



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Desenvolvimento de sistema de propulsão para protótipo de veículo de tração humana

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

Autor

João Manuel Pires Duarte

Orientador

Professor Doutor Pedro Mariano Simões Neto

Júri

Presidente Professor Doutor Ana Paula Bettencourt Martins Amaro
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Professor Doutor Pedro Mariano Simões Neto
Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra
Engenheiro Renato Miguel Vendinha de Jesus Ferreira
Responsável de Engenharia na Empresa WhyseMadness®

Colaboração Institucional



Devido ao acordo de confidencialidade estabelecido com a empresa WhyseMadness®, algumas partes deste documento foram truncadas, aparecendo no documento assinaladas com a palavra CONFIDENCIAL

Coimbra, Setembro, 2013

O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.

Albert Einstein

Aos meus Avós,
aos meus Pais.

Agradecimentos

Este trabalho encerra mais um capítulo da minha vida que não teria sido possível sem a colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais reservo este espaço para prestar o meu sincero reconhecimento.

Aos meus Pais, pelo amor, pela amizade, por todo o apoio e compreensão e por terem sido incansáveis ao longo de todo o meu percurso académico.

Ao Professor Doutor Pedro Mariano Simões Neto, pela orientação, disponibilidade e incentivo constante ao longo deste ano para que este projeto fosse bem sucedido até ao fim.

Ao Engenheiro Renato Vendinha pela oportunidade de integrar um projeto desta natureza, pela orientação e disponibilidade dentro e fora das instalações da WhyseMadness®, pelos conhecimentos transmitidos, pela integração na equipa de trabalho e pela amizade.

Ao Engenheiro José Bandeira pela ajuda, pelas discussões construtivas, ensinamentos transmitidos e pela amizade.

Ao Lino Ferreira pela amizade e disponibilidade constante, ao Miguel Rodrigues pelo tempo dedicado aos *sketches*, ao Miguel Samarra pela ajuda preciosa para que o projeto terminasse em tempo útil e a todos os restantes colaboradores da WhyseMadness®, Solien e Sirmaf, que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso deste projeto.

Ao Rui Honório pela amizade sincera e companheirismo ao longo dos últimos cinco anos.

Ao Ricardo Moreira, pelo companheirismo ao longo desta etapa.

A todos os meus amigos e colegas de curso por todo o apoio e amizade.

Ao Professor Doutor Fernando Antunes e ao Professor Doutor Pedro Carvalheira pela excelência no apoio, profissionalismo e disponibilidade que sempre manifestaram.

A todos os docentes e colaboradores do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra (FCTUC) que direta ou indiretamente contribuíram para que eu tivesse chegado até aqui.

Ao clube de remo da Associação Académica de Coimbra pela disponibilidade e colaboração que manifestaram.

A todos um sincero Muito Obrigado!

João Duarte

Resumo

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de propulsão para um veículo de tração humana que conjuga uma plataforma móvel de três rodas com o movimento do desporto aquático remo. Dada a sua origem, este veículo foi batizado de *Rowtrike*.

Este trabalho conta com um estudo de mercado relativo a produtos já existentes que apresentem algumas semelhanças com o produto que se vai criar, uma análise biomecânica do movimento do utilizador, uma apresentação dos diversos conceitos que estiveram na origem do sistema de propulsão do equipamento, um estudo energético que permitiu otimizar a relação de transmissão do veículo e conseguir estimar qual a sua velocidade máxima bem como uma análise estrutural de alguns componentes com base no método dos elementos finitos.

Palavras-chave: Sistema de propulsão, *Rowtrike*, Biomecânica, Estudo energético.

Abstract

The main objective of this work is the development of a propulsion system for a human traction vehicle which combines a mobile three wheel platform with the aquatic sport rowing movement. Considering its origin, this vehicle was named Rowtrike.

This work presents a benchmarking analysis of the existing products which have some similarity with the product that will be created, a biomechanical analysis of the user movement, a presentation of all the concepts that were on the origin of the propulsion system of the equipment, an energetic study which provided the optimization of the gear ratio of the vehicle and predict which will be its maximum speed as well as a structural analysis of some of its components based on the finite element method.

Keywords Propulsion system, Rowtrike, Biomechanical, Energetic study.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Simbologia e Siglas	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas	xviii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação e Objetivos	1
1.2. Estado da Arte.....	2
1.2.1. <i>Rowbike</i>	2
1.2.2. <i>Tripendo</i>	4
1.2.3. <i>Rowing Bike</i>	5
1.2.4. Ergómetro de Remo.....	7
2. ANÁLISE BIOMECÂNICA.....	9
2.1. Biomecânica do Remo	9
2.1.1. Composição da remada.....	9
2.1.2. Esforços envolvidos.....	12
2.2. Biomecânica do Ciclismo	14
2.2.1. Composição da pedalada	14
2.2.2. Esforços envolvidos.....	15
2.3. Comparação entre os movimentos.....	17
3. ANÁLISE CONCEPTUAL.....	19
3.1. Mecanismo de <i>Scotch Yoke</i>	19
3.2. Mecanismo de Pinhão-Cremalheira.....	20
3.3. Mecanismo de alavancas	21
3.4. Mecanismo de corrente.....	22
3.5. Mecanismo de remos	23
3.6. Mecanismo adotado	24
4. SISTEMA DE PROPULSÃO	25
4.1. Posições do utilizador	25
4.2. Banco e haste de propulsão.....	26
4.2.1. Guiamento	27
4.2.2. Decomposição do movimento	28
4.2.3. Batentes mecânicos.....	29
4.3. Transmissão de potência	30
4.4. Mecanismo de retorno	32
5. ANÁLISE QUANTITATIVA.....	35
5.1. Análise Cinemática	35
5.2. Análise Dinâmica.....	38
5.2.1. Energia Cinética	39

5.2.2.	Peso do <i>Rowtrike</i> e utilizador	40
5.2.3.	Momento de atrito de rolamento	41
5.2.4.	Força do vento	41
5.2.5.	Força produzida pelo utilizador	43
5.2.6.	Atritos internos	43
5.2.7.	Formulação Geral	43
5.2.8.	Resultados obtidos	46
6.	SISTEMA DE CENTRAGEM	51
6.1.	Implementação do Sistema	52
7.	ANÁLISE ESTRUTURAL	55
7.1.	Apoio de pés	56
7.2.	Estrutura do banco	58
8.	CONCLUSÕES	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
	ANEXO A	65
	APÊNDICE A	71
	APÊNDICE B	73
	APÊNDICE C	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. <i>Rowbike 720 Crew</i> (Rowbike, 2010).	2
Figura 1.2. Pormenores <i>Rowbike</i> (Imagem adaptada de Rowbike, 2010).....	3
Figura 1.3. <i>Tripendo</i> (Tripendo, 2013).....	4
Figura 1.4. Sistema de propulsão do <i>Tripendo</i> (Tripendo, 2013).....	5
Figura 1.5. a) <i>Rowingbike</i> ; b) Pormenor do tambor da <i>Rowingbike</i> (Rowingbike, 2013)....	6
Figura 1.6. <i>Concept2-model A</i> (Concept2, 2013).....	7
Figura 1.7. <i>Concept2-model D</i> (Concept2, 2013).	8
Figura 2.1. Músculos exercitados no ataque (Imagem adaptada de Concept2, 2013).	10
Figura 2.2. Músculos exercitados no impulso (Imagem adaptada de Concept2, 2013).....	10
Figura 2.3. Músculos exercitados na saída (Imagem adaptada de Concept2, 2013).....	11
Figura 2.4. Músculos exercitados na recuperação (Imagem adaptada de Concept2, 2013).12	
Figura 2.5. Célula de carga instalada entre a corrente e o manípulo do ergómetro (Baptista, 2005).....	13
Figura 2.6. Curva de força em função do tempo de um remador (Baptista, et al., 2008). ..	13
Figura 2.7. Etapas da pedalada e músculos exercitados (Cyclingfitness, 2013).	14
Figura 2.8. Músculos exercitados durante a pedalada (Imagem adaptada de Cyclingclub, 2011).....	15
Figura 2.9. Força aplicada pelo ciclista no pedal (Coyle, et al., 1990).	16
Figura 2.10. Binário produzido pelo ciclista numa pedalada (Coyle, et al., 1990).	17
Figura 2.11. a) Taxa de consumo de energia em função da RPE (unidade de medida da intensidade do esforço físico); b) Frequência cardíaca em função da RPE; TM – Passadeira Rolante; SS – <i>Stepping</i> ; RE – Remo Ergómetro; XC – Elíptica; CE – Ciclo Ergómetro; AD – Bicicleta utilizando a resistência do ar (Zeni, et al., 1996).....	18
Figura 3.1. Mecanismo de <i>Scotch-Yoke</i> (Grabcad, 2013).	20
Figura 3.2. Mecanismo de Pinhão-Cremalheira (Alibaba, 2013).....	20
Figura 3.3. <i>Kettler Favorit</i> (Rowingmachinereviews, 2013).	21
Figura 3.4. Implementação do mecanismo de alavancas.....	21
Figura 3.5. <i>Concept2-model D</i> (Concept2, 2013).	22
Figura 3.6. <i>Kettler Kadett</i> (Kettler, 2013).	23
Figura 3.7. Implementação do mecanismo de remos.	24

Figura 4.1. Medição de pontos-chave de uma embarcação de remo (Imagem adaptada de Kleshnev, 2006).....	25
Figura 4.2. Medição de pontos-chave de um ergómetro (Imagem adaptada de Fitnessnetwork, 2013).	26
Figura 4.3. Banco e haste de propulsão.	27
Figura 4.4. Esforço aplicado no patim.....	27
Figura 4.5. Guiamento do sistema de propulsão.	28
Figura 4.6. Decomposição do movimento do banco e da haste de propulsão.	29
Figura 4.7. Batentes mecânicos da haste de propulsão.....	30
Figura 4.8. Transmissão motora.	30
Figura 4.9. Veio intermédio que une o pinhão motriz e a coroa.	31
Figura 4.10. Transmissão movida.	31
Figura 4.11. Mecanismo de retorno da corrente motriz.	33
Figura 5.1. Deslocamento das mãos e da corrente motriz.	36
Figura 5.2. Sistema de transmissão; [1] Pinhão motriz; [2] Coroa; [3] Pinhão do cubo de mudanças internas; [4] Roda traseira.	36
Figura 5.3. Diagrama de corpo livre do <i>Rowtrike</i>	39
Figura 5.4. Força peso em função do ângulo de inclinação do solo.....	40
Figura 5.5. Determinação do C_x no <i>Project Falcon wind tunnel simulation</i>	42
Figura 5.6. Implementação do método de Euler no <i>Excel</i>	45
Figura 5.7. Determinação da velocidade máxima teórica do <i>Rowtrike</i>	46
Figura 5.8. Curva teórica de evolução da velocidade do <i>Rowtrike</i> em função do tempo num trajeto horizontal, com variação da mudança engrenada.	47
Figura 5.9. Comparação da curva de velocidade em função do tempo a ritmos de utilização diferentes num plano horizontal.	48
Figura 5.10. Comparação da curva de velocidade em função do tempo a ritmos de utilização diferentes numa subida com 5% de inclinação.	49
Figura 5.11. Velocidade terminal numa descida com 5% de inclinação.	50
Figura 5.12. Evolução da aceleração em função do tempo numa descida com 5% de inclinação.....	50
Figura 6.1. Protótipo construído para testar a inclinação do <i>Rowtrike</i>	51
Figura 6.2. Sistema de centragem implementado no <i>Rowtrike</i>	52
Figura 6.3. Pormenor do sistema de centragem.	53
Figura 6.4. Funcionamento do sistema de centragem na situação de inclinação para o lado esquerdo; a) Rotação do braço esquerdo; b) Pormenor do batente mecânico do braço direito.....	53

Figura 7.1. Modelo numérico da chapa de apoio de pés.	56
Figura 7.2. Visualização das tensões de <i>Von Mises</i> do modelo do apoio de pés utilizando um fator de escala superior.....	57
Figura 7.3. Visualização da variação do deslocamento do modelo do apoio de pés utilizando um fator de escala superior.....	58
Figura 7.4. Modelo numérico da estrutura do banco.....	59
Figura 7.5. Visualização das tensões de <i>Von Mises</i> da estrutura do banco utilizando um fator de escala superior.....	59
Figura 7.6. Visualização da variação do deslocamento do modelo da estrutura do banco utilizando um fator de escala superior.....	60
Figura 8.1. <i>Sketch</i> da versão final do <i>Rowtrike</i>	62
Figura A.1. Evolução da aceleração em função do tempo num trajeto horizontal a um ritmo de cruzeiro.	71
Figura A.2. Evolução do deslocamento em função do tempo num trajeto horizontal a um ritmo de cruzeiro.	71
Figura B.1. <i>Rowtrike</i>	73
Figura B.2. <i>Rowtrike</i> inclinado para a direita.....	73
Figura B.3. <i>Rowtrike</i> visto de trás.	74
Figura B.4. <i>Crash test dummy</i> com cerca de 1,60 m ao lado do <i>Rowtrike</i>	74
Figura B.5. <i>Crash test dummy</i> sentado no <i>Rowtrike</i>	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1. Relações de transmissão de cada mudança do cubo de mudanças internas (Shimano, 2013).	38
Tabela 5.2. Sistema de transmissão final.....	47
Tabela 7.1. Propriedades mecânicas do AlMg4.5Mn.....	55

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

a – Aceleração

A_f – Área frontal

C_x – Coeficiente de arrasto aerodinâmico

C_r – Coeficiente de resistência ao rolamento

$C.M.$ – Centro de massa

dW – Trabalho elementar de uma força ou momento

E_c – Energia cinética

F_a – Força de atrito

F_N – Componente normal de uma força F aplicada numa superfície

F_T – Componente tangencial de uma força F aplicada numa superfície

i – Relação de transmissão

I – Momento de Inércia

m – Massa

$M_{a_{rol}}$ – Momento de atrito de rolamento

N – Reação normal

p – Pressão

P – Peso

$P_{requerida}$ – Potência requerida

R – Raio

v – Velocidade linear

Z – Número de dentes de uma engrenagem

α – Ângulo de inclinação

Δx – Deslocamento

Δt – Intervalo de tempo

ρ – Massa volúmica

ω – Velocidade angular

Siglas

AAC – Associação Académica de Coimbra

CAD – *Computer Aided Design*

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra

MEF – Método dos Elementos Finitos

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e Objetivos

Este trabalho tem como motivação o desenvolvimento de um sistema de propulsão para um protótipo de um veículo de tração humana. Este veículo foi batizado de *Rowtrike* e, como o próprio nome indica, será constituído por três rodas e utilizará um sistema de propulsão baseado no movimento de um dos desportos mais antigos e que envolve maior esforço físico ao utilizar grande parte dos principais grupos musculares do corpo humano: o remo. A ideia surgiu quando o Engenheiro Renato Vendinha observava um treino *indoor* aparentemente aborrecido de atletas de remo e pensou: e se os ergómetros andassem?

O *Rowtrike* é, assim, um veículo híbrido de *fitness* e transporte, que permitirá aos seus utilizadores trocar os treinos aborrecidos fechados dentro de um ginásio pelo ar livre. Um estudo realizado pela Universidade de *Exeter* concluiu que as pessoas se divertem mais e se sentem mais satisfeitas ao praticar exercício ao ar livre, tendo a maior parte dos participantes no estudo revelado uma grande vontade de repetir a atividade mais tarde (Thompson, et al., 2011). Assim, este equipamento pode ser responsável por melhorias como: perda de peso, redução dos níveis de *stress*, melhorias no desempenho cardiovascular, aumento da resistência e aumento da flexibilidade.

Por outro lado, tendo em conta a atual utilização excessiva de combustíveis fósseis, bastante prejudiciais ao meio ambiente e à saúde do ser humano, o *Rowtrike* apresenta-se como um meio de transporte alternativo amigo do ambiente. Em suma, este equipamento cria um compromisso bastante interessante entre lazer, saúde, bem-estar e preservação do meio ambiente.

Este projeto insere-se na gama de produtos da recém-nascida WhyseMadness®, uma marca da empresa de Soluções Integradas de Engenharia Solien. Esta marca define-se como Engenharia Criativa, pretendendo entrar no mercado para desenvolver e criar produtos. Tudo isto só é possível graças a uma equipa multidisciplinar que questiona sempre “o estado das coisas” e que mistura funcionalidade “sensata” com criatividade, inovação, irreverência e uma dose de “loucura”.

O objetivo final será, então, desenvolver um sistema de propulsão para o *Rowtrike* que se assemelhe ao movimento do desporto aquático que lhe serviu de inspiração. Ramalho Ortigão disse numa publicação de 1948 da *Almanaque de sports*: “Remar é dizer ao oceano: chega-te para trás que vai aqui um homem! E o oceano obedece.”. Para que esta frase continue a ter sentido neste projeto, o oceano tem de ser substituído pelo solo e este terá que se chegar para a frente e não para trás. Assim, o sistema de propulsão a implementar terá que ter em conta questões como o estudo energético do movimento, a funcionalidade pretendida para o equipamento e a ergonomia do utilizador.

1.2. Estado da Arte

Antes de dar início ao desenvolvimento do projeto foi feita uma pesquisa com o intuito de perceber quais os produtos que já se encontravam no mercado que pudessem ter semelhanças com o conceito do *Rowtrike*. Os equipamentos encontrados serão agora apresentados.

1.2.1. *Rowbike*

A *Rowbike* trata-se de uma bicicleta que, em vez dos tradicionais pedais, utiliza um sistema de propulsão semelhante ao de um ergómetro de remo, conforme se pode observar na Figura 1.1. À primeira vista pode até parecer um equipamento que será facilmente dominado pelos utilizadores das bicicletas tradicionais, no entanto o movimento de arranque parece um pouco intimidador para o utilizador.



Figura 1.1. *Rowbike* 720 Crew (Rowbike, 2010).

Os principais componentes do sistema de propulsão deste equipamento são a cassete de velocidades, o desviador, a corrente, a haste de propulsão, duas polias (uma instalada no fundo e outra na lateral da haste de propulsão) e uma corda elástica. Todos estes elementos estão identificados na Figura 1.2. A direção, por sua vez, é comandada pelo guiador, que está ligado à roda dianteira através de um conjunto de espias de aço.



Figura 1.2. Pormenores *Rowbike* (Imagem adaptada de Rowbike, 2010).

Assim, para se movimentar com a *Rowbike*, o utilizador tem de se impulsionar com os pés, deslizando o banco para trás e puxando a haste de propulsão em direção ao seu peito, fazendo com que a polia instalada na lateral da haste puxe a corrente para a frente, que ao estar engrenada na cassete de velocidades faz mover a roda traseira e dar início ao movimento. A corrente não está em constante movimento como acontece com as bicicletas tradicionais, mas sim com um movimento para a frente e para trás, tipo serra. A corda elástica compensa a parte da corrente que é puxada para frente, permitindo desta forma que haja movimento. Quando a haste de propulsão volta à posição inicial, não existe qualquer transmissão de movimento devido ao sistema de cubo livre da roda traseira, que apenas permite que haja transmissão do movimento numa direção. O desviador permite deslocar a corrente entre os diversos carretos da cassete de velocidades, mantendo a corrente sempre devidamente tensionada e permitindo deste modo que se possa utilizar a mudança ideal durante cada percurso.

