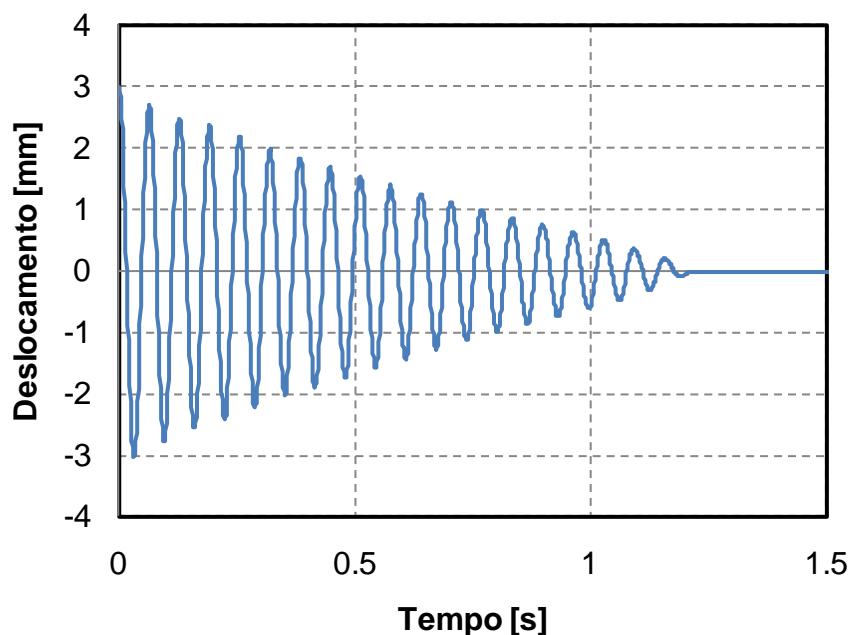


Figura 22. Curva típica do movimento do sistema em vibração livre com atrito; par de materiais AL2024-AL6082, $F_N=0.2\text{N}$.

8) Integração numérica da equação diferencial, utilizando como variáveis de entrada a F_N , X_0 e uma estimativa inicial do valor de coeficiente de atrito, μ ;

9) Comparação da curva integrada com a curva real adquirida em 7), Figura 23.

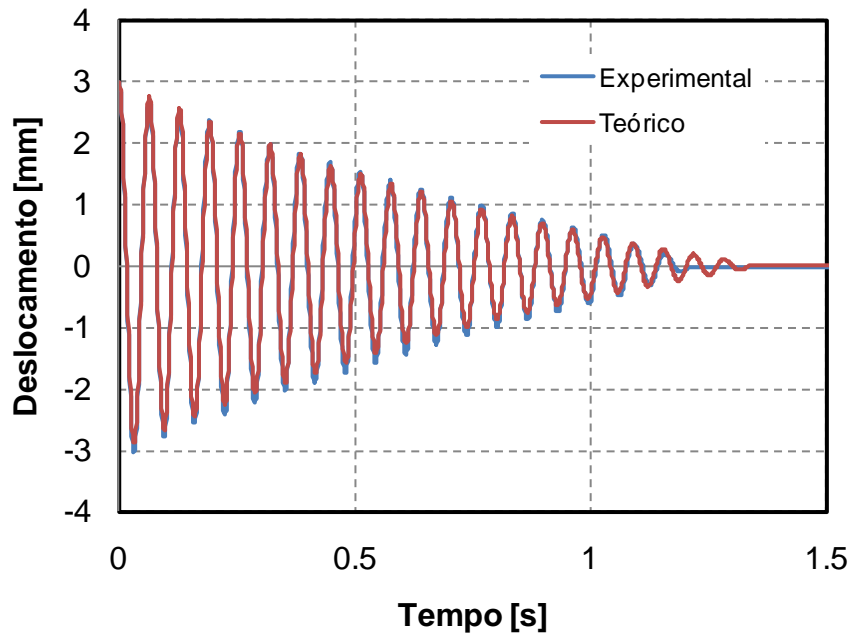


Figura 23. Comparação típica da curva teórica com a curva obtida experimentalmente; par de materiais AL2024-AL6082, $F_N=0.2N$.

10) Repetição do passo 8) para diferentes valores de coeficiente de atrito até maximizar a correlação entre as duas soluções, Figura 24.

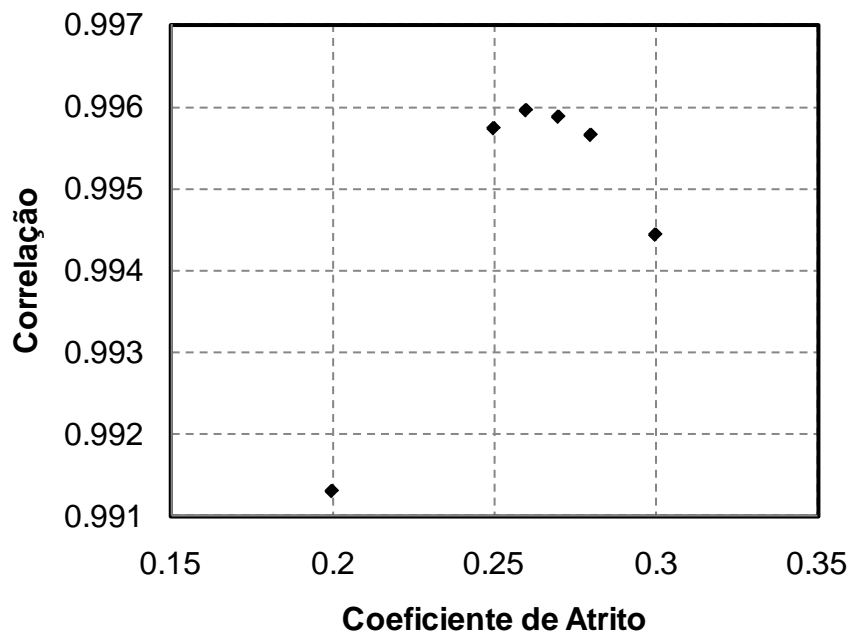


Figura 24. Evolução típica da correlação entre a curva teórica e a curva experimental em função do valor do coeficiente de atrito; par de materiais AL2024-AL6082, $F_N=0.2N$.

O procedimento de determinação do coeficiente de atrito é apresentado e resumido sob a forma de fluxograma na Figura 25.

