



Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia da Conceção e Desenvolvimento de Produto

Desenvolvimento e caracterização de materiais  
compósitos em fibra de carbono com amortecimento  
piezoelétrico em forqueta de bicicleta de estrada

**Luís Miguel De Almeida Frade**

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Rui Ruben, professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Carlos Capela, professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

Leiria, 30 março 2015



# Agradecimentos

---

Quero agradecer aos meus orientadores, Professor Carlos Capela e Professor Rui Ruben, pelo incansável apoio, disponibilidade demonstrada e orientação científica ao longo das várias etapas do presente trabalho.

Ao Luis Carreira pela troca de informações e ajuda despendida no âmbito da programação e configuração de programas informáticos fundamentais na recolha e gestão de dados.

Ao Engenheiro Carlos Dias, responsável pelo Laboratório de Tecnologia Oficinal do Departamento de Engenharia Mecânica da ESTG, pela ajuda, disponibilidade e constante troca de conhecimentos práticos, importantes às etapas de construção.

Ao Professor Fernando Batista pela disponibilidade demonstrada na realização de teste de vibrações.

Agradeço ainda à minha família, amigos, pelo apoio incondicionalmente ao longo dos anos, contribuindo para o finalizar desta importante etapa.



## Resumo

---

Os materiais inteligentes são cada vez mais utilizados no desporto de alta competição, para reduzir os impactos e vibrações, aumentando assim o rendimento do atleta. O presente trabalho tem como objetivo analisar e estudar o comportamento de materiais de alto desempenho, nomeadamente materiais compósitos de fibra de carbono, microesferas ocas de vidro, e piezoelétrico, aplicados numa forqueta de bicicleta de estrada. Com estes materiais pretende-se aumentar o nível de conforto do ciclista e reduzir o seu nível de fadiga.

Numa primeira fase, foi usada uma forqueta de gama alta do fabricante Trek, com a qual foram realizadas simulações em Abaqus com modelos numéricos em modo estático e dinâmico. Foram caracterizadas diversas configurações de forquetas, com e sem a introdução de bandas de fibras piezoelétricas, para medir o amortecimento de vibrações. Na fase seguinte foram produzidas réplicas da forqueta comercial em compósitos de fibra de carbono, com núcleo em microesferas ocas de vidro, tendo por objetivo diminuir o peso da forqueta e reduzir de igual modo as vibrações.

As forquetas protótipo foram sujeitas a ensaios mecânicos de vibração e de impacto, em ambiente laboratorial, de modo a comparar o seu desempenho mecânico e a eficácia do amortecimento das vibrações.

O núcleo de microesferas ocas de vidro mostrou ser uma boa forma de reduzir o desconforto provocado pelas vibrações, no entanto a forqueta fica mais pesada. O material piezoelétrico mostrou-se, do ponto de vista computacional, relevante para reduzir a amplitude dos deslocamentos da forqueta.

*Palavras-chave:* forqueta de bicicleta, compósitos de fibra de carbono, piezoelétrico, vibrações, materiais leves e de alto desempenho.



## Abstract

---

Smart materials are more and more used in high-level sports to reduce impacts and vibrations and increase athletics' performance. This work has the objective of present a scientific study about the behavior of composite materials - carbon fiber and hollow glass microspheres -, introducing piezoelectric bands in a road bike fork. The objective is to increase the comfort level of the cyclist and also reduce the level of the fatigue.

On the first stage, has been used a high-end fork Trek brand which were carried out Abaqus simulations with numerical models in static and dynamic mode. Several configurations of forks were characterized with and without the introduction of piezoelectric bands fibers to measure the vibrations damping. In the next step were produced commercial fork replicas in carbon fiber composites, with hollow glass microspheres core, with the objective of reduce the weight of the fork, as well as, reduce the vibrations.

The forks prototype were subject to mechanical vibration and impact tests in a laboratory environment, in order to compare their mechanical performance and the effectiveness of vibrations damping.

The hollow glass microspheres core shows to be a good solution in order to decrease fork vibrations, however the fork increases the weight. The piezoelectric band, from the computational point of view, could be relevant to reduce the amplitude of fork displacements.

Key-Words: bicycle fork, carbon fiber composites, piezoelectric, vibration, light and high performance fiber materials.



# Índice de Figuras

---

Figura 1 - Composição geométrica de uma forqueta rígida. ....	3
Figura 2 - Os métodos de fabrico de forquetas em fibra de carbono (Cortesia da empresa Easton™).....	5
Figura 3 - Núcleo flexível em latex.....	5
Figura 4 - Molde para forqueta em IMP (Cortesia da empresa Trek™).....	6
Figura 5 - Sistema de coordenadas cartesianas para a mão. Na posição ‘segurar’ (A e B) a mão prende uma barra de 2 cm de diâmetro. Na posição ‘plana’ (C) a mão pressiona uma esfera de 5 cm de raio.....	8
Figura 6 - Forqueta com tecnologia Zertz (Cortesia da empresa Specielized™). ....	9
Figura 7 - Forqueta Isospeed da serie Domane (Cortesia da empresa Trek™). ....	9
Figura 8 - TTC (Tuned Compliance Concept) (Cortesia da empresa BMC™).....	10
Figura 9 - Amortecimento desenvolvido pela empresa Canyon™. ....	11
Figura 10 - Suntour Swing Shock (Cortesia da empresa Suntour™).....	11
Figura 11 - Tecnologia Countervail® (Cortesia da empresa MSC).....	12
Figura 12 - Ensaio comparativo de forquetas com e sem tecnologia Countervail® (Cortesia da empresa Bianchi™).....	13
Figura 13 - MFC da empresa Smart Material Corporation. ....	14
Figura 14 - Raquete Intellifiber™ da marca Head™. ....	15
Figura 15 - Esqui com <i>microchip</i> pré-programado da Head™. ....	15
Figura 16 - Dispositivo ativo de vibração de uma asa de avião, (a) principio, (b) vista geral de uma asa equipada transdutores piezoelétricos (Documento AXC-NASA-Boeing-US Air Force). ....	16
Figura 17 - Ciclo de fabricação das cerâmicas PZT pela via sólida. ....	17
Figura 18 - Vista explodida de um MFC da Smart Materials Corporation.....	17
Figura 19 - Modos operacionais do MFC [23].....	18
Figura 20 - Tipos de deformações do MFC [23].....	19
Figura 21 - Modelo equivalente de uma estrutura vibratória piezoelétrica.....	20
Figura 22 - Ilustração dos fatores de amortecimento. ....	23
Figura 23 - Microesferas de vidros ocas 3M™. ....	24
Figura 24 - Câmara Comet® Eco 4M da Steinbichler™. ....	28
Figura 25 - Medição de espessura em várias secções da forqueta. ....	29
Figura 26 - Variação de espessura da forqueta comercial.....	30
Figura 27 - Foto microscópica de secções transversais da forqueta comercial.....	31
Figura 28 - a) Uma malha não estruturada; b) A malha estruturada utilizada. ....	32
Figura 29 - Bifurcação de malha na coroa da forqueta. ....	33
Figura 30 - Localização da carga .....	36
Figura 31 – Sequência de empilhamento do compósito em fibra de carbono biaxial e uniaxial. ....	37
Figura 32 - Sequência de empilhamento do compósito em fibra de carbono uniaxial com diferentes orientações.....	38
Figura 33 - Realização de provetes em fibra de carbono 125x68mm.....	38
Figura 34 - Disposição dos pontos de controlo nos provetes.....	39
Figura 35 - Variação de espessura nas placas de ensaio bidirecional. ....	39

Figura 36 - Variação de espessura nas placas de ensaio unidirecional. ....	39
Figura 37 - Ensaio a flexão em 3 pontos - Laminado em fibra de carbono. ....	40
Figura 38 - Ensaio a flexão em 3 pontos - Provete cilíndrico em fibra de carbono com núcleo em microesferas ocas de vidro. ....	42
Figura 39 - Molde em poliuretano de alta densidade. ....	44
Figura 40 - Inserto para posicionamento de ponteiras. ....	44
Figura 41 - Inserto metálico em alumínio. ....	45
Figura 42 - Revestimento multicamadas com desmoldante SB 680. ....	46
Figura 43 - Vazamento da resina no interior do molde. ....	47
Figura 44 - Desmoldação do núcleo em resina com microesferas ocas de vidro. ....	48
Figura 45 - Revestimento do núcleo com fibra de carbono. ....	49
Figura 46 - Forqueta em processo de cura sob vácuo. ....	50
Figura 47 - Maquinação de ponteiras em placa de alumínio. ....	51
Figura 48 - Padrão do pavimento de ciclovia - R1. ....	53
Figura 49 - Ciclovia na Rua do Repouso (Marinha Grande). ....	53
Figura 50 - Padrão do pavimento de estrada em asfalto - R2. ....	54
Figura 51 - Estrada Nacional N356-2. ....	54
Figura 52 - Padrão do pavimento de estrada em asfalto irregular R3. ....	55
Figura 53 - Estrada ER242-2, no concelho da Marinha Grande. ....	55
Figura 54 - Padrão do pavimento em calçada a portuguesa - R4. ....	56
Figura 55 - Jardim Luís de Camões (Leiria) ....	56
Figura 56 - Padrão do pavimento em granito paralelepípedo 20x10 cm - R5. ....	57
Figura 57 - Avenida Estação (Oliveirinha-Carregal do Sal). ....	57
Figura 58 - Padrão do pavimento em granito paralelepípedo 10x10 cm - R6. ....	58
Figura 59 - Avenida das Piscinas em São Pedro de Moel (Marinha Grande). ....	58
Figura 60 - Esquema eletrónico realizado no programa Fritzing. ....	59
Figura 61 - Parte do programa Arduino. ....	60
Figura 62 - Pontos de medição na forqueta. ....	61
Figura 63 - Bicicleta Trek Domane 4.5. ....	61
Figura 64 - Posição da forqueta em estrada. ....	62
Figura 65 - Banco de ensaio de vibrações. ....	64
Figura 66 - Arduino Sensor Data Gather”(GSDG). ....	65
Figura 67 - Ensaio em forquetas. ....	66
Figura 68 - Ensaio a flexão em 3 pontos de um provete. ....	68
Figura 69 - Curva Força-Flecha de laminado bidirecional. ....	68
Figura 70 - Curva Tensão-Deformação de laminado unidirecional. ....	69
Figura 71 - Ensaio a flexão em 3 pontos de um compósito com núcleo em microesferas ocas de vidro. ....	69
Figura 72 - Curva Tensão-Deformação. ....	70
Figura 73 - Zonas de maiores valores de tensão (longitudinal (S11) e radial (S22)) na forqueta T1. ....	71
Figura 74 - Deslocamento aplicado a uma carga estática em forqueta T1 (diversas configurações) ....	72
Figura 75 - Curva resposta em frequência. ....	73
Figura 76 - Principais etapas na realização dos ensaios em estrada. ....	76
Figura 77 - Resultados dos sensores 1 e 2. ....	76
Figura 78 - Aceleração em x, y, z para configuração R1. ....	77
Figura 79 - Aceleração em x, y, z para configuração R2. ....	77
Figura 80 - Aceleração em x, y, z para configuração R3. ....	78
Figura 81 - Aceleração em x, y, z para configuração R4. ....	78
Figura 82 - Aceleração em x, y, z para configuração R5. ....	79

Figura 83 - Aceleração em x, y, z para configuração R6 .....	79
Figura 84 - Total RMS (x, y, z) para cada pavimento na posição Cp1. ....	81
Figura 85 - Total RMS (x, y, z) para cada pavimento na posição Cp2. ....	81
Figura 86 - Total RMS (x, y, z) para cada pavimento na posição Cp3. ....	81
Figura 87 - Banco de ensaio com fonte vibratória. ....	82
Figura 88 - Resultado da forqueta C1 .....	83
Figura 89 - Resultado da forqueta T1 .....	83
Figura 90 - Resultado da forqueta T2.....	83
Figura 91 - Resultado da forqueta T3.....	84
Figura 92 - Resultado da forqueta T4.....	84
Figura 93 - Amortecimento das forquetas verso banco de ensaios .....	84
Figura 94 - Amortecimento das forquetas verso Forqueta Comercial C1.....	85
Figura 95 - Total RMS (x, y, z) para cada pavimento na mão do ciclista.....	85
Figura 96 - Ensaio de vibração livre com martelo de impacto.....	87
Figura 97 - Esquema representativo da forqueta em estudo .....	87
Figura 98 - Método da largura de banda para determinação do amortecimento.....	88
Figura 99 - Função Resposta em Frequência (FRF) da forqueta comercial C1.....	89
Figura 100 - Comparativo dos resultados de largura de banda entre forquetas. ....	89
Figura 101 - Comparativo dos resultados de fator de amortecimento entre forquetas. ....	90
Figura 102 - Amortecimento sub-amortecida ( $\zeta < 1$ ) típico de uma forqueta.....	90



## Índice de Tabelas

---

Tabela 1 - Medição de espessura em várias secções da forqueta comercial. ....	30
Tabela 2 - Configuração do revestimento de forquetas.....	35
Tabela 3- Propriedades das microesferas ocas de vidro.....	46
Tabela 4 - Otimização das características mecânicas dos tecidos de fibra de carbono.....	70
Tabela 5 - Resultados da tensão tangencial e radial em forquetas .....	71
Tabela 6 - Compilação de valores de deslocamento aplicado a uma carga estática .....	72
Tabela 7 - Fator de amortecimento pelo método da resposta em frequência.....	74
Tabela 8 - Frequências naturais das diversas forquetas .....	75
Tabela 9 - Compilação dos valores RMS e Pico-Pico obtidos com forqueta comercial, nos vários pavimentos.....	80
Tabela 10 - Avaliação da exposição das vibrações (RMS) transmitidas ao sistema mão-braço, segundo a norma ISO 5349. ....	86



## Lista de Siglas

---

3D	Tridimensional
ASTM	American Society for Testing and Materials
BMC	Bicycle Manufacturing Company
CATIA	Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DSL	Domain Specific Language
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
FRF	Função Resposta em Frequência
GSDG	Arduino Sensor Data Gather
HGM	Hollow Glass Microspheres
IMP	Integrated Molding Process
ISO	International Organization for Standardization
LSB	Least Significant Bit
MFC	Macro Fiber Composites
MSC	Materials Sciences Corporation
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PU	Poliuretano
PZT	Lead Zirconate Titanate
RMS	Root Mean Square
TM	Trademark
TTC	Tuned Compliance Concept
US	United State



## Lista de Símbolos

---

Apresenta-se de seguida a lista com os principais símbolos utilizados:

°	Grau geométrico
°C	Grau Celsius
%	Percentagem
A	Amplitude máxima do movimento oscilatório [mm]
$a_{hv}$	Vibração Equivalente [ $m/s^2$ ]
c	Coeficiente de amortecimento
C	Capacitância [F]
dB	Decibel
E	Campo Elétrico [N/C]; Módulo de elasticidade [ $N/m^2$ ]
F	Força Aplicada, [N]
g	Aceleração da gravidade
g	Gramma
G	Módulo de elasticidade transversal
h	Hora
I	Intensidade elétrica [A]
K	Coeficiente de rigidez [N/m]
$K_{eq}$	Constante de rigidez equivalente [N/m]
Pa	Pascal
Hz	Hertz
m	Massa do Sistema [kg]
M	Massa do Sistema [kg]
m	Metro
l	Litro
Q	Magnitude [g/N]
N	Newton
rpm	Rotações por minuto
s	Segundo

$t$	Tempo
$u$	Deslocamento
$T$	Temperatura
$V$	Tensão elétrica
$W$	Watt
$\dot{x}$	Velocidade da massa [m/s]
$\ddot{x}$	Aceleração da massa [m/s <sup>2</sup> ]
$y$	Deslocamento
---	
$\varepsilon$	Extensão [mm]
$\alpha$	Ângulo
$\zeta$	Fator de amortecimento
$\varphi$	Fase inicial do $i$ -ésimo modo de vibração
$\lambda$	Decremento logarítmico
$\sigma$	Tensão [N]
$\omega$	Frequência angular [Hz]
$\omega_d$	Frequência da oscilação amortecida [Hz]
$\omega_n$	Frequência Natural [Hz]
$\nu$	Coeficiente de Poisson

# Índice

<b>1.INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 CONFORTO NUMA BICICLETA DE ESTRADA .....	1
1.2 FORQUETA DE BICICLETA .....	3
1.2.1 Forquetas de bicicleta de estrada.....	3
1.2.2 Forquetas em fibra de carbono .....	4
1.2.3 Ausência de conforto e fadiga prolongada.....	6
1.2.4 Soluções atuais .....	8
1.3 TECNOLOGIA PIEZOELÉTRICA .....	14
1.3.1 Soluções comerciais de MFC .....	14
1.3.2 Efeito piezoelétrico .....	16
1.3.3 Equações piezoelétricas .....	19
1.4 AMORTECIMENTO VISCOELÁSTICO.....	21
1.5 MICROESFERAS OCAS DE VIDRO .....	24
1.5.1 Características das microesferas ocas de vidro .....	24
1.5.2 Utilização de microesferas ocas de vidro.....	25
1.6 OBJETIVOS .....	25
<b>2-PROCEDIMENTO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL</b> .....	<b>27</b>
2.1 PROCESSO DE MODELAÇÃO 3D DE UMA FORQUETA.....	27
2.1.1 Engenharia inversa.....	27
2.1.2 Modelação da forqueta.....	28
2.1.2.1 Definição de superfície classe A .....	28
2.1.2.2 Definição de espessuras .....	29
2.1.3 Definição de camadas .....	30
2.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE EM ABAQUS™ .....	31
2.2.1 Criação de um modelo de elementos finitos .....	32
2.2.2 Tipos de análises .....	33
2.2.3 Configuração dos modelos a simular no Abaqus™.....	34
2.2.3.1 Geometria dos modelos .....	34
2.2.3.2 Propriedades do elemento da secção .....	35
2.2.3.3 Dados dos materiais .....	35
2.2.3.4 Cargas e condições de fronteira.....	36
2.2.3.5 Tipo de dados a serem obtidos como output.....	36
2.3 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS .....	37
2.3.1 Realização de provetes em fibra de carbono.....	37
2.3.2 Ensaios à flexão dos provetes em Fibra de Carbono .....	40
2.3.3 Realização de provetes em fibra de carbono com microesferas ocas de vidro .....	41
2.3.4 Ensaios mecânicos dos provetes.....	41
2.4 DESENVOLVIMENTO DO MOLDE .....	42
2.4.1 Características e requisitos do molde .....	42
2.4.2 Modelação do molde .....	42
2.4.3 Programação e maquinagem CNC das cavidades .....	43
2.4.4 Construção dos acessórios amovíveis .....	44
2.5 CRIAÇÃO DO NÚCLEO EM MICROESFERAS OCAS DE VIDRO.....	45
2.5.1 Características e requisitos .....	45
2.5.2 Vazamento do compósito.....	45
2.6 REALIZAÇÃO DO PROTÓTIPO .....	48
2.6.1 Revestimento do núcleo com laminado de Fibra de carbono .....	48
2.6.2 Inserção das ponteiras.....	50
2.7 REALIZAÇÃO DE ENSAIOS MECÂNICOS .....	51
2.7.1 Características e requisitos.....	51
2.7.2 Medição de vibrações em estrada como referência .....	52
2.7.2.1 Tipo de pavimento selecionado para o estudo.....	52
2.7.2.2 Leque de velocidades selecionadas .....	58

2.7.2.3 Instrumentos de medição de aceleração e metodologia aplicada .....	59
2.7.2.4 Equipamento utilizado nos ensaios.....	61
2.7.2.5 Condições de realização.....	62
2.7.3 Ensaios de vibração forçada com fonte vibratória.....	63
2.7.3.1 Características do banco de ensaios vibratório .....	63
2.7.3.2 Condições de realização.....	64
2.7.4 Ensaio de vibração livre com forquetas protótipo .....	66
<b>3.APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>67</b>
3.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS A FLEXÃO EM PROVETES.....	67
3.1.1 Ensaio em provetes (placas).....	67
3.1.2 Ensaio em provetes com microesferas.....	69
3.2 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES EM ABAQUS™.....	70
3.2.1 Otimização de valores de material .....	70
3.2.2 Localização das zonas de maiores valores de tensão.....	71
3.2.3 Deslocamento aplicado a uma carga estática.....	72
3.2.4 Fator de amortecimento obtido decremento logarítmico .....	73
3.2.5 Resultados de frequências naturais das diversas configurações de forquetas .....	74
3.3 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE VIBRAÇÕES EM ESTRADA.....	75
3.3.1 Resultado em pavimento R1.....	77
3.3.2 Resultado em pavimento R2.....	77
3.3.3 Resultado em pavimento R3.....	78
3.3.4 Resultado em pavimento R4.....	78
3.3.5 Resultado em pavimento R5.....	79
3.3.6 Resultado em pavimento R6.....	79
3.3.7 Comparação dos resultados entre os vários pavimentos.....	80
3.4 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE VIBRAÇÃO EM BANCO DE ENSAIO .....	82
3.4.1 Resultados da forqueta C1 .....	83
3.4.2 Resultados da forqueta T1.....	83
3.4.3 Resultados da forqueta T2.....	83
3.4.4 Resultados da forqueta T3.....	84
3.4.5 Resultados da forqueta T4.....	84
3.4.6 Comparação dos resultados entre as várias forquetas.....	84
3.5 AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO DAS VIBRAÇÕES TRANSMITIDAS AO SISTEMA MÃO-BRAÇO .....	85
3.6 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE VIBRAÇÃO COM MARTELO DE IMPACTO .....	86
3.6.1 Fator de amortecimento $\zeta$ determinado pelo método da largura de banda $\Delta\omega$ .....	88
3.6.2 Fator de amortecimento $\zeta$ determinado pelo decremento logarítmico $\lambda$ .....	90
<b>4.CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO .....</b>	<b>93</b>
4.1 CONCLUSÕES.....	93
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO 1 – FICHA TÉCNICA DA RESINA EPÓXI.....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO 2 – VARIAÇÃO DE ESPESSURA DOS PROVETES .....</b>	<b>101</b>
<b>ANEXO 3 – LARGURA DE BANDA .....</b>	<b>103</b>

---

# Capítulo 1

---

## 1.Introdução

---

### 1.1 Conforto numa bicicleta de estrada

O design e a tecnologia estão constantemente juntos na criação de novos modelos de bicicletas de Estrada. O desenvolvimento de novas formas, materiais, texturas e decorações cativam qualquer ciclista. No caso de bicicletas de estrada de gama média-alta, as aparências dão lugar ao rigor do comportamento do veículo no asfalto onde a evolução técnica vai ao encontro da exigência do ciclista assíduo. Nesta categoria de atletas de alta competição, as bicicletas são tendencialmente eficientes, leves, silenciosas, cómodas de modo a poder alcançar um alto desempenho em qualquer situação. A redução do peso das bicicletas como a sua estabilidade mecânica está em constante melhoria nos gabinetes de desenvolvimento dos mais prestigiados fabricantes recorrendo a novos materiais, processos de fabrico e soluções técnicas. Nesta evolução tecnológica, o conforto é um critério que permanecia em falta ou mesmo considerado irrelevante há alguns anos atrás, mas que hoje tem vindo a ser valorizado pelos centros de engenharia e de *design*. Numa bicicleta, o componente sujeito às maiores solicitações exteriores é sem dúvida a forqueta, especialmente, quando o ciclista circula em estradas pavimentadas ou em piso irregular criando uma forte trepidação propagando-se pela bicicleta até atingir os membros superiores do ciclista sujeitos a fadiga muscular e ausência de sensibilidade nos mesmos. É neste campo que a investigação desta tese se vai focar, recorrendo a utilização de novos materiais, novas técnicas de fabrico e inovadoras soluções para reduzir vibrações.

A utilização da bicicleta de estrada clássica como modalidade desportiva tem vindo a crescer ao longo das últimas décadas. A presença diária de bicicletas de estradas é uma realidade visível em qualquer parte da Europa, impulsionada por eventos de renome no panorama internacional como são exemplo o “Tour de France” ou “o Giro” em Itália. Estes eventos desportivos com cobertura televisível em direto aumentam a popularidade do evento, quer entre amadores, quer entre profissionais.

Hoje em dia, as características deste tipo de bicicleta permitem uma maior flexibilidade ao percorrer grandes distâncias com transmissões mecânicas silenciosas e de fácil utilização. A leveza dos quadros e componentes são os grandes trunfos das marcas que tornam estes veículos “jóias” da modalidade. Atualmente, as bicicletas de estrada destinadas a ciclistas amadores ou profissionais, são construídas com materiais como o alumínio, o titânio ou a fibra de carbono, sendo esta última uma referência na elite do ciclismo mundial. O sucesso de bicicletas em compósitos abre um leque de inúmeras facilidades e vantagens sobre outros materiais. Por exemplo, devido ao seu *design*, arrojado e sem limites, é possível realizar sem grandes dificuldades (devido ao processo de fabrico intrínseco e flexível) um equipamento sólido e leve ao mesmo tempo. Destaca-se a rigidez e uma estabilidade notável que oferece ao corredor a possibilidade de transformar todo o poder muscular em potência à roda traseira. No entanto ainda é possível melhorar alguns aspetos dos quais o conforto do atleta. Este tema sempre ficou um pouco na sombra das novidades tecnológicas particularmente centradas na transmissão mecânica, na estabilidade ou até na aerodinâmica. Nestes últimos anos a tendência criada pelas marcas dá mais protagonismo ao tema do conforto que terá várias interpretações. A principal e incontornável enquadra-se na participação do mítico Paris-Roubaix cujo percurso em pavimento com paralelepípedos irregulares criaram a necessidade de minimizar as vibrações recorrendo a soluções inovadoras, exclusivamente nos quadros da bicicleta ou invés das forquetas que permanecem desprotegidas dos severos impactos a que são submetidas. Outra visão, menos técnica e orientada para fins de marketing com soluções de absorção em destaque dando uma mais-valia ao produto.

De forma concisa pode-se afirmar que uma bicicleta de estrada de gama média ou alta evoluiu de forma considerável em vários pontos como suprarreferido. No entanto é possível otimizar de forma global o conforto do ciclista atuando em componentes sujeitos a elevadas solicitações mecânicas, como é o caso das forquetas.

A introdução de material piezoelétrico de modo a reduzir vibrações em desportos de alta competição é hoje uma realidade. Por exemplo, as raquetes de ténis ou pranchas de snowboard são pioneiros na integração de compósitos inteligentes cuja finalidade é sempre dupla: reduzir vibrações (obtendo um melhor controlo e precisão) e aumentar o conforto do atleta (obtendo melhor *performance*).

Desta forma, os métodos preconizados para responder aos campos vibratórios provenientes do asfalto são métodos de controlo ativo com recurso a tecnologia piezoelétrico cujo objetivo

delineado é eliminar ou reduzir o campo vibratório, sobrepondo a perturbação primária com frequências idênticas mas de amplitude oposta.

## 1.2 Forqueta de bicicleta

### 1.2.1 Forquetas de bicicleta de estrada

A escolha de um modelo de bicicleta de estrada é feita segundo vários critérios, podendo estes serem o *design* (onde a forma e as cores são atrativas para um ciclista ocasional), o peso, ou estabilidade, pois todos são requisitos fundamentais para um ciclista experiente ou de alto rendimento. A composição das forquetas vai ao encontro de um público menos exigente com forquetas em alumínio de diferentes características e espessuras. Para ciclistas exigentes o titânio é uma aposta na resistência devido à sua leveza e durabilidade. As forquetas em titânio são as mais dispendiosas e as menos comercializadas ao invés das forquetas em fibra de carbono, cujas características mecânicas conjugadas com um *design* sem limites a um custo razoável para entrada de gamas de fibra de carbono do tipo 1K ou 3K.

Existem tipos diferentes de forquetas rígida (ou de estrada) que variam segundo os estilos, materiais e dimensões. A geometria genérica de uma forqueta rígida, como se pode ver na Figura 1, consiste num tubo fixo com pernas curvas, e possui duas ponteiras para acoplar ao eixo da roda dianteira e um encaixe para o sistema de travagem.

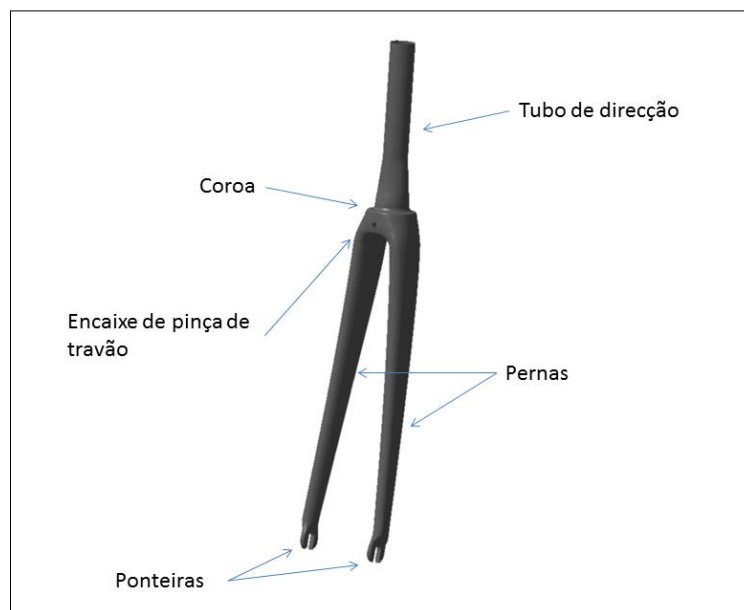


Figura 1 - Composição geométrica de uma forqueta rígida.

## 1.2.2 Forquetas em fibra de carbono

Para um ciclista de alto rendimento, as forquetas tal como quadro da bicicleta são produzidas em fibra de carbono de alta qualidade e características mecânicas consideradas superior, como afirma o fabricante de bicicleta Velocite: “os compósitos em fibra de carbono oferecem hoje em dia o melhor: peso, rigidez, durabilidade”, do mesmo modo,

*“o fabrico é de extrema importância em ser capaz de controlar as cargas de torção. Ao contrário dos materiais isotrópicos, compósitos de fibra de carbono são um material sintético que pode ser feito para satisfazer praticamente qualquer propriedade mecânica sem alterar a forma estrutural global da peça por serem inteiramente anisotrópica” [1].*

Concretamente, um laminado de qualidade superior como Prepreg T700 de 12K (resina pré-impregnada) do fabricante Toray cujo módulo de elasticidade ronda os 230 GPa permite a marcas de renome internacional como a Trek™, Specialized™, Cube™, entre outras, desenvolver forquetas com espessuras reduzidas, garantindo no entanto, excelentes propriedades mecânicas. Desta forma duas forquetas visualmente idênticas mas com referências (quantidade de filamentos de fibra) de tecido de fibra de carbono diferentes podem ter características mecânicas semelhantes mas espessuras diferentes e por consequência pesos diferentes.

Existe três tipos de métodos de construção de forquetas em fibra de carbono (ver Figura 2), a saber:

- A versão de baixo custo cuja forqueta é realizada em três partes distintas: tubo de direção, coroa em alumínio *Chromoly* (aço de alta dureza e leveza) e as pernas em fibra de carbono. Esta solução, mais flexível permite um leque de combinações de outros materiais sem necessitar de ferramentas adicionais. Estes três componentes são posteriormente unidos por adesivo ou cola.
- A união de duas partes (tubo de direção moldado ao resto da forqueta com tiras de fibra de carbono laminado) que torna este produto mais vantajoso em comparação ao primeiro método pela redução do peso proveniente a substituição do tubo de direção de aço por fibra de carbono.
- A Integrated Molding Process (IMP) conhecido também como *monocoque* permite a moldação de forquetas em fibra de carbono na sua integralidade. Este processo não só elimina uma quantidade relativa de material em relação aos métodos supracitados como facilita a realiza-

ção de geometrias complexas melhorando o desempenho da forqueta [2]. O processo IMP permite também realizar forquetas mais leves, duráveis e com melhor desempenho (impacto e fadiga). No entanto, é de salientar o custo mais elevado do IMP devido a uma complexidade acrescida, na colocação do laminado no molde, e no controlo do processo [3].



Figura 2 - Os métodos de fabrico de forquetas em fibra de carbono (Cortesia da empresa Easton™).

As soluções apresentadas são moldações em molde fechado em aço com núcleo flexível em latex pressurizado previamente revestido por camadas de frações de fibra de carbono Prepreg, como ilustrado na Figura 3 e Figura 4.



Figura 3 - Núcleo flexível em latex.

A moldação pode ser feita com ou sem inserção de reforços metálicos (em alumínio). Estes são frequentemente utilizados em zonas estratégicas da forqueta onde ocorre elevadas solicitações mecânicas. A junção coroa com o tubo de direção é uma das zonas sensíveis. As pon-

teiras metálicas também fazem parte desta etapa de fabricação. No entanto já se registam soluções de forquetas sem insertos metálicos utilizando o processo IMP.



Figura 4 - Molde para forqueta em IMP (Cortesia da empresa Trek™).

A fibra de carbono preconizada no processo produtivo de bicicletas de alto desempenho necessita de características superiores (como já referido neste trabalho). Empresas como a Toray, Hex, Toyo, Tenax e Mitsubishi podem fornecer a matéria-prima suprarreferido mediante garantias de utilização, concretamente em países devidamente autorizados.

### 1.2.3 Ausência de conforto e fadiga prolongada

A saúde desportiva está cada vez mais presente tanto no desporto amador como no profissional, equiparando este requisito a outros, como redução de peso, aerodinamismo ou ainda aumento de rigidez da bicicleta. Garantir o conforto de um ciclista é sinónimo de melhor desempenho, e poderia ser o lema de muitos treinadores ou diretores de gabinetes de engenharia.

A ausência de conforto é visível no ciclismo de estrada profissional pelos rostos dos corredores transmitindo, sofrimento e desgaste, ao longo de centenas de quilómetros e de muitas horas de cadência muscular. Segundo Yvan Champoux, da Universidade de Sherbrooke no Québec, podemos distinguir dois tipos de conforto, “o estático e o dinâmico” [4].

“O conforto estático” ou “conforto ergonómico” pode ser caracterizado, por um lado pela morfologia, flexibilidade do ciclista e pela posição do mesmo em cima da bicicleta. Por outro

lado, o tamanho e a seleção de componentes da bicicleta são de grande importância de modo a oferecer ao corredor uma posição de condução personalizada permitindo um andamento harmonioso e ausente de dores musculares precoces.

