



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Desenvolvimento de modelo para previsão de desgaste em contactos roda/carril de veículos ferroviários.

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

Autor

André Roberto Soares

Orientador

Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho

Júri

Presidente	Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa Professor Associado da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Luís Manuel de Jesus Coelho Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria
Orientador	Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho Professor Associado da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2014

"Uma pessoa inteligente resolve um problema, um sábio previne-o."

Albert Einstein

Aos meus pais.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta representa o culminar de um percurso académico. É com enorme gratidão que presto reconhecimento a todas as pessoas/entidades que me sustentaram ao longo deste percurso e que tornaram possível a realização desta dissertação. A enorme satisfação que marca o alcançar desta última etapa, é partilhada com um agradecimento especial a algumas pessoas.

Primeiramente, agradeço ao Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho, meu orientador, por toda a sua dedicação, disponibilidade, apoio e motivação transmitida que tornaram possível a realização desta dissertação. Os valiosos conhecimentos e valores transmitidos marcaram o meu percurso académico.

Ao Miguel Esteves, pelo acompanhamento nos últimos meses e por toda a entrega e interesse demonstrados na realização do trabalho.

A todos os meus amigos, com os quais partilhei o meu percurso académico, por todo o apoio demonstrado, pelos ensinamentos transmitidos, e acima de tudo por fazerem parte desta fase importante da minha vida.

Aos colegas do *Bunker*, por todo o apoio transmitido, por toda a entrega e ajuda com que me presentearam nos últimos meses, e por todos os momentos de companheirismo que partilhámos.

E finalmente, aos meus pais, por esta oportunidade única, por todos os ensinamentos, conhecimentos e valores transmitidos, sem dúvida que sem eles tudo isto não seria possível. O sucesso é partilhado com as pessoas mais importantes.

Resumo

Atualmente, a manutenção assume um carácter de extrema importância, não só a nível económico mas também a nível da segurança. Este tema associado ao setor ferroviário elucida o objetivo da presente dissertação, inserida num projeto que em vista este tema. Assim, o desenvolvimento de uma ferramenta de previsão de desgaste no contacto roda/carril surge como o objetivo principal do estudo realizado. De salientar que o presente estudo dá seguimento a estudos já realizados no âmbito do projeto “WearWheel”.

Primeiramente foi realizada uma cadeia de ensaios de atrito e desgaste com contacto rolamento/escorregamento de provetes obtidos de uma roda de um veículo ferroviário e de um carril da ferrovia. Os ensaios foram executados numa máquina de discos a fim de simular o contacto roda/carril presente num troço reto da ferrovia.

Com base na análise numérica dos resultados alcançados nos ensaios rolamento/escorregamento, foi desenvolvido um modelo apto a realizar a previsão da taxa específica de desgaste, consoante as condições de funcionamento impostas. Para este modelo foram considerados três parâmetros determinantes para o desgaste – velocidade linear, pressão de contacto e percentagem de escorregamento – sobre os quais se determinaram funções de peso que pudessem traduzir a sensibilidade da variação de cada um deles na taxa específica de desgaste. Estas funções de peso corrigem o valor da taxa específica de desgaste standard, adaptando-o às condições de contacto pretendidas.

Comparados os valores obtidos experimentalmente com os valores obtidos pelo modelo de previsão considerando a influência de cada função de peso referente aos três parâmetros já identificados, foi possível verificar uma boa aproximação dos resultados experimentais e teóricos, que atestam a fiabilidade do método desenvolvido.

Palavras-chave: Atrito, Carril, Desgaste, Mecanismos de Desgaste, Modelo de Previsão de Desgaste, Roda, Rolamento/escorregamento.

Abstract

Currently, maintenance assumes an extremely important character, not only on an economic matter, but also for safety issues. This theme, associated to the railroad sector, clears a present objective for this thesis, inserted in a project to be discussed forwardly. Having this in mind, the development of a prevision tool of wear in the contact between wheel/rail, appears as the main objective of study. It is important to remind that this project is a continuation of a past study named “WearWheel”.

At a first approach, a series of trials of wear and friction were performed with the rolling-sliding contact of specimens obtained on a wheel of a train wheel and of a rail track. The tests were executed of a disk machine with the purpose of simulating the contact between wheel and rail, present on a segment of a rail track.

Based on the numeric analyses of the achieved results of the specimens rolling-sliding, a model was developed to create the prevision of the specific wear rate, having in consideration the function conditions imposed. For the model imposed, three parameters were considered to me determinant for the wear – linear velocity, contact pressure and slide percentage – followed by the function determination of the weight that could be traduced in variation sensibility of each one of them on the specific wear. The weight functions correct the standard wear rate, adapting them to the contact conditions pretended.

After comparing the obtained values with the ones obtained by the prevision model, considering the influence of the weight function referred by the three parameters already identified, it was possible to verify a good approximation of the experimental and theoretical values that give the liability of the method developed.

Keywords Friction, Rail, Wear, Wear Mechanisms, Predictive Wear Model, Wheel, Rolling-Sliding.

Índice

Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	ix
Simbologia e Siglas	x
Simbologia.....	x
Siglas	xi
1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Contacto roda/carril	4
2.2. Materiais constituintes da roda e do carril	4
2.3. Mecanismos de desgaste	5
2.3.1. Abrasão	5
2.3.2. Adesão	6
2.3.3. Desgaste por contacto de rolamento	6
2.4. Corrugação	7
2.5. Encruamento	8
2.6. Mapas de desgaste	8
2.7. Estudos anteriores	9
3. Métodos experimentais, procedimentos e materiais.....	12
3.1. Provetes e geometria de contacto.....	12
3.2. Equipamento utilizado	15
3.3. Ensaíos realizados.....	17
3.4. Materiais	20
3.5. Mecanismos de desgaste e análises complementares	21
4. Apresentação e discussão de resultados	23
4.1. Ensaíos de rolamento/escorregamento.....	23
4.1.1. Influência da velocidade linear.....	23
4.1.2. Influência da pressão de contacto.....	27
4.1.3. Influência da % de escorregamento.....	32
4.2. Análises complementares	37
4.2.1. Micrografias e dureza	38
5. Método de previsão de desgaste	44
5.1. Fatores de Sensibilidade	45
5.1.1. Fatores de velocidade linear	46
5.1.2. Fatores de pressão.....	47
5.1.3. Fatores de escorregamento	48
5.2. Verificação do método	49
5.2.1. Velocidade linear.....	49
5.2.2. Pressão de contacto.....	51
5.2.3. % de Escorregamento	52

5.2.4. Erro de previsão.....	53
6. Conclusões.....	55
Referências Bibliográficas.....	58
ANEXO A	60
ANEXO B	61
ANEXO C	62
ANEXO D	63
ANEXO E.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Modelo de desgaste para aferição do coeficiente de desgaste. [Jendel,2002]	9
Figura 3.1. Secção da roda com esquema de obtenção dos provetes.	13
Figura 3.2. Secção de carril e secções após o corte.	13
Figura 3.3. Secção de carril com esquema de obtenção dos provetes.	14
Figura 3.4. Geometria do provete representativo da roda.	14
Figura 3.5. Geometria do provete representativo do carril.	15
Figura 3.6. Equipamento de realização dos ensaios.	16
Figura 3.7. Esquema de contacto roda/carril em condições de rolamento/escorregamento.	17
Figura 3.8. Micrografia de material do carril.	21
Figura 3.9. Micrografia de material da roda.	21
Figura 4.1. Perfis de desgaste dos provetes da roda para as velocidades testadas.	24
Figura 4.2. Volume desgastado dos dois elementos para as velocidades estabelecidas.	25
Figura 4.3. Taxa específica de desgaste da roda e do carril em função das velocidades estudadas.	25
Figura 4.4. Taxa energética de desgaste da roda e do carril, em função da velocidade linear.	26
Figura 4.5. Coeficiente de atrito médio em função da velocidade linear.	26
Figura 4.6. Trabalho específico da força de atrito na roda e no carril para as velocidades estudadas.	27
Figura 4.7. Volume de desgaste da roda (preto) e carril (verde) em função da energia dissipada por atrito.	27
Figura 4.8. Perfis de desgaste em função da pressão de contacto.	28
Figura 4.9. Volume desgastado na roda e no carril em função da pressão de contacto.	29
Figura 4.10. Taxa específica de desgaste da roda e do carril em função da pressão de contacto.	30
Figura 4.11. Taxa energética de desgaste da roda e do carril em função da pressão de contacto.	30
Figura 4.12. Coeficiente de atrito médio em função da pressão de contacto.	31
Figura 4.13. Coeficiente de atrito médio em função da pressão de contacto.	31
Figura 4.14. Volume de desgaste da roda (preto) e carril (verde) em função da energia dissipada por atrito.	32

Figura 4.15. Perfis de desgaste dos provetes representativos da roda.	33
Figura 4.16. Volume desgastado na roda e no carril em função da percentagem de escorregamento.	34
Figura 4.17. Taxa específica de desgaste da roda e do carril em função das % de escorregamento estudadas.	35
Figura 4.18. Taxa energética de desgaste da roda e do carril em função da % de escorregamento.	35
Figura 4.19. Evolução do coeficiente de atrito médio com a % de escorregamento.	36
Figura 4.20. Trabalho específico da força de atrito na roda e no carril, em função da % de escorregamento.	37
Figura 4.21. Volume de desgaste da roda (preto) e carril (verde) em função da energia dissipada por atrito.	37
Figura 4.22. Evolução da dureza com a profundidade para o par roda/carril, do ensaio: 0,75m/s;500MPa;1%.	38
Figura 4.23. Micrografia do provete representativo da zona de contacto do carril, do ensaio: 0,75m/s;500MPa;1%.	39
Figura 4.24. Micrografia do provete representativo da zona de contacto da roda, do ensaio: 0,75m/s;500MPa;1%.	39
Figura 4.25. Evolução da dureza com a profundidade para o par roda/carril, do ensaio: 1 m/s;600MPa;1%.	40
Figura 4.26. Micrografia do provete representativo da zona de contacto do carril, do ensaio: 1m/s;600MPa;1%.	41
Figura 4.27. Micrografia do provete representativo da zona de contacto da roda, do ensaio: 1m/s;600MPa;1%.	41
Figura 4.28. Evolução da dureza com a profundidade para o par roda/carril, do ensaio: 1 m/s;500MPa;0,2%.	42
Figura 4.29. Micrografia do provete representativo da zona de contacto do carril, do ensaio: 1m/s;500MPa;0,2%.	43
Figura 4.30. Micrografia do provete representativo da zona de contacto da roda, do ensaio: 1m/s;500MPa;0,2%.	43
Figura 5.1. Fator de velocidade linear para a roda.	46
Figura 5.2. Fator de velocidade linear para o carril.	46
Figura 5.3. Fator de pressão para a roda.	47
Figura 5.4. Fator de pressão para o carril.	48
Figura 5.5. Fator de escorregamento para a roda.	49
Figura 5.6. Fator de escorregamento para a roda.	49
Figura 5.7. Previsões da taxa específica de desgaste comparativamente aos valores dos ensaios, em função da velocidade linear, na roda.	50

Figura 5.8. Previsões da taxa específica de desgaste comparativamente aos valores dos ensaios, em função da velocidade linear, no carril.	51
Figura 5.9. Previsões da taxa específica de desgaste comparativamente aos valores dos ensaios, em função da pressão de contacto, na roda.	52
Figura 5.10. Previsões da taxa específica de desgaste comparativamente aos valores dos ensaios, em função da pressão de contacto, no carril.	52
Figura 5.11. Previsões da taxa específica de desgaste comparativamente aos valores dos ensaios, em função da % de escorregamento, na roda.	53
Figura 5.12. Previsões da taxa específica de desgaste comparativamente aos valores dos ensaios, em função da % de escorregamento, no carril.	53
Figura A. 1. Balança de precisão <i>A&D GH-202</i>	60
Figura B. 1. Durómetro <i>Struers Duramin</i>	61
Figura C. 1. Microscópio ótico <i>Zeiss Axiotech</i>	62
Figura D. 1. Microscópio ótico <i>Nikon Stereo Photo SMZ-10</i>	63
Figura E. 1. Rugosímetro <i>Mitutoyo SJ-500</i>	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Combinação de ensaios fazendo variar a velocidade linear dos provetes.	18
Tabela 3.2. Combinação de ensaios fazendo variar a pressão de contacto.	18
Tabela 3.3. Combinação de ensaios fazendo variar a percentagem de escorregamento	18
Tabela 3.4. Relação entre a percentagem de escorregamento e as dimensões dos provetes	19
Tabela 3.5. Composição química da roda e do carril. [Sadio, 2013].....	20
Tabela 4.1. Volume de desgaste dos elementos roda e carril através de dois métodos distintos.	24
Tabela 4.2. Volume de desgaste dos elementos roda e carril através de dois métodos distintos.	29
Tabela 4.3. Volume de desgaste dos elementos roda e carril através de dois métodos distintos.	33
Tabela 5.1. Erros de previsão referente aos elementos do par roda/carril.....	54

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

E_i – Módulo de Elasticidade do material i

E^* – Módulo de Elasticidade equivalente das duas superfícies de contacto

F – Força aplicada

F_a – Força de atrito

F_N – Força normal no ponto de contacto

H – Dureza do material

HR – Humidade relativa

HV – Dureza Vickers

k – Taxa específica de desgaste

k_e – Taxa energética de desgaste

K – Coeficiente de desgaste

l – Espessura do provete estacionário

N – Força normal

N_1 – Número de dentes da roda dentada inferior

N_2 – Número de dentes da roda dentada superior

σ_c – Tensão de compressão máxima na área de contacto

q – Carga linearmente distribuída

r_i – Raio do provete i

R – Raio médio dos provetes

V – Volume de desgaste

ν_i – Coeficiente de *Poisson* do objeto i

w_i – Velocidade de rotação do provete i

W_a – Trabalho específico da força de atrito

x – Distância de escorregamento

Δt – Intervalo de tempo (1 segundo)

Siglas

ASTM – American Society for Testing and Materials

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

MIT – Massachusetts Institute of Technology

1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação surge como continuação do estudo realizado por Sadio, D. (2013), “Atrito e desgaste em contacto roda/carril de veículos ferroviários com movimento rolamento/escorregamento e escorregamento puro”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, e está inserida num projeto financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia denominado “*WearWheel*”, que engloba diversas entidades, principalmente o IDMEC do Instituto Superior Técnico, a EMEF, a ALSTOM e o CEMUC da Universidade de Coimbra.

Foi durante a revolução industrial, que teve início, em meados do século XVIII, no Reino Unido, que surgiu um novo meio de transporte, rápido e seguro, o veículo ferroviário. Foi apenas o despoletar de um setor que atualmente se mostra bastante desenvolvido.

A constante evolução deste meio de transporte inspira novos cuidados relativamente ao ramo da manutenção. A necessidade de uma manutenção eficaz é evidente. Uma das operações de manutenção determinante para a segurança e conforto do transporte ferroviário é a reperfilagem. A reperfilagem consiste nas operações de maquinagem realizadas com o objetivo de refazer a geometria das rodas e dos carris após a sua alteração induzida por desgaste. Esta operação inclui a medição do perfil da roda e posterior comparação aos valores de referência de modo a verificar a necessidade de executar uma operação de maquinagem que repõe a geometria adequada para secção transversal do aro da roda. A extensão do intervalo de reperfilagem e a capacidade de previsão do período limite para a sua realização possibilitará a minimização dos custos a ela associados.

Em Portugal, atualmente, existe uma empresa que executa as operações de reperfilagem, a EMEF. Porém, em todo o território nacional, apenas existem dois locais onde se podem realizar estes procedimentos, sem desmontagem dos eixos, o que acarreta elevados custos monetários e uma logística de elevado grau de dificuldade.

A fim de evitar operações de reperfilagem desnecessárias e inoportunas, o projeto “*WearWheel*” tem por objetivo desenvolver uma ferramenta numérica que seja capaz

de prever o desgaste sofrido pelos veículos ferroviários em função das condições de serviço, de modo a proceder à reperfilagem correta e eficaz.

Assim, o desenvolvimento de um modelo que traduza o desgaste no contacto roda/carril, considerando os parâmetros de contacto determinantes - velocidade linear, pressão de contacto e percentagem de escorregamento-, caracteriza o objetivo do presente estudo.

Para concretizar este objetivo, a atual dissertação está dividida em seis capítulos.

No primeiro capítulo é feito um enquadramento do tema e objetivo da dissertação.

O segundo capítulo, revisão bibliográfica, contém os conceitos fundamentais à compreensão da dissertação, tal como têm sido objeto de publicação recente.

O terceiro capítulo engloba a metodologia e os procedimentos que foram aplicados neste estudo.

No quarto capítulo, os resultados dos testes realizados, são apresentados e discutidos.

No quinto capítulo, é apresentado o método de previsão de desgaste, proposto no âmbito da tese de mestrado de Duarte Sadio, Sadio, D. (2013), incluindo as melhorias obtidas com os resultados dos ensaios agora realizados.

No sexto e último capítulo, são expostas as conclusões do presente estudo e são ainda ponderadas sugestões para futuros trabalhos que estejam no seguimento deste.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em meados do século XVIII, assinala-se uma época marcante para a indústria espalhada pelo globo. Em pleno Reino Unido, é iniciado um acontecimento determinante de profundas transformações, não só naquela região, mas em todo o Mundo, a revolução industrial. A incansável procura de um meio de transporte rápido, eficiente e seguro, que permitisse transportar não só mercadorias mas também passageiros, aliada a uma expansão industrial, dá origem ao desenvolvimento de um novo meio de transporte, o transporte ferroviário.

Richard Trevithick, produziu em 1804, o modelo ferroviário, que mais se aproxima ao usado atualmente. A locomotiva projetada permitia o transporte de mercadorias e passageiros, tal como tinha sido idealizado em anos anteriores. Efetivamente, a evolução do setor ferroviário assumiu largas proporções aquando da revolução industrial, e nos dias de hoje, o contínuo avanço ferroviário é evidente.

O movimento dos comboios é feito pelas linhas férreas, sendo estas constituídas por dois carris dispostos paralelamente e a uma distância chamada de bitola. Nos tempos que correm, existem inúmeras linhas férreas dispersas por todo o mundo, onde circulam comboios de variadas características, confirmando assim a progressão constante deste setor.

A evolução do meio ferroviário acarreta novas responsabilidades, nomeadamente a manutenção dos equipamentos. Impreterivelmente, surge a necessidade de estudar os mecanismos de desgaste presentes e a sua evolução temporal no contacto roda/carril, a fim de garantir uma manutenção atempada e eficiente. Como já tinha sido referido, uma manutenção conveniente possibilita uma redução dos custos associados e um aumento da segurança dos equipamentos e dos utilizadores.

Na presente dissertação são estudados os mecanismos de desgaste verificados no contacto roda/carril e a sua evolução temporal, com o objetivo de virem a integrar um programa que permita prever os intervalos de manutenção, com um modelo de previsão de desgaste no contacto em estudo, permitindo assim identificar os momentos temporais em que devem ser realizadas as operações de reperfilagem.

O presente capítulo abrange os conceitos essenciais para a elaboração desta dissertação, apresentados de forma breve, visto já terem sido abordados pormenorizadamente nos estudos elaborados por Marta, P. (2012), “Estudo do desgaste em contactos roda/carril em veículos ferroviários”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, e por Sadio, D. (2013), “Atrito e desgaste em contacto roda/carril de veículos ferroviários com movimento rolamento/escorregamento e escorregamento puro”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.

2.1. Contacto roda/carril

Em condições normais de contacto, as rodas motoras dos veículos ferroviários assumem uma velocidade tangencial ligeiramente maior que a velocidade de avanço da composição, resultando por isso que o contacto se faz com algum escorregamento.