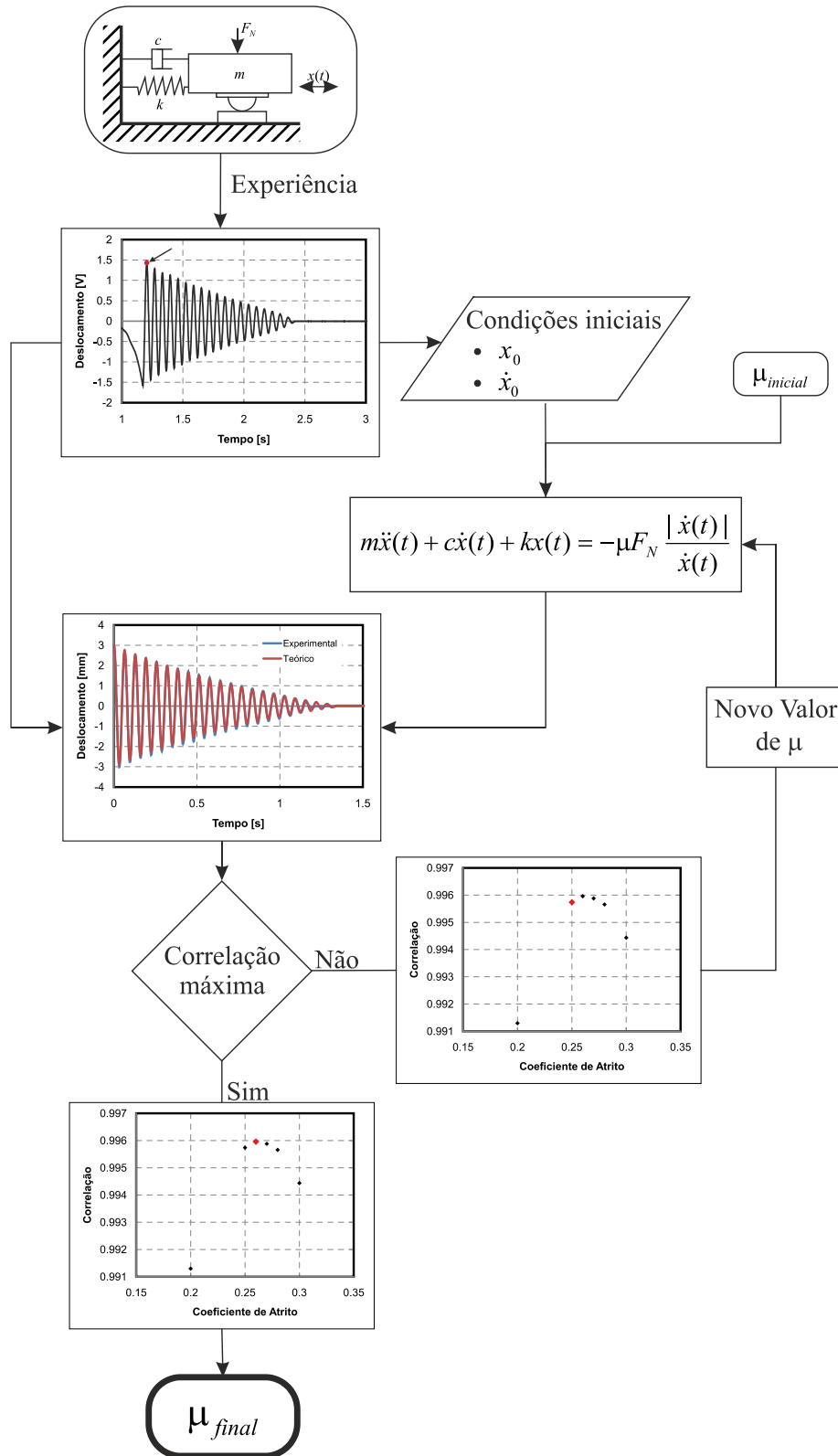


Figura 25. Fluxograma do procedimento de determinação do coeficiente de atrito.

4. APLICAÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL

No presente capítulo são apresentados e discutidos, os materiais, as condições de ensaio e os valores de atrito dos diferentes pares tribológicos.

4.1. Materiais

Para estudar a aplicabilidade da técnica optou-se por escolher pares de materiais com comportamento tribológico diferente. Os materiais testados, e as respectivas propriedades, estão sintetizados na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades dos materiais em estudo³.

Par tribológico	Provete	Designação	E	Dureza	R _a	R _{RMS}	R _Z
			[GPa]	[HV]	[μm]	[μm]	[μm]
1	Esfera	AL2024	69	131	0.98	1.27	7.94
	Plano	AL6082	69	98	0.72	0.91	3.89
2	Esfera	100Cr6	207	856	–	–	–
	Plano	AISI P20	207	571	0.12	0.14	0.60
3	Esfera	Al ₂ O ₃	>300	≈2000	–	–	–
	Plano	Vidro	≈70	≈590	0.11	0.13	0.61
4	Esfera	Al ₂ O ₃	>300	≈2000	–	–	–
	Plano	Al ₂ O ₃	>300	≈2000	0.30	0.37	1.58
5	Esfera	100Cr6	207	856	–	–	–
	Plano	NBR	0.01-0.1	–	–	–	–
6	Esfera	100Cr6	207	856	–	–	–
	Plano	Látex	0.001- 0.005	–	–	–	–

O primeiro par é constituído por dois materiais metálicos de baixa dureza e sensíveis a fenómenos de desgaste por adesão. O segundo par é composto por dois materiais metálicos, dois aços, mais duros e de menor susceptibilidade a fenómenos de desgaste

³ Os valores do módulo de elasticidade, E, assim como os da dureza dos pares tribológicos 3 e 4 são estimados, ou seja, não foram medidos.

e de adesão. O terceiro par é constituído por dois materiais cerâmicos de elevada dureza. No entanto, verificou-se o aparecimento de “crateras” superficiais no plano, provocadas pelo impacto da esfera durante os testes. Isto, levou à selecção de um quarto par, constituído por dois materiais cerâmicos, também duros, mas menos sensíveis ao impacto. O quinto par é constituído por um metal duro, o material da esfera, e um elastómero. Como os resultados obtidos diferiram bastante dos verificados com os restantes pares, para esta particularidade de comportamento, utilizou-se um sexto par de materiais, composto pela esfera de aço e por um elastómero com propriedades completamente distintas, no entanto com um comportamento acentuadamente viscoelástico.

4.2. Condições de ensaio

Os ensaios foram realizados em ambiente de laboratório, com a temperatura de $22\pm 3^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $50\pm 10\%$. A taxa de aquisição do sinal, como já referido anteriormente, foi de 1000 Hertz.

As condições de cada ensaio estão sintetizadas na Tabela 4.

Tabela 4. Condições ambientais dos ensaios.

Par tribológico	Temperatura	Humidade relativa
	[$^{\circ}\text{C}$]	[%]
1	20	44
2	19	47-50
3	-	-
4	25	58
5	24	56
6	24	61

4.3. Valores de atrito

Na Tabela 5 são mostrados os resultados do coeficiente de atrito para diferentes condições de carga do par tribológico AL2024-AL6082. Os resultados apresentados referem-se ao tratamento estatístico dos resultados de 4 repetições realizadas imediatamente umas após outras e no mesmo local, sem recolocação dos provetes.

Na Tabela 5 é possível observar que o valor do coeficiente de atrito para cargas baixas, 0.2 e 0.3 N, é caracterizado por um desvio padrão e intervalo de confiança elevados, quando comparado com as cargas 0.5 e 0.7 N.

Tabela 5. Coeficiente de atrito para diferentes condições de carga; Esfera AL2024 – Plano AL6082.

Força Normal [N]	Coef. de atrito	Desvio padrão	Int. confiança 95%
0.2	0.53	0.22	± 0.22
0.3	0.62	0.21	± 0.20
0.5	0.69	0.02	± 0.02
0.7	0.61	0.04	± 0.04

Assim, analisando a evolução do coeficiente de atrito ensaio a ensaio, conforme representado na Figura 26, observa-se que, para cargas de 0.2 e 0.3 N, existe uma evolução ascendente do valor do coeficiente de atrito com o número de passagens, ou seja, com o número de ensaios. Este comportamento é menos visível, ou mesmo inexistente para cargas mais elevadas, 0.5 e 0.7 N. É de realçar que, ao fim de um número reduzido de ensaios, o valor do coeficiente de atrito converge para uma gama de valores relativamente estreita.

Este caso ilustra e comprova a aplicabilidade e sensibilidade da técnica a materiais onde ocorra deformação plástica por rotação, originando uma variação significativa do atrito com o número de ciclos de repetição do movimento.

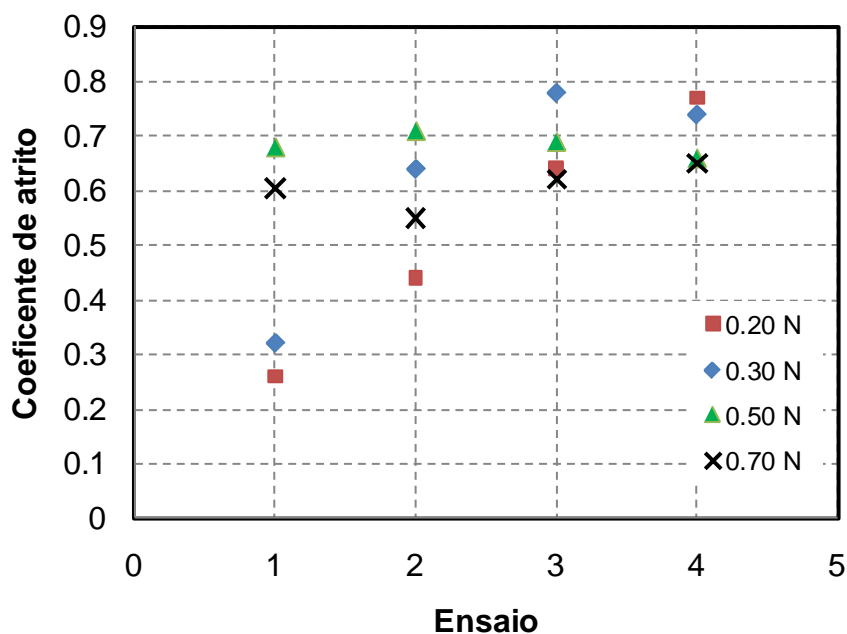


Figura 26. Evolução do atrito para diferentes condições de carga; Esfera AL2024 – Plano AL6082.