A polia lateral não existia no primeiro modelo da *Rowbike*, tendo sido implementada mais tarde por Dave Olson. Anteriormente, a corrente estava presa numa ponta ao fundo da haste de propulsão e na outra à corda elástica. Com a introdução da polia lateral, a corrente passou a estar presa numa ponta ao quadro da *Rowbike*, sendo que na

outra se manteve presa à corda elástica. Esta alteração traduziu-se no aumento da corrente movida em cada remada do utilizador para o dobro. Assim, todas as mudanças passaram a funcionar corretamente, o que não acontecia anteriormente, pois em certas subidas a primeira e segunda mudanças não engrenavam. A velocidade máxima do equipamento passou de 20 km/h para 35 km/h. Por fim, o *lag* existente no sistema das mudanças devido ao facto de em cada remada se começar num ponto morto em vez de ter um movimento contínuo como acontece nas bicicletas tradicionais a pedais, passou para metade.

1.2.2. *Tripendo*

O *Tripendo* trata-se de um *trike* reclinado e está ilustrado na Figura 1.3. Quando comparado com uma bicicleta tradicional, imediatamente se conclui que a segunda roda à frente e o baixo centro de gravidade lhe conferem uma maior estabilidade. A posição do assento confere um maior conforto na condução, especialmente quando combinado com o sistema de suspensão. A força transmitida aos pedais também é superior quando o utilizador está reclinado.



Figura 1.3. *Tripendo* (Tripendo, 2013).

O principal problema dos *trikes* é o risco de capotamento ao descrever uma curva a uma velocidade relativamente elevada. No entanto, neste equipamento, toda a estrutura se inclina nas curvas juntamente com as rodas, conferindo uma estabilidade bastante elevada. A direção é comandada pelas duas alavancas verticais.

O sistema de propulsão do *Tripendo* é constituído por uma cassette de velocidades e desviador traseiros, uma cassette de velocidades e desviador dianteiros, uma

cremalheira onde estão acoplados os pedais e duas correntes (uma exterior a unir as duas cassetes de velocidades e outra dentro do quadro a unir a cassette de velocidades dianteira à cremalheira pedaleira), conforme se pode observar na Figura 1.4. Assim, o utilizador ao pedalar faz mover a corrente dentro do quadro, transmitindo o movimento à cassette de velocidades dianteira. Por sua vez, a corrente exterior transmite o movimento da cassette de velocidades dianteira à traseira, fazendo com que a roda inicie o seu movimento de rotação. A roda traseira ao estar equipada com o sistema de cubo livre, apenas permite transferência do movimento numa direção.

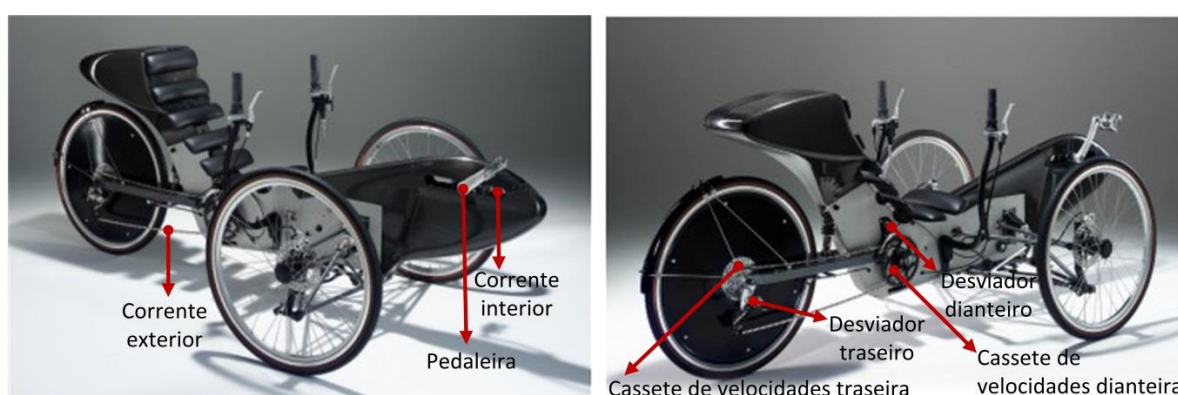


Figura 1.4. Sistema de propulsão do *Tripendo* (Tripendo, 2013).

1.2.3. *Rowing Bike*

A *Rowing Bike* trata-se de uma bicicleta reclinada que, em vez dos tradicionais pedais, utiliza um sistema de propulsão baseado no ergómetro de remo, embora com diferenças significativas, conforme se pode observar na Figura 1.5 a). Neste equipamento, contrariamente ao que acontece no ergómetro de remo, o banco do utilizador não desliza. Como tal, é o suporte de pés que desliza sobre uma calha, originando um movimento solidário de extensão e retenção das pernas e dos braços. O facto de o banco não deslizar e a sua posição reclinada conferem um maior conforto na condução.

O sistema de propulsão deste equipamento é constituído pela haste de propulsão, pelo suporte de pés deslizante, pelo tambor cónico traseiro, por duas cordas sintéticas de *dyneema*, uma corda elástica e duas polias (superior e inferior). A primeira corda, de cor azul na Figura 1.5 a), denominada por cabo de braçada, une a haste de propulsão ao suporte de pés deslizante, passando pela polia superior. A segunda corda, de cor amarela na Figura 1.5 b), denominada por cabo de propulsão, une diretamente o

suporte de pés deslizante ao tambor cónico traseiro e tem de estar sob tensão. A corda elástica, de cor preta na Figura 1.5 b), denominada por cabo de retorno, une o tambor cónico traseiro ao suporte de pés, passando pela polia inferior, e é responsável por manter a tensão no cabo de propulsão.

Assim, o utilizador movimenta a *Rowing Bike* começando por puxar a haste de propulsão em direção ao seu peito e impulsionando os pés para a frente. Isto faz com que o cabo de propulsão (amarelo) que está ligado ao tambor traseiro dê início ao movimento da roda. Quando as pernas atingem a máxima extensão possível, o movimento inverte-se, não sendo transmitido qualquer tipo de movimento à roda devido ao sistema de cubo livre. Como tal, o cabo de propulsão não está em constante movimento, mas sim com um movimento para a frente e para trás, tipo serra.

O sistema de velocidades deste equipamento também é fora do comum, sendo comandado por um botão no guiador que ao ser completamente pressionado, duas coisas acontecem: o tambor cónico traseiro é bloqueado, isto é, deixa de rodar em torno do seu próprio eixo, e o sítio onde o cabo de propulsão se enrola no suporte de pés fica desbloqueado. Nestas condições, o utilizador ao puxar a haste de propulsão em direção ao seu peito, o cabo de propulsão é desenrolado do suporte de pés e enrolado no tambor, passando para uma mudança mais alta. Por outro lado, se o utilizador empurrar a haste de propulsão na direção contrária do seu peito, o cabo de propulsão é desenrolado do tambor e enrolado no suporte de pés, passando para uma mudança mais baixa.

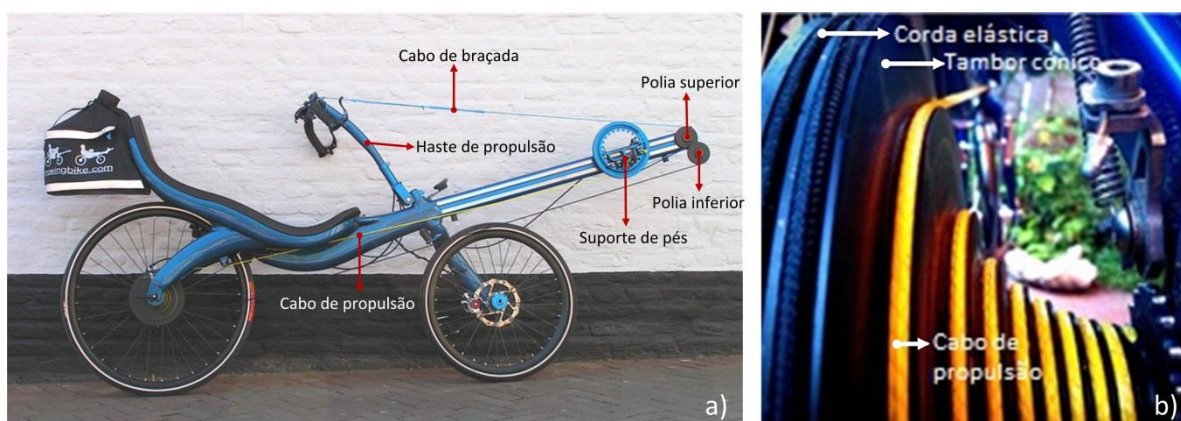


Figura 1.5. a) Rowingbike; b) Pormenor do tambor da Rowingbike (Rowingbike, 2013).

1.2.4. Ergómetro de Remo

O ergómetro de remo é um equipamento de *fitness* criado a pensar no treino dos praticantes de remo. Todavia, hoje em dia pode ser encontrado em praticamente todos os ginásios e é utilizado para o treino de quase todos os desportos incluindo fórmula 1, atletismo, vela, triatlo, rugby, futebol e basquetebol.

Esta máquina permite simular em terra o movimento realizado por um remador num barco dentro de água. A primeira réplica quase perfeita desse movimento data de 1980 e foi desenvolvida por dois engenheiros remadores dos Estados Unidos, os irmãos Peter e Dick Dreissigacker. A Figura 1.6 ilustra essa réplica, que recebeu o nome de *Concept2-model A*. Esta ideia surgiu num dia de neve em Vermont, onde os irmãos Dreissigacker e os colegas de remo se depararam com o grande problema de, devido ao rigoroso inverno que atravessavam, o rio onde costumavam treinar ter congelado, retirando-lhes tempo essencial da sua preparação para as competições. Assim, a partir de uma estrutura simples com um banco deslizante e um aro de uma roda de bicicleta, onde um conjunto de alhetas plásticas montadas em torno do aro criavam resistência do ar, nasceu o primeiro equipamento capaz de reproduzir um movimento muito semelhante ao de um remador dentro de água.



Figura 1.6. *Concept2-model A* (Concept2, 2013).

A Figura 1.7 mostra um equipamento dos dias de hoje, o *Concept2-model D*. Pode-se verificar que o conceito permanece idêntico, com a principal diferença a incidir no facto de neste modelo a resistência do ar poder ser variável, sendo controlada por uma alavanca que permite a entrada de maiores ou menores quantidades de ar para a roda de inércia, criando a resistência ao movimento. Assim, quanto mais ar entrar mais difícil se

torna mover a roda de inércia. Este sistema pode ser comparado ao sistema de mudanças de uma bicicleta. Também não deixa de ser evidente a presença de um pequeno monitor que permite visualizar o desempenho do utilizador em ritmo, *watts* e calorias.



Figura 1.7. *Concept2-model D* (Concept2, 2013).

2. ANÁLISE BIOMECÂNICA

A biomecânica pode ser definida como o estudo da estrutura fisiológica e das atividades dos organismos vivos dotados de movimento. Assim, neste capítulo interessa estudar a biomecânica do remo, uma vez que foi o movimento deste desporto que deu origem à criação do *Rowtrike*. Será também feita uma análise biomecânica ao movimento do ciclismo como termo comparativo.

2.1. Biomecânica do Remo

Remar é um movimento cíclico, onde as pernas, o tronco e os braços trabalham sincronizados. O corpo move-se sobre um assento deslizante devido à propulsão das pernas durante a remada, enquanto puxa um ou dois remos (Steinacker, 1993).

2.1.1. Composição da remada

A técnica apropriada do remo está dividida em quatro fases distintas: ataque, impulso, saída e recuperação. Após a recuperação inicia-se uma nova remada, voltando o remador à posição de ataque, sem que existam paragens entre remadas. Durante cada remada completa são solicitados os maiores grupos musculares do corpo humano: pernas, peito, costas e braços. De seguida serão descritas as diferentes fases do movimento, a posição do remador em cada fase e os grupos musculares que são exercitados durante cada fase.

2.1.1.1. Ataque

Na posição de ataque o remador segura firmemente o manípulo com as duas mãos, desloca o banco para a frente de modo a que os joelhos fiquem fletidos e em linha reta com a região do calcanhar do pé, mantém os ombros descansados, estende os braços e inclina o corpo para a frente conforme se pode observar na Figura 2.1.

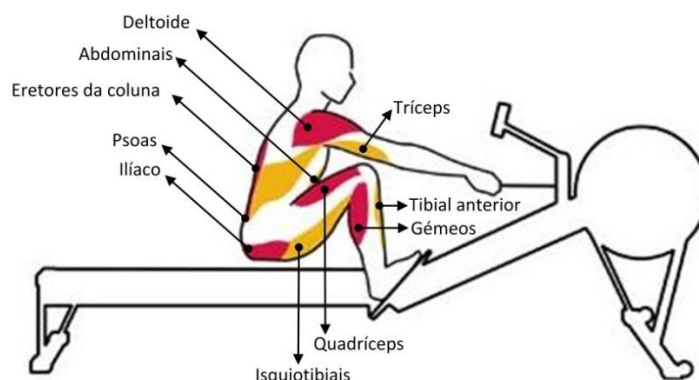


Figura 2.1. Músculos exercitados no ataque (Imagem adaptada de Concept2, 2013).

Nesta posição os músculos eretores da coluna estão relaxados para permitir a flexão do tronco, conseguida à custa dos músculos abdominais. Os músculos psoas maior e menor e o íliaco flexionam a bacia e as ancas. Os isquiotibiais e os gêmeos contraem enquanto os joelhos são fletidos. Os quadríceps alongam enquanto o reto femoral contribui para a flexão da anca. A flexão dorsal dos tornozelos é feita pelos tibiais anteriores. Os cotovelos são estendidos pelos tríceps e os punhos são segurados pelos músculos flexores dos dedos.

2.1.1.2. Impulso

O impulso começa com as pernas e as costas a fazerem todo o esforço. Nesta fase o remador estica as pernas e o tronco passa pela posição vertical. A meio do impulso, os braços ainda estão esticados e os ombros descansados, conforme se pode observar na Figura 2.2.

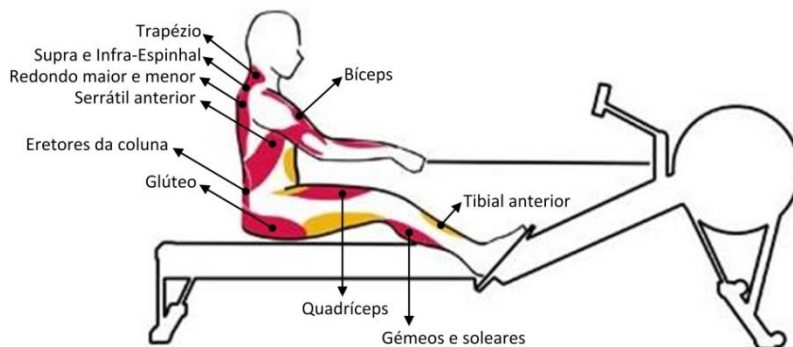


Figura 2.2. Músculos exercitados no impulso (Imagem adaptada de Concept2, 2013).

Nesta posição os quadríceps estendem os joelhos e os pés são fletidos pelos soleares e gêmeos. Uma série de músculos estabilizadores ajudam no apoio à região lombar. Todos os músculos do ombro estão contraídos, incluindo o supra e infra-espinhal, o redondo maior e menor e os bíceps. A omoplata é estabilizada pelo serrátil anterior e pelo músculo trapézio. Assim que os joelhos acabam de estender, a anca também é estendida pela contração do glúteo e dos gêmeos. A extensão das costas ocorre pela contração dos eretores da coluna.

2.1.1.3. Saída

No final do impulso, o manípulo é puxado pelos braços e ombros em direção ao abdômen, não tão alto como o peito, nem tão baixo como os quadris. As pernas estão esticadas e o tronco inclinado ligeiramente para trás, como se pode observar na Figura 2.3.

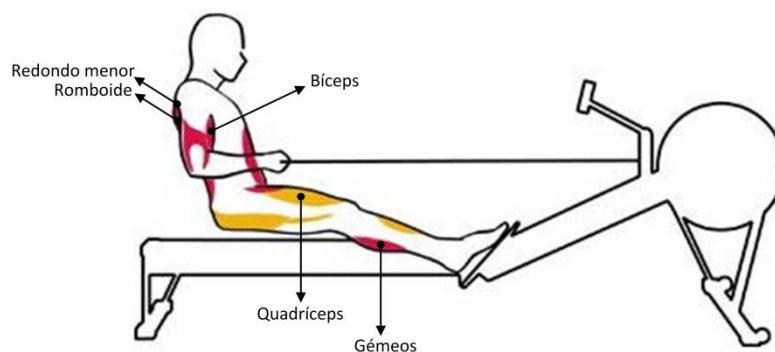


Figura 2.3. Músculos exercitados na saída (Imagem adaptada de Concept2, 2013).

Nesta posição os joelhos estão completamente estendidos e os tornozelos em flexão plantar. A extensão da anca e das costas é agora terminada. Os músculos da parte superior do corpo estão completamente contraídos para finalizar a remada. Os músculos flexor e extensor do antebraço contraem para estabilizar o pulso. O redondo menor, deltoide posterior e os bíceps estão a atuar na articulação do ombro. A omoplata é rodada para baixo pelo peitoral menor e puxada para trás pelo trapézio e pelo romboide.

2.1.1.4. Recuperação

A recuperação inicia-se pela extensão dos braços e movimento do corpo para a frente, articulado na anca. Isto posiciona o manípulo em frente aos joelhos para evitar a

interferência entre os joelhos e as mãos durante o movimento do assento para a frente, conforme se pode observar na Figura 2.4.

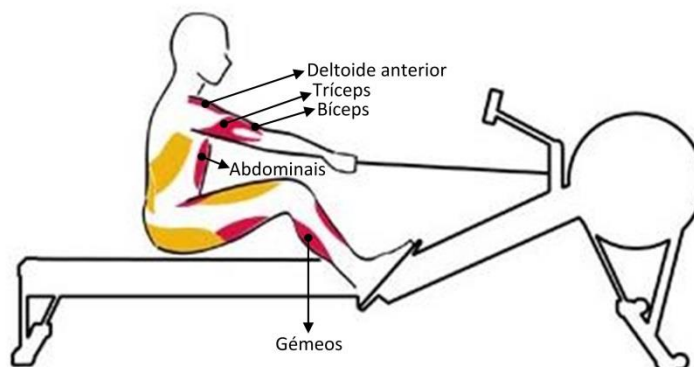


Figura 2.4. Músculos exercitados na recuperação (Imagem adaptada de Concept2, 2013).

Nesta posição os braços são empurrados para a frente pela ação dos tríceps, até os cotovelos atingirem a extensão total. Os deltoides anteriores contraem com o coracobraquial e com os bíceps e os braços sobem ligeiramente à medida que passam por cima dos joelhos. Os músculos abdominais fletem o tronco e uma vez que as mãos passam os joelhos, o slide inicia o seu movimento para a frente através da flexão dorsal dos tornozelos e da flexão da anca e dos joelhos.

No final da recuperação o atleta regressa à posição de ataque, dando início a uma nova remada. Entre remadas o corpo não deve chegar a parar completamente, de forma a manter um movimento contínuo.

2.1.2. Esforços envolvidos

Um estudo realizado por (Baptista, et al., 2008) submeteu um grupo de 15 remadores a um teste de ergómetro com o objetivo de investigar as diferenças nas respostas fisiológicas e biomecânicas entre as diferentes curvas de força em função do tempo dos remadores. A produção de força foi medida através de uma célula de carga instalada entre a corrente e o manípulo do ergómetro conforme se pode observar na Figura 2.5.



Figura 2.5. Célula de carga instalada entre a corrente e o manípulo do ergómetro (Baptista, 2005).

A Figura 2.6 apresenta os resultados obtidos para um mesmo remador da curva de força em função do tempo de uma remada.