Quando o comboio percorre um trajeto reto, a roda entra em contacto com a cabeça do carril, verificando-se essencialmente rolamento. Neste caso o contacto ocorre na cabeça do carril dando origem fundamentalmente a fenómenos de fadiga de contacto. Por outro lado, quando a circulação do comboio é feita num trajeto curvo, além do contacto na cabeça do carril, constata-se escorregamento puro provocado por um segundo ponto de contacto entre a falange da roda e a zona lateral do carril. Nesta segunda área verificam-se fenómenos de adesão devido ao escorregamento puro, sobreposto a desgaste por abrasão. (Olofsson et al., 2006)

Os danos provocados no par roda/carril são influenciados pelas condições de contacto entre roda e carril nomeadamente pela magnitude das forças de contacto.

2.2. Materiais constituintes da roda e do carril

A resistência ao desgaste e a resistência à deformação plástica são duas das características fundamentais que devem estar contempladas nos materiais constituintes da roda e do carril. Contudo, a seleção destes materiais é também condicionada pelos custos associados ao material.

Atualmente, os componentes roda e carril, ainda são produzidos na sua maioria em aços carbono-manganês. Estes dois elementos fornecem ao material a dureza e resistência ao desgaste adequadas.

A composição dos materiais constituintes do carril apresenta uma percentagem elevada de carbono (0,75%) e manganês (0,9%). Estes materiais, de estrutura ferrítico-perlítica, são geralmente obtidos por laminagem a quente e na maioria dos casos utilizam-se após recozimento (Bhushan, 2013).

Na composição das rodas, geralmente, são usados aços-carbono. Estes aços apresentam normalmente até 1,65% de manganês e 0,60% de silício, com reduzidos níveis de outros elementos. Os aços referidos podem ser classificados de médio carbono quando contemplam valores de carbono entre 0,30% e 0,60% e valores de manganês entre 0,60% e 1,65%, ou então, aços de alto teor em carbono, onde a percentagem de carbono varia entre 0,60% e 1,00% e a percentagem de manganês está contida entre 0,30% e 0,90%. Na maioria dos casos, os aços são usados com estrutura perlítica, podendo por vezes existir, em aços de baixo/médio carbono, uma fase ferrítica. Nestes casos, a resistência ao desgaste é garantida pelo endurecimento por deformação facilitado pelos teores significativos de carbono e manganês. Em algumas composições podem usar-se rodas em aços temperados e revenidos (Clarke, 2008).

2.3. Mecanismos de desgaste

Os mecanismos de desgaste podem ser classificados de várias formas visto estarem relacionados com diferentes parâmetros. Assim, é impraticável uma classificação única dos mecanismos de desgaste. Com intuito de familiarizar o leitor com os conceitos, na presente secção, faz-se uma breve revisão dos mecanismos de desgaste com base na classificação apresentada por J. Halling (Halling, 1975).

2.3.1. Abrasão

A abrasão é caracterizada como o mecanismo de desgaste que ocorre devido à existência de pequenas partículas que apresentam dureza superior à do material afetado pelo desgaste abrasivo. A origem destas partículas abrasivas está relacionada com o movimento relativo entre dois corpos. Este fenómeno também pode ser verificado no movimento relativo entre duas superfícies, em que uma delas apresenta uma dureza e rugosidade superiores.

Existem dois tipos de abrasão: abrasão a dois e abrasão a três corpos que sustentem entre si movimento relativo. No primeiro caso, respetivamente, o desgaste abrasivo ocorre devido às pequenas partículas que se encontram conectadas a uma das superfícies. Por sua vez, no segundo caso, as partículas abrasivas movimentam-se livremente entre as duas superfícies com movimento relativo.

2.3.2. Adesão

O fenómeno chamado adesão ocorre quando se verifica um deslizamento entre duas superfícies rugosas de materiais que apresentem compatibilidade metalúrgica. Elevadas tensões locais de contacto, que surgem devido à existência de rugosidade superficial, causam deformações plásticas e aumentam a temperatura de contacto, facilitando a formação de soluções sólidas que estão na génese do fenómeno de gripagem.

O deslizamento entre as superfícies leva ao desaparecimento da película de óxidos que reveste os metais. Assim, o contato direto entre os átomos das duas superfícies é estabelecido. Posto isto, uma espécie de fusão superficial pode ser desencadeada por uma pressão normal.

A progressiva transmissão de partículas entre as superfícies é provocada pela existência de movimento relativo, o que gera formação de detritos pela quebra das ligações.

O aumento do coeficiente de atrito surge relacionado ao mecanismo de desgaste por adesão, o que gera temperaturas mais elevadas na superfície, verificando-se assim a formação de óxidos (Fe_2O_3 e Fe_3O_4) de elevada dureza. A abrasão pode surgir agregada à adesão devido aos óxidos referidos anteriormente.

2.3.3. Desgaste por contacto de rolamento

O desgaste provocado por este tipo de mecanismo é resultante do contacto entre duas superfícies, sendo estas superfícies alvo de um rolamento contínuo. Posto isto, o desgaste pode ser verificado em qualquer uma das superfícies. Nos contactos do tipo hertziano, a tensão tangencial máxima ocorre abaixo da superfície de contacto, enquanto que a tensão normal máxima ocorre à superfície e a jusante do contacto. Pelo exposto, em função do comportamento elasto-plástico dos materiais, os contactos com rolamento originam deformação subsuperficial e *pitting*, ou propagação superficial e *spalling*.

Os sistemas, que têm movimentos de rolamento/escorregamento, são os principais lesados por este tipo de mecanismo de desgaste.

Habitualmente, em fases iniciais, as falhas são praticamente indetetáveis na superfície visto terem tendência a desenvolverem-se no interior do material. Ao atingirem a superfície, geram-se imperfeições, o que provoca instantaneamente a perda de funcionalidade ou eficiência do material em questão. De salientar o facto de este tipo de desgaste poder estar presente durante inúmeros ciclos sem que se presencie qualquer aparecimento de partículas.

2.4. Corrugação

Após serem abordados os mecanismos de desgaste presentes no estudo, são apresentados fenómenos, não menos importantes, que afetam o setor ferroviário.

Primeiramente é introduzido o conceito de corrugação. Este fenómeno, verificado nos carris, induz nas ferrovias vibrações e ruído, que se confirmam prejudiciais para o setor. As vibrações sentidas nos carris despoletam uma variação nas forças de contacto, e conseqüentemente, desgaste no contacto roda-carril. A corrugação deve-se à sobreposição do desgaste resultante de movimentos de rolamento-escorregamento com variação cíclica das forças de contacto e dá origem a um desgaste irregular da cabeça do carril.

Existem seis tipos de corrugação, classificados com base nas suas características e mecanismos. A mais preocupante para o setor ferroviário é designada por corrugação de pequeno comprimento de onda. Este tipo de corrugação compreende comprimentos de onda entre 25 e 80 mm. De notar o elevado ruído e desgaste presenciado no carril (Wu et al.,2005; P. A. Meehan et al., 2005).

A corrugação é minimizada com uma gestão adequada da tração, mantendo a percentagem de escorregamento em valores adequados ao tipo de veículos e de trajetos. Após a sua ocorrência, deve ser realizada uma manutenção apropriada e eficaz nos elementos do sistema, particularmente o carril, e melhorar o controlo de tração para dificultar o seu reaparecimento.

2.5. Encruamento

Outro fenómeno que condiciona o setor ferroviário é o encruamento. O encruamento induz um aumento das propriedades mecânicas, resultante da deformação plástica. Este fenómeno é verificado no corrente estudo visto que no contacto roda/carril a deformação da microestrutura leva um aumento da dureza na superfície do material.

O encruamento dá origem a um aumento de dureza, o que por si só resulta num incremento da resistência ao desgaste. Todavia, quando o contacto ocorre com baixo deslizamento e são preponderantes as condições de fadiga de contacto, a redução da tenacidade aumenta a incidência das fissuras subsuperficiais.

2.6. Mapas de desgaste

Com a finalidade de dar resposta à evolução sistemática do setor ferroviário, mantendo elevados níveis de conforto, segurança e competitividade, surge a necessidade de realizar cada vez mais uma manutenção económica e eficiente. Este fator leva à procura de um método que possa prever o desgaste presente no rasto e na falange da roda, uma vez que o perfil das rodas assume uma preponderância enorme no desempenho do veículo ferroviário.

Em 1953, Archard publicou um modelo de desgaste simples e fácil de implementar. Este modelo, já relativamente antigo, é dos mais usados no setor ferroviário e está dependente de variáveis que são habitualmente conhecidas. O modelo propõe uma relação entre o volume de desgaste e as variáveis: distância de escorregamento e força normal, traduzida pela equação 2.1.

$$\frac{V_W}{D} = K \times \frac{N}{H} \quad (2.1)$$

Sendo V_W , o volume de desgaste [m^3], D a distância de escorregamento [m], N a força normal [N], H a dureza do material [N/m^2] e K o coeficiente de desgaste.

O coeficiente de desgaste, K , é um valor obtido experimentalmente e ilustra a probabilidade de formação de uma partícula de desgaste.

Hoje em dia é também utilizado um modelo derivado de Archard é utilizado que se encontra representado na equação 2.2. (Czichos, 2000)

$$V_W = k \times N \times D \quad (2.2)$$

A derivação do modelo original de Archard compreende a incorporação do efeito da dureza do material, H , no coeficiente de desgaste, k . A evolução mostra que o desgaste não se encontrava apenas dependente da distância e da força normal.

No ano de 2002, Thomas Jendel elabora um estudo com o intuito de prever o desgaste nos perfis das rodas, através de uma ferramenta que permitisse realizar a previsão da evolução do desgaste em função das condições de serviço. No estudo foi usado o modelo derivado de Archard. Jendel pretendia simular através de ensaios, realizados em máquinas *pin-on-disk* e *disk-on-disk*, a realidade de um veículo ferroviário confrontado com as diferentes condições a que é exposto diariamente. Neste estudo identificaram-se como variáveis determinantes do coeficiente de desgaste a pressão de contacto e a velocidade de escorregamento.

A evolução do coeficiente de desgaste em função da pressão de contacto e da velocidade de escorregamento é ilustrada na Figura 2.1.

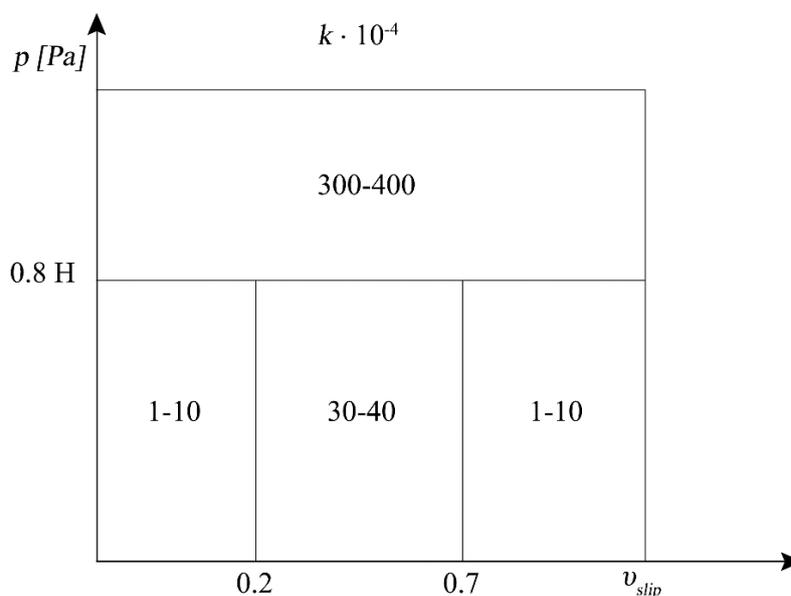


Figura 2.1. Modelo de desgaste para aferição do coeficiente de desgaste. [Jendel,2002]

2.7. Estudos anteriores

A presente dissertação surge no seguimento de estudos realizados anteriormente no DEM, com o intuito de alcançar um método que possa prever o desgaste no contacto roda/carril de veículos ferroviários. Com base numa política de manutenção adequada e

eficaz a realizar sobre os transportes ferroviários, pretende-se prever qual o instante mais adequado para executar de forma correta a reperfilagem das rodas destes veículos.

A primeira fase do projeto foi iniciada com o estudo realizado por Marta, P. (2012).Primeiramente, recorrendo a materiais semelhantes aos utilizados nos componentes das rodas dos veículos ferroviários e dos carris constituintes das ferrovias, realizaram-se ensaios de rolamento/escorregamento e escorregamento puro, a fim de estudar o comportamento tribológico e identificar as principais variáveis que condicionavam a evolução do desgaste.No referido estudo, analisaram-se três parâmetros com o objetivo de observar a influência de cada um deles: velocidade linear, pressão de contacto e percentagem de escorregamento. Estes parâmetros sofreram variações nos diferentes ensaios, tendo em conta o intervalo admissível de estudo de cada um.

No entanto, algumas debilidades foram avistadas nestas simulações. O facto de o material usado na obtenção dos provetes não ser o usado atualmente no setor ferroviário, afasta o estudo da realidade. De salientar que os parâmetros foram estudados para diferentes valores, que possibilitaram a determinação de intervalos adequados de valores a assumir pelos parâmetros em estudos futuros.

Assim, conseqüentemente, surgiu o trabalho desenvolvido por Sadio, D. (2013). Neste último estudo, a procura do método de previsão de desgaste, definido inicialmente, sofreu avanços que se mostraram fundamentais para a progressão da investigação. Os materiais usados inicialmente, foram neste estudo, substituídos por materiais provenientes de uma roda e de um carril, cedidos pela CP e pela REFER. Por sua vez, foram executadas simulações mais aproximadas da realidade. Os resultados obtidos nos ensaios tribológicos serviram como base para as conclusões do estudo e contribuem positivamente para a determinação do método de previsão de desgaste.

Contudo, o número limitado de ensaios realizados fragiliza o método desenvolvido. Assim, a necessidade de tornar a ferramenta de previsão mais robusta, leva a que mais ensaios sejam realizados a fim de reduzir o erro das várias funções de peso usadas pelo método.

A presente dissertação procura dar resposta a estas lacunas com o objetivo de melhorar a fiabilidade do método de previsão. Sendo assim, para a realização de ensaios rolamento/escorregamento foram selecionados valores a adotar pelos três parâmetros, definidos inicialmente. Estes valores foram atribuídos após uma análise cuidada dos

resultados do estudo anterior. Entendendo-se que o domínio de cada uma das variáveis estava de acordo com as limitações do equipamento experimental disponível, valores intermédios dos ensaios já realizados foram assumidos e testados.

É de esperar que a fiabilidade do método de previsão de desgaste aumente visto a amostra de resultados ser mais extensa, permitindo redefinir as funções de peso das diferentes variáveis.

3. MÉTODOS EXPERIMENTAIS, PROCEDIMENTOS E MATERIAIS

O corrente capítulo tem como finalidade expor os métodos experimentais e procedimentos, utilizados no presente estudo, os materiais aos quais se recorreu aquando da realização dos ensaios de rolamento/escorregamento e os parâmetros relacionados com o processo de desgaste.

Estudos anteriores serviram de base para os ensaios tribológicos realizados, onde se pretendia recriar em laboratório, o contacto roda/carril, a fim de identificar e analisar os parâmetros que condicionam o desgaste sofrido por ambos os elementos. As variáveis em questão permitem posteriormente uma análise mais conclusiva da influência de cada um deles no desgaste final originado.

De notar, que a escolha acertada e coerente das variáveis condicionantes é de extrema importância, pois as conclusões a serem retiradas terão como base os resultados obtidos nos ensaios tribológicos.

3.1. Provetes e geometria de contacto

Para que os materiais em estudo tivessem composição e estado metalúrgico semelhantes ao caso em estudo, os provetes utilizados nos ensaios de rolamento/escorregamento foram obtidos por maquinagem de pedaços de aço extraídos duma roda e de um carril, gentilmente cedidos pela CP e pela REFER.

A roda já se encontrava cortada em secções, aquando do trabalho desenvolvido por Sadio, D. (2013), “Atrito e desgaste em contacto roda/carril de veículos ferroviários com movimento rolamento/escorregamento e escorregamento puro”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.

Quanto aos provetes da roda, foram maquinados quatro provetes a partir de cada secção do aro da mesma. Na Figura 3.1, apresenta-se um esquema elucidativo da maquinação da secção da roda.

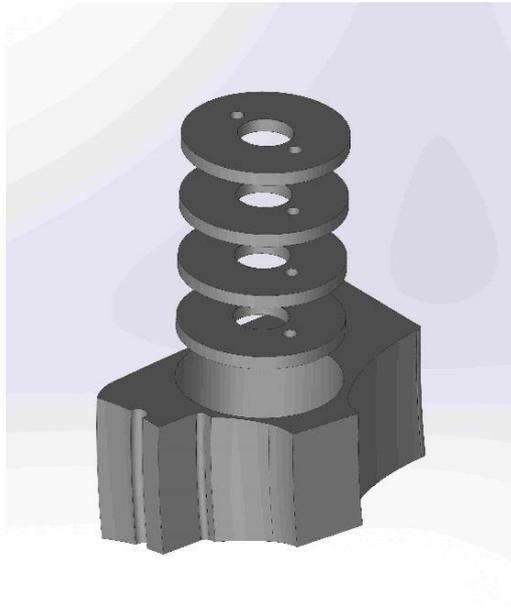


Figura 3.1. Secção da roda com esquema de obtenção dos provetes.

O carril foi cortado em secções, através de um serrote mecânico. Posteriormente, cada secção foi dividida em três partes: cabeça, parte intermédia e base do carril, como ilustrado na Figura 3.2.



Figura 3.2. Secção de carril e secções após o corte.

Foram maquinados quatro provetes de cada secção do carril, representados esquematicamente na Figura 3.3. Dois deles provenientes da cabeça do carril, um proveniente da zona intermédia e outro proveniente da base.



Figura 3.3. Secção de carril com esquema de obtenção dos provetes.

Nos ensaios de rolamento/escorregamento, os provetes encontram-se paralelamente em contacto cilindro-cilindro. Os provetes apresentam dimensões semelhantes, porém o provete do carril distingue-se por um pequeno filete, que proporciona um contacto uniforme entre os provetes e garante que o efeito provocado pelo desalinhamento, que se mostra prejudicial, seja reduzido, Figura 3.4 e Figura 3.5.

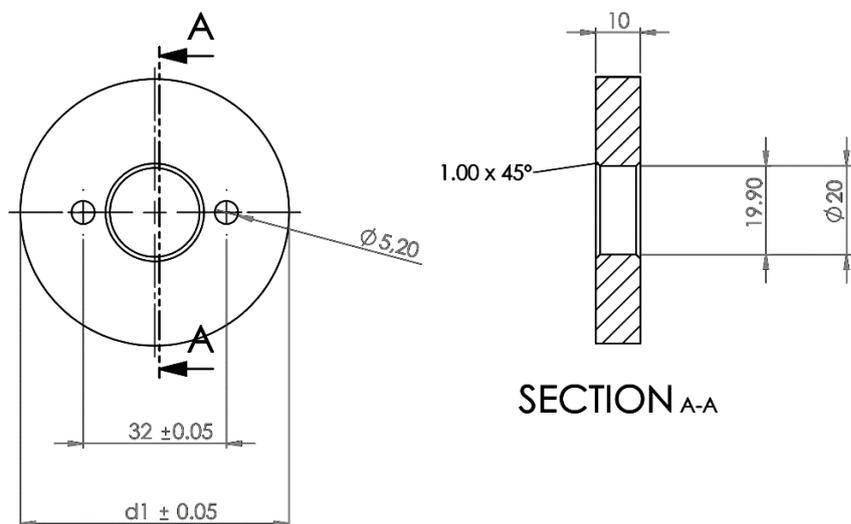


Figura 3.4. Geometria do provete representativo da roda.