A representação gráfica da força de atrito em função da força normal, Figura 27, permite verificar a adequada linearidade dos resultados com um índice de correlação linear de *Pearson* de 0.98, permitindo concluir que a aplicação do modelo linear de *Coulomb-Amontons* é adequada. Do mesmo gráfico é possível obter uma adequada estimativa para o valor do coeficiente de atrito, 0.65 (Ramalho, 2010).

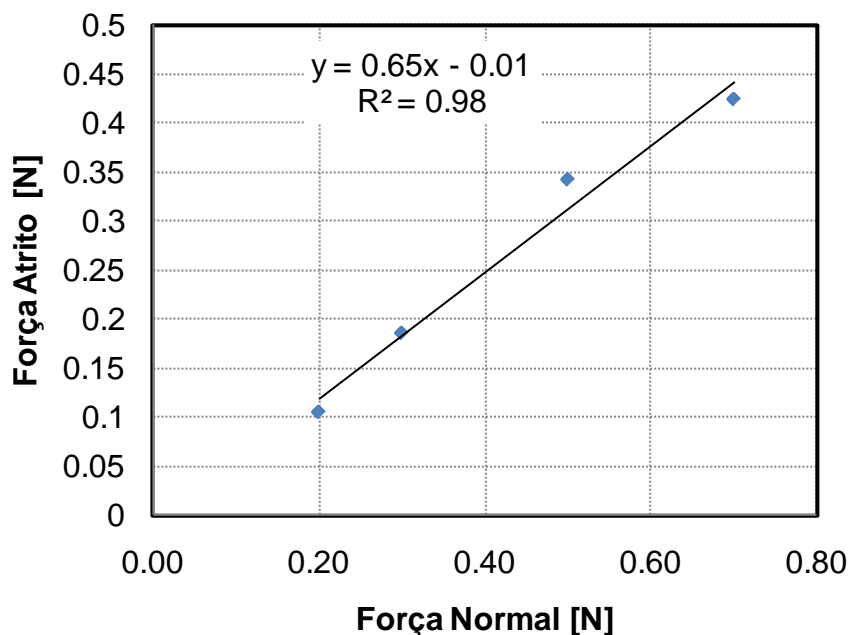


Figura 27. Coeficiente de atrito AL2024-AL6082.

Na Tabela 6 são mostrados os resultados do coeficiente de atrito para diferentes condições de carga do par tribológico 100Cr6-AISI P20.

Neste caso, mesmo para cargas baixas, os valores do coeficiente de atrito entre ensaios é relativamente constante, o que se traduz em intervalos de desvio padrão e de confiança muito reduzidos.

Tabela 6. Coeficiente de atrito para diferentes condições de carga; Esfera 100Cr6 – Plano AISI P20.

Força Normal [N]	Coef. de atrito	Desvio padrão	Int. de confiança 95%
0.2	0.26	0.04	±0.04
0.3	0.22	0.04	±0.04
0.5	0.13	0.01	±0.00
0.7	0.12	0.01	±0.01

Observa-se, também, que à medida que a força normal aumenta o desvio entre os resultados é menor, ou seja, há uma maior estabilidade do valor do coeficiente de atrito entre repetições.

Pelo gráfico da força de atrito em função da força normal, representado na Figura 28, para o par de materiais 100Cr6-AISI P20, obtém-se o valor de 0.05 para o coeficiente de atrito com um índice de correlação linear de *Pearson* de 0.85.

Neste caso, porque o índice de correlação linear de *Pearson* é relativamente baixo, além da constante de desvio da linha de tendência, 0.04, ser da ordem de grandeza do coeficiente de atrito, 0.05, seria conveniente a realização de mais ensaios para outros valores de carga para esclarecer esta tendência.

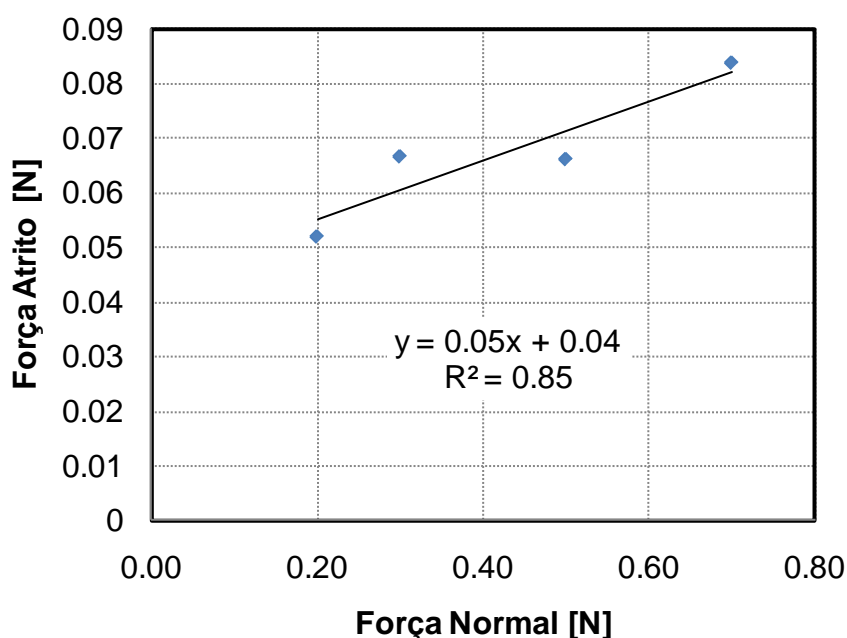


Figura 28. Coeficiente de atrito 100Cr6-AISI P20.

Na Tabela 7 são mostrados os resultados do coeficiente de atrito para diferentes condições de carga do par tribológico Al₂O₃-Vidro.

Tabela 7. Coeficiente de atrito para diferentes condições de carga; Esfera Al₂O₃ – Plano Vidro.

Força Normal [N]	Coef. de atrito	Desvio padrão	Int. de confiança 95%
0.2	0.21	0.02	±0.02
0.3	0.14	0.01	±0.01
0.5	0.13	0.00	±0.00
0.7	0.22	0.03	±0.04

Analisando a tabela anterior, verifica-se que em todas as gamas de cargas o coeficiente de atrito é praticamente constante. No entanto, analisando ensaio a ensaio, Figura 29, constata-se a existência de dois pontos com um comportamento anormal, ensaio número 4 para a força normal de 0.50 N e ensaio número 2 para a carga de 0.7 N.

Analisando a superfície do plano de um destes ensaios, Figura 30, verifica-se a existência de uma fractura superficial, originada pelo impacto da esfera quando contacta com o plano.