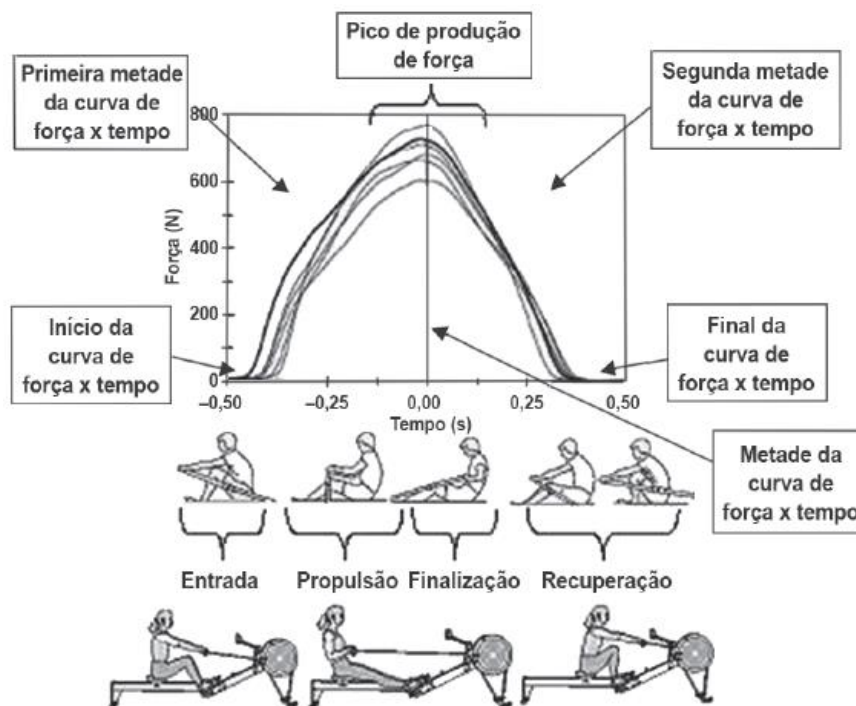


Figura 2.6. Curva de força em função do tempo de um remador (Baptista, et al., 2008).

2.2. Biomecânica do Ciclismo

Pedalar é um movimento cíclico em torno de um eixo em que apenas as pernas trabalham, sendo que o tronco e os braços apenas são usados para o equilíbrio e postura do atleta durante o movimento.

2.2.1. Composição da pedalada

Cada pedalada é constituída por duas etapas distintas: o impulso e a recuperação, conforme mostra a Figura 2.7.

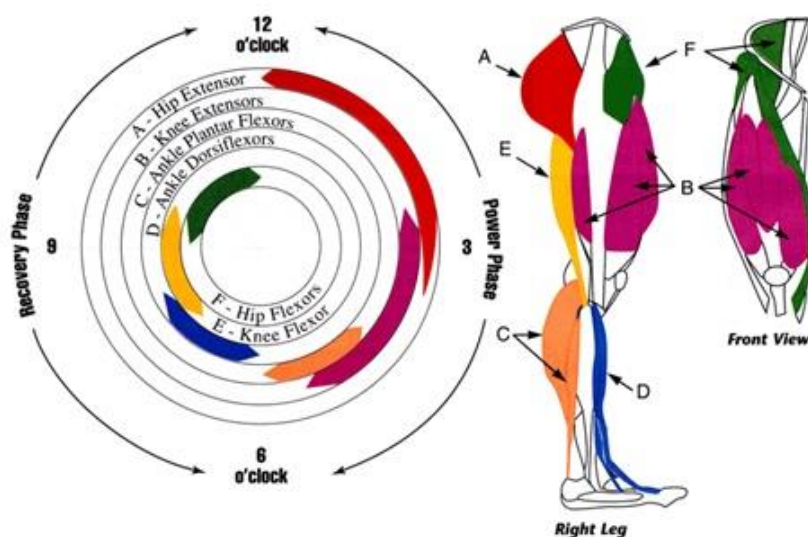


Figura 2.7. Etapas da pedalada e músculos exercitados (Cyclingfitness, 2013).

Fazendo uma analogia entre o movimento da perna no ciclismo e o ponteiro das horas num relógio convencional, a primeira fase da etapa de impulso inicia-se às 12H e vai até às 3H, exercitando o músculo glúteo máximo. A segunda fase decorre entre as 3H e as 5H, exercitando os quadríceps. Esta fase está normalmente associada à geração de mais força durante a pedalada, sendo particularmente importante em subidas de declive acentuado. A terceira e última fase da etapa de impulso decorre entre as 5H e as 6H e está a cargo dos músculos gêmeos e soleares.

A primeira fase da etapa de recuperação inicia-se às 6H e vai até às 8H, exercitando o músculo tibial anterior e o extensor longo dos dedos. A segunda fase decorre entre as 8H e as 10H, exercitando os músculos flexores do joelho que vão puxar o

calcanhar para cima em direção às nádegas. A terceira e última fase da etapa de recuperação inicia-se às 10H com a exercitação dos músculos flexores do quadril e termina às 12H, onde se inicia um novo ciclo, isto é, uma nova pedalada.

Como foi dito anteriormente, uma vez que no ciclismo apenas as pernas são responsáveis por produzir energia para transmitir movimento à bicicleta, somente os músculos das pernas são exercitados, ao contrário do remo que exercita todos os grandes grupos musculares do corpo humano. Em suma, os músculos exercitados são os glúteos, os quadríceps, os flexores do quadril e dos joelhos, os gêmeos e soleares, o tibial anterior e o flexor longo dos dedos, conforme mostra a Figura 2.8.



Figura 2.8. Músculos exercitados durante a pedalada (Imagem adaptada de Cyclingclub, 2011).

2.2.2. Esforços envolvidos

Um estudo realizado por (Coyle, et al., 1990) submeteu um grupo de 15 ciclistas a um teste de ergómetro com o objetivo de os avaliar fisiologicamente e biomecanicamente enquanto simulavam um contrarrelógio de 40 km, pedalando no laboratório em ergómetros de bicicleta. Este grupo de 15 atletas foi subdividido em dois grupos: o grupo 1 constituído por 9 elementos de elite e o grupo 2 constituído por 6 elementos de *performance* mais baixa.

Um ciclista ao pedalar aplica no pedal uma força que pode ser decomposta em duas componentes: a componente normal à superfície superior do pedal F_N e a

componente tangencial à superfície superior do pedal F_T . A aplicação desta força vai produzir um momento no eixo de rotação da pedaleira, conforme se pode observar na Figura 2.9, responsável por dar início ao movimento de rotação da roda da bicicleta.

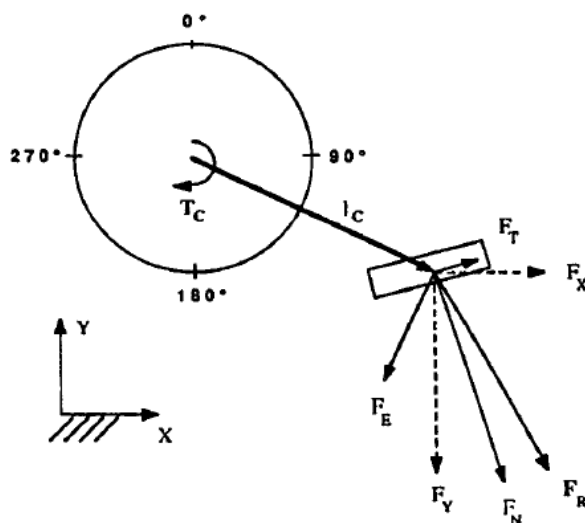


Figura 2.9. Força aplicada pelo ciclista no pedal (Coyle, et al., 1990).

De modo a medir a magnitude da força aplicada pelo atleta, neste estudo foi utilizado um pedal dinamómetro, equipado com um potenciómetro que emitia um sinal analógico indicando a orientação do pedal e dois sinais analógicos indicando a magnitude das componentes radial e tangencial da força aplicada no pedal. O ergómetro de ciclismo por sua vez também estava equipado com um potenciómetro ligado à pedaleira que emitia um sinal analógico diretamente relacionado com a posição da pedaleira (em graus).

A Figura 2.10 apresenta os resultados médios obtidos, para os dois grupos, do binário produzido numa pedalada.

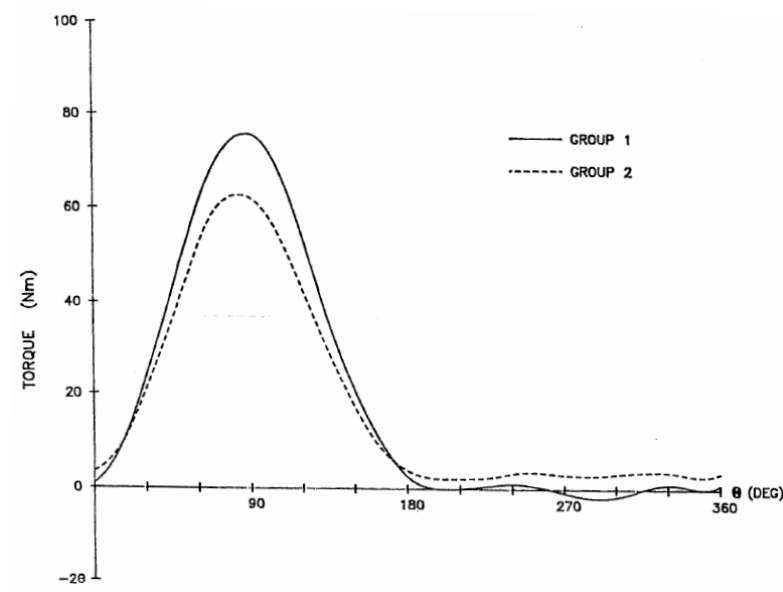


Figura 2.10. Binário produzido pelo ciclista numa pedalada (Coyle, et al., 1990).

2.3. Comparação entre os movimentos

A análise energética do movimento torna-se necessária para avaliar a eficácia do movimento que será adotado para a tração do *Rowtrike*, isto é, a potência transferida ao equipamento para o seu deslocamento, bem como a sua eficiência, ou seja, a energia consumida pelo utilizador ao deslocar-se no equipamento.

Um estudo realizado pelo Departamento de Ciências Biomédica e Zoológica da Universidade de Ohio (Hagerman, et al., 1988) revela que a potência transferida durante o movimento de ciclismo é superior à potência transferida durante o movimento do remo, concluindo deste modo que o ciclismo é mais eficaz. Por outro lado, este estudo também revela que o remo consome mais energia ao utilizador do que o ciclismo, o que o torna mais interessante do ponto de vista da prática de exercício físico. Assim, conclui-se que o remo embora sendo menos eficaz na transmissão de potência é mais eficiente no que respeita à excitação física do utilizador.

Um outro estudo (Zeni, et al., 1996) faz uma comparação exaustiva dos consumos energéticos ao utilizador em seis máquinas de exercício indoor (tapete rolante, bicicleta utilizando a resistência do ar, elíptica, ciclo-ergómetro, remo-ergómetro e *stepper*), concluindo que existe uma diferença significativa na taxa média de consumo de

energia com cada equipamento, variando até 1093 kJ/h (261 kcal/h). Assim, de todos os equipamentos analisados, o tapete rolante é aquele em que é consumida mais energia ao utilizador, conforme se pode verificar no gráfico da Figura 2.11 a). Este gráfico também mostra que o consumo de energia do utilizador no remo-ergómetro é superior quando comparado com o do ciclo-ergómetro, confirmando os resultados do estudo do Departamento de Ciências Biomédica e Zoológica da Universidade de Ohio.

O gráfico da Figura 2.11 b) relaciona a frequência cardíaca com a intensidade de esforço físico, sendo que a frequência cardíaca aumenta em proporção à taxa metabólica requerida para o esforço de cada máquina. Assim, a uma maior frequência cardíaca corresponde um maior consumo de energia e como se pode verificar no gráfico da Figura 2.11 b), é ao remo-ergómetro que está associada uma maior frequência cardíaca quando comparado com o ciclo-ergómetro, confirmando mais uma vez os resultados obtidos anteriormente.

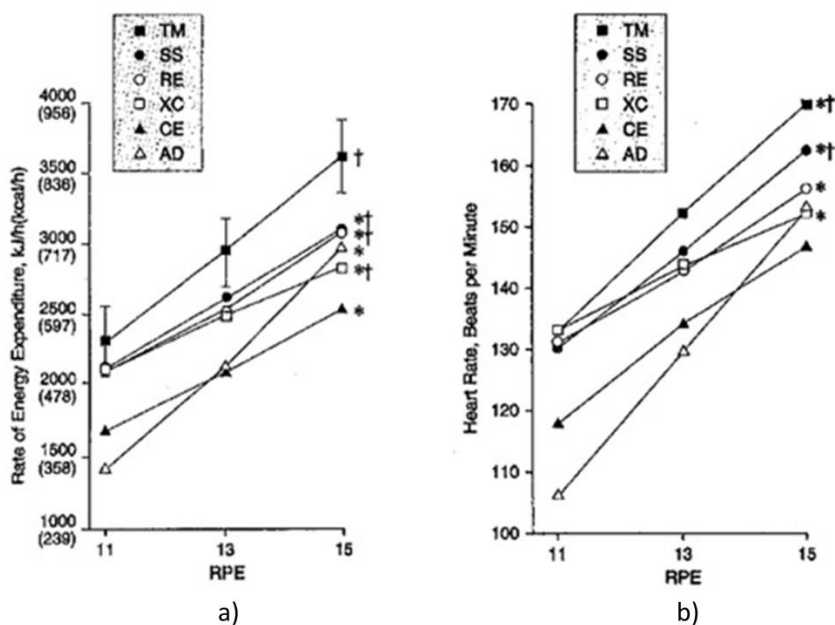


Figura 2.11. a) Taxa de consumo de energia em função da RPE (unidade de medida da intensidade do esforço físico); b) Frequência cardíaca em função da RPE; TM – Passadeira Rolante; SS – *Stepping*; RE – Remo Ergómetro; XC – Elíptica; CE – Ciclo Ergómetro; AD – Bicicleta utilizando a resistência do ar (Zeni, et al., 1996).

3. ANÁLISE CONCEPTUAL

Uma vez estabelecido um ponto de partida para o projeto, conceber um veículo de três rodas com um sistema de propulsão humana baseado no movimento do remo, e depois de realizada toda a pesquisa relativa a equipamentos semelhantes já existentes no mercado, seguiu-se a geração de conceitos.

Nesta fase foram apresentadas várias ideias para implementar quer o sistema de propulsão quer o sistema de direção do veículo, que após uma cuidadosa e fundamentada análise, conduziu a uma combinação entre estes dois sistemas que definiu o caminho a seguir no projeto. De seguida serão apresentados os conceitos que estiveram na origem da propulsão do *Rowtrike*, bem como a análise dos pontos fortes e desafios que levaram à tomada de decisão final.

3.1. Mecanismo de *Scotch Yoke*

O mecanismo de *Scotch Yoke*, conforme está ilustrado na Figura 3.1, permite transformar o movimento de translação em rotação e vice-versa. Assim, a ideia seria transformar o movimento para a frente e para trás do atleta no remo em movimento de rotação e de seguida transmiti-lo às rodas. Este mecanismo apresentava como principal ponto forte o facto de transmitir potência quer na fase de ataque quer na fase de recuperação do atleta, criando deste modo um movimento contínuo. No entanto, o seu ponto forte rapidamente se transformou num desafio dada a dificuldade em transmitir potência da fase de recuperação numa subida, por exemplo.

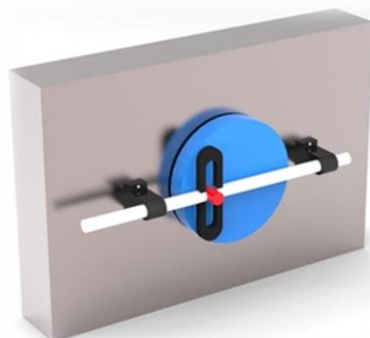


Figura 3.1. Mecanismo de *Scotch-Yoke* (Grabcad, 2013).

Este mecanismo é bastante similar ao mecanismo de biela-manivela, tendo as limitações deste para a aplicação em causa, nomeadamente o facto da distância linear percorrida ser constante e consequentemente de difícil adaptação a utilizadores de diferentes estaturas, e de existirem pontos mortos, onde a transmissão do movimento de translação para rotação não se faz pura e simplesmente.

3.2. Mecanismo de Pinhão-Cremalheira

O mecanismo de pinhão cremalheira, ilustrado na Figura 3.2, é um mecanismo bastante simples que permite transformar o movimento de translação em movimento de rotação e vice-versa. A sua simplicidade na conversão do movimento através do movimento da cremalheira sobre o pinhão foi, aliás, considerado o seu ponto forte. Por outro lado, a dificuldade em compatibilizar o comprimento necessário para a cremalheira, tendo em conta a amplitude do movimento do remo, com as dimensões do veículo foi o maior entrave à sua utilização.



Figura 3.2. Mecanismo de Pinhão-Cremalheira (Alibaba, 2013).

3.3. Mecanismo de alavancas

O conceito do acionamento por alavanca foi baseado numa máquina de remo *indoor* da marca *Kettler*, ilustrada na Figura 3.3.



Figura 3.3. *Kettler Favorit* (Rowingmachinereviews, 2013).

Neste conceito, o utilizador ao puxar as alavancas transformaria esse movimento em movimento rotativo numa roda dentada solidária com o eixo de rotação das alavancas. A Figura 3.4 ilustra o mecanismo que se pretendia de forma mais clara.

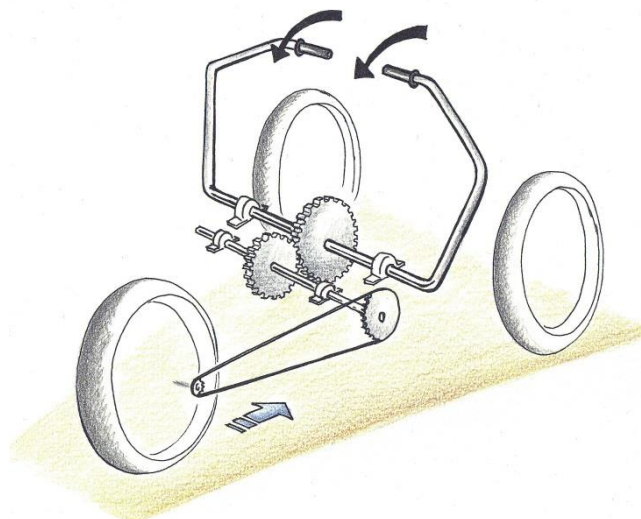


Figura 3.4. Implementação do mecanismo de alavancas.

Um dos pontos fortes deste mecanismo passa pela sua facilidade de implementação. Por outro lado, também seria um mecanismo de fácil compatibilização com o sistema de direção, que poderia passar pelos pés ou, com recurso a um diferencial,

utilizar também o movimento das alavancas para mudar de direção. Assim, o utilizador ao puxar a alavanca esquerda e mantendo a direita estática iria virar para o lado esquerdo e vice-versa. Uma vez que as alavancas trabalham num eixo fixo, toda a passagem de cabos para o sistema de mudanças e travagem também estaria facilitada.

O maior desafio neste conceito passa por aproximar o movimento descrito pelo utilizador ao movimento real do remo. Neste caso, a trajetória das mãos segue um arco de circunferência, o que se afasta bastante da realidade do desporto aquático.

3.4. Mecanismo de corrente

O conceito de acionamento com barra única foi baseado na máquina de remo *indoor* líder do mercado mundial, a *Concept2*. Os seus equipamentos são os mais utilizados em academias de remo e os que mais se aproximam ao movimento do atleta na água. A Figura 3.5 ilustra o modelo mais comum da *Concept2* nos dias de hoje, o modelo D.



Figura 3.5. *Concept2-model D* (Concept2, 2013).

Nestes equipamentos o utilizador durante o ataque puxa o punho que está ligado a uma roda de inércia que gere a resistência ao movimento e durante a recuperação o punho regressa à posição inicial devido a um sistema de elásticos.