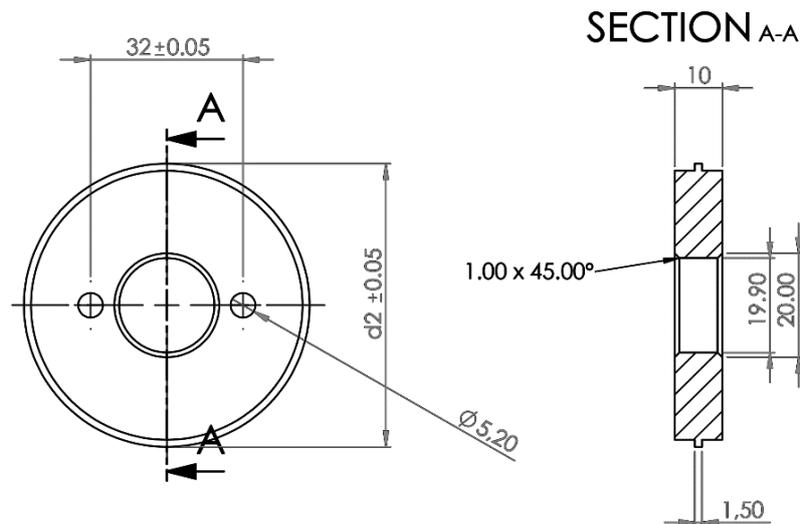


Figura 3.5. Geometria do provete representativo do carril.

Para se calcular a tensão de compressão máxima no contacto para regimes elásticos, tendo em conta a geometria de contacto cilindro-cilindro, são utilizadas as equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 (Pilkey, 2005).

$$\sigma_c = 0,798 \times \left(\frac{qE^*}{K} \right)^{1/2} \quad (3.1)$$

$$q = \frac{F}{l} \quad (3.2)$$

$$K = \frac{(D_1 \times D_2)}{(D_1 + D_2)} \quad (3.3)$$

$$E^* = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (3.4)$$

3.2. Equipamento utilizado

Na execução dos ensaios de rolamento/escorregamento recorreu-se ao tribómetro TE 53 da marca PLINT, estando este representado na Figura 3.6.

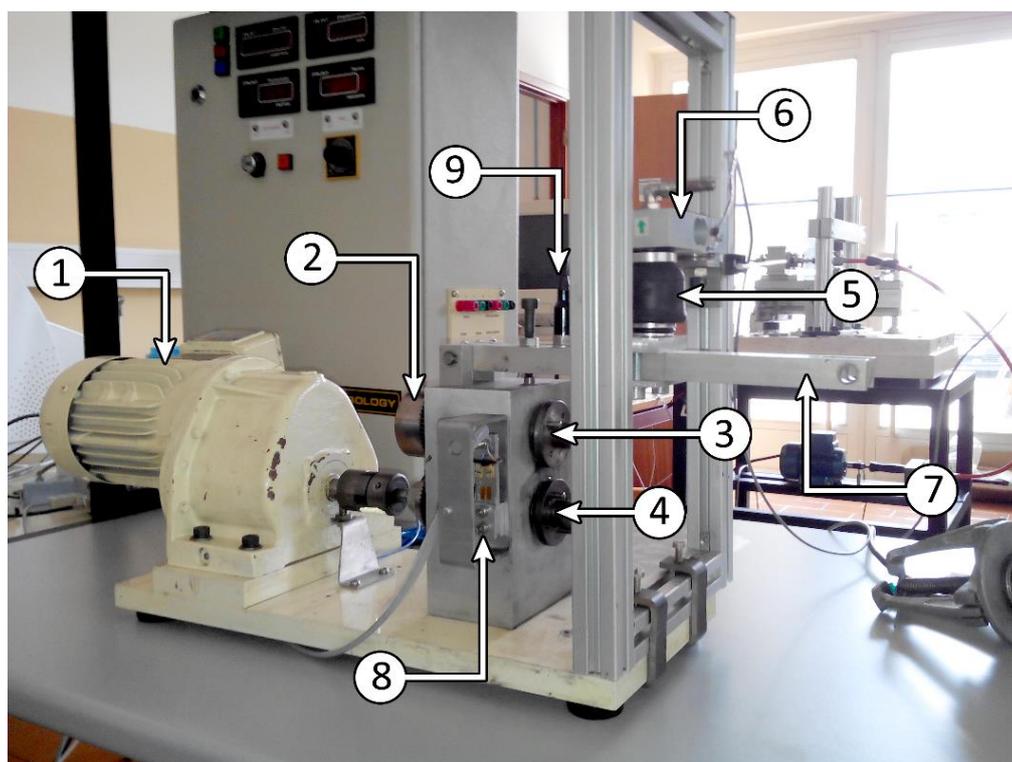


Figura 3.6. Equipamento de realização dos ensaios.

1. Motor elétrico
2. Engrenagens
3. Provette superior (carril)
4. Provette inferior (roda)
5. Mola pneumática
6. Alavanca de aplicação de carga
7. Célula de carga
8. Sistema de medição da força de atrito
9. Acelerómetro

A fim de proporcionar ao leitor um enquadramento com o equipamento em questão, é apresentada uma breve descrição deste, tendo em conta que, a caracterização detalhada do tribómetro se encontra presente no trabalho desenvolvido por Marta, P. (2012).

O motor elétrico (1 da Figura 3.6), por intermédio de um veio e usando uma engrenagem (2 da Figura 3.6), que garante uma rotação sincronizada, induz movimento aos provetes (3 e 4 da Figura 3.6). A pressão de contacto é aplicada através de uma mola

pneumática, de uma célula de carga e de uma alavanca (5, 6 e 7 da Figura 3.6). A vibração do sistema é medida através de um acelerómetro (9 da Figura 3.6).

3.3. Ensaios realizados

Nos ensaios rolamento/escorregamento, é retratado o movimento de um veículo ferroviário ao longo de um troço reto da ferrovia. Este movimento é caracterizado pelo contacto entre a zona plana da roda e a cabeça do carril, Figura 3.7, existindo em grande parte rolamento e uma pequena percentagem de escorregamento. O escorregamento é influenciado pelas condições de contacto, referidas anteriormente, e pelos parâmetros que permitem regular os mecanismos de tração.

Ao longo dos ensaios são medidos dois fatores externos, a temperatura ambiente e a humidade relativa. Todos os ensaios foram realizados sob condições de $22\pm 3^{\circ}\text{C}$ e $50\pm 5\%$ de HR.

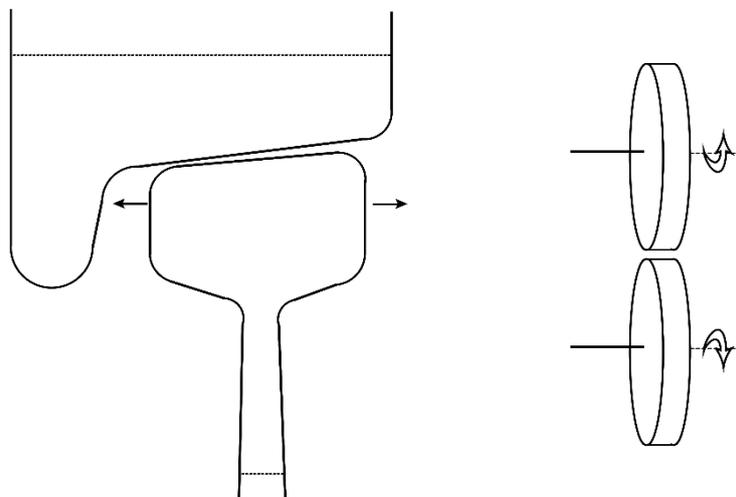


Figura 3.7. Esquema de contacto roda/carril em condições de rolamento/escorregamento.

Na Figura 3.7, é ainda representado esquematicamente, um ensaio rolamento/escorregamento, onde se verifica a rotação conjugada dos provetes, logo com rotação em sentidos opostos.

No presente estudo, os ensaios rolamento/escorregamento foram realizados de modo a estudar a influência da conjugação dos fatores: velocidade linear dos provetes, pressão de contacto e percentagem de escorregamento.

Os valores assumidos pelos parâmetros referidos anteriormente, foram definidos em concordância com os valores contidos no estudo realizado por Sadio, D. (2013).

Assim, as condições de ensaio foram definidas inicialmente, fazendo variar, em cada ensaio, um dos parâmetros alvo do estudo e mantendo constante os restantes. De notar, que foi realizado um ensaio *standard* com as condições: 1 m/s (velocidade linear dos provetes); 500 MPa (pressão de contacto) e 1 % (percentagem de escorregamento).

Numa primeira fase, foram mantidos constantes os valores da pressão de contacto (500 MPa) e da percentagem de escorregamento (1 %), fazendo variar a velocidade linear dos provetes, como se pode verificar na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Combinação de ensaios fazendo variar a velocidade linear dos provetes.

Velocidade linear [m/s]	0,75
	1,25

Seguidamente, consideraram-se diferentes valores para a pressão de contacto, preservando constantes os valores da velocidade de rolamento (1 m/s) e da percentagem de escorregamento (1 %) (Tabela 3.2).

Tabela 3.2. Combinação de ensaios fazendo variar a pressão de contacto.

Pressão de contacto [MPa]	400
	600
	800

Por fim, a percentagem de escorregamento foi o parâmetro a sofrer variações, considerando o valor da velocidade linear como 1 m/s e 500 MPa como o valor da pressão de contacto (Tabela 3.3).

Tabela 3.3. Combinação de ensaios fazendo variar a percentagem de escorregamento

Escorregamento [%]	0,2
	0,75
	1,25

A função entre os raios dos provetes, r_1 e r_2 , e as suas velocidades de rotação, w_1 e w_2 , permite calcular a percentagem de escorregamento entre os provetes, representada

na equação 3.5. Entretanto, é possível calcular o valor da velocidade de rotação w_2 através da equação 3.6.

$$\%_{\text{escorregamento}} = \frac{r_1 w_1 - r_2 w_2}{r_1 w_1} \quad (3.5)$$

$$w_2 = \frac{N_1}{N_2} \times w_1 \quad (3.6)$$

Onde, N_1 e N_2 simbolizam o número de dentes das rodas dentadas inferior e superior, respetivamente.

Assim, na Tabela 3.4 estão representadas as relações entre as dimensões dos provetes da roda e do carril e as suas correspondentes percentagens de escorregamento.

Tabela 3.4. Relação entre a percentagem de escorregamento e as dimensões dos provetes

Raio do provete inferior (roda) [mm]	Raio do provete superior (carril) [mm]	Escorregamento [%]
29,765	30,235	0,2
29,85	30,15	0,75
29,9	30,1	1
29,925	30,075	1,25

Estudos anteriores mostram que a percentagem de escorregamento presente num veículo ferroviário, que circula num troço reto da ferrovia, varia entre os 0 e 2% (Olofsson. et. al., 2006) Assim, os valores escolhidos para o presente estudo, enquadram-se no intervalo definido acima (entre 0 e 2%) e intercalam os valores estudados por Sadio, D. (2013).

O modelo de Archard-Czichos permite calcular o valor da taxa específica de desgaste, representada pela equação 3.7, e que simboliza a relação entre o volume de desgaste e a severidade (Czichos, 1992).

$$V = k \times F_N \times x \Leftrightarrow k = \frac{V}{F_N \times x} \quad (3.7)$$

O trabalho realizado pela força de atrito ao longo do ensaio tem como base o cálculo da energia dissipada por atrito. Por sua vez, o trabalho realizado pela força de atrito, simboliza o produto entre a força de atrito e a distância de escorregamento do ensaio (equação 3.8).

$$\Delta E = \int F_a dx = \sum_{t=1}^{t \text{ final}} F_{a \text{ média}} \times w \times R \times \Delta t \quad (3.8)$$

Sabendo que o sistema de aquisição de dados permite uma aquisição de valores para a força de atrito com uma frequência 1000 Hz, é calculado a cada segundo um valor médio da força de atrito, $F_{a \text{ média}}$. A velocidade de escorregamento é determinada pelo produto entre o raio médio dos provetes R (m), e a diferença entre as suas velocidades angulares w (rad/s).

Com o intuito de calcular a taxa energética de desgaste, k_e , é utilizada a relação entre o volume de material desgastado e a energia dissipada por atrito. De salientar que os valores obtidos para o trabalho específico da força de atrito, são determinados através do inverso da taxa energética de desgaste.

Os procedimentos prévios a cada ensaio rolamento/escorregamento estão descritos no trabalho desenvolvido por Marta, P. (2012).

3.4. Materiais

Previamente, no estudo realizado por Sadio, D. (2013), “Atrito e desgaste em contacto roda/carril de veículos ferroviários com movimento rolamento/escorregamento e escorregamento puro”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, foi apresentada uma análise pelo teste de espectrometria de absorção atómica por chama, fornecida por uma empresa competente. Assim, na Tabela 3.5 são apresentadas as composições químicas dos aços da roda e do carril.

Tabela 3.5. Composição química da roda e do carril. [Sadio, 2013]

	%C	%S	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
Carril	0,622	0,390	1,320	0,0307	0,0144	0,0241	0,005	0,04883
Roda	0,445	0,309	0,836	0,0101	0,0145	0,230	0,0299	0,0764

Os dois elementos em estudo são aços, com uma elevada percentagem de carbono na sua composição química. De salientar o facto de o carril apresentar uma maior concentração de carbono na sua composição, o que lhe confere uma dureza superior, quando comparado com a roda.

As Figura 3.8 e Figura 3.9, ilustram as microestruturas do carril e da roda, respetivamente. Ambas apresentam uma estrutura perlítico-ferrítica, em que as zonas mais escuras representam a perlite e as zonas brancas, em menor quantidade e maioritariamente encontradas nas fronteiras de grão, representam a ferrite. (Sadio, 2013)

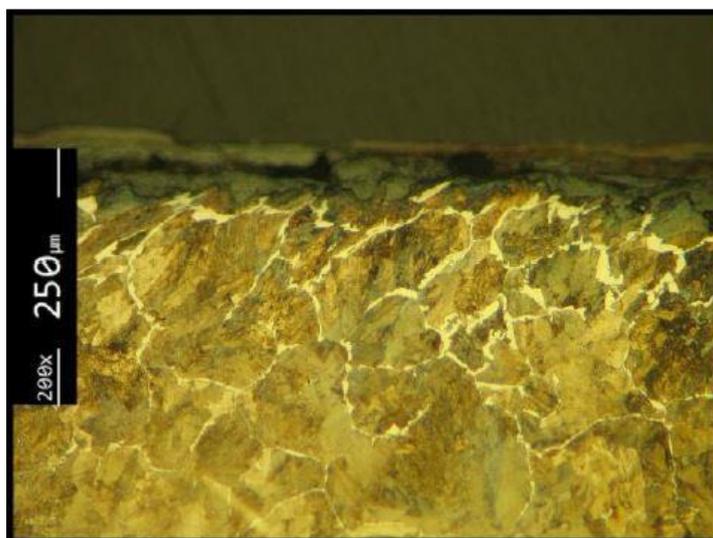


Figura 3.8. Micrografia de material do carril.

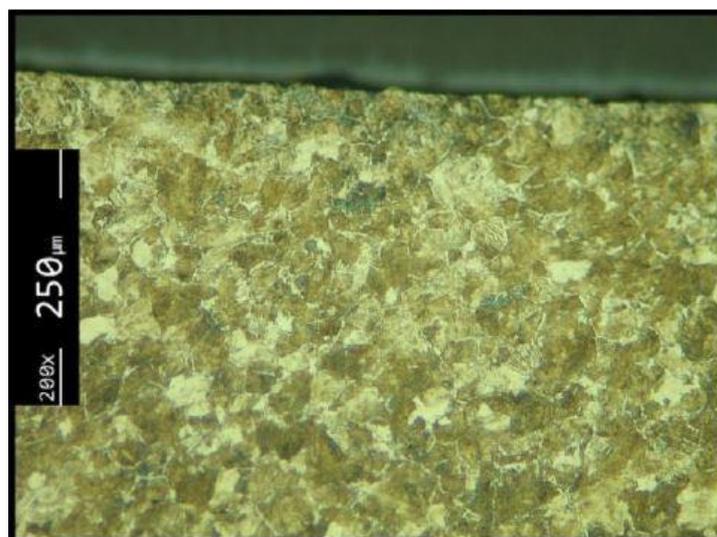


Figura 3.9. Micrografia de material da roda.

3.5. Mecanismos de desgaste e análises complementares

A fim de estudar os mecanismos de desgaste verificados no contacto roda-carril, foram realizados ensaios de dureza e foram analisadas as microestruturas das amostras alvo de estudo.

Para isso cortaram-se pequenas amostras de três pares de provetes de ensaios diferentes. Foi retirada uma secção de cada provete, ou seja, uma amostra do provete que simula a roda e uma amostra do provete que simula o carril.

Selecionaram-se os seguintes ensaios: ensaio em que a velocidade linear é de 0,75 m/s, sendo a pressão de contacto e a percentagem de escorregamento, 500 MPa e 1%, respetivamente; ensaio em que a pressão de contacto assumiu o valor 600 MPa, sendo a velocidade linear 1 m/s e com 1% escorregamento; ensaio com 0,2 % de escorregamento, velocidade linear de 1 m/s e com 500 MPa de pressão de contacto.

As amostras retiradas de cada provete foram submetidas a um polimento. Este procedimento foi executado através de uma gama de lixas de carboneto de silício, de granometria entre 240 e 2500, e posteriormente por diamante de 3 μ m. Após o polimento, as amostras foram expostas a um ataque com uma solução de 98% de álcool etílico e 2% de ácido nítrico (Nital) para se realizar uma análise da micrografia.

Posteriormente, realizaram-se ensaios de dureza a todas as amostras sujeitas ao polimento e ao ataque a fim de analisar as durezas de ambos os constituintes do sistema roda-carril e para se verificar a presença de encruamento abaixo da pista de contacto.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados obtidos nos ensaios de rolamento/escorregamento são apresentados e discutidos no presente capítulo. Neste capítulo são ainda expostos os resultados de análises complementares, análise metalográfica e ensaios de dureza, a fim de adquirir informações que complementem os ensaios tribológicos.

4.1. Ensaios de rolamento/escorregamento

Os ensaios de rolamento/escorregamento foram realizados consoante os procedimentos indicados no capítulo anterior, capítulo 3. Seguidamente são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios realizados. Os resultados são apresentados de forma tripartida, onde se mostra a influência de cada parâmetro definido inicialmente, sendo os parâmetros: velocidade linear, pressão de contacto e percentagem de escorregamento.

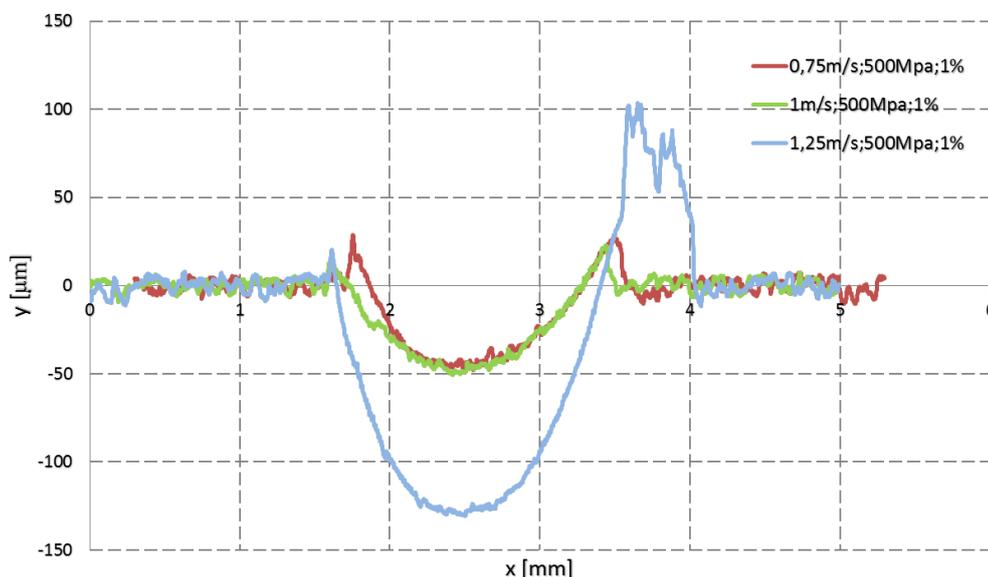
4.1.1. Influência da velocidade linear

O efeito da velocidade foi estudado através de ensaios rolamento/escorregamento a velocidades previamente definidas. Os valores assumidos pelo parâmetro em estudo foram de 0,75; 1 e 1,25 m/s. Fixaram-se os valores 500 MPa e 1% para as restantes variáveis, pressão de contacto e percentagem de escorregamento, respetivamente.