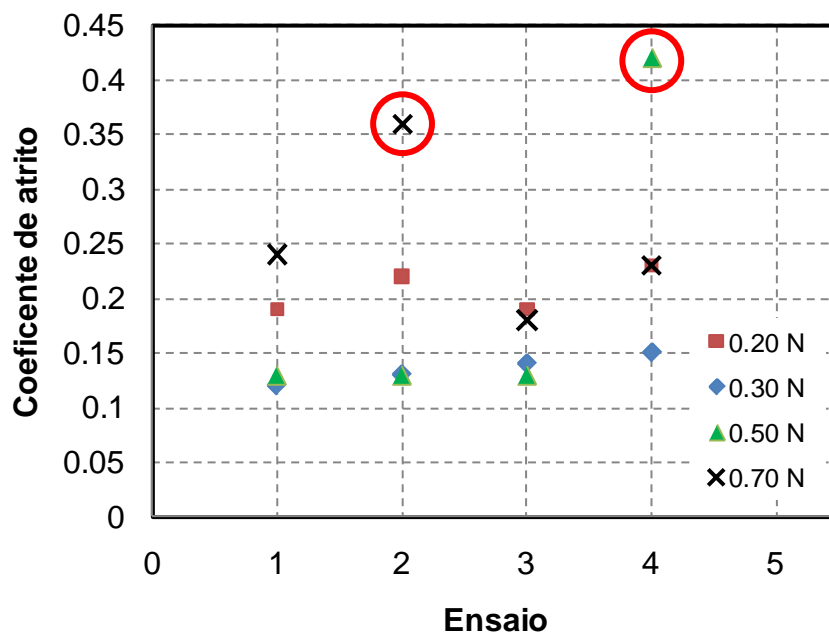


Figura 29. Evolução do atrito para diferentes condições de carga, Al_2O_3 -Vidro.

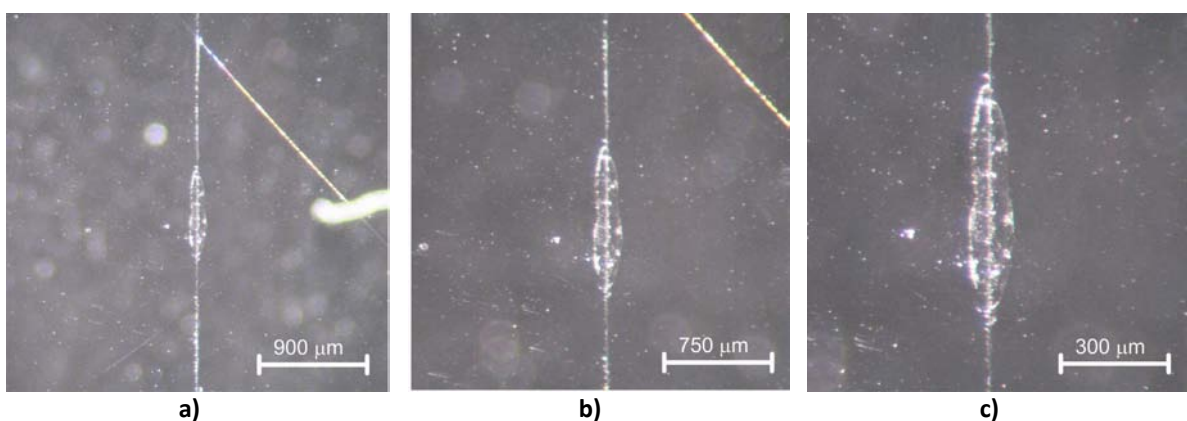


Figura 30. Superfície do plano do par Al_2O_3 -Vidro: a) vista a 1.5x; b) vista a 2.5x; c) vista a 4x.

A origem desta fractura está na preparação da experiência, e não pelo decorrer da mesma. Isto torna o ensaio inválido, pelo que os respectivos resultados não foram utili-

zados para efeitos de cálculo, ou seja, o valor de atrito deste ensaio foi excluído e não foi tido em conta para o cálculo dos valores apresentados na Tabela 7.

Este caso mostra a sensibilidade da técnica perante defeitos que existam na superfície do material, já que, o aparecimento de qualquer defeito superficial provoca uma variação significativa na resposta do sistema, que, por sua vez, se reflecte no valor do coeficiente de atrito.

O gráfico da Figura 31 mostra o valor de 0.22 para o coeficiente de atrito para o par de materiais Al_2O_3 -Vidro, com um índice de correlação linear de *Pearson* de 0.85. Também para este par de materiais a extensão da experiência a um número mais elevado de condições de contacto poderia permitir resultados com menor dispersão.

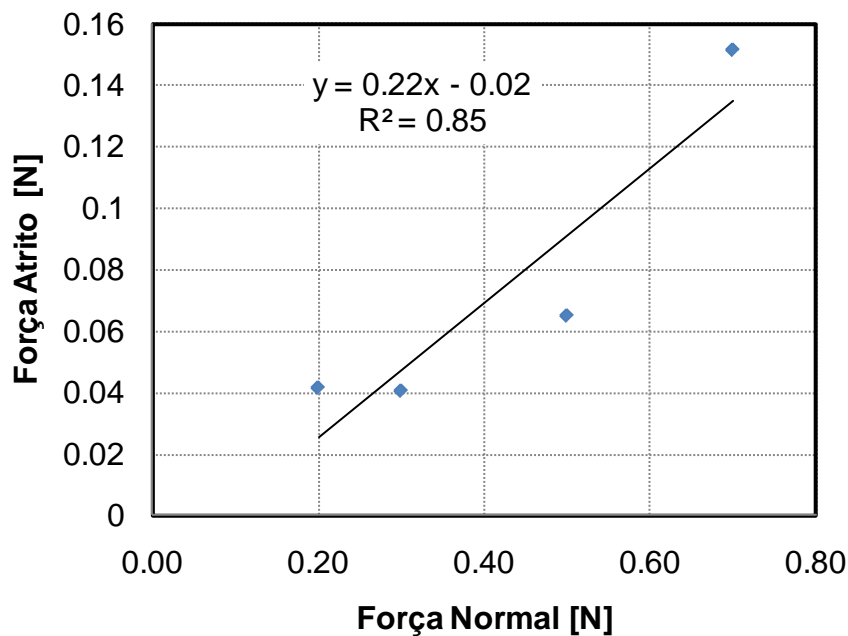


Figura 31. Coeficiente de atrito Al_2O_3 -Vidro.

Com o objectivo de verificar se este tipo de comportamento acontece em todos os materiais frágeis, substituiu-se o material do plano por outro também cerâmico mas mais tenaz, Al_2O_3 .

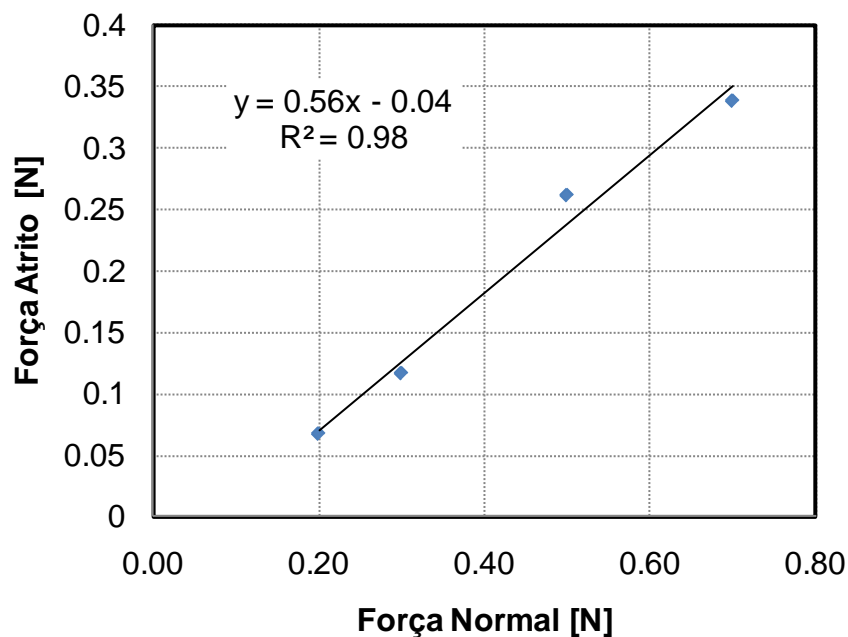
Na Tabela 8 são mostrados os resultados do coeficiente de atrito para diferentes condições de carga do par tribológico Al_2O_3 - Al_2O_3 .

Tabela 8. Coeficiente de atrito para diferentes condições de carga; Esfera Al_2O_3 – Plano Al_2O_3 .

