



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Álvaro Manuel Monteiro Almeida

**OTIMIZAÇÃO DO TESTE DE DESGASTE DE  
PRATO DE UMA TRANSMISSÃO DE BICICLETA**

**VOLUME 1**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Produção e Projeto orientada pelo Professor Doutor Luís Miguel Cardoso Vilhena Pereira da Silva e apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologias ao Departamento de Engenharia Mecânica.**

Outubro de 2020



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# Otimização do Teste de Desgaste de Prato de uma Transmissão De Bicicleta

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

## Chainring Wear Test Optimization

Autor

**Álvaro Manuel Monteiro Almeida**

Orientadores

**Luís Miguel Cardoso Vilhena Pereira da Silva**

**Luís Miguel Mendes Figueiredo**

Júri

Presidente	<b>Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho</b> <b>Professor Catedrático da Universidade de Coimbra</b>
Orientador	<b>Engenheiro Luís Miguel Mendes Figueiredo</b> <b>SRAMPort - Transmissões Mecânicas, Lda</b>
Vogais	<b>Professor Doutor Pedro Alexandre de Almeida do Vale</b> <b>Antunes</b> <b>Professor Auxiliar convidado da Universidade de Aveiro</b>

Colaboração Institucional

---

**SRAM.** SRAMPort -  
Transmissões  
Mecânicas, Lda

Coimbra, outubro 2020



“To do something well is so worthwhile that to die trying to do it better cannot be foolhardy. Life is measured in achievement, not in years alone.”

Bruce McLaren

Ao meu avô



## AGRADECIMENTOS

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Ao Senhor Professor Doutor Luís Miguel Cardoso Vilhena Pereira da Silva, pelo apoio, a competência com que me orientou, a disponibilidade, o tempo despendido e os valiosos conhecimentos transmitidos.

À empresa SRAMPort na pessoa do Senhor Engenheiro Luís Miguel Mendes Figueiredo pelos componentes fornecidos, pela informação disponibilizada, pelo apoio no seguimento do processo e pela disponibilidade.

Aos meus pais pelos valores e apoio incondicional, à minha família que esteve sempre presente durante este percurso.

Ao meu avô Álvaro por ser a minha fonte de inspiração e motivação.

Por último, mas não menos importante, à Sofia pelo apoio, pela paciência e confiança que depositou em mim durante esta caminhada.



## RESUMO

O presente trabalho tem como principal objetivo a otimização de um teste de desgaste ao prato de transmissão de uma bicicleta. Este é realizado atualmente na empresa SRAM®, por forma a aproximar os resultados do teste laboratorial realizados com a situação real que acontece no terreno.

Primeiramente, começou-se por verificar os testes existentes e as suas características, em que foi analisada a variabilidade entre testes e componentes. Em segunda análise, foram identificadas as fontes de incerteza presentes no teste e os fatores que influenciam os resultados do mesmo. Finalmente e depois de recolhida toda a informação relativamente aos testes de desgaste existentes, foi feita uma comparação entre teste no terreno e teste laboratorial, em que foram identificadas as principais diferenças e semelhanças entre eles.

**Palavras-chave:** Desgaste, Abrasão, Prato de Transmissão, Bicicleta.



## ABSTRACT

The main objective of the work presented in this thesis is the optimization of the chainring wear test, SRAM®'s internal test in which the main goal is to approximate the results of the laboratory test with what actually happens on the field.

First, we started by analyzing the existing tests and their characteristics, in which the variability between tests and components was analyzed. In a second analysis, the sources of uncertainty present in the test and the factors that influence the results of the test were identified. Finally, and after collecting all the information regarding the existing degassing tests, a comparison was made between field tests and laboratory tests in which the main differences and similarities between them were identified.

**Keywords** Wear, Abrasion, Chainring, Bicycle



# ÍNDICE

ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE TABELAS .....	xi
SIMBOLOGIA E SIGLAS.....	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas .....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO TEÓRICA .....	3
2.1. Evolução da bicicleta .....	3
2.2. Tipos de correntes em bicicletas .....	5
2.3. Condições de funcionamento de correntes .....	6
2.3.1. <i>Cross chaining</i> .....	6
2.3.2. Forma de engrenamento .....	7
2.3.3. <i>Chain suck</i> .....	8
2.4. Mecanismos de desgaste .....	9
2.4.1. Desgaste por adesão.....	12
2.4.2. Desgaste por abrasão .....	13
2.4.3. Desgaste por fadiga .....	14
2.4.4. Desgaste por corrosão.....	15
2.5. Deformação Plástica .....	16
3. SRAM®.....	17
3.1. SRAMPort .....	18
3.1.1. Produtos SRAMPort.....	18
3.1.2. Produtos Grupo SRAM® .....	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
4.1. Materiais .....	21
4.1.1. EDT <i>Wear Test Machine</i> .....	21
4.1.2. CMM ( <i>Coordinate Measuring Machine</i> ) .....	22
4.2. Procedimento para a realização do teste de desgaste .....	23
5. Avaliação do desgaste no sistema de transmissão.....	29
5.1. Tipo de testes de desgaste.....	29
5.1.1. Teste laboratorial .....	30
5.1.2. Teste realizado no terreno.....	32
5.2. Fontes de incerteza.....	33
5.2.1. Medição .....	33
5.2.2. Parâmetros de teste .....	34
5.2.3. Aplicação da pasta abrasiva.....	35
5.3. Fatores influenciadores .....	36
5.3.1. Número de dentes na cassette .....	36
5.3.2. Design da placa interior e do revestimento <i>Hard Chrome</i> .....	36
5.3.3. Velocidade de rotação .....	38

6. Resultados e discussão .....	39
6.1. Testes complementares.....	48
6.1.1. <i>Autoshift</i> .....	48
6.1.2. <i>Efficiency</i> .....	51
7. Conclusões .....	53
REFERÊNCIAS .....	55
ANEXO A.....	57
APÊNDICE A .....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Celerífero (Did you Know, n.d.).....	3
Figura 2.2 - John Starley - Rover Safety (Science Museum Group Collection, n.d.). ....	3
Figura 2.3 - Sistema de Transmissão – SRAM Red eTap (SRAM, n.d.).....	4
Figura 2.4 - Variação do momento torsor com a posição do pedal (Levarda, 2018). ....	5
Figura 2.5 – Diversos componentes de uma corrente de rolos convencional.....	5
Figura 2.6 - Correntes de rolos <i>bushingless</i> (Pinkbike, 2020). ....	6
Figura 2.7 - <i>Cross Chaining</i> (WickWerks, 2018). ....	7
<b>Figura 2.8</b> - Engrenamento num prato desgastado (Brown & Allen, 2016). ....	7
Figura 2.9 – <i>Chain suck</i> (Open Cycle, 2016). ....	8
<b>Figura 2.10</b> - Representação dos tipos de degaste (Kato & Adachi, 2001).....	9
<b>Figura 2.11</b> - Representação da variação da rugosidade da superfície com a distância de escorregamento (Kato & Adachi, 2001).....	10
Figura 2.12 - Tendência de formação de ligações de alguns pares metálicos. ....	12
<b>Figura 2.13</b> - Degaste por abrasão, (a) de um material dúctil, (b) de um material frágil (Kato & Adachi, 2001).....	13
<b>Figura 2.14</b> – Esquema mostrando o mecanismo de degaste por abrasão: (a) abrasão a dois corpos ou riscagem, (b) abrasão a três corpos ou rolamento (Hutchings & Shipway, 2017).....	14
Figura 2.15 - Geometria de uma partícula abrasiva (Trezona et al., 1999). ....	14
Figura 2.16 – <i>Micropitting</i> (Errichello, 2011).....	15
<b>Figura 2.17</b> - Imagem esquemática de Degaste por corrosão (Kato & Adachi, 2001). ....	15
Figura 2.18 - (a) deformação unicamente elástica (b) deformação elástica e deformação plástica(Dowling, 2019). ....	16
Figura 3.1 – Marcas do grupo SRAM®. ....	17
Figura 3.2 - Localização das várias fábricas e escritórios da empresa. ....	17
Figura 3.3 - Correntes SRAM®. ....	18
Figura 3.4 - Rodas Zipp®.....	18
Figura 3.5 - Componentes produzidos pelas várias marcas.....	19
Figura 4.1 - Modelo de: (a) prato de transmissão; (b) cassete, utilizados no presente estudo. .....	21
Figura 4.2 - Elementos da Máquina. ....	22
Figura 4.3 - Sistema de sondagem (Mitutoyo, n.d.). ....	22
<b>Figura 4.4</b> - CMM (Mitutoyo, n.d.).....	22

---

Figura 4.5 Sirmaf® EDT Wear Test Machine (SIRMAF, n.d.) .....	23
<b>Figura 4.6</b> - Configuração do detetor laser.....	26
Figura 5.1 - Pormenor do desgaste nas placas externas e nos pinos (Figueiredo, 2009). ...	29
Figura 5.2 - Evolução do desgaste lateral (a) 0h de teste (b) 42h de teste. ....	30
Figura 5.3 – Correlação em número de dentes e desgaste .....	31
Figura 5.4 – Tempo de utilização de cada relação de transmissão. ....	32
Figura 5.5 - Representação do procedimento de referenciação da medição do prato.....	34
Figura 5.6 - Parâmetros da máquina.....	35
Figura 5.7 – Curvas de variação de caudal da bomba peristáltica. ....	35
Figura 5.8 – Rebarba formada durante o teste. ....	36
Figura 5.9 - Imagens microscópicas da camada do revestimento Hard Chrome, (a) eixos, (b) placas .....	37
Figura 5.10 - Design das placas internas testados.....	37
Figura 6.1 - Identificação numérica dos dentes examinados nos testes. ....	40
Figura 6.2 - Taxa de desgaste da corrente em relação à redução por dente.....	42
Figura 6.3 - Redução de área por dente em relação ao tempo de teste. ....	42
Figura 6.4 - Perfis de desgaste lateral. ....	43
Figura 6.5 - Evolução do desgaste no <i>load flank</i> (70rpm/7h). ....	44
Figura 6.6 - Evolução do desgaste no <i>load flank</i> (80rpm/7h). ....	44
Figura 6.7 - Evolução do desgaste no <i>load flank</i> , dentes perpendiculares ao pedal (FDT#1). .....	45
Figura 6.8- Evolução do desgaste no <i>load flank</i> , dentes perpendiculares ao pedal (FDT#2). .....	45
Figura 6.9 - Aspeto visual do desgaste presente no dente nº1 (70rpm/7h). ....	45
Figura 6.10 - Aspeto visual do desgaste presente no dente nº10 (70rpm/7h). ....	45
Figura 6.11 - Aspeto visual do desgaste presente no dente nº1 (80rpm/7h). ....	46
Figura 6.12 - Aspeto visual do desgaste presente no dente nº10 (80rpm/7h). ....	46
Figura 6.13 - Aspeto visual do desgaste presente no dente nº1 (FDT#1). ....	46
Figura 6.14 - Aspeto visual do desgaste presente no dente nº10 (FDT#1). ....	46
Figura 6.15 - Aspeto visual do desgaste presente no dente nº1 (FDT#2). ....	46
Figura 6.16 - Aspeto visual do desgaste presente no dente nº10 (FDT#2). ....	46
Figura 6.17 - Desgaste no <i>load-flank</i> . ....	48
Figura 6.18 - Esquema do teste de <i>Autoshift</i> . ....	49

---

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Posicionamento do detetor laser.....	26
Tabela 5.1 - Comparação de testes ao mesmo componente. ....	31
Tabela 5.2 - Influência da corrente no desgaste. ....	31
Tabela 5.3 - Diferenças entre laboratório e terreno. ....	33
Tabela 5.4 - Desgaste provocado pelos diferentes designs testados.....	38
Tabela 5.5 - Variação dos parâmetros com alteração da velocidade de rotação. ....	38
Tabela 6.1 - Medições do prato exterior testado em terreno (FDT#1).....	39
Tabela 6.2 - Medições do prato interior testado em terreno (FDT#1).....	39
Tabela 6.3 - Medições do prato exterior testado em terreno (FDT#2).....	39
Tabela 6.4 - Medições do prato interior testado em terreno (FDT#2).....	39
Tabela 6.5 - Parâmetros dos testes.....	40
Tabela 6.6 - Medições do prato exterior testado em laboratório (80rpm/7h).....	41
Tabela 6.7 - Medições do prato exterior testado em laboratório (70rpm/24h).....	41
Tabela 6.8 - Medições do prato exterior testado em laboratório (70rpm/7h).....	41
Tabela 6.9 - Relação entre taxa de desgaste por dente no terreno e no laboratório (mm <sup>2</sup> ). 43	
Tabela 6.10 - Resultados do teste <i>Autoshift Inboard</i> (FDT#1). ....	49
Tabela 6.11 - Resultados do teste <i>Autoshift Inboard</i> (FDT#2). ....	50
Tabela 6.12 - Resultados do teste <i>Autoshift Inboard</i> (80rpm/7h) ....	50
Tabela 6.13 - Resultados do teste <i>Efficiency</i> (FDT#1).....	51
Tabela 6.14 - Resultados do teste <i>Efficiency</i> (FDT#2).....	51
Tabela 6.15- Resultados do teste <i>Efficiency</i> (80rpm/7h).....	51



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

- $M_t$  – Momento torsor aplicado no pedal  
 $F$  – Força aplicada  
 $R_p$  – Distância do ponto de aplicação da força ao eixo  
 $\theta_p$  – Ângulo do pedal com a horizontal  
 $V_{ad}$  – Volume de desgaste por adesão  
 $K_{ad}$  – Coeficiente de desgaste por adesão  
 $W$  – Carga aplicada  
 $L$  – Distância de escorregamento  
 $H$  – Dureza do material de desgaste  
 $V_{ab}$  – Volume de desgaste por abrasão  
 $K_{ab}$  – Coeficiente de desgaste por abrasão  
 $T_T$  – Torque na *cassette*  
 $T_F$  – Torque no *chainring*  
 $P$  – Potência produzida pelo motor  
 $\omega_f$  – Velocidade angular do motor frontal  
 $i$  – Relação de transmissão  
 $\sigma$  – Tensão  
 $\varepsilon$  – Deformação  
 $E$  – Módulo de Young  
 $\sigma_0$  – Tensão limite de elasticidade  
 $SiO_2$  – Sílica

### Siglas

- EDT – Ensaio de transmissão  
CMM – *Coordinate Measuring Machine*  
MTB – *Mountain Bike*  
FDT – *Field Test*



# 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, numa economia cada vez mais competitiva e globalizada, é fundamental para uma empresa realizar testes aos seus componentes para garantir que estes cumprem a função para a qual são projetados. Estes testes devem simular as falhas que possam acontecer durante a utilização dos componentes, por forma a antecipar o tempo de vida útil de determinado componente.

Desta forma, é fundamental a realização de testes para minimizar não só a possibilidade de falhas nos produtos comercializados, mas também para ganhar vantagem competitiva.

A SRAM®, empresa fabricante de componentes para bicicletas, realiza vários tipos de testes, entre os quais podemos citar: testes laboratoriais, testes de avaliação de componentes em serviço sujeitos a condições reais, testes a componentes atualmente em produção, bem como testes a componentes ainda em fase de projeto. Enquanto o objetivo dos testes a produtos em fase de produção é avaliar se o produto cumpre os requisitos estipulados, no caso de produtos em fase de projeto o objetivo passa pela introdução de melhorias concretas.

O presente trabalho tem como principal objetivo a análise e comparação do procedimento do teste de desgaste a pratos de transmissão de bicicletas realizado em laboratório, simulando determinadas condições reais de modo a avaliar o desgaste sofrido.

Este trabalho é a continuação de uma cooperação duradoura tendo em vista a melhoria continua entre o Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e a SRAMPort – Transmissões mecânica Lda, tendo grande parte dos objetivos já sido alcançados.

A presente trabalho encontra-se dividido em sete capítulos. O primeiro capítulo corresponde a uma pequena introdução acerca do trabalho desenvolvido. O segundo capítulo consiste numa revisão teórica, na qual é apresentada uma breve história da evolução da bicicleta, bem como do seu sistema de transmissão. Neste capítulo também são explicados os problemas que podem acontecer no sistema de transmissão e são igualmente abordados vários tipos de dano que podem acontecer no sistema.

O terceiro capítulo apresenta uma breve história da empresa, onde se fala da sua fundação e evolução ao longo dos últimos anos. Neste capítulo são também referidos os diferentes produtos produzidos pela SRAM®.

No quarto capítulo encontram-se expostos os materiais utilizados no presente estudo, bem como a descrição de todo o procedimento do ensaio e os modelos de tratamento de dados usados em laboratório.

O capítulo quinto destina-se à análise dos dados existentes de testes, anteriormente feitos, tanto laboratoriais como testes realizados no terreno. Encontra-se igualmente expostas as fontes de incerteza ligadas ao procedimento e a influência de vários fatores relacionados quer com a natureza do teste, quer com o sistema de transmissão.

No sexto capítulo é apresentada uma comparação entre testes laboratoriais e testes realizados no terreno, onde são confrontados os perfis de desgaste dos vários testes e também são expostos e analisados resultados de alguns testes suplementares importantes.

Por fim, no sétimo capítulo, encontram-se apresentadas as principais conclusões deste estudo.

## 2. REVISÃO TEÓRICA

### 2.1. Evolução da bicicleta

A história da bicicleta começa com o celerífero. Este foi inventado em 1790 pelo conde francês Sivrac e consistia em duas rodas ligadas por uma ponte de madeira onde o movimento era produzido pelos pés, que atuavam diretamente sobre o solo (Pequini, 2000), tal como se pode observar através da Figura 2.1.



**Figura 2.1** - Celerífero (Did you Know, n.d.).

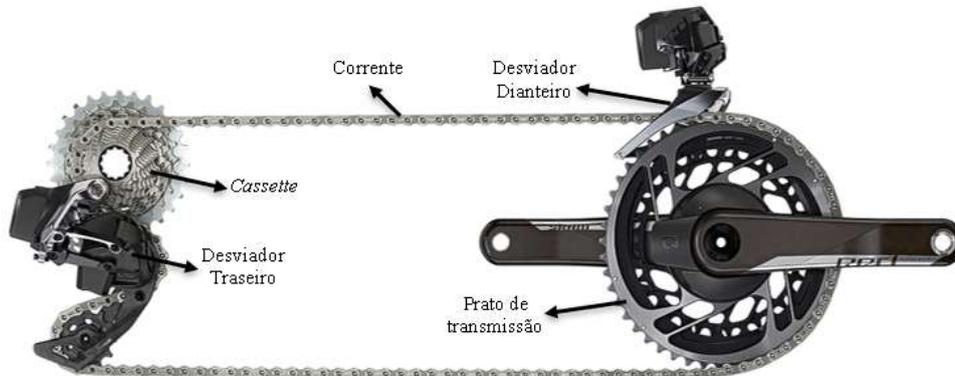
Não é claro quem foi a primeira pessoa a introduzir os pedais na bicicleta. Alguns testemunhos apontam para o escocês K. MacMillan (1839) ou G. Dalzell (1845), no entanto, este feito é comumente atribuído ao francês P. Lallment, que ligou os pedais ao cubo da roda dianteira (1862).

A bicicleta, tal como se conhece atualmente, apareceu em 1885, quando John Starley construiu uma bicicleta chamada “*Rover Safety*” (Figura 2.2), em que grande melhoria introduzida foi passar a usar-se a corrente para produzir movimento na roda traseira. Apesar de John Starley ter revolucionado a configuração da bicicleta, oficialmente é considerado que a bicicleta contemporânea apareceu em 1900 (domtotal, 2018).