Os perfis de desgaste, adquiridos com um rugosímetro, e a pesagem representam as duas opções concretizadas para a medição do desgaste nos provetes. Na Tabela 4.1 estão representados os valores obtidos através de cada método.

Tabela 4.1. Volume de desgaste dos elementos roda e carril através de dois métodos distintos.

	Volume de desgaste da roda		Volume de desgaste do carril
	Pesagem	Perfil de Rugosidade	Pesagem
0,75 m/s	$9,73 \times 10^{-9} \text{ m}^3$	$7,23 \times 10^{-9} \text{ m}^3$	$2,15 \times 10^{-9} \text{ m}^3$
1 m/s	$1,09 \times 10^{-8} \text{ m}^3$	$8,84 \times 10^{-9} \text{ m}^3$	$1,79 \times 10^{-9} \text{ m}^3$
1,25 m/s	$1,26 \times 10^{-8} \text{ m}^3$	$2,31 \times 10^{-8} \text{ m}^3$	$1,59 \times 10^{-9} \text{ m}^3$

**Figura 4.1.** Perfis de desgaste dos provetes da roda para as velocidades testadas.

Na Figura 4.1 estão representadas as curvas dos perfis de desgaste da roda relativamente à velocidade linear dos provetes. Por intermédio da análise do gráfico representado, é possível verificar que o aumento do parâmetro velocidade traduz um crescimento do valor de desgaste. De salientar que o ensaio que decorreu na velocidade mais elevada, ostenta a cratera de desgaste superior.

A evolução do volume desgastado no par roda/carril em função dos valores de velocidade linear definidos inicialmente está ilustrada na Figura 4.2. Observando o comportamento gráfico do volume desgastado ao longo do parâmetro velocidade linear, é possível verificar a tendência crescente do desgaste na roda ao longo do intervalo de velocidades lineares, enquanto para o elemento carril se verifica uma tendência contrária, ou

seja, um decréscimo do desgaste na mesma gama de velocidades. Estas tendências são igualmente visíveis na Figura 4.3, onde se apresenta a taxa específica de desgaste em função da velocidade linear dos provetes.

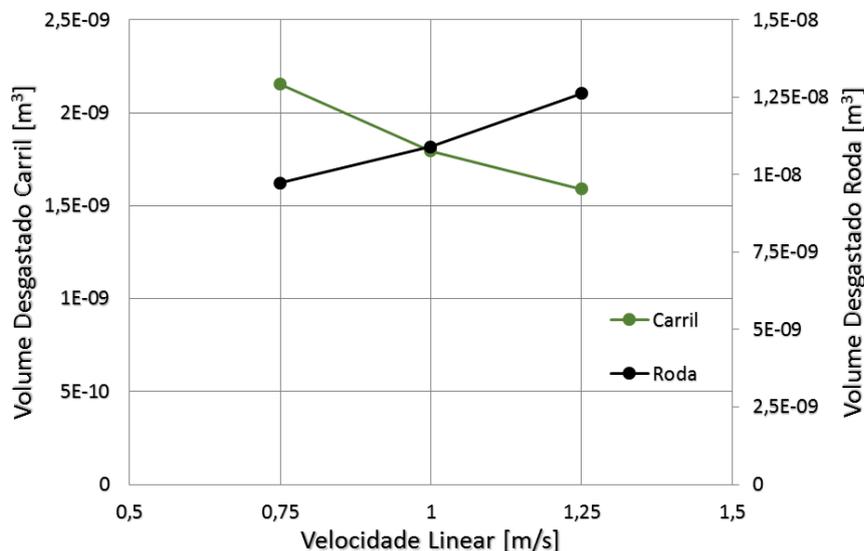


Figura 4.2. Volume desgastado dos dois elementos para as velocidades estabelecidas.

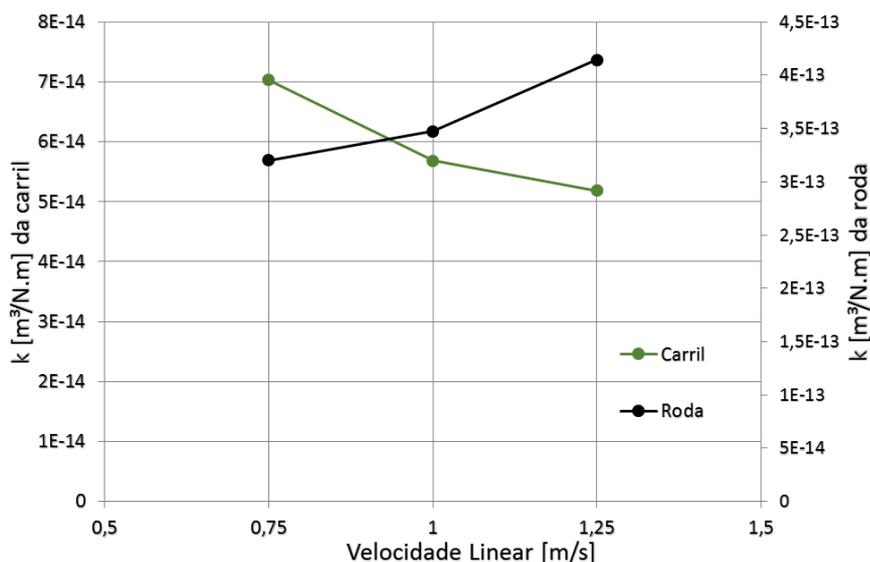


Figura 4.3. Taxa específica de desgaste da roda e do carril em função das velocidades estudadas.

As tendências verificadas anteriormente são novamente possíveis de observar no gráfico que relaciona a taxa energética de desgaste do par roda/carril com a velocidade linear, Figura 4.4.

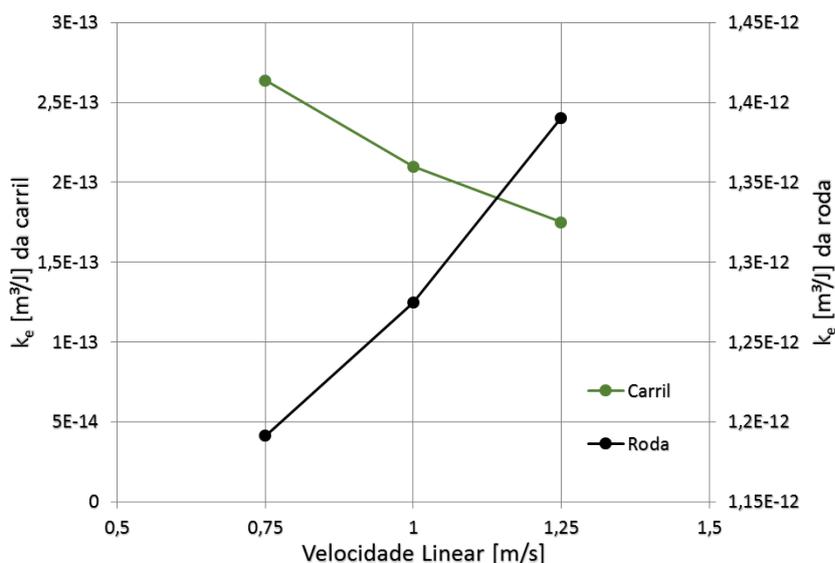


Figura 4.4. Taxa energética de desgaste da roda e do carril, em função da velocidade linear.

Na Figura 4.5, encontra-se reproduzida a evolução do coeficiente de atrito médio para os diferentes valores assumidos pela velocidade linear. É possível verificar o aumento gradual do coeficiente de atrito médio à medida que a velocidade linear dos provetes se eleva.

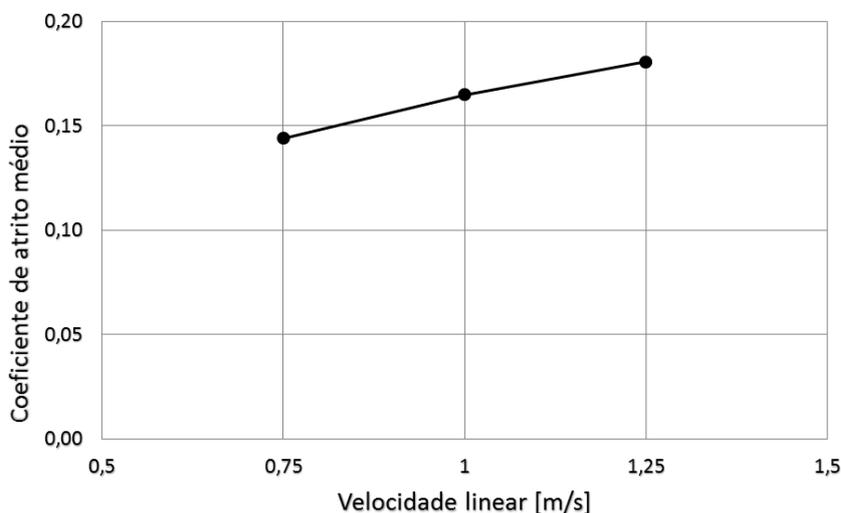


Figura 4.5. Coeficiente de atrito médio em função da velocidade linear.

O trabalho específico da força de atrito representa o inverso da taxa energética de desgaste, e consequentemente permite observar uma tendência oposta à tendência que tem sido verificada, Figura 4.6.

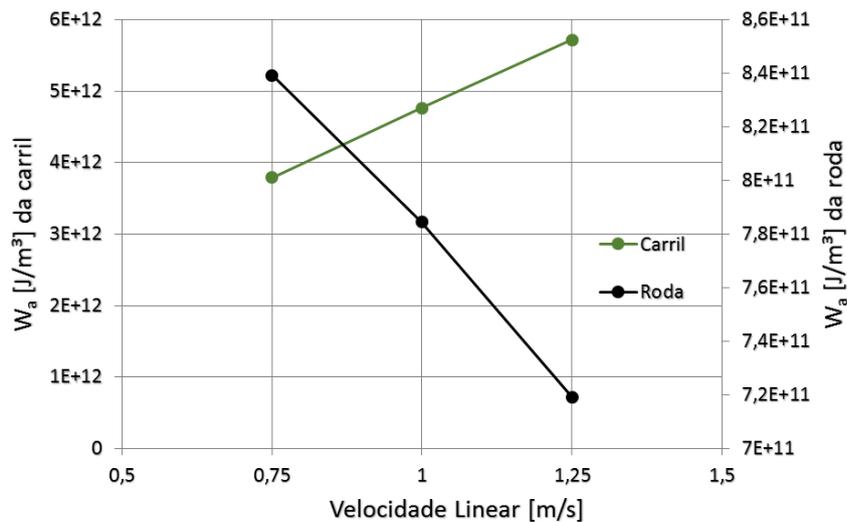


Figura 4.6. Trabalho específico da força de atrito na roda e no carril para as velocidades estudadas.

A Figura 4.7 traduz o volume desgastado nos elementos roda e carril, em função da energia dissipada por atrito. Uma vez que esta variável assume valor equivalente para o par roda/carril, observando a Figura 4.7 conclui-se que o desgaste sofrido pelo elemento representativo da roda é sempre superior em cerca de uma ordem de grandeza ao desgaste sofrido pelo disco que simula o carril.

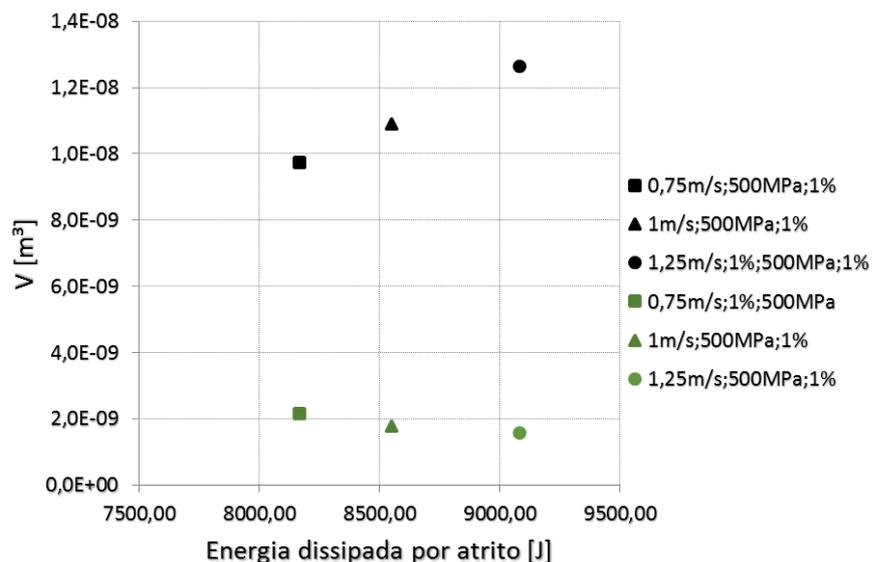


Figura 4.7. Volume de desgaste da roda (preto) e carril (verde) em função da energia dissipada por atrito.

4.1.2. Influência da pressão de contacto

Para se analisar a influência da pressão de contacto em contacto rolamento/escorregamento, foram realizados ensaios com valores distintos de pressão. Quanto à velocidade linear e a percentagem de escorregamento, fixaram-se em 1 m/s e 1%,

respetivamente. Por sua vez, o parâmetro pressão de contacto foi testado com os valores 400, 500, 600 e 800 MPa.

Na Figura 4.8, estão representados os perfis de desgaste no provete que simula a roda. Observa-se que o ensaio sujeito a uma pressão de 800 MPa sofreu um desgaste intenso, sendo possível afirmar que o aumento da pressão conduz a um aumento do desgaste sofrido aquando do contacto roda/carril.

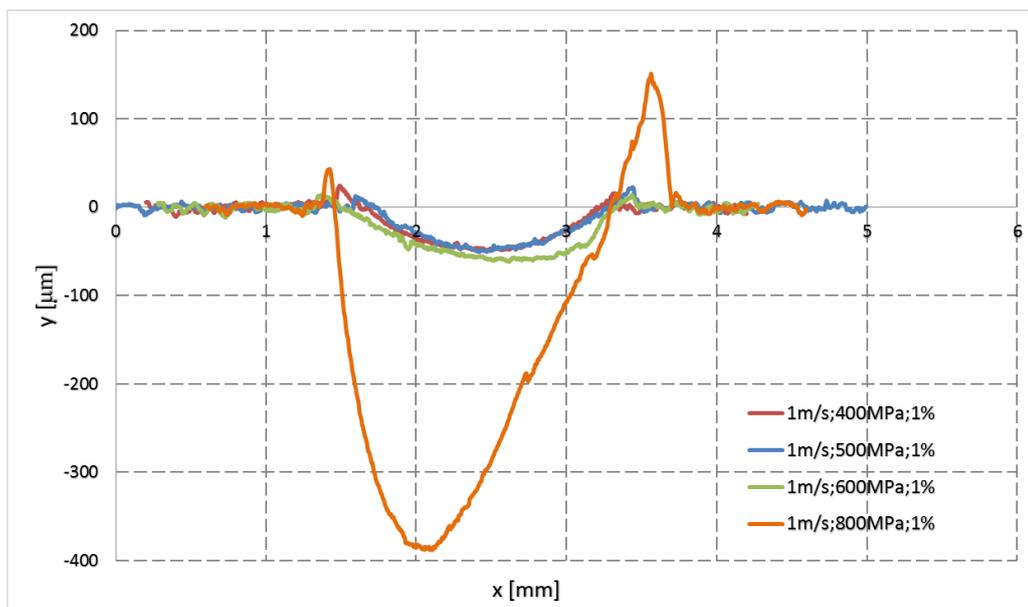
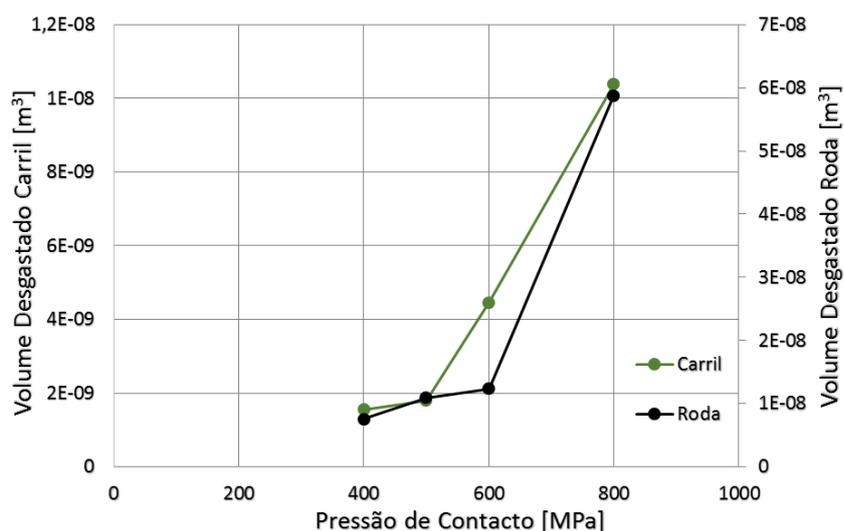


Figura 4.8. Perfis de desgaste em função da pressão de contacto.

A Tabela 4.2 comprova a conexão entre a pressão de contacto e o desgaste. Quando o fator pressão sofre um aumento, é visível o instantâneo aumento do desgaste provocado. Na Figura 4.9 ilustra-se a variação de volume de desgaste em função da pressão de contacto, onde se confirma a tendência discutida anteriormente, ou seja, o aumento da pressão leva a um aumento do volume de desgaste.

Tabela 4.2. Volume de desgaste dos elementos roda e carril através de dois métodos distintos.

	Volume de desgaste da roda		Volume de desgaste do carril
	Pesagem	Perfil de Rugosidade	Pesagem
400 MPa	$7,54 \times 10^{-9} \text{ m}^3$	$9,09 \times 10^{-9} \text{ m}^3$	$1,55 \times 10^{-9} \text{ m}^3$
500 MPa	$1,09 \times 10^{-8} \text{ m}^3$	$8,84 \times 10^{-9} \text{ m}^3$	$1,79 \times 10^{-9} \text{ m}^3$
600 MPa	$1,23 \times 10^{-8} \text{ m}^3$	$1,39 \times 10^{-8} \text{ m}^3$	$4,46 \times 10^{-9} \text{ m}^3$
800 MPa	$5,88 \times 10^{-8} \text{ m}^3$	$7,58 \times 10^{-8} \text{ m}^3$	$1,04 \times 10^{-8} \text{ m}^3$

**Figura 4.9.** Volume desgastado na roda e no carril em função da pressão de contacto.

Em relação à taxa específica de desgaste e à taxa energética de desgaste, Figura 4.10 e Figura 4.11, apresentam uma evolução semelhante. Ambas decrescem no intervalo de pressões [400;600] MPa e após estes valores apresentam um crescimento acentuado até atingir o valor do ensaio com a pressão mais elevada (800MPa).

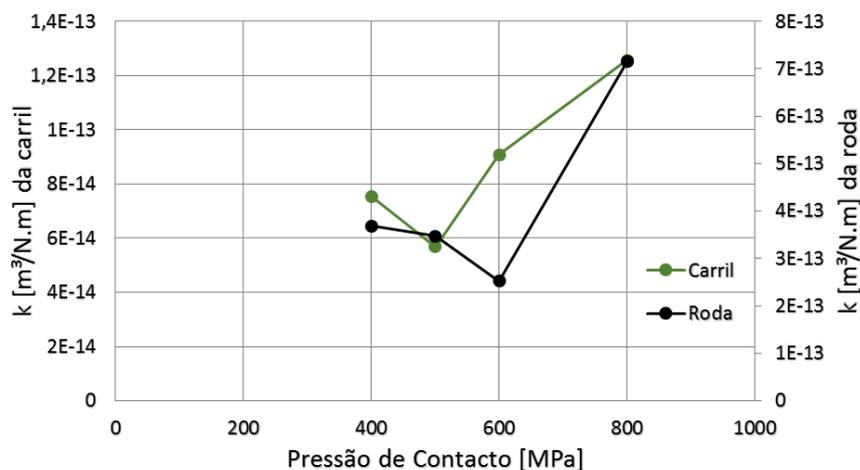


Figura 4.10. Taxa específica de desgaste da roda e do carril em função da pressão de contacto.