Força Normal [N]	Coef. de atrito	Desvio padrão	Int. de confiança 95%
0.2	0.34	0.08	± 0.08
0.3	0.39	0.03	± 0.03
0.5	0.52	0.11	± 0.10
0.7	0.48	0.01	± 0.01

Neste caso, para as cargas de 0.2 e 0.5 N, o desvio entre os valores obtidos é da ordem dos 20 %. Para as cargas de 0.3 e 0.7 N o desvio é residual. Ao contrário do caso anterior, neste caso não existiu qualquer fractura provocada pelo manuseamento do mecanismo, o que permite afirmar que todos os ensaios são válidos.

O gráfico da força de atrito em função da força normal mostra o valor de 0.56 para o coeficiente de atrito para o par de materiais Al_2O_3 - Al_2O_3 , com um índice de correlação linear de *Pearson* de 0.98, Figura 32.

**Figura 32.** Coeficiente de atrito Al_2O_3 - Al_2O_3 .

A Figura 33 representa o exemplo de um ensaio do par de materiais 100Cr6-NBR.

Analisando a Figura 33, ao contrário do que aconteceu nos ensaios realizados para os outros materiais, como por exemplo o caso representado na Figura 23, constata-se que, apesar de o número de oscilações ser menor, a frequência própria de vibração obtida experimentalmente não coincide com a frequência própria de vibração do modelo teórico.

Isto é, a curva teórica que mais se aproxima da curva experimental está desfasada e atrasa-se à medida que decorre o ensaio, concluindo-se que a oscilação não decorre a frequência constante.

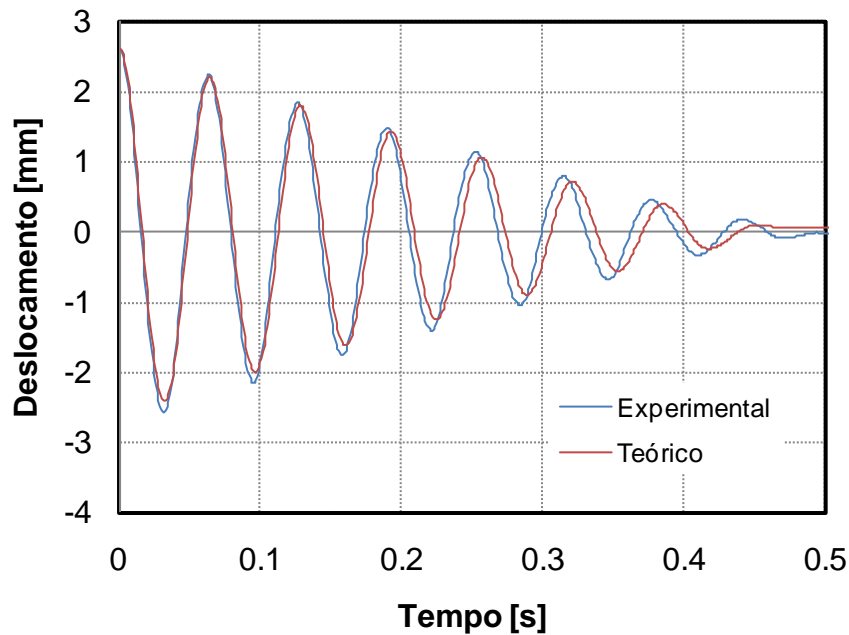


Figura 33. Comparação da resposta real do sistema com a resposta obtida por via teórica, 100Cr6-NBR.

Com o objectivo de verificar se este tipo de comportamento é típico em todos os materiais viscoelásticos, optou-se por repetir o estudo utilizando agora como plano uma película de látex. O resultado é semelhante, como é mostrado na Figura 34.

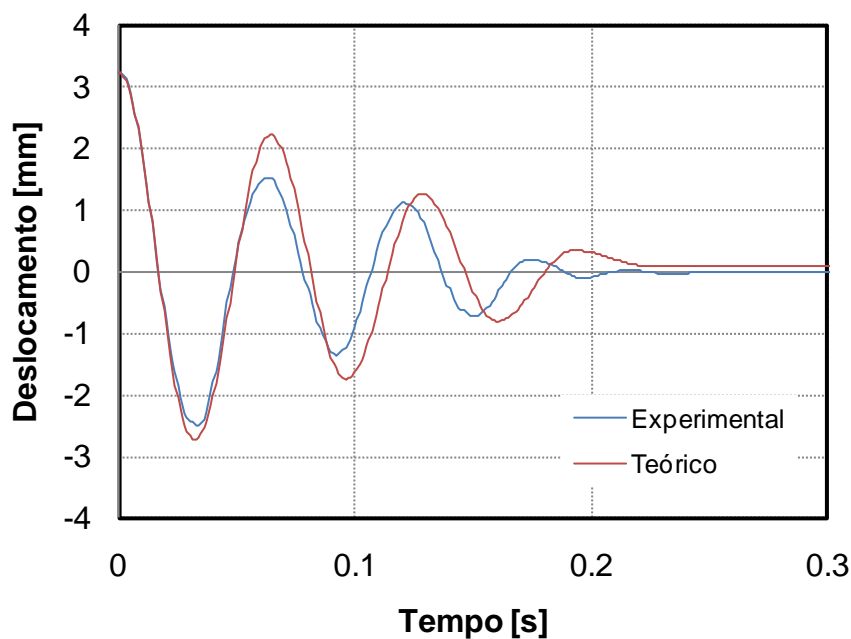


Figura 34. Comparação da resposta real do sistema com a resposta obtida por via teórica, 100Cr6-Látex.

A explicação para o comportamento identificado, deve-se ao comportamento deste tipo de materiais; de facto nos materiais com comportamento viscoelástico a relação entre as tensões e as deformações não é linear, e as tensões são dependentes da velocidade de deformação. Este comportamento afecta a parte homogénea da equação diferencial do movimento, equação (19), afecta, o termo da derivada de 1ª ordem, isto é, o amortecimento, e o termo da derivada de ordem zero, ou seja, a rigidez do sistema, e possivelmente também afecta o segundo membro da equação, ou seja, o atrito. A análise inversa deste tipo de materiais deverá exigir a aplicação de equações não lineares.

5. VALIDAÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL

No presente capítulo proceder-se-á à validação da técnica e do procedimento de análise inversa pela comparação com resultados obtidos aplicando uma técnica diferente, no caso a técnica de deslizamento unidireccional com carga crescente *Load-Scanner*, utilizando como materiais de teste o par tribológico Esfera AL2024 – Plano AL6082.

5.1. Validação do procedimento pela técnica *Load-Scanner*

A técnica *Load-Scanner* consiste em colocar uma esfera (5 mm de raio) a deslizar, em movimento contínuo e a velocidade constante (1 mm/s), em contacto com um plano. Concomitantemente com o movimento de avanço aplicar-se-á um aumento da força normal de forma linear até ao valor de 13 N.

A Figura 35 mostra a evolução da força de atrito com o aumento da força normal numa primeira passagem, para o par de materiais Esfera AL2024 – Plano AL6082.

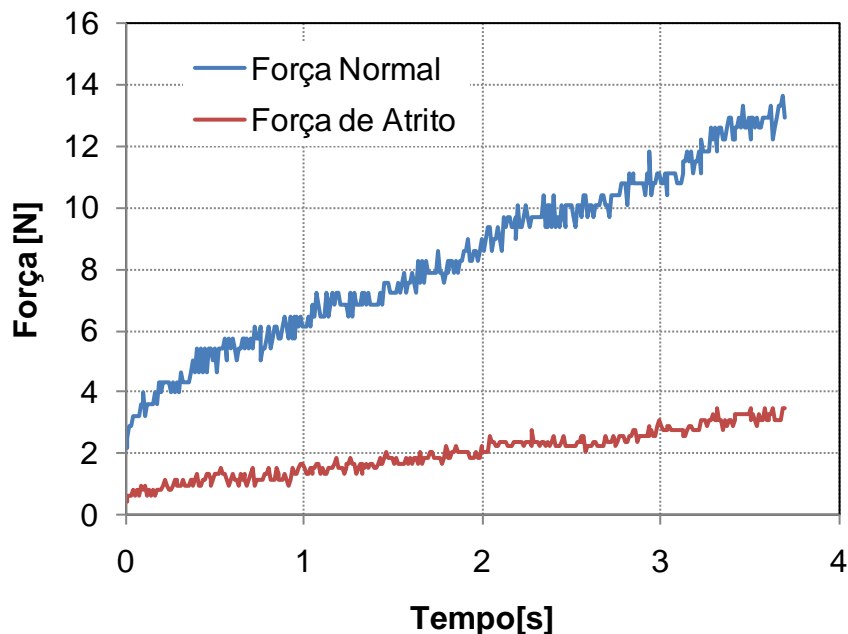


Figura 35. Evolução da força de atrito com o aumento da força normal, AL2024-AL6082.