A ideia seria o utilizador durante o ataque puxar uma corrente que estaria ligada a uma roda dentada, transformando o movimento de translação em rotação, e que durante a recuperação a corrente regressasse à posição inicial com recurso a um sistema de elásticos. Foram considerados dois cenários para este mecanismo, sendo que no primeiro o

movimento das mãos seria guiado e no segundo esse guiamento não existia, podendo as mãos flutuar tal como acontece nos ergómetros.

Este conceito tem como ponto forte principal o facto de efetuar uma boa réplica do movimento do remo. O mecanismo com guiamento das mãos ainda tem como pontos fortes o facto de permitir um maior equilíbrio do atleta bem como facilitar a ocultação de cabos para o sistema de mudanças e travagem. Por outro lado, este sistema apresenta desafios ao nível da implementação do guiamento, regulação da altura do punho à estatura do utilizador e passagem de cabos dada a amplitude do movimento. Por sua vez, o mecanismo sem guiamento das mãos tem como ponto forte o facto de ser ajustável à altura do utilizador e como principais desafios a passagem de cabos, compatibilização com a direção (impedindo que esta seja implementada nas mãos) e conferir a estabilidade necessária ao utilizador.

3.5. Mecanismo de remos

O conceito do mecanismo de remos foi inspirado no mecanismo existente nos barcos de remo bem como no modelo *Kadett* da máquina de remo *indoor* da marca *Kettler*, ilustrada na Figura 3.6.



Figura 3.6. *Kettler Kadett* (Kettler, 2013).

Neste conceito, cada remo estaria acoplado a uma engrenagem cónica em posição horizontal, que por sua vez estaria engrenada noutra engrenagem cónica em posição vertical, transformando deste modo o movimento da remada em movimento de rotação. A Figura 3.7 ilustra o mecanismo que se pretendia de forma mais perceptível.

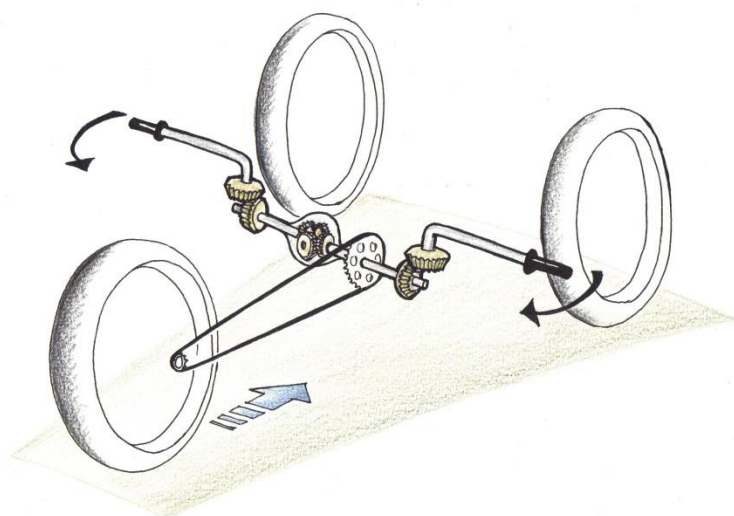


Figura 3.7. Implementação do mecanismo de remos.

O ponto forte deste conceito é sem dúvida o facto de este ser o mecanismo que melhor reproduz o movimento do remo. Por outro lado, o facto do eixo de rotação dos remos ser fixo também facilitaria a passagem de cabos necessária. Os principais desafios prendem-se com a compatibilização com o sistema de direção bem como o facto de este mecanismo obrigar a que o veículo tivesse uma largura tal que nos impediria de circular apenas numa faixa de uma ciclovia, sendo que a largura mínima de uma pista ciclável com separação física é de 1,30 metros (IMTT & GPIA, 2011).

3.6. Mecanismo adotado

Uma vez apresentados os diferentes conceitos que estiveram na origem do sistema de propulsão do *Rowtrike* e analisados os pontos fortes e desafios de cada um deles, foi o mecanismo de corrente com guiamento das mãos que ganhou ênfase e levou a que se deixasse o anteprojecto e se desse início ao projecto propriamente dito. Quanto à direção, ficou definido que esta seria nas mãos tipo guiador e que o veículo iria inclinar de modo a permitir maiores velocidades em curva, promover a “diversão” na utilização do *Rowtrike* e pelo facto de ser um movimento intuitivo.

4. SISTEMA DE PROPULSÃO

Antes de dar início ao desenvolvimento do sistema de propulsão propriamente dito, foi feita uma pesquisa para perceber exatamente como se decompunha o movimento do remo de modo a tentar respeitar ao máximo posições chave como o ângulo de apoio dos pés, curso do banco e as alturas entre pés, banco e mãos.

Este mecanismo pode ser dividido em duas partes distintas: o banco e haste de propulsão e o mecanismo de retorno.

4.1. Posições do utilizador

Como foi dito anteriormente, o mecanismo de propulsão implementado foi baseado nos equipamentos de remo-ergómetro da marca *Concept2*. Estes equipamentos por si só já são uma aproximação ao movimento real de um remador numa embarcação. Contudo, após uma reunião com membros do clube de remo da Associação Académica de Coimbra (AAC), foi-nos transmitida a informação de que o movimento descrito nestas máquinas já era uma aproximação razoável ao modelo aquático e que durante a execução do movimento da remada, a trajetória das mãos deveria ser a mais horizontal possível.

Durante esta visita às instalações do clube de Remo da AAC efetuaram-se algumas medições de pontos-chave do posicionamento do atleta para a realização da remada e confrontou-se com a informação encontrada na literatura. A Figura 4.1 mostra as dimensões mais importantes a reter de uma embarcação.

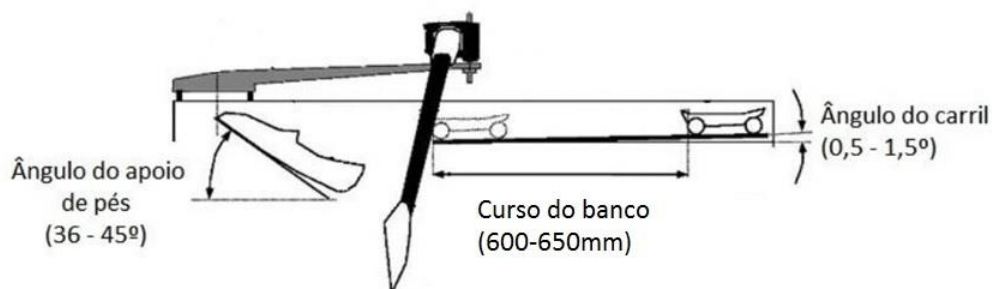


Figura 4.1. Medição de pontos-chave de uma embarcação de remo (Imagem adaptada de Kleshnev, 2006).

Uma vez retiradas as medidas necessárias na embarcação, também foram efetuadas medições nos ergómetros *Concept2*. A Figura 4.2 mostra as dimensões que foram recolhidas.

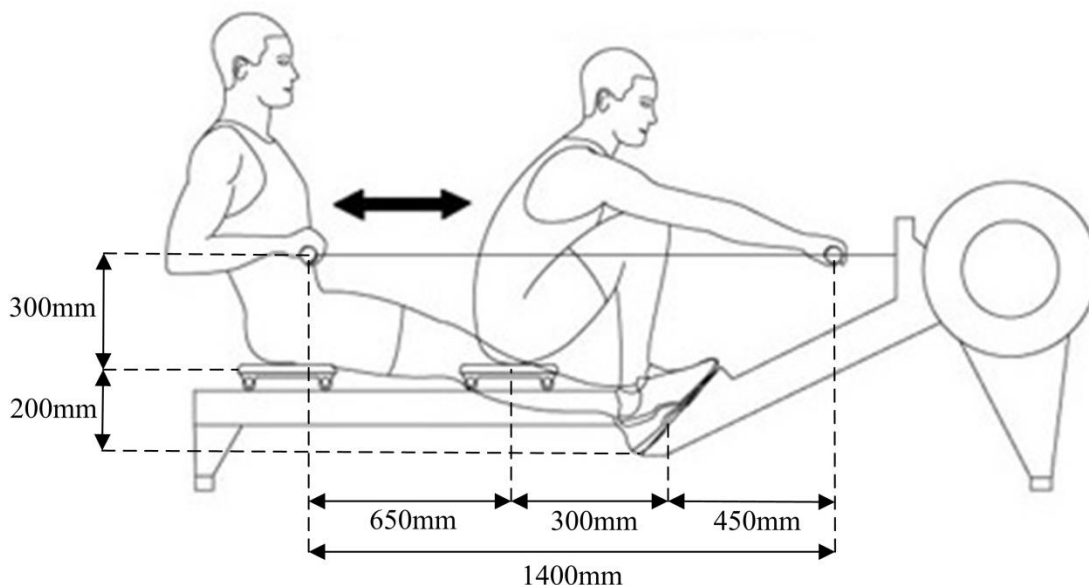


Figura 4.2. Medição de pontos-chave de um ergómetro (Imagem adaptada de Fitnessnetwork, 2013).

Recolhida toda a informação relativa às posições do utilizador, estavam reunidas as condições para desenvolver o sistema de propulsão, tentando sempre que possível respeitar ao máximo as condições mencionadas anteriormente.

4.2. Banco e haste de propulsão

Visto que se pretendia que o movimento das mãos fosse guiado, o banco e a haste de propulsão foram concebidos de modo a partilharem o seu guiamento, conforme se pode verificar na Figura 4.3. Este princípio construtivo permitiu que o mecanismo se tornasse mais compacto e económico.



Figura 4.3. Banco e haste de propulsão.

4.2.1. Guiamento

Para efetuar o guiamento do banco e da haste de propulsão foi selecionado um conjunto de dois patins e um rail da marca *INA* (ANEXO A). Para a seleção dos patins admitiu-se que o caso mais desfavorável seria os patins suportarem o peso do utilizador aplicado excentricamente, o equivalente ao utilizador levantar-se e sentar-se no equipamento, como mostra a Figura 4.4.

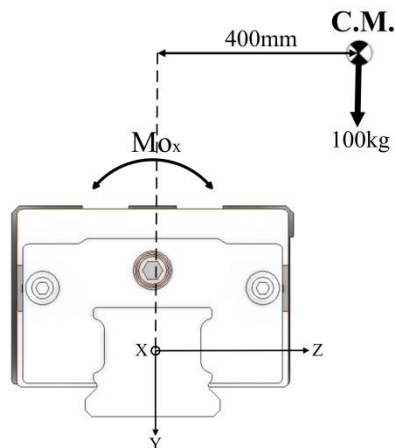


Figura 4.4. Esforço aplicado no patim.

Assim, para um utilizador de 100 kg , cujo centro de massa estivesse com uma excentricidade no eixo do z de 400 mm em relação ao plano central do patim, provocaria neste um momento tórsor em torno do eixo do x de 400 Nm . Depois de consultado o catálogo *online* da *INA* foram selecionados dois patins de quatro filas de esferas, estreitos e

de série longa (KWVE25-B-SL). Cada patim suporta até um momento torsor em torno do eixo do x de $745 Nm$, sendo que ao instalar dois patins obtém-se um fator de segurança superior a 2. O rail selecionado para acoplar os patins, de referência TKVD25-U, tem um comprimento de $1000 mm$ e a particularidade de ser apertado de baixo para cima, isto é, o próprio rail contém a furação roscada onde apertam os parafusos, evitando assim o uso de porcas e anilhas para fixar as ligações aparafusadas. A Figura 4.5 mostra em pormenor a instalação dos patins.



Figura 4.5. Guiamento do sistema de propulsão.

4.2.2. Decomposição do movimento

Como foi dito anteriormente, durante a execução do movimento da remada, a trajetória das mãos deveria ser a mais horizontal possível. Para que esta premissa fosse respeitada, a haste de propulsão teria de estar separada da estrutura do banco e ter um guiamento dedicado. Este guiamento tornava-se difícil de implementar dado o espaço que iria ocupar, conduzindo a um veículo exageradamente longo.

Deste modo, decidiu-se decompor o movimento das mãos em dois: um primeiro em que as mãos descrevem uma trajetória horizontal no início da remada, e um segundo em que as mãos descrevem uma trajetória curvilínea na ponta final da remada. Embora sabendo que ao efetuar esta decomposição o movimento se iria afastar da trajetória ideal, esta foi uma concessão por ser a solução que melhor articulava todos os desafios técnicos. A Figura 4.6 torna perceptível a decomposição do movimento efetuada.

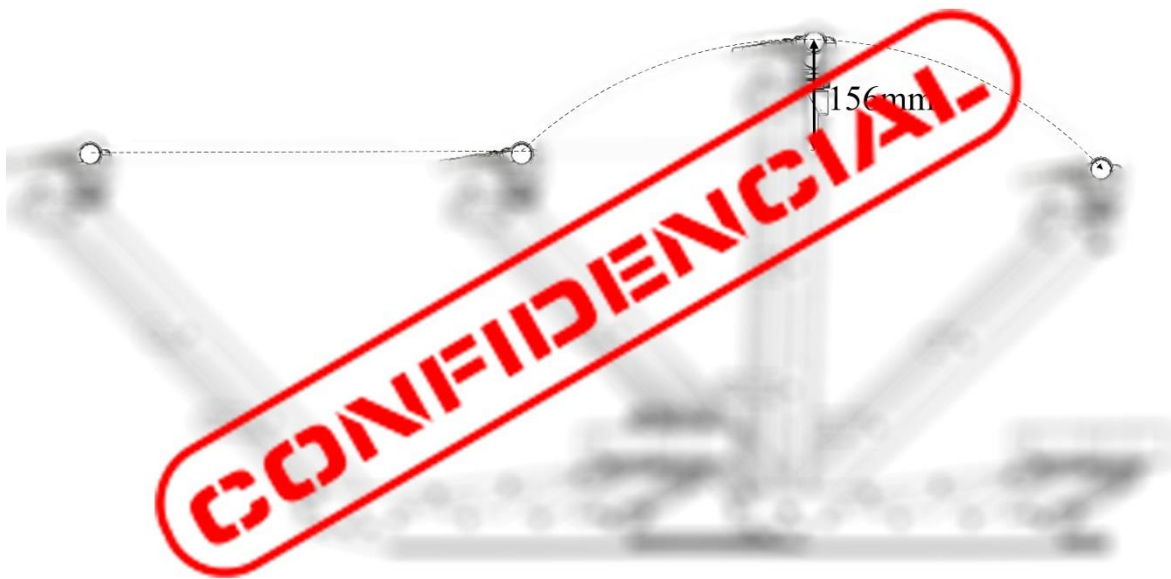


Figura 4.6. Decomposição do movimento do banco e da haste de propulsão.

Analisando a Figura 4.6 é possível observar o princípio construtivo adotado na haste de propulsão. Assim, é possível verificar que a haste está construída tendo por base um mecanismo de paralelogramo articulado. Este princípio construtivo permite que o guiador descreva uma trajetória curvilínea e plana, evitando que o utilizador torça os pulsos quando está na fase final da remada, prevenindo desta forma o aparecimento de lesões e aumentando o conforto. De notar que a posição das manetes se mantém fixa em relação às mãos durante todo o movimento, facilitando deste modo o seu acionamento. Também é de assinalar que o eixo de rotação da haste está situado o mais abaixo possível de forma a aumentar o raio da trajetória curvilínea descrita e assim desvirtuar o menos possível o movimento das mãos.

4.2.3. Batentes mecânicos

Outro aspeto que foi considerado no princípio construtivo da haste de propulsão foi a criação de dois batentes mecânicos para que a haste tivesse duas posições de repouso, uma na posição mais avançada e outra na posição mais recuada, limitando o movimento desta. Na Figura 4.7 mostra-se como foram criados os batentes mecânicos.

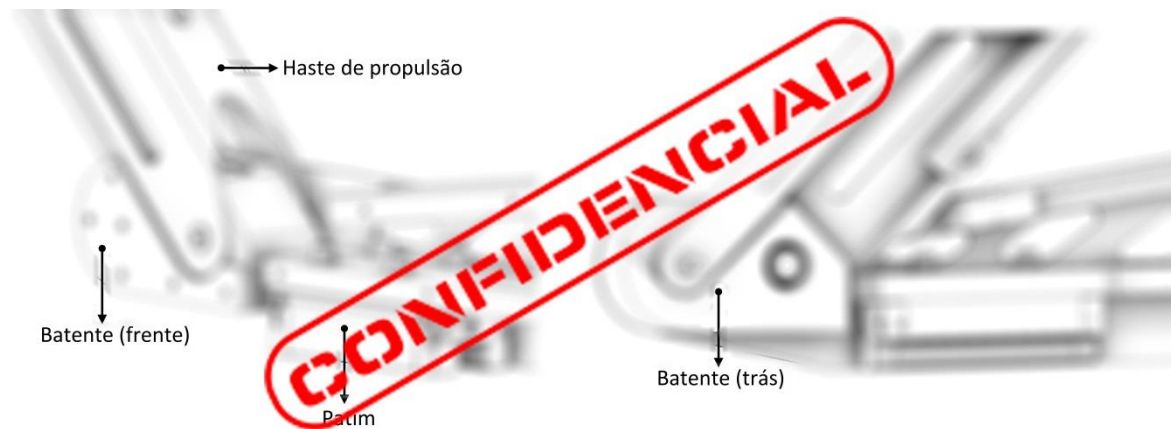


Figura 4.7. Batentes mecânicos da haste de propulsão.

4.3. Transmissão de potência

A transmissão de potência da haste de propulsão para a roda traseira faz-se através de duas transmissões mecânicas por corrente. A primeira transmissão, representada na Figura 4.8, une a haste propulsão ao pinhão motriz e será denominada de transmissão motora.



Figura 4.8. Transmissão motora.

Assim, o utilizador ao puxar a haste de propulsão faz com que a corrente que está acoplada ao pinhão motriz transforme o movimento de translação em movimento de

rotação. Por sua vez o pinhão motriz está ligado rigidamente a outro pinhão, denominado de coroa, conforme se pode verificar na Figura 4.9.

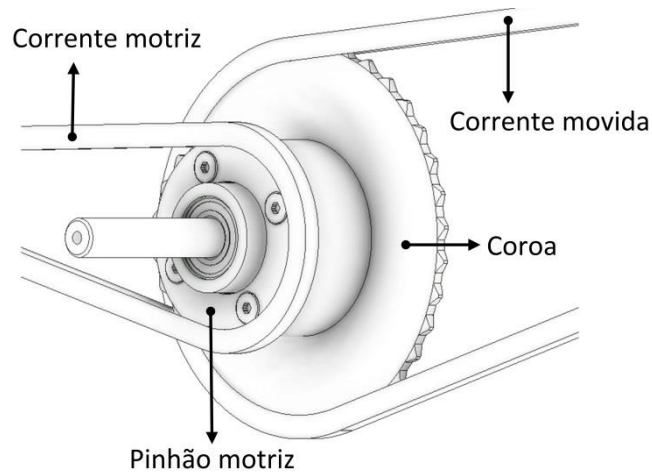


Figura 4.9. Veio intermédio que une o pinhão motriz e a coroa.

A coroa transmite o movimento de rotação do pinhão motriz à roda traseira através da segunda transmissão mecânica por corrente, denominada de transmissão movida, conforme mostra a Figura 4.10.



Figura 4.10. Transmissão movida.