“O conforto dinâmico” pode ser interpretado pelas agressões exteriores ao conjunto bicicleta, ciclista. A transmissão de vibrações pode ser perceptível em cinco pontos distintos no corpo do atleta (as mãos, os pés, as nádegas). O tecido sensorial humano comprimido repetidamente ao longo de um percurso acidentado cria um nível de eficiência reduzida (fadiga) suficiente para ser perceptível por parte do ciclista como desconforto [4].

As partes do corpo humano sujeito a grandes vibrações provenientes da estrada em paralelepípedos, são submetidas a elevados valores de vibração equivalente ( $40 m.s^{-2} < a_{hv} < 70 m.s^{-2}$ ) e frequências na ordem dos 55 Hz. Valor registado em testes com protótipos no âmbito de um estudo científico da Universidade de Reims em colaboração com a Equipa de ciclismo profissional, La Française des Jeux, sobre os efeitos das vibrações no ciclista ao percorrer longas distâncias em estradas pavimentadas [5]. Este leque de frequências encontram-se próximo da frequência natural das mãos como mencionado nas normas ISO 5349 e ISO 2631 [6], [7]. Desta forma o efeito de ressonância produzido é intensificado e amplificado, transmitindo-se ao ciclista sob a forma de desconforto. Segundo o físico Hans-Christian Smolik, “cada vibração ou impacto no corpo humano tem de ser compensado pela força muscular a qual, em grandes distâncias produz fadiga” [8]. Este efeito é caracterizado, nos membros superiores, pelos sintomas seguintes: mão e dedos ausentes de sensibilidade (dedos mortos), dedo branco, tendinite dos antebraços, distúrbios visuais, falta de concentração entre outros. As vibrações de extremidades situam-se na faixa de 6,3 a 1250 Hz e são as mais danosas ao organismo, podendo levar a quedas e perigo de morte [6]. Segundo as diretivas europeias, o valor máximo de exposição não deve ultrapassar os  $5 m.s^{-2}$ . No entanto, segundo o estudo realizado pela Universidade de Reims, um ciclista tem uma exposição de  $22 m.s^{-2}$  ao longo de 75 minutos de prova no Paris-Roubaix, ou seja quatro vezes superior ao recomendado [5]. Segundo a norma ISO 5349-1, a aceleração localizada nas mãos, resultante das vibrações em x, y e z têm a equação seguinte:

$$a_{hv} = \sqrt{ax^2 + ay^2 + az^2}$$

Na Figura 5 está representado as três direções de medição e na Tabela 10, apresenta os limites de exposição à vibração na mão em relação ao tempo e aceleração.

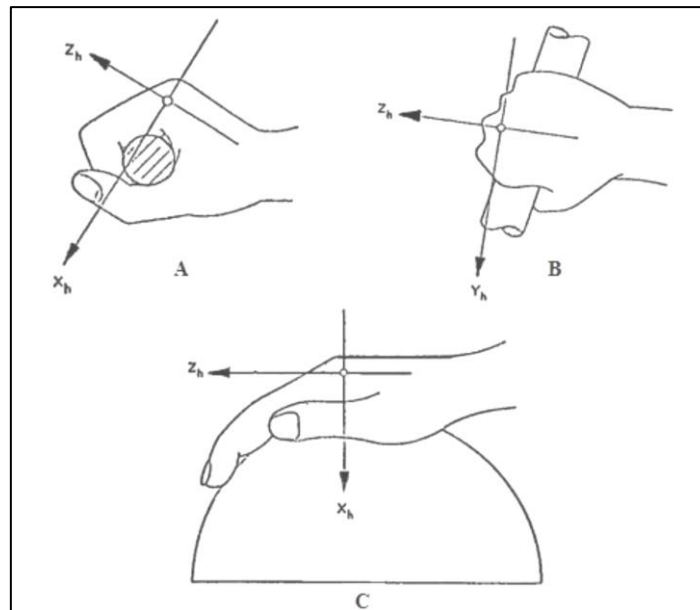


Figura 5 - Sistema de coordenadas cartesianas para a mão. Na posição ‘segurar’ (A e B) a mão prende uma barra de 2 cm de diâmetro. Na posição ‘plana’ (C) a mão pressiona uma esfera de 5 cm de raio.

A medição da vibração é feita por meio de instrumentos ligados a um transdutor de aceleração, denominado de acelerómetro. Este é o elemento que capta o movimento vibratório transformando-o em um sinal elétrico proporcional à aceleração.

### 1.2.4 Soluções atuais

O desenvolvimento tecnológico tem vindo a diversificar-se nos últimos anos, abandonando a visão exclusiva de obter bicicletas leves, rígidas, fiáveis e mecanicamente evoluídas. Desta forma, novos requisitos são adotados e investigados de modo a melhorar o conforto e por sua vez o rendimento do ciclista seja ele amador ou profissional. O modelo Roubaix SLA do fabricante Specialized™, possui uma forqueta em fibra de carbono de elevada qualidade especialmente desenvolvida para estradas com os “famosos paralelos” do épico Paris-Roubaix. A solução encontrada resume-se à introdução de um inserto em elastómero (Zertz) em ambas as pernas da forqueta (ver Figura 6). O posicionamento estratégico destes polímeros permite absorver as irregularidades do asfalto pela própria deformação viscoelástica, libertando energia que é dissipada sob a forma de calor. A tecnologia Zertz é protegida desde 2002 por patente e pertence a marca norte americana Specialized™ [9].



Figura 6 - Forqueta com tecnologia Zertz (Cortesia da empresa Specialized™).

A empresa Trek™ seguiu uma estratégia diferente, baseando-se em duas especificações necessárias para obter uma boa forqueta: “Ter uma rigidez lateral nas curvas e garantir uma flexibilidade vertical para absorver as vibrações da estrada” [10]. Para responder às especificações supramencionadas a empresa redesenhou as suas forquetas de forma otimizada. Deste modo, apresenta no seu portfólio de produtos (em fibra carbono) a série Domane, que possui forquetas Isospeed cujas pernas, no plano lateral, são radicalmente espalmadas e aerodinâmicas de modo a ser mais rígidas em curva. Combinado com uma curvatura acentuada das pernas no plano lateral e um tubo de direção assimétrico (mais estreito no plano frontal) proporcionam melhor flexibilidade e por sua vez conforto, como ilustrado na Figura 7 [10].



Figura 7 - Forqueta Isospeed da serie Domane (Cortesia da empresa Trek™).

Recorrendo à mesma abordagem, o construtor suíço BMC™ enverga o seu desenvolvimento pela otimização estrutural das suas forquetas. Exemplo disso, o *design* do modelo Grandfondo GF01, que foi idealizado para percorrer grandes distâncias em provas de resistência, é semelhante ao modelo anterior. Com o conceito TTC (Tuned Compliance Concept), os engenheiros da BMC™ conseguem otimizar a mistura de diferentes fibras de carbono e a suas orientações, mesmo em secções reduzidas, como se pode observar na Figura 8. Por outro lado a colocação de pontos de flexão estrategicamente posicionados, permite desta forma uma maior flexibilidade vertical mantendo a rigidez lateral e de rotação desejada [11]. Como sublinha Thor Hushovd da BMC Racing, uma forqueta “ não pode ser muita dura, porque estaríamos a saltar constantemente, por isso, é necessário ter mais contacto, com as pedras de forma a ter mais aderência...” ou seja a ideia pode ser a de assimilar uma suspensão de bicicleta de montanha que ao contacto com a estrada maximiza a aderência e estabilidade da bicicleta [12].

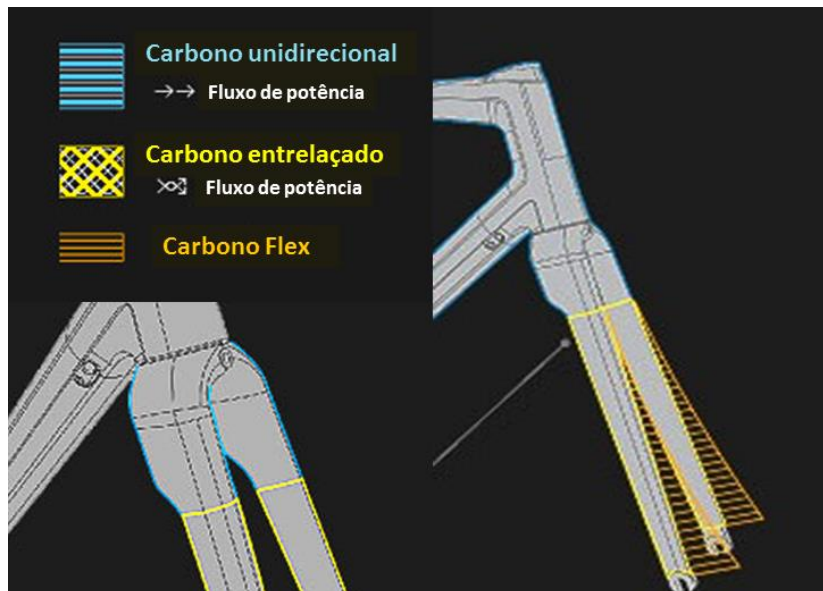


Figura 8 - TTC (Tuned Compliance Concept) (Cortesia da empresa BMC™).

O projeto 0.01 da Canyon™ nasce no início de 2007 numa parceria com o Instituto de Materiais Compósitos Kaiserslautern. Este projeto foi desenvolvido por Hans-Christian Smolik, o qual quer apresentar a sua visão de como poderão parecer as bicicletas de estrada do futuro. “O resultado é uma bicicleta de estrada com curso de 1,5 cm, visualmente impercetíveis enquanto bicicleta de estrada de suspensão total. A suave ação dos elementos da suspensão resulta num ganho de desempenho, maximizando a aderência (e conseqüente segurança) nas superfícies irregulares” [8]. A solução técnica de amortecimento é composta na forqueta por guias e molas em aço, reforçado por um elastómero para evitar qualquer encravamento (ver Figura 9).



Figura 9 - Amortecimento desenvolvido pela empresa Canyon™.

De uma forma mais explícita, o fabricante de forquetas Suntour desenvolveu um conceito mecânico de amortecimento para bicicletas de estrada urbanas. A forqueta Swing Shock é composta em duas partes solidárias por um eixo como representado na Figura 10. O movimento de amortecimento é realizado pelo conjunto pistão e mola helicoidal, que permite obter um curso de 30 mm absorvendo as irregularidades das estradas. Por motivos de excesso de peso (1395 g) este conceito encontra-se em produção, exclusivamente em bicicletas urbanas [13]. No entanto o mecanismo otimizado com um *design* reformulado, com materiais mais leves e por fim, com um controlo ativo do sistema anti vibratório, a forqueta poderia ser uma opção válida a adotar em bicicletas de gama superior.

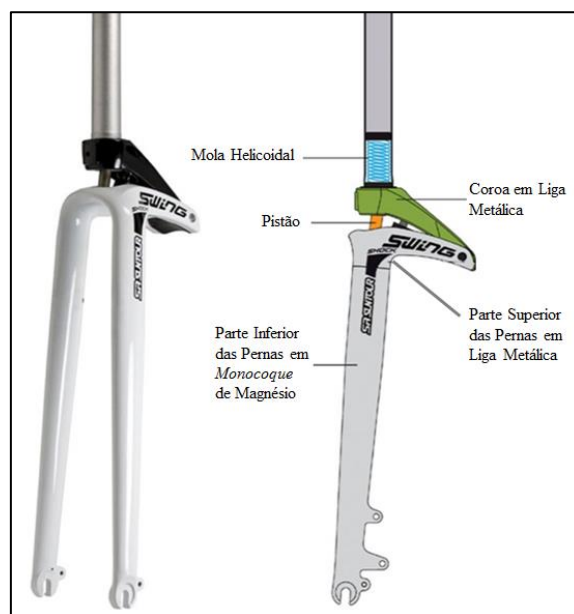


Figura 10 - Suntour Swing Shock (Cortesia da empresa Suntour™).

Novas abordagens surgem neste campo sem introdução de elementos auxiliares como acima mencionado. O construtor Bianchi™ anunciou em abril de 2013 a introdução de um novo material que vai equipar as forquetas (e quadros) da gama alta Infinito CV. Esta inovação é fruto da colaboração exclusiva da Bianchi™ com a empresa norte americana Materials Sciences Corporation (MSC), no desenvolvimento inovador do compósito de fibra de carbono Countervail®. Esta tecnologia inicialmente desenvolvida para aplicações aeronáuticas e anti-vibratórias entra na indústria desportiva na expectativa de redução vibratória utilizando materiais leves e de propriedades mecânicas superiores.

Com sua arquitetura especial (com patente registada) de pré-forma da fibra do carbono, o material viscoelástico é estrategicamente inserido entre camadas de fibra de carbono, maximizando a dissipação vibratória da energia (ver Figura 11). Os estudos realizados pelo consórcio concluem a eliminação de vibração na ordem dos 75% (em comparação com uma forqueta convencional em fibra de carbono) e o aumento da rigidez da forqueta, beneficiando o ciclista de menor fadiga muscular, maior controlo na condução e ganhos energéticos relevantes [14].

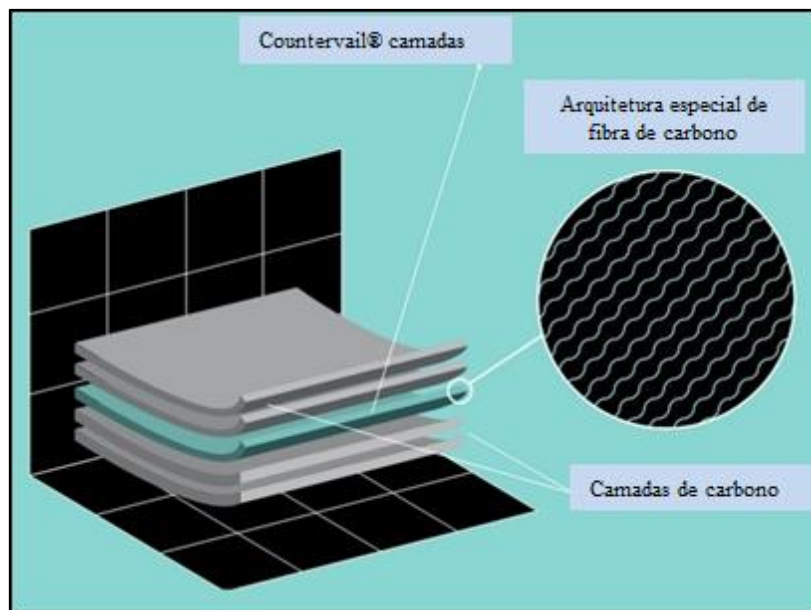
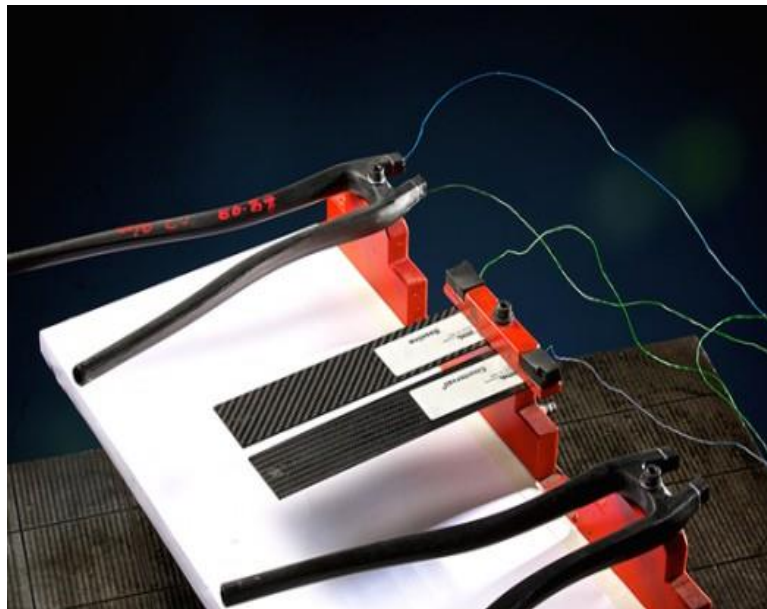


Figura 11 - Tecnologia Countervail® (Cortesia da empresa MSC).

Esta tecnologia vanguardista é com certeza uma alternativa com futuro promissor no desporto de alto rendimento como noutras áreas onde o efeito vibratório é considerado parasita. Comparando com as soluções já relatadas neste trabalho, o compósito Countervail® permanece discreto e protegido, desconhecendo-se o processo de fabrico detalhado, como da preparação da matéria-prima.

No filme promocional da Bianchi™ sobre a tecnologia Countervail®, (difundido no mês de setembro de 2013) são divulgadas algumas características sobre a tecnologia afirmando que o elastômero patenteado pela MSC “amortece vibrações e não impactos” tornando assim o conceito Countervail® eficaz num leque de frequências de fraca amplitude, ou seja ideal em estradas irregulares sem grandes ressaltos [14]. A Bianchi™ apresenta no mesmo filme um ensaio comparativo realizado a duas forquetas; uma com a tecnologia Countervail® e a outra sem. Fixas numa mesa vibratória o resultado visual entre duas forquetas são representadas pelo ressalto de uma bola de ténis de mesa submetida a frequência transmitida pelas extremidades das pernas de cada forqueta. O resultado visual é uma clara redução da amplitude vibratória da bola em contacto com a forqueta produzida com a tecnologia da MSC (ver Figura 12).



**Figura 12 - Ensaio comparativo de forquetas com e sem tecnologia Countervail® (Cortesia da empresa Bianchi™).**

É possível afirmar que as soluções que existem hoje no mercado são variadas e respondem parcialmente ao tema analisado neste trabalho, seguindo tecnologias e materiais distintos.

A monitorização de vibrações e impactos em protótipos por parte dos construtores de bicicletas é uma realidade, hoje em dia. Os resultados que advêm dos testes físicos cruzados com os resultados computacionais CAD/CAE permitem uma evolução crescente no amortecimento das vibrações. No entanto, os resultados publicados pelas grandes marcas de bicicletas são um misto de inovação tecnológica promissora misturado com estratégia de marketing onde a fonte do problema nem sempre é tratado de forma eficaz e íntegra.

## 1.3 Tecnologia Piezoelétrica

O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 pelos cientistas franceses Jacques e Pierre Curie [15]. De uma forma genérica, o efeito piezoelétrico caracteriza-se por uma conversão eletromecânica que se traduzir por sensor ou atuador segundo o efeito desejado. Inicialmente os atuadores piezoelétricos eram limitados a aplicações de pequenos deslocamentos como motores piezoelétricos [16] ou posicionadores óticos [17]. Os recentes avanços tecnológicos nesta área têm permitido aos atuadores piezoelétricos alcançar novos níveis de tensão e de deslocamento. A Macro Fibra Composite (MFC) representado na Figura 13 que será abordado mais à frente neste trabalho oferece uma flexibilidade inédita e uma tensão de atuação que abriu as portas para várias inovações e desenvolvimentos na área da investigação.



Figura 13 - MFC da empresa Smart Material Corporation.

Esta secção é destinada à utilização da piezoelectricidade no âmbito do controlo passivo e ativo. Após introdução de soluções comerciais da utilização desta tecnologia e suas características, apresentam-se os MFC utilizados em controlo passivo e ativo.

### 1.3.1 Soluções comerciais de MFC

Desenvolvido inicialmente pela NASA [18], os MFC deram entrada em diversas aplicações desportivas no intuito de reduzir as vibrações próprias destas modalidades. A Head™ fabricante conceituado de raquetes e acessórios de ténis [19], apresentou em 2013 uma inovadora solução de amortecimento vibratório Intellifiber™, recorrendo a tecnologia piezoelétrica ativa

embutida no aro da própria raquete como ilustrado na Figura 14. A mesma solução é utilizada pela marca ao colocar nos seus esquis e *snowboards* bandas de MFC. Quando uma carga de impacto é aplicada a um destes produtos, as fibras piezoelétricas convertem a energia mecânica em energia elétrica enviado para um *microchip* que devolve a energia elétrica otimizada para o atuador Intellifiber™ reduzindo desta forma 20% das vibrações e aumentando a estabilidade do equipamento. Deste modo o conforto e a eficiência do atleta são otimizados [19].

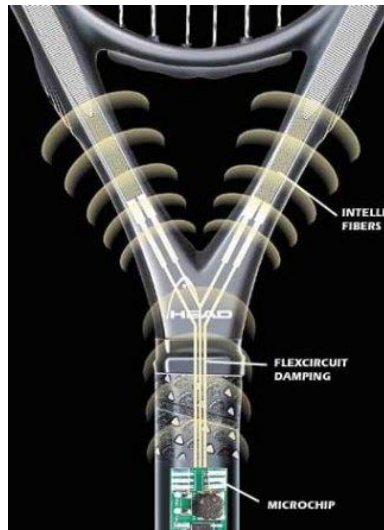


Figura 14 - Raquete Intellifiber™ da marca Head™.

Neste campo a Head™ vai mais longe ao desenvolver uma solução inteligente de autogestão da energia produzida pelos sensores piezoelétricos, uma vez que esta é acumulada e redistribuída de forma eficiente através de *microchip* pré-programado contrariando as oscilações vibratórias proveniente das solicitações mecânicas (ver Figura 15). Desta forma, estabilidade e desempenho são os grandes trunfos desta tecnologia [20].

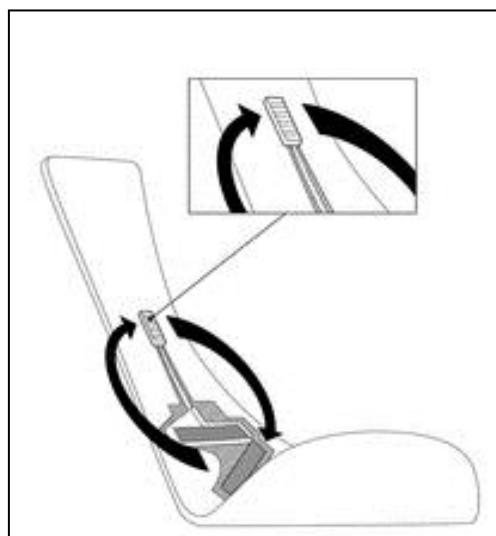


Figura 15 - Esqui com *microchip* pré-programado da Head™.

Num domínio diferente, mas relevante, é a crescente introdução de dispositivos piezoelétricos na aeronáutica. O interesse desta tecnologia de ponta é estudado de forma intensiva em várias áreas. O comportamento de estruturas é o principal foco de atenção dos gabinetes de desenvolvimento que leva a investigação a responder aos problemas de fadiga existente derivado das altas vibrações detetadas nas extremidades das asas dos aviões, quando submetidos a elevadas velocidades com ângulos de voo desfavoráveis (Figura 16). Neste sentido, a utilização de sensores e atuadores piezoelétricos vem controlar os dois modos, flexão e torção [21].

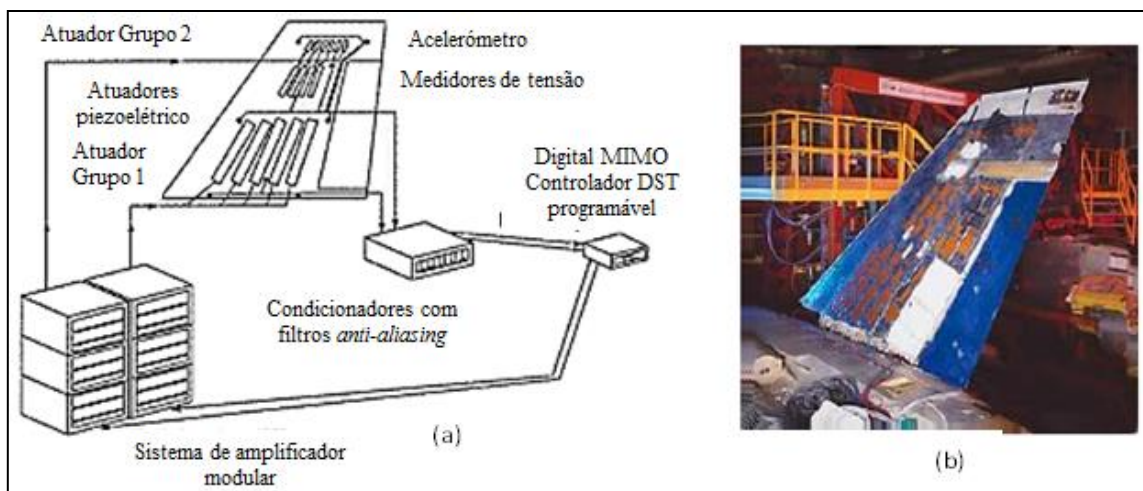


Figura 16 - Dispositivo ativo de vibração de uma asa de avião, (a) princípio, (b) vista geral de uma asa equipada transdutores piezoelétricos (Documento AXC-NASA-Boeing-US Air Force).

### 1.3.2 Efeito piezoelétrico

O efeito piezoelétrico é um fenómeno de polarização elétrica induzida pelo constrangimento de certos materiais. Esta polarização é proporcional ao constrangimento e muda de pólo com ela. O fenómeno é reversível, ou seja uma polarização elétrica resultando da aplicação de um campo elétrico provoca uma deformação do material. Ou seja, efeito piezoelétrico invertido. Na origem deste fenómeno eletromecânico está associado a estrutura cristalina do material. O efeito piezoelétrico é possível em certos sólidos não condutores possuindo uma anisotropia cristalina característica. Deste modo existe um eixo privilegiado na aparição de cargas elétricas intitulado de eixo de polarização. O número de sólidos piezoelétricos são poucos, sendo o quartzo o mais conhecido.

Nos anos quarenta do século XX, as cerâmicas piezoelétricas fazem a sua aparição com coeficientes piezoelétricos superiores aos cristais de então abrindo caminho para novas aplicações. O material cerâmico mais vulgar o titanato zirconato de chumbo (PZT) atinge o estado

de piezoelétrico após um processo final de polarização de modo a orientar os vetores de polarização na mesma direção (Figura 17).

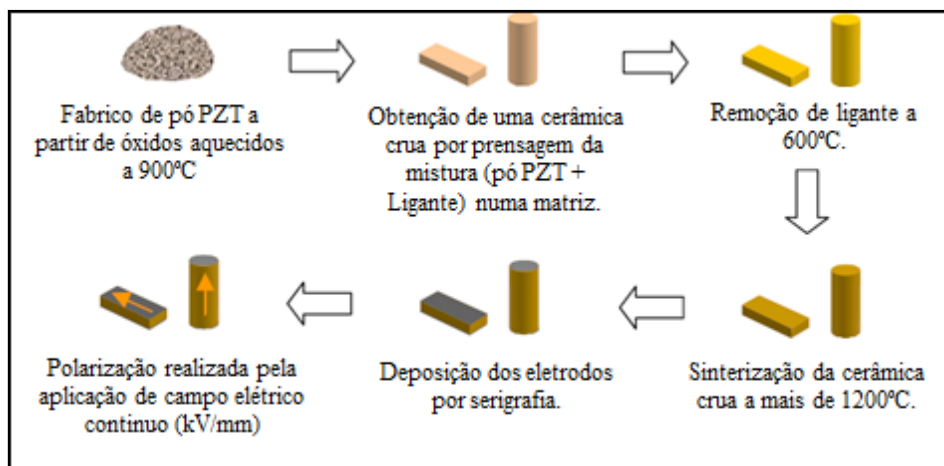


Figura 17 - Ciclo de fabricação das cerâmicas PZT pela via sólida.

As cerâmicas PZT apresentam-se frágeis e de difícil adaptação a superfícies curvas podendo fraturar num processo de manuseamento ou deformação. De modo a permitir uma maior flexibilidade foi criado o MFC, um conjunto de fibras de material cristalino de elevada rigidez, numa matriz polimérica flexível [22]. Em comparação com os piezoelétricos tradicionais, o MFC é flexível, conformável e de uma deformação generosa quando atuado. A Figura 18 ilustra de forma detalhada a composição interna do MFC da empresa Smart Materials Corporation [23].

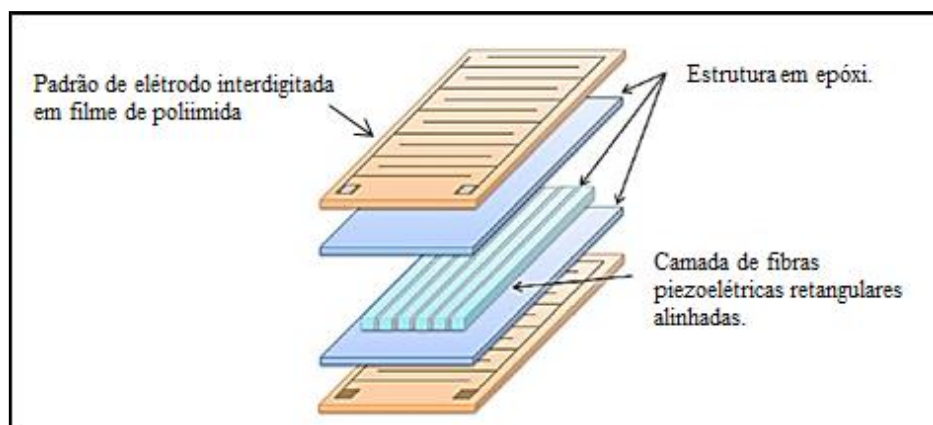


Figura 18 - Vista explodida de um MFC da Smart Materials Corporation.

De uma forma detalhada, os MFC são constituídos por um electro que alimenta um campo elétrico ao longo das fibras internas. Desta forma é necessário uma ligação sólida entre a matriz e as fibras para transferir as cargas de acionamento até à superfície externa do dispositivo.

Na fase final do processo de fabrico, a placa piezoelétrica é polarizada durante um minuto a 1500V.

Existe uma variedade de MFC *standard* disponível pelos diversos fabricantes. No entanto é possível desenvolver em colaboração com um fornecedor um dispositivo dedicado para um fim específico [23].

O MFC funciona em dois modos distintos:

- Modo 33, característico de coletores MFC do tipo P1;
- Modo 31, característico de coletores MFC do tipo P2.

No modo 33 a direção da força aplicada e a tensão gerada através da polarização do material são análogas, enquanto no modo 31 a força aplicada é direcionada segundo o eixo perpendicular ao da polarização, como representado na Figura 19 [23].

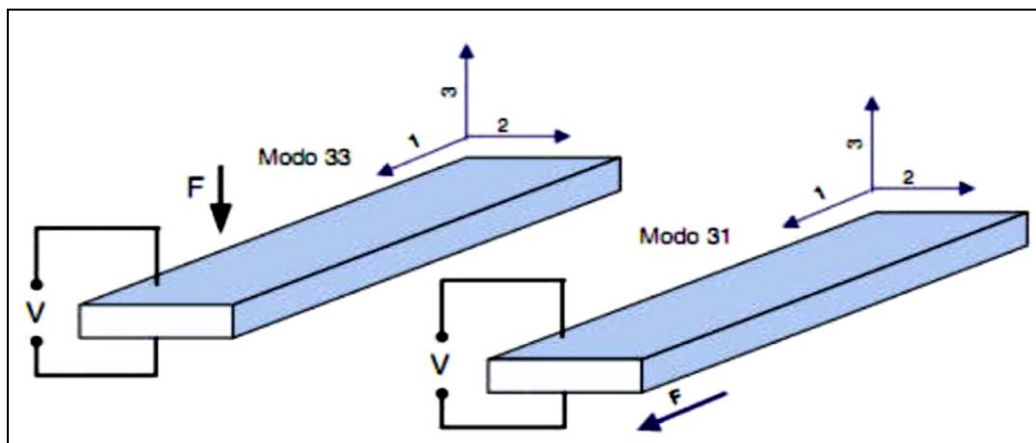


Figura 19 - Modos operacionais do MFC [23].

O MFC é composto por uma estrutura extremamente fina e maleável, permitindo acoplar este sensor a vários tipos de estruturas, mesmo complexas, por colagem ou soldadura. Quando é aplicada uma tensão elétrica sobre o material piezoelétrico (forma ativa), esta deforma (alonga, contrai, torce) ou provoca vibrações no substrato do mesmo, falamos neste caso de atuador piezoelétrico (ver Figura 20). Ao invés, este tipo de célula tem uma elevada sensibilidade a deformações, ruído e a vibrações, permitindo uma recolha de energia elétrica quando pressionados. Nesta situação, a célula passa a ser um sensor piezoelétrico [23].

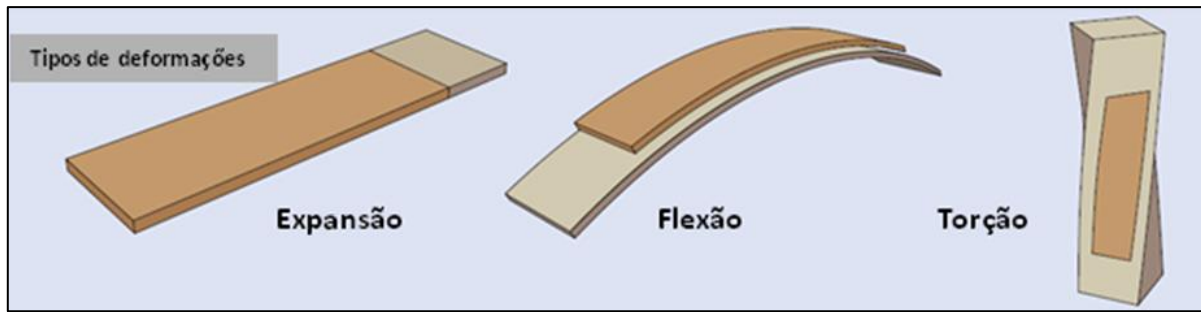


Figura 20 - Tipos de deformações do MFC [23].

### 1.3.3 Equações piezoelétricas

Como referido no capítulo anterior, após a conclusão do processo de polarização da placa piezoelétrica, esta assume propriedades mecânicas e elétricas. Estas equações possuem duas variáveis mecânicas e duas elétricas. O efeito direto (sensor) ou inverso (atuador) são representados pela matriz seguinte:

- Efeito piezoelétrico Direto: 
$$D = d \cdot T + \epsilon^T \cdot E \quad (1)$$

- Efeito piezoelétrico Invertido: 
$$S = s^E \cdot T + dt \cdot E \quad (2)$$

Sendo  $S$  a extensão,  $T$  a tensão mecânica,  $E$  o campo elétrico,  $D$  o campo de indução,  $s^E$  a deformabilidade da célula piezoelétrica em curto-circuito,  $d$  a constante piezoelétrica e  $\epsilon^T$  a constante dielétrica do material piezoelétrico a tensão mecânica constante.