A relação entre a força de atrito e a força normal é mostrada na Figura 36, e obtém-se o valor de 0.27 para o coeficiente de atrito com um índice de correlação linear de *Pearson* de 0.98.

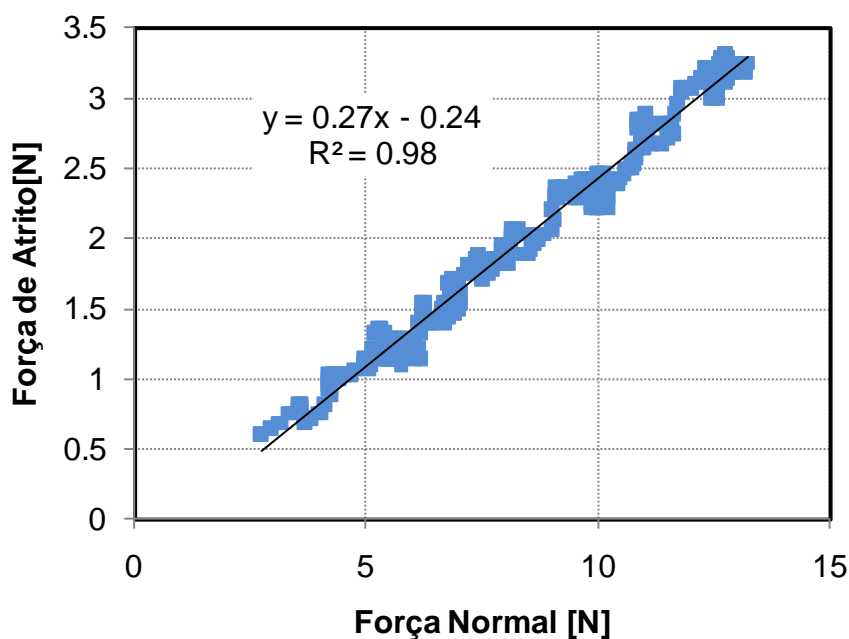


Figura 36. Força de atrito em função da força normal, AL2024-AL6082.

Para proceder à validação do modelo, este procedimento foi repetido quatro vezes, ou seja, foram realizadas quatro passagens sobre a mesma pista.

A evolução da força de atrito em função da força normal, com o decorrer do número de passagens, é mostrada na Figura 37. A quarta passagem revela variações locais e abruptas da força de atrito, indicando a ocorrência de fenómenos de adesão

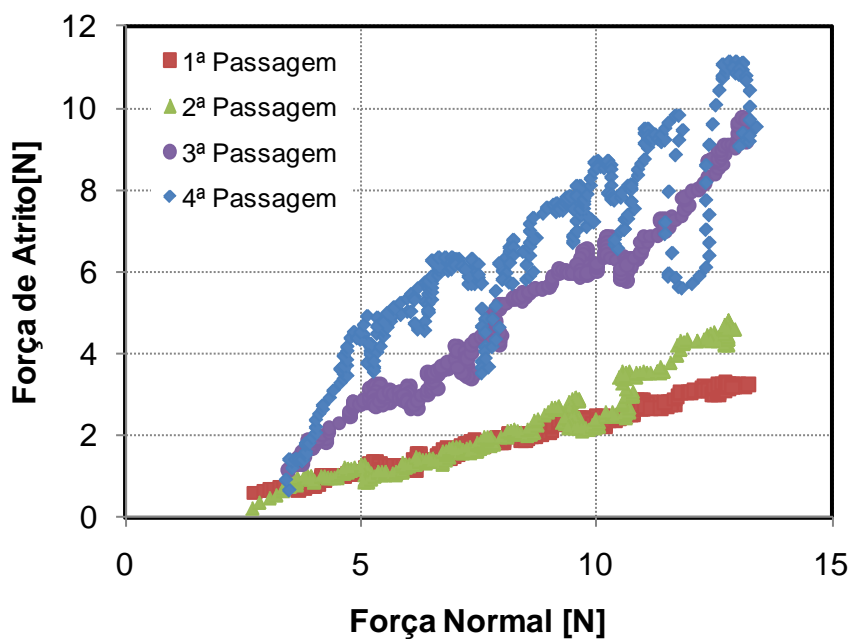


Figura 37. Evolução da força de atrito com o número de passagens, em função da força normal, AL2024-AL6082.

A correspondente evolução do coeficiente de atrito pode ser observada na Figura 38. Verifica-se um aumento do atrito com o número de passagens com tendência para um regime de estabilização a partir da 3ª passagem.

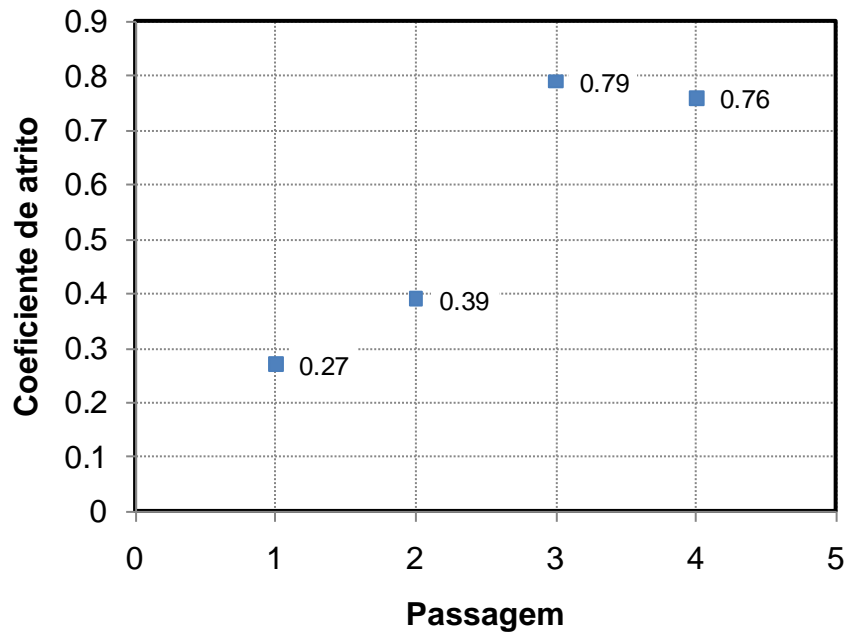


Figura 38. Evolução e valor do coeficiente de atrito com o número de passagens, AL2024-AL6082.

Como ilustra a Figura 39, esta constatação torna-se mais clara e visível sobrepondo os resultados obtidos pela técnica *Load-Scanner*, representados na Figura 38, com os resultados obtidos pelo novo modelo experimental, representados na Figura 26.

A comparação dos resultados demonstra que em ambas as técnicas se verificou sensibilidade à rodagem, que se revelou por um aumento do atrito com o número de passagens realizadas sobre a mesma pista. Contudo, a técnica de medição por vibração parece ser menos sensível a este efeito quando os valores de carga normal foram mais elevados. Esta diferença deve-se ao facto de um teste de medição por vibração implicar várias oscilações sobre a mesma pista de contacto, e, quando a carga normal é suficientemente elevada o atrito tende para um valor estacionário minimizando o efeito da rodagem. Os valores obtidos por ambas as técnicas foram bastante semelhantes o que reforça a validade da técnica agora proposta como uma alternativa viável para medição do atrito em contactos deslizantes.