Na Figura 4.10 também é possível verificar que em vez da tradicional cassette de velocidades que usualmente se encontra nas bicicletas, no *Rowtrike* optou-se por utilizar

um sistema de mudanças internas no cubo da roda traseira. Esta solução, apesar de ser mais dispendiosa, traz vantagens significativas. Com este sistema o engrenamento das mudanças é bastante mais suave e acima de tudo permite o engrenamento de qualquer mudança em qualquer altura, o que não acontece com a cassette de velocidades tradicional. Assim, se o utilizador parar numa subida em quarta velocidade, quando voltar a arrancar basta mudar o seletor de mudanças para a primeira velocidade e começar a remar. Observando a Figura 4.10 também é possível verificar que o veio intermédio da transmissão e a suspensão traseira partilham o mesmo eixo. Este princípio construtivo permitiu que não fosse necessário utilizar o tradicional desviador traseiro das bicicletas que tensiona o ramo bambo da corrente. Esteticamente, o cubo de mudanças internas e a partilha do eixo traseiro permitiram conferir um *design* bastante mais “limpo” ao equipamento.

4.4. Mecanismo de retorno

Na Figura 4.11 representa-se o mecanismo de retorno da corrente que está instalado no corpo central do *Rowtrike* e que tem como componentes principais uma corda elástica igual à que é utilizada nos ergómetros *Concept2* e uma peça de união entre a corrente motriz e o elástico. Como o próprio nome indica, este mecanismo é responsável pelo retorno da corrente, isto é, quando o utilizador finaliza o ataque e entra na fase de recuperação, é este mecanismo que faz com que a haste de propulsão regresse à posição inicial. Por outro lado, este mecanismo também é responsável por manter sempre tensionada a corrente motriz e é ele que permite o deslocamento da corrente à custa do alongamento do elástico. A peça que faz a união entre a corrente e o elástico contém uma polia que funciona como uma roldana móvel, o que permite reduzir para metade a força necessária para vencer a força do elástico e reduzir também para metade o curso da peça de união. Assim, se ao efetuar a remada o utilizador deslocar a corrente x mm, a peça de união desloca-se $\frac{x}{2}$ mm.



Figura 4.11. Mecanismo de retorno da corrente motriz.

5. ANÁLISE QUANTITATIVA

Durante o desenvolvimento do sistema de transmissão do *Rowtrike* houve necessidade de efetuar uma análise cinemática e dinâmica do movimento do equipamento quer para selecionar corretamente o número de dentes que os pinhões envolvidos na transmissão deveriam ter, quer mesmo para poder estimar qual a velocidade máxima que o veículo conseguiria atingir. Estes estudos serão apresentados de seguida.

5.1. Análise Cinemática

“A cinemática é o ramo da mecânica que estuda o movimento dos corpos, sem dar atenção às forças que o produzem. A cinemática é importante não só porque há problemas em que só interessa mesmo estudar o movimento, mas também porque a análise dinâmica exige conceitos de cinemática” (Antunes, 2012). No presente caso interessa obter uma relação entre a velocidade de translação das mãos do utilizador e a velocidade de deslocamento do equipamento.

Uma vez que as mãos e a corrente motriz efetuam deslocamentos diferentes no mesmo intervalo de tempo, conforme se pode verificar na Figura 5.1, começa-se por estabelecer uma relação entre a velocidade das mãos e a velocidade da corrente. Esta relação é dada por:

$$\frac{v_{m\tilde{a}o}}{v_{corrente}} = \frac{\frac{\Delta x_{m\tilde{a}o}}{\Delta t}}{\frac{\Delta x_{corrente}}{\Delta t}} = \frac{\Delta x_{m\tilde{a}o}}{\Delta x_{corrente}} = \frac{1406}{840} \approx 1,67 \quad (5.1)$$

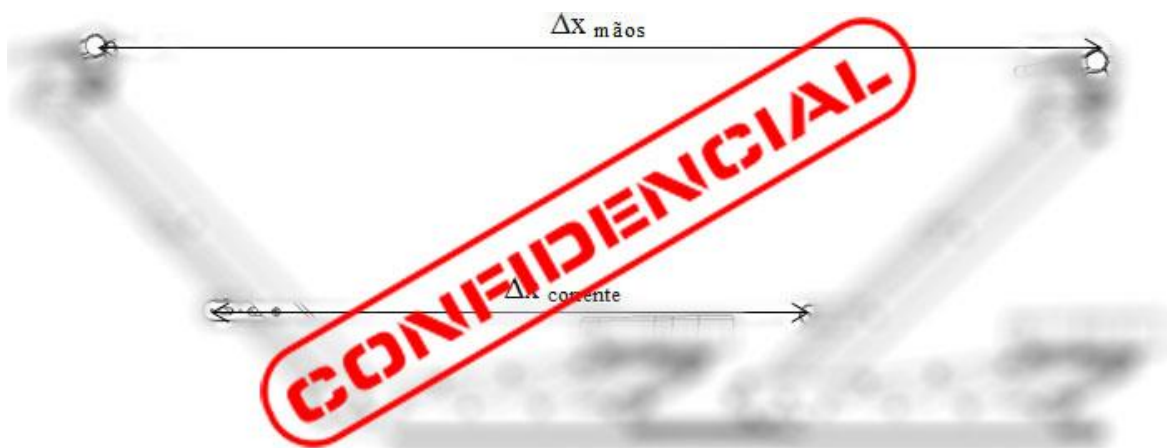


Figura 5.1. Deslocamento das mãos e da corrente motriz.

Na Figura 5.2 faz-se uma representação esquemática da transmissão do *Rowtrike*, de modo a facilitar a compreensão da dedução que se segue.

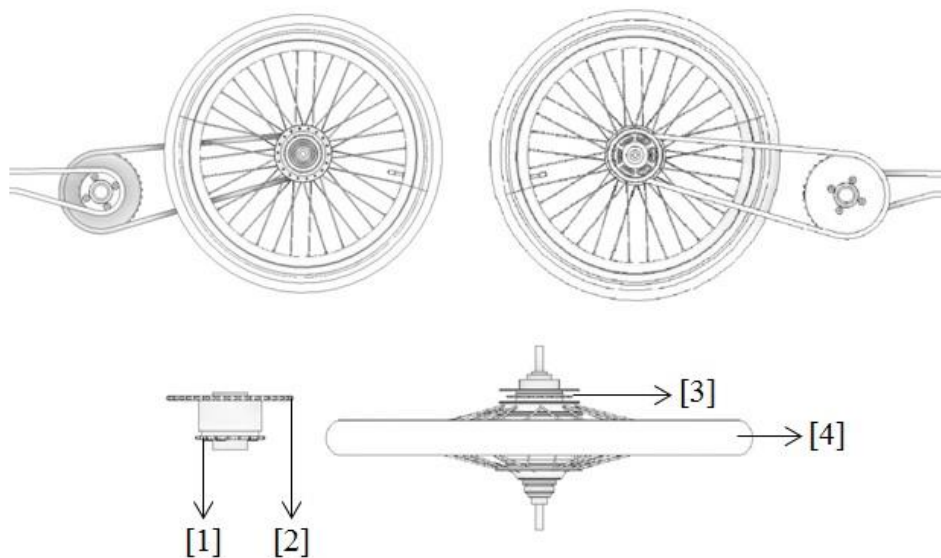


Figura 5.2. Sistema de transmissão;
[1] Pinhão motriz; [2] Coroa; [3] Pinhão do cubo de mudanças internas; [4] Roda traseira.

Sabendo que a velocidade linear da corrente motriz é um vetor tangente à trajetória do pinhão motriz (Figura 5.2 [1]) em cada instante, a relação entre a velocidade da mão e a velocidade angular do pinhão motriz é dada por:

$$v_{corrente} = \omega_1 R_1 \Leftrightarrow \frac{v_{m\tilde{a}o}}{1,67} = \omega_1 R_1 \Leftrightarrow \omega_1 = \frac{v_{m\tilde{a}o}}{1,67 \times R_1} \quad (5.2)$$

Uma vez que o pinhão motriz e a coroa (Figura 5.2 [2]) estão ligados por veio rígido, as características do movimento mantêm-se, logo:

$$\omega_1 = \omega_2 \quad (5.3)$$

A corrente movida faz a ligação entre a coroa e o pinhão do cubo de mudanças internas (Figura 5.2 [3]). A corrente é inextensível, pelo que:

$$v_2 = v_3 \Leftrightarrow \omega_2 Z_2 = \omega_3 Z_3 \Leftrightarrow \omega_3 = \frac{\omega_2 Z_2}{Z_3} \Leftrightarrow \omega_3 = \frac{v_{m\tilde{a}o}}{1,67 \times R_1} \times \frac{Z_2}{Z_3} \quad (5.4)$$

A velocidade angular da roda traseira (Figura 5.2 [4]) é igual à velocidade angular do pinhão do cubo de mudanças internas afeto da relação de transmissão imposta pela mudança engrenada dentro do cubo. Assim:

$$\omega_4 = \omega_3 \times i_{cubo} \Leftrightarrow \omega_4 = \frac{v_{m\tilde{a}o}}{1,67 \times R_1} \times \frac{Z_2}{Z_3} \times i_{cubo} \quad (5.5)$$

A roda traseira tem um movimento plano com centro instantâneo de rotação no ponto de contacto com o solo, se não existir escorregamento. Assim:

$$v_{trike} = \omega_4 R_4 \Leftrightarrow v_{trike} = \frac{v_{m\tilde{a}o}}{1,67 \times R_1} \times \frac{Z_2}{Z_3} \times i_{cubo} \times R_4 \quad (5.6)$$

As relações de transmissão das diferentes mudanças do cubo de mudanças internas estão apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Relações de transmissão de cada mudança do cubo de mudanças internas (Shimano, 2013).

<i>Shimano Alfine 8V</i>	
Mudança	<i>i</i>
1 ^a	0,53
2 ^a	0,64
3 ^a	0,75
4 ^a	0,85
5 ^a	1
6 ^a	1,22
7 ^a	1,42
8 ^a	1,62

5.2. Análise Dinâmica

“A Dinâmica é o ramo da mecânica que relaciona as forças aplicadas com as acelerações resultantes” (Antunes, 2012). Uma vez que o *Rowtrike* se trata de um mecanismo (conjunto de corpos rígidos articulados com um objetivo específico), a abordagem energética é a formulação mais adequada para analisar a sua dinâmica. A abordagem energética baseia-se no cálculo da energia cinética das massas e do trabalho das forças. A primeira lei da termodinâmica, ou princípio da conservação de energia, diz que a quantidade total de energia num sistema isolado permanece constante, o que conduz à base das formulações energéticas, o teorema da energia cinética:

$$dE_c = dW_{ext} + dW_{int} \quad (5.7)$$

em que dW_{ext} representa o trabalho das forças exteriores ao sistema e dW_{int} o trabalho das forças internas. Dividindo ambos os membros pelo tempo (dt) obtém-se uma versão diferencial:

$$\frac{dE_c}{dt} = \frac{dW_{ext}}{dt} + \frac{dW_{int}}{dt} \quad (5.8)$$

A segunda lei da termodinâmica, ou lei da entropia, diz-nos que o termo de dissipação interna de energia (dW_{int}) é obrigatoriamente negativo.

Na Figura 5.3 representa-se o diagrama de corpo livre do *Rowtrike*. Despreza-se o movimento relativo do utilizador e a força de impulsão do ar.



Figura 5.3. Diagrama de corpo livre do *Rowtrike*.

As forças normais N_1 , N_2 , N_3 e as forças de atrito F_{a1} , F_{a2} e F_{a3} não produzem trabalho uma vez que, não havendo escorregamento, os pontos de contacto das rodas com o solo têm a mesma velocidade que este, isto é, zero.

5.2.1. Energia Cinética

A energia cinética é uma energia associada ao movimento dos corpos. Assim, a energia cinética do *Rowtrike* é dada por:

$$\begin{aligned}
 E_c &= E_{c_{rodas}} + E_{c_{estrutura+utilizador}} = \\
 &= 2 \times \left(\frac{1}{2} I_{rf} \omega_{rf}^2 + \frac{1}{2} m_{rf} v_{trike}^2 \right) + \left(\frac{1}{2} I_{rt} \omega_{rt}^2 + \frac{1}{2} m_{rt} v_{trike}^2 \right) + \frac{1}{2} m_{estrutura+utilizador} v_{trike}^2 = \\
 &= \frac{1}{2} \left(\frac{2 \times I_{rf} + I_{rt}}{R^2} + 2 \times m_{rf} + m_{rt} + m_{estrutura+utilizador} \right) v_{trike}^2 = \\
 &= \frac{1}{2} \left(\frac{2 \times I_{rf} + I_{rt}}{R^2} + m_{trike} + m_{utilizador} \right) v_{trike}^2
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

em que I_{rf} e I_{rt} são os momentos de inércia das rodas da frente e de trás respectivamente, em relação ao seu eixo de rotação. A derivada da Equação (5.9) em relação ao tempo é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{dE_c}{dt} &= 2 \times \frac{1}{2} \left(\frac{2 \times I_{rf} + I_{rt}}{R^2} + m_{trike} + m_{utilizador} \right) v_{trike} \frac{dv_{trike}}{dt} = \\ &= \left(\frac{2 \times I_{rf} + I_{rt}}{R^2} + m_{trike} + m_{utilizador} \right) v_{trike} a_{trike} \end{aligned} \quad (5.10)$$

5.2.2. Peso do Rowtrike e utilizador

O peso do veículo e do utilizador produzem uma potência que pode ser positiva, negativa ou nula. Numa subida os pesos opõem-se ao movimento, pelo que produzem uma potência negativa. Numa descida os pesos ajudam ao movimento, pelo que produzem uma potência positiva. Por fim, numa estrada plana os pesos não se opõem ao movimento, pelo que a potência por eles produzida é nula. Atendendo à Figura 5.4 a equação que traduz a potência produzida pelos pesos em função do ângulo do solo é dada por:

$$\frac{dW_{peso}}{dt} = -(P_{trike} + P_{utilizador}) \text{sen}(\alpha) v_{trike} \quad (5.11)$$



Figura 5.4. Força peso em função do ângulo de inclinação do solo.

Para efeitos de cálculo considerou-se uma massa de 100 kg para o utilizador e uma massa de 40 kg para o *Rowtrike*.

5.2.3. Momento de atrito de rolamento

O momento de atrito de rolamento que contraria o movimento de rotação das rodas, indicado na Figura 5.3, também produz uma potência que é dada por:

$$\begin{aligned}
 \frac{dW_{M_{arol}}}{dt} &= -M_{a_{rol1}} \omega_r - M_{a_{rol2}} \omega_r - M_{a_{rol3}} \omega_r = \\
 &= -C_r N_1 R_r \omega_r - C_r N_2 R_r \omega_r - C_r N_3 R_r \omega_r = \\
 &= -C_r (N_1 + N_2 + N_3) R_r \omega_r = \\
 &= -C_r (P_{trike} + P_{utilizador}) \cos(\alpha) R_r \omega_r = \\
 &= -C_r (P_{trike} + P_{utilizador}) \cos(\alpha) R_r \frac{v_{trike}}{R_r} = \\
 &= -C_r (P_{trike} + P_{utilizador}) \cos(\alpha) v_{trike}
 \end{aligned} \tag{5.12}$$

em que C_r é o coeficiente de resistência ao rolamento, que assume o valor de 0,006 (Santin, et al., 2007).

5.2.4. Força do vento

Como é sabido, o ar oferece uma resistência ao movimento dos corpos. Esta resistência é tanto maior quanto maior for a velocidade a que o corpo se desloca. A potência produzida pela força do vento é dada por:

$$\begin{aligned}
 \frac{dW_{vento}}{dt} &= -F_{vento} v_{trike} = \\
 &= -C_x \frac{1}{2} \rho_{ar} A_f v_{trike}^2 v_{trike} = \\
 &= -C_x \frac{1}{2} \rho_{ar} A_f v_{trike}^3
 \end{aligned} \tag{5.13}$$

em que C_x é o coeficiente de arrasto aerodinâmico, A_f é a área frontal do veículo obtida pela projeção da forma do veículo no plano perpendicular à direção do movimento e ρ_{ar} é o valor da massa volúmica do ar à temperatura de 20°C e à pressão atmosférica

($1,2 \text{ kg} / \text{m}^3$). De realçar o facto notório de que a força de arrasto aerodinâmico apresenta uma maior dependência da velocidade do que a resistência de rolamento.

5.2.4.1. Coeficiente de arrasto aerodinâmico

O coeficiente de arrasto aerodinâmico do *Rowtrike* foi calculado com recurso ao *add-on Project Falcon* para o *software Autodesk® Inventor®*. Este *add-on* permite simular fluxos de ar em torno de veículos, edifícios ou outros objetos à escolha num túnel de vento virtual. Esta aplicação permite extrair resultados como a velocidade, pressão, força de arrasto e coeficiente de arrasto. O coeficiente de arrasto aerodinâmico médio obtido para o *Rowtrike* com o utilizador em cima foi de aproximadamente 0,4 conforme se pode verificar na Figura 5.5.

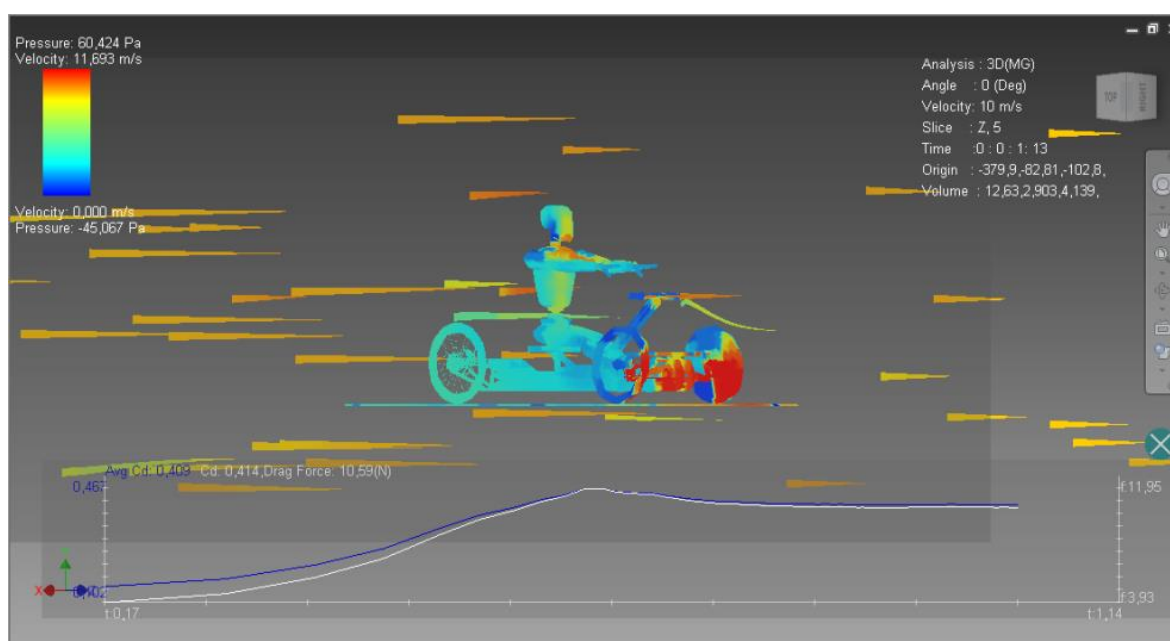


Figura 5.5. Determinação do C_x no *Project Falcon wind tunnel simulation*.

5.2.4.2. Área frontal

A área frontal do veículo também foi medida com recurso ao *software Autodesk® Inventor®*, obtida pela projeção da forma do veículo com o utilizador em cima num plano perpendicular ao solo. A área obtida foi de aproximadamente $0,75 \text{m}^2$.

5.2.5. Força produzida pelo utilizador

O utilizador ao exercer força sobre a haste de propulsão produz uma potência que é dada por:

$$\frac{dW_{m\tilde{a}os}}{dt} = F_{m\tilde{a}os} v_{m\tilde{a}os} \quad (5.14)$$

Uma vez conhecida a relação entre a velocidade de translação das mãos do utilizador e a velocidade de deslocamento do equipamento obtida na Equação (5.6) da análise cinemática, a potência produzida pelo utilizador é dada por:

$$\frac{dW_{m\tilde{a}os}}{dt} = F_{m\tilde{a}os} \frac{1,67 \times R_1}{i_{cubo} \times R_4} \times \frac{Z_3}{Z_2} v_{trike} \quad (5.15)$$

Para efeitos de cálculo utilizou-se o valor de força média aplicada pelo utilizador durante a remada (Kleshmev, 2005).

