

Seleção de Materiais para Quadros de Bicicletas

por André Duarte B. L. Ferreira

Disciplina: Seleção de Materiais
Docente: Prof. Doutor Viriato Teixeira de Abreu e Antunes
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
5º ano, 1º semestre

Porto, 15 de Janeiro de 2014

Abstract

On this work the material selection for bike frames is studied. For this, a simple market research is done with 5 fictional metal frames. A few materials are then selected to be studied in detail based on some of their relevant properties. Their properties and the resulting bike frame are then matched against the market research frames and some solutions are proposed for the challenges that arise from making such bike frames, namely the production and joining of the bike frame tubes.

Resumo

Neste trabalho é estudada a seleção de materiais para quadros de bicicleta. Para isso, efetuou-se um estudo de mercado com 5 quadros metálicos fictícios. Selecionam-se então alguns materiais para ser estudados em detalhe baseado em algumas das suas propriedades relevantes. Essas propriedades e as do quadro resultante são comparadas relativamente às do estudo do mercado, e são propostas algumas soluções a produção do quadro nos materiais selecionados e união dos tubos.

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. PORQUE É QUE UM AUMENTO DE RIGIDEZ É VISTO COMO DESEJÁVEL?	2
2.2. QUANDO É QUE A LEVEZA DE UMA BICICLETA É MAIS DESEJADA?	2
2.3. OS ÍNDICES DE MÉRITO	3
3. ESTUDO DO MERCADO	4
3.1. MATERIAIS	4
3.1.1. QUADROS EM AÇO	4
3.1.2. QUADROS EM ALUMÍNIO	4
3.1.3. QUADROS EM TITÂNIO	5
3.2. COMPARAÇÃO DOS MODELOS EXISTENTES	5
3.2.1. CÁLCULOS	5
3.2.2. PESO	7
3.2.3. COMPARAÇÃO DOS QUADROS FD E FDGT	7
3.2.4. O QUADRO TREPA TI	9
3.2.5. OS QUADROS BIK E ALTL	14
3.3. ÍNDICES DE MÉRITO DE MATERIAIS	15
3.4. OUTRAS PROPRIEDADES A CONSIDERAR	18
3.5. PROCESSO DE UNIÃO DOS TUBOS	19
3.5.1. BRASAGEM DOS QUADROS EM AÇO	19
3.5.2. SOLDADURA DOS QUADROS EM ALUMÍNIO	21
4. SELEÇÃO E ESTUDO DE MATERIAIS PARA A BICICLETA MA2000	23
4.1. INTRODUÇÃO	23
4.2. SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA ESTUDO	23
4.2.1. POLIMÉRICOS	25
4.2.2. NATURAIS	28
4.3. ESTUDOS DAS PROPRIEDADES DOS QUADROS E DOS MATERIAIS	34
4.3.1. INTRODUÇÃO	34
4.3.2. RESISTÊNCIA À FADIGA	36
4.3.3. RESILIÊNCIA	37
4.3.4. TENACIDADE AO CHOQUE	38
4.3.5. RIGIDEZ E RESISTÊNCIA ESPECÍFICA	39
4.3.6. COMPARAÇÃO DE EI , $\sigma_E R^2 T$, ρA E ERT^2 .	42

4.3.7.	ANÁLISE DOS ÍNDICES DE MÉRITO	45
4.3.8.	RESUMO DA ANÁLISE RELATIVA AO ÍNDICES DE MÉRITO	48
5.	<u>DIMENSIONAMENTO, PRODUÇÃO E MONTAGEM</u>	50
5.1.	DIMENSIONAMENTO	50
5.1.1.	MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO	50
5.1.2.	RESULTADOS	51
5.2.	PRODUÇÃO	53
5.2.1.	TRATAMENTO DA MADEIRA	56
5.2.2.	SELEÇÃO DE ADESIVOS	58
5.3.	MONTAGEM	64
6.	<u>TRABALHOS FUTUROS E CONCLUSÕES</u>	70
7.	<u>REFERÊNCIAS</u>	72