**Figura 2.2** - John Starley - Rover Safety (Science Museum Group Collection, n.d.).

Atualmente, a transmissão da bicicleta pode ser feita através de: corrente, correias dentadas ou eixo cardã, sendo a transmissão por corrente a mais comum, tal como se pode observar na Figura 2.3.



**Figura 2.3** - Sistema de Transmissão – SRAM Red eTap (SRAM, n.d.).

Este tipo de transmissão apresenta vantagens face aos outros tipos referidos, como por exemplo: não tem escorregamento, permite a transmissão de elevadas forças e também permite ter várias mudanças, usando carretos com diferentes números de dentes.

Como principais desvantagens podem identificar-se o ruído que esta produz, o elevado peso, e a necessidade de manutenção regular.

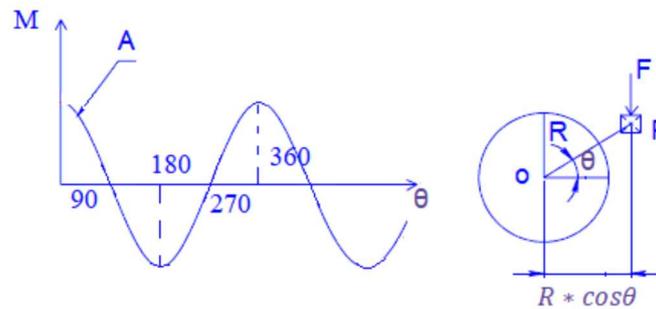
Dentro das bicicletas atuais podem identificar-se dois grandes tipos de bicicleta: as de estrada e as de montanha. Nas bicicletas de montanha (MTB) usa-se apenas um prato de transmissão e nas de estrada, normalmente, usam-se dois pratos de dimensões diferentes.

O mecanismo de transmissão da força exercida pelo ciclista para a roda tem a principal desvantagem de este não transmitir um binário constante à roda. Se a força do pedal,  $F$ , for considerada uniforme, o momento torsor varia seguindo uma função cosseno, tal como exemplificado na Figura 2.4.

O momento torsor,  $M_t$  aplicado ao pedal pode ser determinado com base na seguinte expressão

$$M_t = FR_p \cos \theta_p, \quad (2.1)$$

onde  $F$  é a força aplicada ao pedal,  $P$  é o ponto onde se aplica a força (pedal),  $R_p$  é a distância ao eixo ou “braço da força” e  $\theta_p$  o angulo que este faz com a horizontal.



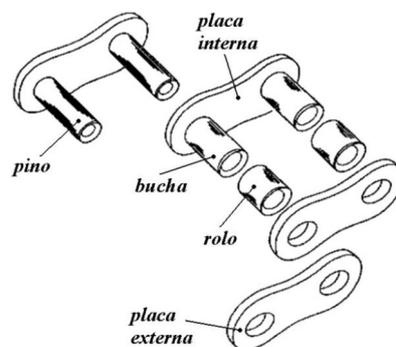
**Figura 2.4** - Variação do momento torsor com a posição do pedal (Levarda, 2018).

## 2.2. Tipos de correntes em bicicletas

Existem dois tipos de correntes usadas em transmissões de bicicletas: as convencionais e as sem bucha (*bushingless*), tal como mostrado nas Figura 2.5 e 2.6. Tal como o nome indica, elas apenas diferem num componente que é a utilização ou a ausência de buchas.

Nas correntes convencionais as duas placas internas são unidas por uma bucha tubular e podem ser comparadas a rebites ocos. Quando a corrente é montada, as placas externas ocultam as extremidades das buchas e o centro é tapado pelos rolos.

Os pinos de ligação que unem a corrente passam pelo meio das buchas e os rolos giram em torno do exterior das buchas, fazendo com que ambas as superfícies da bucha estejam sujeitas a desgaste.



**Figura 2.5** – Diversos componentes de uma corrente de rolos convencional.

Nas correntes sem buchas, em vez de as placas internas terem um furo simples, por onde passaria a bucha, estas possuem um furo com uma saliência que irá ser metade do tamanho de uma bucha.

Neste caso, as placas internas têm um lado interior e exterior determinado pela existência da saliência, podendo também ter chanfros na parte interna. Estes chanfros permitem que a corrente funcione mais suavemente quando esta não está perfeitamente alinhada.

Esta forma construtiva, com a ausência de utilização de buchas, permite que a corrente seja lateralmente mais flexível que as convencionais, pois não existe uma ligação rígida entre as duas metades da bucha e ainda existe um pequeno espaço entre estas mesmas metades.



Figura 2.6 - Correntes de rolos *bushingless* (Pinkbike, 2020).

## 2.3. Condições de funcionamento de correntes

Existem algumas condições de funcionamento do sistema de transmissão importantes para o estudo do desgaste do prato que é importante referir, sendo elas o *cross chaining*, a forma de engrenamento e *chain suck*. Estas condições ou têm impacto sobre o desgaste, ou então são elas próprias uma causa do desgaste.

As mesmas encontram-se identificadas e explicadas nos pontos seguintes.

### 2.3.1. *Cross chaining*

*Cross chaining* é o termo utilizado para designar a condição em que a corrente está a cruzar a linha central do sistema de transmissão. Tal condição é obtida, por exemplo, para o caso em que temos a corrente no prato (*chainring*) exterior ou de maior dimensão e na engrenagem da cassete (*cog*) também de maior dimensão, tal como ilustra a Figura 2.7.

Este facto não acontece em termos industriais e de simulação uma vez que as correntes são utilizadas para transmitir potência entre eixos paralelos.

Quando tal acontece, produz-se uma tensão adicional no sistema de transmissão causando desgaste adicional no prato da corrente e na engrenagem da cassete. Tal fenómeno faz com que haja uma perda de potência e, conseqüentemente, pode ainda causar outros problemas tais como *chain skipping* ou *chain suck*.

Sabemos que sempre que há movimento, há resistência ao movimento, como é das forças de atrito e da resistência do ar. Quando se projetam componentes de bicicletas

tem-se em atenção o peso, o adequado *design*, bem como a seleção de materiais por forma a minimizar estas perdas energéticas. Por outro lado, existem alguns fatores que são mais difíceis de controlar tendo em conta uma utilização desportiva em condições extremas, tal como a utilização da bicicleta em terra ou lama, onde partículas abrasivas se introduzem no sistema de transmissão. Estes fatores externos vão reduzir inevitavelmente a eficiência do sistema de transmissão, fazendo com que o ciclista tenha de se esforçar ainda mais para produzir a mesma potência.

Se a isto juntarmos a condição de *cross chaining*, podemos concluir que em certas condições a solicitação dos componentes de um sistema de transmissão é extremamente elevada aumentando muito o risco de desgaste dos componentes. A Figura 2.7 ilustra de forma esquemática o fenómeno de *cross chaining*, onde é possível observar o cruzamento da linha central do sistema de transmissão por parte da corrente.

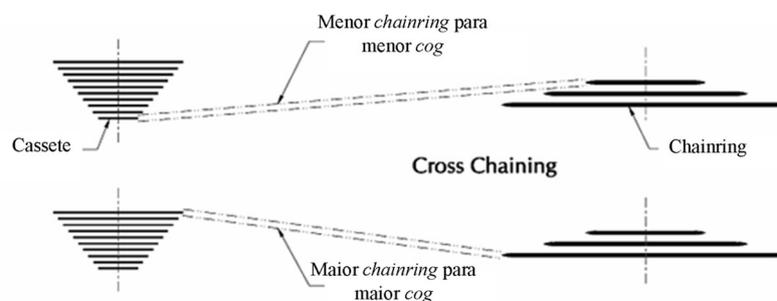


Figura 2.7 - *Cross Chaining* (WickWerks, 2018).

### 2.3.2. Forma de engrenamento

A forma como ocorre o engrenamento da corrente é diferente na cassette e no prato. Este ocorre no ramo tenso da corrente, enquanto o desengrenamento ocorre no ramo bambo.

Se o prato de transmissão estiver desgastado, em vez de o rolo engrenar normalmente, encosta sobre a ponta do dente, podendo fazer com que a corrente saia do prato, fazendo com que ocorra uma perda de potência (Figura 2.8).



Figura 2.8 - Engrenamento num prato desgastado (Brown & Allen, 2016).

### 2.3.3. Chain suck

*Chain suck* é o nome dado ao fenômeno que ocorre quando a corrente falha em desengrenar dos dentes do prato de transmissão, agarrando-se aos dentes, enquanto o prato continua a rodar fazendo com que a corrente se enrole em torno deste.

Existem alguns fatores que contribuem para a ocorrência deste fenômeno, tais como: fazer uma mudança de prato sobre tensão, os dentes do prato ou a corrente estarem danificados, a existência de partículas rígidas na corrente, má lubrificação da corrente, desgaste do prato e desgaste ou alongamento excessivo da corrente.

Este fenômeno ocorre com maior frequência em pratos de transmissão de menores dimensões e especialmente em bicicletas de montanha.

Para que ocorra uma fácil separação entre a corrente e o prato de transmissão é necessário que os elos e os rolos estejam completamente livres de carga no pedal. Isto permite que a corrente flutue livremente para fora dos dentes. O flanco de carga dos dentes deve ter o formato adequado para permitir que os rolos se soltem, mesmo que a carga permaneça nos dentes inferiores e, neste caso, o elo vá eliminando continuamente a tensão na corrente enquanto o rolo se move e finalmente desprende do dente.

Pratos de transmissão mais pequenos produzem maior tensão na corrente devido à maior razão de transmissão e também têm menos dentes para distribuir a carga, sendo que cada dente suporta uma carga mais elevada que pode ser transportada até aos dentes inferiores (Levy, 2000).

A Figura 2.9 ilustra o fenômeno de *chainsuck*, onde a linha a tracejado representa a posição que a corrente toma quando esse fenômeno ocorre.



Figura 2.9 – *Chain suck* (Open Cycle, 2016).

## 2.4. Mecanismos de desgaste

O desgaste é o fenómeno de remoção de uma superfície ou parte dela devido à interação com outra superfície e é responsável pela perda de durabilidade e rentabilidade de muitas máquinas.

A taxa de desgaste varia com as condições de funcionamento e com o tipo de material. Isto implica que seja fulcral projetar as condições de funcionamento tal como proceder a uma manutenção eficaz e optar por uma seleção adequada dos materiais dos diversos componentes por forma a minimizar o desgaste.

O desgaste é o resultado da remoção de material devido à separação física por micro-fraturas, por dissolução química ou por fusão da interface de contacto. Podem ainda identificar-se vários tipos de desgaste, sendo estes o adesivo, o abrasivo, o corrosivo e por fadiga. Porém, o modo dominante de um determinado mecanismo de desgaste pode alterar-se, podendo esta mudança ser induzida por alterações nas propriedades e na resposta dinâmica da superfície do material causadas por aquecimento gerado por atrito, pela formação de filme químico ou outro.

Em geral, o desgaste não acontece apenas por um só mecanismo de forma isolada, mas antes, por um conjunto de diferentes mecanismos.

Alguns parâmetros importantes para a caracterização do desgaste são o volume de desgaste, a rugosidade da superfície desgastada e a geometria das partículas de desgaste.

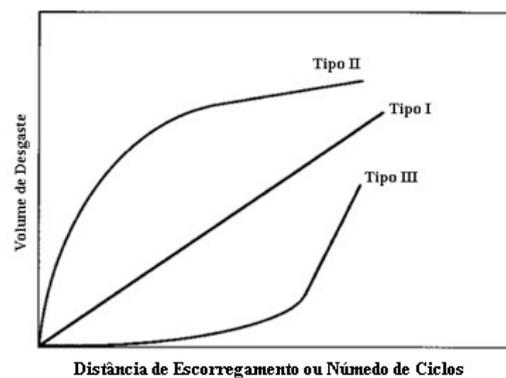
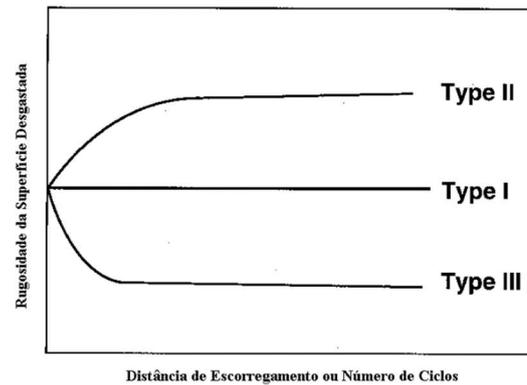


Figura 2.10 - Representação dos tipos de desgaste (Kato & Adachi, 2001).



**Figura 2.11** - Representação da variação da rugosidade da superfície com a distância de escorregamento (Kato & Adachi, 2001).

Tendo como base a Figura 2.10 podem identificar-se três tipos de desgaste. O tipo I representa uma taxa de desgaste constante ao longo de todo o processo em que o volume de desgaste é proporcional à distância de escorregamento ou ao número de ciclos. O tipo II onde pode observar-se uma transição de uma taxa inicial de desgaste mais elevada, logo com um declive mais elevado, para uma taxa mais reduzida, onde é possível observar uma diminuição do declive. O desgaste do tipo II é mais comum em metais e denota um efeito de rodagem. O tipo III onde se pode verificar igualmente um efeito de rodagem, em que se pode observar uma transição catastrófica de uma taxa inicial muito baixa para uma taxa muito elevada, tal como é observável pelo tipo de curva exponencial. Este tipo é comum nos materiais cerâmicos.

No desgaste do tipo III, a distância de escorregamento antes do desgaste catastrófico (subida acentuada) é o período no qual se dá normalmente a iniciação da fenda e que depende do acabamento inicial da superfície, das propriedades do material e das condições de atrito.

Por outro lado, a Figura 2.11 representa a rugosidade da superfície em função da distância de escorregamento ou número de ciclos para três tipos de desgaste diferentes. O tipo I mostra o caso de desgaste constante em que a rugosidade da superfície não se altera. O tipo II representa um aumento inicial da rugosidade mantendo-se depois constante. O tipo III ilustra um período inicial de rodagem e desgaste constante em que a rugosidade diminui, mantendo-se depois constante, fenómeno que é característico de superfícies lixadas ou polidas.

O desgaste é normalmente avaliado pela quantidade de volume de material perdido e pelo estado da superfície desgastada. Já o grau de desgaste é designado por taxa de desgaste, taxa específica de desgaste ou coeficiente de desgaste. A taxa de desgaste é

definida como o volume de desgaste por unidade de distância. A taxa específica de desgaste é definida por volume de desgaste por unidade de distância e de carga. O coeficiente de desgaste é resultado do produto da taxa específica de desgaste pela dureza do material.

Pode afirmar-se que o desgaste não é uma propriedade do material, mas antes uma resposta do sistema tribológico que depende dos materiais e das condições de contacto, tais como, carga aplicada, distância de deslizamento/número de ciclos e condição de lubrificação. De tal forma que a frase em inglês é notoriamente conhecida na área da tribologia “*Wear is not a material property. It is a system response*”.

Por vezes, o desgaste é investigado do ponto de vista dos tipos de contacto entre as superfícies dos diversos materiais. Porém, existem muitos tipos de configurações de contacto entre essas superfícies, tais como: compressão e deslocamento normal ou inclinado, escorregamento unidirecional, rolamento e rolamento com escorregamento. Também podem existir partículas sólidas livres que atacam as superfícies.

É importante referir também a configuração de contacto, sendo esta descrita como desgaste de rolamento, desgaste por impacto ou desgaste por atrito. As descrições destas configurações são baseadas na aparência do tipo de contacto. Embora não representem os mecanismos de desgaste de uma maneira específica.

A maneira mais simples e direta de pensar sobre mecanismos de desgaste é através da severidade de contacto como contacto elástico ou contacto plástico e ter em conta a resposta do sistema tribológico.

Os principais modos de desgaste são o desgaste adesivo, o desgaste abrasivo, o desgaste por fadiga e o desgaste corrosivo ou por corrosão.

Quando duas superfícies interatuam, contactam-se pelas extremidades das asperezas superficiais, em áreas reais habitualmente muito reduzidas, ou seja com pressões de contacto muito significativas. Nestas condições podem formar-se junções por adesão. A fratura pode ou não ocorrer na interface, podendo assim conduzir à transferência de material de uma superfície para a outra.

Por outro lado, se o contacto acontecer entre superfícies de materiais com durezas diferentes, o material mais duro irá penetrar no outro. Quando a fratura é provocada por micro cortes, o desgaste resultante neste caso é chamado de desgaste abrasivo, não se especificando o modo de fratura ou as forças de adesão.

No caso em que o contacto se dá em regime de movimento repetitivo irá gerar-se uma fratura por fadiga ao fim de um certo número de ciclos de atrito. Quando a falha da superfície é causada por fadiga o desgaste é nomeado de desgaste por fadiga.

De igual modo, se o contacto acontecer em ambiente corrosivo, a reação triboquímica na superfície de contacto é acelerada. Quando esta reação causa remoção de material o desgaste provocado é designado por desgaste corrosivo.

### 2.4.1. Desgaste por adesão

No que respeita o desgaste por adesão, se a força de ligação, que se forma na zona de contacto plástico entre duas superfícies, for suficiente para resistir ao movimento relativo de escorregamento irá causar uma grande deformação plástica na zona de contacto, que se encontra sobre o efeito de tensões de compressão e corte. Esta deformação irá causar a iniciação de fenda e a sua propagação combinando os modos de fratura por tração e por corte. Quando a fenda se propaga até a interface de contacto uma partícula de desgaste é formada e completa-se a transferência adesiva.

Em determinadas situações a adesão pode estender-se a áreas significativas originando processos de gripagem.

Alguns materiais têm maior tendência para formar soluções sólidas ou compostos intermetálicos, tratando-se de um dos principais fatores no processo de formação das ligações. O diagrama representado na Figura 2.12 ilustra precisamente a maior ou menor facilidade que um dado par de metais tem em formar soluções sólidas e conseqüentemente sofrer desgaste adesivo. Tal como se pode observar no diagrama um par composto por dois metais iguais tem uma baixíssima tendência de sofrer desgaste adesivo.

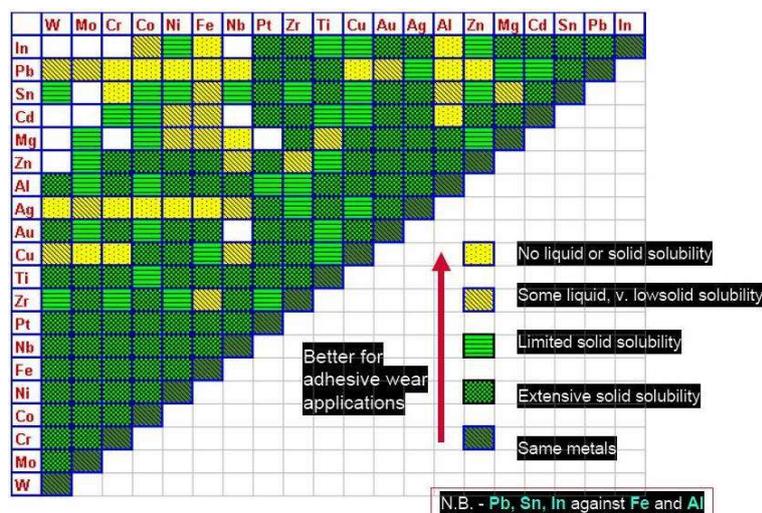


Figura 2.12 - Tendência de formação de ligações de alguns pares metálicos.