O comportamento elétrico de um transdutor piezoelétrico de vibração pode ser representado por um modelo matemático de amortecedor viscoelástico. Numa situação em que a estrutura é submetida um ínfimo deslocamento provocado por uma excitação (exterior ao sistema) perto da sua frequência de ressonância, pode-se representar a estrutura (com os elementos piezoelétricos) da seguinte forma: massa + mola + piezoelétrico + amortecedora (ver Figura 21).

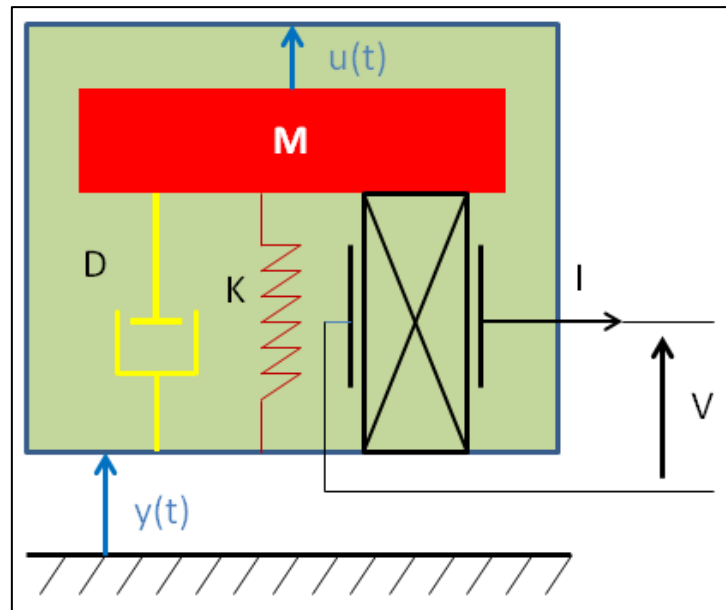


Figura 21 - Modelo equivalente de uma estrutura vibratória piezoelétrica.

Numa abordagem simplificada, a estrutura é considerada uma massa  $M$  rígida colada sobre uma mola de coeficiente  $K$  correspondendo à rigidez da estrutura em fibra de carbono. O amortecedor  $D$  correspondente às perdas mecânicas da estrutura. O transdutor piezoelétrico acoplado à estrutura registra o deslocamento de massa ( $u$ ) pelos sinais de saída elétrica  $I$  e  $V$ , monitorizados por equipamento de medição apropriado (osciloscópio).

As equações piezoelétricas juntam as variáveis mecânica ( $u$ ,  $FP$ ) com os elétricos ( $I$ ,  $V$ ) sobre a forma simplificada de relações (1):

$$\begin{cases} Fp = K_p u + \alpha V \\ I = \alpha \dot{u} - C \dot{V} \end{cases} \quad (3)$$

A constante  $K_p$  representa a rigidez da placa piezoelétrica em estado de curto-circuito.  $C$  é a capacitância fixada e  $\alpha$  é um fator de força. É possível demonstrar que o movimento  $u(t)$  da massa  $M$  submetida a vibrações externas geradas de  $y(t)$ , é descrito pela equação diferencial:

$$M\ddot{u} + D\dot{u} + Ku + K_p u + \alpha V = -M\dot{y} \quad (4)$$

Em que genericamente,  $\dot{q}$  representa a derivada parcial de  $q$  em ordem ao tempo  $t$ .

O deslocamento inerente à excitação externa  $y(t)$  é considerada como puramente sinusoidal com uma frequência perto da frequência de ressonância da estrutura. De modo, simplificada, considere-se uma carga puramente resistiva diretamente ligada ao elemento piezoelétrico.

Neste caso, a tensão para a carga  $R$  é alternativa. Considerando a segunda equação de piezoelétrico e a carga de resistência, a tensão sobre o elemento piezoelétrico pode ser expressa no domínio da frequência como uma função do deslocamento ( $u$ ), onde  $\omega$  é a frequência angular.

$$V = \frac{\alpha R}{1+jRC\omega} j\omega u \quad (5)$$

Pode-se relacionar a tensão  $V$  com o deslocamento  $y(t)$  obtidos pela equação (4), no domínio da frequência:

$$\frac{V}{y} = \frac{jM\alpha R\omega^3}{(-M\omega^2 + jD\omega + K + K_p)(1 + jRC\omega) + j\alpha^2 R\omega} \quad (6)$$

Na ressonância de estruturas com baixa perdas de viscosidade, a expressão (6) pode ser simplificada e leva a:

$$\frac{V}{y} = \frac{M\alpha R\omega^2}{\alpha^2 R + D + jRCD\omega} \quad (7)$$

### 1.4 Amortecimento viscoelástico

Os sistemas mecânicos são, em geral, sistemas amortecidos, cujo fenômeno, nas suas diversas formas, opõe-se ao movimento vibratório, dissipando energia. A resposta dos sistemas às excitações externas depende do fator de amortecimento que se pode representar em três estados:

- Inexistente no sistema originando numa excitação inicial que vibraria indefinidamente;
- Baixo e o sistema diz-se sub-amortecido vibrando com uma oscilação gradualmente atenuada;
- Elevado e o sistema diz-se sobre-amortecido e não oscilará possuindo apenas um retorno à sua posição inicial.

O amortecimento viscoelástico baseia-se na Lei de Newton, que envolve parâmetros variáveis no tempo cujos sistemas são classificados de acordo com o número de graus de liberdade do movimento [24].

No modelo viscoelástico parte-se do pressuposto de que a natureza do amortecimento é viscosa e a força de atrito  $F$  é proporcional à velocidade  $\dot{x}$  representando uma oposição ao movimento, sendo descrita pela equação:

$$F = -c\dot{x} \quad (8)$$

Onde  $c$  é uma constante de proporcionalidade e  $\dot{x}$  a velocidade de deslocamento de uma massa  $m$  em relação a um ponto fixo.

Considerando o sistema como massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade. Sendo  $m$  a massa,  $k$  a constante elástica da mola e  $c$  o coeficiente de amortecimento viscoso, representa-se este sistema pela seguinte equação:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (9)$$

Rescrevendo esta equação, tem-se:

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = 0 \quad (10)$$

Sabendo que:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{e} \quad \zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (11)$$

Sendo  $\omega_0$  a frequência natural de vibração e  $\zeta$  representa o fator de amortecimento. Desta forma simplifica-se a equação utilizando estas duas novas grandezas:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0 \quad (12)$$

e assumindo a solução [25] :

$$x = e^{\gamma t} \quad (13)$$

Chega-se a  $\gamma$ :

$$\gamma = \omega_0(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) \quad (14)$$

O comportamento descrito pela equação (13) depende da solução de  $\gamma$ :

- Se  $\zeta > 1$ : há duas soluções reais sendo o caso super-amortecido;
- Se  $\zeta = 1$ : há uma solução real sendo o caso criticamente amortecido;
- Se  $0 \leq \zeta < 1$ : há duas soluções complexas sendo o caso sub-amortecido.

Os casos super-amortecidos e criticamente amortecido são não oscilatórios (ver Figura 22) e não serão contemplados neste trabalho.

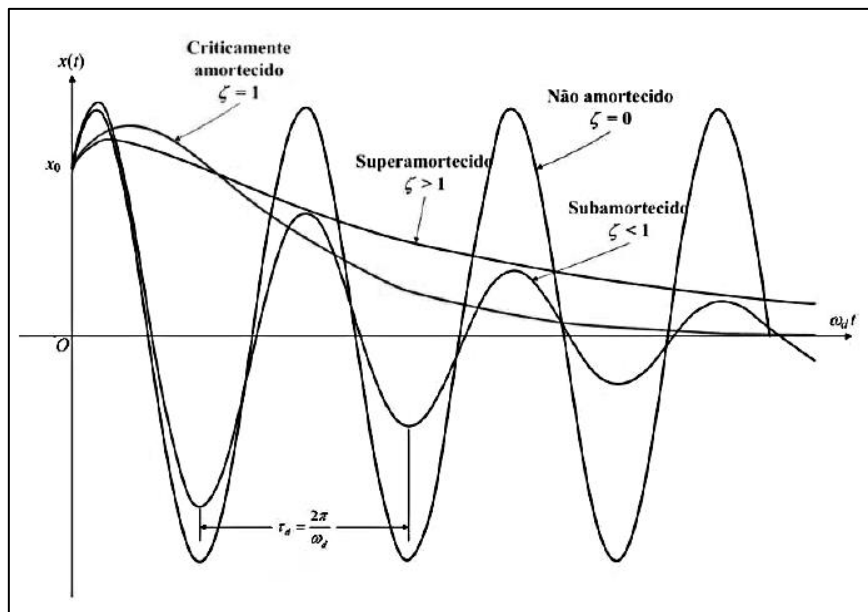


Figura 22 - Ilustração dos fatores de amortecimento.

A solução em que  $0 \leq \zeta < 1$ , sistema sub-amortecido, é dada pela equação:

$$x(t) = A_0 e^{-\zeta \omega_0 t} \cos(\omega_d t + \varphi) \quad (15)$$

Sendo  $A_0$ , a amplitude inicial de vibração,  $\varphi$  a fase inicial de vibração e  $\omega_d$  a frequência natural amortecida cuja equação é:

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (16)$$

Este modelo matemático é conhecido como sistema linear amortecido com um grau de liberdade [25].

Assumindo que a ressonância de estruturas pode ser interpretada como uma associação de vários sistemas de um grau de liberdade, o modelo de vibração é representado por:

$$x(t) = \left[ \sum_{i=1}^N A_i e^{-\zeta \omega_{ni} t} \cos(\omega_{di} t + \varphi_i) \right] + R_{wn} \quad (17)$$

Neste modelo  $A_i$ ,  $\zeta_i$ ,  $\omega_{ni}$ ,  $\omega_{di}$ ,  $\varphi_i$  são, respetivamente, amplitude inicial, amortecimento, frequência natural de vibração, frequência natural amortecida e fase inicial do  $i$ -ésimo modo de vibração. O termo  $R_{wn}$  é um ruído branco descorrelacionado do sinal.

Quando a frequência de excitação é igual à frequência natural do sistema de vibração então ocorre a ressonância. Quando tal acontece, a amplitude de vibração aumentará sendo regulada apenas pela quantidade de amortecimento presente no sistema [26].

## 1.5 Microesferas ocas de vidro

### 1.5.1 Características das microesferas ocas de vidro

A indústria dos materiais compósitos dispõe de matéria-prima mineral destinada às resinas sintéticas de modo a conceder certas propriedades que as resinas não possuem intrinsecamente. O conjunto de microesferas ocas de vidro tem a particularidade de aligeirar as resinas termoplásticas ou termoendurecíveis, graças à sua massa volúmica extremamente baixa (0,12 a 0,60  $g/cm^3$ ). Elas permitem também uma boa absorção de energia ao impacto e são resistentes à flexão como indicado na ficha técnica do fornecedor Rebelco. Sob forma de pó branco as partículas perfeitamente esféricas (menos de 200 $\mu m$  de diâmetro) e de espessura fina, (entre 0,5 e 1,5 $\mu m$ ), têm uma menor viscosidade misturado com resina, em comparação com cargas minerais convencionais de geometria aleatória (ver Figura 23).

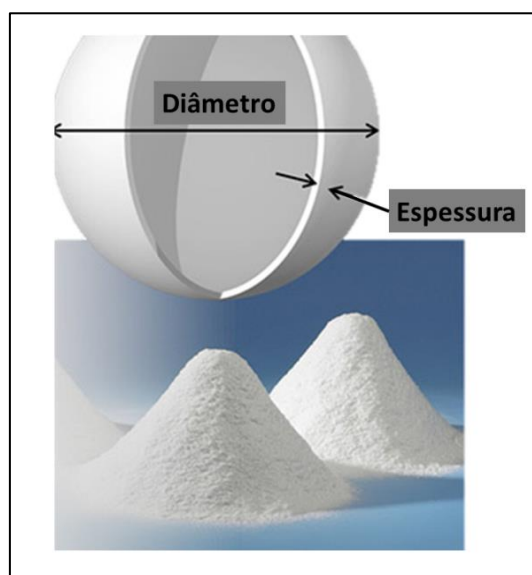


Figura 23 - Microesferas de vidros ocas 3M™.

As microesferas ocas de vidro ocupam menos superfície e dispersam-se uniformemente pela mistura o que leva a uma redução considerável do consumo de resina e a um aumento da quantidade de carga. Com uma pequena quantidade de microesferas ocas de vidro é possível substituir materiais pesados convencionalmente utilizados.

### 1.5.2 Utilização de microesferas ocas de vidro

O recurso as microesferas ocas de vidro tem vindo a crescer em diversas áreas da indústria, como na construção civil, aeronáutica, náutica ou no ramo automóvel que suscitam um interesse crescente. A busca de novos materiais e tecnologias para tornar os veículos do futuro mais leves e que produzem menos emissões é o grande desafio de alguns construtores de automóveis [27]. A empresa 3M™ oferece três soluções de microesferas ocas de vidro entre materiais de enchimento, processamento de materiais e conceitos para a nova tecnologia de vedação. Segundo a mesma, ao “utilizar esferas ocas de vidro em aplicações de moldagem por injeção, a densidade de compósitos termoplásticos pode ser reduzida em 30%, dependendo do material”... “A uma nova alternativa ao uso do metal em componentes para o ramo automóvel”, juntando dois componentes de moldagem por injeção (uma poliamida 46 DSM Stanyl com o Dyneon fluoro elastómero da 3M). Esta alternativa permite combinações de material que torna o conjunto leve, resistente a altas temperaturas (até 200°C) sem risco de corrosão e uma liberdade geométrica no desenvolvimento de componentes [27].

### 1.6 Objetivos

Com este trabalho, pretende-se contribuir para o desenvolvimento de novas soluções de amortecimento de vibrações em forqueta rígida de bicicleta de estrada. Neste estudo foram realizados ensaios experimentais de caracterização das propriedades mecânicas das forquetas. Também foram realizados ensaios experimentais, em laboratório e em estrada, de modo a comparar o comportamento dinâmico de diferentes forquetas com distintos números de camadas de fibra de carbono e com ou sem núcleo de microesferas ocas de vidro. Do ponto de vista computacional, foram realizadas análises em frequência e estáticas para comparar as mesmas forquetas estudadas experimentalmente mas agora com e sem a aplicação de uma placa de material piezoelétrico.

Assim, os principais objetivos a alcançar neste estudo são os seguintes:

- Estudar o comportamento estrutural e mecânico de forquetas em fibra de carbono com núcleo e elemento piezoelétrico utilizando o método dos elementos finitos.
- Obter experimentalmente as características vibratórias de forqueta rígida comercial, em diversos pavimentos;
- Avaliar experimentalmente as características vibratórias de forquetas rígida protótipo, em laboratório;
- Confrontar valores de aceleração experimentais com valores limites preconizado pela norma ISO 5349;
- Demonstrar os benefícios de um amortecimento de vibrações recorrendo a utilização de microesferas ocas de vidro e elemento piezoelétrico.

---

# Capítulo 2

---

## 2-Procedimento numérico e experimental

---

Neste capítulo, são apresentadas as várias fases do projeto, que assentou numa abordagem que é constituída por cinco fases designadas por:

- Definição do produto por processo de engenharia inversa e construção de ferramentas;
- Simulação numérica em Abaqus™;
- Caraterização de materiais;
- Realização de protótipos;
- Validação de protótipos.

### 2.1 Processo de modelação 3D de uma forqueta

#### 2.1.1 Engenharia inversa

Como base de trabalho para o presente estudo foi escolhida uma forqueta em carbono *mono-coque* do fabricante TREK, modelo Madone 6.9 do ano 2010. O modelo foi gentilmente cedido pela empresa Bicimax (representante da marca em Portugal). Não tendo sido possível obter o modelo CAD pelo fabricante TREK, foi definido seguir o caminho da engenharia inversa. Deste modo foi realizado no laboratório da empresa Key Plastics Portugal S.A, a digitalização 3D da forqueta recorrendo a inovadora tecnologia de luz branca. O equipamento, uma câmara COMET® ECO 4M da marca Steinbichler™ equipado de uma lente de 200 mm<sup>3</sup> (Volume de medição em mm<sup>3</sup>) e de uma mesa rotativa permitiu a recolha de uma nuvem de pontos da forqueta (Figura 24).



Figura 24 - Camêra Comet® Eco 4M da Steinbichler™.

Baseada na projeção de padrões de luz sobre a superfície alvo foi possível varrer a totalidade das superfícies expostas. A forqueta foi submetida a 87 *shots* permitindo a aquisição de uma nuvem de 56 milhões de pontos. A precisão dos dados recolhidos está na ordem da dezena de  $\mu\text{m}$  garantindo um ótimo pós processamento de dados em programas de CAD/CAE.

### 2.1.2 Modelação da forqueta

#### 2.1.2.1 Definição de superfície classe A

Após conclusão do processo de digitalização do modelo físico da forqueta, foi então realizada a engenharia inversa de forma a obter uma geometria fiel ao modelo inicial mas sem imperfeições ou granulado próprio da interligação entre pontos sobre forma de triângulos. A complexidade geométrica da peça leva a seguir uma estratégia de conceção avançada e rigorosa. Deste modo, com auxílio do programa de CAD/CAE, CATIA V5, um conjunto de secções (longitudinais e transversais) e *splines* foram delineadas ao longo da geometria digitalizada pelas quais foram criadas superfícies evolutivas. O conjunto de superfícies geradas foi agrupado obtendo por fim uma única superfície em 3D também denominada de casca. O resultado comparativo entre o modelo digitalizado e a superfície exterior criada é satisfatório, já que o intervalo máximo de erro obtido fica num intervalo de -0,1 a 0,1 mm. Este modelo 3D será utilizado mais a frente na realização do molde como também será a base para a análise computacional.

### 2.1.2.2 Definição de espessuras

De forma a obter a variação de espessura ao longo do modelo físico foi seccionada uma segunda forqueta, em carbono da marca Trek™, com as mesmas características do modelo digitalizado. O mapa de secções foi delineado de forma a poder obter o máximo detalhe. Deste modo, foi definido efetuar uma secção longitudinal e um conjunto de 23 secções transversais, numa metade da peça. Na Figura 25 estão identificados os pontos de medição de 1 à 23, com espaçamento de 30 mm, 15 mm e 10 mm em zonas de maior ou menor detalhe como representado na Tabela 1.



Figura 25 - Medição de espessura em várias secções da forqueta.

Para realizar este levantamento de dimensões foi utilizado um microcópio Tesa Visio 300DCC, com uma lente de 15x. A variação de espessura no sentido longitudinal da peça mostra um complexo processo de fabrico, com resultados convergindo para um máximo localizado na bifurcação das duas hastes. Já no sentido transversal, a secção de cuja forma em “U” regista um aumento significativo entre as extremidades e a base do “U” como se pode ver na Figura 27. A compilação dos dados na Tabela 1, deu origem ao gráfico da Figura 26, cujos resultados obtidos entre o lado A e o lado B são semelhantes em zonas análogas. No entanto, verifica-se uma disparidade entre pontos laterais versus pontos frontais das hastes com uma variação de espessura de 1mm. Já na zona central da bifurcação o diferencial é superior podendo chegar aos 2,5 mm. Por fim a área de menor variações entre o lado A e B regista-se no cilindro entre os pontos 14 e 23.

Tabela 1 - Medição de espessura em várias secções da forqueta comercial.

PTS DE CTRL	A-EXT (mm)	A-INT (mm)	A-CENT (mm)	B-EXT (mm)	B-INT (mm)	B-CENT (mm)
P01	1,579	1,568	2,502	1,791	2,055	2,584
P02	1,542	1,269	2,258	1,233	1,503	2,356
P03	1,275	1,071	2,040	1,369	1,608	2,225
P04	1,542	1,269	2,258	1,489	1,735	2,352
P05	1,509	1,214	2,127	1,376	1,615	2,527
P06	1,441	1,316	2,280	1,412	1,660	2,419
P07	1,491	1,235	2,116	1,533	1,609	2,430
P08	1,378	1,363	2,387	1,516	1,546	2,560
P09	1,429	1,381	2,430	2,039	2,123	3,302
P10	1,860	2,106	2,935	2,387	2,354	4,845
P11	2,691	2,346	4,586	2,897	2,951	5,693
P12	2,984	2,924	5,460	3,632	3,558	5,854
P13	4,500	6,000	6,230	4,403	6,300	6,283
P14	7,013	7,000	7,000	6,838	6,838	6,838
P15	6,705	6,600	6,600	6,871	6,871	6,871
P16	5,560	5,500	5,500	5,612	5,612	5,612
P17	4,056	4,056	4,056	3,950	3,950	3,950
P18	2,853	2,853	2,853	2,706	2,706	2,706
P19	2,438	2,438	2,438	2,321	2,321	2,321
P20	2,305	2,305	2,305	2,314	2,314	2,314
P21	2,334	2,334	2,334	2,331	2,331	2,331
P22	2,349	2,349	2,349	2,357	2,357	2,357
P23	2,256	2,256	2,256	2,324	2,324	2,324

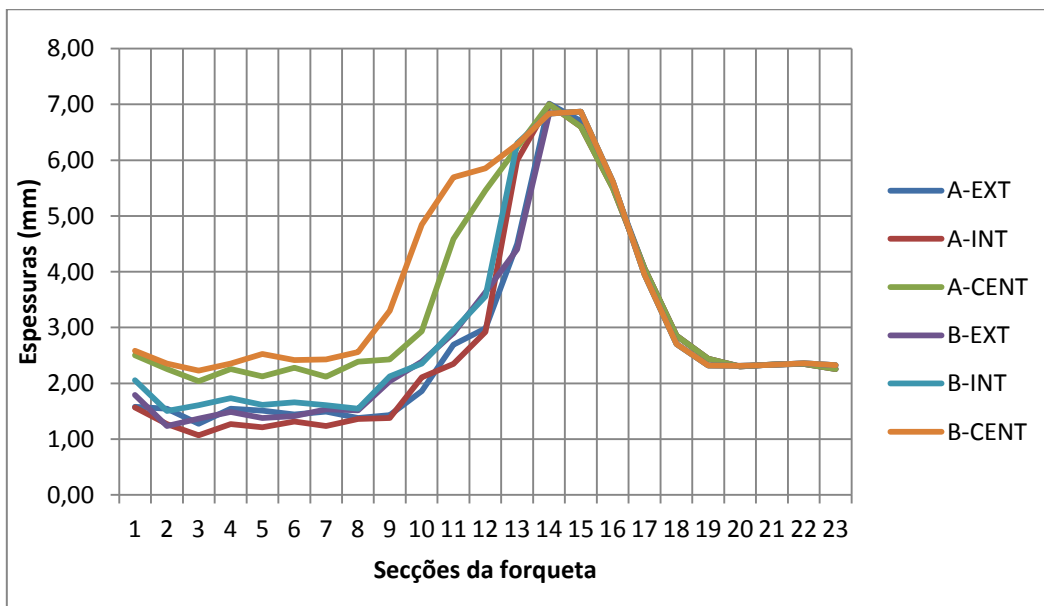


Figura 26 - Variação de espessura da forqueta comercial.

### 2.1.3 Definição de camadas

O controlo da variação de espessura é fundamental neste processo de engenharia inversa, de forma a estar o mais próximo possível da geometria padrão. No sentido de delinear a quantidade de espessuras utilizadas em forquetas pela Trek™, recolhemos fotos microscópicas de

varias secções onde é possível observar, em alguns casos, a presença de vestígios de camadas homogéneas, paralelas, descontinuadas. No entanto não é possível confirmar que se tratam de camadas de fibra de carbono ou de resina ou até de ambas como ilustrado na Figura 27. Deste modo a delimitação de camada como a própria orientação da fibra nas várias secções analisadas não são conclusivas transpondo este requisito para um método empírico na fase de prototipagem.

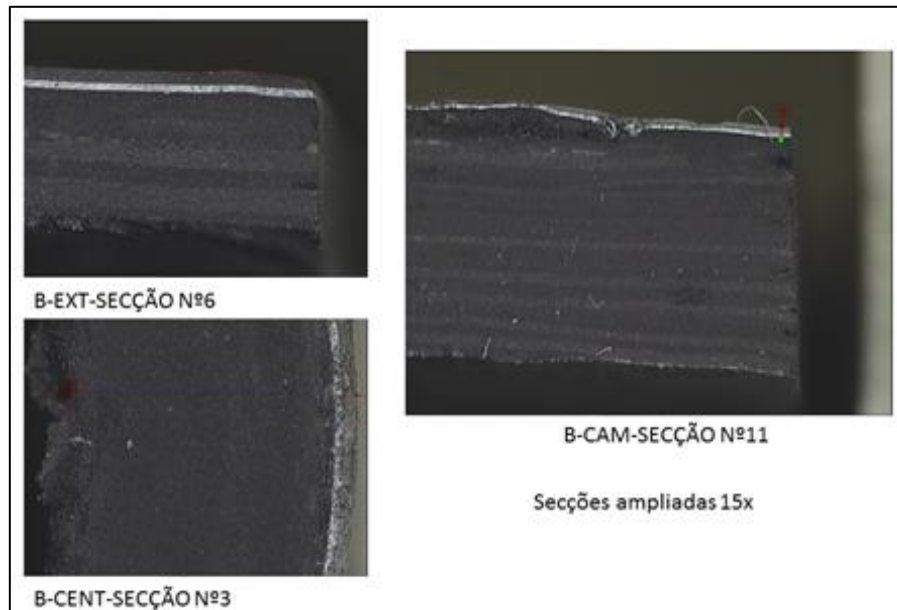


Figura 27 - Foto microscópica de secções transversais da forqueta comercial.

## 2.2 Simulação numérica e análise em ABAQUS™

A análise de elementos finitos em forquetas de bicicleta foi realizada no programa Abaqus™ (Versão 6.13). Este programa informático é apropriado para este tipo de estruturas de compósitos laminados associados a modelação geométrica avançada e complexa. A análise detalhada de forquetas de bicicletas em elementos finitos necessita uma abordagem sectorial onde espessuras, cargas, condições fronteiras e resultados são dedicadas.

Nesta fase inicial do projeto foi determinado seguir dois caminhos complementares de forma a poder efetuar simulações no programa comercial de elementos finitos Abaqus™ utilizando valores provenientes de resultados de ensaios apresentados no próximo capítulo na caracterização de materiais.

## 2.2.1 Criação de um modelo de elementos finitos

O comportamento mecânico da forqueta pode ser verificado por meio de simulações de elementos finitos com programas de CAE como o Abaqus™. Desta forma é possível calcular deslocamentos, deformações, tensões e forças resultantes, como também frequências naturais.

Numa simulação de elementos finitos, a forqueta é modelada com uma malha, isto é, um conjunto de nós e elementos. A escolha da malha em particular determina as funções básicas que representam o campo de deslocamento, e, portanto, tem uma influência considerável sobre os resultados. Para que eles sejam relevantes, a construção da malha deve respeitar certos princípios e seguir uma abordagem ordenada da seguinte forma:

- Identificado um conjunto de secções perpendicular ao sentido longitudinal da forqueta, a partir do modelo 3D da forqueta (casca exterior) proveniente do programa informático CATIA V5;
- Garantir uma malha de qualidade superior; recorrendo a um gerador de malha automático, desenvolvido para o efeito, em linguagem Fortran™. O tipo e os tamanhos dos elementos determinam os limites da peça. Neste caso foram adotados elementos hexaédricos de 8 nós para o piezoelétrico e o núcleo de microesferas ocas de vidro e elementos quadriláteros de casca com 4 nós para a fibra de carbono. A quantidade de quadriláteros por secções ao longo da forqueta é sempre a mesma; garantindo a posição e ligação dos nós entre eles de forma homogénea (ver Figura 28).

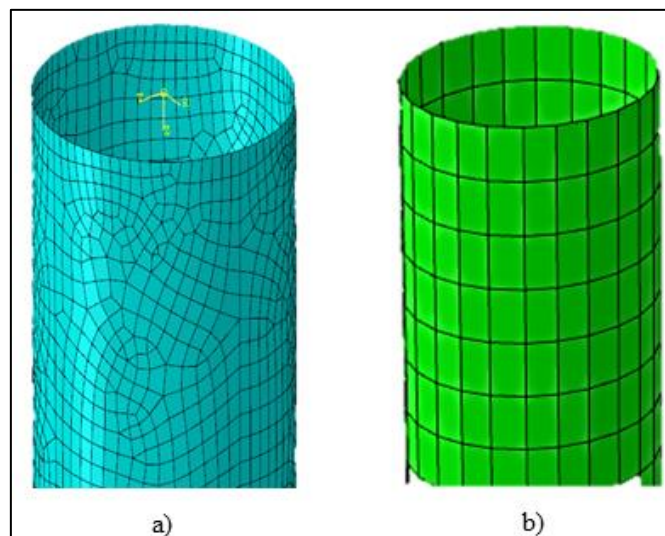


Figura 28 - a) Uma malha não estruturada; b) A malha estruturada utilizada.

- A geometria de uma forqueta de estrada apresenta uma bifurcação na coroa da peça, onde o tubo de direção dá lugar a duas pernas. Esta divergência tridimensional não deve ser sinónima de redução ou divisão de elementos ao longo da forqueta, mas sim a sua preservação ao longo da peça. A estratégia escolhida baseia-se na criação de duas faixas de transição (uma em cada perna) cujo número de elementos por secção é idêntico aos presentes nas secções a montante (ver Figura 29).

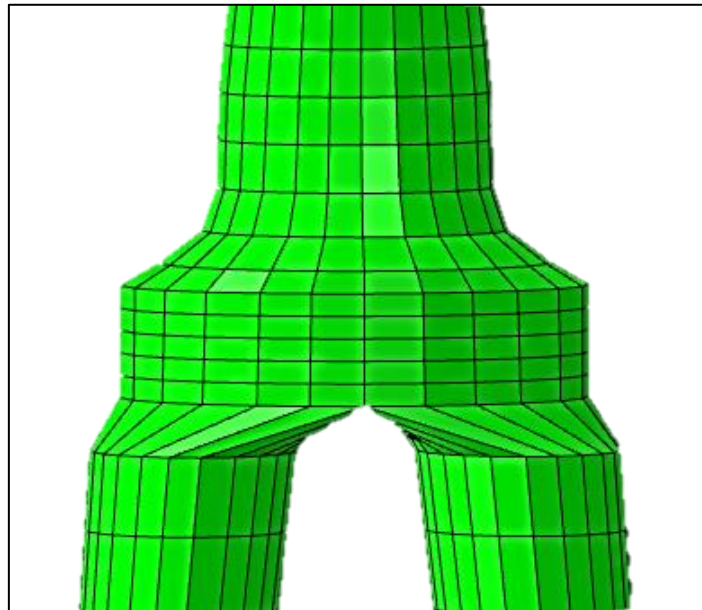


Figura 29 - Bifurcação de malha na coroa da forqueta.

### 2.2.2 Tipos de análises

No sentido de monitorizar o comportamento mecânico das diversas configurações de forquetas foi definido a realização de simulação em modo estático, dinâmico e também modal.

As configurações de forquetas são:

- Forqueta em fibra de carbono;
- Forqueta em fibra de carbono com elemento piezoelétrico;
- Forqueta em fibra de carbono com núcleo em microesferas ocas de vidro;
- Forqueta em fibra de carbono com núcleo em microesferas ocas de vidro com elemento piezoelétrico.

## 2.2.3 Configuração dos modelos a simular no Abaqus™

### 2.2.3.1 Geometria dos modelos

A geometria da forqueta é a primeira etapa neste estudo. A sua definição foi desenvolvida por engenharia inversa e modelada no programa informático CATIA V5 como reportado no subcapítulo anterior 3.1.1.

O material selecionado para construir a forqueta foi a fibra de carbono 6K (equivalente a ref. T700) de alta rigidez com ou sem núcleo de microesferas ocas de vidro e elemento piezoelétrico. As configurações de tecido unidirecionais adotadas são caracterizadas no Abaqus™ (material, propriedades mecânicas) por camada e de forma distintas.

Deste modo serão considerados quatro protótipos (T1, T2, T3, T4) com diferentes configurações de fibra de carbono como representado na Tabela 2:

- O protótipo T1 é definido como referência e possui características geométricas (variação de espessura) semelhantes à forqueta comercial. A quantidade e orientação dos laminados unidirecionais provêm das medições realizadas na fase de engenharia inversa (ver Figura 26 e Tabela 1).
- O protótipo T2 possui características geométricas (variação de espessura) semelhantes à forqueta comercial cuja quantidade e orientação dos laminados unidirecionais foram reduzidas em 25%.
- O protótipo T3 possui características geométricas (variação de espessura) semelhantes à forqueta comercial cuja quantidade e orientação dos laminados unidirecionais foram reduzidas em 50%.
- O protótipo T4 possui características geométricas (variação de espessura) semelhantes à forqueta comercial cuja quantidade e orientação dos laminados unidirecionais foram reduzidas em 62,5%.

Tabela 2 - Configuração do revestimento de forquetas.

Secções	Protótipo T1 (Ref.)		Protótipo T2 (Ref.-25%)		Protótipo T3 (Ref.-50%)		Protótipo T4 (Ref.+25%)	
	Espessuras (mm)	Camadas	Espessuras (mm)	Camadas	Espessuras (mm)	Camadas	Espessuras (mm)	Camadas
A	2,3	8	1,725	6	0,8625	3	2,15625	7
B	5	17	3,75	13	1,875	6	4,6875	16
C	5	17	3,75	13	1,875	6	4,6875	16
D-F	2,5	8	1,875	6	0,9375	3	2,34375	8
D-L	1,5	5	1,125	4	0,5625	2	1,40625	5

O diagrama mostra duas forquetas coloridas. A forqueta à esquerda tem uma haste verde (Zona A), um anel laranja (Zona B), uma base azul (Zona C) e duas pernas ciano (Zona D-F). A forqueta à direita tem uma haste verde (Zona A), um anel laranja (Zona B), uma base azul (Zona C) e uma perna amarela (Zona D-L). As zonas são delimitadas por linhas tracejadas e rótulos.

### 2.2.3.2 Propriedades do elemento da secção

### 2.2.3.3 Dados dos materiais

As propriedades mecânicas dos materiais selecionados para este estudo foram determinadas pela caracterização de provetes (placas) com diferentes camadas e orientações de fibra de carbono, como apresentado na secção 3.3.1. Os valores recolhidos na sequência dos ensaios à flexão permitiram, definir as propriedades mecânicas dos dois tipos de laminados (unidirecional e bidirecional). A aplicação foi desenvolvida em Fortran e funciona em ambiente Abaqus.