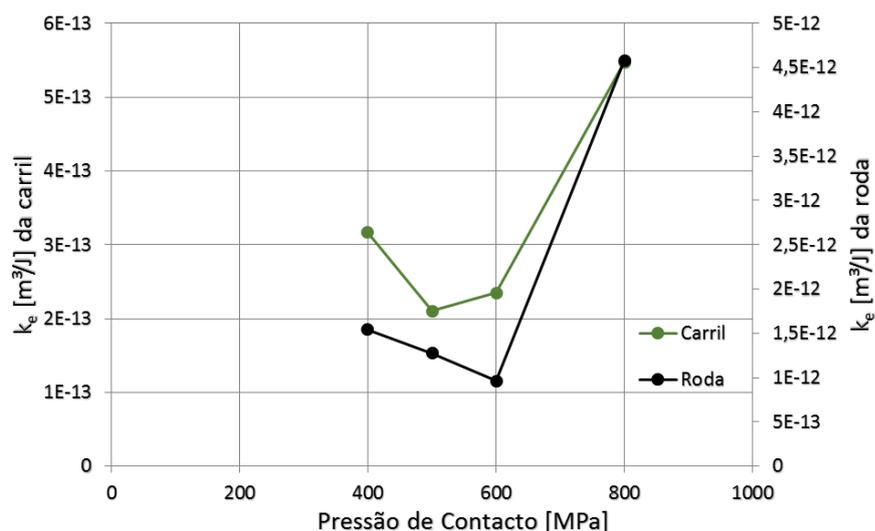


Figura 4.11. Taxa energética de desgaste da roda e do carril em função da pressão de contacto.

A evolução dos valores do coeficiente de atrito médio em função da pressão de contacta é apresentada na Figura 4.12. A tendência neste gráfico não está definida, exibindo o valor mais elevado para o ensaio de 500 MPa e o valor mais baixo no ensaio de maior pressão de contacto, 800 MPa.

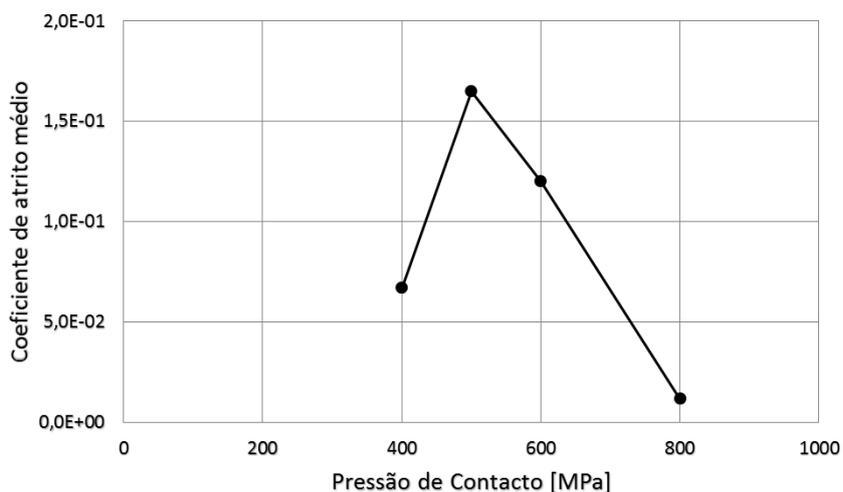


Figura 4.12. Coeficiente de atrito médio em função da pressão de contacto.

O trabalho específico da força de atrito, Figura 4.13, apresenta um comportamento semelhante ao coeficiente de atrito médio. A pressão de 500 MPa continua a exibir o valor mais elevado.

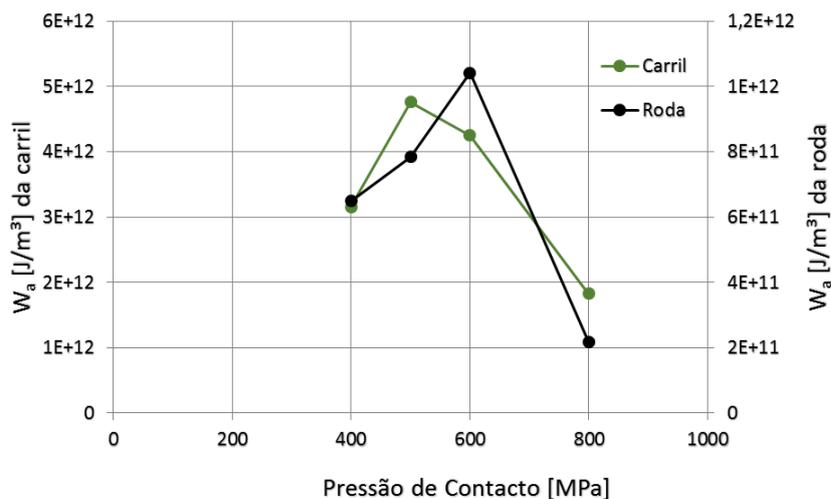


Figura 4.13. Coeficiente de atrito médio em função da pressão de contacto.

Analisando a Figura 4.14, que relaciona o volume desgastado com a quantidade de energia dissipada em ambos os provetes, verifica-se que o provete que simula a roda sofre um desgaste superior ao provete do carril e de salientar que até 500 MPa os valores são semelhantes mas em valores superiores de pressão verifica-se um aumento significativo na energia dissipada.

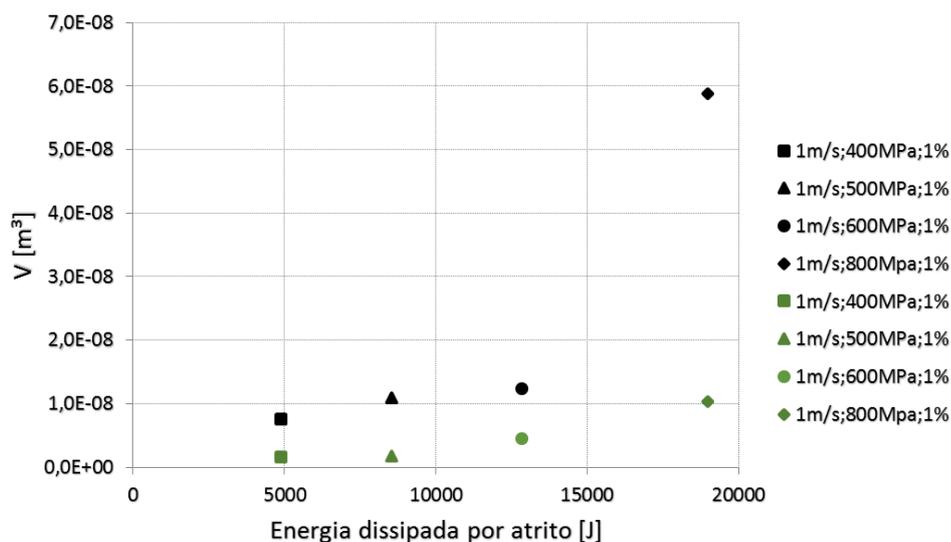


Figura 4.14. Volume de desgaste da roda (preto) e carril (verde) em função da energia dissipada por atrito.

4.1.3. Influência da % de escorregamento

A fim de estudar o efeito da percentagem de escorregamento no contacto roda carril, realizaram-se ensaios fazendo variar este parâmetro. Fixando os valores da velocidade linear e da pressão de contacto, e variando a percentagem de escorregamento entre 0% e 2%, intervalo aplicado ao trecho reto das ferrovias. Assim, o parâmetro em estudo assume os valores 0,2%, 0,75%, 1% e 1,25%.

A Figura 4.15. Perfis de desgaste dos provetes representativos da roda. Figura 4.15 ilustra os perfis de desgaste dos ensaios sujeitos a alterações da percentagem de escorregamento. É possível afirmar que este parâmetro influencia claramente o volume de desgaste. De salientar que se verifica um aumento do volume de desgaste conforme se eleva o valor da percentagem de escorregamento.

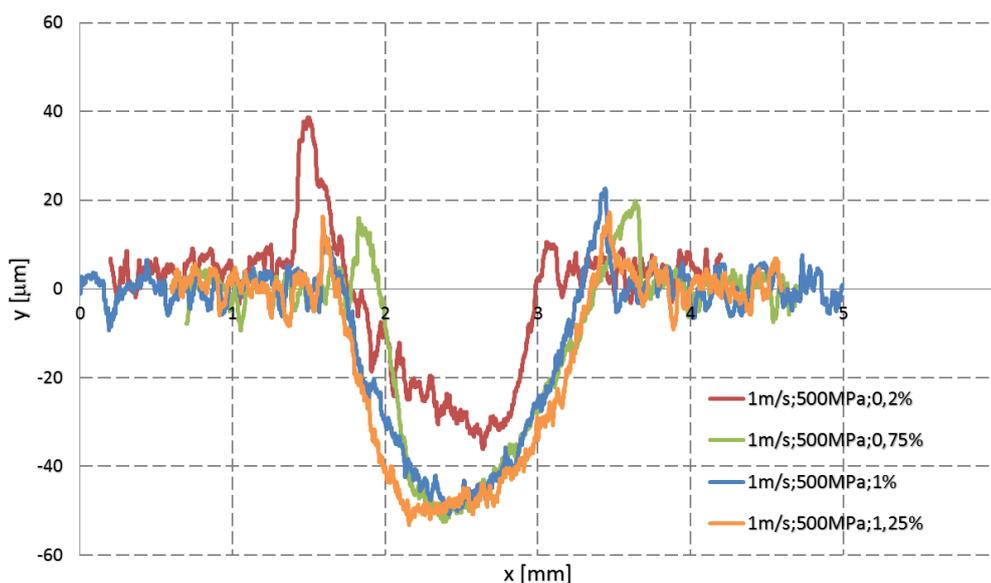


Figura 4.15. Perfis de desgaste dos provetes representativos da roda.

Em seguimento, a Tabela 4.3, comprova a tendência verificada acima, onde se comprova que o valor de volume de desgaste aumenta gradualmente com o aumento da percentagem de escorregamento imposta nos ensaios realizados.

Tabela 4.3. Volume de desgaste dos elementos roda e carril através de dois métodos distintos.

	Volume de desgaste da roda		Volume de desgaste do carril
	Pesagem	Perfil de Rugosidade	Pesagem
0,2%	$4,00 \times 10^{-9} \text{ m}^3$	$3,06 \times 10^{-9} \text{ m}^3$	$1,24 \times 10^{-9} \text{ m}^3$
0,75%	$8,23 \times 10^{-9} \text{ m}^3$	$7,70 \times 10^{-9} \text{ m}^3$	$1,53 \times 10^{-9} \text{ m}^3$
1%	$1,09 \times 10^{-8} \text{ m}^3$	$8,84 \times 10^{-9} \text{ m}^3$	$1,79 \times 10^{-9} \text{ m}^3$
1,25%	$9,45 \times 10^{-9} \text{ m}^3$	$1,06 \times 10^{-8} \text{ m}^3$	$1,80 \times 10^{-9} \text{ m}^3$

A tendência do aumento do volume de desgaste com a influência da percentagem de escorregamento, referida acima, está representada na Figura 4.16, onde se verifica um crescimento dos valores de desgaste sofrido por ambos os provetes conforme se aumenta o parâmetro percentagem de escorregamento. De notar, o volume de desgaste sofrido pela roda

no ensaio de 1 % de percentagem de escorregamento ser o mais elevado, e foge ligeiramente à tendência.

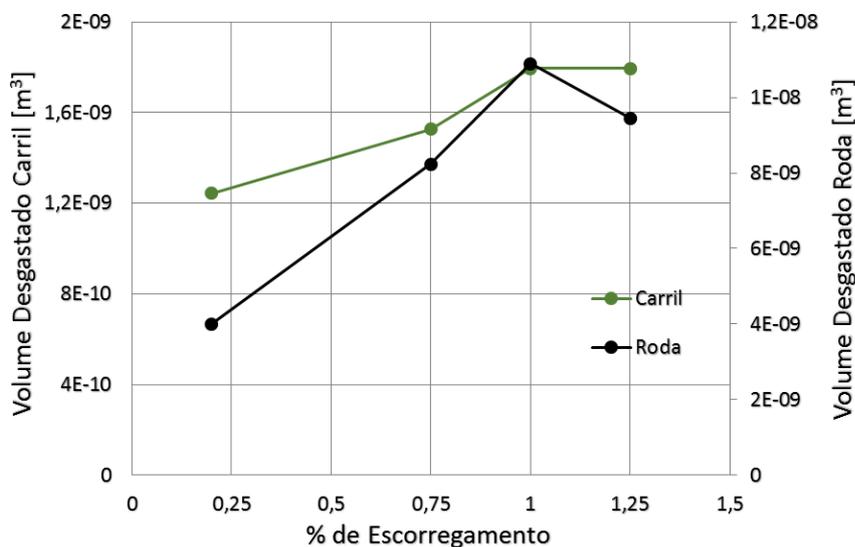


Figura 4.16. Volume desgastado na roda e no carril em função da percentagem de escorregamento.

Ilustrado na Figura 4.17, encontra-se o gráfico representativo da variação da taxa específica de desgaste dos provetes da roda e do carril, para diferentes percentagens de escorregamento. As curvas representativas da taxa específica de desgaste de ambos os provetes apresentam uma tendência decrescente, observando-se que para a percentagem de escorregamento mais baixa, 0,2%, o valor da taxa específica de desgaste assume o valor mais elevado, tanto para o provete da roda como para o provete do carril.

Contrariamente à evolução verificada no volume desgastado nos provetes representativos da roda e do carril, a taxa específica de desgaste decresce a partir do seu valor máximo, 0,2% de escorregamento. Assim, para valores de escorregamento reduzidos, a curva da taxa específica de desgaste atinge valores elevados, ilustrados na evolução da curva, devido à sobreposição dos mecanismos de fadiga de contacto com o desgaste provocado pelo atrito de escorregamento. Por sua vez, para valores superiores de escorregamento, as tensões induzidas por atrito modificam o campo de distribuições de tensões de escorregamento o que leva à improvável ocorrência de fadiga.

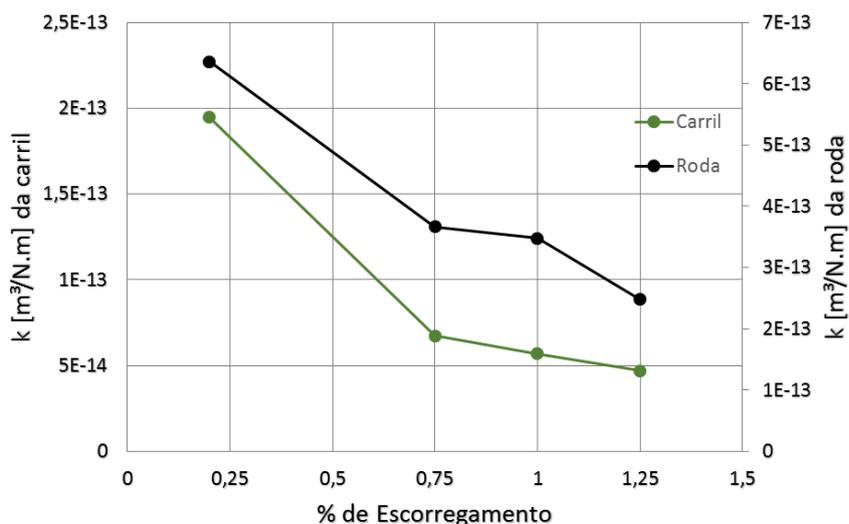


Figura 4.17. Taxa específica de desgaste da roda e do carril em função das % de escorregamento estudadas.

Quanto á taxa energética de desgaste dos provetes da roda e do carril, representada na Figura 4.18, com a o aumento dos valores de % de escorregamento apresenta uma tendência crescente. No entanto, para o valor de 1 % de escorregamento a tendência não é verificada visto este ponto decrescer ligeiramente em relação à tendência.

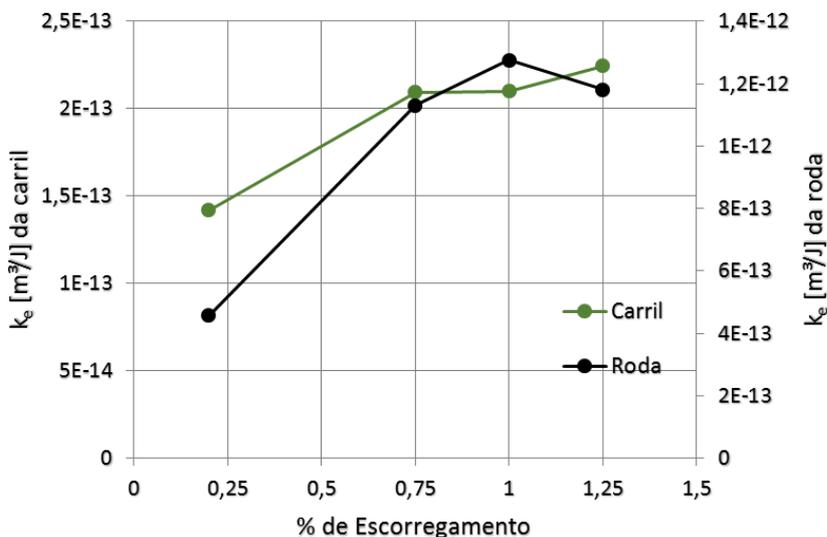


Figura 4.18. Taxa energética de desgaste da roda e do carril em função da % de escorregamento.

Na Figura 4.19, está representada a evolução do coeficiente de atrito médio em função da evolução da % de escorregamento. Observa-se um aumento dos valores de coeficiente de atrito médio com o aumento da % de escorregamento, exceto para o ensaio com maior percentagem de escorregamento, 1,25%, que foge ligeiramente à tendência, visto

que se verifica uma redução do valor do coeficiente de atrito médio com o aumento da percentagem de escorregamento.

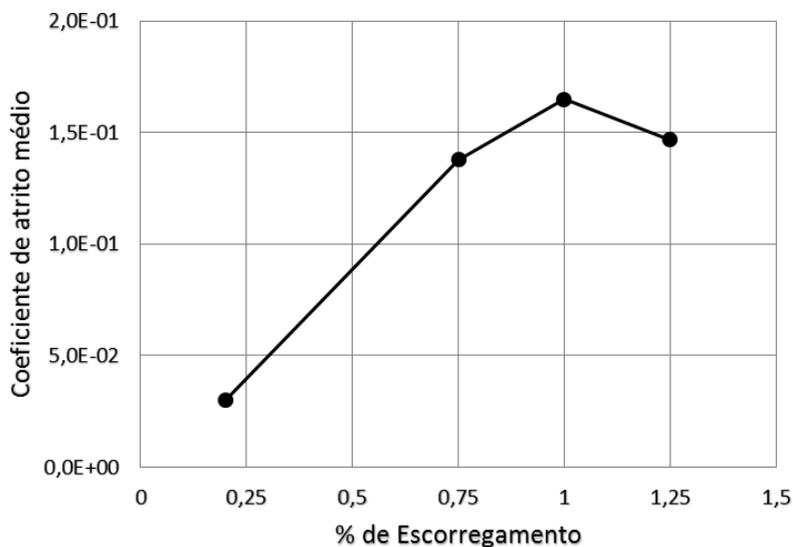


Figura 4.19. Evolução do coeficiente de atrito médio com a % de escorregamento.

A Figura 4.20 ilustra a evolução do trabalho específico da força de atrito nos provetes representativos da roda e do carril. É possível observar que para ambos os provetes a tendência, conforme se aumentam os valores da percentagem de escorregamento, decresce. É possível ainda verificar que o valor mais elevado da tendência é para a percentagem de escorregamento de 0,2%, o que destaca a função determinante da fadiga de contacto para valores reduzidos de escorregamento. De facto conclui-se que se o mecanismo de fadiga de contacto for muito importante podem obter-se valores de desgaste significativos mesmo que o escorregamento, e como tal a contribuição líquida do atrito, seja baixo.