O volume de desgaste por adesão ( $V_{ad}$ ) pode ser estimado pela seguinte expressão:

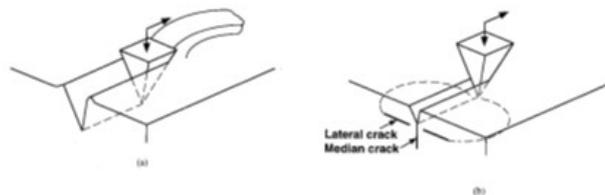
$$V_{ad} = K_{ad} \cdot \frac{WL}{H} \quad (2.2)$$

onde  $K_{ad}$  é o coeficiente de desgaste para desgaste por adesão,  $W$  é a carga aplicada,  $L$  é a distância de escorregamento e  $H$  é a dureza do material de desgaste.

### 2.4.2. Desgaste por abrasão

Relativamente ao desgaste por abrasão, no caso de na interface entre duas superfícies o contacto for inclinado ou curvo, passamos a ter indentação em vez de escorregamento. Como resultado dessa indentação algum volume da superfície do material é removido levando à formação de uma ranhura na superfície com menor dureza.

Quando se assume um modelo de contacto único onde o material com maior dureza e afiado é indentedo no plano da superfície formam-se ranhuras e rebarbas. Se o material desgastado for dúctil forma-se uma rebarba em forma de laço, gerada por mecanismos de micro corte, como mostra a Figura 2.13(a). Se por outro lado o material for frágil, as partículas de desgaste são formadas por propagação de fendas, como ilustra a Figura 2.13(b).



**Figura 2.13** - Desgaste por abrasão, (a) de um material dúctil, (b) de um material frágil (Kato & Adachi, 2001).

Da mesma forma que para o desgaste por adesão, pode estimar-se o volume de desgaste por abrasão ( $V_{ab}$ ) através da seguinte expressão (Eq. 2.3)

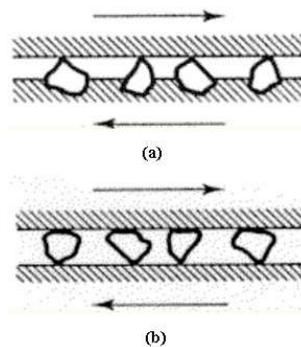
$$V_{ab} = K_{ab} \cdot \frac{WL}{H} \quad (2.3)$$

onde  $K_{ab}$  é o coeficiente de desgaste para desgaste por abrasão,  $W$  é a carga aplicada,  $L$  é a distância de escorregamento e  $H$  é a dureza do material.

O desgaste por abrasão divide-se em duas classificações sendo elas abrasão a dois corpos ou por riscagem e abrasão a três corpos ou por rolamento.

Abrasão a dois corpos significa que o abrasivo está fixo a uma das superfícies ou é resultado de uma elevada rugosidade das superfícies com maior dureza. Quando o abrasivo se encontra situado entre duas superfícies em movimento, podendo rodar

livremente entre elas designa-se por abrasão a três corpos ou por rolamento. Tais mecanismos são ilustrados na Figura 2.14.

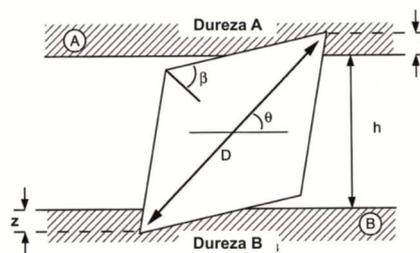


**Figura 2.14** – Esquema mostrando o mecanismo de desgaste por abrasão: (a) abrasão a dois corpos ou riscagem, (b) abrasão a três corpos ou rolamento (Hutchings & Shipway, 2017).

Para os agentes abrasivos, a relação de dureza destes em comparação com a dureza do material que está em contacto é determinante no dano causado, ou seja, quanto maior for a razão entre durezas maior será o desgaste.

Outra condição que influencia a quantidade de desgaste é a geometria das partículas abrasivas, existindo um diâmetro ( $D$ ) máximo para o qual a abrasão é mais severa (Rabinowicz, 1995). Também a abrasividade induzida pela geometria das mesmas é um fator importante para a quantidade de material removido.

Para caracterizar esse efeito é utilizado o ângulo de ataque,  $\theta$ , (Figura 2.15) da partícula, onde este representa o ângulo formado entre a superfície de ataque da partícula e a superfície do material (Mulhearn & Samuels, 1962).



**Figura 2.15** - Geometria de uma partícula abrasiva (Trezona et al., 1999).

### 2.4.3. Desgaste por fadiga

Fadiga, descreve um processo em que a tensão é aplicada repetidamente iniciando uma fenda no substrato. Esta propaga-se até a superfície, onde uma secção da superfície se liberta deixando uma cratera na superfície. A tensão pode ser causada por contaminantes pressionados entre as superfícies em carga ou pela rugosidade das superfícies.

Quando temos superfícies muito duras as crateras são muito pequenas e pouco profundas. As áreas de *micropitting*, designação das áreas onde existem estas pequenas crateras, podem ser difíceis de identificar, pois estas podem dar a entender que o material está “fosco”, como se pode observar na Figura 2.16.



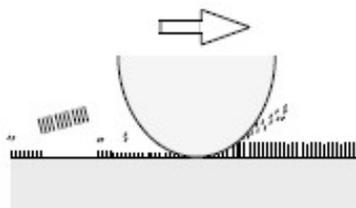
**Figura 2.16** – *Micropitting* (Errichello, 2011)

#### 2.4.4. Desgaste por corrosão

Quando o movimento de escorregamento entre duas superfícies se dá num meio corrosivo, especialmente líquido ou gasoso, são formados, através de reação química ou eletroquímica, produtos nas superfícies dos materiais.

Se estes produtos da reação aderirem fortemente à superfície e tiverem um comportamento idêntico ao do material base, o mecanismo de desgaste será praticamente igual ao do material base. No entanto, em alguns casos os produtos comportam-se de maneira diferente do material base, tornando assim o desgaste bastante diferente. Tal comportamento é típico em metais que formam camadas de óxidos passivantes e que diferem do material base ou “*bulk*” material. Um exemplo concreto é o alumínio e o titânio que em contacto com a atmosfera ou água formam uma fina camada de oxido protetor.

No desgaste corrosivo, a reação tribo-eletroquímica produz uma camada na superfície do material, como se de um revestimento se tratasse. Esta camada ao mesmo tempo é removida por atrito (Figura 2.17). A taxa de crescimento da camada e de remoção determina a taxa de desgaste.



**Figura 2.17** - Imagem esquemática de Desgaste por corrosão (Kato & Adachi, 2001).

## 2.5. Deformação Plástica

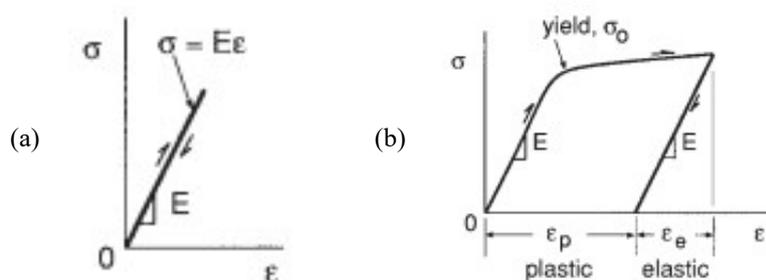
Em mecânica dos materiais as deformações são quantificadas em deformações normais e de corte.

As deformações por vezes são essenciais para o funcionamento de alguns mecanismos como é o caso de uma mola. Porém, deformações excessivas, especialmente se forem permanentes, podem ser prejudiciais.

A deformação que surge rapidamente após o carregamento pode ser classificada de deformação elástica ou deformação plástica, como ilustrado na Figura 2.18(a).

A deformação elástica é recuperada imediatamente após retirada a tensão. Quando esta é a única tensão presente a tensão e deformação são geralmente proporcionais. Para carregamentos axiais a constante de proporcionalidade é o módulo de elasticidade ou módulo de Young ( $E$ ), Figura 2.18(b).

A deformação plástica não é recuperada quando é retirada a tensão e, portanto, é permanente. Uma vez iniciada a deformação plástica, um pequeno aumento da tensão provoca uma deformação relativamente grande. Este processo chama-se de cedência e a tensão a partir do qual este comportamento acontece é a tensão limite de elasticidade ( $\sigma_0$ ) (Dowling, 2019).



**Figura 2.18** - (a) deformação unicamente elástica (b) deformação elástica e deformação plástica (Dowling, 2019).

Quando o objetivo é que não ocorra deformação plástica devemos garantir que a tensão não seja maior que a tensão limite de elasticidade.

### 3. SRAM®

A SRAM® foi fundada em 1987 em Chicago, Estados Unidos, por três amigos. SRAM é um acrónimo formado por letras dos nomes dos fundadores: Scott, Ray e Sam.

Inicialmente a empresa contava apenas com 6 colaboradores num pequeno armazém.

A empresa adquiriu outras marcas que contribuíram para o seu crescimento e consolidação no mercado de componentes para bicicletas. Neste momento possui seis marcas e dois projetos de carácter social e humanitário, tal como é possível observar na Figura 3.1.

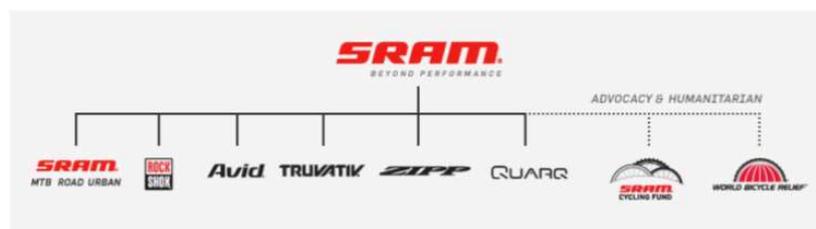


Figura 3.1 – Marcas do grupo SRAM®.

Atualmente a SRAM® encontra-se espalhada por três continentes e nove países com dezoito fábricas e escritórios, tal como mostrado no mapa da Figura 3.2.



Figura 3.2 - Localização das várias fábricas e escritórios da empresa.

### 3.1. SRAMPort

A SRAMPort foi adquirida em 1997 pelo grupo SRAM® e, atualmente, é a única unidade fabril do grupo na Europa. A SRAMPort tem com atividade principal o desenvolvimento e produção de correntes para bicicletas e, adjacente à produção de correntes, faz a montagem de rodas.

Anteriormente à aquisição pelo grupo a empresa tinha o nome Trasmeca, Transmissões mecânicas, Lda, e tinha sido fundada em 1968, passando a ser SRAMPort apenas em 2008.

#### 3.1.1. Produtos SRAMPort

A SRAMPort é responsável pelo fabrico de toda a gama de correntes do grupo SRAM. É uma empresa que oferece uma gama de correntes para transmissões de 1 a 12 velocidades, para ciclismo de estrada ou montanha, com diferentes especificações e acabamentos para ir de ao das exigências dos clientes, produzindo assim correntes com uma ou mais características diferentes entre si, tais como: peso, revestimento, materiais ou propriedades mecânicas. Na Figura 3.3 encontram-se ilustrados alguns tipos de correntes produzidas pela SRAMPort.

Na unidade fabril em Portugal, para além de fabricadas correntes também são montadas as rodas da marca ZIPP®, ilustradas na Figura 3.4.



Figura 3.3 - Correntes SRAM®.



Figura 3.4 - Rodas Zipp®.

### 3.1.2. Produtos Grupo SRAM®

O grupo SRAM produz a maioria dos componentes de uma bicicleta, excluindo o quadro e o selim. Cada marca do grupo é responsável por um determinado segmento de componentes. A Figura 3.5 demonstra a divisão dos diversos componentes pelas diversas marcas.

Produto	Exemplos	Marca
<i>Shifters</i>		<b>SRAM</b>
Desviadores		<b>SRAM</b>
Travões		<b>SRAM</b> <b>Avid</b>
<i>Cassettes</i>		<b>SRAM</b>
<i>Cranksets/Pratos</i>		<b>SRAM</b> <b>TRUVATIV</b>
Suspensões		<b>ROCK SHOX</b>
Espigões de Selim		<b>ROCK SHOX</b> <b>ZIPP</b> <b>TRUVATIV</b>
Guiadores e Avanços		<b>ZIPP</b> <b>TRUVATIV</b>
Rodas		<b>ZIPP</b>
Medição de Potência		<b>QUARQ</b>

Figura 3.5 - Componentes produzidos pelas várias marcas.



## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Materiais

O objeto/material de estudo é um prato de transmissão de uma bicicleta constituído por 52 dentes para um sistema de transmissão de 11 velocidades, tal como exemplificado na Figura 4.1. Todos os restantes elementos do teste são considerados consumíveis.



**Figura 4.1** - Modelo de: (a) prato de transmissão; (b) cassette, utilizados no presente estudo.

Para além dos componentes do sistema de transmissão são utilizados outros equipamentos por forma a efetuar o teste de desgaste a um prato de transmissão, que são: EDT - *Wear Test Machine* e CMM - *Coordinate Measuring machine*, cuja descrição será apresentada de seguida.

#### 4.1.1. EDT *Wear Test Machine*

EDT - *Wear Test Machine* é uma máquina que tem como objetivo simular e testar em laboratório as condições de funcionamento de um sistema de transmissão de uma bicicleta.

Esta é constituída por vários componentes, destacando-se um servomotor, um motor redutor, um suporte para cada desviador, um sistema de ancoragem de prato e um sistema para fixar a cassette. A Figura 4.2 mostra os diferentes elementos constituintes deste equipamento.

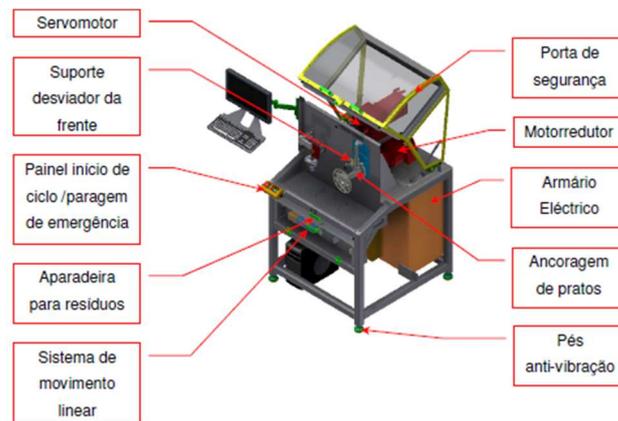


Figura 4.2 - Elementos da Máquina.

#### 4.1.2. CMM (*Coordinate Measuring Machine*)

Uma CMM é um equipamento de medição que usa uma sonda eletrónica sensível para medir uma série de pontos discretos da geometria de uma peça. É usada para verificar se as dimensões estão conformes com a especificação. A Figura 4.4 mostra uma CMM.

A medição das peças é baseada na comparação da distância entre dois pontos da superfície da peça e comparada com um padrão. Por forma a medir as geometrias de uma peça, diâmetro ou a posição de um ponto é efetuada uma sondagem da superfície, fazendo o sensor tocar na peça, nos pontos desejados, medindo assim a sua posição em relação a um sistema de referência (Star Rapid®, n.d.).

As CMM são constituídas por três componentes principais: estrutura principal, sistema de sondagem e o sistema de recolha de informação. A estrutura principal inclui os eixos de movimento e a mesa de trabalho. Do sistema de sondagem fazem parte a cabeça, a sonda, a extensão e o palpador (Figura 4.3). Por fim, o sistema de recolha de informação envolve os respetivos softwares e controladores necessários.



Figura 4.3 - Sistema de sondagem (Mitutoyo, n.d.).



Figura 4.4 - CMM (Mitutoyo, n.d.).

## 4.2. Procedimento para a realização do teste de desgaste

Atualmente, a SRAM® já tem desenvolvido um teste para avaliar o desgaste que ocorre nos pratos de transmissão. Este teste baseia-se num procedimento anteriormente criado para avaliar o desgaste em correntes e tem como objetivo avaliar a quantidade de perda de material que um prato de transmissão apresenta após exposto a abrasão por um determinado período. É assim possível identificar quando ocorre o fenómeno de *micro-chainsuck* e avaliar a redução da área de superfície do prato de transmissão.

Por forma a simular condições extremas, o procedimento para avaliar o desgaste consiste em utilizar uma pasta abrasiva que é aplicada ao sistema de transmissão. O sistema de transmissão é montado na máquina de teste, designada por EDT *Wear Test Machine*, utilizando fixadores e espaçadores de forma a criar a linha de corrente desejada, tal como se pode observar na Figura 4.5. A velocidade de rotação é constante usando para isso o motor frontal que se encontra conectado com o prato de transmissão. É ainda aplicada uma força de travagem no motor traseiro, que se encontra ligado à cassetete, por forma a simular a força do pedal.

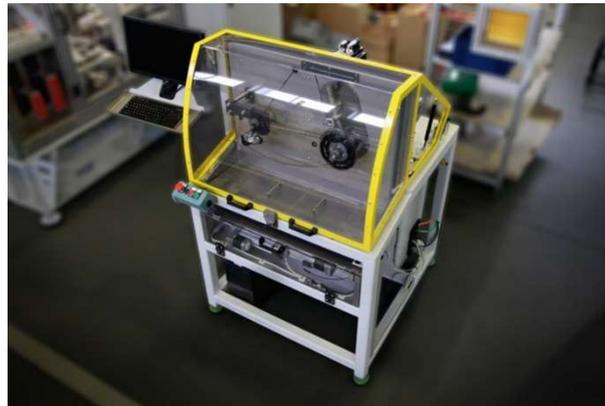


Figura 4.5 Sirmaf® EDT *Wear Test Machine* (SIRMAF, n.d.).

O teste de desgaste efetua-se com o maior *cross chaining* possível por forma a maximizar o desgaste da superfície lateral do dente. Os dentes do prato são avaliados em intervalos de tempo específicos (a cada sete horas). Este teste é realizado por um período de quarenta e duas horas ou até que ocorra uma falha que ponha em causa o sistema. O procedimento para avaliar o desgaste encontra-se dividido em várias partes que se apresentam seguidamente.

A primeira etapa é a preparação da amostra em que se executam os seguintes passos:

- Montar do prato de transmissão no equipamento de teste, seguindo as especificações da marca;
- Identificar e numerar os dentes onde se iram fazer as medições com recurso a um punção, isto é fazer um número de marcar igual ao número do dente;
- Fazer a medição do contorno e do perfil lateral dos dentes do prato;
- Fazer a limpeza da corrente, seguindo o procedimento interno;
- Cortar a corrente no comprimento adequado segundo as indicações do fabricante;
- Fazer a medição da corrente novamente seguindo o procedimento interno;
- Marcar a corrente e o elo de ligação para identificar a direção do movimento.

A segunda etapa refere-se à preparação do equipamento de teste, instalação e fixação da amostra, encontrando-se subdivida nos seguintes passos:

- Instalar o eixo dianteiro, espaçadores e o prato de transmissão no motor dianteiro;
- Seguindo as indicações do fabricante instalar uma cassette limpa, sendo que o carroto de maior dimensão deve ser novo;
- Instalar o suporte para o desviador traseiro na máquina e apertar manualmente os parafusos;
- Instalar o desviador traseiro com as polias limpas no suporte anteriormente montado e alinhar o desviador traseiro de acordo com as indicações do fabricante. Se for usado o mesmo desviador de um teste anterior verificar se não se encontra danificado;
- Montar a corrente no sistema de transmissão;
- Ajustar a tensão do cabo do desviador;
- Posicionar a corrente no carroto e no prato de maior dimensão;
- Alinhar o detetor laser seguindo os parâmetros da Tabela 4.1 e as indicações da Figura 4.6;
- Com recurso a uma seringa recolher 6 ml de pasta abrasiva;
- Aplicar uma gota de pasta abrasiva em cada rolo à secção de baixo da corrente e rodar o eixo dianteiro até se ter aplicado pasta abrasiva em todos os rolos da corrente.