Deste modo foi possível para cada material obter as seguintes propriedades:

-Módulo de elasticidade E nas três principais direções (E11, E22, E33);

-Módulo de *Poisson* ( $\nu_{12}$ ,  $\nu_{13}$ ,  $\nu_{23}$ );

-Módulo de Elasticidade transversal ( $G_{12}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{23}$ ).

Como referido no subcapítulo 2.2.3.2, o laminado selecionado (fibra de carbono uniaxial 6K) foi aquele que apresenta as melhores características mecânicas para a aplicação em causa ( $E$ ,  $\nu$  e  $G$ ).

### 2.2.3.4 Cargas e condições de fronteira

A carga e as condições de fronteira neste estudo são essencial para obter resultados realísticos e utilizáveis. A forqueta apresenta uma geometria complexa e deste modo é fundamental a realização de uma correta e detalhada análise de tensão/extensão ( $\sigma/\epsilon$ ) sujeitas as condições reais de um ciclista. A carga de 350 N imposta na base da coroa da forqueta assenta em valores médios de um homem de 80 Kg. A direção da carga é contrária à polarização do material piezoelétrico.

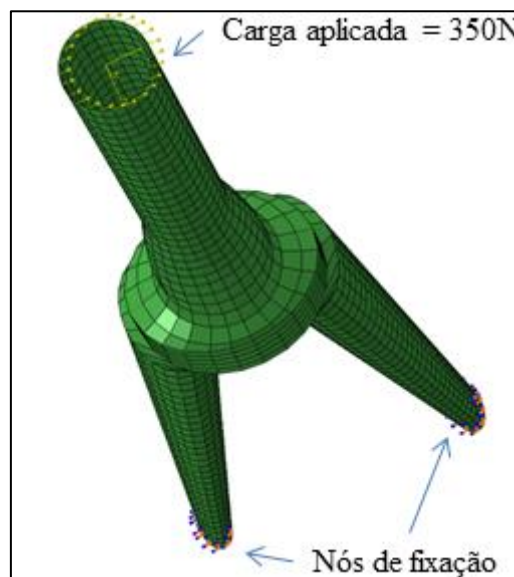


Figura 30 - Localização da carga

### 2.2.3.5 Tipo de dados a serem obtidos como output

Pretende-se com as simulações de elementos finitos, primeiro; localizar zonas com maior nível de tensões e segundo, evidenciar o amortecimento vibratório das diversas configurações de forquetas. Deste modo, são dados essenciais a frequência natural  $\omega_n$  e o fator de amortecimento  $\zeta$ .



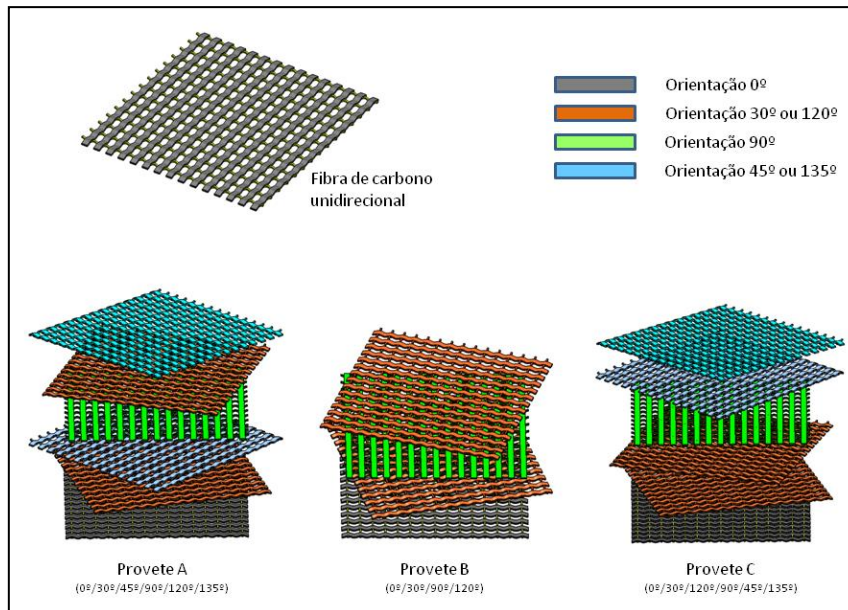


Figura 32 - Sequência de empilhamento do composto em fibra de carbono uniaxial com diferentes orientações.

A totalidade dos laminados foi impregnada com mistura de resina epóxi (SR1500) e endurecedor lento (SD2503) entre camadas como ilustrado na Figura 33. Os provetes são colocados em saco de vácuo ao longo das oito horas de cura, como recomendado pelo fornecedor Sicommin (Anexo 1).



Figura 33 - Realização de provetes em fibra de carbono 125x68mm.

Após obtenção dos provetes foi realizado um controlo de espessura em sete pontos distintos previamente definidos para cada provete (ver Figura 34 e Figura 36). As medições foram fei-

tas com uma coluna de medição digital Tesa cuja ponteira utilizada tem forma cilíndrica com 2 mm de diâmetro.

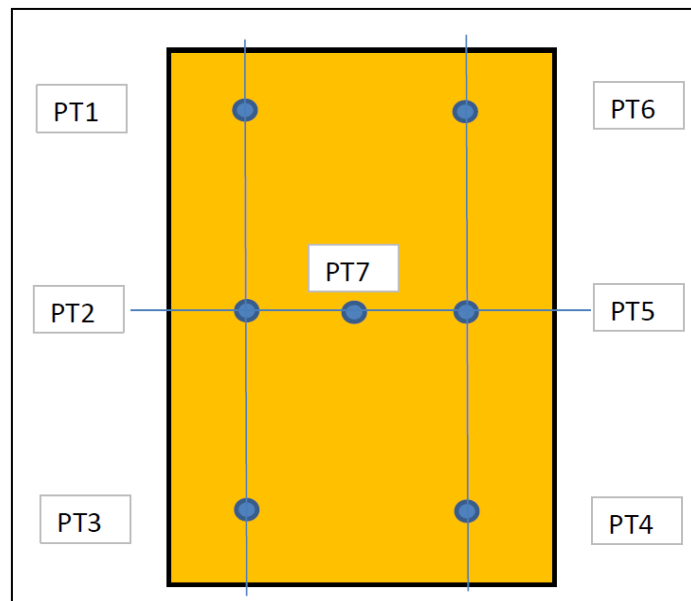


Figura 34 - Disposição dos pontos de controlo nos provetes.

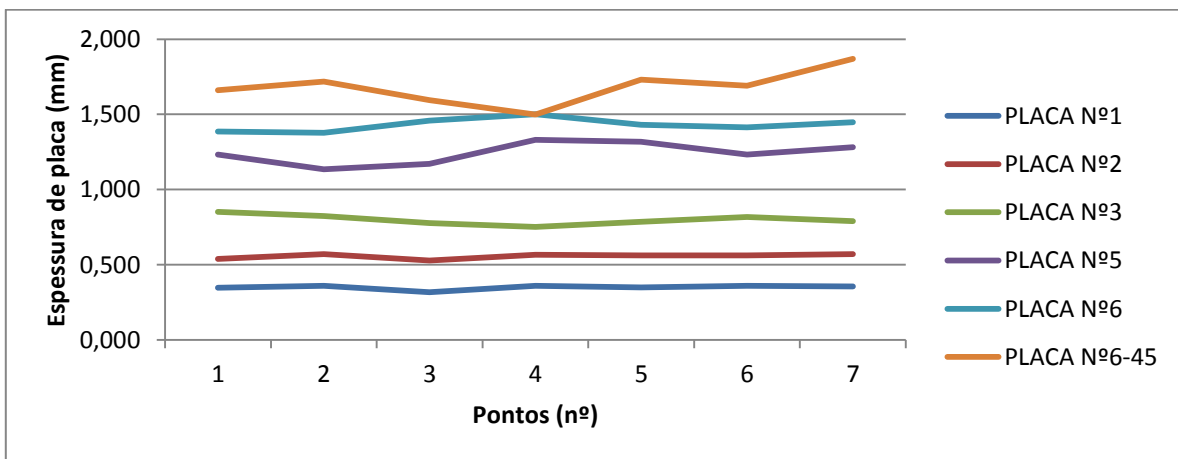


Figura 35 - Variação de espessura nas placas de ensaio bidirecional.

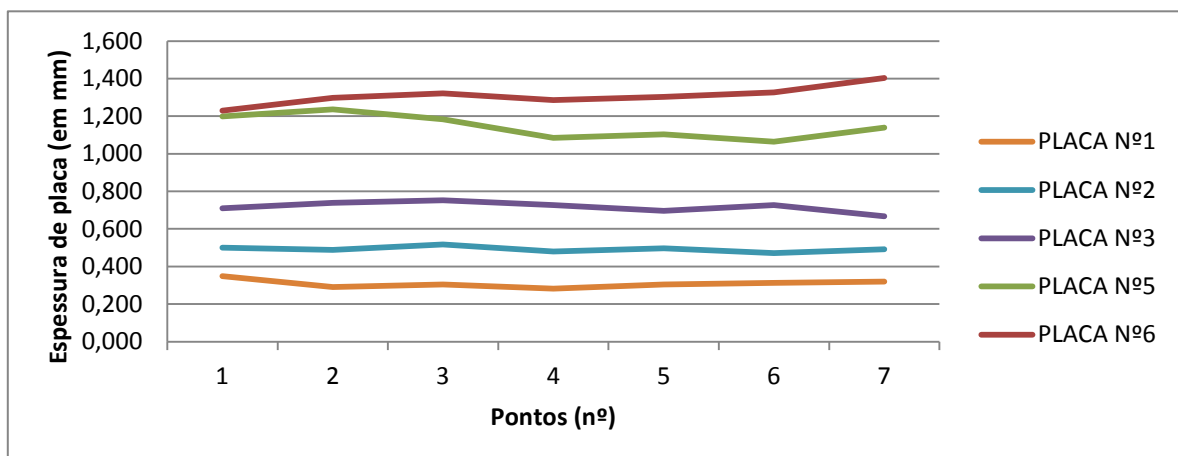


Figura 36 - Variação de espessura nas placas de ensaio unidirecional.

Os resultados apresentados nas Figura 35 e Figura 36 indicam que quanto maior o número de camadas de fibra de carbono maior é a variação de espessura da placa. A causa apontada para esta flutuação deve-se à falta de homogeneização da resina entre camadas e da própria cura do compósito sob vácuo. Nesta tabela também é possível definir a espessura de uma camada de fibra de carbono cuja média se situa em 0,3 mm (retirando 0,04 mm da camada residual unilaterial de álcool polivinílico). No anexo 2 encontra-se informação numérica da variação de espessura dos provetes.

Com os valores de espessura obtidos é possível reproduzir de forma mais concreta a variação de espessura presente na forqueta comercial da Trek™ (referência deste estudo).

### 2.3.2 Ensaios à flexão dos provetes em Fibra de Carbono

Para os ensaios de flexão em três pontos, todos os provetes têm como dimensões 125 mm de comprimento, 68 mm de largura, e espessuras variável de amostra para amostra como já referido.

Todos os ensaios foram realizados a temperatura ambiente e com controlo de deslocamento, com uma velocidade de carregamento de 5mm/min. Os ensaios e a sua preparação foram realizados conforme a norma ISO 14125 [28].

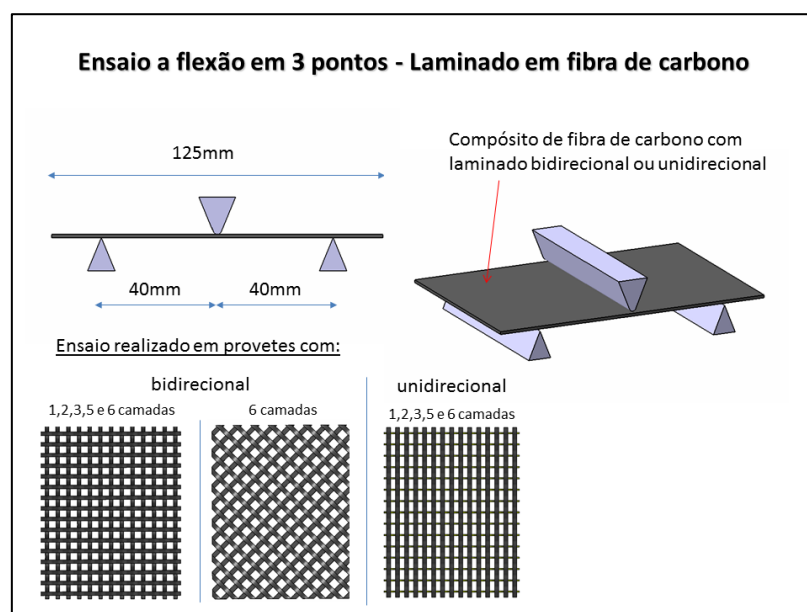


Figura 37 - Ensaio a flexão em 3 pontos - Laminado em fibra de carbono.

Os resultados permitem obter numa primeira fase as propriedades ortotrópicas dos materiais em estudo (fibra de carbono bidirecional e unidirecional) tal como o módulo de elasticidade

E, módulo de *Poisson*  $\nu$  e módulo de Corte  $G$ , de modo a ser utilizado como variável no programa Abaqus™.

### 2.3.3 Realização de provetes em fibra de carbono com microesferas ocas de vidro

Os materiais *sandwichs* apresentam um interesse nas aplicações que requerem ao mesmo tempo rigidez e leveza do produto final. São constituídos de forma genérica por camadas exteriores e por um núcleo (oco ou cheio) que mantem o espaçamento das camadas exteriores. As teorias da resistência dos materiais mostram de facto, que a rigidez à flexão de um painel é proporcional ao cubo da sua espessura. Deste modo, o núcleo de um compósito multicamadas permite aumentar o módulo do estratificado de forma a aumentar de forma significativa o momento de inércia, pelo aumento de espessura de o material de baixa densidade. Deste modo, o resultado obtido é um aumento considerável da rigidez, com um baixo aumento da massa total da peça. Neste sentido, o estudo será focado nesta teoria com a realização de tubos *sandwichs* compostos de camadas de fibra de carbono nas extremidades e no seu núcleo microesferas ocas de vidro com matriz polimérica de resina epóxi. Com esta configuração de compósitos pretende-se analisar o comportamento mecânico à flexão.

### 2.3.4 Ensaios mecânicos dos provetes

Foram produzidos 3 provetes cilíndricos idênticos (P1, P2, P3) de secção 34 mm de diâmetro com um comprimento de 355mm composto desta forma (ver Figura 38):

- um núcleo em microesferas ocas de vidro (ref. Rebelco SG25 - Glass Cell 25) cuja percentagem volumétrica é de 50% com matriz polimérica cuja percentagem volumétrica é de 50%;
- um revestimento por 4 camadas de fibra de carbono com a ref. Rebelco 195-1000 -3K HS.

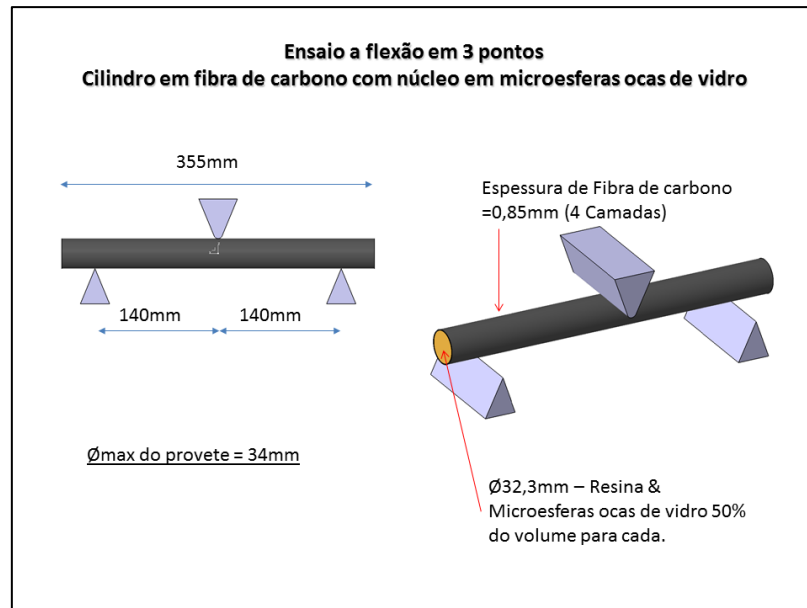


Figura 38 - Ensaio a flexão em 3 pontos - Provete cilíndrico em fibra de carbono com núcleo em microesferas ocas de vidro.

## 2.4 Desenvolvimento do molde

### 2.4.1 Características e requisitos do molde

O desenvolvimento de uma ferramenta que permita a reprodução da forqueta da Trek™ necessita de recorrer à construção de um molde cujo processo de fabrico se pretende rápido e de baixo custo permitindo obter diversas moldações.

### 2.4.2 Modelação do molde

Após obtenção da superfície classe A do modelo 3D da forqueta, deu-se início ao desenvolvimento do molde. A modelação foi efetuada no programa informático Dassault CATIA V5R19. Os requisitos de desmoldagem, posicionamento e soluções inerentes ao processo de moldagem de compósitos em molde fechado. A escolha do material do molde recaiu sobre a espuma de poliuretano (PU) de alta densidade cuja referência é SikaBlock® M960 do fabricante Sika. A escolha foi baseada por um lado, na quantidade de amostras necessárias para utilizar em testes mecânicos previstos neste estudo, inferior a 10 unidades e por outro lado pelas propriedades do material. Estas permitem uma maquinação fácil e uma redução significativa do tempo de processamento em comparação com materiais ferrosos, como alumínio ou aço.

O molde é constituído por duas cavidades, um inserto cilíndrico posicionado ao centro do molde cuja função é de poder moldar o furo que permite fixar o sistema de travagem da bicicleta e por fim um inserto de geometria retangular com um dos topos boleado de forma a posicionar pelo interior, as duas ponteiras que irão fixar ao eixo da roda.

### 2.4.3 Programação e maquinagem CNC das cavidades

O centro de maquinagem CNC (comando numérico computadorizado) Cincinatti Milacron presente nas instalações da ESTG foi a ferramenta utilizada para realizar as duas partes do molde. A preparação e programação do processo de maquinação, como a estratégia de desbaste e de acabamento de superfície foram ajustadas à geometria a esculpir no interior do molde cuja qualidade do acabamento se pretendia rigorosa, com um excelente polimento. Como refere J. Sloan “A superfície da ferramenta ajusta a linha de base da qualidade da produção-peça, logo a forma da peça e a qualidade de superfície não podem ser melhores do que as da ferramenta” [29]. As cavidades do molde, nomeadas de cavidade fixa e cavidade móvel delimitadas pela linha de partição, devidamente orientada no molde permitem a correta desmoldação das peças moldadas. As duas cavidades posicionadas por pinos centrais (pinos na cavidade fixa e casquilhos na cavidade amovível) garantem a ausência de desencontros e a obtenção de uma linha de partição discreta na moldação. Na cavidade fixa do molde foram colocados furos laterais de 4 mm de diâmetro para escapes de ar. Estes orifícios são essenciais durante o processo de vazamento da resina. Desta forma o preenchimento do molde torna-se homogéneo minimizando a presença de bolhas e de defeitos superficiais do núcleo. Após vazamento contínuo de resina nos orifícios, estes são estancados por cilindros metálicos previamente dimensionados de modo a eliminar a presença de prisões durante a fase de desmoldação. Na mesma cavidade fixa foram adicionados ao longo da zona moldante, orifícios com presença de extratores cilíndricos de 4 mm de diâmetro que servirão a retirada do núcleo do molde após cura de uma forma mais simples e eficaz evitando possíveis fraturas (ver Figura 39).

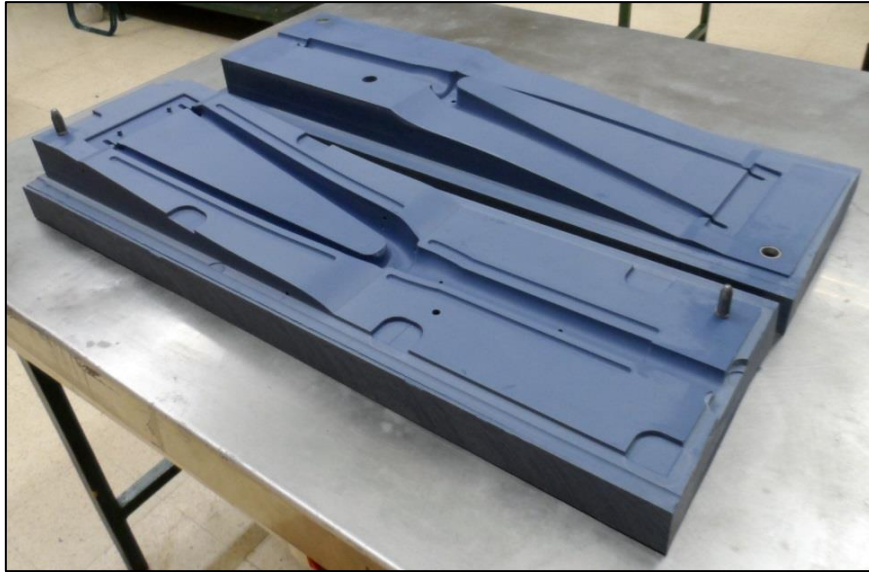


Figura 39 - Molde em poliuretano de alta densidade.

#### 2.4.4 Construção dos acessórios amovíveis

O inserto retangular foi realizado no mesmo material do molde, em PU. A sua maquinação também foi feita no centro de maquinação Cincinatti Milacron, após preparação e programação do modelo 3D no programa informático SOLIDCAM 2013 (ver Figura 40).



Figura 40 - Inserto para posicionamento de ponteiras.

Por sua vez o inserto cilíndrico em alumínio foi realizado nas instalações da ESTG no torno manual Piñacho Mod. L-8/165 (Figura 41).



Figura 41 - Inseto metálico em alumínio.

## 2.5 Criação do núcleo em microesferas ocas de vidro

### 2.5.1 Características e requisitos

A construção de um núcleo em microesferas ocas de vidro é um conceito inovador e com características favoráveis na redução da massa e no aumento da rigidez permitindo um revestimento com fibra de carbono

### 2.5.2 Vazamento do compósito

As microesferas ocas de vidro utilizadas neste trabalho são comercializadas pela Rebelco cuja referência é Glass Cell 25. Comercialmente são denominadas Glass Bubbles® (hollow glass microspheres, HGM). As suas principais características encontram-se descritas na Tabela 3.

Tabela 3- Propriedades das microesferas ocas de vidro.

Aspecto	Norma	Glass Cell 25	Glass Cell 20	Glass Cell 10
Cor		Pó Branco		
Diâmetro médio		55 micron	60 micron	70 micron
Diâmetro máximo		125 micron		
Absorção de óleo	ASTM D1483	310 - 360		
Conductividade térmica W/m.K à 20 °C		0.02 - 0.12		
Constante dielétrica		1.36		
Alcalinidade	ASTM D3100	< 0.5 meq / g		
Materiais voláteis		< 0.5 % em peso ou < 2 % em volume		
Temp. de amolecimento		600 °C		
Densidade aparente		0.13 - 0.18	0.10 - 0.15	0.05 - 0.10
Densidade nominal Pichnômetro a ar	ASTM D2840	0.23 - 0.27	0.18 - 0.22	0.10 - 0.14
Resistência a pressão Isostática (bar)	ASTM D3102	52	34	17
Gaz interno		33% oxigênio et 66 % dióxido de enxofre SO <sub>2</sub>		

A resina epóxi utilizada foi a SR 1500, de índice de viscosidade  $1250 \pm 250$  mPa.s ( $t = 25^\circ\text{C}$ ) e massa volúmica de  $1,13 \pm 0,01$  g.cm<sup>3</sup>, fornecido pela empresa Sicomin na forma líquida. Associado à resina foi utilizado como endurecedor, o modelo SD 2503 do mesmo fornecedor da resina cuja razão volumétrica é de 100/35 ml ou 100/33 g.

Antes de proceder ao vazamento da resina é recomendado preparar o molde para o vazamento. Deste modo, e de forma a poder retirar a moldação do molde, este foi sujeito a um revestimento multicamadas com desmoldante (álcool polivinílico) (ver Figura 42).

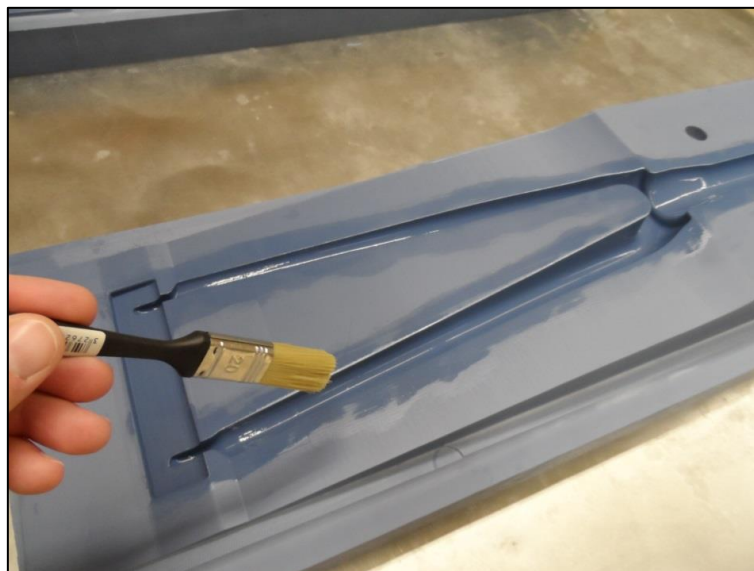


Figura 42 - Revestimento multicamadas com desmoldante SB 680.

A composição da resina foi determinada de acordo com o volume das cavidades a preencher que corresponde a um total de 583 cm<sup>3</sup>. De forma a tornar o núcleo consistente e leve foi determinado utilizar uma percentagem volumétrica de 50% de microesferas ocas de vidro e 50%

de resina com endurecedor. A densidade da moldação tem desta forma, uma massa volúmica de  $0,69 \text{ g/cm}^3$  correspondendo a um acréscimo de 402 g à massa da forqueta.

O processo de fabrico é iniciado colocando num recipiente 135 g de microsferas ocas de vidro e 600 g de resina previamente aquecido a temperatura de  $70^\circ\text{C}$  durante um período de 20 minutos de forma a reduzir a viscosidade da mesma. De seguida, um movimento circular da mistura deve ser feito de forma a obter um conjunto homogéneo, evitando concentrações de microsferas ocas de vidro, foco de fratura em ensaios mecânicos. Após misturar durante 15 minutos o recipiente é colocado em autoclave de vácuo único, do fabricante HEK, durante 30 minutos, na qual é visível a saída de ar de forma gradual. Sendo visível a expansão intermitente da mistura ao longo do processo. Desta forma a presença de bolsas de ar são removidas garantindo uma mistura homogénea isentas de micro-cavidades. Por último é adicionada à mistura 198 g de endurecedor. Novamente, o conjunto é misturado até obter um composto homogéneo. A relação volumétrica da resina e do endurecedor necessita de um tempo de preparação de 42 minutos antes de se iniciar a reação exotérmica que atinge a temperatura de  $215^\circ\text{C}$ .

O molde fechado é colocado na vertical com os orifícios laterais de fugas de ar abertos, o processo de enchimento pode ser iniciado. A resina é introduzida por gravidade pelo topo do molde ou seja na parte superior da forqueta (ver Figura 43). O preenchimento é monitorizado pelo excesso de material expulso para o exterior do molde pelos orifícios laterais colocados ao longo do molde. O processo de vazamento foi concluído em 35 minutos, o tempo de cura teórico de 8 horas foi prolongado em 24 horas, seguido da retirada do núcleo do molde.



Figura 43 - Vazamento da resina no interior do molde.

Com auxílio dos extratores, a desmoldação do núcleo do molde foi feita de forma lenta e minuciosa de forma a não fraturar a peça (ver Figura 44).

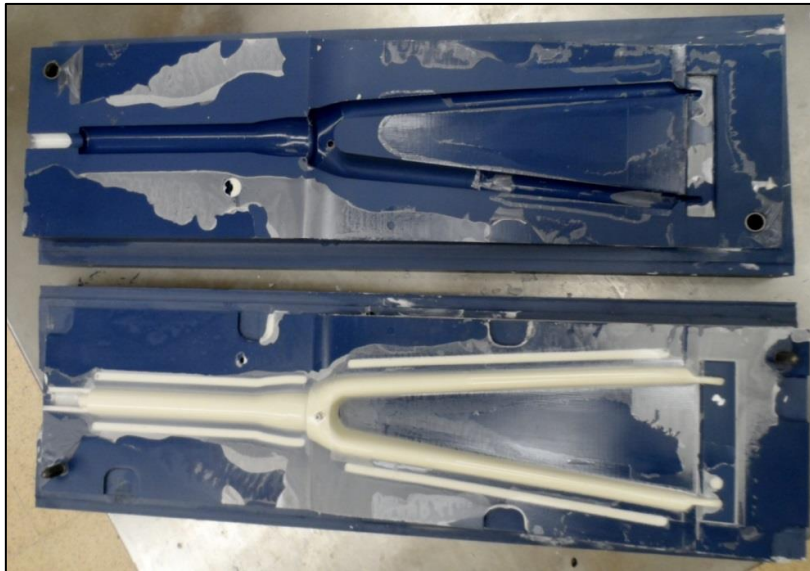


Figura 44 - Desmoldação do núcleo em resina com microesferas ocas de vidro.

## 2.6 Realização do protótipo

Após a obtenção dos núcleos em microesferas ocas de vidro, com as ponteiros metálicas embutidas na fase de vazamento da resina, é possível iniciar a fase de revestimento com fibra de carbono.

### 2.6.1 Revestimento do núcleo com laminado de Fibra de carbono

As técnicas de processamento de compósitos de matriz epoxídica com fibras de carbono são diversas como já referido no subcapítulo 1.2.2. Neste estudo, a técnica utilizada para fabrico de forquetas é o saco de vácuo que oferece ao produto, um bom acabamento de superfície e garante as características mecânicas suficiente para poder ser utilizado nos ensaios mecânicos que serão realizados mais a frente neste trabalho.

O processo concretamente requer uma sequência de etapas bem definidas para o sucesso da moldação. Uma dessas é sem dúvida a definição de padrões ou *patch* cuja forma deve ser adaptada à geometria do núcleo e às zonas de maior sollicitação registadas nas simulações de elementos finitos. A escolha do padrão passa também pela escolha do tipo de tecido e da sua orientação (ver Figura 45). No processo de fabrico das forquetas protótipo aplicou-se alterna-

damente o tecido de fibra de carbono unidirecional com várias orientações, com resina epoxídica, procurando uma impregnação homogênea e completa das fibras de carbono.

De forma a garantir a necessária proporção de resina e catalisador, estes foram pesados previamente. A deposição da resina foi realizada manualmente com recurso a uma trincha, de modo a distribuir esta por toda a superfície do laminado. Esta deposição deve ser realizada com cuidado, de forma a evitar zonas mal impregnadas.

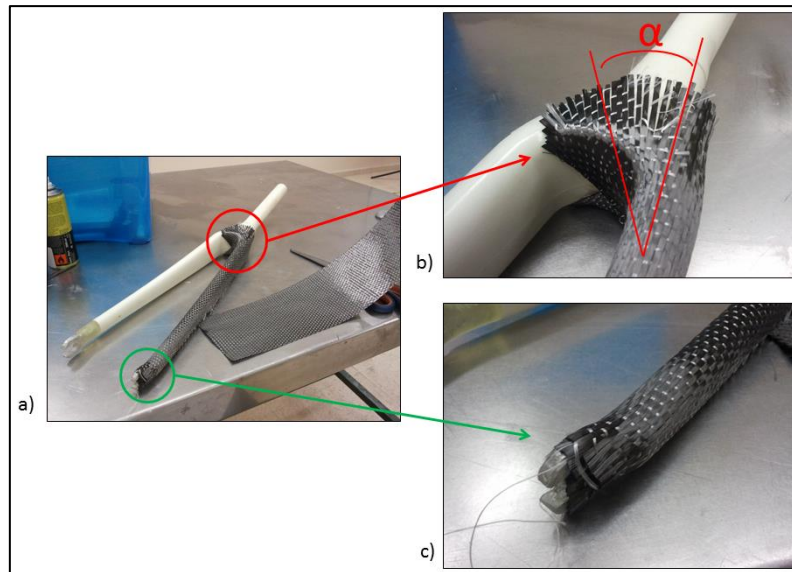


Figura 45 - Revestimento do núcleo com fibra de carbono.

O princípio da técnica de revestimento com recurso ao saco de vácuo é simples: consiste apenas em um saco de vácuo envolvendo o núcleo revestido com o laminado de onde o ar é retirado por uma bomba de vácuo. A diferença de pressão cria uma pressão externa ao longo do laminado sobre o núcleo.

A primeira camada que vai contra o laminado não curado é um tecido arrancador que é usado como uma barreira entre o laminado e uma película plástica micro furada. Este permite, de forma controlada, a extração de resina em excesso presente entre camadas de laminado durante a aplicação de vácuo.

A segunda camada ou manta de respiro, tipicamente em materiais de fibras sintéticas e/ou tecido de fibra de vidro pesada, é utilizado para facilitar a distribuição uniforme do vácuo no interior do saco.

Por fim, com recurso a uma película de elastómero de silicone e fita vedante de borracha foi possível construir um saco de vácuo (cuja forma semelhante a um envelope fiel à geometria

da forqueta) na qual se vai colocar o núcleo revestido, pelas camadas de laminado, de tecidos e películas supracitadas no parágrafo anterior. A película do saco é usada como o diafragma de vácuo que é selado nas arestas evitando entradas de ar (ver Figura 46). Por outro lado a sua função é de criar uma atmosfera de vácuo controlada e isolada durante o processo de cura.



Figura 46 - Forqueta em processo de cura sob vácuo.

### 2.6.2 Inserção das ponteiras

A geometria das ponteiras foi desenvolvida de forma adequada ao processo de sobre moldação. Desta forma é possível reforçar a ligação entre os dois materiais e manter uma espessura homogénea ao redor do espigão da ponteira.

O centro de maquinagem CNC Cincinatti Milacron, nas instalações da ESTG, foi o equipamento escolhido para o fabrico dos insertos. Numa placa de alumínio de 6 mm de espessura foram maquinados nove pares de ponteiras como ilustrado na Figura 47.