5.2.6. Atritos internos

Admitindo uma perda de 10% da potência produzida pelo utilizador devido a atritos internos do mecanismo, estas perdas são dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{dW_{int}}{dt} &= -0,1 F_{m\tilde{a}os} v_{m\tilde{a}os} = \\ &= -0,1 F_{m\tilde{a}os} \frac{1,67 \times R_1}{i_{cubo} \times R_4} \times \frac{Z_3}{Z_2} v_{trike} \end{aligned} \quad (5.16)$$

5.2.7. Formulação Geral

Substituindo as expressões deduzidas anteriormente na Equação (5.8), obtém-se a seguinte formulação para a situação mais geral:

$$\begin{aligned}
\frac{dE_c}{dt} &= \frac{dW_{ext}}{dt} + \frac{dW_{int}}{dt} \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow \frac{dE_c}{dt} &= \frac{dW_{peso}}{dt} + \frac{dW_{Marol}}{dt} + \frac{dW_{vento}}{dt} + \frac{dW_{mãos}}{dt} + \frac{dW_{int}}{dt} \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow \left(\frac{2 \times I_{rf} + I_{rt}}{R^2} + m_{trike} + m_{utilizador} \right) v_{trike} a_{trike} &= \\
&= -(P_{trike} + P_{utilizador}) \text{sen}(\alpha) v_{trike} - C_r (P_{trike} + P_{utilizador}) \text{cos}(\alpha) v_{trike} - \\
&- C_x \frac{1}{2} \rho_{ar} A_f v_{trike}^3 + F_{mãos} \frac{1,67 \times R_1}{i_{cubo} \times R_4} \times \frac{Z_3}{Z_2} v_{trike} - 0,1 F_{mãos} \frac{1,67 \times R_1}{i_{cubo} \times R_4} \times \frac{Z_3}{Z_2} v_{trike} \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow \underbrace{\left(\frac{2 \times I_{rf} + I_{rt}}{R^2} + m_{trike} + m_{utilizador} \right)}_{C_1} a_{trike} = \\
&= \underbrace{0,9 F_{mãos} \frac{1,67 \times R_1}{i_{cubo} \times R_4} \times \frac{Z_3}{Z_2} - (P_{trike} + P_{utilizador}) \text{sen}(\alpha) - C_r (P_{trike} + P_{utilizador}) \text{cos}(\alpha)}_{C_2} - \\
&- \underbrace{C_x \frac{1}{2} \rho_{ar} A_f}_{C_3} v_{trike}^2
\end{aligned} \tag{5.17}$$

A Equação (5.17) trata-se de uma equação diferencial que de forma simplificada assume a forma:

$$C_1 \frac{dv}{dt} = C_3 v^2 + C_2 \tag{5.18}$$

A integração da Equação (5.17) permite obter a velocidade em cada instante. No entanto, esta integração só é possível recorrendo a um método numérico. O método de Euler é o método mais simples para a resolução de equações diferenciais (Alberto, 2004). Este método parte das condições iniciais de posição e velocidade do movimento (x_0 e v_0) e calcula a aceleração no instante seguinte, que pode ser função da velocidade ou da posição. Assim, para saber as velocidades de um corpo entre um instante inicial t_0 e um instante final t_f , basta dividir o intervalo $[t_0, t_f]$ em N partes iguais Δt e calcular as velocidades nos instantes t_i usando as acelerações no instante anterior da seguinte forma:

$$v_i = v_{i-1} + a_{i-1} \times \Delta t \quad (5.19)$$

Do mesmo modo, calculam-se as posições do corpo no instante t_i usando as velocidades no instante anterior da seguinte forma:

$$x_i = x_{i-1} + v_{i-1} \times \Delta t \quad (5.20)$$

Neste método assume-se que a aceleração e a velocidade são constantes dentro de cada incremento de tempo Δt , o que por não ser normalmente verdade, induz em erro. De forma a minimizar este erro, o incremento de tempo Δt deve ser suficientemente pequeno.

Na Figura 5.6 pode-se ver a implementação da integração da Equação (5.17) no *Excel*. Nas células *J3* e *K3* estão definidas as condições iniciais do movimento: $v_0 = 0$ e $x_0 = 0$. Na célula *F3* está indicado o incremento de tempo Δt utilizado. A aceleração é calculada substituindo os dados de entrada e as condições iniciais na Equação (5.17) e a velocidade e a posição são calculadas conforme foi explicado em cima. Assim, na célula *I4* está implementada a equação $a_1 = \frac{C_2 - C_3 \times J3^2}{C_1}$, na célula *J4* a equação $v_1 = J3 + I3 \times \$F\3 e na célula *K4* a equação $x_1 = K3 + J3 \times \$F\3 . A repetição da quarta linha permite analisar o movimento até quando se quiser.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2		Dados de entrada				Δt [s]	t [s]	F mão [N]	a(t) trike [m/s ²]	v(t) trike [m/s]	x(t) trike [m]
3		ϕ roda [mm]	508,00			0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4		R4 [mm]	254,00				0,01	394,00	0,69	0,00	0,00
5		I roda [Kg/m ²]	0,06				0,02	394,00	0,69	0,01	0,00
6		m total [Kg]	140,00				0,03	394,00	0,69	0,01	0,00
7		α [°]	0,00				0,04	394,00	0,69	0,02	0,00
8		C _r	0,01				0,05	394,00	0,69	0,03	0,00
9		i cubo	0,53				0,06	394,00	0,69	0,03	0,00
10		ρ_{ar} [Kg/m ³]	1,23				0,07	394,00	0,69	0,04	0,00
11		A _f [m ²]	0,75				0,08	394,00	0,69	0,05	0,00
12		C _x	0,40				0,09	394,00	0,69	0,06	0,00
13		g [m/s ²]	9,81				0,10	394,00	0,69	0,06	0,00
14		R ₁ [mm]	38,56				0,11	394,00	0,69	0,07	0,00
15		Z ₂	36,00				0,12	394,00	0,69	0,08	0,00
16		Z ₃	23,00				0,13	394,00	0,69	0,08	0,00
17							0,14	394,00	0,69	0,09	0,01

Figura 5.6. Implementação do método de Euler no *Excel*.

5.2.8. Resultados obtidos

Tendo em conta que a potência máxima que o utilizador é capaz de debitar pode chegar aos 500 *Watt* (Hofmijster, 2010) e sabendo que a potência requerida para movimentar o veículo é dada por:

$$P_{requerida} = \left((P_{trike} + P_{utilizador}) \sin(\alpha) + C_r (P_{trike} + P_{utilizador}) \cos(\alpha) + C_x \frac{1}{2} \rho_{ar} A_f v_{trike}^2 \right) v_{trike} \quad (5.21)$$

traçou-se um gráfico com a potência requerida em função da velocidade do veículo calculada utilizando o método de Euler e intersectou-se com a linha dos 500 *Watt*, de modo a saber qual a velocidade máxima que se pode atingir. Para esta análise não interessa qual a relação entre os pinhões da transmissão nem a mudança que está engrenada. Este facto é facilmente perceptível se compararmos com um automóvel que, com uma determinada potência, poderia atingir a velocidade máxima qualquer que fosse a mudança engrenada. Na prática tal não acontece porque o motor está limitado a um certo número de rotações por minuto. Neste caso a limitação é a velocidade de deslocamento das mãos do utilizador. O gráfico obtido está representado na Figura 5.7, onde se pode verificar que a velocidade máxima é de aproximadamente 46 km/h.

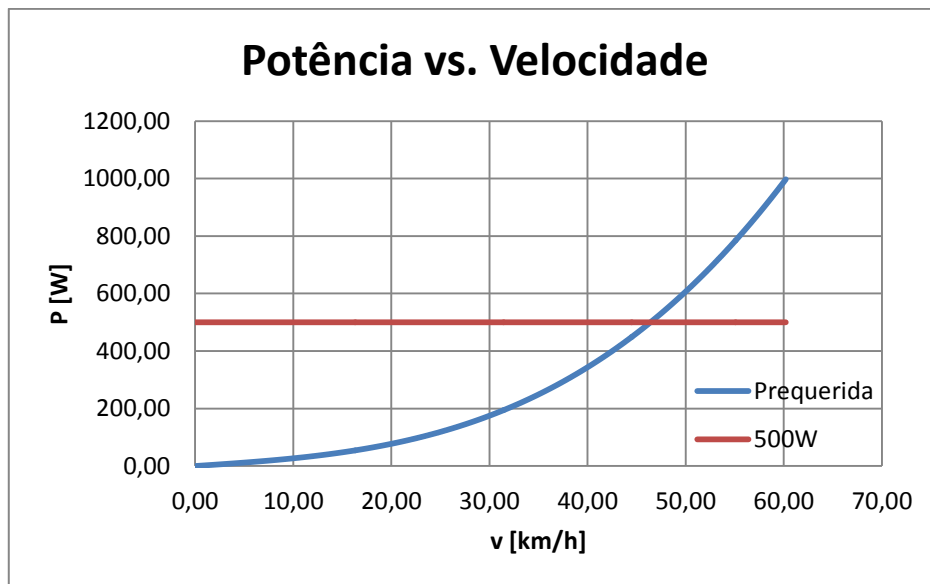


Figura 5.7. Determinação da velocidade máxima teórica do Rowtrike.

Com este ponto de partida, dimensionou-se iterativamente o sistema de transmissão para o Rowtrike, tendo também em conta limitações dimensionais de projeto.

Assim, os componentes do sistema de transmissão ilustrados na Figura 5.2 têm as dimensões apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Sistema de transmissão final.

Sistema de Transmissão		
<u>Componente</u>	<u>Nº Dentes</u>	<u>Diâmetro Nominal [mm]</u>
Pinhão motriz [1]	19	77,11
Coroa [2]	36	---
Pinhão do cubo [3]	23	---
Roda BMX [4]	---	508

5.2.8.1. Trajeto Horizontal

Considerando um cenário de estrada horizontal, em que o utilizador circula a um ritmo de cruzeiro, isto é, não ultrapassando uma velocidade nas mãos de $0,7 \text{ m/s}$, aplicando uma força média de 394 N (Kleshmev, 2005), traçou-se a curva da velocidade do *Rowtrike* em função do tempo, representada no gráfico da Figura 5.8. A alteração da mudança em que circula é comandada pelo primeiro de dois acontecimentos: o utilizador atinge a velocidade nas mãos de $0,7 \text{ m/s}$ ou esgota a potência máxima que consegue debitar.

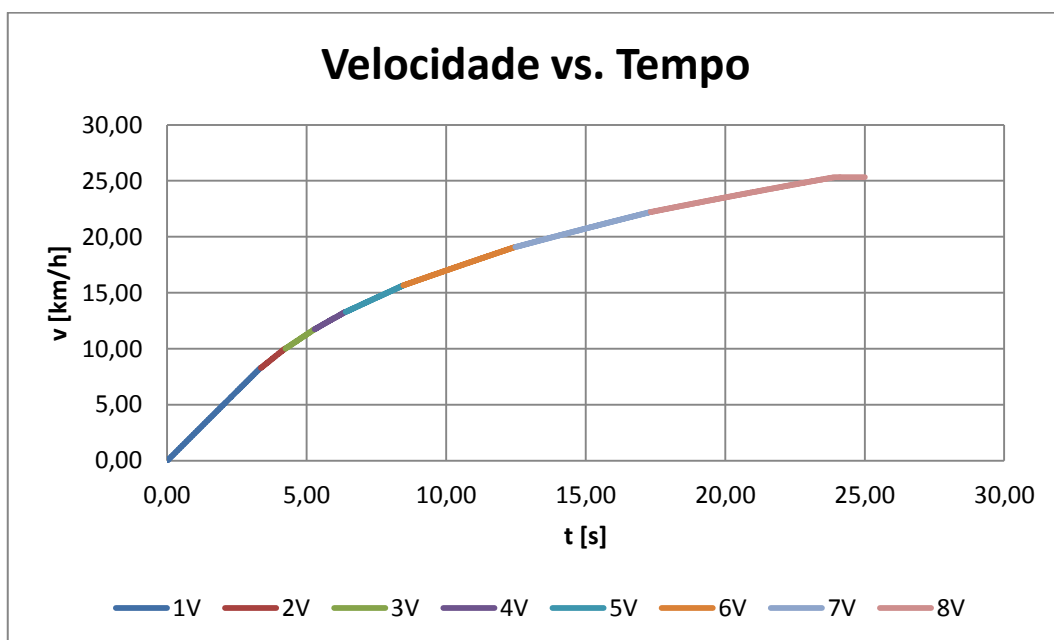


Figura 5.8. Curva teórica de evolução da velocidade do *Rowtrike* em função do tempo num trajeto horizontal, com variação da mudança engrenada.

As curvas da evolução da aceleração e do deslocamento do *Rowtrike* em função do tempo estão apresentadas no APÊNDICE A.

Se o utilizador circular a um ritmo mais forte, atingindo uma velocidade na mão de $1,1\text{ m/s}$ e aplicando uma força média de 430N (Kleshmev, 2005), a velocidade máxima atingida pelo *Rowtrike* aumenta, como seria de esperar. A comparação entre a curva de velocidade e a utilização do veículo a diferentes ritmos está apresentada no gráfico da Figura 5.9.

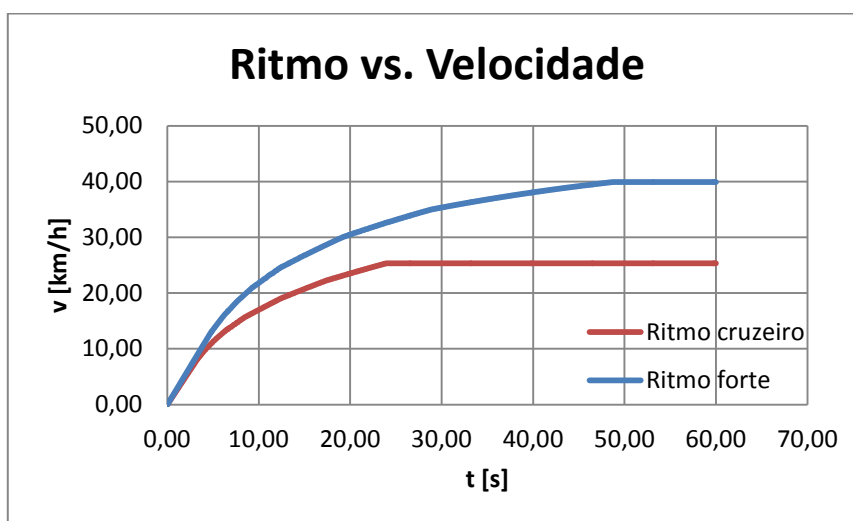


Figura 5.9. Comparação da curva de velocidade em função do tempo a ritmos de utilização diferentes num plano horizontal.

5.2.8.2. Trajeto Inclinado (subida)

Terrenos com declives superiores a 5% são considerados impróprios para a circulação de bicicletas (IMTT & GPIA, 2011). Assim, considerando o cenário do utilizador estar a subir uma estrada com uma inclinação de 5%, a um ritmo de cruzeiro (não ultrapassando uma velocidade nas mãos de $0,7\text{ m/s}$ e aplicando uma força média de 394N) traçou-se a curva da velocidade do *Rowtrike* em função do tempo. Nestas condições o utilizador não consegue ir além da 2ª mudança. Caso o utilizador passe para um ritmo mais forte (atingindo uma velocidade na mão de $1,1\text{ m/s}$ e aplicando uma força média de 430N), consegue fazer o mesmo percurso utilizando até a 3ª mudança. O gráfico da Figura 5.10 mostra esta evolução.

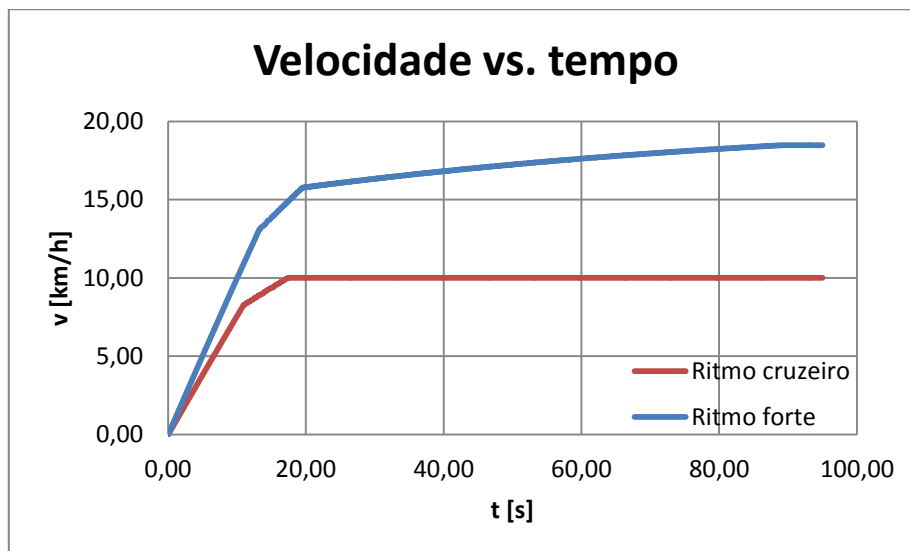


Figura 5.10. Comparação da curva de velocidade em função do tempo a ritmos de utilização diferentes numa subida com 5% de inclinação.

5.2.8.3. Trajeto Inclinado (descida)

Considerando o cenário de o utilizador se encontrar no cimo de uma estrada com 5% de inclinação e decidir descê-la sem efetuar qualquer movimento, isto é, deslocando-se apenas por ação da gravidade, verifica-se que a velocidade do *Rowtrike* converge assintoticamente para os 65 km/h , conforme se pode observar no gráfico da Figura 5.11. Para atingir esta velocidade era necessário manter estas condições durante cerca de 100 s , o que corresponderia a uma distância percorrida de aproximadamente 1950 m . A aceleração decresce de $0,42 \text{ m/s}^2$ para 0 conforme se pode confirmar no gráfico da Figura 5.12.

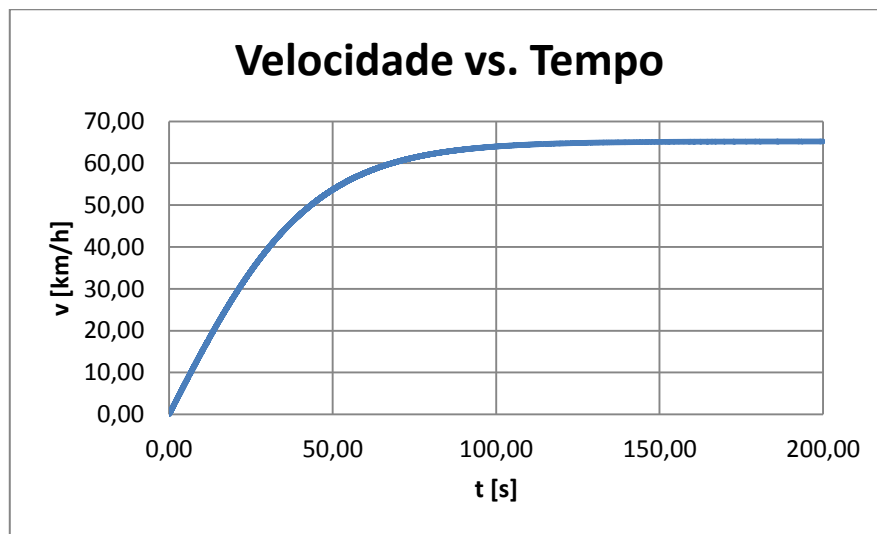


Figura 5.11. Velocidade terminal numa descida com 5% de inclinação.