A terceira etapa consiste na execução do teste de desgaste, onde se devem executar os seguintes passos:

- Selecionar os parâmetros do teste;
- Iniciar o teste.  
**Nota:** o teste será interrompido se for detetada uma *micro-chainsuck*. É usual acontecer *micro-chainsuck* na fase inicial do teste, enquanto a pasta abrasiva se distribui pelos componentes.
- Se aplicável, fazer um vídeo às 0 horas;
- Se acontecer alguma falha, como *chaisuck*, *autoshift* ou *chain skip*, executar o passo seguinte com o laser de deteção desligado;
- A cada sete horas, ou se ocorrer falha:
  - Verificar se as marcas que indicam a direção corrente são visíveis, voltar a marcar se for necessário;
  - Retirar a corrente;
  - Remover o prato do equipamento, sem remover as fixações;
  - Limpar e secar o prato de transmissão;
  - Fotografar cada um dos dentes marcados;
  - Proceder a medição do prato com recurso a uma CMM;
  - Reinstalar o prato no equipamento;
  - Fazer a medição da corrente, segundo o procedimento interno;
  - Voltar a colocar a corrente no sistema de transmissão, com a mesma direção de movimento. Se for aplicável trocar o *latch*;
  - Voltar a executar a segunda etapa do procedimento;
  - Gravar um vídeo de alta velocidade;
- Continuar o teste, e reaplicar estes passos até fazer um total de 42 horas, ou até ocorrer uma falha.

Tal como identificado num dos passos anteriores é necessário preparar-se a pastava abrasiva. Trata-se de um processo simples, mas deve-se fazer com muita precisão uma vez que pequenas variações na composição da pasta abrasiva podem causar flutuações nos resultados obtidos. A pasta abrasiva prepara-se misturando homogeneamente: 75 g de um material abrasivo, SiO<sub>2</sub> com um diâmetro médio de partículas de 75 µm e finalmente 86 g de lubrificante, FINISH LINE WET™. A mesma mistura deve ser utilizada durante todo o teste.

Para a realização do teste é essencial definir alguns parâmetros operacionais tais como: velocidade do motor frontal, que é mantida constante e tem o valor de 80 rpm e o torque no motor traseiro que é calculado utilizando as seguintes formulas:

$$T_T [N \cdot m] = \frac{T_F [N \cdot m]}{i} \tag{4.1}$$

$$T_F [N \cdot m] = \frac{P [W] \times 60}{2\pi \times \omega_f [rpm]} \tag{4.2}$$

$$i = \frac{N^\circ \text{ de dentes no prato}}{N^\circ \text{ de dentes na cassette}} \tag{4.3}$$

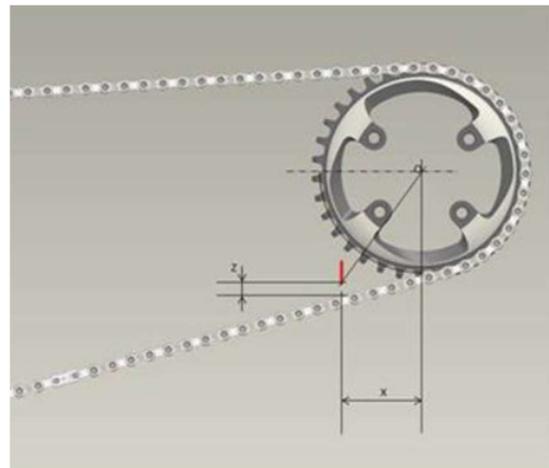
onde  $T_t$  é o torque na cassete,  $T_f$  o torque no prato,  $P$  a potência,  $\omega_f$  a velocidade angular do motor frontal e  $i$  a relação de transmissão.

Por último é preciso posicionar-se o detetor laser. Existem parâmetros fixos para o posicionamento que são ilustrados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** - Posicionamento do detetor laser.

	Chaining size	CR Pitch Radius	Laser Sensor Position	
			X*	Z
Chaining size [T]	28 T	56.6 mm	34 mm	6mm (±1mm) above trigger point
	29 T	58.6 mm	35 mm	
	30 T	60.6 mm	36 mm	
	31 T	62.7 mm	38 mm	
	32 T	64.7 mm	39 mm	
	33 T	66.7 mm	40 mm	
	34 T	68.7 mm	41 mm	
	35 T	70.7 mm	42 mm	
	36 T	72.8 mm	44 mm	
	37 T	74.8 mm	45 mm	
	38 T	76.8 mm	46 mm	
	39 T	78.8 mm	47 mm	
	40 T	80.9 mm	49 mm	
	41 T	82.9 mm	50 mm	
	42 T	84.9 mm	51 mm	
	43 T	86.9 mm	52 mm	
	44 T	88.9 mm	53 mm	
	45 T	91.0 mm	55 mm	
	46 T	93.0 mm	56 mm	
	47 T	95.0 mm	57 mm	
48 T	97.0 mm	58 mm		
49 T	99.0 mm	59 mm		
50 T	101.1 mm	61 mm		
51 T	103.1 mm	62 mm		
52 T	105.1 mm	63 mm		
53 T	107.1 mm	64 mm		
54 T	109.1 mm	65 mm		

\*X\* X = CR pitch radius (mm) \* 0.6



**Figura 4.6** - Configuração do detetor laser.

Após a realização do teste, é essencial elaborar um relatório com o objetivo de analisar a evolução dos parâmetros que estão a ser testados. Neste relatório devem estar presentes dois tipos de informação, os parâmetros de entrada e os resultados obtidos.

Nos parâmetros de entrada devem ser identificados o tipo de prato de transmissão bem como os restantes componentes da transmissão, tais como: o torque aplicado no motor traseiro, a potência, a velocidade de rotação do motor frontal e a posição do sensor detetor de *chainsuck*.

Já em relação aos resultados obtidos devem ser especificados: o tempo total de teste, a redução de área por dente no final do teste, o desgaste lateral do dente ao final das 42 horas, o tempo até que aconteça uma falha bem como os intervalos de inspeção. Para além destes parâmetros devem ser também apresentadas um conjunto de informações que devem ser retiradas antes do teste, depois de cada intervalo de inspeção e no final do teste. Desse conjunto de informações fazem parte fotografias de cada um dos dentes marcados, o alongamento da corrente, um gráfico que relaciona a redução de área por dente com a duração do teste, a redução de área do prato e comparações, obtidas através da CMM, do perfil dos dentes e do contorno do prato de transmissão.

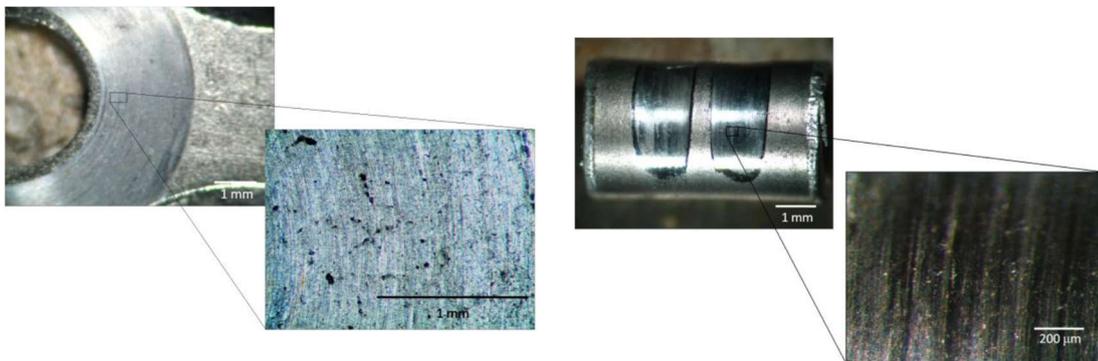


## 5. Avaliação do desgaste no sistema de transmissão

Durante a utilização da bicicleta são utilizados diferentes tipos de relação de transmissão. Este facto faz com que a corrente, o prato de transmissão, os carretos e os desviados se friccionem entre si. Na ausência de uma barreira de lubrificante entre eles, muitas vezes porque é lavado, evaporado pelo sol ou expelido com o uso, pequenos contactos intermetálicos surgem. Estes contactos intermetálicos geram pequenos fragmentos cada vez que um momento torsor é aplicado. A este efeito há que adicionar a possibilidade de pequenas partículas de areia serem lançadas pelos pneus para os componentes da transmissão e potenciarem o efeito de desgaste abrasivo.

Tendo em conta que a cadência média de um ciclista é cerca de oitenta rotações por minutos, faz com que o efeito se vá acumulando, provocando o desgaste dos componentes.

Estudos anteriores relacionados com os mecanismos de dano em correntes de bicicletas revelam que o principal mecanismo de desgaste é o desgaste por abrasão (Figueiredo, 2009).



**Figura 5.1** - Pormenor do desgaste nas placas externas e nos pinos (Figueiredo, 2009).

Através da observação da Figura 5.1 é possível identificar sulcos de relevo na direção do movimento e paralelos entre si. Estes indicadores são característicos do desgaste por abrasão, pelo que se conclui que o principal mecanismo de dano que ocorre nas interfaces de contacto é abrasivo (Ramalho, 1994).

### 5.1. Tipo de testes de desgaste

A SRAM efetua dois tipos de testes para avaliar o desgaste dos pratos de transmissão: o teste laboratorial e o teste efetuado no terreno. Estes dois tipos de testes são

efetuados uma vez que eles são bastante diferentes um do outro, quer em níveis de complexidade quer no tempo necessário para obter resultados. O teste realizado no terreno é muito mais complexo e necessita de muito mais tempo para se obterem resultados com alguma fiabilidade, pois este depende de muitos fatores externos ao sistema de transmissão.

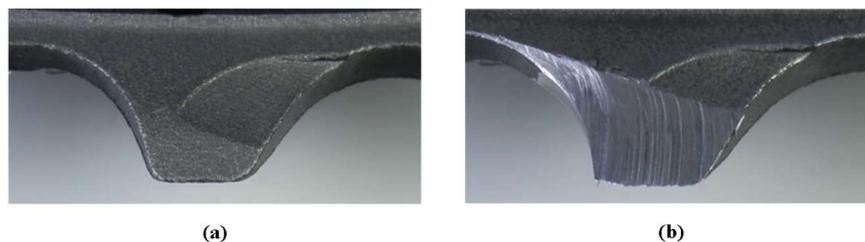
### 5.1.1. Teste laboratorial

O teste laboratorial é um teste destrutivo, ou seja, no final do teste os componentes testados estão obsoletos. Este tipo de testes ajudam a simular e perceber o que poderá acontecer no terreno num período de tempo menor.

O teste tem como principal objetivo simular a falha que ocorre no terreno. Neste caso é avaliado o comportamento de um prato de transmissão quando sujeito a condições extremas de funcionamento, isto é, o pior cenário possível.

Para acelerar o processo de desgaste é utilizada uma pasta abrasiva, constituída por óleo e sílica, cuja composição foi anteriormente descrita e a corrente é posicionada no carreto de maior dimensão para proporcionar o maior *cross chaining* possível, tal como foi ilustrado na Figura 2.7.

A Figura 5.2 ilustra a evolução do desgaste de um determinado dente do prato de transmissão antes de iniciar o teste e com 42 h de teste.



**Figura 5.2** - Evolução do desgaste lateral (a) 0h de teste (b) 42h de teste.

Neste teste são avaliados dois tipos de falhas e denominadas *autoshift* e *micro chainsuck*. Para que o *autoshift* seja considerado uma falha basta que aconteça uma vez, no entanto para que a falha seja por *chainsuck* têm de acontecer 100 *micro chainsucks*.

Dos testes anteriormente realizados podem tirar-se as seguintes conclusões:

1. Quando se comparam testes realizados a pratos de transmissão idênticos os resultados de desgaste são aproximadamente constantes apresentando no entanto pequenas

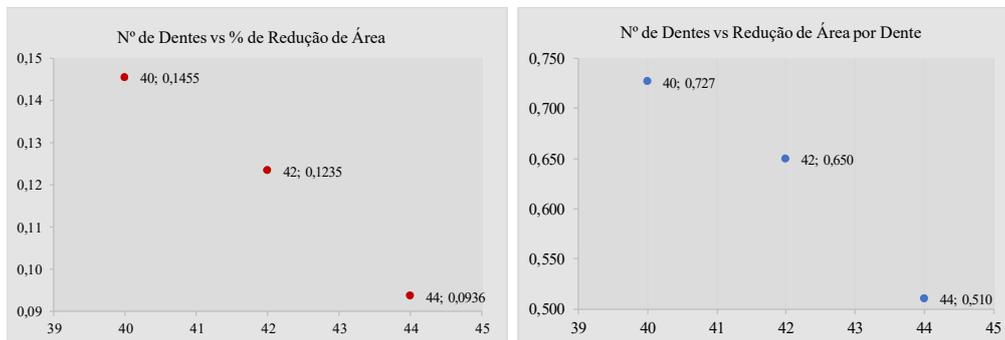
diferenças que podem estar relacionadas com as dimensões iniciais do prato de transmissão (Tabela 5.1).

**Tabela 5.1** - Comparação de testes ao mesmo componente.

<b>Chainring</b>	RED 22 – S2F	RED 22 – S2F	RED 22 – S2F
<b>Chain</b>	PCRED 22	PCRED 22	PCRED 22
<b>Connecting Link</b>	Power Lock 11s	Power Lock 11s	Power Lock 11s
<b>Cassete</b>	PG1170	PG1170	PG1170
<b>Rear Derailleur</b>	Force 22	Force 22	Force 22
<b>Redução de Área do Prato [mm<sup>2</sup>]</b>	77.870	78.017	83.371
<b>Redução de Área [%]</b>	0.2224	0.2373	0.2373
<b>Nº de Dentes no Prato</b>	53	53	53
<b>Nº de Dentes na Cassete</b>	28	28	28
<b>Redução de Área por Dente [mm<sup>2</sup>]</b>	1.47	1.47	1.57

- Quando são testados pratos do mesmo tipo, alterando apenas o número de dentes, é possível observar que quanto menor o número de dentes maior a percentagem de redução de área e área de redução por dente, tal como é possível observar na Figura 5.3.

Nº de Testes	Nº de Dentes	Média da % de Redução de Área	Média de Redução de Área por Dente [mm <sup>2</sup> ]
3	40	0,1455	0,727
1	42	0,1235	0,650
1	44	0,0936	0,510



**Figura 5.3** – Correlação em número de dentes e desgaste

- O tipo de corrente tem um papel muito importante no desgaste do prato de transmissão, podendo concluir-se que correntes diferentes em pratos iguais produzem desgastes consideravelmente diferentes tal como se pode constatar na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2** - Influência da corrente no desgaste.

Chainring	Corrente	PowerLock®	Cassete	Desviador Treseiro	Redução de Área [mm <sup>2</sup> ]	Redução de Área [%]	Nº de Dentes no Prato	Nº de Dentes na Cassete	Redução de Área por dente [mm <sup>2</sup> ]
Qactus 48/35 - T0	Doppio - Proto #3.6	Doppio - Prototype	PG1170	FORCE 22	80,302	0,281362786	48	28	1,67
Qactus 48/35 - T0	Doppio - Proto #5	Doppio - Prototype	PG1170	FORCE 22	65,125	0,22816422	48	28	1,36

### 5.1.2. Teste realizado no terreno

À semelhança do teste laboratorial o objetivo deste teste é avaliar o desgaste que o prato de transmissão apresenta após um determinado período de real utilização. O sistema é então montado numa bicicleta que é utilizada de forma regular pelo ciclista, replicando perfeitamente as condições de funcionamento.

O teste é dividido em determinados intervalos temporais para serem feitas medições dos perfis do prato de transmissão. Nestes intervalos de tempo os ciclistas têm de registar o número de quilómetros, a trajetória do percurso, as condições atmosféricas, tipo de terreno em que foi utilizada a bicicleta e se ocorreu algum problema.

Do teste também é possível retirar informação sobre a potência média produzida pelo ciclista e o tempo que cada ciclista utilizou numa determinada relação de transmissão, tal como exemplificado na Figura 5.4.



**Figura 5.4** – Tempo de utilização de cada relação de transmissão.

Podendo considerar-se este o teste que melhor representa as condições de utilização real, apresenta, no entanto, algumas desvantagens. Depende do ciclista que vai utilizar o sistema de transmissão o que faz com que o teste seja muito mais demorado. Na Tabela 5.3 evidenciam-se algumas diferenças entre os dois tipos de teste, laboratorial e no terreno.

**Tabela 5.3** - Diferenças entre laboratório e terreno.

	<b>Laboratório</b>	<b>Terreno</b>
Momento torsor exercido no prato de transmissão	Constante	Sinusoidal
Agentes externos	Óleo, sílica	Óleo, água, ferro, níquel, zinco, molibdênio, alumínio, carbonato de cálcio, sílica
Dimensões das partículas	≈ 75 μm	< 150 μm
<i>Cross chaining</i>	Mais desfavorável possível	Variável
Velocidade de rotação	Constante	Variável
Potência	400 W	Variável
Relação de transmissão	Constante	Variável, depende do ciclista
Mecanismo de desgaste	Predominantemente abrasão, deformação plástica	Predominantemente abrasão, adesão e deformação plástica.
Condições ambientais	Constantes*	Dependentes das condições atmosféricas

\*apesar de não controladas as condições em laboratório são aproximadamente constantes e semelhantes, temperatura, humidade, ambiente não reativo.

## 5.2. Fontes de incerteza

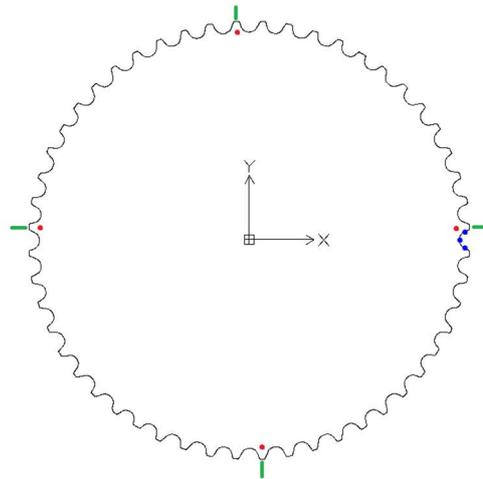
Durante a execução dos testes foram identificadas algumas fontes de incerteza quer relacionadas com a realização do teste quer na recolha dos resultados do teste. Estas fontes de incerteza podem afetar a interpretação dos resultados ou então contribuir para uma variabilidade das condições testadas.

### 5.2.1. Medição

Uma das limitações do teste está relacionada com a medição dos perfis do prato de transmissão na CMM. Esta medição necessita que sejam referenciados alguns pontos para definir o plano e os eixos de onde irá ser feita a medição.

Como esta referenciação tem de ser efetuada cada vez que se faz uma medição é crucial que seja sempre feita da mesma forma, porque uma pequena diferença no sistema de referência causa alterações no perfil medido pela CMM.

Cada vez que é efetuada uma medição o prato apresenta sempre dimensões diferentes, por esta razão é extremamente complicado definir um sistema de referência exatamente igual ao da anterior medição, tornando os resultados ligeiramente diferentes de medição para medição.



**Figura 5.5** - Representação do procedimento de referenciação da medição do prato.

A Figura 5.5 representa o procedimento para se criar o sistema de referência, que é constituído por três passos, representados pelas diferentes cores (verde, vermelho e azul).

No primeiro passo, são indicados os quatro pontos a vermelho, em que o palpador toca na superfície do prato, por forma a criar o plano 0XY.