Índice de Figuras

Figura 1: Duração da atividade física e redução de mortalidade de todas as causas. ^[3]	1
Figura 2: Sistema de eixos usado.	5
Figura 3: Comparação do índice ρA	7
Figura 4: Comparação do índice $\sigma_e r^2 t$	8
Figura 5: Comparação do índice $E l$	8
Figura 6: Comparação do índice $E r t^2$	9
Figura 7: Resumo dos resultados dos índices analisados para os 5 quadros em estudo.	9
Figura 8: Seleção de ligas de titânio para melhoria das propriedades do quadro TREPATI.	11
Figura 9: Seleção de ligas de titânio para melhoria das propriedades do quadro TREPATI, enfoque em σ_e	12
Figura 10: Seleção de ligas de titânio para melhoria das propriedades do quadro TREPATI, enfoque em ρ e E	12
Figura 11: Preço e temperatura de fusão dos quatros principais elementos usados na brasagem como metais de adição.	20
Figura 12: Variação da temperatura de fusão de ligas baseadas em cobre. ^[5]	21
Figura 13 - variação da dureza do alumínio junto da ZAC.	22
Figura 14: Escolha de materiais para análise com base em E/ρ e σ_e	24
Figura 15: Algumas bicicletas de material polimérico atualmente existentes, a Frie, a Itera, a Airbike, a “Bicicleta Invisível” e a Innervision. ^{[6],[7],[8],[9],[10]}	25
Figura 16: Esquema representativo da estrutura do quadro da bicicleta Innervision. ^[10]	26
Figura 17: Seleção de materiais poliméricos para estudo aprofundado com base em σ_e e E/ρ	27
Figura 18: Diferentes tipos de configuração dos tecidos de FC. ^[11]	27
Figura 19: Gráfico representativo das várias qualidades comerciais de FC. ^[11]	28
Figura 20: Sobreposição dos tecidos com diferentes orientações da fibra em várias camadas. ^[11]	28
Figura 21: Seleção de um material natural dos que passaram as restrições impostas no início do cap. 4.2 para estudo mais aprofundado.	28
Figura 22: Seleção de um material natural incluindo o preço como fator a ter em conta.	29
Figura 23: Bicicletas em carvalho comercializadas pelo artista Jan Gunneweg. ^[13]	30
Figura 24: Duas bicicletas em bambu comercializadas pela BambooBikeMaker. ^[15]	31
Figura 25: Duas bicicletas em bambu comercializadas pela Bamboosero e pela CalfeeDesign. ^{[16],[17]}	31
Figura 26: Joost Notenboom e Michiel Roodenburg numa jornada em bicicletas de bambu que durou 20 meses. ^[18]	32
Figura 27: Sueshiro Sano e uma das suas bicicletas em mogno. ^[19]	32
Figura 28: Duas bicicletas em mogno do designer industrial Zheng Chin produzidas em 2014. ^[35]	33
Figura 29: Resistência à fadiga dos materiais em estudo e o melhor e o pior do estudo do mercado.	36
Figura 30: Resistência à fadiga de todos os materiais (nível 1).	36
Figura 31: Resiliência dos materiais escolhidos.	37
Figura 32: Resiliência de todos os materiais (nível 1).	37
Figura 33: Tenacidade ao choque dos materiais escolhidos.	38
Figura 34: Tenacidade ao choque de todos os materiais (nível 1).	38
Figura 35: Resistência específica dos materiais escolhidos.	39
Figura 36: Resistência específica de todos os materiais (nível 1).	39
Figura 37: Rigidez específica dos materiais escolhidos.	40
Figura 38: Rigidez específica de todos os materiais (nível 1).	40