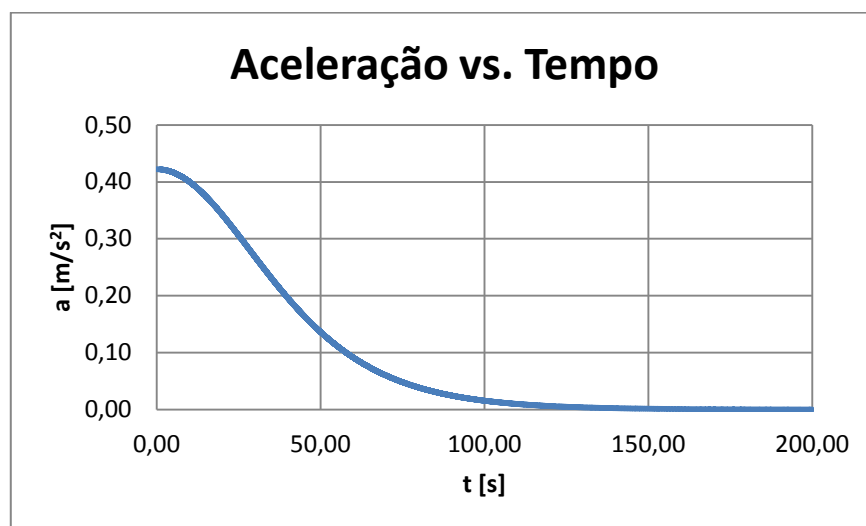


Figura 5.12. Evolução da aceleração em função do tempo numa descida com 5% de inclinação.

6. SISTEMA DE CENTRAGEM

Como foi dito anteriormente, o *Rowtrike* foi pensado para se inclinar, aproximando-se mais do modelo aquático do remo (uma vez que este grau de liberdade também existe na água), aumentando a “diversão” do utilizador e ao mesmo tempo permitindo uma maior velocidade em curva. No entanto, os graus de liberdade necessários para que o equipamento tivesse este comportamento obrigaram à construção de um mecanismo algo complexo, o que levou à construção de um protótipo físico para melhor compreender o comportamento do mecanismo. O protótipo foi construído com base numa máquina de remo de alavancas antiga montada sobre uma estrutura de perfis de alumínio como está ilustrado na Figura 6.1.



Figura 6.1. Protótipo construído para testar a inclinação do *Rowtrike*.

Depois de construído o protótipo físico, obteve-se o resultado que se estava à espera: com os graus de liberdade que se pretendiam o sistema era instável, isto é, se o equipamento estivesse direito (sem inclinar) este mantinha esta posição, mas a partir do momento que se aplicava uma pequena carga em direção a um dos lados, o sistema pura e simplesmente tombava para esse lado sendo depois difícil retomar a posição inicial. Este

fenómeno é explicado pelo facto de o centro de massa do veículo estar posicionado acima do eixo de rotação, que se encontra no solo. Contra a impossibilidade de o centro de massa passar para baixo do eixo de rotação, decidiu-se implementar no *Rowtrike* um sistema de centragem. Este sistema tem como objetivo ajudar o utilizador a retomar a posição inicial depois de se inclinar para descrever uma curva e também de manter o equipamento estável quando o utilizador se senta pela primeira vez e tem de fixar os pés nos poisa-pés antes de dar início ao movimento.

6.1. Implementação do Sistema

A implementação do sistema de centragem consistiu na instalação de duas molas de tração que têm como função contrariar a força que o utilizador exerce ao inclinar o veículo e desta forma facilitar o retorno à posição inicial. Este sistema foi implementado no eixo de rotação do veículo. A Figura 6.2 ilustra o mecanismo implementado.



Figura 6.2. Sistema de centragem implementado no *Rowtrike*.

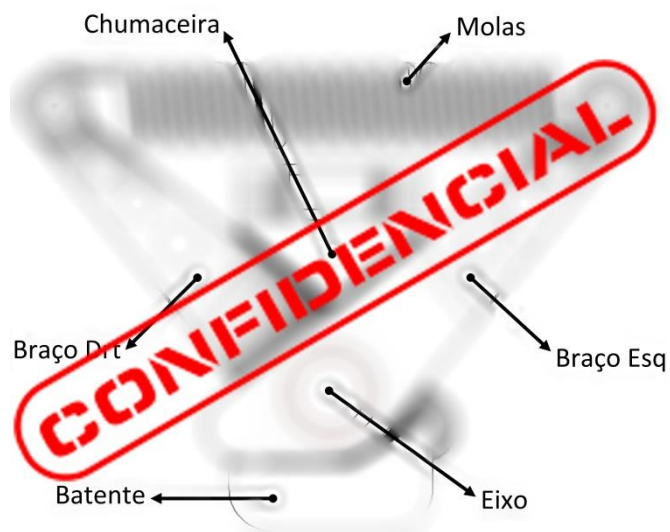


Figura 6.3. Pormenor do sistema de centragem.

O mecanismo de centragem (Figura 6.3) funciona da seguinte forma: o utilizador ao inclinar-se, inclina o corpo central do veículo que está solidário com a chumaceira onde está assente o eixo de rotação. Deste modo a chumaceira vai empurrar um dos braços onde estão fixas as molas, enquanto o outro fica em batente mecânico. Assim, as molas vão estar tracionadas e quando o utilizador deixar de exercer força estas vão obrigar o sistema a retomar a posição inicial. A Figura 6.4 ilustra a situação em que o utilizador se inclina para a esquerda.



Figura 6.4. Funcionamento do sistema de centragem na situação de inclinação para o lado esquerdo;
a) Rotação do braço esquerdo; b) Pormenor do batente mecânico do braço direito.

Observando a Figura 6.4 podemos verificar que quando o utilizador se inclina para a esquerda o braço esquerdo é empurrado pela chumaceira e roda em torno do eixo, enquanto o braço direito fica em batente mecânico. A implementação deste sistema permitiu solucionar a instabilidade do veículo. De notar também que quando as molas são instaladas já têm uma determinada pré-carga para que o sistema não reaja à aplicação de uma carga mínima, permitindo deste modo que o utilizador quando se senta para apertar os pés não entre em desequilíbrio.

7. ANÁLISE ESTRUTURAL

O projeto e análise de componentes mecânicos exige a utilização de ferramentas numéricas para avaliação dos deslocamentos, tensões e deformações. O método dos elementos finitos (MEF) tem assumido um papel de relevo neste contexto (Antunes & Neto, 2012). De notar que o MEF só tem utilidade prática se houver uma forte capacidade computacional de apoio dado o elevado número de cálculos que é necessário efetuar, nomeadamente na resolução de grandes sistemas de equações lineares.

Todos os componentes mecânicos analisados foram fabricados numa liga de alumínio da série 5000, AlMg4.5Mn, cujas principais propriedades mecânicas se encontram descritas na Tabela 7.1. O alumínio é um material muito utilizado em engenharia devido às suas boas propriedades mecânicas. Assim, este material apresenta uma baixa densidade, boa resistência à corrosão, facilidade de maquinação e é o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre. A liga 5000, em particular, é utilizada para trabalho mecânico sem tratamento térmico, em que o magnésio é o principal elemento de liga que por sua vez promove o endurecimento por solução sólida. Esta liga é normalmente usada em chapas finas para trabalho mecânico (Smith, 1998).

Toda a modelação numérica para a análise estática linear foi realizada com recurso ao *software Autodesk® Inventor®*, aproveitando deste modo toda a modelação de sólidos que já estava feita.

Tabela 7.1. Propriedades mecânicas do AlMg4.5Mn.

AlMg4.5Mn	Tensão de cedência [MPa]	Tensão de rutura [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Coefficiente de Poisson	Densidade [Kg/m ³]
	275	310	68,9	0,33	2713

7.1. Apoio de pés

Um dos componentes analisados foi a chapa onde estão assentes os pés do utilizador. Nas condições de fronteira do modelo foram restringidos todos os graus de liberdade nos furos onde se efetua a ligação aparafusada que une a chapa de apoio dos pés à estrutura principal do veículo. A aplicação de carga foi baseada num estudo do Dr. *Valery Kleshnev* (Kleshnev, 2004) onde foi medida a força aplicada no poisa pés de um barco de remo. A força aplicada pelo atleta apresenta um pico de aproximadamente 900 N , valor este que vai ser considerado para a análise estrutural do apoio de pés de modo a considerar o caso mais desfavorável. Uma vez que neste caso apenas se está a analisar um dos poisa pés, foi utilizado metade do valor indicado anteriormente. A carga aplicada na chapa foi uma pressão, uma vez que a força exercida pelo utilizador se distribui pela área do poisa pés $\left(p = \frac{F}{A}\right)$. A malhagem foi gerada automaticamente pelo *software*, tendo posteriormente sido feito um refinamento da malha na zona dos furos, dado serem zonas de concentração de tensões, resultando assim uma malha de 25078 nós e 13878 elementos. A Figura 7.1 apresenta o modelo numérico já malhado com as condições de fronteira a azul e a carga aplicada a amarelo.



Figura 7.1. Modelo numérico da chapa de apoio de pés.

Na Figura 7.2 é apresentada a distribuição das tensões de *Von Mises* na chapa do apoio de pés nas condições de carga indicadas anteriormente. Os resultados obtidos mostram que as deformações mais elevadas estão localizadas nas zonas dos furos (zonas de concentração de tensões) e que se encontram abaixo do valor da tensão de cedência do material.

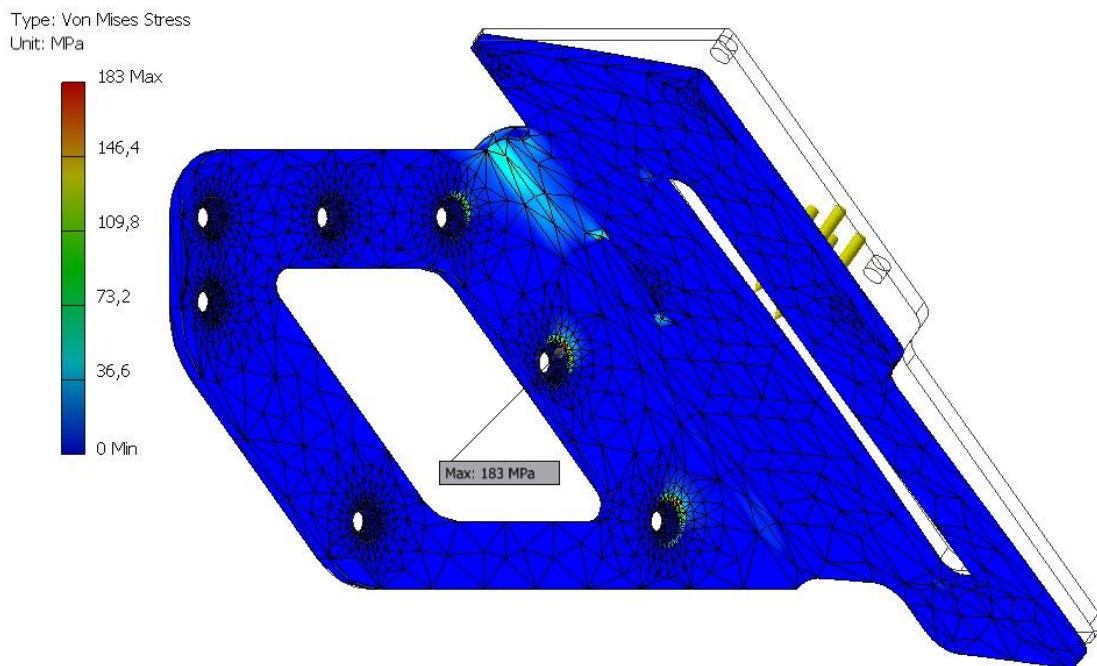


Figura 7.2. Visualização das tensões de *Von Mises* do modelo do apoio de pés utilizando um fator de escala superior.

Na Figura 7.3 é apresentada a distribuição dos deslocamentos da chapa do apoio de pés. Os resultados obtidos mostram que o deslocamento máximo ocorrido na peça é de $2,34\text{ mm}$, um deslocamento aceitável para a peça em questão.

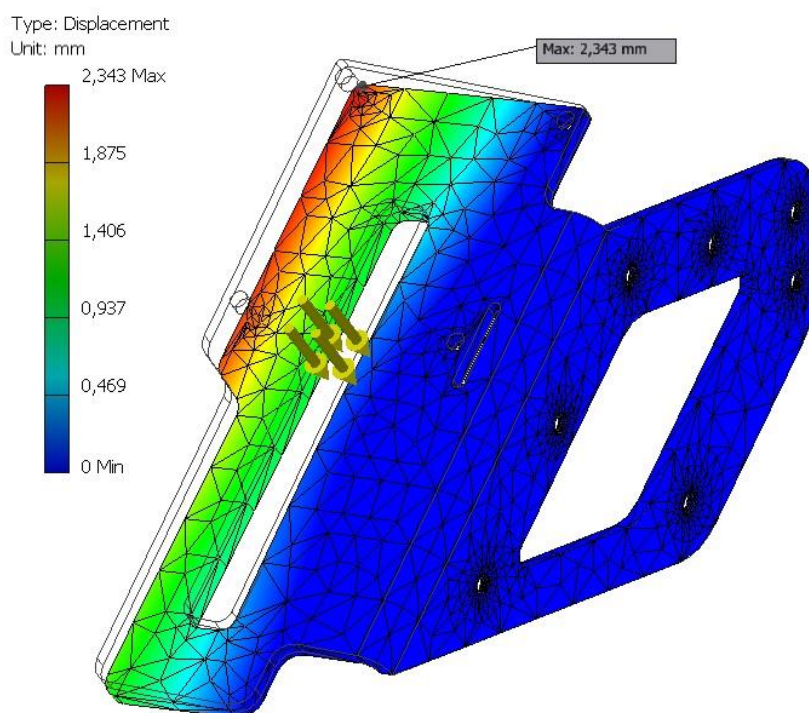


Figura 7.3. Visualização da variação do deslocamento do modelo do apoio de pés utilizando um fator de escala superior.

7.2. Estrutura do banco

A estrutura do banco onde o utilizador se senta também foi alvo de uma análise estrutural. O modelo considera a condição de contacto entre as diferentes peças que constituem a estrutura do tipo *Bonded*, isto é, considera a montagem como um corpo rígido. Nas condições de fronteira do modelo foram restringidos todos os graus de liberdade nos furos onde se efetua a ligação aparafusada que une esta estrutura aos patins que fazem o seu guiamento. A aplicação de carga teve em conta um utilizador de 100 kg sentado na estrutura. Assim, foi aplicada uma pressão na chapa onde fixa o banco. A malhagem foi gerada automaticamente pelo *software*, resultando assim uma malha de 88948 nós e 50750 elementos. A Figura 7.4 apresenta o modelo numérico já malhado com as condições de fronteira a azul e a carga aplicada a amarelo.



Figura 7.4. Modelo numérico da estrutura do banco.

Na Figura 7.5 é apresentada a distribuição das tensões de *Von Mises* na estrutura do banco nas condições de carga indicadas anteriormente. Os resultados obtidos mostram que as deformações mais elevadas estão localizadas na zona imediatamente abaixo do banco e que se encontram muito abaixo do valor da tensão de cedência do material.

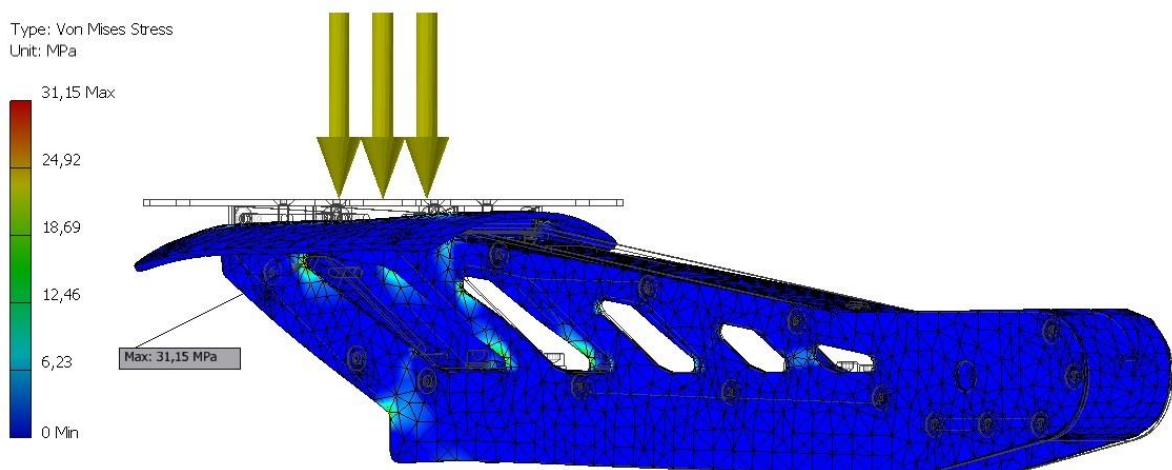


Figura 7.5. Visualização das tensões de *Von Mises* da estrutura do banco utilizando um fator de escala superior.

Na Figura 7.6 é apresentada a distribuição dos deslocamentos na estrutura do banco. Os resultados obtidos mostram que o deslocamento máximo ocorrido na estrutura é de $0,13 \text{ mm}$, um deslocamento desprezável para a estrutura em questão.

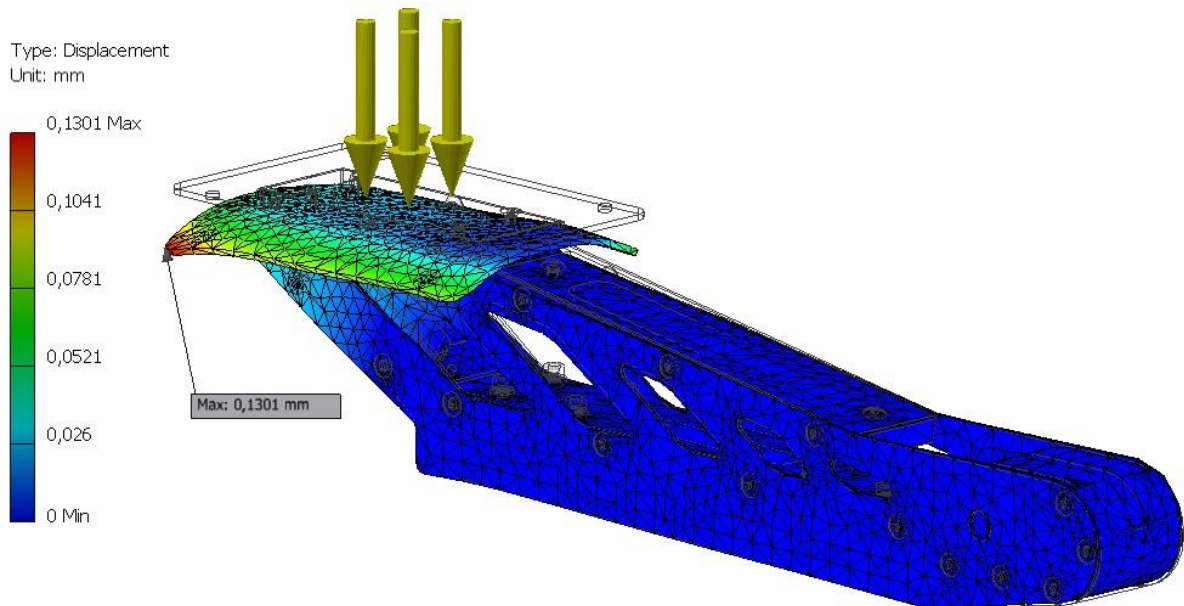


Figura 7.6. Visualização da variação do deslocamento do modelo da estrutura do banco utilizando um fator de escala superior.