No segundo passo, o palpador da CMM encosta na extremidade dos dentes indicados pela cor verde, para referenciar o prato no espaço.

Por último, são indicados os três pontos a azul que são utilizados para traçar o eixo 0X. Estes são a principal fonte de incerteza uma vez que aquela zona do prato vai-se alterando devido ao desgaste sofrido.

### 5.2.2. Parâmetros de teste

Os parâmetros de teste introduzidos na máquina nem sempre coincidem com os parâmetros de operação. Para um determinado teste, foram por exemplo, introduzidos na máquina os seguintes parâmetros: velocidade de rotação: 70rpm e torque na cassete: 33.6N·m.

Na Figura 5.6 pode observar-se que estes valores não estão a ser operacionalizados, tal como é visível na linha a branco que representa o momento torsor na cassete e onde este apresenta uma variação de amplitude considerável, com picos superiores e inferiores ao valor definido.

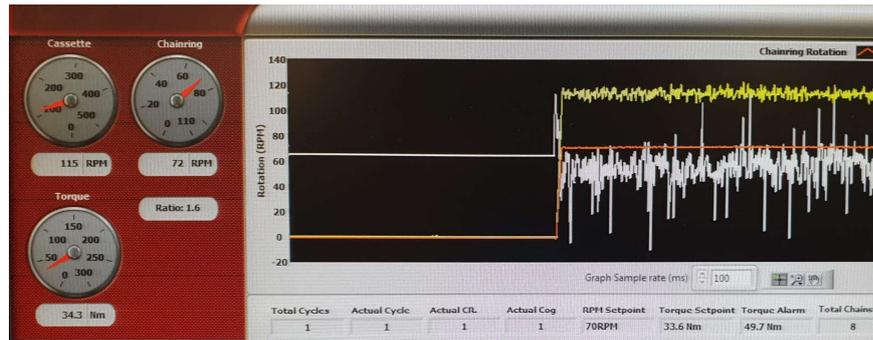


Figura 5.6 - Parâmetros da máquina.

### 5.2.3. Aplicação da pasta abrasiva

A aplicação da pasta abrasiva pode ser feita de duas formas diferentes, mediante o tipo de pasta utilizada. Esta pode ser aplicada manualmente com o recurso a uma seringa, ou então automaticamente com o recurso a uma bomba peristáltica.

Se a aplicação for feita manualmente é depositada uma gota de pasta abrasiva em cada rolo da corrente, o que leva a que a quantidade aplicada em cada rolo possa não ser sempre a mesma.

Se for feita de forma automática, é necessário regular o caudal da bomba. Esse caudal é regulado fazendo rodar um parafuso que altera a velocidade de rotação da bomba.

O valor de rotação normalmente utilizado é 0.5 rpm, mas como a resolução da máquina é 0.1 não é possível saber se este valor é o exato, podendo variar entre 0.46 e 0.54 rpm. Esta variação reflete-se numa variação de caudal tal como exemplificado na Figura 5.7.

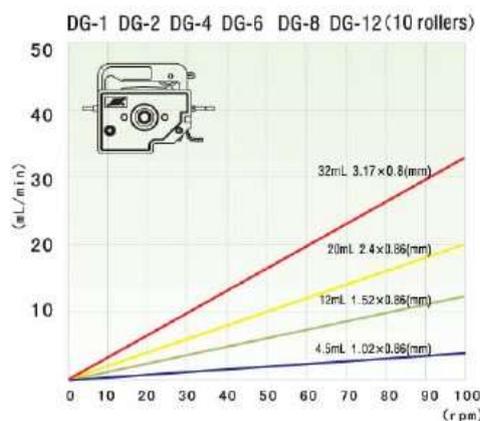


Figura 5.7 – Curvas de variação de caudal da bomba peristáltica.

Uma vez que é utilizado um tubo de diâmetro interno de 2.4 mm, a reta que descreve a variação de caudal com o aumento da rotação é  $y = 0.2x$ . Tem-se então que o caudal pode variar entre 0.092 ml/min e 0.108 ml/min.

### 5.3. Fatores influenciadores

De seguida, serão enumerados e descritos diversos fatores que têm influência direta sobre o desgaste observado no prato de transmissão afetando a respetiva taxa de desgaste.

#### 5.3.1. Número de dentes na cassette

O aumento de número de dentes no carreto da cassette faz com que o torque na cassette seja maior. Para as mesmas condições de funcionamento, uma cassette com 30 dentes apresenta um torque de 28,65 Nm, enquanto com 36 dentes este torque sobe para 34,38 Nm.

Este fenómeno faz com que a força que o rolo aplica no *load flank* do dente seja maior. Se esta for suficientemente elevada para que a tensão criada seja superior à tensão limite de elasticidade do material do prato de transmissão, este irá deformar-se criando rebarbas tal como observado na Figura 5.8.



Figura 5.8 – Rebarba formada durante o teste.

#### 5.3.2. Design da placa interior e do revestimento *Hard Chrome*

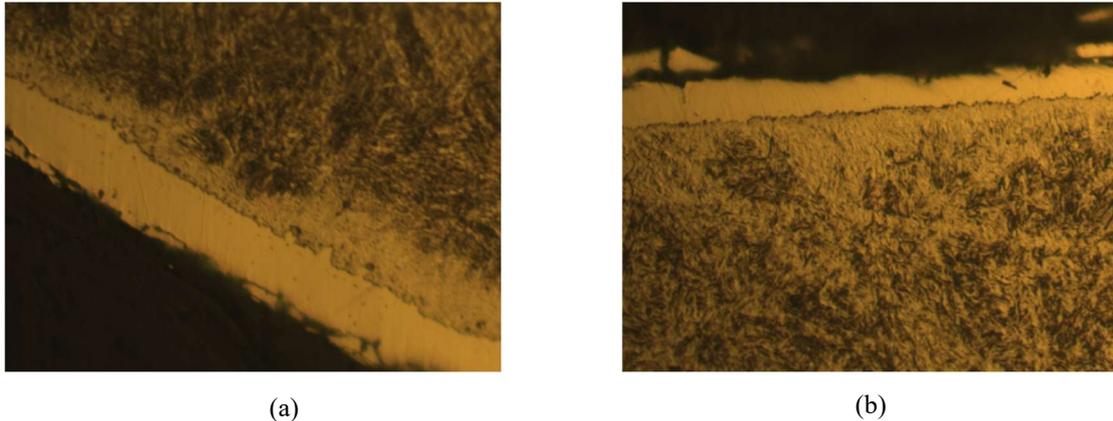
O *Hard Chrome*, também chamado internamente de tratamento delta, é um tratamento térmico feito num forno rotativo. As peças a tratar são introduzidas dentro de um invólucro juntamente com uma mistura de três substâncias: Crómio, Alumina e Cloreto de Amónio. Esta mistura é designada de cimento. Este é introduzido dentro do forno onde permanece um determinado tempo, mediante o tipo de peça a tratar.

Durante a estadia no forno desencadeiam-se uma série de reações químicas, em que o crómio se deposita à superfície das peças de aço, migrando em seguida para o seu interior. O cloreto de amónio e a alumina servem como catalisadores da reação, ou seja, vão contribuir para que os iões de crómio difundam à superfície das peças e estabeleçam ligações ao carbono do aço formando assim carbonetos de crómio (Gomes & Ferreira, 1992).

O objetivo do tratamento térmico, *Hard Chrome*, é revestir alguns dos componentes da corrente com um revestimento composto por carbonetos de crómio Este

aumenta a resistência tanto ao desgaste como à corrosão, aumentando ainda o valor da dureza superficial acima de 1200 HV. O revestimento tem uma espessura entre 7 e 15  $\mu\text{m}$  nos pinos e entre 5 e 15  $\mu\text{m}$  nas placas internas. Na Figura 5.9 mostram-se algumas micrografias evidenciando o revestimento *Hard Chrome*.

O *design* das placas internas de algumas correntes apresentam uma borda afiada, que associado ao revestimento *Hard Chrome* resulta num desgaste excessivo do prato de transmissão.



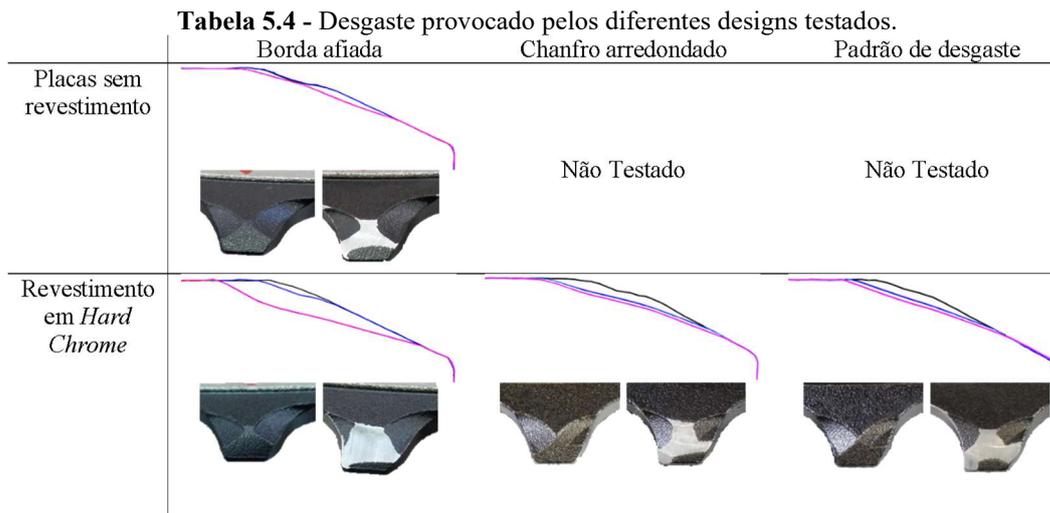
**Figura 5.9** - Imagens microscópicas da camada do revestimento Hard Chrome, (a) eixos, (b) placas

Foi executado um estudo para perceber a influência dos parâmetros anteriormente mencionados no desgaste de pratos de transmissão. Foram testados dois tipos de design. O primeiro consistia num chanfro arredondado por forma a eliminar a borda afiada, o outro consistia num padrão de desgaste, tal como mostrado na Figura 5.10.



**Figura 5.10** - Design das placas internas testados.

Na Tabela 5.4 são apresentados os resultados obtidos para os diferentes testes por forma a avaliar a influência do design da placa interna no desgaste dos dentes do prato de transmissão. São igualmente apresentados o perfil de desgaste lateral bem como uma imagem de cada dente, no início e no final do teste.



### 5.3.3. Velocidade de rotação

Como descrito anteriormente, a velocidade de rotação utilizada nos testes de desgaste de prato é fixada em 80 rpm. Porém, no teste de desgaste de corrente, que é similar ao teste de desgaste de prato, é utilizada uma velocidade de rotação de 70 rpm.

Estudos efetuados pela SRAMPort para o teste de desgaste de corrente, revelaram que em algumas combinações prato de transmissão/cassete, a corrente entra em ressonância para uma velocidade de rotação de 80 rpm o que é prejudicial para o sistema de transmissão e também produz muito ruído. Como resultado deste estudo a velocidade foi alterada para 70 rpm diminuindo assim a possibilidade de a corrente atingir uma frequência própria de vibração e entrar em ressonância.

Por outro lado, a velocidade de rotação tem influência sobre as condições de funcionamento do sistema de transmissão, isto é, se a potência for mantida constante e se diminuir a velocidade de rotação iremos ter um aumento do valor do torque na cassete e da carga na corrente. Na Tabela 5.5 é apresentada essa variação para um prato de 50 dentes com um carreto de 30 dentes.

**Tabela 5.5 - Variação dos parâmetros com alteração da velocidade de rotação.**

Potência [W]	400	
Velocidade de rotação [rpm]	80	70
Carga na corrente [N]	472,4	539,9
Torque na cassete [N·m]	28,65	32,74

## 6. Resultados e discussão

Nas Tabelas 6.1-6.4 são apresentados os resultados do desgaste obtido durante um teste realizado no terreno. Este teste teve como objetivo simular a vida útil de um sistema de transmissão, SRAM RED ETAP®, para a modalidade de ciclismo de estrada. O plano de teste teve duas vertentes, uma em que a corrente era substituída no grupo a 0,8 % de alongamento (FDT#1) e outra vertente em que não foi substituída (FDT#2).

A transmissão utilizada neste teste foi a seguinte: prato de transmissão 52T/36T, cassete 11-30T.

**Tabela 6.1** - Medições do prato exterior testado em terreno (FDT#1).

Duração [h]	Área do prato [mm <sup>2</sup> ]	Redução de área por dente [mm <sup>2</sup> ]	Comprimento da corrente [mm]	Alongamento da Corrente [%]	Redução de área [%]
0	33671,359	0,000	1360,15	0,00%	0,000%
354,94	33607,764	1,223	1367,90	0,57%	0,189%
595,23	33565,074	2,044	1371,00	0,80%	0,316%
595,23 *	33565,074	2,044	1359,79	0,00%	0,316%
840,85	33508,864	3,125	1369,69	0,73%	0,483%
901,35	33492,625	3,437	1371,10	0,83%	0,531%

\* Corrente Nova

**Tabela 6.2** - Medições do prato interior testado em terreno (FDT#1).

Duração [h]	Área do prato [mm <sup>2</sup> ]	Redução de área por dente [mm <sup>2</sup> ]	Comprimento da corrente [mm]	Alongamento da Corrente [%]	Redução de área [%]
0	16099,443	0,000	1360,15	0,000%	0,000%
354,94	16084,282	0,421	1367,90	0,570%	0,094%
595,23	16064,919	0,959	1371,00	0,798%	0,214%
595,23 *	16064,919	0,959	1359,79	0,000%	0,214%
840,85	16055,876	1,210	1369,69	0,728%	0,271%
901,35	16051,730	1,325	1371,10	0,832%	0,296%

\* Corrente Nova

**Tabela 6.3** - Medições do prato exterior testado em terreno (FDT#2).

Duração [h]	Área do prato [mm <sup>2</sup> ]	Redução de área por dente [mm <sup>2</sup> ]	Comprimento da corrente [mm]	Alongamento da Corrente [%]	Redução de área [%]
0	33674,807	0,000	1360,15	0,000%	0,000%
566,65	33586,271	1,703	1369,29	0,672%	0,263%
626,97	33568,375	2,047	1372,73	0,925%	0,316%
684,08	33560,560	2,197	1376,33	1,190%	0,339%

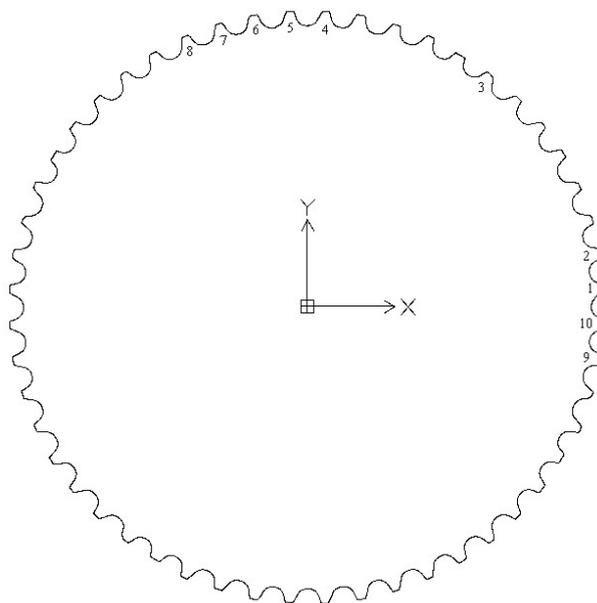
**Tabela 6.4** - Medições do prato interior testado em terreno (FDT#2).

Duração [h]	Área do prato [mm <sup>2</sup> ]	Redução de área por dente [mm <sup>2</sup> ]	Comprimento da corrente [mm]	Alongamento da Corrente [%]	Redução de área [%]
0	16089,815	0,000	1360,15	0,000%	0,000%
566,65	16072,278	0,487	1369,29	0,672%	0,109%
626,97	16071,692	0,503	1372,73	0,925%	0,113%
684,08	16061,618	0,783	1376,33	1,190%	0,175%

Os pratos de transmissão interiores (36 dentes) apresentam uma percentagem de desgaste menor, uma vez que são menos utilizados que os pratos de transmissão exteriores (52 dentes). Como visto anteriormente, quando se comparam pratos de transmissão do mesmo tipo, menor número de dentes implica maior desgaste.

Realizaram-se testes em laboratório ao mesmo sistema de transmissão que o utilizado no teste de terreno com a diferença que neste caso a cassete utilizada foi a 11-32T.

A Figura 6.1 ilustra a identificação numérica dos dentes analisados durante o estudo.



**Figura 6.1** - Identificação numérica dos dentes examinados nos testes.

Foram executados três testes diferentes variando os parâmetros tal como apresentado na Tabela 6.5. Os resultados obtidos podem ser observados nas Tabelas 6.6 - 6.8.

**Tabela 6.5** - Parâmetros dos testes.

Teste	80rpm/7h	70rpm/24h	70rpm/7h
Velocidade de rotação [rpm]	80	70	70
Carga na corrente [N]	454,3	519,2	519,2
Torque na cassete [N·m]	29,38	33,58	33,58
Intervalo de inspeção [h]	7	24	7
Aplicação da pasta abrasiva	Manual <sup>(a)</sup>	Automática <sup>(b)</sup>	Automática <sup>(b)</sup>
Composição da pasta abrasiva	75g de SiO <sub>2</sub> + 100ml de Óleo	10g de SiO <sub>2</sub> + 100ml de Óleo	10g de SiO <sub>2</sub> + 100ml de Óleo

<sup>(a)</sup>aplicada uma gota em cada rolo no início de cada intervalo

<sup>(b)</sup>aplicada continuamente, com recurso a uma bomba peristáltica

**Tabela 6.6** - Medições do prato exterior testado em laboratório (80rpm/7h).

Duração [h]	Área do prato [mm <sup>2</sup> ]	Redução de área por dente [mm <sup>2</sup> ]	Comprimento da corrente [mm]	Alongamento da Corrente [%]	Redução de área [%]
0	33677,574	0,000	1411,14	0,00%	0,00
7	33669,527	0,155	1412,44	0,09%	0,02
14	33661,273	0,313	1413,05	0,14%	0,05
21	33655,080	0,433	1413,68	0,18%	0,07
28	33642,873	0,667	1414,46	0,24%	0,10
35	33632,289	0,871	1414,97	0,27%	0,13
42	33622,283	1,063	1415,50	0,31%	0,16

**Tabela 6.7** - Medições do prato exterior testado em laboratório (70rpm/24h).

Duração [h]	Área do prato [mm <sup>2</sup> ]	Redução de área por dente [mm <sup>2</sup> ]	Comprimento da corrente [mm]	Alongamento da Corrente [%]	Redução de área [%]
0	33693,843	0,000	1411,14	0,00%	0,00
24	33630,968	1,209	1413,31	0,15%	0,19
28	xxx	xxx	1413,82	0,19%	xxx

**Tabela 6.8** - Medições do prato exterior testado em laboratório (70rpm/7h).

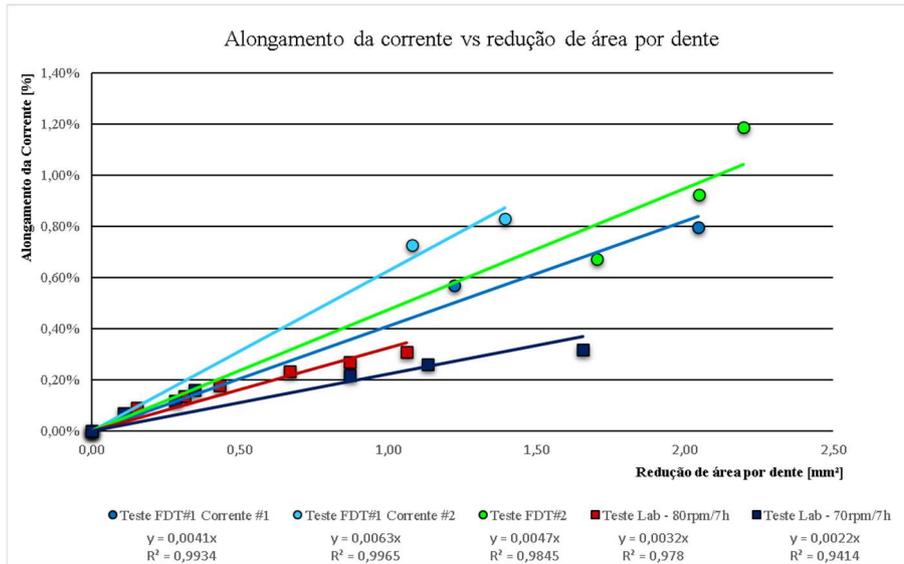
Duração [h]	Área do prato [mm <sup>2</sup> ]	Redução de área por dente [mm <sup>2</sup> ]	Comprimento da corrente [mm]	Alongamento da Corrente [%]	Redução de área [%]
0	33689,245	0,000	1410,78	0,00%	0,00
7	33683,578	0,109	1411,78	0,07%	0,02
14	33674,503	0,284	1412,45	0,12%	0,04
21	33671,119	0,349	1413,07	0,16%	0,05
28	33643,958	0,871	1413,85	0,22%	0,13
35	33630,295	1,134	1414,48	0,26%	0,17
42	33603,152	1,656	1415,29	0,32%	0,26

Autoshift às 42h04min 42h07min e 42h08min

Pela análise dos resultados, pode concluir-se, que o teste realizado a 70 rpm e com um intervalo de inspeção de 24 horas revelou que o efeito da troca da posição de engrenamento da corrente em relação ao prato tem um papel fundamental no desgaste do prato. Durante o primeiro período de inspeção, as placas internas da corrente estiverem sempre a engrenar no mesmo grupo de dentes o que fez com que a remoção de material nesse grupo fosse muito pronunciada. Pouco tempo após se ter modificado a posição de engrenamento das placas interiores ocorreram falhas por *autoshift* e por *chainsuck*.