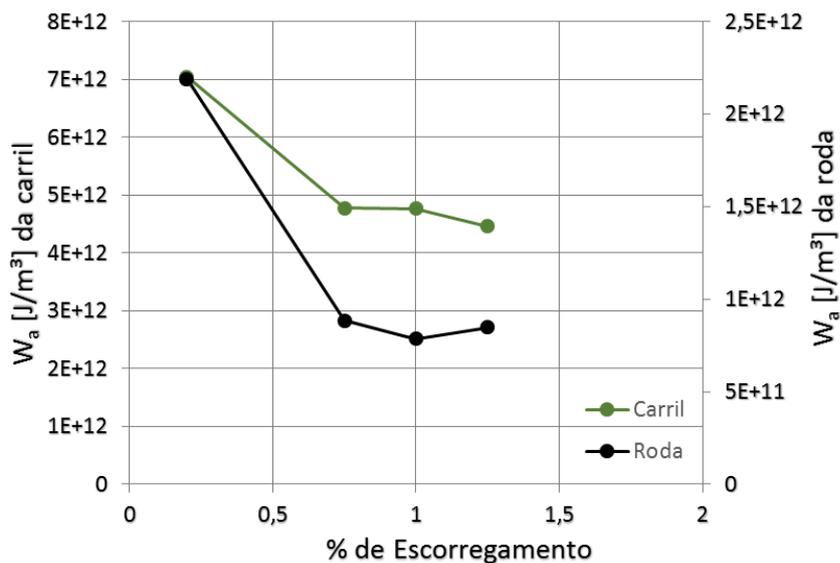


Figura 4.20. Trabalho específico da força de atrito na roda e no carril, em função da % de escorregamento.

Na Figura 4.21, é comparado o volume desgastado com a quantidade de energia dissipada em ambos os provetes, em função das diferentes percentagens de escorregamento. É possível verificar que os provetes representativos da roda apresentam valores mais elevados de desgaste. Quanto à quantidade de energia dissipada por atrito assume o valor superior para o ensaio de menor percentagem de escorregamento, 0,2%.

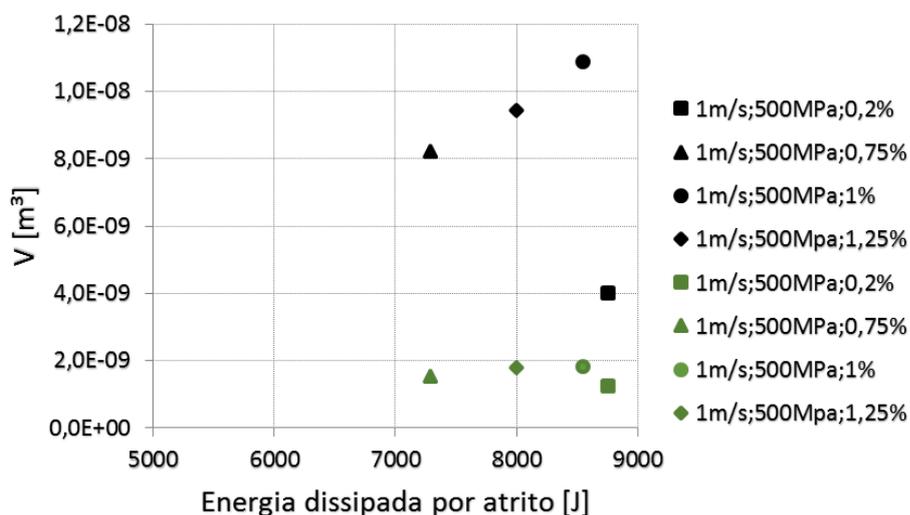


Figura 4.21. Volume de desgaste da roda (preto) e carril (verde) em função da energia dissipada por atrito.

4.2. Análises complementares

No seguinte subcapítulo são apresentados os resultados dos ensaios de dureza realizados e são apresentadas as micrografias obtidas após ataque com Nital a 2%. Através

desta análise foi possível identificar os fenómenos que afetam o par roda/carril ao longo dos ensaios realizados.

4.2.1. Micrografias e dureza

Como havia sido referido no capítulo três da presente dissertação, para se efetuar uma análise do perfil de dureza e da microestrutura foi selecionado um par de provetes representativo de cada um dos três parâmetros estudados. Foi feita uma análise para o par roda/carril de modo a compreender a evolução da dureza e a forma em como o desgaste se fez notar nos diferentes ensaios realizados.

Primeiramente, o ensaio alvo de estudo compreendia as seguintes condições: velocidade linear de 0,75 m/s, 500MPa para a pressão de contacto e 1% de escorregamento. Este ensaio corresponde ao lote de ensaios em que se fez variar a velocidade linear imposta aos provetes que simbolizam o par roda/carril.

Na Figura 4.22, é ilustrada a evolução da dureza com a profundidade, tanto para a roda como para o carril, para o ensaio em questão.

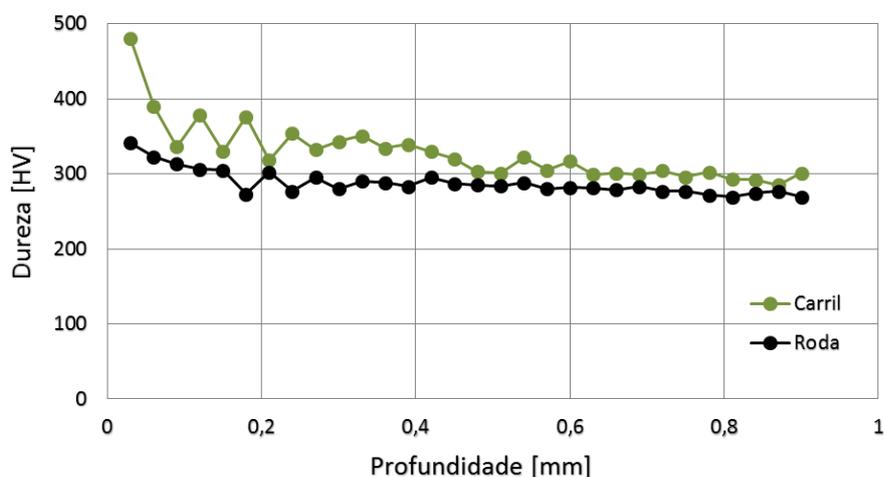


Figura 4.22. Evolução da dureza com a profundidade para o par roda/carril, do ensaio: 0,75m/s;500MPa;1%.

Através da análise da Figura 4.22, é possível verificar que, para o carril, a dureza sofre um decréscimo de cerca de 500 HV para aproximadamente 300 HV quando se analisa desde a superfície até à profundidade de 0,6 mm. Esta elevada dureza na zona superficial mostra um encruamento significativo sofrido pelo provete representativo do carril. Por sua vez, no provete da roda, verifica-se também um encruamento, apesar de ser menos significativo, passando de cerca de 350 HV para cerca de 285 HV conforme se aumenta a

profundidade da análise. De salientar a dureza superior do provete do carril em relação ao provete representativo da roda, facto esse que pode ser explicado pela percentagem superior de carbono no material do carril.

Nas Figura 4.23 e Figura 4.24, encontram-se representadas as microestruturas referentes às amostras retiradas para o par roda/carril do ensaio referido acima. Em ambas as figuras se observa a deformação do grão junto à superfície o que comprova o encruamento referido acima através da análise da dureza realizada a cada um dos provetes representativos dos elementos roda e carril.



Figura 4.23. Micrografia do provete representativo da zona de contacto do carril, do ensaio: 0,75m/s;500MPa;1%.

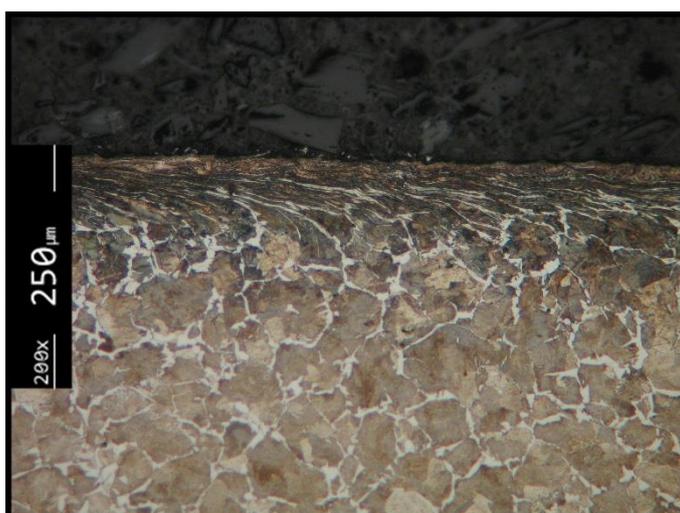


Figura 4.24. Micrografia do provete representativo da zona de contacto da roda, do ensaio: 0,75m/s;500MPa;1%.

Foram analisadas amostras retiradas dos provetes do par roda/carril referentes a um ensaio onde se fez variar o parâmetro pressão de contacto – 1 m/s; 600 MPa; 1%. Na

Figura 4.25 encontra-se ilustrada a evolução da dureza das amostras referentes aos elementos roda e carril em função da profundidade.

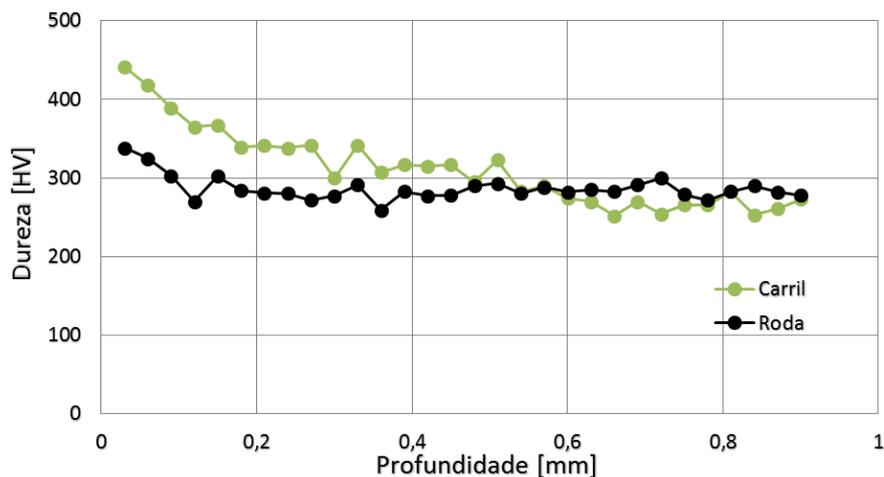


Figura 4.25. Evolução da dureza com a profundidade para o par roda/carril, do ensaio: 1 m/s;600MPa;1%.

Analisando as curvas da evolução de dureza dos elementos roda e carril, é possível observar novamente um encruamento em ambos os casos quando se varia a profundidade desde a superfície da amostra até cerca de 200 μm , sendo mais acentuado este fenómeno no caso do carril onde se verifica um decréscimo de dureza desde aproximadamente 450 HV para 300 HV. De salientar novamente a dureza superficial superior do elemento carril, explicada pela percentagem superior de carbono do material em relação ao material referente à roda.

Nas micrografias ilustradas pelas Figura 4.26 e Figura 4.27, é possível observar uma camada onde se observa uma deformação do grão em cerca de 200 μm de profundidade, o que aliado ao gráfico representado na Figura 4.25, comprova o encruamento sofrido por ambos os elementos. De notar ainda um encruamento mais evidente quando se varia a pressão de contacto em relação ao parâmetro velocidade linear.

Importante ainda referir que na Figura 4.27, se consegue observar na microestrutura outro fenómeno referido nesta dissertação que afeta o sector ferroviário, a corrugação.

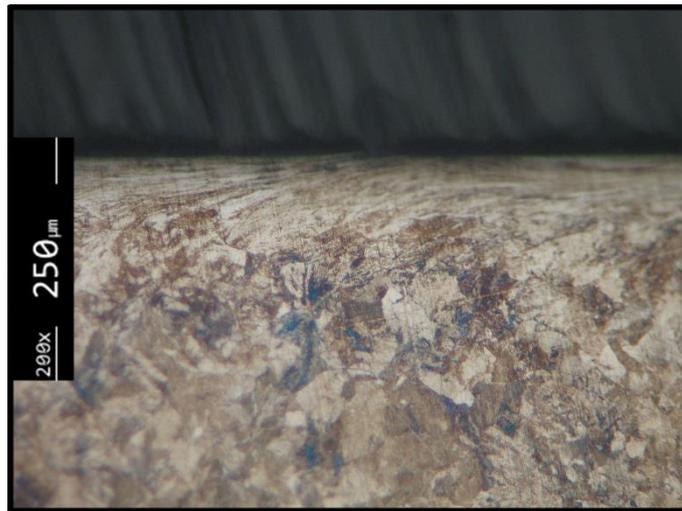


Figura 4.26. Micrografia do provete representativo da zona de contacto do carril, do ensaio: 1m/s;600MPa;1%.



Figura 4.27. Micrografia do provete representativo da zona de contacto da roda, do ensaio: 1m/s;600MPa;1%.

Para finalizar, foram analisadas amostras dos provetes referentes ao par roda/carril de um dos ensaios onde se fez variar a percentagem de escorregamento – 1 m/s; 500 MPa; 0,2 %. A evolução da dureza em função da profundidade das amostras retiradas está representada na Figura 4.28.

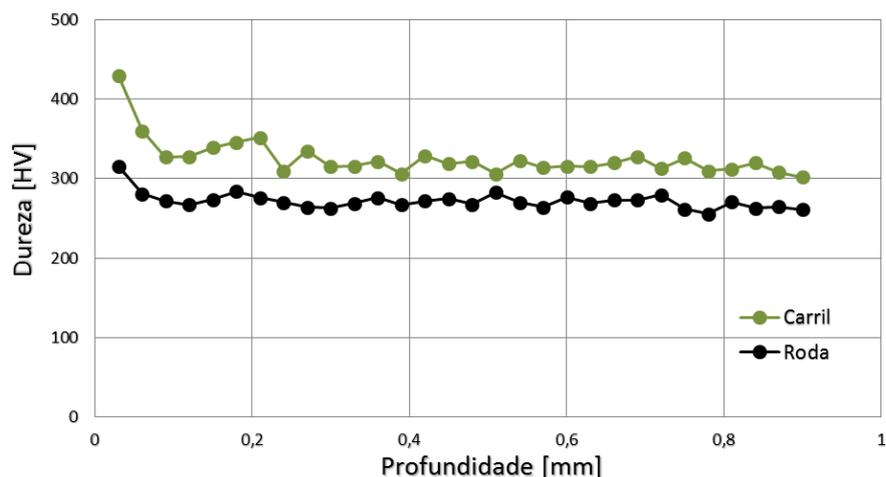


Figura 4.28. Evolução da dureza com a profundidade para o par roda/carril, do ensaio: 1 m/s;500MPa;0,2%.

As curvas referentes à evolução da dureza em função da profundidade de cada um dos elementos mostra para os primeiros 100 μm de profundidade encruamento. É possível verificar que para o elemento representativo do carril se verifica um decréscimo de dureza de cerca de 430 HV para aproximadamente 320 HV na profundidade indicada, enquanto que no elemento roda, apesar de não ser um decréscimo tão acentuado, cerca de 50 HV, se comprova novamente a presença de encruamento. Assim, é novamente evidente a dureza superior do material do carril em relação à roda, facto explicado pela mais elevada percentagem de carbono presente no material referente ao carril.

Quanto às micrografias apresentadas nas Figura 4.29 e Figura 4.30, ilustram novamente na camada superficial das amostras a deformação de grão. De notar, que para este ensaio em que se reduziu a percentagem de escorregamento para 2% ser mais evidente a presença de corrugação em ambas as amostras, estando mais evidenciada na amostra retirada do provete representativo do carril, Figura 4.30.



Figura 4.29. Micrografia do provete representativo da zona de contacto do carril, do ensaio: 1m/s;500MPa;0,2%.

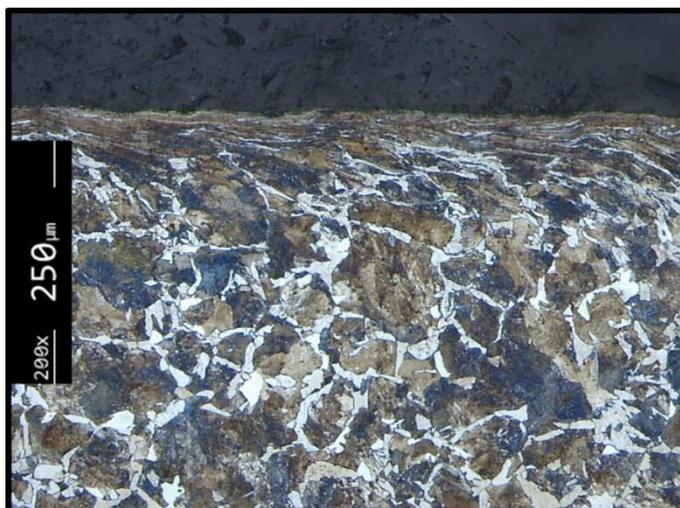


Figura 4.30. Micrografia do provete representativo da zona de contacto da roda, do ensaio: 1m/s;500MPa;0,2%.

5. MÉTODO DE PREVISÃO DE DESGASTE

Concluída a análise de resultados dos ensaios de rolamento/escorregamento realizados, conjugando com a ferramenta de previsão de desgaste iniciada no estudo realizado por Sadio, D. (2013), “Atrito e desgaste em contacto roda/carril de veículos ferroviários com movimento rolamento/escorregamento e escorregamento puro”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, foi possível complementar a ferramenta de previsão da evolução do desgaste na para roda/carril.

Baseado no modelo de desgaste desenvolvido por Archard, referido no capítulo 3 da presente dissertação, surge o método de previsão proposto. Um valor *standard* da taxa específica de desgaste é assumido e o seu valor é corrigido para diferentes condições de contacto. As condições *standard* ponderadas foram as seguintes, 1 m/s; 500 MPa; 1%. A fim de corrigir os efeitos da velocidade linear, da pressão de contacto e da % de escorregamento são tidos em conta três fatores de sensibilidade. O modelo concebe a capacidade de calcular fatores de velocidade linear, pressão de contacto e escorregamento para diferentes condições de contacto em relação à condição *standard*. A equação 5.1 traduz a influência dos diferentes fatores de sensibilidade na taxa específica de desgaste.

$$k = \frac{k_{standard}}{f_{velocidade} \times f_{pressão} \times f_{escorregamento}} \quad (5.1)$$

Posto isto, foram determinados os diferentes valores de $k_{standard}$. Para o carril, $k_{standard} = 5,68 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$, e para a roda, $k_{standard} = 3,47 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$.

A metodologia seguida no estabelecimento do modelo de previsão foi semelhante à anteriormente utilizada no estudo realizado por Sadio, D. (2013), “Atrito e desgaste em contacto roda/carril de veículos ferroviários com movimento rolamento/escorregamento e escorregamento puro”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, e pode-se resumir do seguinte modo:

- i. Identificaram-se como parâmetros determinantes do comportamento ao desgaste a velocidade linear, a pressão de contacto e a percentagem de escorregamento;
- ii. Estabeleceu-se o domínio da variação de cada uma das variáveis em função do compromisso entre a sua variação na aplicação prática que se pretende estudar e os limites admitidos pelo equipamento experimental disponível. Neste aspeto, e porque este trabalho aparece na sequência de outros anteriores, os pontos experimentais escolhidos vieram complementar o trabalho anteriormente realizado;
- iii. Desenhou-se o plano de experiências que permitisse isolar a variação de cada uma das variáveis mantendo constantes as outras;
- iv. O ajuste gráfico da variação da taxa específica de desgaste com cada um dos parâmetros permite avaliar experimentalmente a variação da derivada parcial da taxa específica de desgaste com cada um dos parâmetros;
- v. A precisão do valor da taxa de desgaste é feita fixando um valor central do domínio (definido como condição *standard*) e utilizando funções de peso que traduzem a sensibilidade da variação de cada um dos parâmetros em estudo.