Figura 39: Extensão após rotura e energia necessária para produção de 1kg para os materiais estudados.	41
Figura 40: Extensão após rotura e energia necessária para produção de 1kg para os todos os materiais (nível 1).	41
Figura 41: Índice de mérito da rigidez com raio fixo para os materiais escolhidos.	45
Figura 42: Índice de mérito da rigidez com espessura fixa para os materiais escolhidos.	45
Figura 43: Índice da resistência à flexão com raio fixo para os materiais escolhidos.	46
Figura 44: Índice da resistência à flexão com espessura fixa para os materiais escolhidos.	46
Figura 45: Índice da resistência à encurvadura com raio fixo para os materiais escolhidos.	47
Figura 46: Índice da resistência à encurvadura com espessura fixa para os materiais escolhidos.	47
Figura 47: Fluxograma do processamento da madeira ^[21]	54
Figura 48: Esq.: Folhas de mogno coladas, antes de serem cortadas com a forma da forqueta. D ^a . Forqueta acabada. ^[22]	55
Figura 49: Construção do assento em madeira pelo método de junção de folhas de madeira com resina. ^[23]	55
Figura 50: Cortes de tubos de folhas de mogno, 2.5mm de espessura, com usados na construção de um quadro de bicicleta. Espuma de poliestireno extrudido (Styrofoam) no interior. ^[22]	55
Figura 51: Esq.: Conformação do tubo do assento. D ^a : Alguns tubos antes de serem cortados sob a forma circular. ^[22]	56
Figura 52: Tempo de cura vs temperatura necessário para 5 diferentes colas fenólicas em carvalho branco (Quercus Alba) ^[27] .	59
Figura 53: Lixa e lixadeira orbital. ^[30]	60
Figura 54: Nesta fase tanto o raspador como a plaina deverão ser usados longitudinalmente às fibras da madeira. ^[29]	60
Figura 55: Plaina e raspador: ferramentas usadas na preparação da superfície para a aplicação do adesivo.	60
Figura 56: Esq. Influência do teor de humidade na resistência à tração longitudinal em algumas espécies de madeiras. D ^a : Curvas típicas utilizadas para representar a influência do teor de humidade sobre as propriedades de resistência e rigidez, sendo as curvas a) e c) as mais frequentes. Baixo esq.: Influência do teor de humidade no módulo de elasticidade. Baixo d ^a : influência do teor de humidade na densidade aparente. ^[33]	62
Figura 57: Taxas de deterioração de alguns adesivos expostos diretamente ao ambiente. ^[31]	63
Figura 58 – Alguns dos métodos empregues na ligação de tubos de madeira: Fibras naturais e sintéticas, parafusos, adesivos para juntas em madeira, tubos e juntas metálicas.	65
Figura 59: Vários tipos de juntas utilizadas na ligação de peças de madeira. Esq. juntas entre fins de grão, end-grain joints. D ^a : Juntas entre fim de grão e canto, end-to-edge-grain joints. ^{[27],[31]}	66
Figura 60: Orientação das fibras da madeira e a sua resistência. ^[32]	66
Figura 61: Esq.: Vista de cima do tubo da pedaleira. D ^a : Ligação dos dropouts por junta de superalúminio, obtido por fundição. ^[22]	67
Figura 62: Coeficientes de expansão térmica dos materiais em estudo comparativamente a possíveis fibras para a união dos tubos.	67
Figura 63: Coeficientes de expansão térmica de metais e ligas metálicas.	68
Figura 64: Esq.: Base do quadro em mogno. D ^a quadro depois da introdução de dropouts em superalúminio, tubo de aço na pedaleira, união dos top e down tubes, adição da forqueta e do tubo do assento e envernizamento. ^[22]	69

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1: Composição química dos aços utilizados pela Duarte & C^a.</i>	4
<i>Tabela 2: Propriedades mecânicas dos aços utilizados pela Duarte & C^a.</i>	4
<i>Tabela 3: Composição química do alumínio utilizado pela Faria & Amaral e pela Teixeira & C^a Ld^a.</i>	4
<i>Tabela 4: Propriedades mecânicas do alumínio usado pela Faria & Amaral e pela Teixeira & C^a Ld^a.</i>	5
<i>Tabela 5: Composição química do titânio utilizado pela Cunha V. Ld^a.</i>	5
<i>Tabela 6: Propriedades mecânicas do titânio utilizado pela Cunha V. Ld^a.</i>	5
<i>Tabela 7: Dimensões, propriedades dos materiais e resultados dos cálculos apresentados anteriormente.</i>	6
<i>Tabela 8: Melhoria máxima possível pelo uso de Ti com melhores propriedades.</i>	11
<i>Tabela 9: Propriedades do quadro resultantes utilizando os materiais selecionados.</i>	13
<i>Tabela 10: Melhorias percentuais relativamente ao quadro original.</i>	13
<i>Tabela 11: Tabela comparativa do quadro de Al resultante das modificações propostas com o FD, BIK e ALTL.</i>	15
<i>Tabela 12: Determinação dos índices de mérito para espessura e raio constante.</i>	16
<i>Tabela 13: Tabela resumo dos índices de mérito determinados.</i>	16
<i>Tabela 14: Índices de mérito dos materiais do estudo do mercado.</i>	17
<i>Tabela 15: Alterações percentuais relativamente ao melhor índice de mérito de cada material.</i>	17
<i>Tabela 16: Cálculo exemplificativo do significado prático dos índices de mérito com a comparação da resistência à flexão do aço da FD e do Al.</i>	18
<i>Tabela 17: Tabela resumo de algumas informações relevantes para o estudo do processo de união dos tubos dos quadros do estudo do mercado.</i>	19
<i>Tabela 18 – Durezas obtidas para a brasagem com os eutéticos Ag-Cu e Cu-Zn.</i>	21
<i>Tabela 19: Resumo dos resultados e propriedades dos materiais poliméricos escolhidos e respetivos quadros.</i>	43
<i>Tabela 20: Resumo dos resultados e propriedades das madeiras escolhidas e respetivos quadros.</i>	44
<i>Tabela 21: Resumo dos valores dos índices de mérito dos materiais poliméricos escolhidos.</i>	49
<i>Tabela 22: Resumo dos valores dos índices de mérito dos materiais naturais escolhidos.</i>	49
<i>Tabela 23: Alguns adesivos utilizados na colagem de madeira, aplicações, processos e vantagens / desvantagens.</i>	63