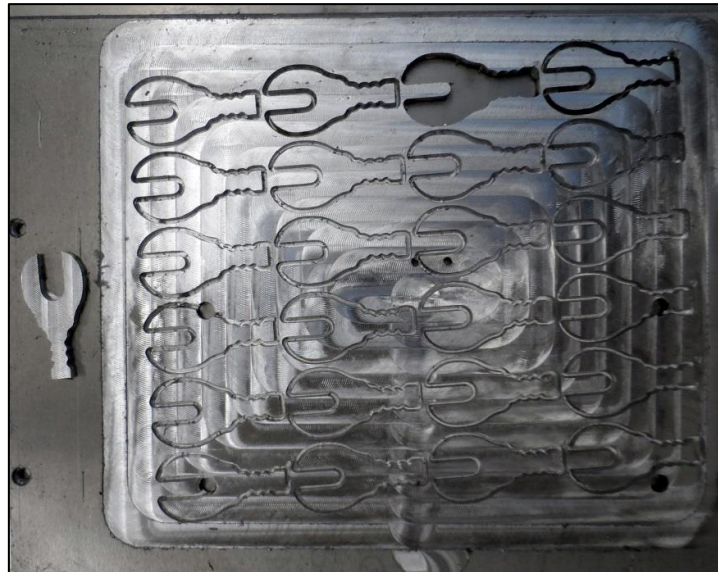


Figura 47 - Maquinação de ponteiras em placa de alumínio.

Os insertos são posicionados no molde em PU de forma precisa de modo a ficar preenchido homogeneamente pela resina com microesferas ocas de vidro.

## 2.7 Realização de ensaios mecânicos

A realização de ensaios mecânicos foi efetuada em laboratório em amostras físicas segundo as normas internacionais adequadas aos diversos ensaios de vibração e flexão executados neste trabalho. Os ensaios de vibração foram realizados num banco de ensaio dedicado. Os outros dois ensaios de flexão foram efetuados em equipamentos convencionais presentes no laboratório de materiais da ESTG.

Para além dos ensaios em ambiente laboratorial, foram realizados testes em estrada com a forqueta comercial.

### 2.7.1 Características e requisitos

Na medição de vibrações, um dos principais parâmetros determinantes da escolha do instrumento adequado é a faixa de frequências. Com altas frequências as amplitudes de deslocamento são baixas e as amplitudes da aceleração são altas fazendo com que os acelerómetros apresentem maior sensibilidade. O instrumento deverá ter características adequadas para medir faixas específicas de amplitudes e frequências.

A forma com que os dados gerados serão analisados é fundamental para a escolha do instrumento de medição. Vários detalhes no processo de medição estão condicionados pela análise que será realizada. Os dados devem estar numa forma mais apropriada para a análise pretendida.

### 2.7.2 Medição de vibrações em estrada como referência

A utilização do banco de ensaio requer a obtenção de patamares de vibrações semelhante aos valores que se podem encontrar no quotidiano, quando se circula de bicicleta por vias mais ou menos irregulares. Neste âmbito, seguindo a norma ISO 5349: “A quantidade principal usada para descrever a intensidade da vibração deve ser a aceleração [ $m.s^{-2}$ ]” [6].

De forma adicional neste estudo, será apurado em pavimentos diversificados, com velocidades de deslocação previamente definidas, “a intensidade de uma vibração, que é a aceleração ... deve ser expressa com o seu valor eficaz (RMS – Root Mean Square). Para a descrição adequada da vibração que é não senoidal, ou seja, aleatório ou de banda larga, o fator de crista (proporção de pico para RMS) do sinal, deve ser também determinado ou avaliado” [6]. O valor RMS é a medida mais relevante, porque leva em consideração o histórico no tempo da onda e dá um valor de nível o qual é diretamente relacionado à energia contida, e portanto, à capacidade destrutiva da vibração.

#### 2.7.2.1 Tipo de pavimento selecionado para o estudo

Para a realização do ensaio em ambiente exterior foram selecionados tipos de pavimento a que o ciclista está na maioria das situações confrontado. A escolha vai de um pavimento liso isento de irregularidades pronunciado por o asfalto presente em ciclovias, até outro extremo que são as estradas em paralelos de granito também conhecido como “pavé” que se encontram frequentemente nos centros históricos de cidades ou aldeias na Europa.

Desta forma, os tipos de pavimento escolhidos e presentes em Portugal capaz de integrar este estudo são:

**-R1 – Ciclovía**

O solo das ciclovias resulta da mistura de agregado grosso, areão, areia, argila e solo calcário. Desta mistura resulta num pavimento com boa durabilidade e permeabilidade com superfície suave e regular (Figura 48).

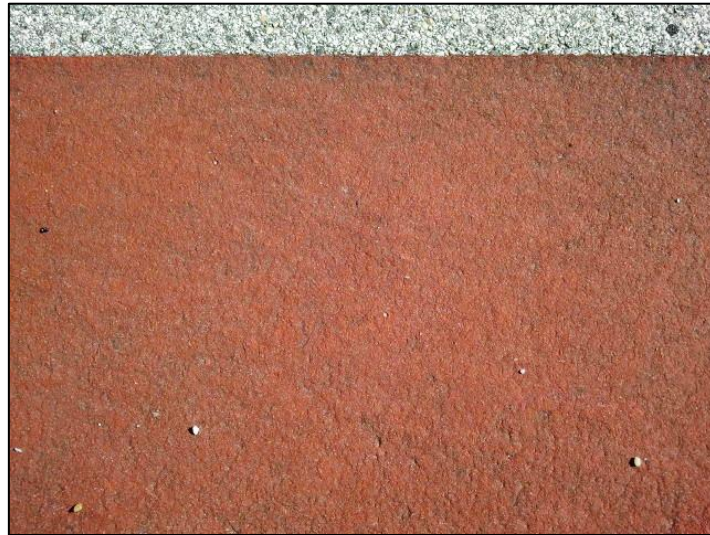


Figura 48 - Padrão do pavimento de ciclovía - R1

Os ensaios com este tipo de terreno foram realizados na ciclovía junto à Rua do Repouso, na cidade da Marinha Grande (Figura 49).



Figura 49 - Ciclovía na Rua do Repouso (Marinha Grande).

### **-R2 -Estrada em asfalto**

As estradas em asfalto ou de betume espesso, de material aglutinante escuro e reluzente, de estrutura sólida, constituído de misturas complexas de hidrocarbonetos presente em estradas nacionais e autoestradas (ver Figura 50).



Figura 50 - Padrão do pavimento de estrada em asfalto - R2.

Os ensaios com este tipo de terreno foram realizados na Estrada Nacional N356-2, no Concelho da Batalha (Figura 51).



Figura 51 - Estrada Nacional N356-2.

### **-R3 -Estrada em asfalto irregular**

As estradas em asfalto irregular são de cor cinzento-escuro, com presenças de fissuras, manchas descoloridas e pequenos buracos com fragmentos de pedra ou de betume (ver Figura 52).



Figura 52 - Padrão do pavimento de estrada em asfalto irregular R3.

Os ensaios foram realizados na estrada ER242-2, no concelho da Marinha Grande (Figura 53).



Figura 53 - Estrada ER242-2, no concelho da Marinha Grande.

#### **-R4 -Calçada portuguesa**

Grande parte das áreas pedonais em Portugal são “calçetadas com pequenos blocos de calcário, basalto ou outros materiais”... “De diferentes cores, repetindo motivos em sequência linear (frisos) ou nas duas dimensões do plano (padrões)” [30]. A sua irregularidade superficial é própria da diáclase do calcário e corte imposto pelo calceteiro (ver Figura 54).



Figura 54 - Padrão do pavimento em calçada a portuguesa - R4.

Os ensaios foram realizados na periferia do Jardim Luis de Camões no centro da cidade de Leiria (Figura 55).



Figura 55 - Jardim Luís de Camões (Leiria)

#### **-R5 - Pavimento em granito paralelepípedo 20 x 10 cm**

Existem muitas estradas, ruas, praças e pátios, em especial nas zonas históricas, cujo pavimento é construído com paralelepípedo de cor cinzento-escuro, algumas delas já são seculares ou até milenares. Existe paralelepípedo de granito de várias dimensões com mais ou menos rigor na sua forma geométrica.



Figura 56 - Padrão do pavimento em granito paralelepípedo 20x10 cm - R5

Os ensaios foram realizados na Avenida Estação, na localidade de Oliveirinha no Concelho do Carregal do Sal (Figura 57).



Figura 57 - Avenida Estação (Oliveirinha-Carregal do Sal).

### **R6 - Pavimento em granito paralelepípedo 10 x 10 cm**

O pavimento em granito paralelepípedo 10 x 10 cm é o modelo mais utilizado em Portugal nesta categoria.



Figura 58 - Padrão do pavimento em granito paralelepípedo 10x10 cm - R6

Os ensaios foram realizados na Avenida das Piscinas, na localidade São Pedro de Moel, no Concelho da Marinha Grande (Figura 59).



Figura 59 - Avenida das Piscinas em São Pedro de Moel (Marinha Grande).

### 2.7.2.2 Leque de velocidades seleccionadas

Cada troço de pavimento em estudo é percorrido a velocidades e cadências constantes. Os patamares de velocidade escolhidos nos pavimentos supracitados são: 10 km/h, 15 km/h, 20 km/h, 25 km/h, 30 km/h, com um erro de  $\pm 2$  km/h.

### 2.7.2.3 Instrumentos de medição de aceleração e metodologia aplicada

O equipamento de medida de vibração optado para realizar os ensaios tanto em laboratório como no terreno é constituído por um conjunto de componentes eletrónicos, entre eles a unidade de processamento Arduino Mega 2560 R3, acelerómetros Gy521 (Mpu6050), relógio Tiny DS3231 de alta precisão e periféricos como leitor de cartão micro SD, cartão microSD 2 Gb, cabos de ligação RJ45 e conectores DB9 macho com RS232 fêmea, pilha de 9 V.

O desenvolvimento do esquema eletrónico foi realizado no programa informático Fritzing utilizando os componentes supracitados no parágrafo anterior (ver Figura 60).

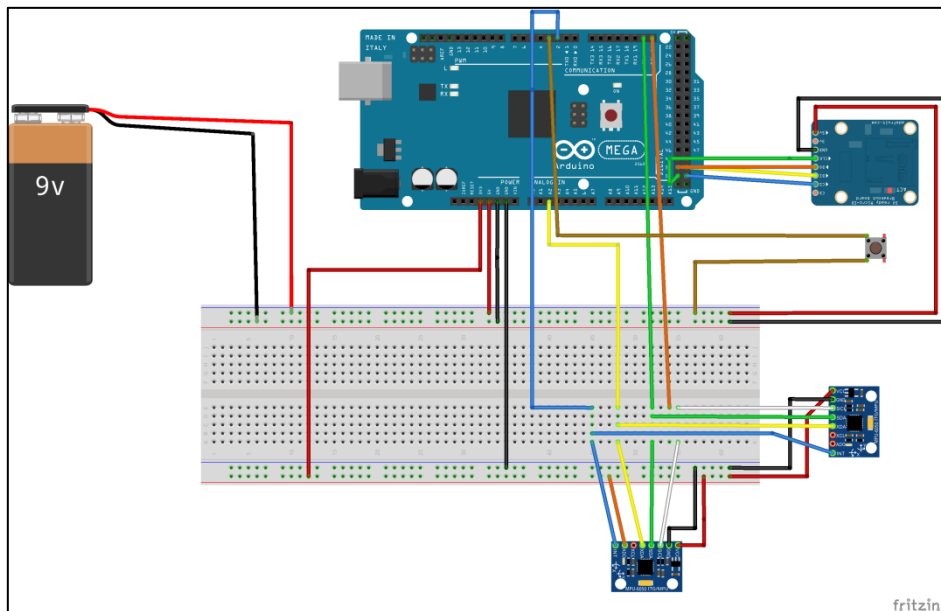
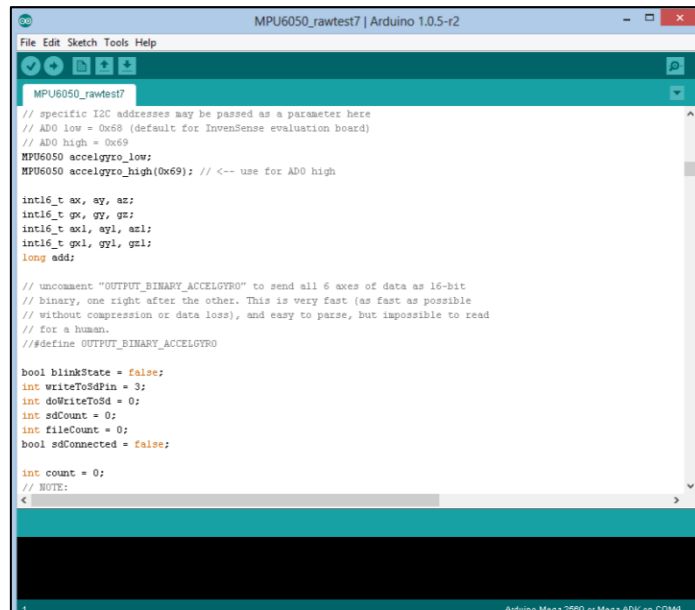


Figura 60 - Esquema eletrônico realizado no programa Fritzing.

Foi definido incorporar dois acelerómetros Gy521 no esquema eletrônico de forma a poder aferir as leituras em vários pontos da forqueta em simultâneo, permitindo uma comparação de resultados em pontos simétricos.

A compilação de programa Arduino cuja linguagem é DSL (Domain Specific Language) inspirada na linguagem de programação C e C++. Dotado de atalhos, as ligações de portas digitais com analógicas, como a gestão dos periféricos, tornam a compilação do programa mais simples. No entanto a mesma realizada para monitorizar a leitura dos sensores exige recorrer a livrarias públicas (otimizadas) de modo a obter um programa eficiente. Na Figura 61 é exibido um extrato do programa desenvolvido.



```
MPU6050_rawtest7 | Arduino 1.0.5-r2
File Edit Sketch Tools Help
MPU6050_rawtest7
// specific I2C addresses may be passed as a parameter here
// AD0 low = 0x68 (default for InvenSense evaluation board)
// AD0 high = 0x69
MPU6050 accelgyro_low;
MPU6050 accelgyro_high(0x69); // <-- use for AD0 high

int16_t ax, ay, az;
int16_t gx, gy, gz;
int16_t ax1, ay1, az1;
int16_t gx1, gy1, gz1;
long add;

// uncomment "OUTPUT_BINARY_ACCELYRO" to send all 6 axes of data as 16-bit
// binary, one right after the other. This is very fast (as fast as possible
// without compression or data loss), and easy to parse, but impossible to read
// For a human.
#define OUTPUT_BINARY_ACCELYRO

bool blinkState = false;
int writeToSdPin = 3;
int doWriteToSd = 0;
int sdCount = 0;
int fileCount = 0;
bool sdConnected = false;

int count = 0;
// NOTE:
```

Figura 61 - Parte do programa Arduino.

Segundo a norma ISO 5349: “ todos os equipamentos de medição de vibração devem ser calibrados adequadamente e, sempre que conveniente, calibrados de acordo com as normas ou recomendações existentes, que regem a calibração destes equipamentos” [6]. Deste modo foi desenvolvido no programa principal, uma macro de otimização de valores dos acelerómetros para cada início de ciclo de leitura. Com esta otimização é possível em alguns segundos saber o desvio presente (a considerar) entre os valores de fábrica de cada sensor e o valor real na posição espacial x, y, z desejada.

A utilização dos sensores Gy521 permite adquirir valores de aceleração tridimensional em LSB (Least Significant Bit)/g e em  $m.s^{-2}$  (após conversão).

As medições, realizadas nos diversos pavimentos e a diferentes velocidades, são localizadas em três pontos equidistantes (140 mm) por lado da forqueta como ilustrado na Figura 62.

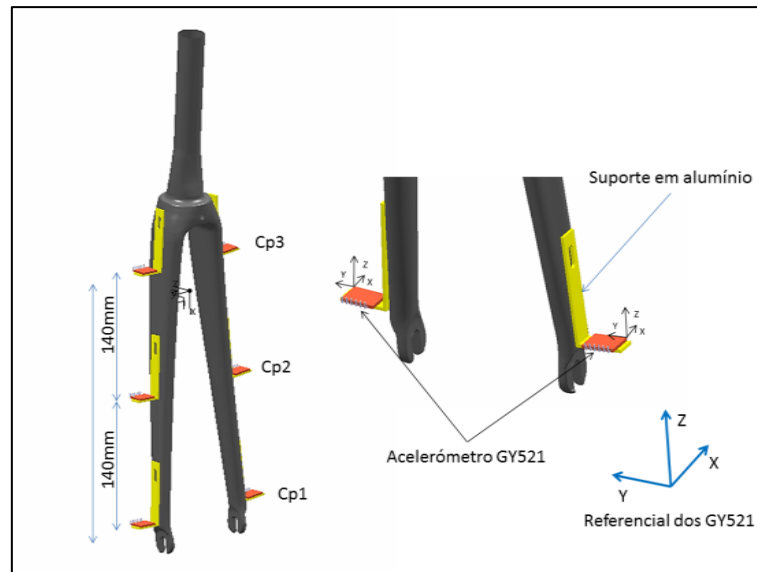


Figura 62 - Pontos de medição na forqueta.

### 2.7.2.4 Equipamento utilizado nos ensaios

Numa caixa hermética, ausente de variação térmica (prejudicial para as calibrações e as leituras) é instalado o equipamento de medição Arduino. Quanto aos periféricos estes são acoplados numa bicicleta de estrada da marca Trek™ cujo modelo Domane 4.5 de 2013 é semelhante ao modelo Madone do presente trabalho (ver Figura 63).

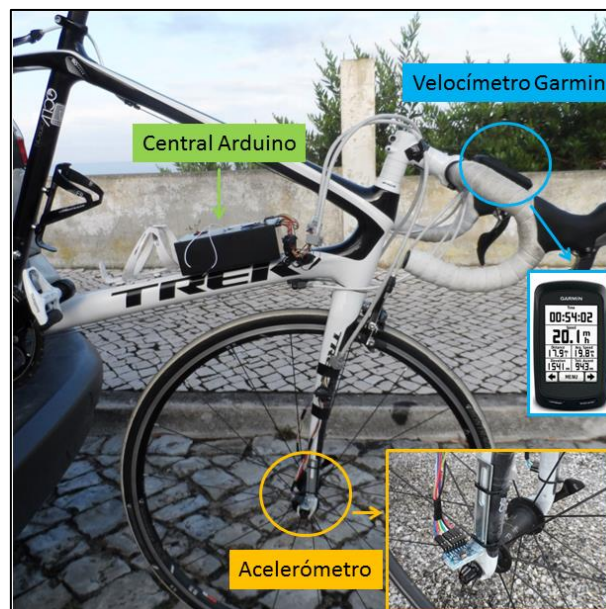


Figura 63 - Bicicleta Trek Domane 4.5.

Cada acelerómetro GY521 é previamente colado numa estrutura metálica (em forma de "L") que por sua vez, é posicionada ao longo de ambos os lados exteriores da forqueta, nos pontos de controlo previamente identificados (Cp1, Cp2, Cp3), de modo a poder recolher leituras

específicas como representado na Figura 62. A posição dos sensores na forqueta preserva o mesmo referencial  $x$ ,  $y$ ,  $z$  para os dois acelerómetros em que o eixo  $z$  é alinhado com o centro da coroa e por consequente o ângulo descrito pelo eixo  $x$  com o pavimento é de  $30^\circ$  (ver Figura 64). Desta forma pode-se comparar os resultados em estrada com os realizados em laboratório.

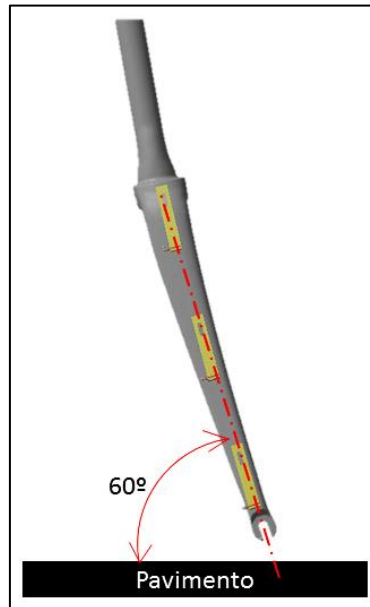


Figura 64 - Posição da forqueta em estrada.

A ligação dos sensores com a unidade central Arduino é feita por cabos RJ45 e conversores DB/RS232, permitindo maior flexibilidade e rigor nas conexões, evitando a quebra de leituras, em pavimentos com elevada trepidação.

### 2.7.2.5 Condições de realização

O sucesso dos ensaios no terreno depende em grande parte das condições previamente estabelecidas sejam elas climatéricas, técnicas ou até físicas. Desta forma foi delineado o cenário favorável para realizar o ensaio cumprindo com os requisitos seguintes:

- Temperatura média no exterior por volta dos  $25^\circ\text{C}$ ;
- Velocidade do vento baixa possível (inferior à  $5\text{ km/h}$ ), podendo ser desprezível caso os sensores estejam orientados de forma não paralela à superfície da estrada;
- O pavimento deve estar seco para evitar deterioração dos equipamentos de medição;

-O controlo de velocidade é monitorizado recorrendo ao equipamento de medição sem fios da marca Garmin Edge 800, equipado de sensor de velocidade e cadência;

-Os pneumáticos da bicicleta foram pressurizados a 8 bar (valor máximo recomendado pela marca de pneumáticos) permitido minimizar a absorção dos impactos da estrada. Desta forma o conjunto roda/pneumático, será negligenciado nos ensaios realizados.

### 2.7.3 Ensaios de vibração forçada com fonte vibratória

A fim de realizar as devidas medições de vibrações nas diversas forquetas protótipos e comercial, realizadas neste projeto foi desenvolvido um banco de ensaios de vibração que permite simular as condições reais de vibração que ocorrem em estrada. A flexibilidade deste equipamento tem a faculdade de poder simular e comparar duas forquetas ao mesmo tempo ou provetes (placas, cilindros). Os instrumentos de medição (Arduino Mega com sensores GY521) utilizados com o banco de ensaios são os mesmos que foram utilizados nos testes realizados em ambiente exterior.

#### 2.7.3.1 Características do banco de ensaios vibratório

O equipamento foi realizado nas instalações da ESTG, com o material disponível e adequado para construir dois conjuntos distintos:

- Uma base fixa com capacidade de aguentar os impulsos proveniente da fonte vibratória. A sua composição, uma base (700 x 300 mm) feita de três perfis de alumínio (secção 100 x 35 mm) com topos em blocos de proteção em PU maquinados. Associado à base, existe um paralelepípedo em PU para fixar o tubo de direção das forquetas. O conjunto fixo é apoiado em dois perfis de alumínio (300 x 100 x 35 mm);

- Uma fonte vibratória monofásica (lixadora Practyl de 135 W com 10000 rpm) acoplada a uma plataforma composta de uma placa de alumínio (310x100x5 mm) e um perfil de alumínio (45 x 45 x 400 mm). A mesma fonte possui um regulador de velocidade de 350 W da marca Cebek (fixo à base fixa).

Os dois conjuntos são solidários por pequenas placas de alumínio que mantêm o *carter* da fonte vibratória fixo à base como se observa na Figura 65.

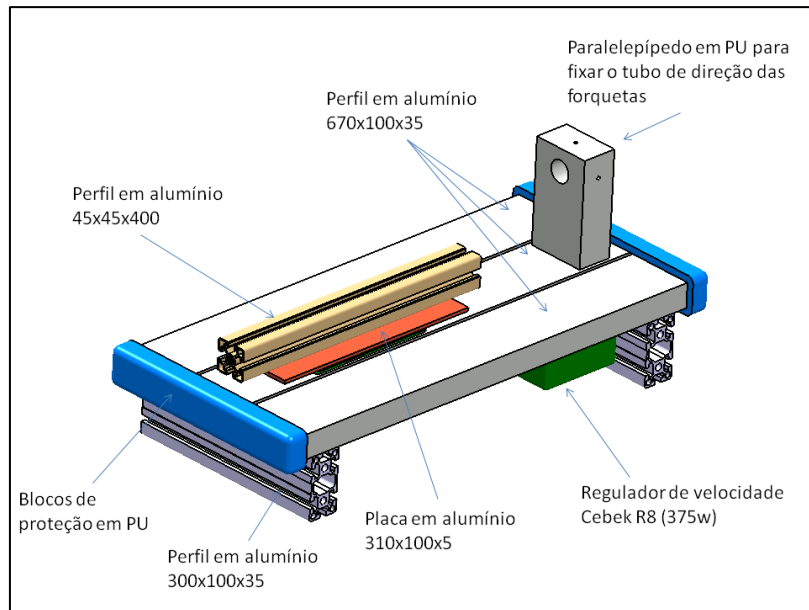


Figura 65 - Banco de ensaio de vibrações.

### 2.7.3.2 Condições de realização

O sucesso dos ensaios em laboratório depende em grande parte das condições previamente estabelecidas sejam elas técnicas ou físicas. Desta forma, foi definido o cenário favorável para realizar o ensaio cumprindo com os requisitos seguintes:

- Temperatura média no laboratório de 25°C;
- Colocação do banco em superfície plana e fixa;
- Utilização dos equipamentos de medição idênticos aos ensaios em estrada de forma a garantir os mesmos critérios de recolha de dados;
- Utilização de um programa informático, intitulado “Arduino Sensor Data Gather”(GSDG), desenvolvido exclusivamente para este ensaio em Visual Studio, que permite analisar em tempo real os dados provenientes de dois acelerómetros colocados, um na base vibratória e o outro na forqueta (nos pontos de controlo  $C_p$ ). Esta aplicação permite também a partir de uma amostra de  $n$  valores previamente definidos, apresentar em tempo real o valor da aceleração RMS (ver Figura 66).

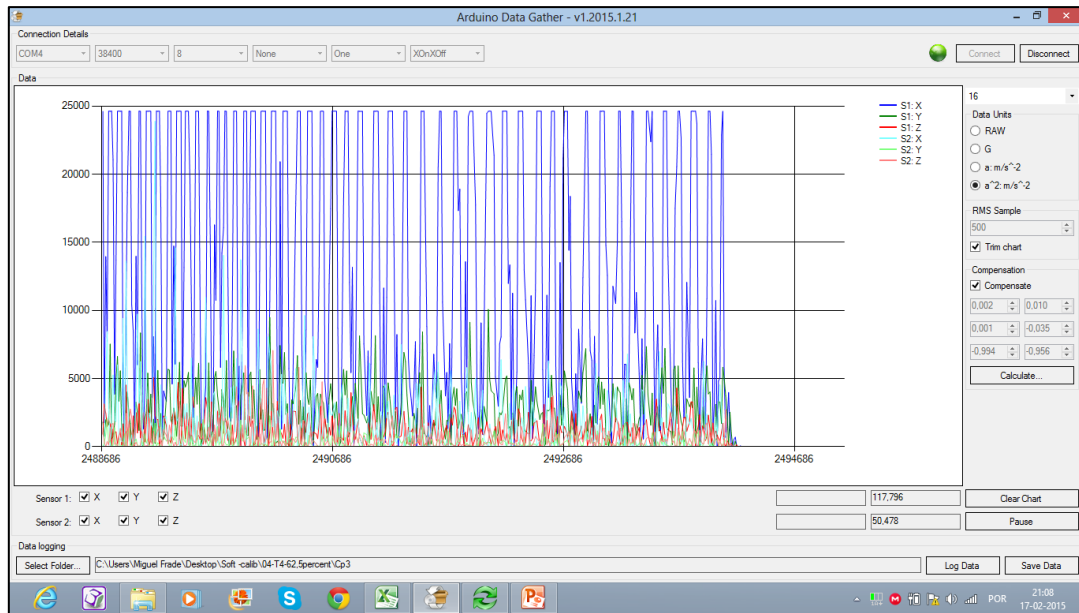


Figura 66 - Arduino Sensor Data Gather™(GSDG).

Nas condições acima referidas foram realizados, no banco de ensaio, os ensaios em forquetas protótipos T1, T2, T3, T4 e comercial C1 (forqueta de referência). A fonte vibratória é calibrada (pelo variador de velocidade) de maneira a reproduzir as acelerações nas 3 direções, RMS, indicadas pelo GSDG. Esses valores são provenientes dos resultados dos ensaios realizados nos diferentes pavimentos supracitados no parágrafo 2.7.2.1.

Pretende-se com este tipo de ensaio, medir a aceleração RMS em vários pontos das amostras e traçar uma tabela comparativa de modo a verificar qual das forquetas tem maior amortecimento de vibrações.

Para cada forqueta é colocado em três pontos distintos de uma perna um acelerómetro GY521 de forma a monitorizar os desvios intrínsecos das vibrações (x, y, z). As forquetas foram posicionadas na horizontal, com o tubo de direção encastrado na base fixa do banco de ensaios e as ponteiras fixas a parte móvel (ver Figura 67) reproduzindo os constrangimentos da forqueta numa bicicleta em andamento de forma simplificada.

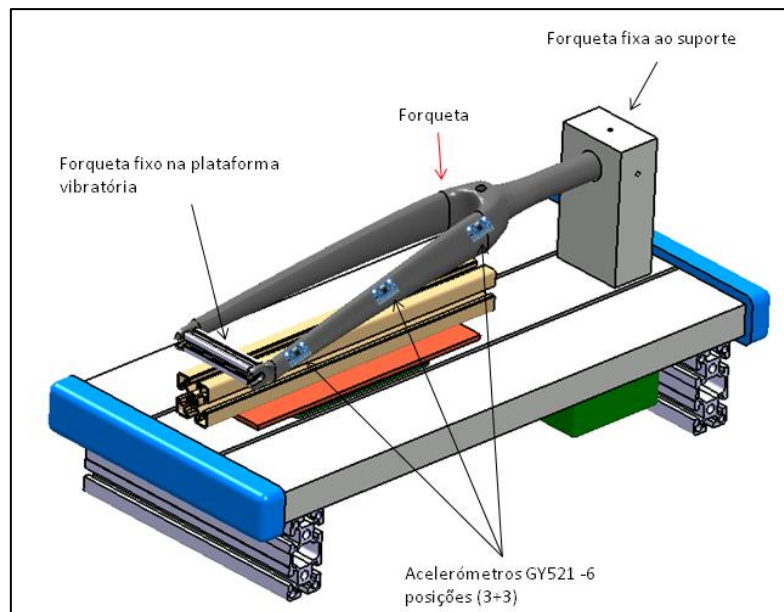


Figura 67 - Ensaio em forquetas.

As forquetas submetidas aos ensaios têm as características supracitadas no subcapítulo 2.2.3.2.

#### 2.7.4 Ensaio de vibração livre com forquetas protótipo

De modo a definir com exatidão o fator de amortecimento  $\zeta$  para cada forqueta (T1, T2, T3, T4 e Comercial C1), foi utilizado um martelo de impacto da marca Bruel (Sensibilidade:  $2.2 \cdot 10^{-3}$  V/N - ICP, 310 mV/20 dB) e um acelerómetro da marca Bruel (modelo 4507 - Sensibilidade:  $9.8 \cdot 10^{-2}$  V/g - ICP, 10,0 V/-10 dB). O programa informático Orors\_OR763 permite analisar em tempo real os dados provenientes de dois canais de comunicação (Força em N e Aceleração em g) (ver Figura 96).

Cada forqueta é suspensa na horizontal, por fios de *nylon*, garantindo o estado livre da peça no ensaio de vibração livre. Os pontos Cp1, Cp2 e Cp3 como representados na Figura 62 são as posições selecionadas para realizar o ensaio de impacto com o equipamento acima referido. Numa das pernas da forqueta é colocado o sensor de aceleração unidirecional e na outra perna, no ponto homólogo é efetuado uma série de seis embates necessários de forma obter uma resposta rigorosa dos sinais provenientes dos canais de comunicação.

## 3.Apresentação e análise dos resultados

---

### 3.1 Resultados dos ensaios a flexão em provetes

#### 3.1.1 Ensaio em provetes (placas)

Todos os ensaios foram realizados, a temperatura ambiente e com controlo de deslocamento, com uma velocidade de carregamento de 5 mm/min. Os ensaios e sua preparação foram realizados numa máquina eletromecânica universal Zwick, modelo Z100, conforme a norma ISO 14125 [28].

Como referido no capítulo precedente, a realização de ensaios de flexão de vários laminados de diferentes matérias e configurações, permitiu a recolha de valores que permitiram obter as propriedades dos laminados através de um processo de otimização, minimizando a diferença entre os resultados experimentais e os numéricos obtido através do método dos elementos finitos (Abaqus).

No ensaio à flexão foi estabelecido um limite de flecha consoante o provete (2 mm, 5 mm e 10 mm) por dois motivos: primeiro, a necessidade de preservar os provetes para ensaios futuros; segundo, apenas são necessárias as propriedades elásticas dos laminados, para as análises seguintes (ver Figura 68).

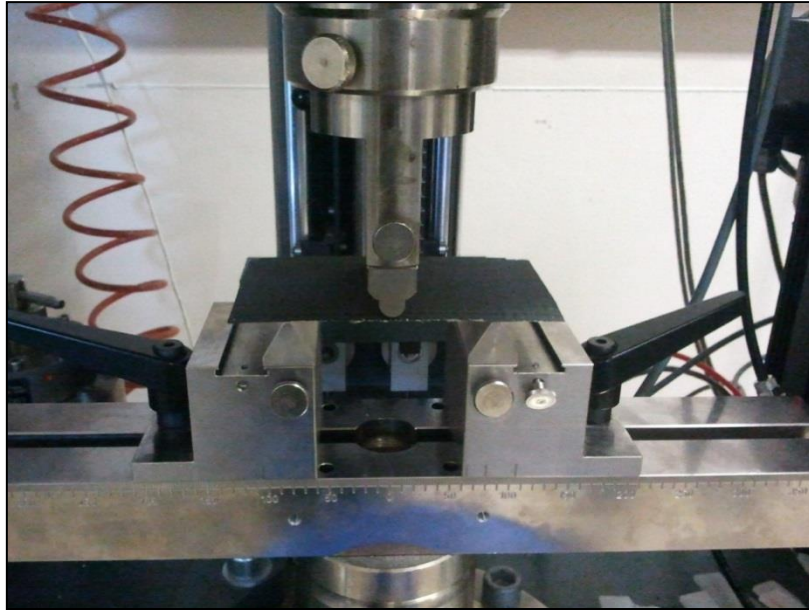


Figura 68 - Ensaio a flexão em 3 pontos de um provete.

O provete nº1 (com uma camada de fibra de carbono) foi descartado pelos valores ( $\sigma$  e  $\epsilon$ ) irregulares e pouco relevantes neste trabalho ou invés dos outros provetes.