8. CONCLUSÕES

A realização deste trabalho contribuiu para o desenvolvimento do projeto global do *Rowtrike* e, deste modo, para levar à construção de um protótipo que irá permitir provar o conceito que está na base da criação do equipamento. Além de servir para validar o conceito do *Rowtrike*, este protótipo também servirá para testar todos os mecanismos nele implementados desde o sistema de propulsão, direção, inclinação, centragem, etc.

Este protótipo vai contar com a integração de diverso material *standard* de bicicleta desde as três rodas de 20” (tamanho normalmente utilizado nas bicicletas de BMX), o cubo de mudanças internas, travões de disco hidráulicos em cada roda, três amortecedores (dois à frente e um atrás), um guiador e um ciclo-computador. Observando o modelo 3D final do equipamento (APÊNDICE B) é possível verificar que o princípio construtivo que está na base da construção deste protótipo assenta na utilização de chapas de alumínio cortadas a laser e na utilização de espaçadores a travar as estruturas. Esta opção tem que ver com o seu baixo custo, facilidade de implementação e rapidez na entrega do material.

Futuramente o *Rowtrike* irá contar com um sistema de acumulação de energia cinética para auxiliar o utilizador em situações mais desfavoráveis como sejam o arranque ou a subida de um plano inclinado. Já foram estudadas algumas hipóteses para a implementação deste sistema como sejam a instalação de um volante de inércia que recupera alguma energia perdida nas travagens e a reutiliza para propulsionar o veículo quando o utilizador assim o entender, a instalação de uma mola de torção que acumule energia durante o movimento de propulsão e depois a liberte quando solicitada pelo utilizador ou ainda a adaptação de uma *Copenhagen Wheel* à roda traseira que acumula energia dissipada durante o movimento de propulsão e durante as travagens, libertando-a quando o utilizador pretender, sendo controlada através de um *smartphone*.

Uma vez validado o conceito que está na origem do *Rowtrike* bem como todos os mecanismos nele implementados, a WhyseMadness® pretende avançar para um produto final que será algo inspirado no *sketch* apresentado na Figura 8.1.

Este trabalho mostrou-se bastante interessante e desafiante ao mesmo tempo que promoveu o desenvolvimento de competências a nível de projeto mecânico, bem como a nível de interação com *software* de CAD 3D Autodesk® Inventor®.



Figura 8.1. *Sketch* da versão final do Rowtrike.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alberto, P., 2004. Alguns métodos numéricos para resolver a equação de Newton.
- Alibaba, 2013. <http://portuguese.alibaba.com/product-free/gear-racks-pinion-110202957.html>.
- Antunes, F. J., 2012. *Mecânica Aplicada - Uma Abordagem Prática*. 1ª ed: LIDEL.
- Antunes, F. J. V. & Neto, M. A., 2012. *Apontamentos de Mecânica Estrutural*.
- Baptista, R. R., 2005. *ASPECTOS FISIOLÓGICOS DA PRODUÇÃO DE FORÇAS EM REMADORES*.
- Baptista, R. R., Cunha, G. d. S. & Oliveira, A. R., 2008. Aspectos Fisiológicos e Biomecânicos da Produção de Força Podem ser Usados no Controle do Treinamento de Remadores de Elite. *Sociedade Brasileira de Medicina do Esporte*.
- Concept2, 2013. www.concept2.com.
- Coyle, E. F. et al., 1990. Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*.
- Cyclingclub, 2011. <http://fatbastardscyclingclub.blogspot.pt/2011/09/which-muscles-do-work.html>.
- Cyclingfitness, 2013. <http://cyclingfitness.hubpages.com/hub/Muscles-groups-used-while-cycling#>.
- Fitnessnetwork, 2013. www.fitnessnetwork.co.za.
- Grabcad, 2013. <http://grabcad.com/library/scotch-yoke-mechanism--1>.
- Hagerman, F. C., Lawrence, R. A. & Mansfield, M. C., 1988. A comparison of energy expenditure during rowing and cycling ergometry. *National Center for Biotechnology Information*.
- Hofmijster, M., 2010. *Mechanics and Energetics of Rowing*.
- IMTT, I. d. M. e. d. T. T. & GPIA, G. d. P. I. e. A., 2011. *Rede Ciclável - Princípios de Planeamento e Desenho*.
- Kettler, 2013. <http://www.kettlerusa.com/fitness/rowers/2771>.
- Kleshnev, V., 2005. Facts. Did You Know That.... Volume 5.
- Kleshnev, V., 2004. *Rowing Biomechanics: Technology and Technique*.
- Kleshnev, V., 2006. *Rowing Biomechanics*.
- Rowbike, 2010. www.rowbike.com.
- Rowingbike, 2013. www.rowingbike.com.
- Rowingmachinereviews, 2013. <http://rowingmachinereviews.co/kettler-favorit-rowing-machine-review/>.
- Santin, J. J. et al., 2007. *THE WORLD'S MOST FUEL EFFICIENT VEHICLE*. s.l.:vdf.
- Shimano, 2013. http://www.shimano.com/publish/content/global_cycle/en/us/index/products/0/alfine.html#.
- Smith, W. F., 1998. *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*. s.l.:McGraw-Hill de Portugal, Lda.

- Steinacker, J., 1993. Physiological Aspects of Training in Rowing. *Int J Sports Med*.
- Thompson, J. C. et al., 2011. Does participating in physical activity in outdoor natural environments have a greater effect on physical and mental wellbeing than physical activity indoors? A systematic review. *National Center for Biotechnology Information*.
- Tripendo, 2013. *www.tripendo.com*.
- Zeni, A. I., Hoffman, M. D. & Clifford, P. S., 1996. Energy Expenditure With Indoor Exercise Machines.

ANEXO A



Carriages KWVE25-B-SL (Series KWVE..-B-SL)

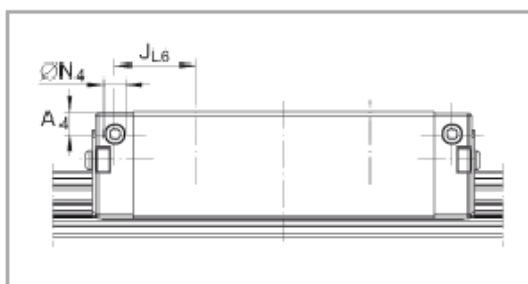
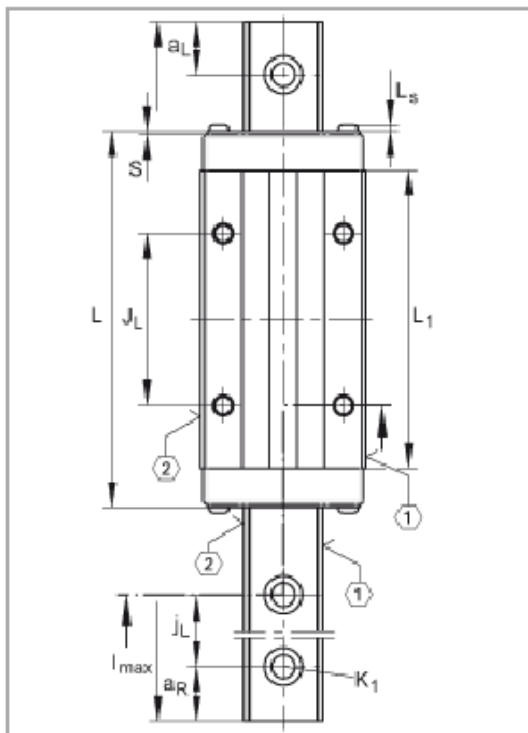
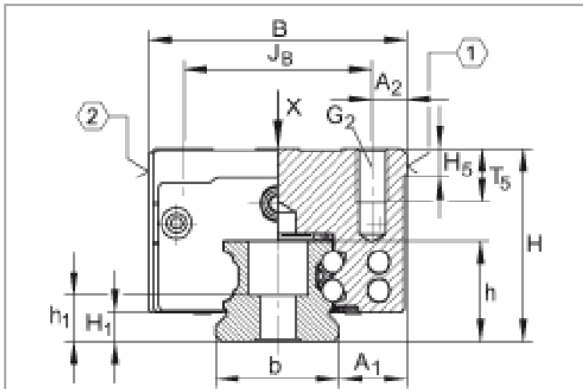
narrow, long carriage, four-row; corrosion-resistant design possible

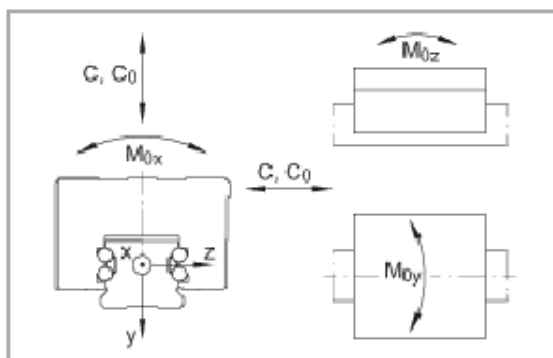
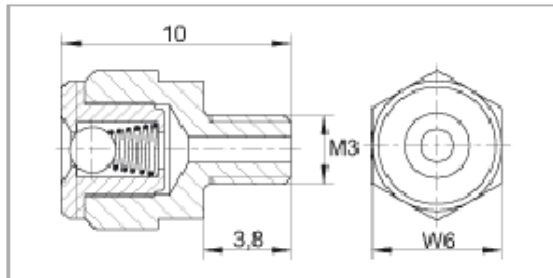
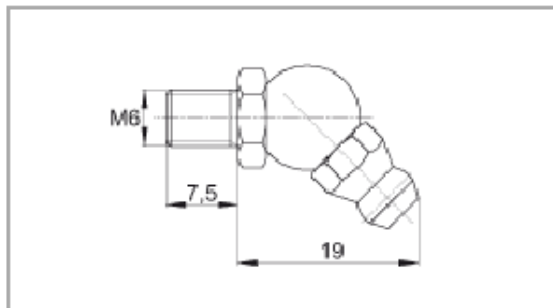
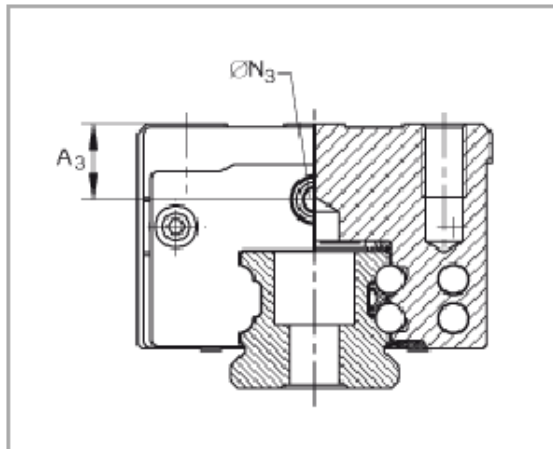
The datasheet is only an overview of dimensions and basic load ratings of the selected product. Please always observe all the guidelines in these overview pages. Further information is given on many products under the menu item "Description". You can also order comprehensive information via the Catalogue ordering system (<http://www.ina.de/content.ina.de/en/mediathek/library/library.jsp>) or by telephone on +49 (91 32) 82 - 28 97.

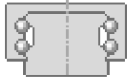
H	36 mm
B	48 mm
L	109,1 mm
1)	Locating face
2)	Marking
3)	Lubrication nipple with tapered head to DIN 71 412-B M6 is supplied loose
A1	12,5 mm
A2	6,5 mm
A3	11 mm
A4	6,5 mm
aL max	53 mm a L and a R are dependent on the length l max of the guideway
aL min	20 mm a L and a R are dependent on the length l max of the guideway
aR max	53 mm a L and a R are dependent on the length l max of the guideway
aR min	20 mm a L and a R are dependent on the length l max of the guideway
b	23 mm Tolerance: -0,005 / -0,03
G2	M6 For screws to DIN ISO 4762-12.9 Max. tightening torque in Nm: M3 = 2,5 M4 = 5 M5 = 10 M6 = 17 M8 = 41 M10 = 83

		M12 = 140 M14 = 220 M16 = 340 If there is a possibility of settling, the fixing screws should be secured against rotation
h	18,7 mm	
H ₁	5,1 mm	
h ₁	8,7 mm	
H ₅	5,25 mm	
J _B	35 mm	
J _L	50 mm	
j _L	60 mm	
J _{L6}	23,3 mm	
K ₁	M6	For screws to DIN ISO 4762-12.9 Max. tightening torque in Nm: M3 = 2,5 M4 = 5 M5 = 10 M6 = 17 M8 = 41 M10 = 83 M12 = 140 M14 = 220 M16 = 340 If there is a possibility of settling, the fixing screws should be secured against rotation
L ₁	86,5 mm	
l _{max}	2960 mm	Maximum length of single-piece guideways; longer guideways are supplied in several sections and are marked accordingly. Maximum single-piece guideway length of 6 m by agreement.
L ₈	1,65 mm	
N ₃	5,5 mm	Maximum permissible screw depth for lubrication connector: 7 mm
N ₄	5,6 mm	Maximum permissible screw depth for lubrication connector: 7 mm
S	0,8 mm	
T ₅	10 mm	
W ₆	6 mm	Width across flats
mw	1 kg	Mass of carriage
ms	2,7 kg/m	Mass of guideway Calculation of basic load rating according to DIN 636, increased basic dynamic load rating possible on the basis of practical experience.
C	23400 N	Basic dynamic load rating

Co	54000 N	Basic static load rating
Mox	745 Nm	Static moment rating about X axis
Moy	825 Nm	Static moment rating about Y axis
Moz	825 Nm	Static moment rating about Z axis







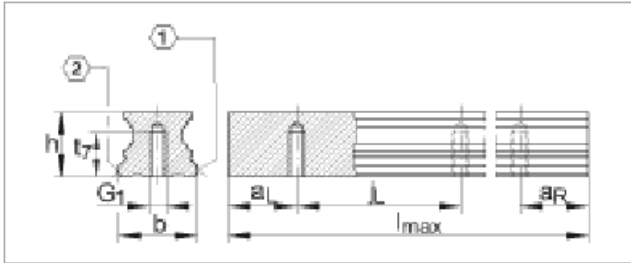
Guideways TKVD25-U (Series TKVD..-U)

for linear ball bearing unit and four-row linear recirculating ball guidance system, for screw mounting from below

The datasheet is only an overview of dimensions and basic load ratings of the selected product. Please always observe all the guidelines in these overview pages. Further information is given on many products under the menu item "Description". You can also order comprehensive information via the Catalogue ordering system (<http://www.ina.de/content.ina.de/en/mediathek/library/library.jsp>) or by telephone on +49 (91 32) 82 - 28 97.

h	18,7 mm	
b	23 mm	Tolerance: -0,005 / -0,03
l _{max}	2960 mm	Maximum length of single-piece guideways; longer guideways are supplied in several sections and are marked accordingly. Maximum single-piece guideway length of 6 m by agreement.
1)		Locating face
2)		Marking
aL _{max}	53 mm	a L and a R are dependent on the length l _{max} of the guideway
aL _{min}	20 mm	a L and a R are dependent on the length l _{max} of the guideway
aR _{max}	53 mm	a L and a R are dependent on the length l _{max} of the guideway
aR _{min}	20 mm	a L and a R are dependent on the length l _{max} of the guideway
G1	M6	For screws to DIN ISO 4762-12.9 Max. tightening torque in Nm: M3 = 2,5 M4 = 5 M5 = 10 M6 = 17 M8 = 41 M12 = 140 M14 = 220 M16 = 340 If there is a possibility of settling, the fixing screws should be secured against rotation
jL	60 mm	
t _z	12 mm	

ms 2,7 kg/m Mass of guideway



APÊNDICE A

Considerando o cenário de estrada horizontal em que o utilizador circula a um ritmo de cruzeiro, a evolução da aceleração do *Rowtrike* em função do tempo está representada no gráfico da Figura A.1.

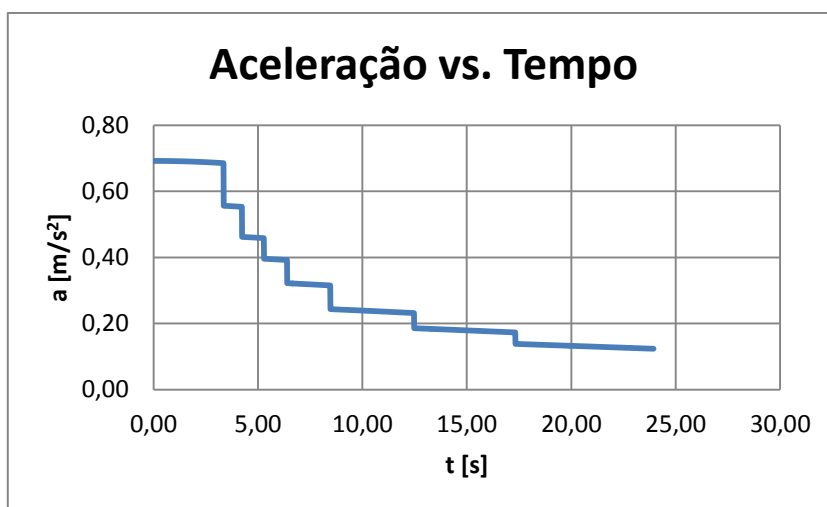


Figura A.1. Evolução da aceleração em função do tempo num trajeto horizontal a um ritmo de cruzeiro.

O gráfico da Figura A.2 representa a curva de deslocamento do *Rowtrike* em função do tempo nas condições descritas em cima.

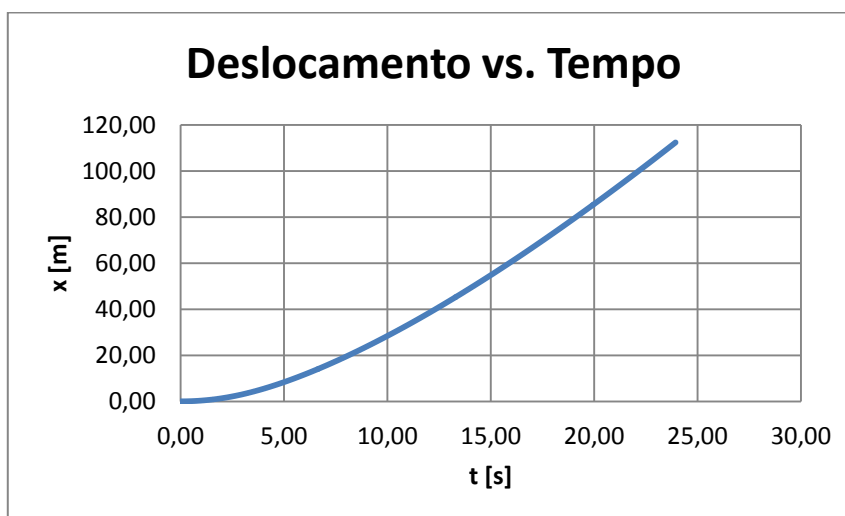


Figura A.2. Evolução do deslocamento em função do tempo num trajeto horizontal a um ritmo de cruzeiro.

APÊNDICE B

Imagens do resultado final do projeto do protótipo do *Rowtrike*.



Figura B.1. *Rowtrike*.



Figura B.2. *Rowtrike* inclinado para a direita.



Figura B.3. *Rowtrike* visto de trás.



Figura B.4. *Crash test dummy* com cerca de 1,60 m ao lado do *Rowtrike*.



Figura B.5. *Crash test dummy* sentado no Rowtrike.

APÊNDICE C

Planos de fabrico de algumas peças do sistema de propulsão do *Rowtrike*.