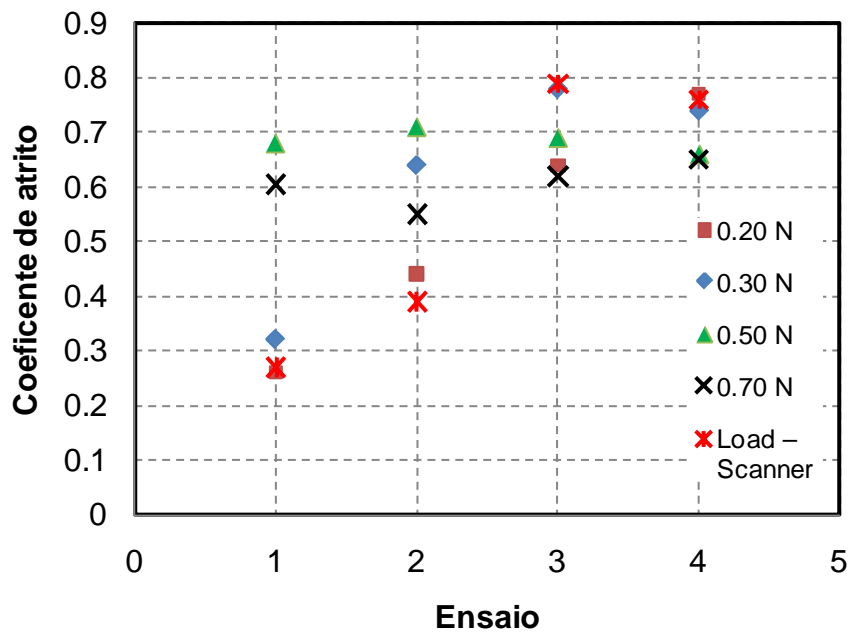


Figura 39. Comparação da evolução e dos valores de atrito obtidos pelo modelo experimental com os obtidos pela técnica *Load-Scanner*; AL2024-AL6082.

5.2. Mecanismos de atrito

A Figura 40 mostra a evolução da topografia das superfícies das amostras, no final dos testes de atrito, do par tribológico AL2024-AL6082 para as diferentes condições de carga.

A Figura 41 a) mostra a topografia da superfície do plano no final do teste de atrito pela técnica *Load-Scanner* ao fim da quarta passagem, do par tribológico AL2024-AL6082. A Figura 41 b) mostra a evolução da força de atrito com o incremento da força normal.

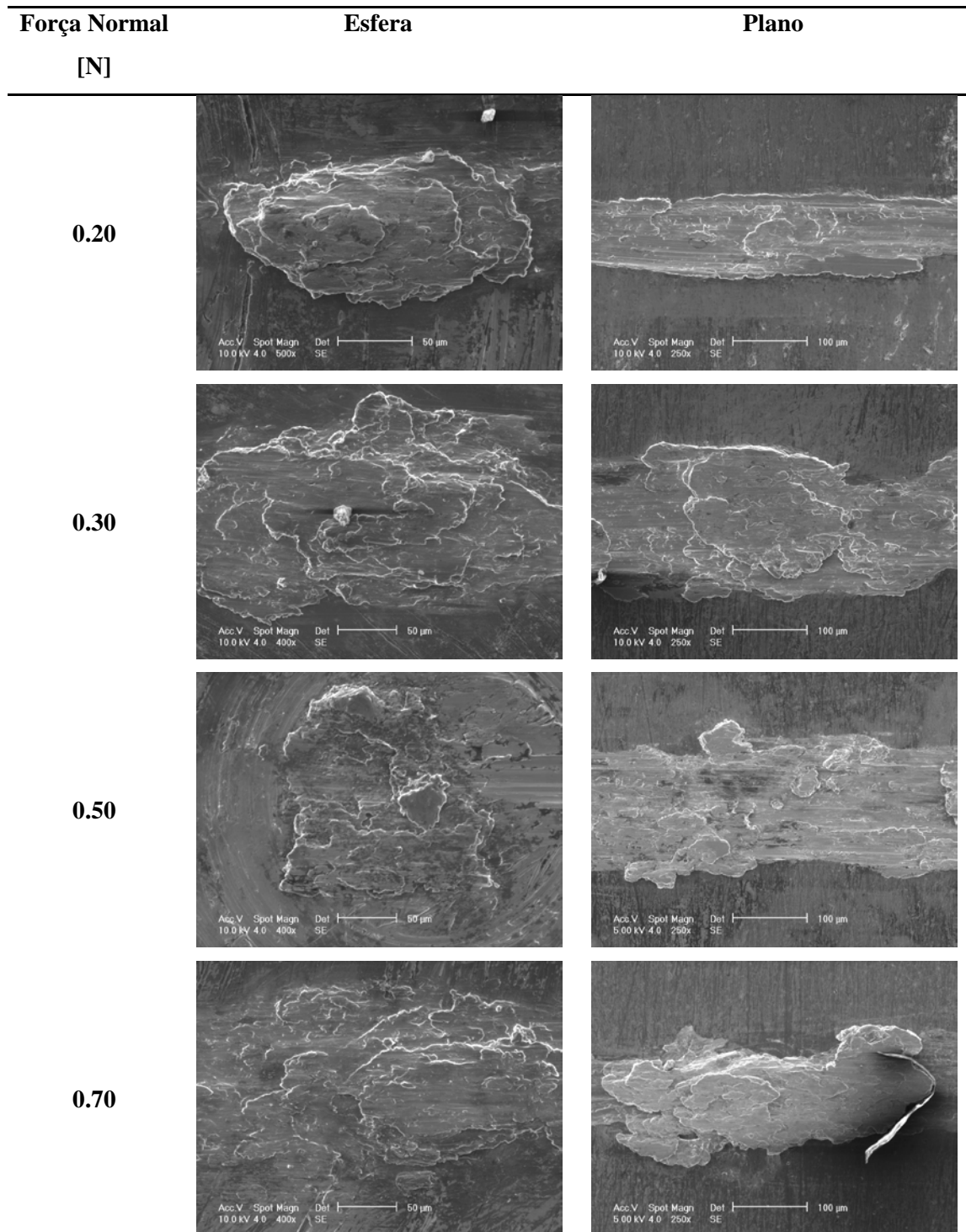


Figura 40. Observação por microscopia electrónica de varrimento da superfície das amostras utilizadas para as diferentes condições de carga, Esfera AL2024 – Plano AL6082.