Constatou-se que a taxa de desgaste da corrente, relativamente ao desgaste de prato, é maior para o teste realizado no terreno do que em laboratório.

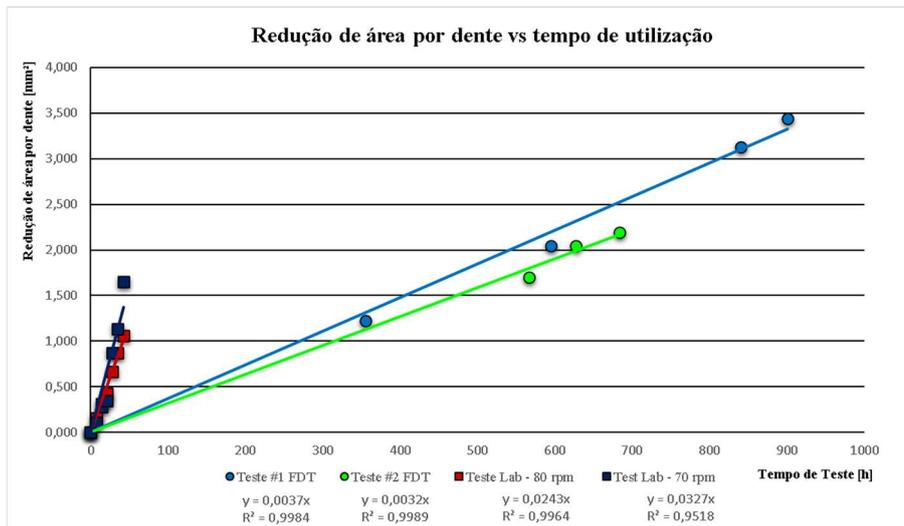
A Figura 6.2 apresenta a taxa de desgaste da corrente em relação à redução por dente.



**Figura 6.2** - Taxa de desgaste da corrente em relação à redução por dente.

Analisando a Figura 6.2 verifica-se que a taxa de desgaste da corrente em relação ao desgaste de prato é diferente de teste para teste. Apresentando o valor mínimo para o teste realizado a 70 rpm e o valor máximo para a segunda corrente do teste realizado no terreno FDT#1.

Quando se comparam os resultados no terreno com os resultados realizados em laboratório constata-se que a taxa de desgaste da corrente em relação ao desgaste do prato é superior e se situa entre 1.3-1.5 no caso do teste executado a 80 rpm e entre 1.9-2.1 no teste realizado a 70 rpm.



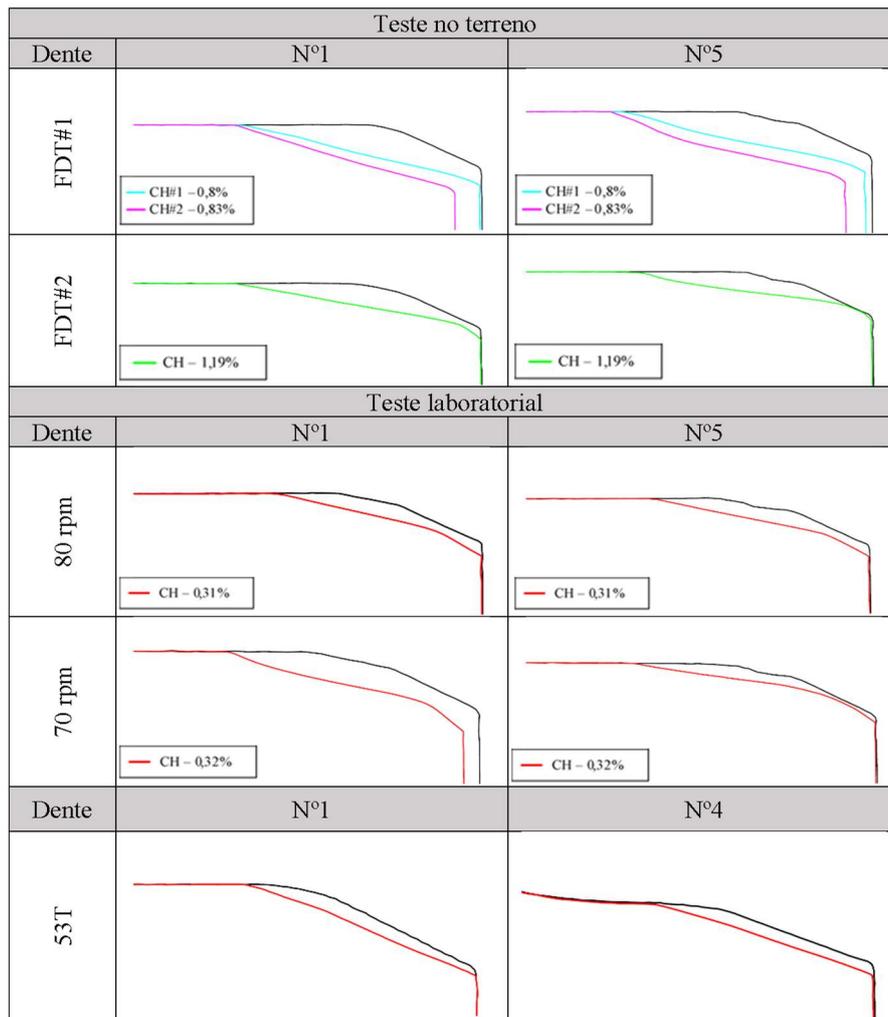
**Figura 6.3** - Redução de área por dente em relação ao tempo de teste.

Tal como esperado, uma vez que o objetivo do teste de laboratório é simular e acelerar o processo real, a redução de área por dente em relação ao tempo de teste é muito superior no teste em laboratório, tal como se pode observar na Tabela 6.9.

**Tabela 6.9** - Relação entre taxa de desgaste por dente no terreno e no laboratório (mm<sup>2</sup>/h).

TESTE	80 rpm/7h	70 rpm/7h	FDT#1	FDT#2
Taxa de desgaste	0,0253	0,0394	0,0038	0,0032

Na Figura 6.4 são apresentados os perfis de desgaste lateral obtidos através da medição na CMM, em que as linhas a preto apresentam o perfil sem desgaste e as linhas a cor o perfil no final do teste.



**Figura 6.4** - Perfis de desgaste lateral.

Analisando a Figura 6.4 verifica-se que embora a redução de área por dente tenha sido maior no teste feito a 70 rpm (com um intervalo de inspeção de 7 horas) do que no teste a 80 rpm com o mesmo intervalo de inspeção, o padrão que o desgaste lateral apresenta é idêntico, com a exceção do dente número 1 em que a altura do dente também diminui.

Referentemente aos testes no terreno observa-se que o padrão e evolução do desgaste lateral é bastante diferente. No teste FDT#2 o desgaste lateral é muito menos pronunciado e é também de realçar que no teste FDT#1 ocorre não só desgaste lateral, mas

também podemos verificar que existe uma redução da altura do dente, que é muito acentuada às 595 horas de teste, altura em que a corrente é substituída por uma nova. Esta redução de altura estará relacionada com o período de *running-in* da corrente.

Quando se compara o padrão de desgaste lateral entre os testes realizados no laboratório e testes realizados no terreno, verifica-se que no laboratório este é mais “arredondado”, mas também que a perda de material na face lateral externa do dente é menor.

Na Figura 6.4 são também apresentados os resultados do teste laboratorial a um prato de 53 dentes (53T). Embora não tenha sido executado um estudo tão profundo nos pratos de dentes ímpares, este é referido por forma a que o engrenamento das placas interiores seja aleatório.

Constata-se que o perfil mais “arredondado” deixa de aparecer nos pratos de dentes ímpares.

No caso de desgaste lateral não se identifica o efeito da carga não ser contante no teste realizado no terreno, apresentando antes um perfil idêntico tanto nos dentes paralelos como nos dentes perpendiculares ao pedal, tal como se pode observar pela análise das Figuras 6.6 - 6.9.

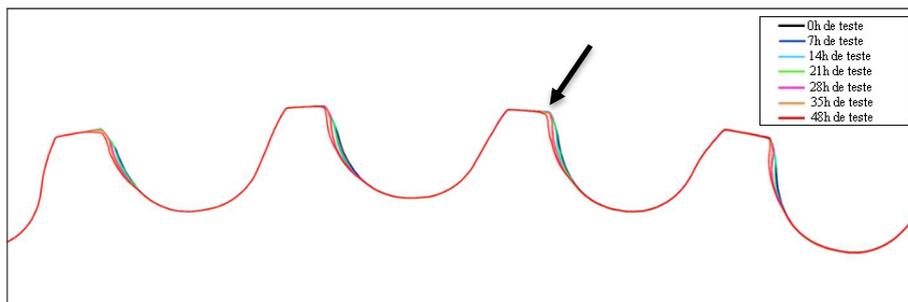


Figura 6.5 - Evolução do desgaste no *load flank* (70rpm/7h).

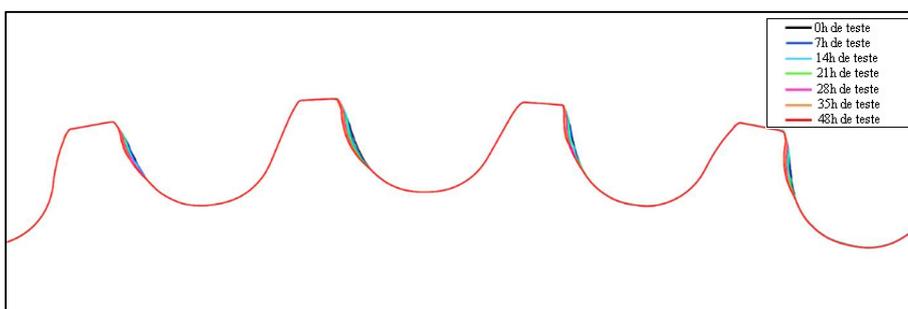
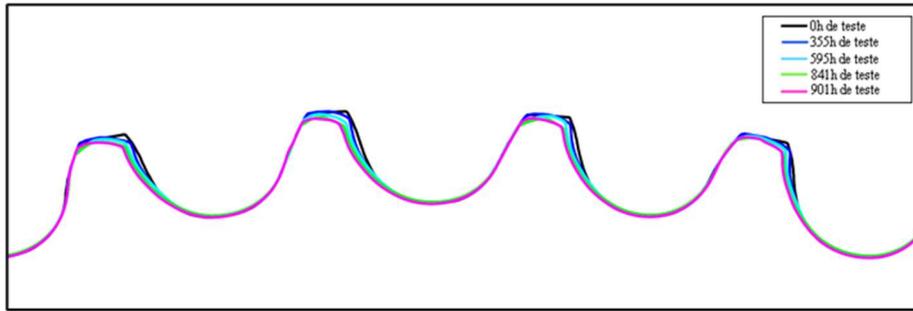
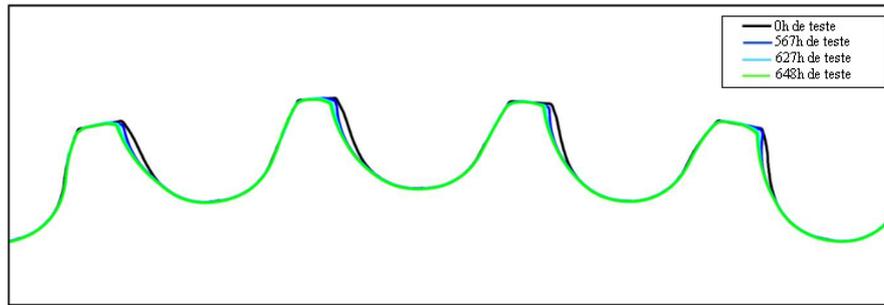


Figura 6.6 - Evolução do desgaste no *load flank* (80rpm/7h).



**Figura 6.7** - Evolução do desgaste no *load flank*, dentes perpendiculares ao pedal (FDT#1).

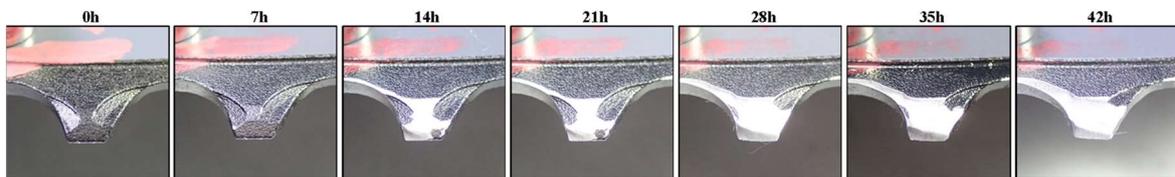


**Figura 6.8**- Evolução do desgaste no *load flank*, dentes perpendiculares ao pedal (FDT#2).

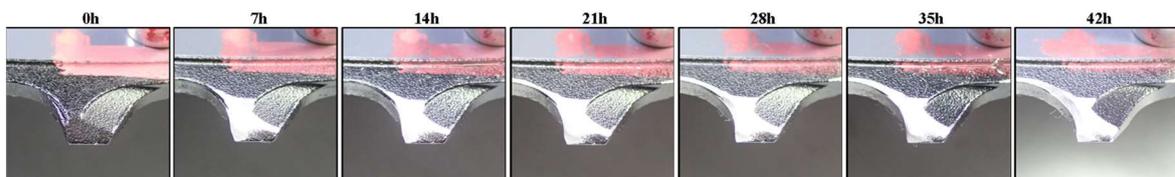
Entre os testes realizados em laboratório observa-se que o desgaste no *load flank* é ligeiramente diferente no teste realizado a 80 rpm, onde o desgaste é mais localizado provocando uma cratera no dente, enquanto no teste realizado a 70 rpm o desgaste se prolonga por toda a zona lateral do dente. Neste teste acontece também deformação plástica no dente, indicada pela seta representada na Figura 6.5.

Nos testes realizados no terreno, com já referido anteriormente, pode-se observar uma redução da altura do dente (teste FDT#1). Por outro lado, a perda de material na zona de contacto do rolo com o dente é semelhante.

As Figuras 6.9 – 6.16 mostram o aspeto visual do desgaste para os diversos dentes.



**Figura 6.9** - Aspeto visual do desgaste presente no dente nº1 (70rpm/7h).



**Figura 6.10** - Aspeto visual do desgaste presente no dente nº10 (70rpm/7h).

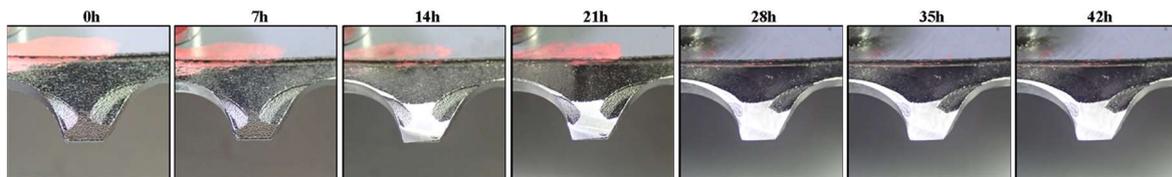


Figura 6.11 - Aspeto visual do desgaste presente no dente nº1 (80rpm/7h).

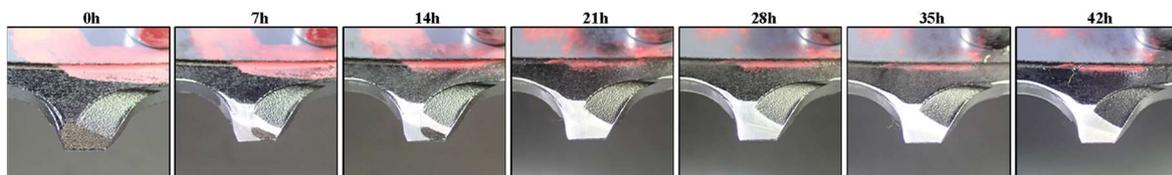


Figura 6.12 - Aspeto visual do desgaste presente no dente nº10 (80rpm/7h).

Nas Figura 6.9 e Figura 6.11 constata-se que só há evolução no desgaste do dente no segundo intervalo de inspeção (7h para 14h), enquanto que nas Figura 6.10 e 6.12 existe evolução do desgaste logo no primeiro intervalo (0h para 7h).

Isto deve-se à posição de engrenamento das placas interiores da corrente: No primeiro intervalo estas encontram-se engrenadas nos dentes pares, no intervalo seguinte a posição de engrenamento é alterada passando a engrenarem nos dentes ímpares. Este fenómeno apenas acontece em pratos com o número de dentes pares.



Figura 6.13 - Aspeto visual do desgaste presente no dente nº1 (FDT#1).



Figura 6.14 - Aspeto visual do desgaste presente no dente nº10 (FDT#1).

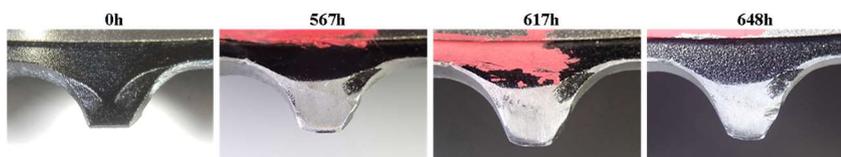


Figura 6.15 - Aspeto visual do desgaste presente no dente nº1 (FDT#2).