Na Figura 69 e na Figura 70 está-se perante uma deformação linear em que a tensão  $\sigma$  é linearmente proporcional à deformação  $\epsilon$ , evidenciando a região elástica para cada provete permitindo desta forma determinar as propriedades elásticas de cada camada do laminado.

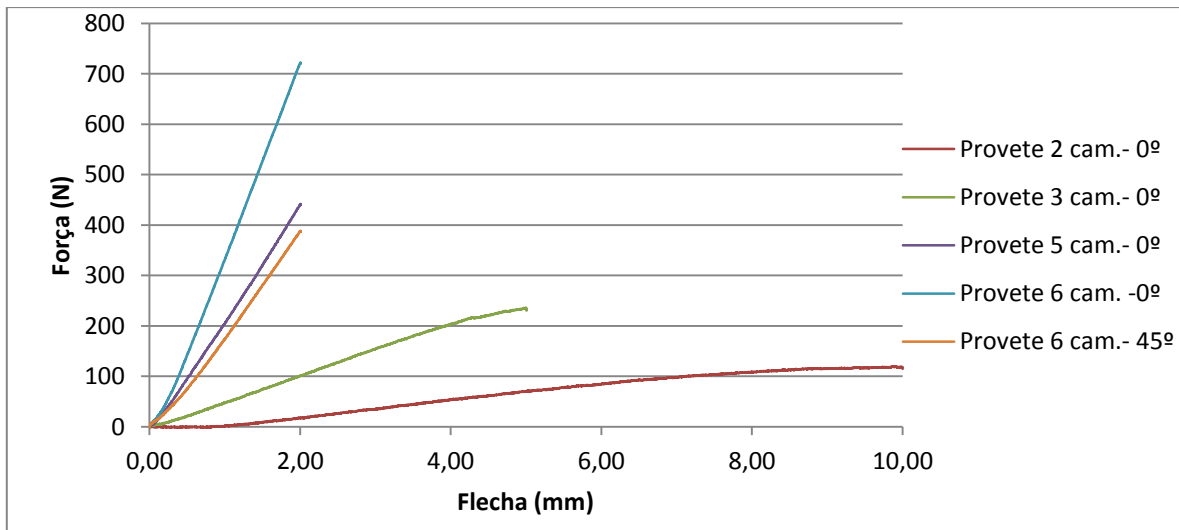


Figura 69 - Curva Força-Flecha de laminado bidirecional.

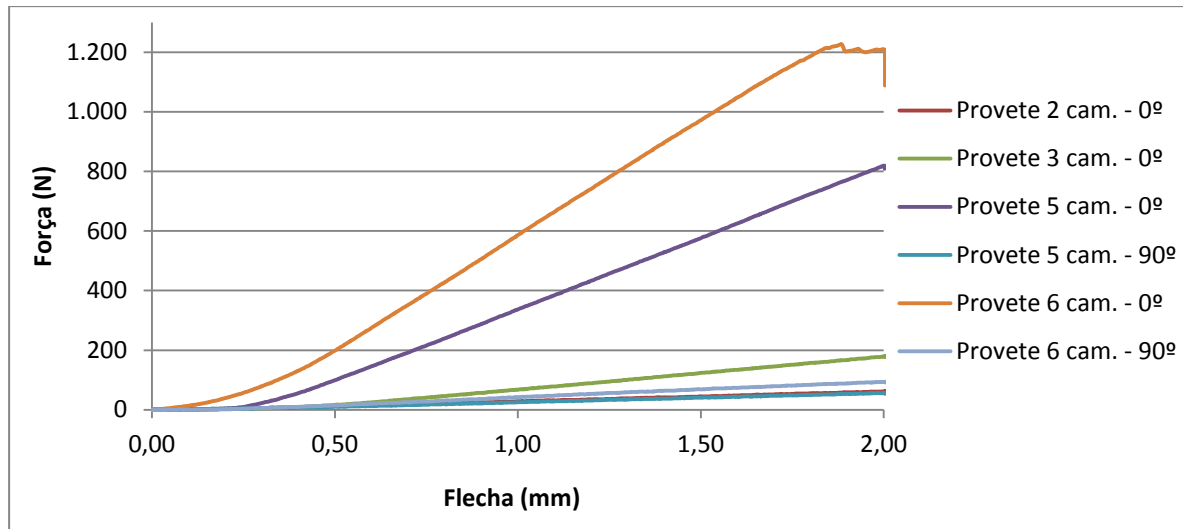


Figura 70 - Curva Tensão-Deformação de laminado unidirecional.

### 3.1.2 Ensaio em provetes com microesferas

Os ensaios de flexão dos 3 provetes cilíndricos com microesferas foram realizados a temperatura ambiente e com controlo de deslocamento, com uma velocidade de carregamento de 5 mm/min. Os ensaios e sua preparação foram realizados conforme a norma ISO 14125 [28].

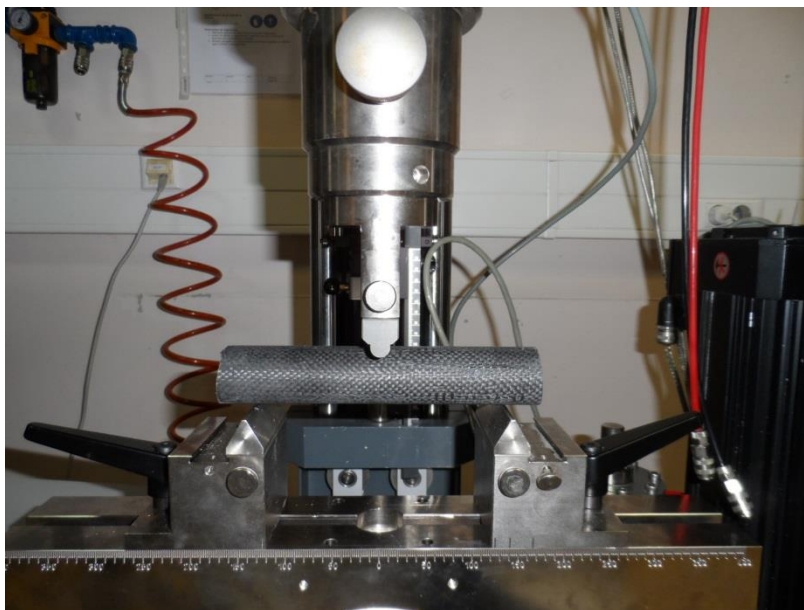


Figura 71 - Ensaio a flexão em 3 pontos de um compósito com núcleo em microesferas ocas de vidro.

Aplica-se a carga a meio vão. O provete encontra-se alinhado simetricamente longitudinal e lateralmente (ver Figura 71).

Em seguida são apresentadas as curvas Tensão-Deformação dos ensaios de flexão em 3 pontos dos provetes, onde se pode ver a evolução da carga para a deformação imposta. As 3 cur-

vas apresentam um comportamento semelhante na região elástica e elástico-plástica (zona de fluência). No entanto a região plástica e o ponto de rotura de cada provete apresenta valores distintos (Figura 72).

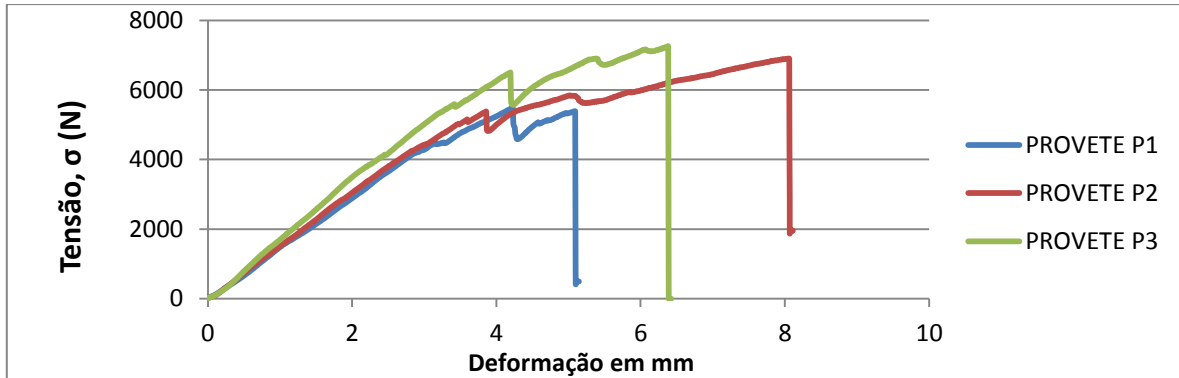


Figura 72 - Curva Tensão-Deformação

A diferença observada nestes provetes, cujas características são idênticas, advém de defeitos superficiais, microscópicos provenientes do processo de fabrico manual.

### 3.2 Resultados de simulações em Abaqus™

Todas as simulações foram realizadas com a mesma quantidade de elementos de malha e com uma carga de 350N orientado em Y (perpendicular a lateral da forqueta) de modo a simplificar a interpretação dos resultados com elementos piezoelétrico.

#### 3.2.1 Otimização de valores de material

Tabela 4 - Otimização das características mecânicas dos tecidos de fibra de carbono

Características mecânicas após otimização									
Tecido de Fibra de Carbono	Módulo de elasticidade - (MPa)			Coeficiente de Poisson			Módulo de elasticidade Transversal - (MPa)		
	E11	E22	E33	v12	v13	v23	G12	G13	G23
Tecido biaxial	833	14672	104	0,35	0,35	0,35	4400	12764	13251
Tecido uniaxial	25307	23269	1795	0,35	0,35	0,35	29218	29601	29373

### 3.2.2 Localização das zonas de maiores valores de tensão

A zona onde se regista maiores níveis de tensão situa-se na coroa e no tubo de direção da forqueta. Com este resultado, a colocação de elementos piezoelétricos é feita no tubo de direção de forma radial.

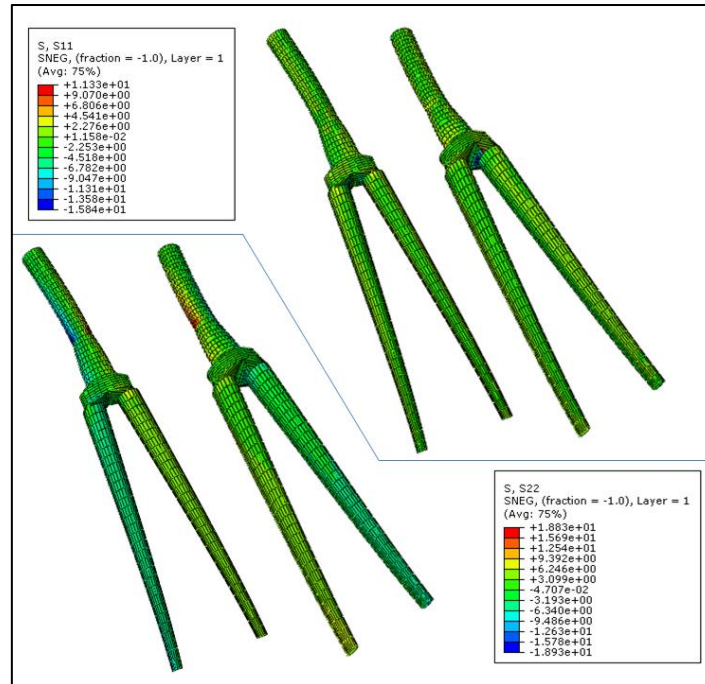


Figura 73 - Zonas de maiores valores de tensão (longitudinal (S11) e radial (S22)) na forqueta T1

De uma forma genérica, regista-se um aumento significativo das tensões inversamente proporcional as camadas de napas de fibra de carbono que revestem as forquetas. De referir o baixo valor de tensões registado no núcleo de microesferas ocas de vidro comparativamente a fibra de carbono.

Tabela 5 - Resultados da tensão tangencial e radial em forquetas

Configuração de Forquetas		Tensão radial S11 e tangencial S22 nas forquetas (em Mpa)			
		T1	T2	T3	T4
CARBONO	S11	11,3300	17,0200	30,2200	43,6100
	S22	18,8300	24,2700	35,0200	51,0900
CARBONO & NUCLEO	S11	6,0970	8,2400	13,1900	16,1500
	S22	17,8800	22,6000	31,2200	39,1700
NUCLEO	S11	1,9210	2,2600	2,5950	2,6570
	S22	0,8673	1,0890	1,4730	1,7750

### 3.2.3 Deslocamento aplicado a uma carga estática

A comparação dos deslocamentos obtidos entre forquetas permite afirmar que existe uma menor flecha no sentido da carga estática, com a introdução de elemento piezoelétrico e núcleo de microesferas ocas de vidro (ver Figura 74). O ganho pode chegar aos 30% no caso da forqueta T4 com núcleo e elemento piezoelétrico como se pode observar na Tabela 6.

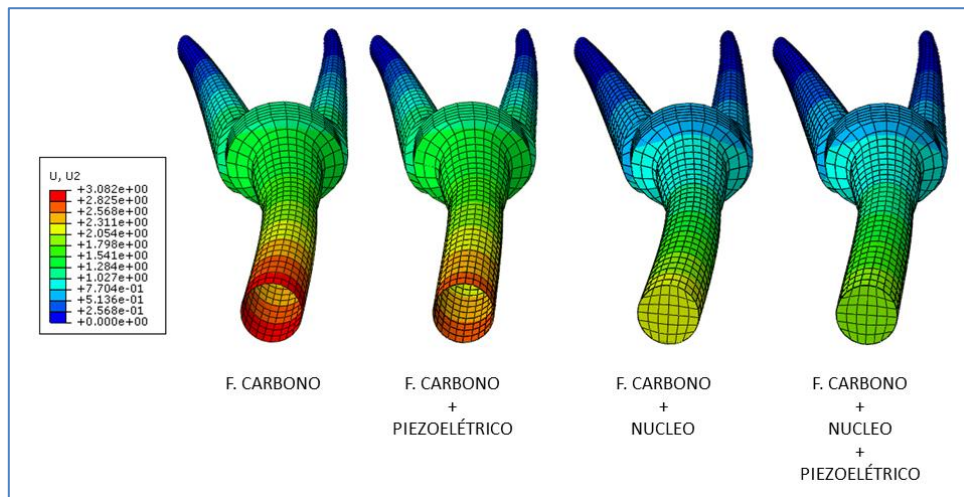


Figura 74 - Deslocamento aplicado a uma carga estática em forqueta T1 (diversas configurações)

Tabela 6 - Compilação de valores de deslocamento aplicado a uma carga estática

Configuração de Forquetas	Deslocamento em mm no eixo U2 (y)								
	T1	T2	T3	T4	Tendência	Desv. T1/T2 (%)	Desv. T1/T3 (%)	Desv. T1/T4 (%)	
CARBONO	1,0230	1,3940	2,2200	3,0820		36,27	117,01	201,27	
CARBONO & PIEZOELÉTRICO	0,9244	1,2550	1,9960	2,7630		35,76	115,92	198,90	
CARBONO & NUCLEO	0,9307	1,2210	1,7990	2,3160		31,19	93,30	148,84	
CARBONO, NUCLEO & PIEZOELÉTRICO	0,8372	1,0930	1,6000	2,0440		30,55	91,11	144,15	
Tendência									
Desv. C/CP (%)	-9,6383187	-9,97131	-10,0901	-10,3504					
Desv. C/CN (%)	-9,0224829	-12,4103	-18,964	-24,854					
Desv. C/CNP (%)	-18,162268	-21,5925	-27,9279	-33,6794					

### 3.2.4 Fator de amortecimento obtido decremento logarítmico

A curva resultante de uma carga pontual e instantânea tem a configuração de uma curva sinusoidal amortecida, própria de um movimento harmônico sub-amortecido ( $\zeta < 1$ ), como representado na Figura 75.

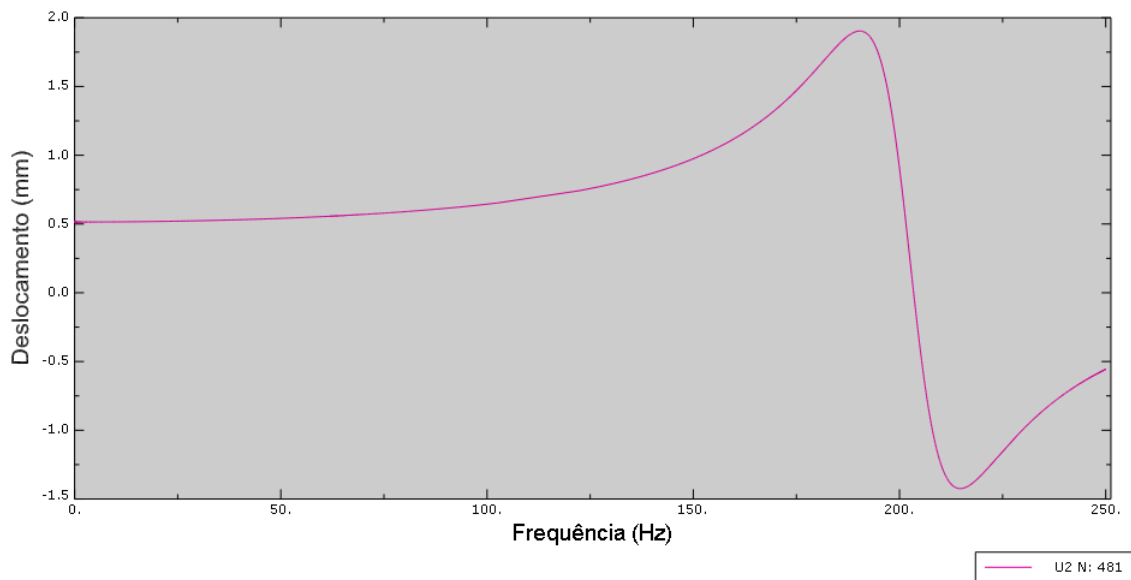


Figura 75 – Curva resposta em frequência

Na Tabela 7 é representado para cada configuração de forqueta o fator de amortecimento  $\zeta$  obtido a partir do método da resposta em frequência. A utilização de elemento piezoelétrico ativo registra um fator de amortecimento menor comparativamente com uma forqueta que não possui piezoelétrico.

Tabela 7 - Fator de amortecimento pelo método da resposta em frequência

		Fator de Amortecimento ( $\zeta$ ) obtido pela Resposta em Frequência							
Configuração de Forquetas	Param.	T1	T2	T3	T4	Tendência	Desv. T1/T2 (%)	Desv. T1/T3 (%)	Desv. T1/T4 (%)
CARBONO	Q (mm)	1,9037	2,6446	4,3186	6,1714				
	Q/v2 (mm)	1,3461	1,8700	3,0537	4,3638				
	$\omega_1$ (Hz)	170	165	159	153				
	$\omega_2$ (Hz)	197	192	185	177,5				
	$\Delta\omega$ (Hz)	27	27	26	24,5				
	$\omega_r$ (Hz)	190	184	177,5	171				
	$\zeta$	0,0711	0,07337	0,073239	0,071637		3,26	3,08	0,82
CARBONO & PIEZOELETRICO	Q (mm)	1,9540	2,7322	4,5236	6,5306				
	Q/v2 (mm)	1,3817	1,9319	3,1986	4,6178				
	$\omega_1$ (Hz)	167,5	161	153	145				
	$\omega_2$ (Hz)	194	187	177,5	168				
	$\Delta\omega$ (Hz)	26,5	26	24,5	23				
	$\omega_r$ (Hz)	186,5	180	171	161				
	$\zeta$	0,0710	0,0722	0,0716	0,0714		1,66	0,83	0,54
CARBONO & NUCLEO	Q (mm)	1,6065	2,0802	2,9710	3,7684				
	Q/v2 (mm)	1,1360	1,4709	2,1008	2,6646				
	$\omega_1$ (Hz)	170	138	128	120				
	$\omega_2$ (Hz)	146	162	149	140				
	$\Delta\omega$ (Hz)	24	24	21	20				
	$\omega_r$ (Hz)	163	155	142	135				
	$\zeta$	0,0736	0,0774	0,0739	0,0741		5,16	0,44	0,62
CARBONO, NUCLEO & PIEZOELETRICO	Q (mm)	1,6360	2,1249	3,0515	3,8819				
	Q/v2 (mm)	1,1568	1,5025	2,1577	2,7449				
	$\omega_1$ (Hz)	145	136	127	118				
	$\omega_2$ (Hz)	168	158	147	137				
	$\Delta\omega$ (Hz)	23	22	20	19				
	$\omega_r$ (Hz)	161,5	152,5	140	132				
	$\zeta$	0,0712	0,0721	0,0714	0,0720		1,30	0,31	1,07

### 3.2.5 Resultados de frequências naturais das diversas configurações de forquetas

Na Tabela 8 regista-se uma clara tendência decrescente da frequência natural, em modos idênticos, entre tipo de revestimento de forquetas (T1, T2, T3 e T4) como também na presença de núcleo em microsferas ocas de vidro. De salientar, a influência reduzida do elemento piezoelétrico na forma passiva na frequência natural das forquetas.

Tabela 8 - Frequências naturais das diversas forquetas

		Frequência Natural (Hz)							
Configuração de Forquetas	Modo	T1	T2	T3	T4	Tendencia	Desv. T1/T2 (%)	Desv. T1/T3 (%)	Desv. T1/T4 (%)
CARBONO	1º	188,09	177,68	160,29	149,28		-5,53	-14,78	-20,63
	2º	424,98	415,06	398,13	383,72		-2,33	-6,32	-9,71
	3º	540,73	530,42	512,03	496,76		-1,91	-5,31	-8,13
	4º	671,41	666,79	654,97	647,39		-0,69	-2,45	-3,58
	5º	921,8	898,42	866,78	850,37		-2,54	-5,97	-7,75
CARBONO & PIEZOELÉTRICO	1º	188,08	177,67	160,29	149,28		-5,53	-14,78	-20,63
	2º	423,48	413,06	395,03	379,59		-2,46	-6,72	-10,36
	3º	533,37	520,85	498,32	479,39		-2,35	-6,57	-10,12
	4º	658,21	649,58	630,22	615,8		-1,31	-4,25	-6,44
	5º	921,8	898,42	866,77	850,35		-2,54	-5,97	-7,75
CARBONO & NUCLEO	1º	185,82	179	167,93	160,02		-3,67	-9,63	-13,88
	2º	377,53	362,29	339,2	321,43		-4,04	-10,15	-14,86
	3º	459,45	437,07	402,87	378,11		-4,87	-12,31	-17,70
	4º	555,23	528,09	483,86	453,42		-4,89	-12,85	-18,34
	5º	822,13	783,6	724,82	683,4		-4,69	-11,84	-16,87
CARBONO, NUCLEO & PIEZOELÉTRICO	1º	185,82	178,99	167,93	160,01		-3,68	-9,63	-13,89
	2º	376,58	361,16	337,76	319,8		-4,09	-10,31	-15,08
	3º	455,93	433,25	398,82	374,07		-4,97	-12,53	-17,95
	4º	548,78	521,02	476,22	445,7		-5,06	-13,22	-18,78
	5º	822,13	783,6	724,81	683,39		-4,69	-11,84	-16,88

### 3.3 Resultados das medições de vibrações em estrada

Os resultados obtidos nos diversos pavimentos de estrada foram realizados em percursos com extensões de 200 m, aproximadamente. Deste modo, a amostra definida como base de comparação entre resultados é de  $t = 1000$  ms com uma frequência de leitura média de 5 ms. Os acelerómetros (esquerdo e direito) posicionados nos pontos Cp1, Cp2 e Cp3 de acordo como referido na Figura 62.

Antes de iniciar cada medição é necessário realizar a calibração dos acelerómetros de modo a garantir a correta leitura do terreno (ver Figura 76). Nessa fase preliminar, os sensores devem estar na horizontal cerca de 3 minutos antes de iniciar de forma automática a central Arduino (ver Figura 64). A gravação seletiva dos dados no cartão *microSD* é realizada com auxílio de um interruptor incorporado na central que é pressionado a cada início e fim de percurso em estudo.

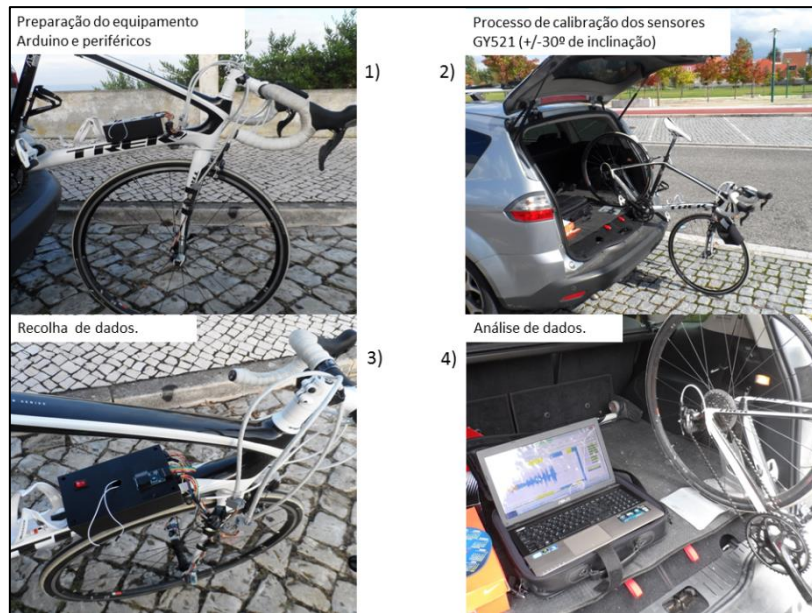


Figura 76 – Principais etapas na realização dos ensaios em estrada.

Os resultados obtidos pelos acelerómetros apresentam valores semelhantes em ambos lados da forqueta em posições idênticas como ilustrado na Figura 77. De modo a simplificar a leitura de resultados é publicado de seguida os resultados de um único lado da forqueta (sensor 1).

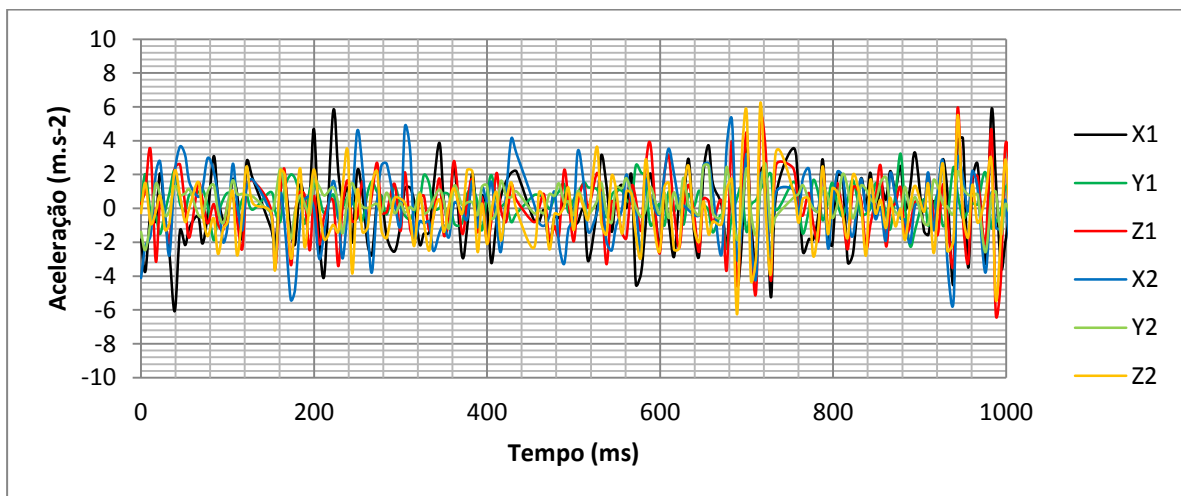


Figura 77 - Resultados dos sensores 1 e 2.