O tratamento foi feito separadamente para cada um dos materiais do par tribológico, permitindo a previsão da taxa específica de desgaste quer para o carril quer para a roda.

5.1. Fatores de Sensibilidade

Os fatores de sensibilidade que afetam as diferentes condições são calculados com base nos resultados de desgaste dos ensaios de rolamento/escorregamento realizados e com os resultados obtidos no estudo realizado por Sadio, D. (2013), “Atrito e desgaste em contacto roda/carril de veículos ferroviários com movimento rolamento/escorregamento e escorregamento puro”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra. Nos próximos subcapítulos são apresentados os resultados utilizados no cálculo de cada um dos fatores.

5.1.1. Fatores de velocidade linear

Nas Figura 5.1 e Figura 5.2, estão representados os pontos que simbolizam a relação entre a taxa específica de desgaste do ensaio *standard* e a taxa específica de desgaste de cada ensaio realizado.

Para o parâmetro velocidade linear, os fatores referentes a este parâmetro são calculados pelas equações 5.2, que foi alcançada aproximando leis de potência, e 5.3 onde se usou uma função polinomial de segundo grau.

$$f_{\text{velocidade roda}} = -0,8808 \times vel^2 + 1,3113 \times vel + 0,5746 \quad (5.2)$$

$$f_{\text{velocidade carril}} = 0,9548 \times vel^{0,3788} \quad (5.3)$$

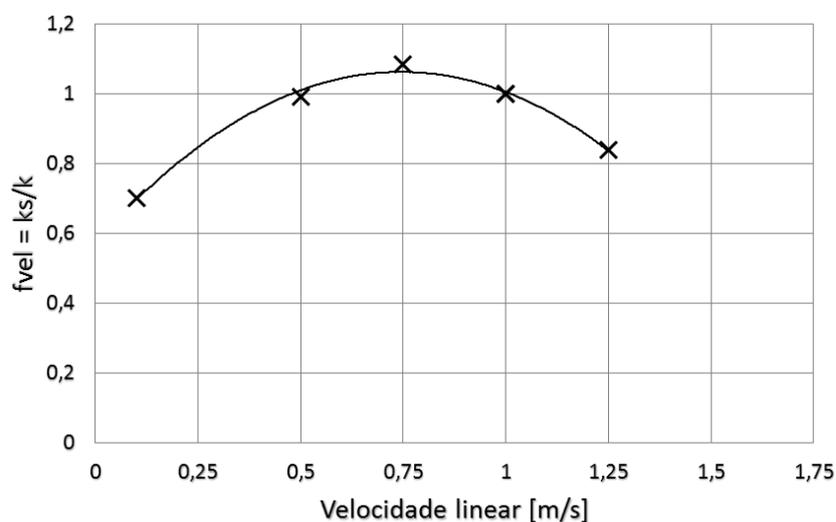


Figura 5.1. Fator de velocidade linear para a roda.

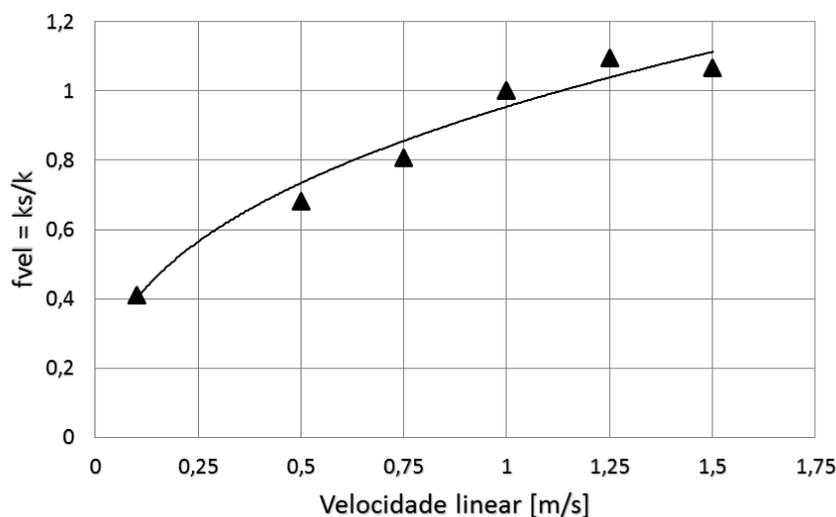


Figura 5.2. Fator de velocidade linear para o carril.

5.1.2. Fatores de pressão

Quanto à pressão de contacto, estão representados nas Figura 5.3 e Figura 5.4 que simbolizam a relação entre a taxa específica de desgaste com as condições *standard* e a taxa específica de desgaste dos ensaios realizados.

A equação que permite calcular o fator de pressão está representada pela equação 5.4. Esta equação representa a sensibilidade da variação da taxa específica de desgaste em função dos resultados obtidos nos ensaios realizados.

$$f_{\text{pressão roda}} = 96,546 \times \text{pressão}^{-0,752} \quad (5.4)$$

Quanto ao carril, as equações 5.5 e 5.6 correspondem ao ajustamento de duas leis diferentes de potência. Os ajustamentos correspondem a uma lei de potência para pressões inferiores a 500 MPa, e a uma lei de potência para pressões superiores a 500 MPa.

$$\text{Pressão} < 500 \text{ MPa} \rightarrow f_{\text{pressão carril}} = 0,0147 \times \text{pressão}^{0,6715} \quad (5.5)$$

$$\text{Pressão} > 500 \text{ MPa} \rightarrow f_{\text{pressão carril}} = 612,28 \times \text{pressão}^{-1,056} \quad (5.6)$$

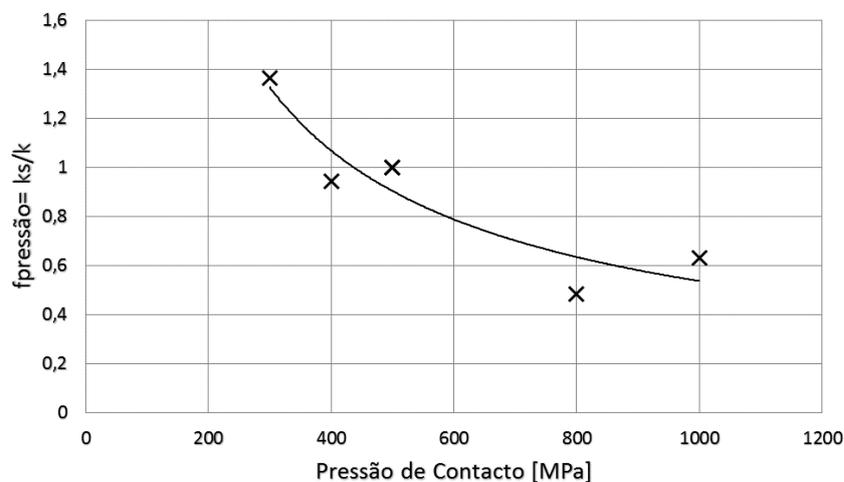


Figura 5.3. Fator de pressão para a roda.

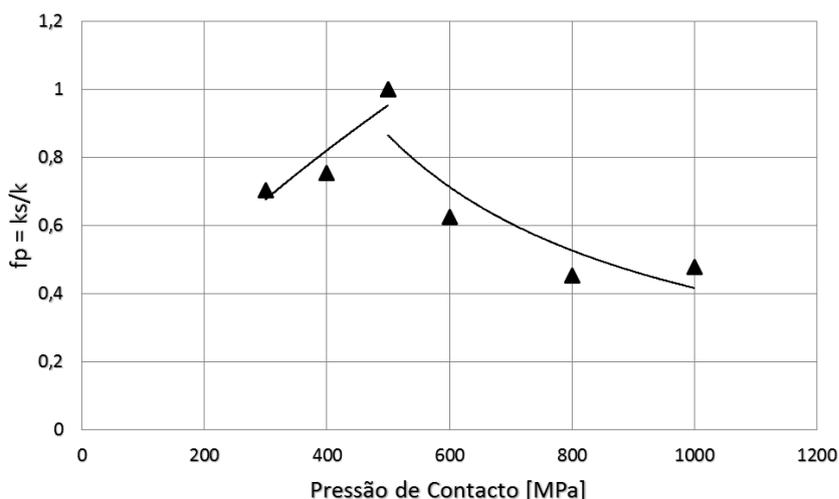


Figura 5.4. Fator de pressão para o carril.

5.1.3. Fatores de escorregamento

Os pontos representados nos gráficos das Figura 5.5 e Figura 5.6, traduzem a relação entre a taxa específica de desgaste do ensaio *standard* e a taxa específica de desgaste do ensaio correspondente.

O fator de escorregamento para a roda pode ser calculado pela equação 5.7 e corresponde à linearização dos resultados alcançados nos ensaios.

$$f_{\text{escorregamento roda}} = 0,581 \times \text{escorregamento} + 0,4298 \quad (5.7)$$

Quanto ao fator de escorregamento para o carril pode ser calculado pela equação 5.8. Até valores de escorregamento de 1,25%, a curva representa uma linearização dos resultados obtidos. Para valores superiores, o fator considera-se constante visto os valores obtidos nos ensaios realizados nesta dissertação e os valores conjugados com os resultados obtidos nos trabalhos desenvolvidos por Sadio, D. (2013), “Atrito e desgaste em contacto roda/carril de veículos ferroviários com movimento rolamento/escorregamento e escorregamento puro”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra e Marta, P. (2012), “Estudo do desgaste em contactos roda/carril em veículos ferroviários”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.

$$f_{\text{escorregamento carril}} = 0,9037 \times \text{escorregamento} + 0,0936 \quad (5.8)$$

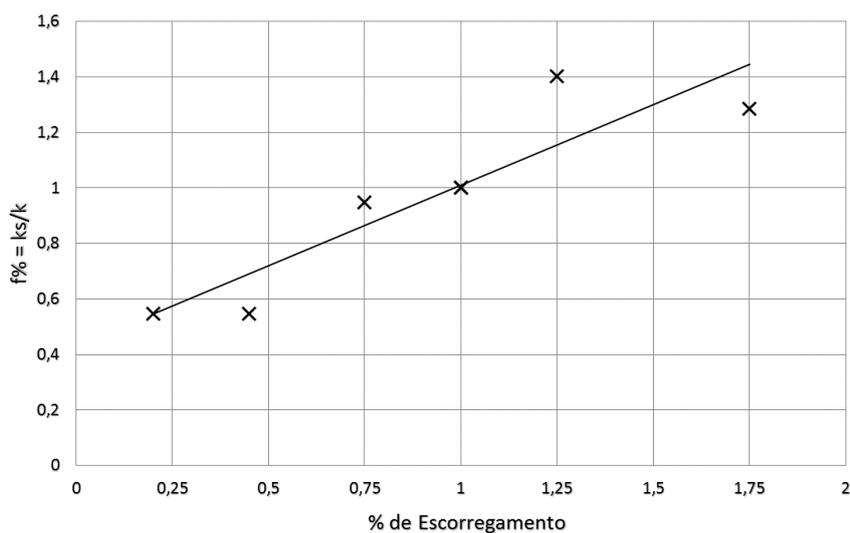


Figura 5.5. Fator de escorregamento para a roda.

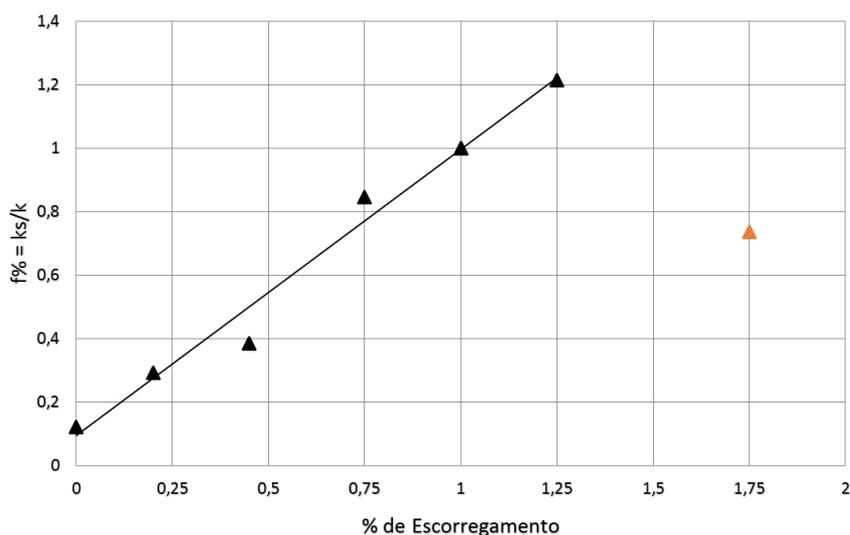


Figura 5.6. Fator de escorregamento para o carril.

5.2. Verificação do método

A fim de averiguar a fiabilidade do método desenvolvido, realizaram-se previsões através da ferramenta de previsão de desgaste proposta. Os resultados obtidos equiparados aos resultados obtidos experimentalmente.

5.2.1. Velocidade linear

Nas Figura 5.7 e Figura 5.8, estão representadas as curvas que ilustram os resultados alcançados através das previsões baseadas no método de desgaste proposto.

Nestes gráficos observa-se a evolução dos valores da taxa específica de desgaste, obtidos pelo método de previsão – curva a preto – e os valores da taxa específica de desgaste referentes aos ensaios realizados com influência da velocidade linear – pontos a vermelho.

Verifica-se uma boa correlação entre os valores teóricos estabelecidos e os valores obtidos experimentalmente, quando estudada a influência no elemento carril. Quanto à roda, observa-se uma boa aproximação dos valores que apresentavam uma velocidade linear superior a 0,75 m/s.

A conjugação dos resultados alcançados na presente dissertação com os resultados obtidos no trabalho desenvolvido por Sadio, D. (2013), “Atrito e desgaste em contacto roda/carril de veículos ferroviários com movimento rolamento/escorregamento e escorregamento puro”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, garantem maior fiabilidade ao método de previsão de desgaste proposto.

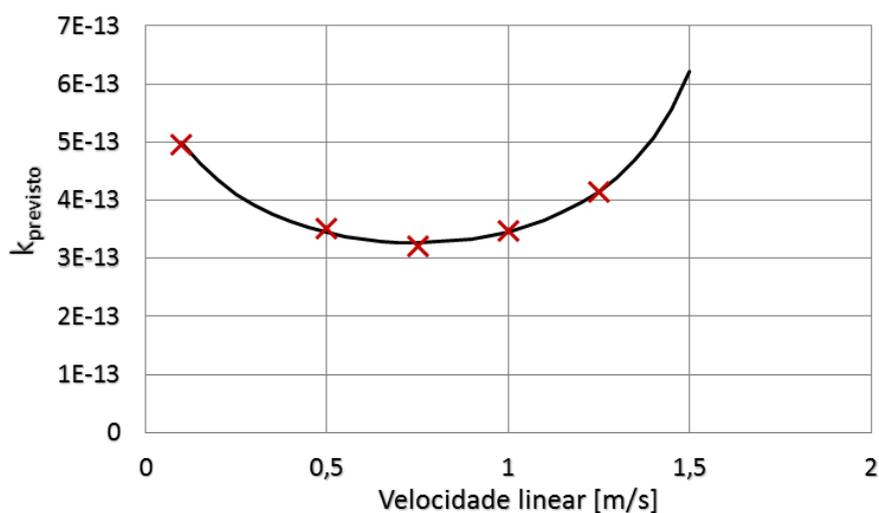


Figura 5.7. Previsões da taxa específica de desgaste comparativamente aos valores dos ensaios, em função da velocidade linear, na roda.

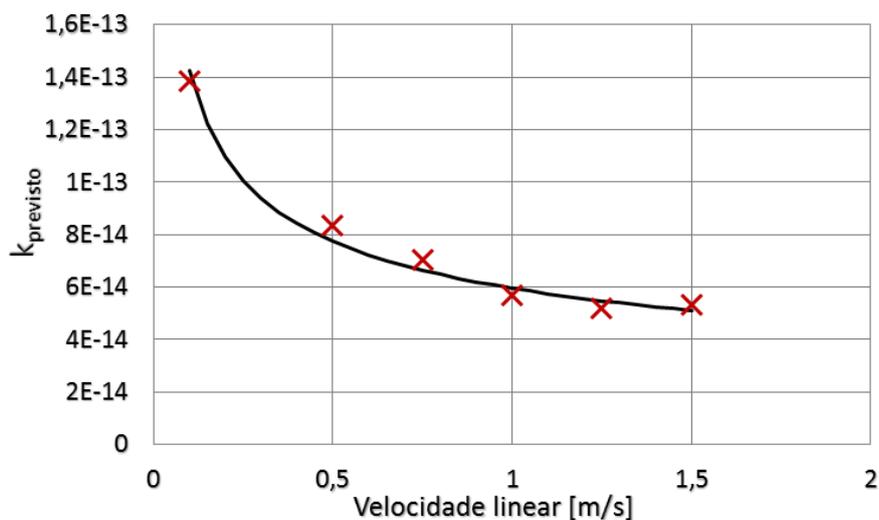


Figura 5.8. Previsões da taxa específica de desgaste comparativamente aos valores dos ensaios, em função da velocidade linear, no carril.

5.2.2. Pressão de contacto

Realizando o mesmo procedimento descrito anteriormente, mas desta vez fazendo variar a pressão de contacto, obtiveram-se as curvas ilustradas nas Figura 5.9 e Figura 5.10. Observando a curva referente à roda, verifica-se um ligeiro desfasamento entre os valores obtidos pelo método de previsão de desgaste proposto e os valores obtidos nos ensaios. Os pontos analisados podem não ser suficientes para garantir uma boa fiabilidade do método e é sugerida a realização de ensaios com pressões de contacto diferentes a fim de garantir uma melhor fiabilidade do método proposto.

Quanto ao carril, é possível observar que os pontos representativos dos resultados alcançados laboratorialmente, aproximam-se claramente dos valores teóricos e seguem a tendência da curva representativa da evolução da taxa específica de desgaste em função da pressão de contacto, obtida através do método de previsão de desgaste proposto.

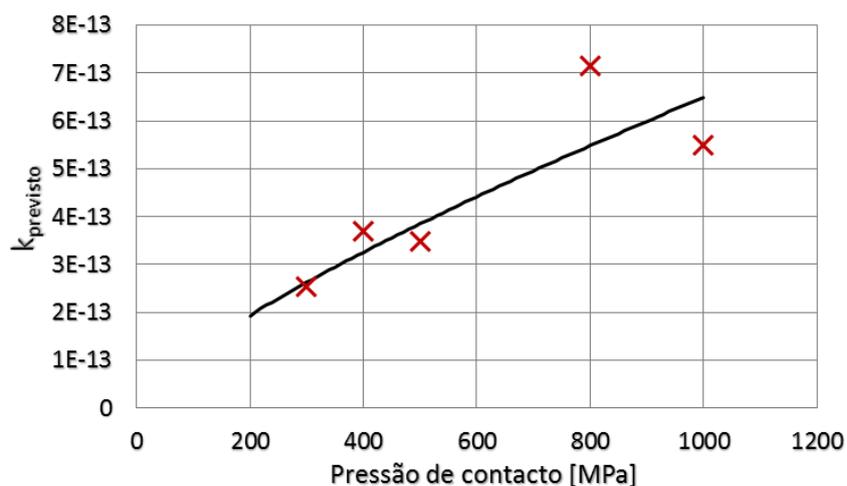


Figura 5.9. Previsões da taxa específica de desgaste comparativamente aos valores dos ensaios, em função da pressão de contacto, na roda.