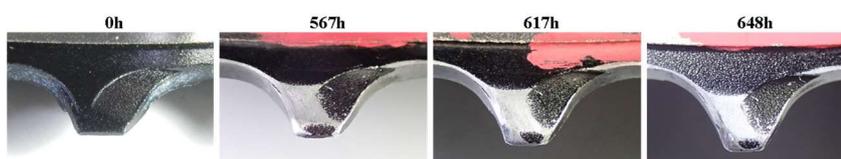


Figura 6.16 - Aspeto visual do desgaste presente no dente nº10 (FDT#2).

Através da análise das fotografias dos dentes dos testes no terreno, verificamos que não acontece o fenómeno anteriormente enunciado, pois neste caso a troca entre pratos de transmissão faz com que a posição de engrenamento das placas interiores possa alterar, tornando assim essa posição completamente aleatória. Com esta aleatoriedade não temos desgaste presente apenas num grupo de dentes (pares ou ímpares).

Na Figura 6.13 encontra-se destacado com um círculo a vermelho uma zona onde ocorreu uma remoção significativa de material no dente. Isto poderá ter origem numa troca de mudança mal executada em que a placa interior engrena de forma deficiente no dente arrancando assim o material.

No teste realizado no terreno o desgaste não é uniforme pelos dentes, apresentando maior desgaste nos dentes que são perpendiculares aos pedais. Isto deve-se à carga que o ciclista aplica não ser constante, podendo ser representada por uma função sinusoidal, tal como apresentado na Figura 2.4.

A Figura 6.17 são representados os perfis de desgaste no *load flank* em duas posições, onde a carga é diferente no teste no terreno.

Nesta é visível essa não uniformidade do desgaste, uma vez que na posição B a quantidade de material removido é maior que na posição A. No teste laboratorial o fenómeno anteriormente descrito não acontece, pois, a força aplicada pelo motor é constante fazendo com que o desgaste seja semelhante em todos os dentes. Também é ilustrado o desgaste no *load flank* no prato de 53 dentes, onde se observa que o perfil se aproxima do perfil do FDT#2 na zona B.

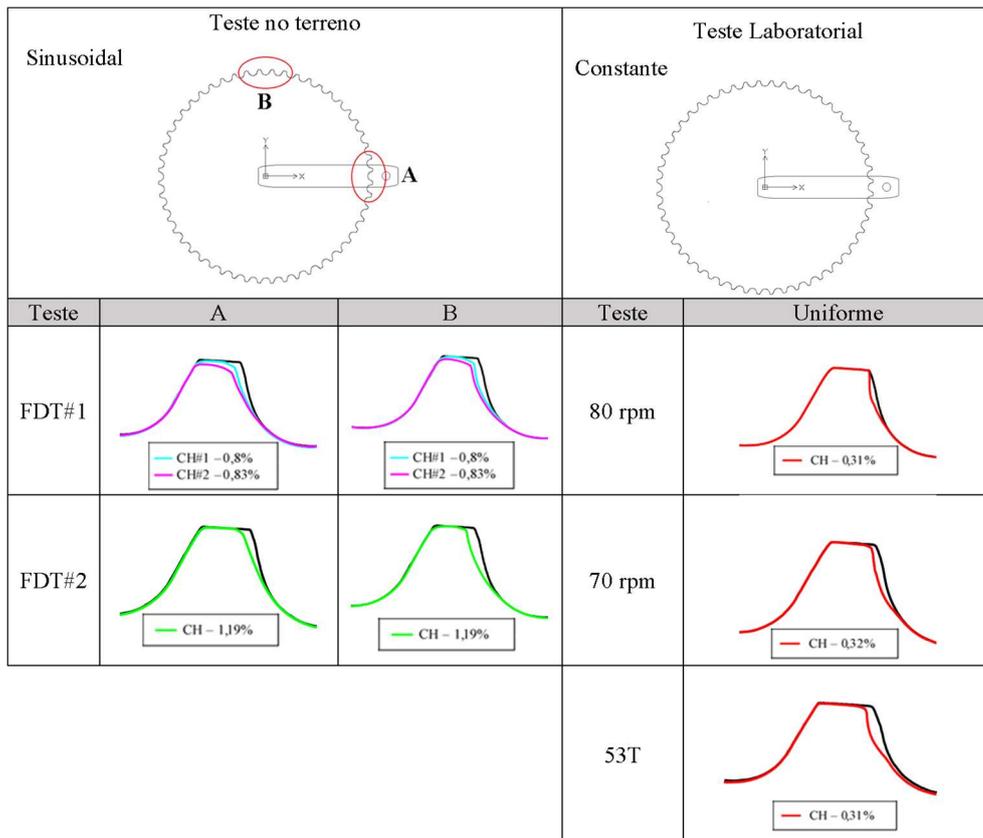


Figura 6.17 - Desgaste no *load-flank*.

## 6.1. Testes complementares

Por forma a avaliar o desempenho do sistema de transmissão foram realizados ainda outros dois tipos de testes. Estes testes são designados internamente por *Autoshift* e *Efficiency*.

### 6.1.1. *Autoshift*

Este teste avalia o desvio máximo do prato de transmissão da sua posição de funcionamento sem que a corrente desengrene.

A máquina de teste é constituída essencialmente por um motor elétrico que transmite movimento rotacional ao prato de transmissão. O veio em que é montado o prato desloca-se por forma a avaliar o desvio máximo que este pode ter da posição de funcionamento sem que a corrente se desengrene. Na linguagem corrente, costuma referir-se que a “corrente cai do prato”.



Figura 6.18 - Esquema do teste de *Autoshift*.

A Figura 6.18 representa um esquema do teste de *autoshift* embora a posição da corrente na cassetagem não esteja correta, pois se se tratar de um teste *inboard* a corrente é posicionada no maior e se for um teste *outboard* é posicionada no carreto menor.

A Tabela 6.10 resume os resultados obtidos para o teste de *Autoshift Inboard* de acordo com diversos parâmetros testados.

Tabela 6.10 - Resultados do teste *Autoshift Inboard* (FDT#1).

0% de Alongamento (Corrente#1)									
Ensaio	Posição Inicial				Posição Inicial	Média	Min	Max	Desvio Padrão
	1	2	3	4					
1	-10	-12	-11	-11	1,0	-11,0	-12,0	-10,0	1,0
2	-12	-12	-12	-12	2,0	-12,0	-12,0	-12,0	0,0
3	-11	-12	-11	-11	3,0	-11,3	-12,0	-11,0	0,6
					4,0	-11,3	-12,0	-11,0	0,6
					Total	-11,4	-12,0	-10,0	0,4
0,57% de Alongamento (Corrente#1)									
Ensaio	Posição Inicial				Posição Inicial	Média	Min	Max	Desvio Padrão
	1	2	3	4					
1	-3,8	-4,9	-5,8	-5	1,0	-4,5	-5,1	-3,8	0,7
2	-4,5	-4,9	-5,2	-5	2,0	-4,6	-4,9	-3,9	0,6
3	-5,1	-3,9	-5,2	-5	3,0	-5,4	-5,8	-5,2	0,3
					4,0	-5,0	-5,0	-5,0	0,0
					Total	-4,9	-5,8	-3,8	0,4
0,798 % de Alongamento (Corrente#1)									
Ensaio	Posição Inicial				Posição Inicial	Média	Min	Max	Desvio Padrão
	1	2	3	4					
1	-1,7	-3,5	-4,1	-4,3	1,0	-2,4	-2,7	-1,7	0,6
2	-2,7	-4,5	-4,1	-4,2	2,0	-3,8	-4,5	-3,5	0,6
3	-2,7	-3,5	-4,1	-5,2	3,0	-4,1	-4,1	-4,1	0,0
					4,0	-4,6	-5,2	-4,2	0,6
					Total	-3,7	-5,2	-1,7	0,9
0% Alongamento (Corrente#2)									
Ensaio	Posição Inicial				Posição Inicial	Média	Min	Max	Desvio Padrão
	1	2	3	4					
1	-2,6	-3	-2,6	-1,9	1,0	-2,3	-2,6	-1,6	0,6
2	-1,6	-3	-2,6	-1,9	2,0	-3,0	-3,0	-3,0	0,0
3	-2,6	-3	-2,6	-2,9	3,0	-2,6	-2,6	-2,6	0,0
					4,0	-2,2	-2,9	-1,9	0,6
					Total	-2,5	-3,0	-1,6	0,4
0,73% Alongamento (Corrente#2)									
Ensaio	Posição Inicial				Posição Inicial	Média	Min	Max	Desvio Padrão
	1	2	3	4					
1	2	0,6	0,9	0,6	1,0	1,1	0,3	2,0	0,9
2	1	1,6	0,9	-0,4	2,0	0,6	-0,4	1,6	1,0
3	0,3	-0,4	0,9	-0,4	3,0	0,9	0,9	0,9	0,0
					4,0	-0,1	-0,4	0,6	0,6
					Total	0,6	-0,4	2,0	0,5

**Tabela 6.11** - Resultados do teste *Autoshift Inboard* (FDT#2).

0% de Alongamento									
Ensaio	Posição Inicial				Posição Inicial	Média	Min	Max	Desvio Padrão
	1	2	3	4					
1	-8	-5	-9	-9	1,0	-8,0	-8,0	-8,0	0,0
2	-8	-8	-6	-8	2,0	-7,0	-8,0	-5,0	1,7
3	-8	-8	-9	-10	3,0	-8,0	-9,0	-6,0	1,7
					4,0	-9,0	-10,0	-8,0	1,0
					Total	-8,0	-10,0	-5,0	0,8
0,67% de Alongamento									
Ensaio	Posição Inicial				Posição Inicial	Média	Min	Max	Desvio Padrão
	1	2	3	4					
1	1,3	1	1,3	0,2	1,0	1,0	0,3	1,4	0,6
2	1,4	-0,1	0,3	1,2	2,0	0,3	-0,1	1,0	0,6
3	0,3	-0,1	0,3	1,2	3,0	0,6	0,3	1,3	0,6
					4,0	0,9	0,2	1,2	0,6
					Total	0,7	-0,1	1,4	0,3
0,92 % de Alongamento									
Ensaio	Posição Inicial				Posição Inicial	Média	Min	Max	Desvio Padrão
	1	2	3	4					
1	-0,5	-1,6	-0,4	-2	1,0	-0,5	-0,5	-0,5	0,0
2	-0,5	-2,6	-0,4	-1	2,0	-2,3	-2,6	-1,6	0,6
3	-0,5	-2,6	-0,4	-2	3,0	-0,4	-0,4	-0,4	0,0
					4,0	-1,7	-2,0	-1,0	0,6
					Total	-1,2	-2,6	-0,4	0,9
1,19% de Alongamento									
Ensaio	Posição Inicial				Posição Inicial	Média	Min	Max	Desvio Padrão
	1	2	3	4					
1	2,9	2	2	1,3	1,0	2,6	1,9	2,9	0,6
2	2,9	1	2,3	1,3	2,0	1,7	1,0	2,0	0,6
3	1,9	2	2	1,3	3,0	2,1	2,0	2,3	0,2
					4,0	1,3	1,3	1,3	0,0
					Total	1,9	1,0	2,9	0,5

**Tabela 6.12** - Resultados do teste *Autoshift Inboard* (80rpm/7h)

0,31% de Alongamento									
Ensaio	Posição Inicial				Posição Inicial	Média	Min	Max	Desvio Padrão
	1	2	3	4					
1	-7,2	-6,7	-7,4	-5,3	1,0	-7,2	-7,2	-7,2	0,0
2	-7,2	-6,7	-6,4	-5,3	2,0	-6,7	-6,7	-6,7	0,0
3	-7,2	-6,7	-6,4	-6,3	3,0	-6,7	-7,4	-6,4	0,6
					4,0	-5,6	-6,3	-5,3	0,6
					Total	-6,6	-7,4	-5,3	0,7

Efetuada uma comparação entre os resultados obtidos no teste *Autoshift Inboard* pode concluir-se que existe uma grande variabilidade nos resultados. Esta pode estar relacionada com vários fatores, como por exemplo, a forma de pedalar do ciclista, o perfil de desgaste do prato, a corrente ou mesmo as características do prato.

A corrente também pode influenciar os resultados, pois correntes de diferentes lotes podem apresentar ligeiras diferenças no arco lateral máximo a que podem ser sujeitas. No entanto, no presente teste todas as correntes usadas foram obtidas do mesmo lote de produção.

Como podemos verificar através análise das Tabela 6.10 e 6.11, os resultados iniciais dos testes realizados no terreno são consideravelmente diferentes. Possivelmente este fato estará relacionado com diferenças no prato de transmissão.

É também de notar que temos resultados mais desfavoráveis nos testes realizados no terreno, o que indicaria que o sistema não estaria funcional, porém não há relatório de falhas por parte dos ciclistas que utilizaram esse sistema de transmissão. Enquanto no teste laboratorial ocorreu logo um conjunto de falhas por *Autoshift*, a seguir ao intervalo de 42

horas em ambos os testes com intervalos de inspeção de 7 horas e no teste com 24 horas de intervalo acontece logo às 28 horas juntando ainda 100 *micro-chainsuck*.

### 6.1.2. Efficiency

Este teste avalia a eficiência do sistema de transmissão, calculando a perda de potência entre o prato de transmissão e a cassete. O teste é feito em todos os carretos da cassete, porém, para o sistema de transmissão utilizado no teste laboratorial, optou-se por fazer apenas em alguns carretos, pois neste teste apenas é utilizado o primeiro carreto. Os resultados dos respectivos testes são mostrados nas Tabelas 6.13 - 6.15

**Tabela 6.13** - Resultados do teste *Efficiency* (FDT#1).

					Alongamento	
Carreto	30T	28T	24T	21T		
Carreto	30T	28T	24T	21T	0%	Corrente#1
Eficiência	94,6%	95,4%	95,5%	95,4%		
W loss @ 400W	21,6	18,4	18,0	18,4		
Carreto	30T	28T	24T	21T	0,57%	
Eficiência	95,4%	96,20%	96,60%	96,60%		
W loss @ 400W	18,4	15,2	13,6	13,6		
Carreto	30T	28T	24T	21T	0,80%	
Eficiência *		96,72%	96,74%	96,78%		
W loss @ 400W		13,1	13,0	12,9		
Carreto	30T	28T	24T	21T	0%	Corrente#2
Eficiência	96,56%	96,52%	96,54%	96,44%		
W loss @ 400W	13,8	13,9	13,8	14,2		
Carreto	30T	28T	24T	21T	0,73%	
Eficiência *		97,2%	97,1%	96,9%		
W loss @ 400W		11,3	11,6	12,4		

\* Impossibilidade de medição

**Tabela 6.14** - Resultados do teste *Efficiency* (FDT#2).

					Alongamento	
Carreto	30T	28T	24T	21T		
Carreto	30T	28T	24T	21T	0%	Corrente#1
Eficiência	95,1%	95,3%	95,4%	95,1%		
W loss @ 400W	19,6	18,8	18,4	19,6		
Carreto	30T	28T	24T	21T	0,67%	
Eficiência	97,4%	97,33%	97,37%	97,42%		
W loss @ 400W	10,4	10,7	10,5	10,3		
Carreto	30T	28T	24T	21T	0,92%	
Eficiência	97,60%	97,36%	97,75%	97,22%		
W loss @ 400W	9,6	10,6	9,0	11,1		
Carreto	30T	28T	24T	21T	1,19%	
Eficiência *		97,33%	97,36%	97,29%		
W loss @ 400W		10,7	10,6	10,8		

\* Impossibilidade de medição

**Tabela 6.15**- Resultados do teste *Efficiency* (80rpm/7h).

					Alongamento	
Carreto	32T U	32T N	28T	25T	22T	
Carreto	32T U	32T N	28T	25T	22T	0,31%
Eficiência	97,4%	97,7%	97,2%	97,2%	0,9678	
W loss @ 400W	10,4	9,2	11,1	11,0	12,88	

U - Usado; N - Novo

Como mostrado na Tabela 6.13 e Tabela 6.14, quando o sistema de transmissão não tem utilização, este apresenta uma eficiência mais baixa que após algum tempo de

utilização. Este fato está relacionado com o *running-in* do sistema sendo que após esse período a eficiência mantém-se praticamente constante.

Os resultados entre os diferentes testes são semelhantes, embora o teste FDT#2, em que não se mudou a corrente é ligeiramente mais eficiente que o outro.

Na Tabela 6.13 verifica-se que a corrente também é responsável por variações na eficiência do sistema, uma vez que quando esta é substituída por uma nova ocorre um aumento da eficiência do sistema.

No teste laboratorial fez-se o teste em dois carretos de 32 dentes para avaliar a diferença entre um carreto novo e um carreto no qual se executou o teste de desgaste de prato. Por análise da Tabela 6.15 constata-se que existe uma diferença mínima na eficiência com vantagem para o carreto novo. Os restantes carretos não apresentam desgaste significativo, pois estes não são utilizados no teste de desgaste de prato.

## 7. CONCLUSÕES

Em primeira análise, podemos concluir que o teste que simula mais fidedignamente o teste no terreno é o teste em pratos com dentes ímpares. A razão por detrás desta conclusão é a aleatoriedade da posição engrenamento das placas interiores, tal como acontece no terreno em condições reais.

Podemos também concluir, que o componente que mais contribui para o desgaste dos pratos de transmissão é a corrente, especificamente as placas interiores da corrente.

Para o teste laboratorial se aproximar mais das condições reais, a troca de posição de engrenamento das placas interiores deve ser efetuada mais vezes, não só no final do intervalo de inspeção pois este é bastante alongado. O fato de aumentar o número de trocas de posição de engrenamento aproxima o sistema de transmissão da aleatoriedade do terreno.

Relativamente ao método de aplicação da pasta abrasiva, não se pode concluir qual o mais indicado pois os resultados são semelhantes. Apenas se pode afirmar que tanto em questões de limpeza e facilidade de aplicação, o método de aplicação automática constante é melhor.

Quanto à velocidade de rotação da máquina, uma vez que a 70 rpm não existe ressonância da corrente, dever-se-ia ajustar a velocidade para 70 rpm e também ajustar a potência para que os restantes parâmetros, torque na cassette e carga na corrente sejam iguais.

É extremamente complicado replicar exatamente o perfil de desgaste que acontece no terreno, uma vez que existem muitas variáveis em jogo: o tipo de ciclista, a forma de utilização, a aleatoriedade na escolha de velocidade, as condições atmosféricas, a manutenção executada entre outras, que são praticamente impossíveis de replicar no laboratório.

Embora o teste laboratorial não consiga replicar totalmente o desgaste que acontece no terreno e também tenha a taxa de desgaste de corrente menor, este representa uma boa aproximação.