### 3.3.1 Resultado em pavimento R1

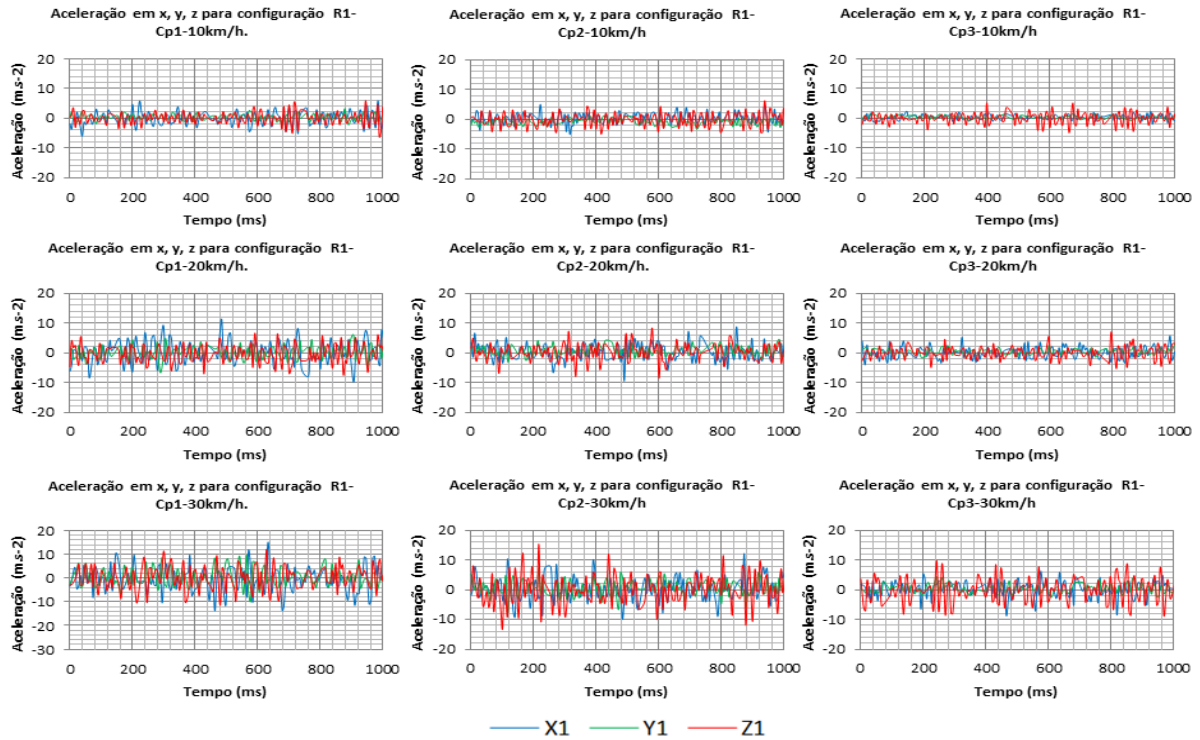


Figura 78 - Aceleração em x, y, z para configuração R1

### 3.3.2 Resultado em pavimento R2

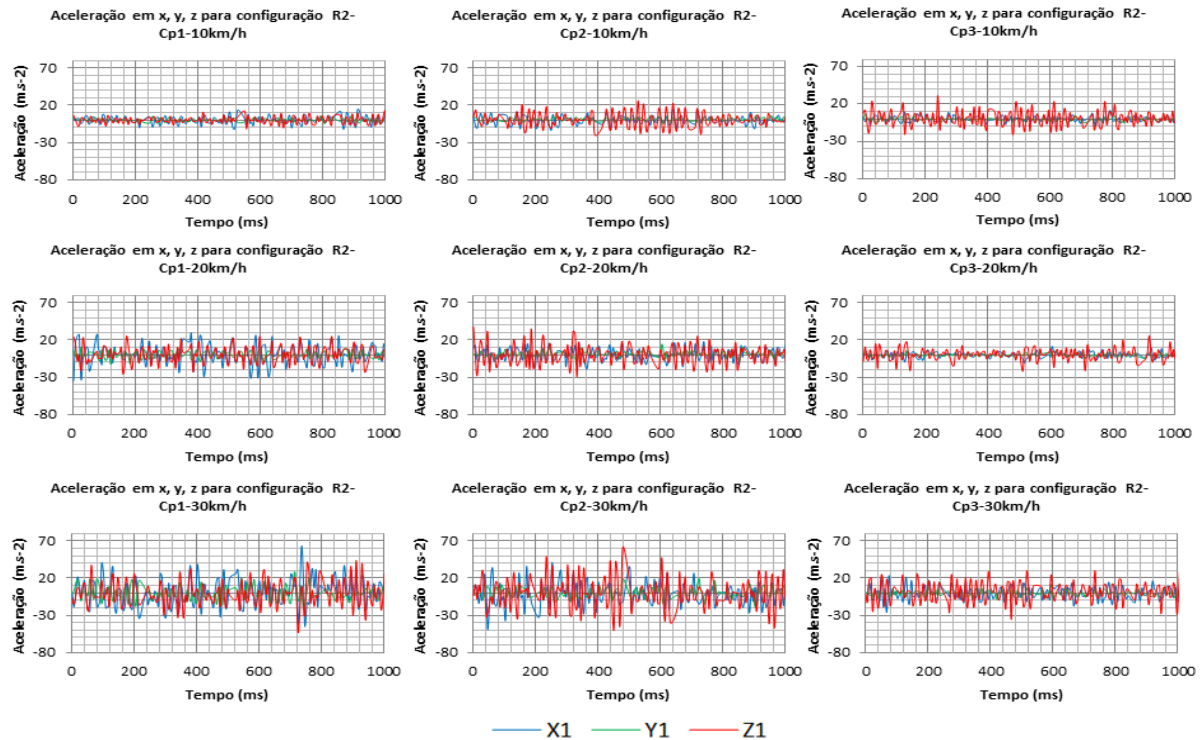


Figura 79 - Aceleração em x, y, z para configuração R2

### 3.3.3 Resultado em pavimento R3

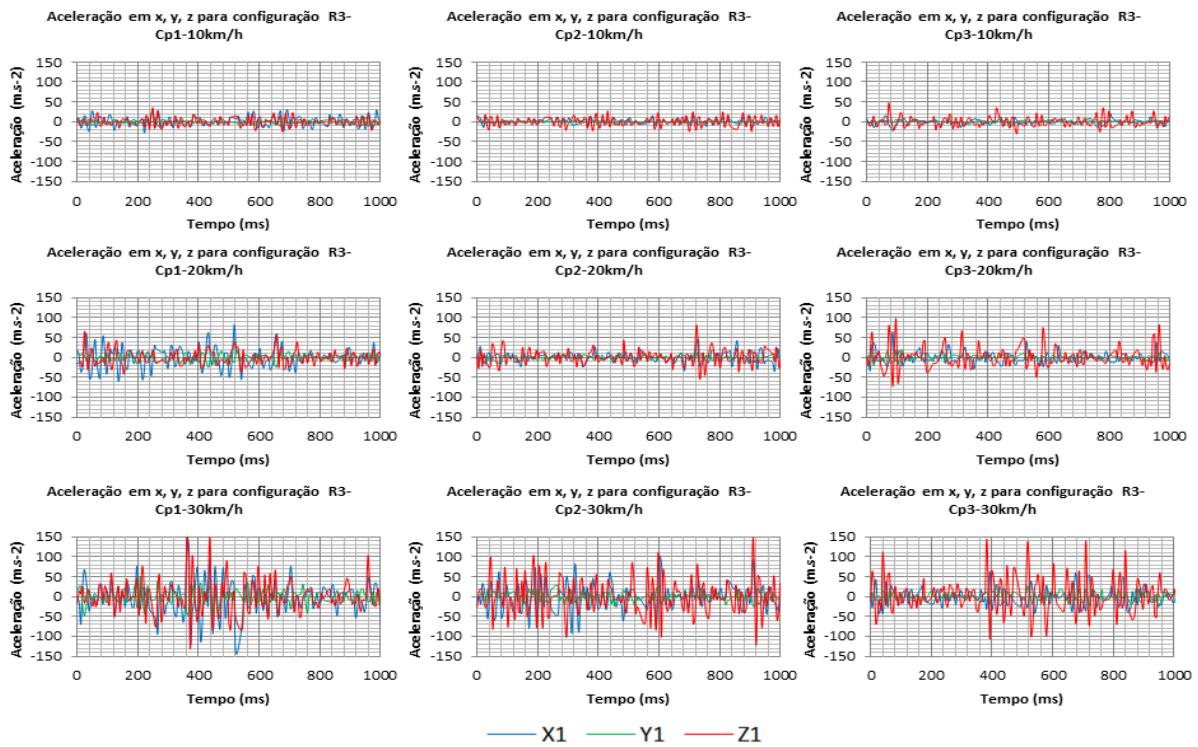


Figura 80 - Aceleração em x, y, z para configuração R3

### 3.3.4 Resultado em pavimento R4

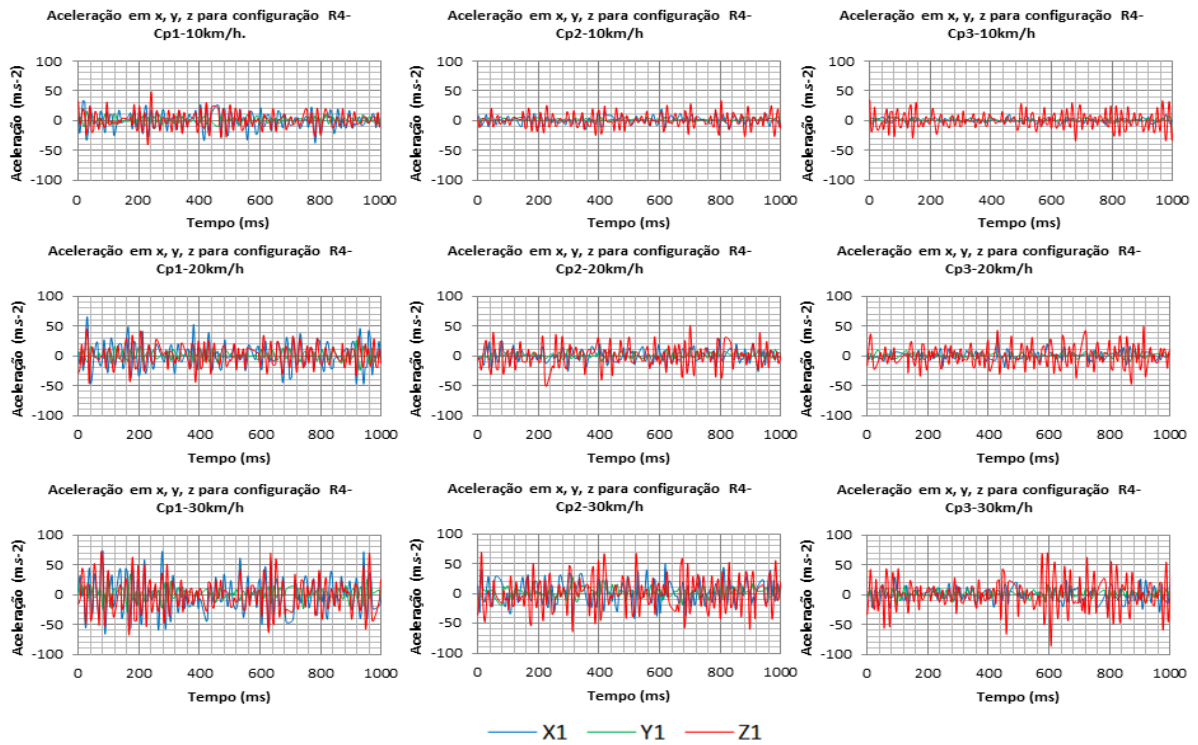


Figura 81 - Aceleração em x, y, z para configuração R4

### 3.3.5 Resultado em pavimento R5

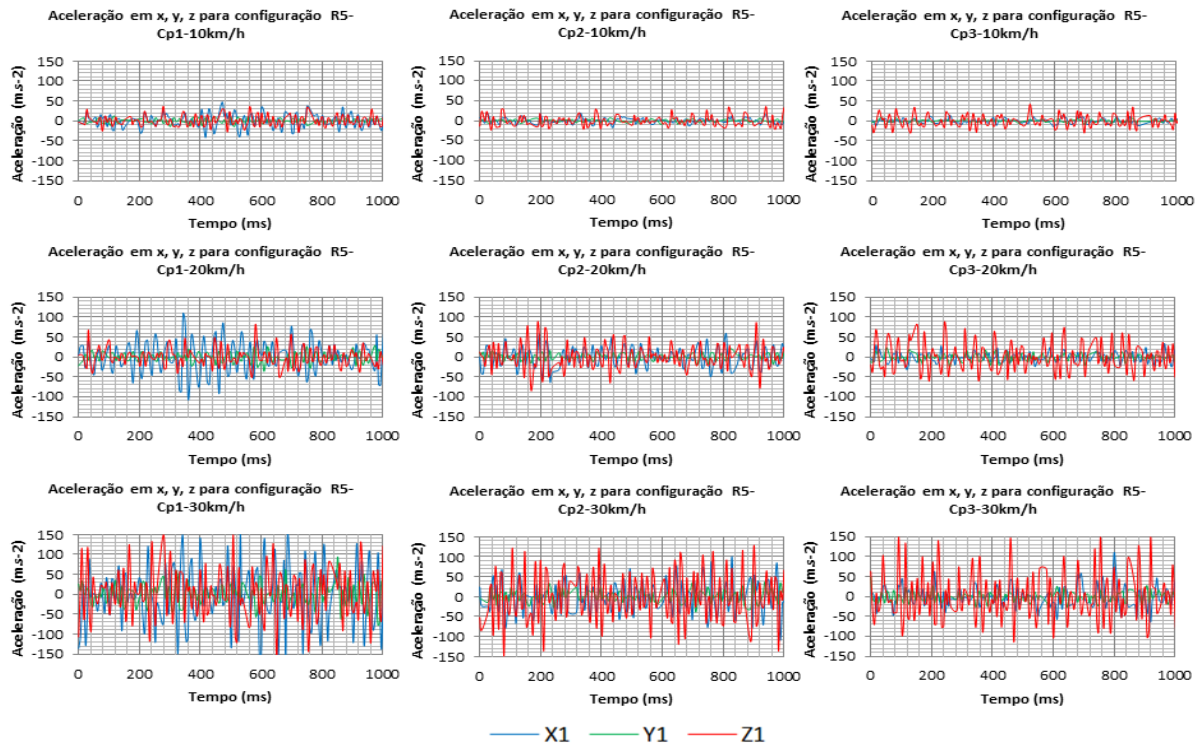


Figura 82 - Aceleração em x, y, z para configuração R5

### 3.3.6 Resultado em pavimento R6

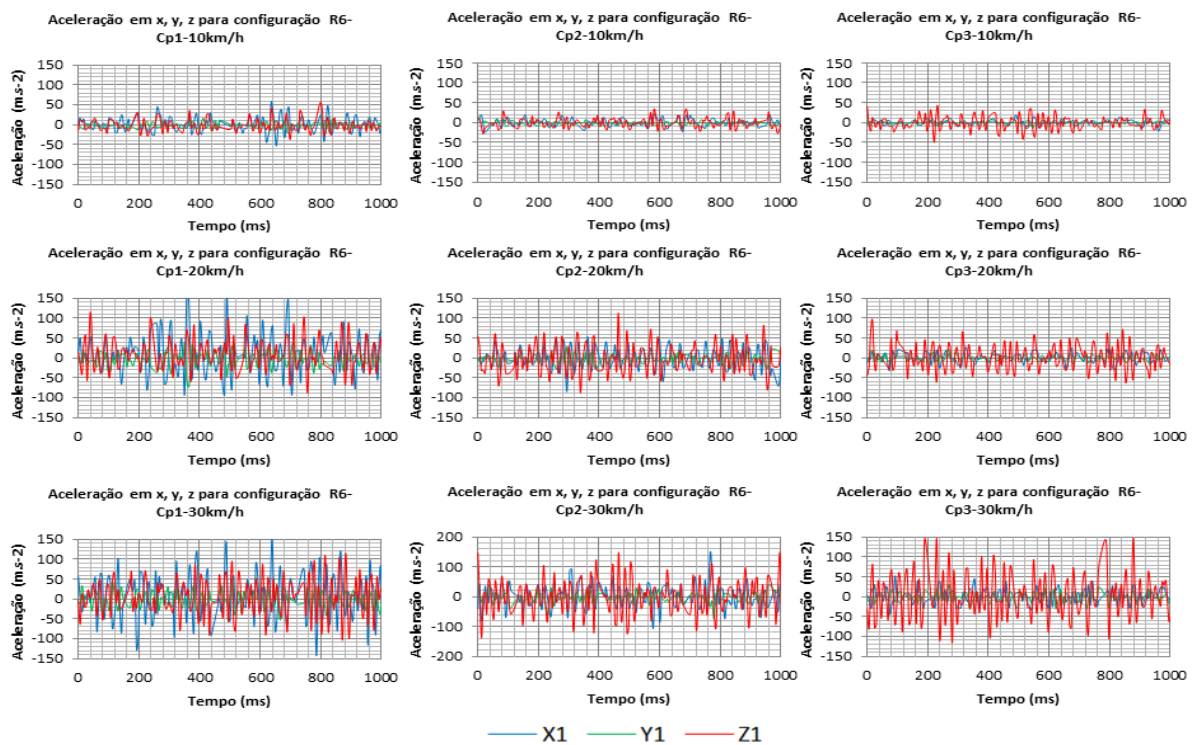


Figura 83 - Aceleração em x, y, z para configuração R6

### 3.3.7 Comparação dos resultados entre os vários pavimentos

De uma forma sucinta, os resultados apresentados na Tabela 9 permitem obter uma visão global sobre o comportamento vibratório da forqueta comercial (forqueta de referência) submetida aos diversos pavimentos pré-selecionados e representativos das reais condições de circulação existentes na Europa.

Tabela 9 - Compilação dos valores RMS e Pico-Pico obtidos com forqueta comercial, nos vários pavimentos.

Pz de Contrôlo	Vel. (km/h)	Eixo	VALOR RMS (s.i.) NOS PAVIMENTOS SEGUINTE												VALOR PICO-PICO (m/s <sup>2</sup> ) NOS PAVIMENTOS SEGUINTE						
			R1	R1 Total	R2	R2 Total	R3	R3 Total	R4	R4 Total	R5	R5 Total	R6	R6 Total	R1	R2	R3	R4	R5	R6	
CP1 - Posição Inferior	10	X	2,40		5,94		11,35		12,23		15,81		18,53		18,60	37,95	93,33	74,99	99,80	123,93	
		Y	1,01	3,47	2,23	8,09	4,08	15,71	4,02	17,43	5,07	21,62	6,62	25,19	6,66	14,82	28,66	25,44	39,30	41,90	
		Z	2,30		5,01		10,07		11,75		13,86		15,74		15,74	19,41	31,24	77,66	88,04	95,96	107,34
	15	X	3,15		7,33		17,16		14,42		27,82		30,05		30,05	19,31	51,27	116,24	98,68	173,37	217,27
		Y	1,52	4,17	2,70	10,47	6,11	24,19	4,71	19,84	9,55	37,13	10,61	39,89	9,01	21,77	40,02	28,74	71,81	98,90	
		Z	2,27		6,96		15,91		12,79		22,66		23,99		15,51	48,26	110,65	91,51	147,20	161,66	
	20	X	3,78		10,78		24,93		18,07		31,13		50,75		27,72	85,18	214,23	125,82	309,50	313,88	
		Y	1,89	5,14	4,55	15,53	9,33	32,55	6,28	26,77	15,31	60,45	16,70	65,89	13,49	32,56	83,57	49,62	119,89	143,80	
		Z	2,93		10,22		18,73		17,92		28,38		38,57		18,94	79,68	146,50	123,88	194,03	250,58	
	25	X	3,82		12,17		35,27		25,00		74,53		61,14		32,83	102,20	263,38	155,89	313,92	313,92	
		Y	2,09	5,56	5,04	16,90	13,64	45,11	8,56	33,53	21,84	88,81	20,56	88,81	13,50	41,21	118,57	68,40	152,44	194,26	
		Z	3,45		10,58		24,80		20,63		43,07		42,39		26,76	73,39	191,71	148,48	313,92	263,94	
30	X	3,78		18,41		43,67		28,70		74,44		67,57		41,52	119,82	313,92	156,96	313,92	313,92		
	Y	3,33	7,54	8,95	25,92	17,64	60,87	10,03	40,55	26,46	102,69	23,85	89,21	19,42	64,66	152,41	76,96	183,65	194,80		
	Z	4,52		15,90		38,59		26,83		65,59		53,15		28,90	117,21	285,10	156,96	313,92	294,73		
CP2 - Posição Central	10	X	1,78		4,83		6,57		5,69		7,92		8,77		12,94	31,67	45,35	37,43	46,97	56,93	
		Y	1,18	3,33	2,15	10,58	2,48	12,44	2,57	13,45	3,37	15,41	4,25	15,41	7,57	12,34	16,00	14,02	27,24	27,10	
		Z	2,55		9,15		10,28		11,91		12,79		11,48		21,37	59,47	78,14	76,83	94,23	79,98	
	15	X	2,05		6,56		9,90		7,00		15,74		16,66		12,18	46,18	100,29	47,21	100,10	101,81	
		Y	1,32	3,41	3,02	11,26	4,04	18,56	3,42	14,42	5,85	30,33	6,72	29,76	8,58	21,40	25,43	21,10	42,87	40,45	
		Z	2,38		8,64		15,17		12,14		25,26		23,73		19,61	57,53	124,11	80,16	169,36	190,65	
	20	X	2,94		8,34		15,33		10,07		23,68		26,42		18,87	50,92	143,71	70,04	140,65	183,70	
		Y	1,88	4,55	3,39	15,00	6,29	27,87	4,29	20,96	7,75	37,91	10,66	45,38	14,67	26,98	44,94	31,19	57,14	75,75	
		Z	2,92		12,00		22,41		17,88		28,57		35,33		24,23	72,62	243,19	111,14	181,05	242,46	
	25	X	3,40		10,66		19,12		12,90		42,01		30,57		19,81	63,83	138,12	83,50	297,61	332,49	
		Y	2,15	5,18	4,47	16,38	67,62	36,20	5,69	25,83	13,14	63,99	12,08	54,02	12,24	25,20	67,62	40,37	103,56	78,60	
		Z	3,26		11,61		24,83		21,64		46,45		42,86		21,18	79,82	248,33	134,94	280,24	266,77	
30	X	4,67		12,81		28,49		17,33		41,50		37,58		37,52	94,13	239,89	123,05	297,08	290,78		
	Y	2,97	7,87	5,71	27,76	10,95	51,04	7,07	34,86	15,82	76,38	15,40	67,02	19,56	41,69	84,75	49,39	105,69	120,30		
	Z	5,60		17,92		40,91		29,40		62,14,00		53,32		43,36	149,89	289,03	156,96	311,37	306,71		
CP3 - Posição Superior	10	X	1,10		3,00		5,42		3,52		6,24		7,32		8,13	21,26	42,47	25,77	42,17	45,78	
		Y	0,85	2,77	1,99	9,60	2,65	12,77	2,64	14,35	3,28	16,94	3,41	18,70	8,87	15,78	21,89	15,45	28,48	27,52	
		Z	2,40		8,90		11,25		13,66		15,41		16,86		38,56	61,90	88,61	78,87	114,37	120,70	
	15	X	1,31		3,89		7,85		5,56		10,14		10,46		6,93	23,78	61,27	39,11	59,94	64,68	
		Y	0,80	2,63	2,48	10,01	3,85	17,12	3,23	14,57	4,69	24,73	4,85	25,92	4,96	17,06	31,15	20,24	35,11	36,55	
		Z	2,14		8,89		14,72		13,08		22,06		23,21		16,77	58,82	110,08	92,62	150,33	188,30	
	20	X	2,10		4,58		12,71		7,12		12,37		13,07		13,83	30,65	104,39	62,58	92,19	88,32	
		Y	1,04	3,41	2,62	13,94	5,86	27,85	4,04	19,07	7,34	37,21	6,82	36,39	6,20	15,42	45,90	23,25	53,12	46,43	
		Z	2,48		12,90		24,08		17,22		34,31		33,27		18,77	84,41	177,34	101,84	249,35	247,80	
	25	X	2,39		6,98		15,69		10,71		19,09		16,56		15,64	40,99	149,44	70,84	122,87	104,60	
		Y	1,09	3,91	3,21	13,60	7,33	36,37	4,57	27,11	10,68	51,75	9,82	50,81	9,59	22,10	72,65	32,89	85,20	69,13	
		Z	2,90		11,33		31,98		24,48		46,90		47,02		18,56	78,21	272,12	138,07	258,63	313,90	
30	X	2,75		8,81		20,58		11,04		23,85		19,71		23,50	51,88	170,32	72,12	174,37	126,80		
	Y	1,45	5,24	4,95	21,38	9,72	45,95	5,64	28,12	13,63	70,04	11,49	56,66	8,59	38,14	74,42	35,98	116,12	85,20		
	Z	4,21		18,84		39,92		25,24		64,42		51,87		29,84	139,80	281,01	155,85	313,92	306,00		

R1 - Ciclovia.

R2 - Estrada em asfalto.

R3 - Estrada em asfalto irregular.

R4 - Calçada portuguesa.

R5 - Pavimento em granito com paralelepípedo 20 x 10 cm.

R6 - Pavimento em granito com paralelepípedo 10 x 10 cm.

Os resultados obtidos evidenciam um aumento do valor RMS proporcional às irregularidades próprias de cada pavimento, com ênfase nas estradas de tipo R5 e R6 que atingem valores totais de RMS extremamente elevados na ordem de 100 m. s<sup>-2</sup> (RMS) (oito vezes superior aos valores registados em ciclovia).

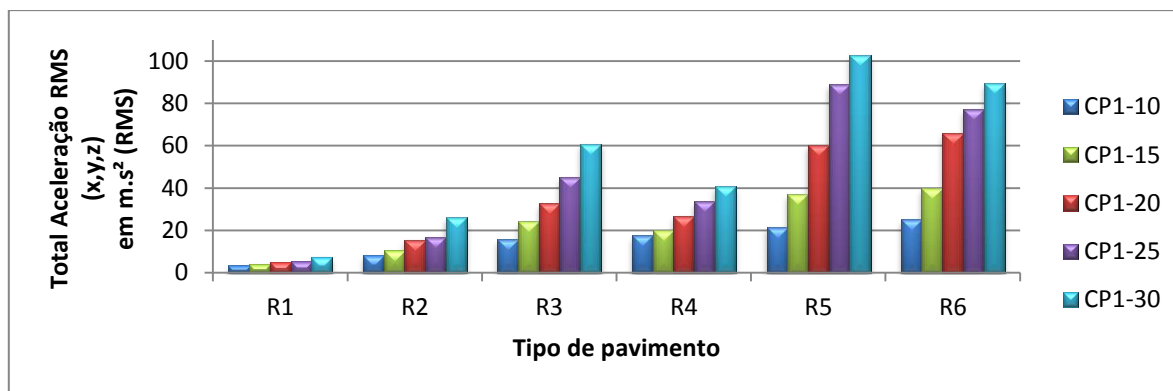


Figura 84 - Total RMS (x, y, z) para cada pavimento na posição Cp1.

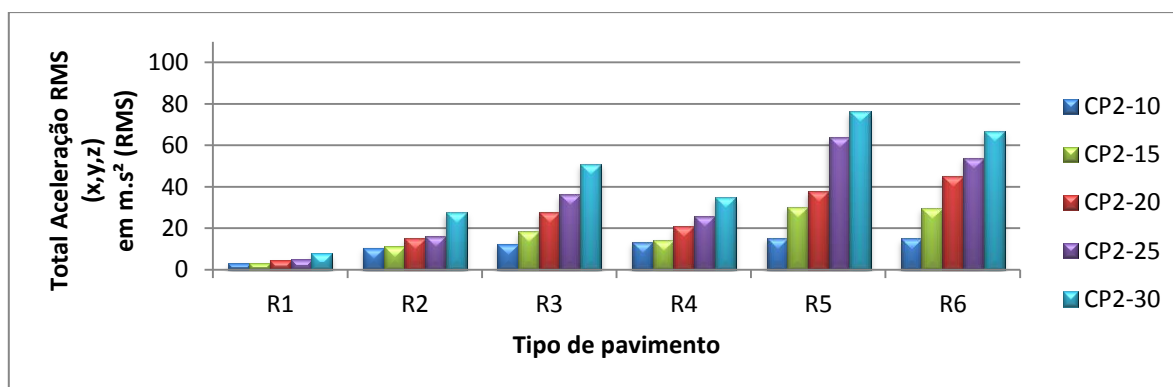


Figura 85 - Total RMS (x, y, z) para cada pavimento na posição Cp2.

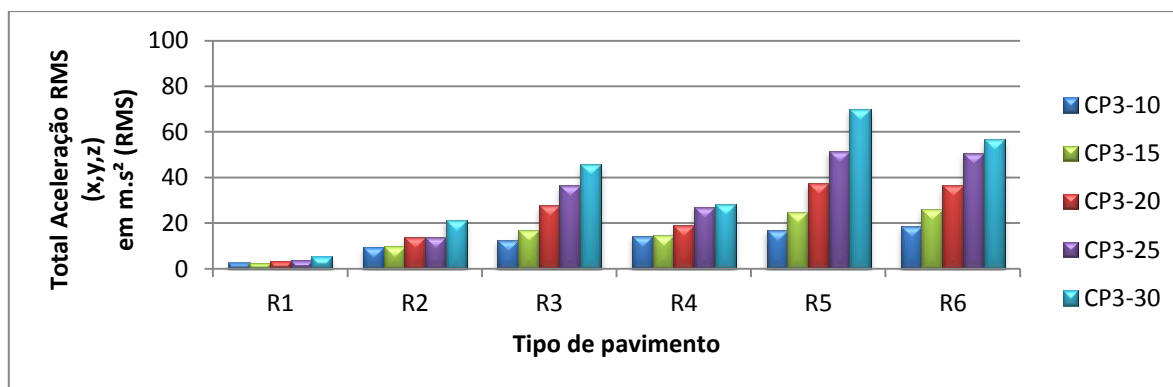


Figura 86 - Total RMS (x, y, z) para cada pavimento na posição Cp3.

À semelhança dos valores de RMS, a amplitude pico-pico da aceleração registada a mesma tendência de proporcionalidade. Associado a este fenómeno verifica-se uma evidente oscilação no eixo x (sentido longitudinal da bicicleta), sendo mesmo superior ao eixo z (sentido longitudinal da forqueta) na posição de controlo Cp1 e na maioria dos pavimentos, a exceção do R1 (Ciclovía). Nas posições Cp2 e Cp3, os valores de aceleração pico-pico são maiores no eixo z em todos os pavimentos. De registar também, uma reduzida mas significativa vibração no eixo y (sentido do eixo da roda), representando 30% a 75% do valor dos eixos x e z. A frequência registada situa-se entre os 40 Hz e os 50 Hz e é transversal aos

cinco tipos de pavimentos deste estudo.

Desta forma conclui-se, que estes ensaios no terreno permitiram identificar acelerações nos três eixos x, y, z, com maior intensidade e amplitude nos pontos de controlo CP1 e reduzindo nos pontos de controlo (Cp2 e Cp3) a montante.

### 3.4 Resultados das medições de vibração em banco de ensaio

Os ensaios preliminares realizados no banco de ensaio permitiram restringir o leque de patamares de acelerações RMS, representativos dos valores obtidos nos ensaios em estrada. Deste modo, os valores de referência aplicados à fonte vibratória são: 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130 e 140  $m.s^{-2}$  (ver Figura 87)



Figura 87 - Banco de ensaio com fonte vibratória.

Os resultados obtidos nos diversos patamares acima referidos, são provenientes dos acelerómetros localizados no banco de ensaio e na forqueta (posicionados nos pontos Cp1, Cp2 e Cp3 de acordo como referida Figura 62).

Antes de iniciar cada medição e à semelhança dos ensaios em estrada, é necessário realizar a calibração dos acelerómetros de modo a garantir a correta leitura das acelerações. Concluída esta fase preliminar, é iniciado de forma automática a recolha de dados pelos sensores e central Arduino (ver Figura 60). A visualização e gravação dos dados são feitas a partir do GSDG.

### 3.4.1 Resultados da forqueta C1

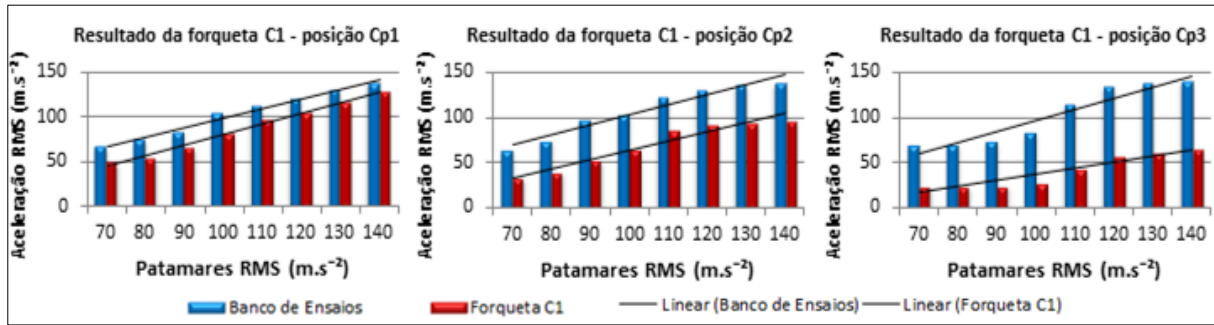


Figura 88 - Resultado da forqueta C1

### 3.4.2 Resultados da forqueta T1

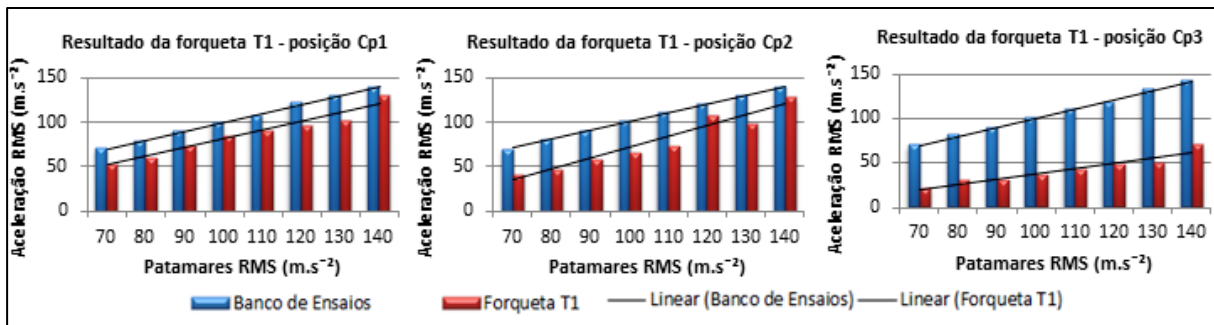


Figura 89 - Resultado da forqueta T1

### 3.4.3 Resultados da forqueta T2

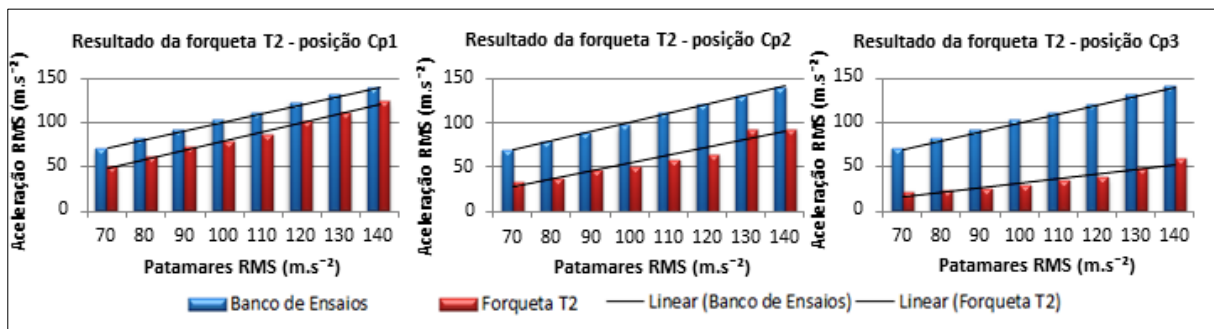


Figura 90 - Resultado da forqueta T2

### 3.4.4 Resultados da forqueta T3

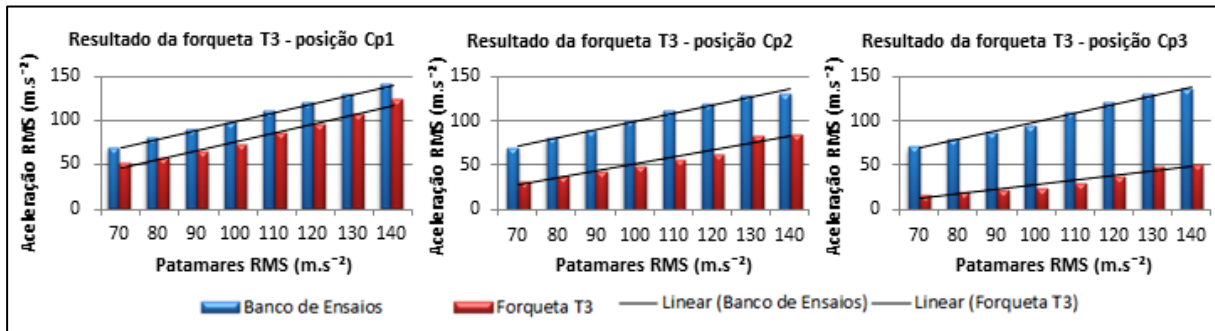


Figura 91 - Resultado da forqueta T3

### 3.4.5 Resultados da forqueta T4

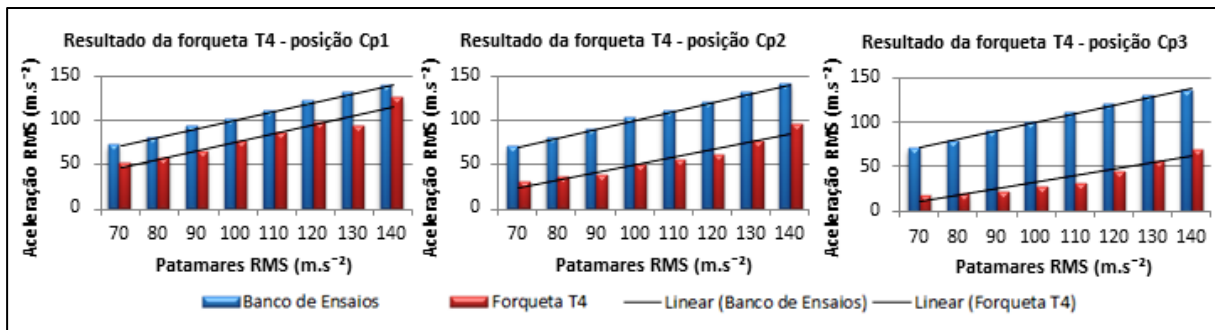


Figura 92 - Resultado da forqueta T4

### 3.4.6 Comparação dos resultados entre as várias forquetas

Os resultados obtidos a partir do banco de ensaios evidenciam um amortecimento gradual dos pontos Cp1 até Cp3 como ilustrado na Figura 93. Consta-se que as forquetas protótipo apresentam valores de amortecimento diminuto quando existe aumento de rigidez (pelo aumento de camadas de fibra de carbono).

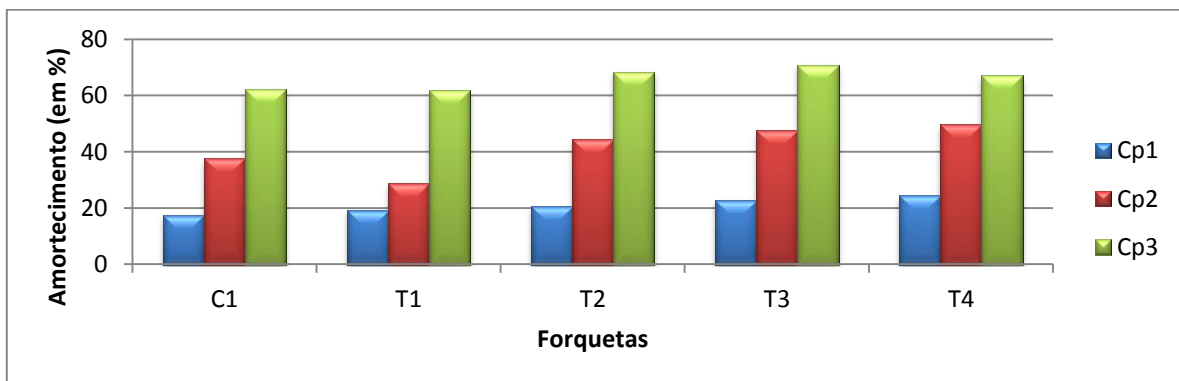


Figura 93 - Amortecimento das forquetas verso banco de ensaios

Colocando a forqueta comercial C1 como referência, é visível o ganho (ente 3% e 12%) no amortecimento registado nas forquetas T2, T3 e T4. Ao invés da forqueta T1, que fica penalizada pela sua rigidez excessiva nos pontos de controlo Cp2 e Cp3 (ver Figura 94).