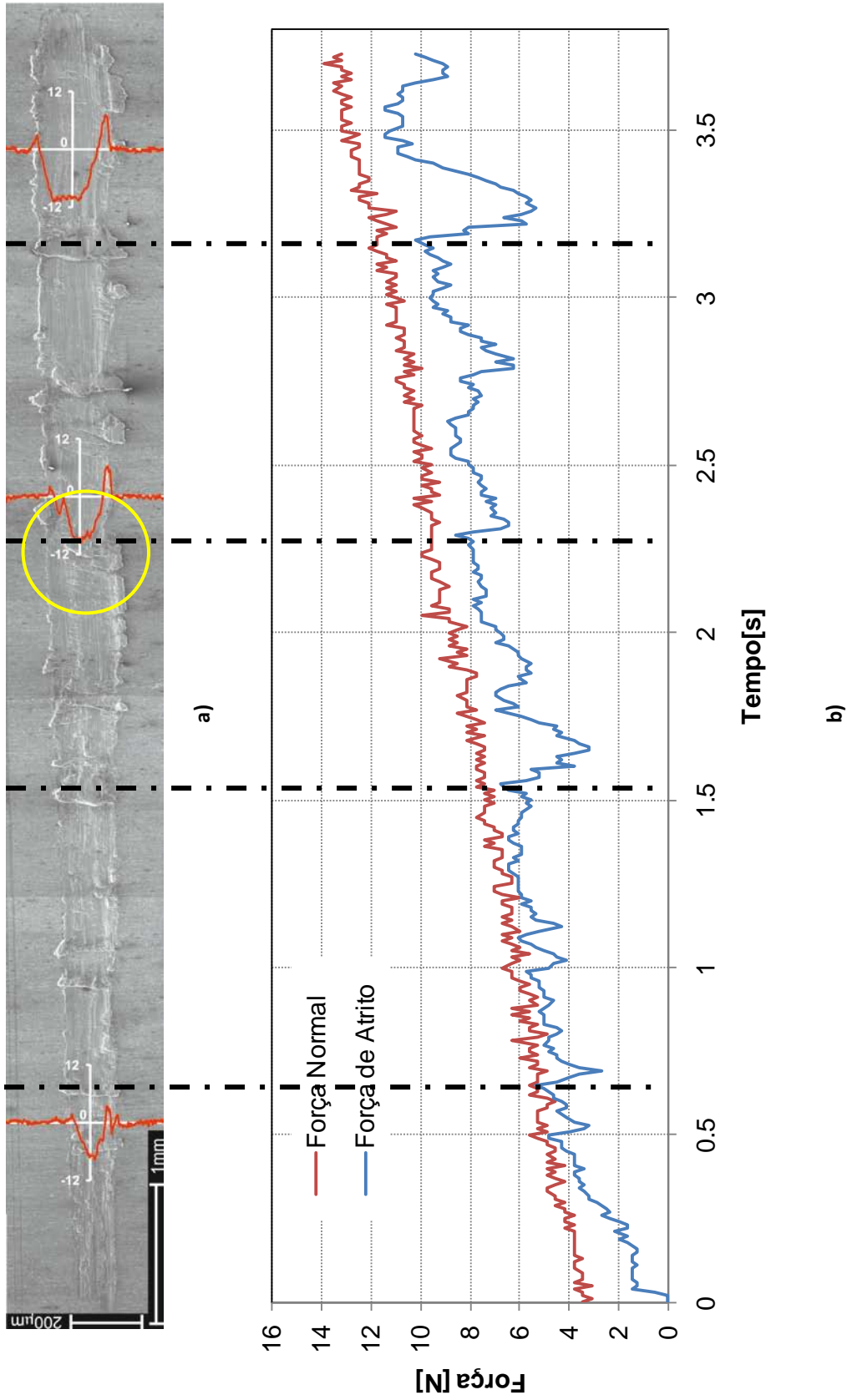


Figura 41. a) Morfologia do plano utilizado na técnica *Load-Scanner* ao fim da 4ª passagem; b) Evolução da força de atrito em função do aumento da força normal, Esfera AL2024 – Plano AL6082.

Em todas as superfícies da Figura 40 e Figura 41, é possível observar a existência de deformação plástica e de transferência de material entre os corpos, provocada pelo sucessivo deslizamento, ou seja, induzida pelo atrito existente entre os corpos. Na Figura 41, é possível observar que sempre que o volume aderente existente na frente da esfera se solta há uma queda localizada da força de atrito, como se vê nos locais identificados pela linha a tracejado. Este comportamento acontece porque o mecanismo de atrito é governado essencialmente pela adesão existente entre as superfícies dos corpos.

A Figura 42 mostra uma ampliação de um pormenor identificado por um círculo sobre a Figura 41. A comparação da morfologia ilustrada na Figura 42 com qualquer pormenor da Figura 40 permite afirmar que, apesar da grandeza das pressões de contacto, a área e o volume serem diferentes, o mecanismo de atrito é o mesmo. Na Figura 41 a), também é possível constatar, como seria de esperar, que à medida que a pressão de contacto aumenta, o volume e a profundidade do desgaste aumentam, como se observa pelos perfis traçados a vermelho na Figura 41.

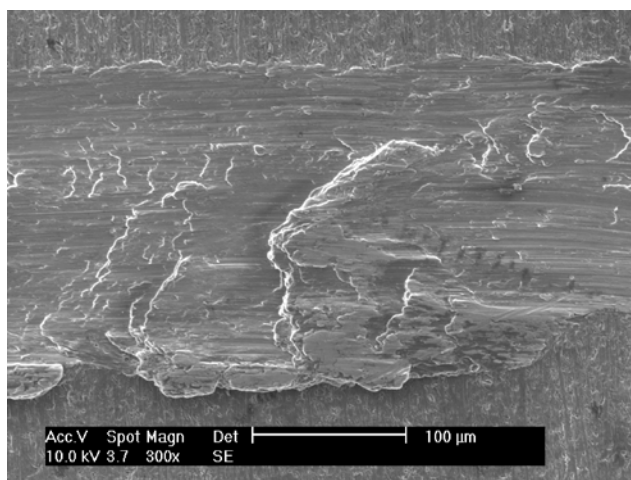


Figura 42. Pormenor a amarelo da Figura 41 a).

6. CONCLUSÃO

Pelo exposto, ao longo da presente dissertação, concluiu-se que a medição do atrito de escorregamento pela avaliação da energia dissipada pelo atrito durante a vibração livre é possível e fácil de aplicar.

A possibilidade de utilizar uma estratégia híbrida, ou seja, a possibilidade de utilizar uma análise analítica e numérica, para determinar as características do sistema, assim como a integração numérica da curva da resposta, é expedita e precisa.

Concluiu-se que a comparação directa dos gráficos deslocamento-tempo, ponto a ponto, utilizando como critério de qualidade o coeficiente de correlação linear de *Pearson*, é prático, fiável e suficientemente preciso, quando comparado com o método do decrescimento de energia utilizado por Rigaud *et al.*, (2010).

O equipamento necessário é simples, pouco dispendioso, fácil de construir e utilizar. As amostras requeridas são pequenas. O tempo total de ensaio, bem como o número necessário de oscilações para a caracterização completa de um par de materiais, é reduzido.

Demonstrou-se que o modelo e a técnica podem ser aplicados a materiais com diferentes comportamentos tribológicos, conduzindo a uma solução unívoca. Todavia, a caracterização de materiais com comportamento viscoelástico requer que seja cuidadosamente analisado o modelo de análise inversa, no sentido de implementar equações não lineares que descrevam o comportamento dinâmico de forma mais precisa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blau, P. J. (2009). "Friction Science and Technology" (2ª Ed.). CRC Press, Inc.
- Budinski, K. G. (2007). "Guide to Friction, Wear, and Erosion Testing". ASTM International.
- Budinski, K. G. (1992). "Laboratory Testing Methods for Solid Friction". In *"Friction, Lubrication, and Wear Technology"* (Vol. 18, pp. 45-58). ASM International Handbook.
- Dicionário da Língua Portuguesa . (2010). Porto Editora.
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (2005). "The Feynman Lectures in Physics" (2ª Ed.). Addison-Wesley.
- G 40 – 01, Standard Terminology relating to Wear and Erosion (ASTM International).
- G 115 - 04, Standard Guide for Measuring and Reporting Friction Coefficients (ASTM International).
- G 99 – 95a. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus (ASTM International, 2000).
- IMF (2011), "World Economic Outlook Database, April 2011". Acedido em 21 de Junho de 2011, em: <http://www.imf.org>
- Ludema, K. C. (2001). "Friction". In B. Bhushan (Ed.), "Modern Tribology Handbook" (Vol. One). CRC Press.
- Ludema, K. C. (1996). "Friction, Wear Lubrication : A Textbook in Tribology". CRC Press, Inc.
- MIT (2011), "Short Programs – Tribology, Friction, and Lubrication ". Acedido em 21 de Junho de 2011, em: http://web.mit.edu/professional/short-programs/courses/designing_tribological_systems.html#notes
- Popov, V. L. (2010). "Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications". Berlin: Springer.

Ramalho, A. (2010). "A reliability model for friction and wear experimental data."

Wear; Volume 269, Issues 3-4, Pages 213-223.

Rigaud, E., Perret-Liaudet, J., Belin, M., Joly-Pottuz, L., & Martin, J. M. (2010). "An original dynamic tribotest to discriminate friction and viscous damping".

Tribology International , 43, 320–329.