## REFERÊNCIAS

- Brown, S., & Allen, J. (2016). *Bicycle Chain and Sprocket Engagement and Wear*. <https://www.sheldonbrown.com/chain-wear.html>
- Did you Know. (n.d.). *Bicycle facts*. Retrieved August 19, 2020, from <https://didyouknow.org/bicycles/>
- domtotal. (2018). *Evolução da bicicleta: materiais, design e mobilidade*. <https://domtotal.com/noticia/1238074/2018/03/evolucao-da-bicicleta-materiais-design-e-mobilidade/>
- Dowling, N. E. (2019). *Mechanical Behavior of Materials* (4th ed.).
- Errichello, R. L. (2011). Morphology of micropitting. *American Gear Manufacturers Association Fall Technical Meeting 2011, December*, 255–273.
- Figueiredo, L. (2009). *Comparação do desgaste de correntes de bicicleta em condições de serviço e em laboratório*. <https://eg.sib.uc.pt/handle/10316/20426>
- Gomes, I., & Ferreira, P. (1992). *FORNOS DE TRATAMENTO DELTA*.
- Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). Tribology: Friction and wear of engineering materials: Second Edition. In *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials: Second Edition*. Elsevier Inc.
- Kato, K., & Adachi, K. (2001). *Wear Mechanisms 7.1 7.2*.
- Levarda, E. (2018). Bicycle transmissions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 444(5). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/444/5/052013>
- Levy, J. (2000). *J LEVY | BikeTechArticles | Chain-Suck : Its causes and mechanisms, How to avoid, prevent, and remedy*. <http://fagan.co.za/Bikes/Csuck/>
- Mitutoyo. (n.d.). *Mitutoyo, Product: CNC CMM, CRYSTA-Apex S 574*. Retrieved August 19, 2020, from [https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/pt/mitutoyo/CRYSTA-APEX%20S900%20Series/CNC-Koordinatenmessger%C3%A4te%20Crysta-Apex%20C574/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/191-248/index.xhtml](https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/pt/mitutoyo/CRYSTA-APEX%20S900%20Series/CNC-Koordinatenmessger%C3%A4te%20Crysta-Apex%20C574/$catalogue/mitutoyoData/PR/191-248/index.xhtml)
- Mulhearn, T. O., & Samuels, L. E. (1962). The abrasion of metals: A model of the process. *Wear*, 5(6), 478–498. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(62\)90064-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(62)90064-9)
- Open Cycle. (2016). *Sram Force Chainring*. <https://opencycle.com/w/gbi.ashx?&w=1440&id=1985>
- Pequini, S. M. (2000). *A evolução tecnológica da bicicleta e suas implicações ergonômicas para a máquina humana*.
- Pinkbike. (2020). *What's the Deal with Chains? - The Explainer - Pinkbike*. <https://www.pinkbike.com/news/video-whats-the-deal-with-chains-the-explainer.html>
- Comportamento tribológico de filmes finos de W-CO-C-influência do cobalto., (1994). Science Museum Group Collection. (n.d.). *Rover "Safety" bicycle, 1885 | Science Museum Group Collection*. Retrieved August 19, 2020, from <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co25833/rover-safety-bicycle-1885-bicycle>.
- SIRMAF. (n.d.). *Sirmaf - EDT Wear Test Machine*. Retrieved August 19, 2020, from [https://www.sirmaf.pt/reflect2.php?img=imgs/pt/produtos/mec5.jpg&fade\\_start=20%&bgc=222222](https://www.sirmaf.pt/reflect2.php?img=imgs/pt/produtos/mec5.jpg&fade_start=20%&bgc=222222)
- SRAM. (n.d.). *SRAM Force eTap AXS Groupset*. Retrieved August 19, 2020, from <https://www.sram.com/en/sram/models/gs-frc-e-a1>

Star Rapid®. (n.d.). *What is a Coordinate Measuring Machine?* Retrieved August 19, 2020, from <https://www.starrapid.com/blog/what-is-a-coordinate-measuring-machine/>

Trezona, R. I., Allsopp, D. N., & Hutchings, I. M. (1999). Transitions between two-body and three-body abrasive wear: Influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. *Wear*, 225–229(I). [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00358-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00358-5)

WickWerks. (2018). *Cross Chaining*. <https://wickwerks.com/support/crosschaining/>

# ANEXO A

É apresentando o modelo de relatório feito internamente pela SRAM®

<b>SRAM</b>	<b>Test Record</b>				
Test #:	90-6215-060-000 TLES - Chaining wear				

# of teeth in chaining
------------------------

Statistics of valid results	
Maximum	
Average	N/A
Chain suck	
Standard deviation	N/A

**Test Data:**

Test duration [h]	Chaining area [mm <sup>2</sup> ]	Area reduction per tooth [mm <sup>2</sup> ]	Chain length [mm]	Chain elongation [%]	Latch
7					

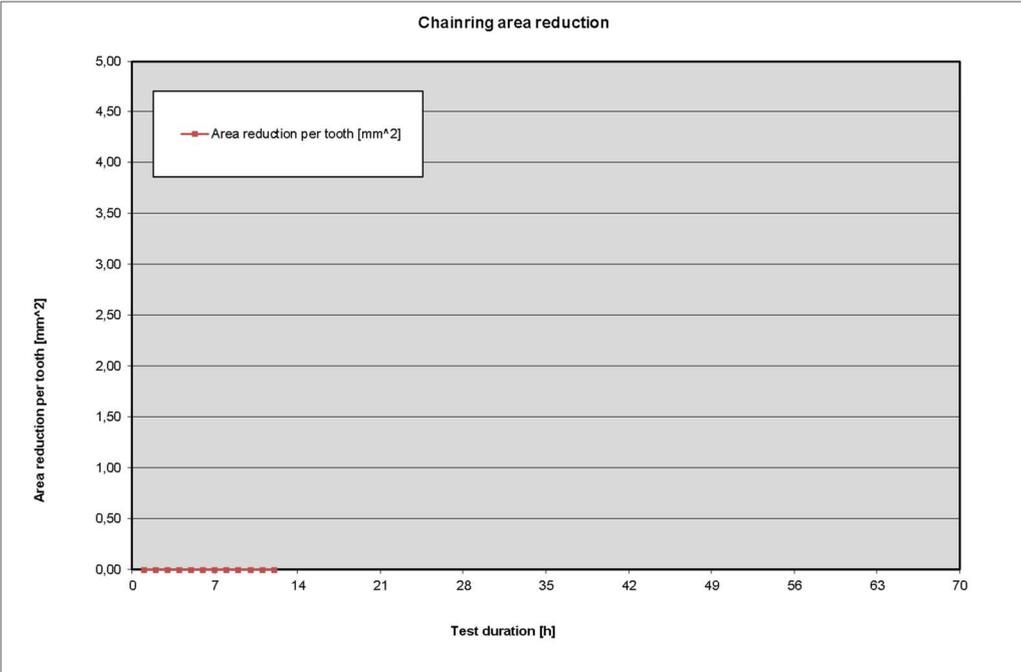
  

Total test time [h]
---------------------

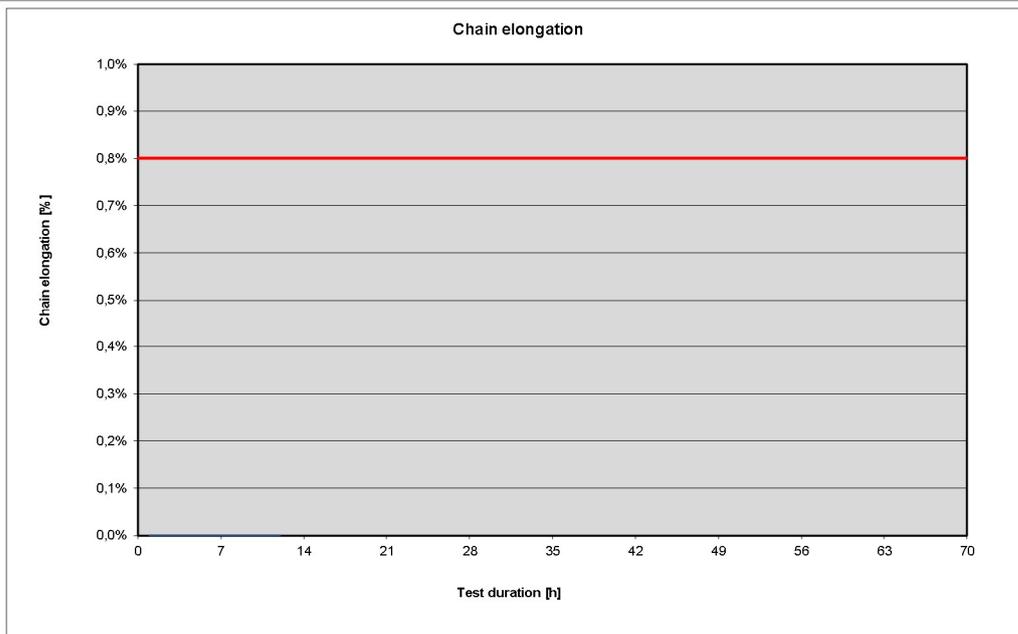
**Test data:**

**Chaining area reduction**



Area reduction per tooth [mm<sup>2</sup>]

Test duration [h]



Complementary information:

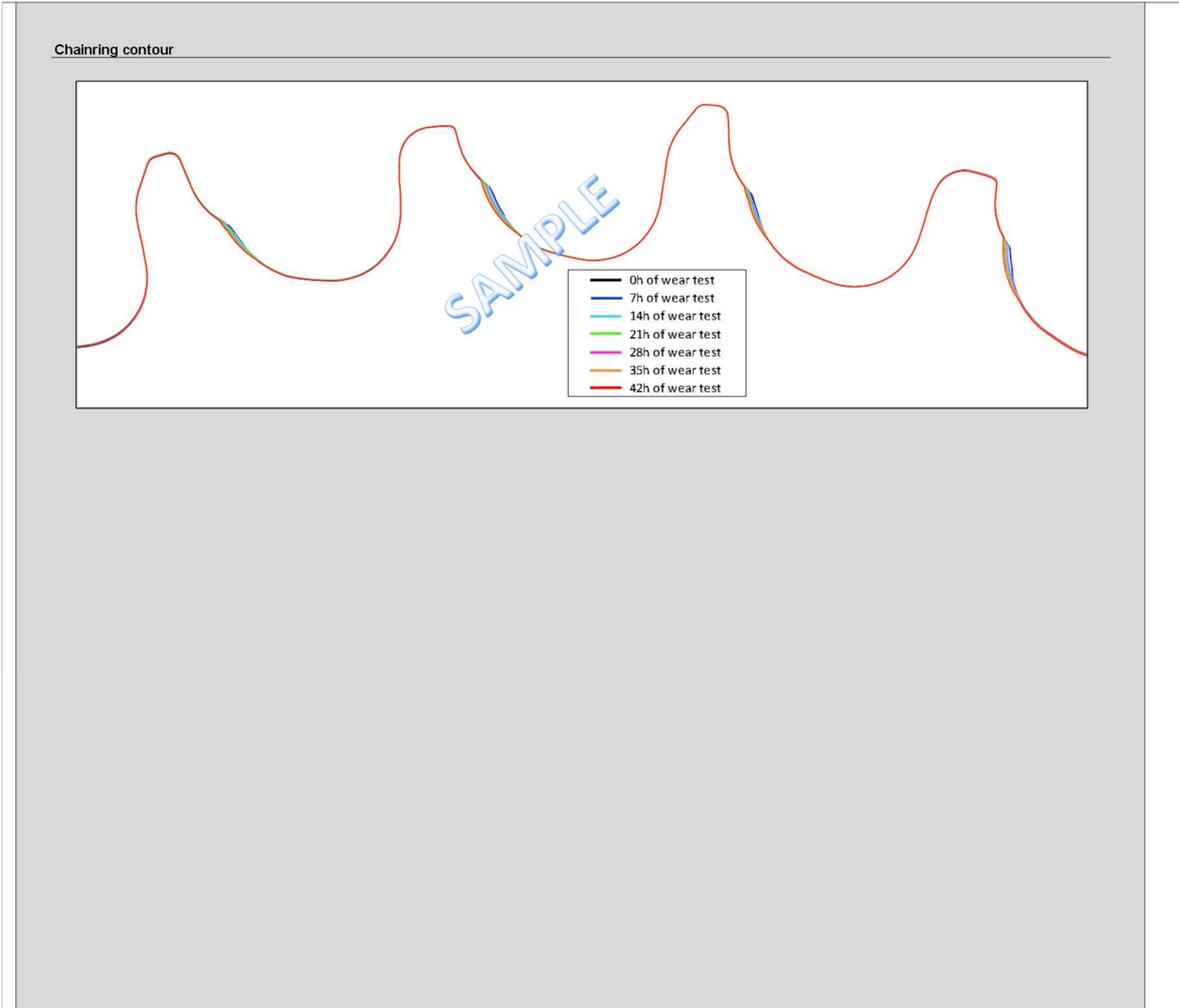
**Tooth #1**

0h      7h      14h      21h      28h      35h      42h

**Tooth #2**

0h      7h      14h      21h      28h      35h      42h

The graph shows the profile of a tooth at different wear test intervals: 0h (black), 7h (blue), 14h (cyan), 21h (magenta), 28h (green), 35h (orange), and 42h (red). The profiles show a slight change in shape over time, with a 'SAMPLE' watermark overlaid on the graph.



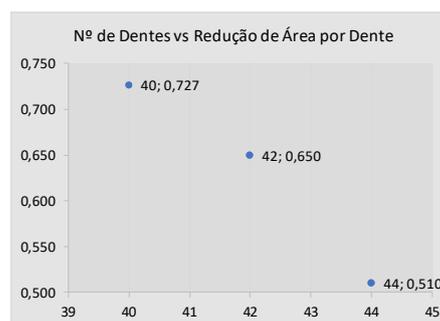
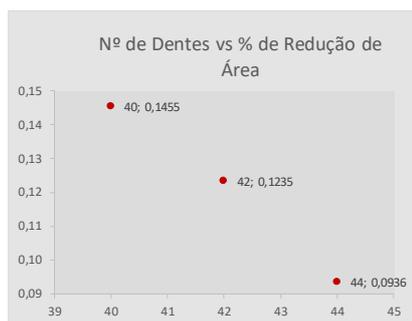


## APÊNDICE A

Durante a análise dos resultados dos testes existentes houve necessidade de elaborar algumas folhas de comparação por forma a identificar as variáveis avaliadas e facilitar a comparação das mesmas. Nestas folhas é identificada a série do prato de transmissão e os restantes componentes e são registadas algumas informações importantes como a redução de área do prato, a redução de área por dente e a variação de comprimento da corrente. Algumas destas variáveis são calculadas com recurso a outras, como é o caso da área.

Utility Road x1

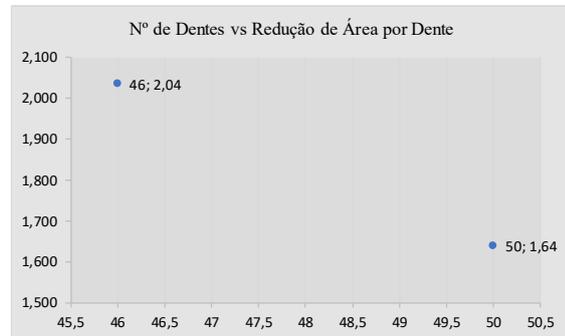
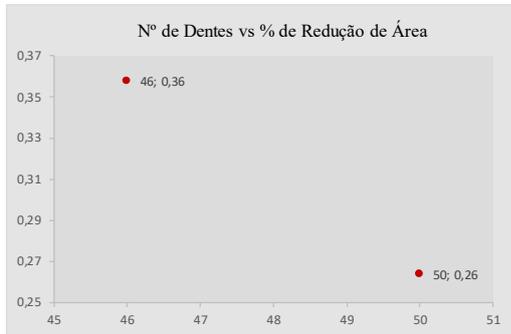
Nº de Testes	Nº de Dentes	Média da % de Redução de Área	Média de Redução de Área por Dente [mm <sup>2</sup> ]
3	40	0,1455	0,727
1	42	0,1235	0,650
1	44	0,0936	0,510



Chainring	Chain	Cassette	Redução da Área do Prato [mm <sup>2</sup> ]	Redução de Área [%]	Número de Dentes no Prato	Número de Dentes Cassete	Redução de Área por Dente [mm <sup>2</sup> ]	Aumento do Comprimento da Corrente [mm]	Alongamento da Corrente [%]
Utility Road 40T XS - T1	PC1170	PG1170	21,967	0,1099	40	32	0,550	4,620	0,340
Utility Road 1x 42T - T0	PC1170	PG1170	27,162	0,1235	42	32	0,650	3,450	0,250
Utility Road 1x 40T - T0	PC1170	PG1170	36,882	0,1850	40	32	0,920	4,520	0,330
Utility Road 1x 44T - T0	PC1170	PG1170	22,634	0,0936	44	32	0,510	3,190	0,230
Utility Road 1x 40T - T1	PC1170	PG1170	28,215	0,1417	40	32	0,710	3,430	0,250

Utility Road x2

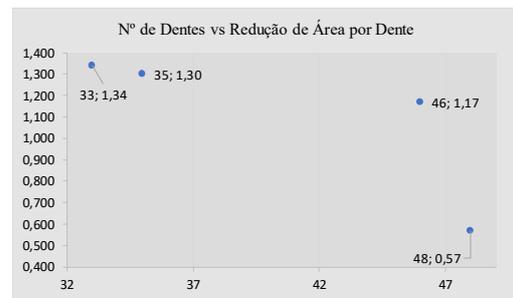
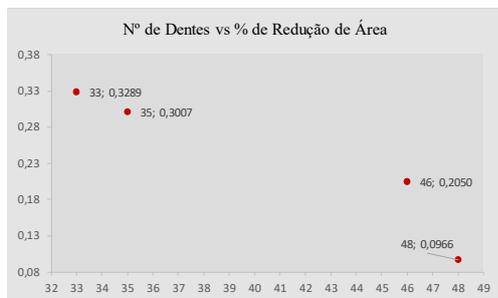
Nº de Testes	Nº de Dentes	Média da % de Redução de Área	Média de Redução de Área por Dente [mm <sup>2</sup> ]
2	46	0,36	2,04
2	50	0,26	1,64



Chainring	Chain	Cassette	Redução da Área do Prato [mm <sup>2</sup> ]	Redução de Área [%]	Número de Dentes no Prato	Número de Dentes Cassete	Redução de Área por Dente [mm <sup>2</sup> ]	Aumento do Comprimento da Corrente [mm]	Alongamento da Corrente [%]
Utility Road 2x 50T - T3	PC1130	PG1170	84,304	0,2715	50	32	1,690	6,550	0,460
Utility Road 2x 46T - T0	PC1130	PG1170	91,919	0,3516	46	32	2,000	6,230	0,450
Utility Road 2x 50T - T3	PC1130	PG1170	79,551	0,2561	50	32	1,590	7,520	0,530
Utility Road 2x 46T - T1	PC1130	PG1170	95,264	0,3641	46	32	2,070	6,330	0,460

Doppio 2x

Nº de Testes	Nº de Dentes	Média da % de Redução de Área	Média de Redução de Área por Dente [mm <sup>2</sup> ]
1	33	0,3289	1,34
1	35	0,3007	1,30
2	46	0,2050	1,17
1	48	0,0966	0,57



Chainring	Chain	Cassette	Redução da Área do Prato [mm <sup>2</sup> ]	Redução de Área [%]	Número de Dentes no Prato	Número de Dentes Cassete	Redução de Área por Dente [mm <sup>2</sup> ]	Aumento do Comprimento da Corrente [mm]	Alongamento da Corrente [%]
Doppio 2x 46T - Proto Modified Teeth	RED Doppio - Proto #5	XG1190	54,511	0,2084	46	28	1,190	2,580	0,190
Doppio 2x 46/33 - T3	RED Doppio - P1	XG1190	52,761	0,2016	46	28	1,150	1,520	0,110
Doppio 2x 48/35 - T3	RED Doppio - P1	XG1190	27,586	0,0966	48	28	0,570	1,650	0,120
Doppio 2x 48/35 Inner - Proto v28	RED D1 - P1	XG1190	45,564	0,3007	35	28	1,300	2,150	0,160
Doppio 2x 46/33 Inner - T3	RED D1 - P1	XG1190	44,210	0,3289	33	28	1,340	2,220	0,160