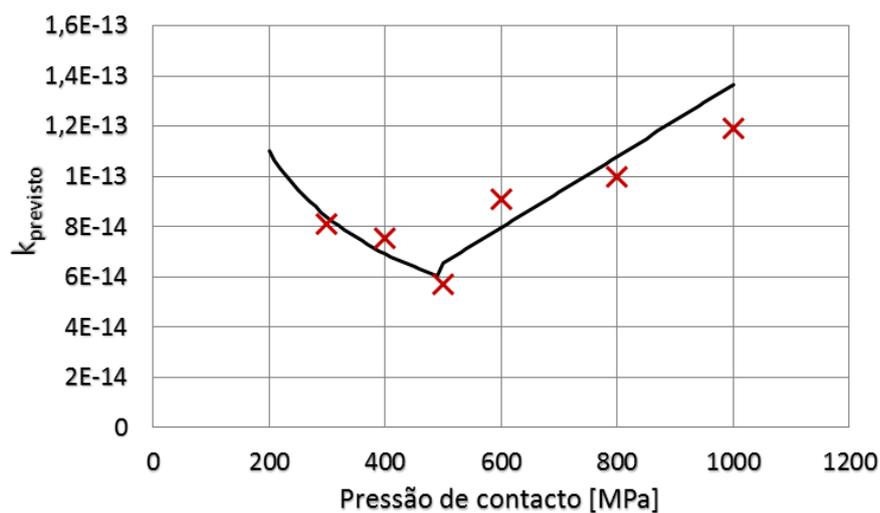


Figura 5.10. Previsões da taxa específica de desgaste comparativamente aos valores dos ensaios, em função da pressão de contacto, no carril.

5.2.3. % de Escorregamento

Nas figuras Figura 5.11 e Figura 5.12, apresentam-se os resultados das previsões feitas, em função da variação da percentagem de escorregamento. Tal como tinha sido referido quanto ao parâmetro velocidade linear, neste caso, os valores obtidos experimentalmente nos ensaios de rolamento/escorregamento, aproximam-se dos valores teóricos calculados pelo método de previsão de desgaste proposto, tanto para a roda como para o carril.

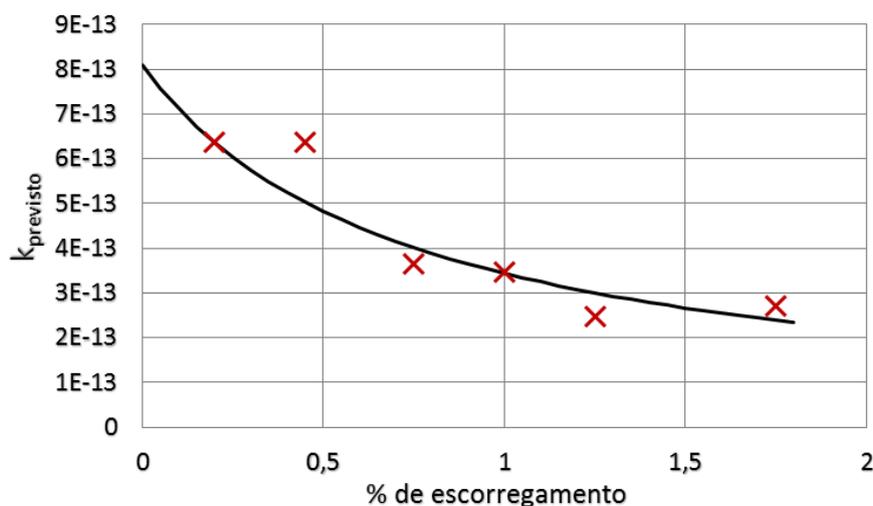


Figura 5.11. Previsões da taxa específica de desgaste comparativamente aos valores dos ensaios, em função da % de escorregamento, na roda.

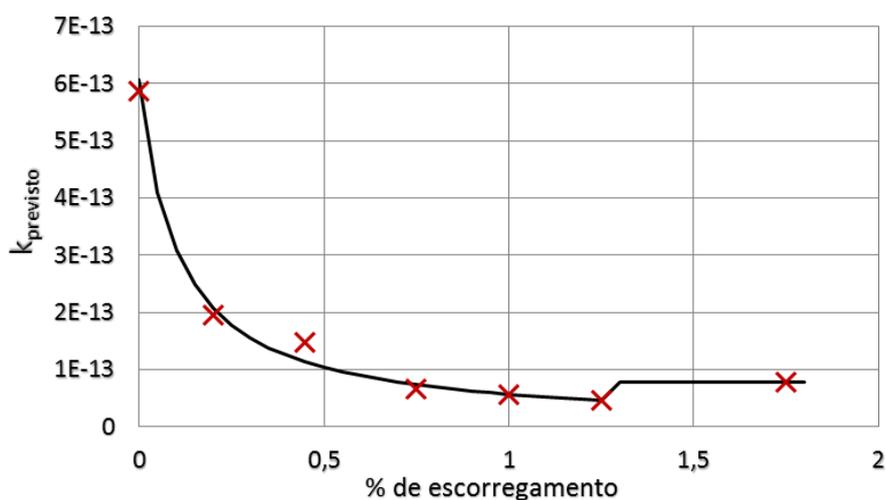


Figura 5.12. Previsões da taxa específica de desgaste comparativamente aos valores dos ensaios, em função da % de escorregamento, no carril.

5.2.4. Erro de previsão

Após ser realizada a comparação entre os valores dos resultados obtidos experimentalmente e os valores previstos calculados através do método de previsão de desgaste, procedeu-se ao cálculo do erro de previsão. Para tal, foram utilizadas as expressões da equação 5.9 e equação 5.10.

$$Erro_{mq} = \frac{\sqrt{(k_{prev} + k_{exp})^2}}{k_{exp}} \tag{5.9}$$

$$Erro_{parâmetro} = \frac{\sum Erro_{mq\ ensaio}}{n} \quad (5.10)$$

Aplicando assim as expressões apresentadas acima foi possível determinar o erro de previsão referente a cada parâmetro alvo de estudo e por fim calcular o valor total do erro referente ao elemento roda e carril. Os valores para o erro de previsão calculados são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Erros de previsão referente aos elementos do par roda/carril.

	Roda	Carril
Velocidade	0,0100	0,0502
Pressão de Contacto	0,1339	0,1140
% Escorregamento	0,1071	0,0624
Erro Total	0,0880	0,0748

Analisando os valores apresentados na Tabela 5.1, é possível verificar que o erro de previsão apresenta valores mais baixos para o parâmetro velocidade linear enquanto que para o fator pressão de contacto para o elemento roda se apresenta como o mais elevado – 0,1339. Este facto pode ser comprovado quando se analisa as figuras representativas das previsões das taxas de desgaste apresentadas no capítulo cinco da presente dissertação. Em relação ao erro de previsão total referente a cada elemento do par roda/carril, é de notar um valor mais elevado para o elemento roda do que para o elemento carril

6. CONCLUSÕES

Na presente dissertação foi possível desenvolver uma ferramenta de previsão de desgaste dos elementos roda e carril de veículos ferroviários. Para isso, foram realizados ensaios laboratoriais que permitissem simular o contacto rolamento/escorregamento do par roda/carril de veículos ferroviários. De salientar ainda que estudos anteriores estiveram na base deste trabalho e contribuíram para o desenvolvimento do método de previsão de desgaste.

Os ensaios de rolamento/escorregamento já realizados em estudos anteriores sustentavam a ferramenta de previsão de desgaste já iniciada. Porém, o método de previsão proposto apresentava algumas fragilidades visto a amostra de resultados ser curta e não fornecer à ferramenta de previsão precisão elevada. Assim, este estudo começou pelo planeamento de ensaios complementares onde se fez variar os parâmetros velocidade linear, pressão de contacto e percentagem de escorregamento, a fim de estudar a sua influência, assumindo as condições *standard* iniciais – 1m/s;500MPa;1. Os resultados destes ensaios permitiram desenvolver através de modelos numéricos fatores de sensibilidade mais exatos que permitiram aumentar a fiabilidade do modelo de previsão proposto.

Seguidamente foram realizados os ensaios de rolamento/escorregamento, onde se controlaram as três variáveis definidas anteriormente – velocidade linear, pressão de contacto. Os resultados dos ensaios em que se fez variar a velocidade linear mostraram que o aumento do parâmetro velocidade traduzia um aumento no volume desgastado pelo elemento roda e um decréscimo no elemento carril. Esta evolução relativa a cada elemento é verificada também quanto à taxa específica de desgaste e quanto à taxa energética de desgaste. Quanto ao parâmetro pressão de contacto, foi possível verificar um aumento significativo de volume desgastado por ambos os elementos quando se fez variar a pressão de contacto de uma forma crescente. O ensaio relativo à pressão de contacto de 800 Mpa apresentou valores de desgaste claramente superiores aos restantes ensaios realizados. Quanto às taxas específica e energética de desgaste, apresentam comportamentos semelhantes para ambos os elementos do par roda/carril, onde se verificam valores

semelhantes para pressões compreendidas entre 400 e 600 Mpa, porém para valores mais elevados de pressão as taxas apresentam uma tendência claramente crescente. Quando se fez variar a percentagem de escorregamento, o volume desgastado em ambos os elementos apresentam uma tendência crescente conforme se aumentava o valor da percentagem de escorregamento. Por sua vez, a taxa específica de desgaste com o aumentar do parâmetro em estudo apresentava uma tendência decrescente, assumindo o seu valor mais elevado para a percentagem de escorregamento mais reduzida, 0,2%. Porém a taxa energética de desgaste apresentou um comportamento contrário ao da taxa específica de desgaste, ou seja, uma tendência crescente que acompanhava o aumento da percentagem de escorregamento.

Após a realização dos ensaios foram retiradas amostras de três pares de provetes representativos dos elementos roda e carril para se realizar ensaios de dureza e análises metalográficas, onde se conseguiu observar fenómenos de desgaste presentes. Em todas as amostras foi possível verificar uma deformação de grão junto à superfície de contacto, facto esse que aliado à elevada dureza observada nesta zona, traduz o encruamento sofrido pelos provetes. De salientar que as amostras que apresentavam maior encruamento continham grandes deformações de grão. Quanto ao fenómeno corrugação, foi evidenciado mais claramente na superfície das amostras retiradas dos provetes sujeitos a uma percentagem de escorregamento de 0,2%. Ainda assim, nas amostras relativas aos provetes ensaiados com a pressão de contacto de 600 MPa, também foi possível observar o fenómeno corrugação na superfície.

Por fim, complementando os resultados dos ensaios de rolamento/escorregamento de estudos anteriores com os resultados alcançados neste trabalho, desenvolveu-se um método de previsão de desgaste. Para a elaboração desta ferramenta de previsão foram desenvolvidos modelos numéricos capazes de calcular fatores de sensibilidade relativos aos parâmetros definidos inicialmente – velocidade linear, pressão de contacto e percentagem de escorregamento. O método de previsão associa a taxa específica de desgaste para as condições *standard*, 1m/s;500MPa;1%, com os fatores referidos, sendo possível verificar assim a sensibilidade da variação de cada um dos parâmetros alvos de estudo na taxa específica de desgaste prevista pelo método. Para finalizar foram reproduzidos resultados alcançados pelo modelo de previsão de desgaste, que posteriormente foram comparados aos valores obtidos experimentalmente, observando-se

uma semelhança entre ambos, o que atesta a fiabilidade do método proposto e desenvolvido nesta dissertação. Por sua vez, após o cálculo do erro de previsão foi possível verificar que o parâmetro que apresentou menor erro foi a velocidade linear. Porém o valor máximo de erro foi 0,1339, referente ao parâmetro pressão de contacto no elemento roda. Quanto ao erro total referente a cada elemento apresenta os valores 0,0880 para o elemento roda e 0,0748 para o elemento carril, sendo este último inferior ao primeiro respetivamente. Os valores gerais do erro são aceitáveis, visto não se apresentarem demasiado elevados.

Concluído o presente estudo, são sugeridas algumas propostas para trabalhos futuros:

1. Realizar ensaios com uma gama maior de pressão de contacto e percentagem de escorregamento para se obter uma melhor aproximação dos fatores respetivos.
2. Estudar outros parâmetros que influenciem o desgaste sofrido pelos elementos roda e carril de veículos ferroviários.
3. Estudar o efeito da lubrificação no contacto roda/carril.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Archard, 1953] Archard, J. F., “Contact and rubbing of flat surfaces”, *Journal of applied physics*, Volume 24, Number 8, 981-988.
- [Barwell, 1958] Barwell, F. T., “Wear of metals”, *Wear*, 1 (1958) 317-332.
- [Bhushan, 2013] Bhushan, B., “Introduction to Tribology”, 2ª Edição, John Wiley & Sons, Ltd.
- [Blau, 1992] Blau, P. J., “ASM Handbook, Volume 18 – Friction, Lubrication and Wear Technology”, ASM International.
- [Braghin et al., 2006] Braghin, F., Lewis, R., Dwyer-Joyce, R. S., Bruni, S., “A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear”, *Wear* 261 (2006) 1253-1264.
- [Callister, 2007] Callister, W. D., “Materials Science and Engineering : An Introduction”, 7ª Edição, John Wiley & Sons, Inc.
- [Clarke, 2008] Clarke, M. (2008), “Wheel rolling contact fatigue (RCF) and rim defects investigation to further knowledge of the causes of the RCF and to determine control measures”, *RSSB Wheel Steel Guide*.
- [Czichos, 2000] Czichos, H. (2000), “Tribology: A systems approach to the Science and Technology of friction, lubrication and wear”, Elsevier Science.
- [Hempelmann et al., 1996] Hempelmann, K., Knothe, K., “An extended linear model for the prediction of short pitch corrugation”, *Wear* 191 (1996) 161-169.
- [Jendel, 2002] Jendel, T., “Prediction of wheel profile wear- comparisons with field measurements”, *Wear* 253 (2002) 89-99.
- [Lewis R. et al., 2004] Lewis, R., Olofsson, U., “Mapping rail wear regimes and transitions”, *Wear* 257 (2004) 721-729.
- [Lewis R. et al., 2004] Lewis, R., Dwyer-Joyce, R. S., “Wear mechanisms and transitions in railway wheel steels. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers”, Part J: *Journal of Engineering Tribology*, 2004, 218 (6), 467-478.
- [Ludema, 1995] Ludema, K. C., “Mechanism-based modeling of friction and wear”, *Wear* 200 (1996) 1-7.
- [Marta, 2012] Marta, P. (2012), “Estudo do desgaste em contactos roda/carril em veículos ferroviários”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [Olofsson et al., 2003] Olofsson, U., Telliskivi, T., “Wear, plastic deformation and friction of two rail steels – a full scale test and a laboratory study”, *Wear* 254 (2003) 80-93

-
- [Olofsson et al., 2006] Olofsson, U., Lewis, R. (2006), “Tribology of the Wheel-Rail Contact. Handbook of Railway Vehicle Dynamics”, Taylor & Francis (Capítulo 5).
- [Pilkey, 2005] Pilkey, W. D., “Formulas for Stress, Strain and Structural Matrices”, 2ª Edição, John Wiley & Sons, Inc.
- [Ramalho et al., 2013] Ramalho, A., Esteves, M., Marta, P., “Friction and wear behaviour of rolling-sliding steel contacts”, *Wear* 302 (2013) 1468-1480.
- [Sadio, 2013] Sadio, D. (2013), “Atrito e desgaste em contacto roda/carril de veículos ferroviários com movimento rolamento/escorregamento e escorregamento puro”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [Tassini et al., 2010] Tassini, N., Quost, X., Lewis, R., Dwyer-Joyce, R., Ariardo, C., Kuka, N., “A numerical model of twin disc test arrangement for the evaluation of railway wheel wear prediction methods”, *Wear* 268 (2010) 660-667.
- [Tunna et al., 2006] Tunna, J., Sinclair, J., Perez, J. (2006), “Development of a wheel wear and rolling contact fatigue model”, UK Proprietary 05-009.
- [Tyfour et al., 1994] Tyfour, W. R., Beynon, J. H. (1994), “The effect of rolling direction reversal on the wear rate and wear mechanism of perlitic rail steel”, *Tribology International*, Butterworth-Heinemann Ltd.
- [Tyfour et al., 1995] Tyfour, W. R., Beynon, J. H., Kapoor, A., “The steady state wear behaviour of perlitic rail steel under dry rolling-sliding contact conditions”, *Wear* 180 (1995) 79-89.
- [Wu et al., 2005] Wu, T. X., Thompson, D. J., “An investigation into rail corrugation due to micro-slip under multiple wheel/rail interactions”, *Wear* 258 (2005) 1115-1125.

ANEXO A

Conforme os procedimentos, medições da massa dos provetes foram realizadas antes e após os ensaios. Ilustrada na Figura A. 1 encontra-se a balança de precisão *A&D GH-202*, usada nas medições. Este equipamento faculta pesagens entre 1mg e 220g. Quando se efetuam pesagens até 51g, a resolução aplicada é de 0,01mg, enquanto que para pesagens superiores a 51g, a resolução passa a assumir o valor 0,1mg.



Figura A. 1. Balança de precisão *A&D GH-202*.

ANEXO B

Os ensaios de dureza foram realizados com o auxílio do durómetro fabricado pela *Struers Duramin*, representado na Figura B. 1. O equipamento faculta medições *Vickers*, *Knoop*, *Brinell* e *Rockwell*. A resolução máxima é de $0,01\mu\text{m}$ e a ampliação máxima de 40x. A duração dos ensaios está contida no intervalo 5 a 999 segundos e suporta cargas aplicadas entre 10 a 2000gf. No presente estudo foram usadas cargas de 200gf ao longo de 15 segundos.

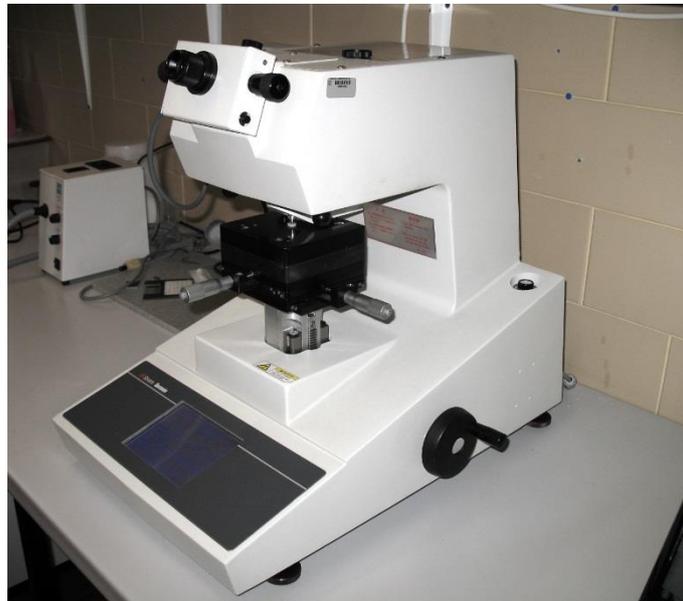


Figura B. 1. Durómetro *Struers Duramin*.

ANEXO C

Para a análise das microestruturas foi usado um microscópio ótico *Zeiss Axiotech*, Figura C. 1. Este equipamento faculta ampliações de 50, 100, 200, 500 e 1000x. Uma câmara digital SLR, anexada ao microscópio, foi utilizada para fotografar as microestruturas.



Figura C. 1. Microscópio ótico *Zeiss Axiotech*.

ANEXO D

As partículas geradas nos ensaios de rolamento/escorregamento foram observadas no microscópio ótico *Nikon Stereo Photo SMZ-10*, Figura D. 1. A iluminação por fibra ótica constatada é proveniente do equipamento *VOLPI Intralux 500*. Acoplada ao microscópio, encontra-se uma máquina fotográfica *Canon PowerShot A620*.



Figura D. 1. Microscópio ótico *Nikon Stereo Photo SMZ-10*.

ANEXO E

As medições dos perfis de rugosidade foram realizadas através de um rugosímetro *Mitutoyo SJ-500*, Figura E. 1. O equipamento contém uma escala compreendida entre $8\mu\text{m}$ e $800\mu\text{m}$ e tem capacidade para uma distância de medição de 50mm. O rugosímetro encontra-se conectado a um computador, que permitiu, através de um *software*, retirar os valores.



Figura E. 1. Rugosímetro *Mitutoyo SJ-500*.