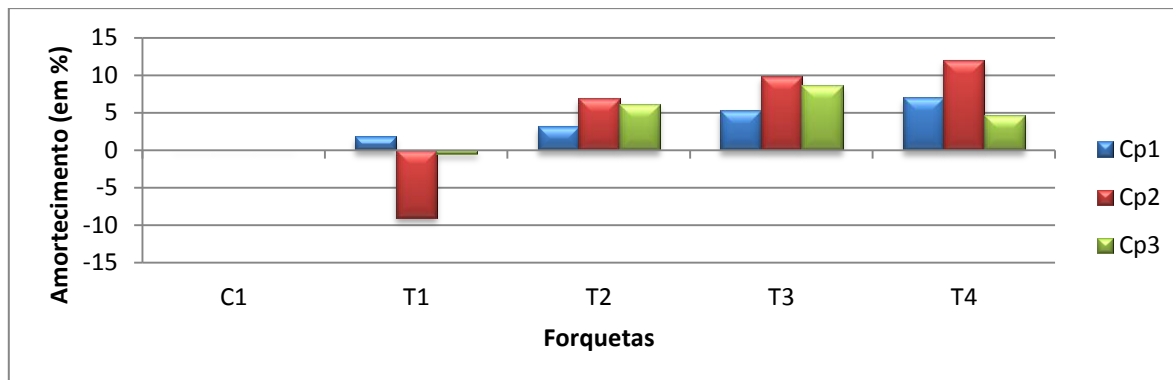


Figura 94 - Amortecimento das forquetas verso Forqueta Comercial C1

### 3.5 Avaliação da exposição das vibrações transmitidas ao sistema mão-braço

No plano da avaliação da exposição das vibrações transmitidas ao sistema mão braço, de referir que de forma prática assume-se uma atenuação da vibração no guiador de 40% do valor da vibração equivalente ( $a_{hv}$ ) no ponto Cp3. Este valor é o resultado de medições efetuadas durante os ensaios em estrada. Desta forma é possível obter uma leitura correta do valor de vibração equivalente na mão de um ciclista.

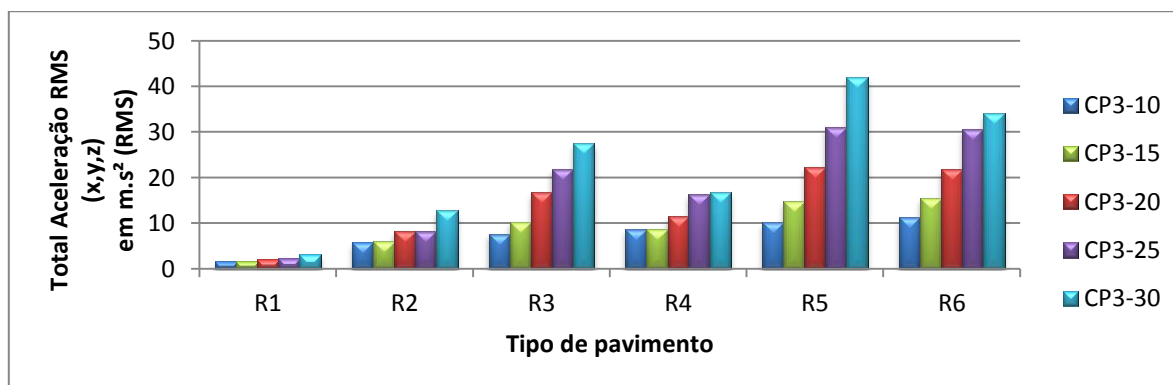


Figura 95 - Total RMS (x, y, z) para cada pavimento na mão do ciclista.

Comparando os resultados obtidos com os valores presentes na Tabela 10 é possível verificar que para os estudos realizados, o ciclista encontra-se sempre dentro de uma zona de conforto, ou seja abaixo de  $5 m.s^{-2}$ , em pavimento do tipo R1 e R2 mesmo com grandes velocidades de deslocação, podendo a atividade ser prolongada durante várias horas. Ao invés, em percur-

os mais acidentados como o R3 e R4, o risco associado às vibrações é significativo para ciclistas se a velocidade e o tempo de deslocação forem superiores a  $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  e duas horas respetivamente. Em situações extremas, como é o caso de atletas profissionais participando na prova mítica de Paris-Roubaix, a duração da exposição do ciclista as vibrações é de seis horas e trinta minutos de forma contínua ao longo de 257 km. O pavimento acidentado é semelhante às características do pavimento R6 deste trabalho. Nestas circunstâncias, ao confrontar os resultados da Figura 95 com os valores recomendados pela Norma ISO 5349, conclui-se que os níveis de vibrações são importantes pelo facto de serem sete vezes superior aos valores limites recomendado pela norma.

Tabela 10 - Avaliação da exposição das vibrações (RMS) transmitidas ao sistema mão-braço, segundo a norma ISO 5349.

Avaliação da exposição das vibrações (RMS) transmitidas ao sistema mão-braço, segundo a norma ISO 5349				
Zona corporal	Duração de exposição (em horas) a 50Hz	Zona Aceitavel (em $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	Zona de risco moderado (em $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	Zonas de risco elevado (em $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
Vibração Mão-Braço	1	< 6	$6 < A(1) < 12$	> 12
	2	< 5	$5 < A(2) < 10$	> 10
	3	< 4,25	$4,25 < A(3) < 8,5$	> 8,5
	4	< 3,5	$3,5 < A(4) < 7$	> 7
	5	< 3,25	$3,25 < A(5) < 6,5$	> 6,5
	6	< 3	$3 < A(6) < 6$	> 6
	7	< 2,75	$2,75 < A(7) < 5,5$	> 5,5
	8	< 2,5	$2,5 < A(8) < 5$	> 5

### 3.6 Resultados das medições de vibração com martelo de impacto

Os ensaios de impacto foram realizados nas instalações da ESTG, seguindo a norma ISO 4866-2010.

Um impacto ideal para uma estrutura é um impulso ideal o que não factível, deste modo é efetuado um conjunto de seis impactos em cada ponto  $C_p$  de modo a obter um resultado mais preciso e exato. Os sensores foram colocados na face exterior das forquetas e os pontos de impacto foram realizados na parte interior correspondente (ver Figura 96).



Figura 96 - Ensaio de vibração livre com martelo de impacto.

De modo gráfico, a forma do movimento obtido em todas as forquetas submetidas ao ensaio de vibração livre, é o representado na Figura 97. Trata-se de um movimento harmónico com forma senoidal, e amplitude decrescente exponencialmente segundo a relação  $Xe^{-\zeta\omega_n t}$ . Observa-se que o efeito do amortecimento está presente na amplitude decrescente, representando a dissipação da energia vibratória.

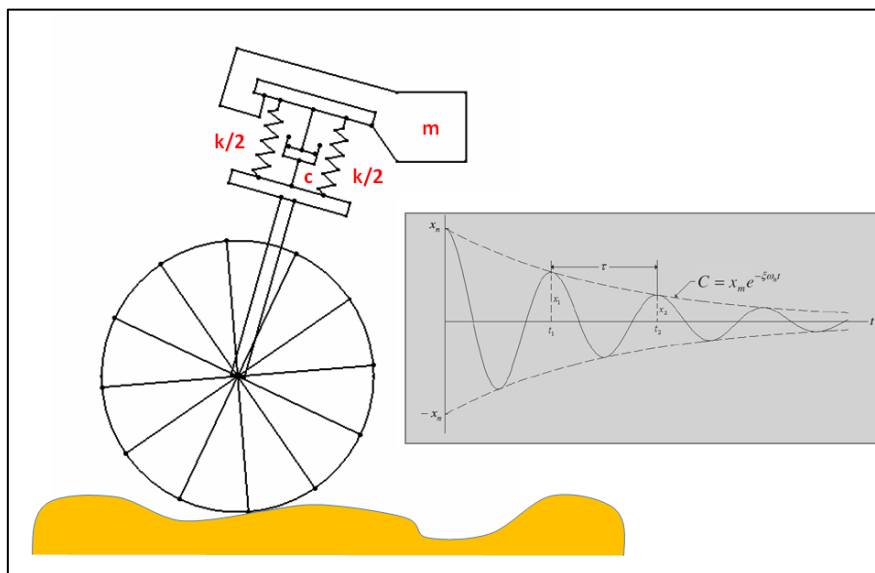


Figura 97 - Esquema representativo da forqueta em estudo

Para grandes valores de  $t$  o termo  $Xe^{-\zeta\omega_n t}$  tende para zero. (18)

A frequência de oscilação agora não é mais a frequência natural, mas sim a chamada frequência da vibração livre amortecida, ou frequência natural amortecida, dada por:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}. \quad (19)$$

Inicialmente deve ser determinado o fator de amortecimento  $\zeta$ , que pode ser obtido a partir de duas maneiras, pelo decremento logarítmico  $\lambda$  ou pela largura de banda  $\Delta\omega$ .

### 3.6.1 Fator de amortecimento $\zeta$ determinado pelo método da largura de banda $\Delta\omega$

Pelo método da largura de banda é possível obter o amortecimento baseado na resposta da frequência. A largura de banda (a meia potência) é definida como a largura de curva da resposta de frequência quando a magnitude  $Q$  é  $(1/\sqrt{2})$  vezes o valor do pico. Este valor é denotado por  $\Delta\omega$ , como ilustrado na Figura 98.

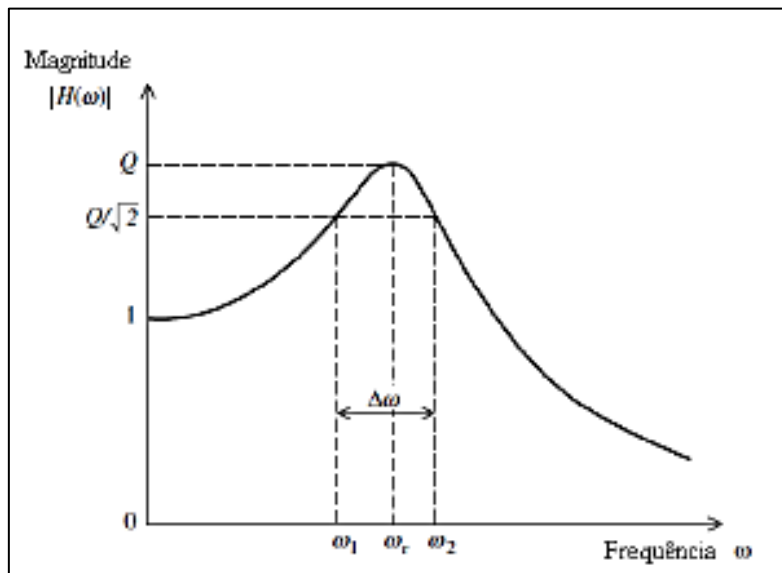


Figura 98 - Método da largura de banda para determinação do amortecimento.

O valor de  $\Delta\omega$  pode ser relacionado com o amortecimento da seguinte forma:

$$\Delta\omega = 2\zeta\omega_0 = 2\zeta\omega_r \quad (20)$$

E portanto, o amortecimento pode ser estimado através da largura de banda, usando a relação:

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_r} \quad (21)$$

Há ainda outros métodos para determinação do amortecimento, que não serão tratados neste trabalho, uma vez que os principais métodos (Decremento Logarítmico e Largura de Banda) foram explícitos.

Os ensaios de impacto foram realizados nos três pontos Cp1, Cp2 e Cp3 das forquetas protótipo (T1, T2, T3, T4), comercial (C1) e no núcleo de microesferas ocas de vidro (N). A função resposta em frequência (FRF) obtida nestes ensaios é semelhante em todas as forquetas. Todas elas possuem 4 a 5 frequências naturais como identificado na Figura 99.

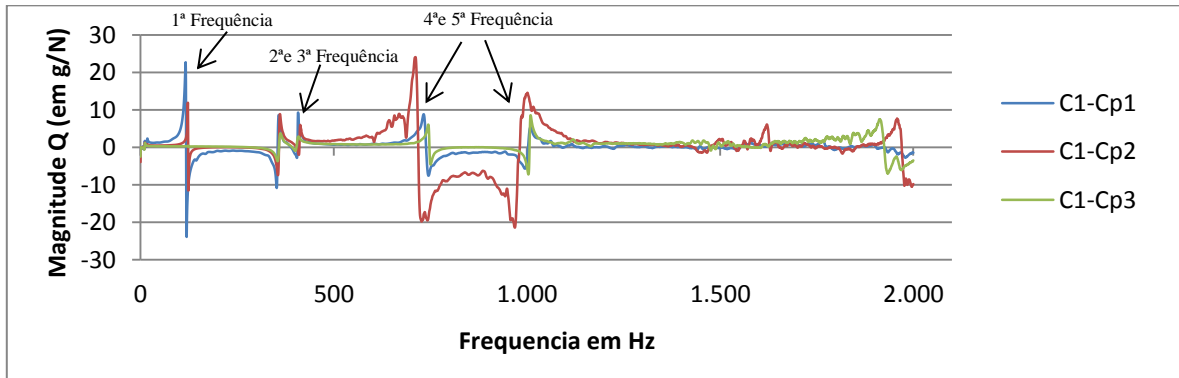


Figura 99 - Função Resposta em Frequência (FRF) da forqueta comercial C1.

Na Figura 100 é o resultado da compilação dos valores  $\Delta\omega$  para cada forqueta. Pode-se concluir que todos os protótipos (T1, T2, T3 e T4), apresentam uma largura de banda superior ao modelo comercial C1. As forquetas T1 e T2 chegam a atingir valores  $\Delta\omega$  três vezes superiores ao produto C1 (ver anexo 3 com o detalhe dos valores).

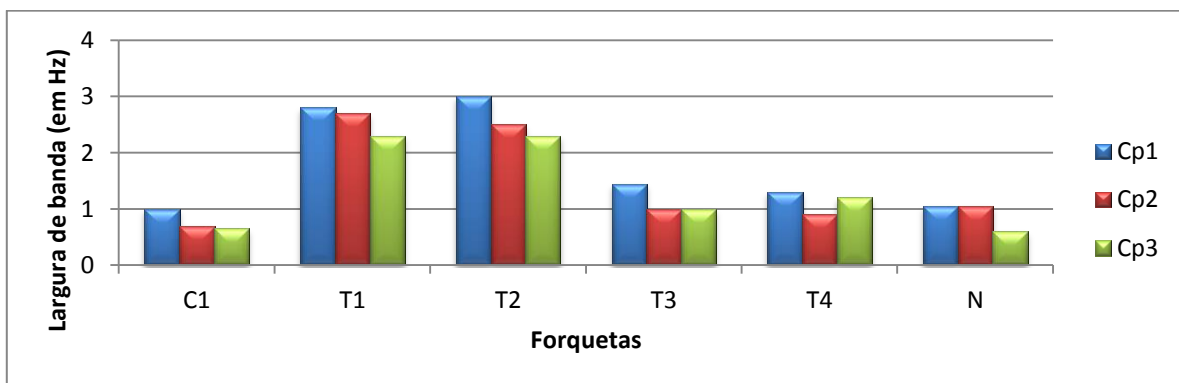


Figura 100 - Comparativo dos resultados de largura de banda entre forquetas.

O fator de amortecimento  $\zeta$  obtido a partir da equação (21) leva-nos a afirmar que de facto todas as forquetas protótipo (T1, T2, T3 e T4) e núcleo (N) apresentam fatores de amortecimento  $\zeta$  superior à forqueta comercial C1. No entanto de referir a proporção entre as forquetas protótipo (T1 e T2), duas vezes superior a C1. Enquanto as forquetas T3 e T4 ficam ligeiramente acima de C1. De realçar os valores do núcleo ficando claramente acima de todas as forquetas, à exceção do ponto Cp3 (ver Figura 101).

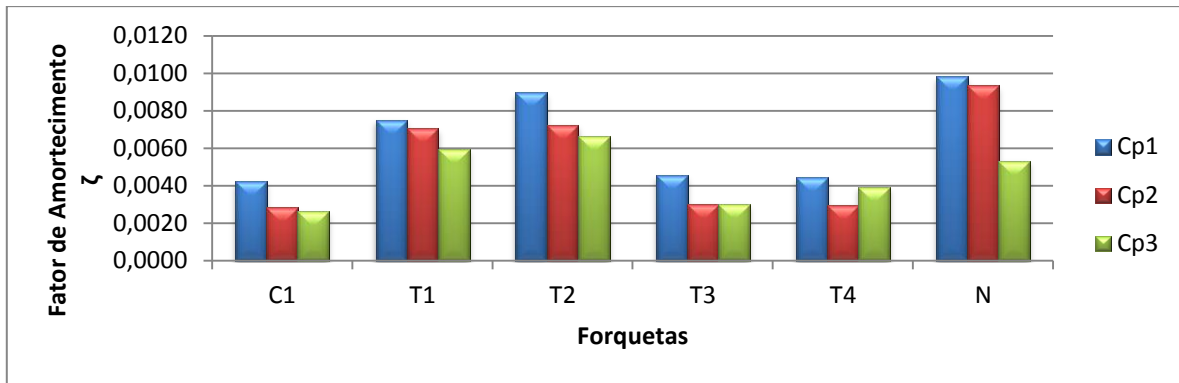


Figura 101 - Comparativo dos resultados de fator de amortecimento entre forquetas.

### 3.6.2 Fator de amortecimento $\zeta$ determinado pelo decremento logarítmico $\lambda$

A rigidez  $k_{eq}$  é determinada através da frequência da vibração livre amortecida  $\omega_n$ . A velocidade inicial é obtida a partir da determinação do tempo correspondente ao máximo deslocamento.

Na seguinte Figura 102 é explícito a solução sub-amortecida ( $\zeta < 1$ ) resultante do impacto do martelo numa posição Cp, numa perna de uma forqueta.

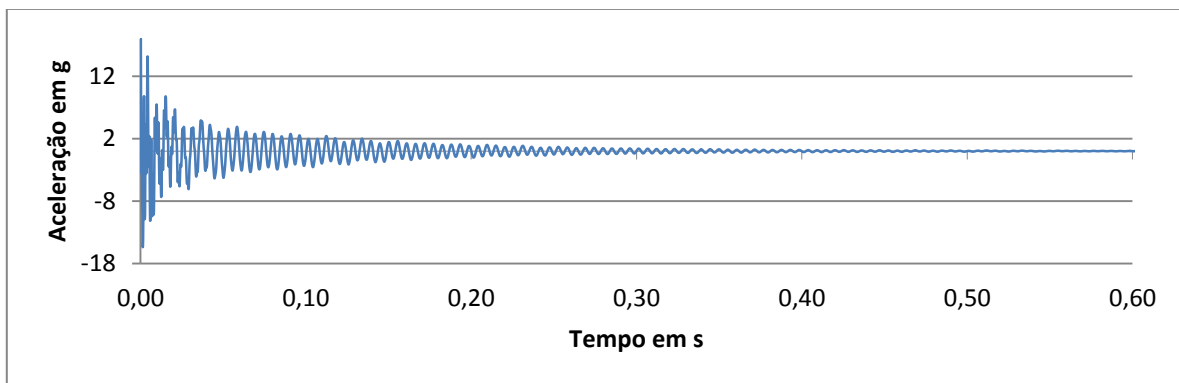


Figura 102 - Amortecimento sub-amortecida ( $\zeta < 1$ ) típico de uma forqueta.

Selecionando um período homogêneo; com  $A_1$  correspondente a uma amplitude de um primeiro pico ( $t_0$ ) e  $A_n$  em  $t_n$ , sendo n o numero de picos. O decremento logarítmico para forqueta T1 é então:

$$\lambda = \frac{1}{n} \ln \left( \frac{A_1}{A_2} \right) = \frac{1}{40} \ln \left( \frac{0,7}{0,18} \right) \Rightarrow \lambda = 0,0339 \quad (22)$$

Através da expressão (16) determina-se o fator de amortecimento por:

$$\zeta = \frac{\lambda}{\sqrt{(2\pi)^2 + \lambda^2}} = \frac{0,0339}{\sqrt{(2\pi)^2 + (0,0339)^2}} \Rightarrow \zeta = 0,0076 \quad (23)$$

A frequência natural é obtida a partir do período da oscilação amortecida  $T_d=0,0055$  s, através da seguinte expressão:

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{2\pi/T_d}{\sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{2\pi/0,0055}{\sqrt{1-(0,0339)^2}} \Rightarrow \omega_n = 1143,05 \text{ rd. s}^{-1} \quad (24)$$

Os resultados obtidos pelo método do decremento logarítmico  $\lambda$  são semelhantes aos valores obtidos pelo método da largura de bando, como exemplificado pelos valores da forqueta T1, acima demonstrado.



---

# Capítulo 4

---

## 4. Conclusão e propostas de desenvolvimento futuro

---

### 4.1 Conclusões

A investigação realizada neste trabalho prende-se com a necessidade de reduzir as vibrações a que estão sujeitos os atletas (quer amadores, quer profissionais) praticantes de ciclismo em pavimentos irregulares. A forqueta de bicicleta de estrada é uma peça chave no rendimento de um atleta durante uma prova desportiva ou num treino, onde as vibrações são um fator perturbador e fortemente desgastante.

Os materiais e processos de fabrico de uma forqueta de gama média ou alta têm grande influência no seu comportamento. Neste momento, o material mais utilizado é a fibra de carbono. A grande vantagem da fibra de carbono é a sua diversificação, pois permite o desenvolvimento de combinações específicas para cada secção da forqueta. A sua rigidez associada ao seu reduzido peso é atualmente a combinação preferida nos gabinetes de desenvolvimento das grandes marcas de bicicletas em detrimento do conforto.

A criação de um modelo numérico de uma forqueta de bicicleta permitiu que se efetuassem diversas simulações de modo a prever o seu comportamento estático e dinâmico. A colocação de elementos piezoelétricos ativos localizados em zonas de maior deformação, permitiu aumentar ligeiramente o amortecimento das vibrações (nalgumas configurações apenas 1% e noutras ligeiramente acima dos 5%) e reduzir de forma mais expressiva o deslocamento máximo da forqueta (aproximadamente 10%).

A realização dos modelos experimentais veio demonstrar que a utilização de um núcleo em microesferas ocas de vidro é um conceito inovador e com grande potencial em circunstâncias específicas de vibrações e que pode ser um caminho a seguir neste tipo de componente. Os vários ensaios permitiram demonstrar ganhos no amortecimento de vibrações, acima dos 10% em comparação com a forqueta comercial de referência neste trabalho. O seu processo de fa-

brico em fase de produção poderia ser otimizado, obtendo um produto robusto com um bom acabamento de superfície.

O custo associado à tecnologia com microesferas ocas de vidro é baixo. Com a inserção de bandas em piezoelétrico ativas e seu *microchip*, o custo aumenta significativamente.

A complementaridade das duas soluções investigadas pode ser uma alternativa a desenvolver em estudos futuros.

---

## Bibliografia

---

1. VELICITE-BIKES – **Carbon Fiber**. Dezembro 2013 [Consult. 15 Dez. 2013]. Disponível em <http://www.velocite-bikes.com/carbon-fiber.html.html>
2. SCOTT – **The carbon experts**. [Consult. 04 Nov. 2013] Disponível em <http://carbonexperts.scott-sports.com/pt/index.html#resultsTab1>
3. EASTON - **Fine tuning forks**. [Consult. 04 Out. 2013] Disponível em <http://www.eastoncycling.com/bike/wp-content/uploads/2010/04/RD-10-Composite-Forks.pdf>
4. CHAMPOUX, Y - **Bicycle Structural Dynamics (Julho 2007)** -[Consult. 23 Mai. 2014] Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.
5. GAYANT, M; BERTUCCI, W; CHIEMENTIN, X - **Paris – Roubaix, Un voyage en Enfer?** In CONFERENCE DU SUAC, Reims, 28 de Janeiro de 2014.
6. ISO 5349.1979, **Guide for evaluation of human exposure to whole-body vibration** – 2ªEd – 18/07/79
7. ISO 2631.1978, **Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration.**
8. CANYON - **Projeto 0.01 - Estudo da bicicleta de estrada confortável** [Consult. 30 Mar. 2014] Disponível em [https://www.canyon.com/\\_pt/technology/project001.html?WYSESSID=dov3nbnlopaet6ft8pq9pea17](https://www.canyon.com/_pt/technology/project001.html?WYSESSID=dov3nbnlopaet6ft8pq9pea17)
9. SPECIALIZED – **Advanced Composite Cycling Products**. [Consult. 05 Mai. 2014] Disponível em [http://www.specialized.com/OA\\_MEDIA/pdf/advance\\_comp\\_whtppr.pdf?xsrc=AC001](http://www.specialized.com/OA_MEDIA/pdf/advance_comp_whtppr.pdf?xsrc=AC001)
10. TREK BICYCLE CORPORATION – **Feature Tour**. [Consult. 15 Mai. 2014] Disponível em [http://www.trekbikes.com/ch/fr/bikes/road/endurance\\_race](http://www.trekbikes.com/ch/fr/bikes/road/endurance_race)
11. BMC – Granfondo GF01 – Endurance. [Consult. 16 Mai. 2014] Disponível em [http://www.bmc-racing.com/fr-fr/bikes/road/platform/endurance/granfondo/gf01/ultegra\\_di2/](http://www.bmc-racing.com/fr-fr/bikes/road/platform/endurance/granfondo/gf01/ultegra_di2/)
12. BIKE ROAR - **Paris-Roubaix – The Bikes**. [Consult. 16 Mai. 2014] Disponível em <http://bikeroar.tumblr.com/post/54412565475/paris-roubaix-the-bikes>

- 
13. SORREL, C. - **Suntour Swing Shock: Suspension Fork for Road Bikes and 'Fixies'**. [Consult. 30 Mar. 2014] Disponível em <http://www.wired.com/2010/10/suntour-swing-shock-suspension-fork-for-road-bikes-and-fixies/>
14. MATERIALS SCIENCES CORPORATION - **Bianchi Infinito CV with Countervail®**. [Consult. 05 Jun. 2014] Disponível em <http://www.materials-sciences.com/countervail.asp>
15. LERNER, E. K. L. L.; WILMOTH, B. - **World of Earth Science**, 2003.
16. MORITA, T. - **Miniature piezoelectric motors**, "Sensors and Actuators", Vol. 103, No. 3, Fev. 2003, p. 291–300.
17. US Patent 5,058,124. 15 Out. 1991.  
British Telecom. Public Limited Com. **Semiconductor Device and Piezoelectric Stack Optical Mounting Assembly**. A Cameron, K., Wyatt, R., Mellis, J., Al-Chalabi, S., and Brain, M.
18. WILKIE, W. K., *e al* - **Low-cost piezocomposite actuator for structural control applications: Smart Structures and Materials 2000**: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, No. 3991, Bremen, Germany, June 2000, p. 323–334.
19. ADVANCED CERAMETRIC INC - **Advanced Cerametrics products are used in a variety of solutions**. [Consult. 05 Jan. 2014] Disponível em <http://www.advancedcerametrics.com>.
20. HEAD - **Head's theory of relativity**. [Consult. 05 Mai. 2014] Disponível em <http://www.head.com/>.
21. RIZET, N. – **Contrôle Actif de vibrations utilisant des matériaux piézo-électriques**. Lyon: Institut National Des Sciences Appliquées. 1999. Tese de doutoramento.
22. WILLIAMS, R.; INMAN, D. - **An Overview of Composite Actuators with Piezoelectric Fibers**, 2002 IMAC-XX: Conference & Exposition on Structural Dynamics, 2002. p. 1–7.
23. SMART MATERIALS CORPORATION - **Macro Fiber Composite – MFC**. [Consult. 03 Fev 2014] Disponível em <http://www.smart-material.com>.
24. ALMEIDA, S.F. - **Análise Dinâmica Experimental da Rigidez de Elementos de Concreto Submetidos à Danificação Progressiva até a Ruptura**. São Paulo: Universidade de São Paulo. 2005. Dissertação de Mestrado.
25. THORBY, D. - **Structural Dynamics and Vibrations in Practice. An Engineering Handbook**. Oxford, UK: Elsevier Ltd, 2008.
26. SETO, W. W. - **Theory and Problems of Mechanical Vibrations**: Schaum Publishing CO. New York, 1964.

- 
27. SEIFERT, J - **Versatile plastic technologies for automotive manufacturing**. PresseBox. Neuss, 10 Set. 2014 [Consult. 05 Out 2014] Disponível em <http://www.pressebox.com/pressrelease/3m-deutschland-gmbh/Versatile-plastic-technologies-for-automotive-manufacturing/boxid/700632>
28. ISO 14125, **Fibre-reinforced plastic composites: Determination of flexural properties** -1998
29. SLOAN, J. -**Proper mold care: Mandatory!**: Composites Technology. February 2011, p. 24-29.
30. PAVILHAO DO CONHECIMENTO - Em Lisboa, à descoberta da ciência e da tecnologia: **Calçada a portuguesa** [Consult. 05 Mar 2014] Disponível em [http://pavconhecimento.pt/roteiro1\\_vagueando/pt/calçada\\_pt.html](http://pavconhecimento.pt/roteiro1_vagueando/pt/calçada_pt.html)



# Anexo 1 – Ficha técnica da resina epóxi



SR 1500  
Lab ref 1424  
Page 6/7  
Version 26/04/2010

## Mechanical properties on pure cast :

Curing cycles	SR 1500 / SD 2505			SR 1500 / SD 2503		SR 1500 / SD 7561			
	14 jours 23 °C	24 h 23°C + 24h 40°C	24 h 23°C + 8h 60 °C	14 jours 23 °C	24 h 23°C + 8h 60 °C	14 jours 23 °C	24 h 23°C + 24h 40°C	24 h 23°C + 16h 60 °C	
<b>Tension</b>									
Modulus of elasticity	N/mm <sup>2</sup>	3100	2900	2900	3350	2860	3000	3000	2900
Maximum resistance	N/mm <sup>2</sup>	77	74	74	77	71	48	67	68
Resistance at break	N/mm <sup>2</sup>	71	68	68	72	65	48	67	67
Elongation at max. load	%	3.6	4.4	4.7	3.6	4.7	1.9	2.7	3.8
Elongation at break	%	4.5	6.0	7.4	5.4	8.0	1.9	2.8	4.2
<b>Flexion</b>									
Modulus of elasticity	N/mm <sup>2</sup>	3200	3100	3100	3300	2760	3250	3100	3100
Maximum resistance	N/mm <sup>2</sup>	115	115	117	125	123	77	112	122
Elongation at max. load	%	4.8	5.4	5.6	4.6	6.4	2.3	3.7	5.3
Elongation at break	%	7.7	8	7.9	7.2	7.5	2.6	3.8	6.9
<b>Charpy impact strength</b>									
Resilience	kJ/m <sup>2</sup>	25	30	26	12	30	28	15	24
<b>Glass Transition / DSC</b>									
Tg1	°C	56	68	72	55	70	55	69	89
Tg1 max.	°C			76		76			92

Essais réalisés sur des éprouvettes de résine pure coulée, sans dégazage préalable, entre des plaques en acier.

Mesures effectuées suivant les normes :

Traction : NF T51-034

Flexion : NF T51-001

Choc Charpy : NF T51-501

Transition vitreuse : ISO 11357-2 : 1999 -5°C/180°C sous azote

Tg1 ou Onset : 1er point à 20 °C/mn

Tg1 maximum ou Onset : deuxième passage



## Anexo 2 – Variação de espessura dos provetes

	Provetes biaxiais - orientação 0° / 90°					Orientação 45°
PONTOS	PLACA Nº1	PLACA Nº2	PLACA Nº3	PLACA Nº5	PLACA Nº6	PLACA Nº6-45
PT -N1	0,347	0,537	0,851	1,232	1,385	1,660
PT -N2	0,360	0,570	0,823	1,134	1,377	1,718
PT -N3	0,316	0,527	0,776	1,171	1,459	1,595
PT -N4	0,359	0,565	0,750	1,331	1,500	1,498
PT -N5	0,349	0,562	0,786	1,317	1,430	1,730
PT -N6	0,360	0,561	0,816	1,232	1,414	1,690
PT -N7	0,355	0,571	0,789	1,281	1,448	1,870

	Provetes Uniaxiais – orientação 0°/90°				
PONTOS	PLACA Nº1	PLACA Nº2	PLACA Nº3	PLACA Nº5	PLACA Nº6
PT -N1	0,348	0,500	0,709	1,199	1,230
PT -N2	0,291	0,489	0,738	1,236	1,298
PT -N3	0,304	0,518	0,753	1,183	1,322
PT -N4	0,282	0,480	0,727	1,084	1,285
PT -N5	0,305	0,496	0,696	1,103	1,303
PT -N6	0,312	0,472	0,727	1,064	1,327
PT -N7	0,320	0,491	0,668	1,140	1,403



## Anexo 3 – Largura de banda

		m (g)	Q	Q/v2	$\omega_1$ (Hz)	$\omega_2$ (Hz)	$\Delta\omega$ (Hz)	$\omega_r$ (Hz)	keq (N/m)	$\zeta$
Forqueta C1	Cp1	450	108,00	76,36	118,60	119,60	1,00	118,90	263934,04	0,0042
	Cp2		19,50	13,78	122,80	123,50	0,70	123,15		0,0028
	Cp3		0,15	0,11	123,55	124,20	0,65	123,80		0,0026
Forqueta T1	Cp1	746	28,00	19,79	185,80	188,60	2,80	186,50	1065829,71	0,0075
	Cp2		6,10	4,31	190,80	193,50	2,70	191,50		0,0070
	Cp3		0,07	0,05	192,20	194,50	2,30	193,00		0,0060
Forqueta T2	Cp1	656	31,20	22,06	166,00	169,00	3,00	166,90	756953,64	0,0090
	Cp2		6,92	4,89	171,70	174,20	2,50	172,50		0,0072
	Cp3		0,09	0,06	173,00	175,30	2,30	173,75		0,0066
Forqueta T3	Cp1	608	55,00	38,89	158,10	159,55	1,45	158,60	635263,36	0,0046
	Cp2		14,00	9,90	163,95	164,95	1,00	164,40		0,0030
	Cp3		0,11	0,07	165,00	166,00	1,00	165,30		0,0030
Forqueta T4	Cp1	554	53,00	37,47	146,20	147,50	1,30	146,80	492474,00	0,0044
	Cp2		12,50	8,83	150,90	151,80	0,90	151,30		0,0030
	Cp3		0,26	0,18	151,80	153,00	1,20	152,30		0,0039
Forqueta N	Cp1	355	47,50	33,58	53,05	54,10	1,05	53,35	42789,39	0,0098
	Cp2		7,60	5,37	55,60	56,65	1,05	56,20		0,0093
	Cp3		0,02	0,01	56,05	56,65	0,60	56,30		0,0053