Lista de Símbolos e Abreviaturas

A	Área
d	Diâmetro
E	Módulo de elasticidade / de Young
K_{1c}	Resistência de um material à propagação de uma fenda
r	Raio
t	Espessura
T	Temperatura
U_r	Módulo de resiliência
ρ	Densidade
σ_e	Tensão de limite elástico / de cedência
σ_f	Tensão limite de fadiga
σ_{f0}	Tensão limite de fadiga convencional a 10^7 ciclos

1. Introdução

A bicicleta é atualmente o meio de transporte de propulsão humana mais energeticamente eficiente. ^[1] Essa eficiência vai desde cerca de 85% com o uso de engrenagens até cerca de 99% sem qualquer engrenagem e analisado sob um ponto de vista puramente mecânico. Com efeito, uma pessoa de 70 kg necessita, em média, de 60 W de potência para andar a passo ligeiro (5km/h) em piso plano. A mesma pessoa no mesmo local numa bicicleta e com um output de potência igual move-se a cerca de 15 km/h. ^[2]

Devido ao seu baixo custo de obtenção e manutenção, a bicicleta é um meio de transporte que é utilizado mesmo em países subdesenvolvidos como alternativa aos meios de transporte mais caros.

Por outro lado, o uso da bicicleta tem benefícios para a saúde também. A prática de exercício físico, desde que com moderação, reduz até 50% o risco de morte de todas as causas^[3]. Como é necessário fazer exercício para andar de bicicleta, de uma maneira algo simplificada poderíamos dizer que andar de bicicleta reduz em até 50% o risco de morte de todas as causas, para pessoas sedentárias.

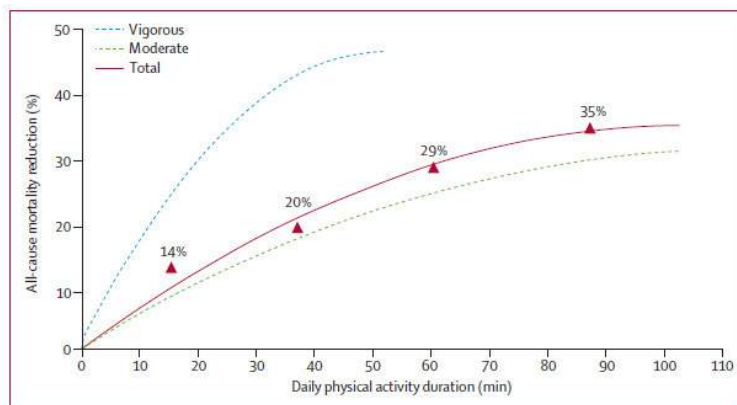


Figura 1: Duração da atividade física e redução de mortalidade de todas as causas.^[3]

Por ser um meio de transporte tão energeticamente eficiente, de fácil obtenção, amigo do ambiente e da saúde, este trabalho é realizado de muito bom grado e com a esperança de que dele possam ter tiradas conclusões úteis.

2. Revisão Bibliográfica

Esta pequena revisão bibliográfica visou apenas dar resposta a algumas dúvidas que foram surgindo com a elaboração deste estudo.

2.1. Porque é que um aumento de rigidez é visto como desejável?

No mundo do ciclismo competitivo, a elevada rigidez das bicicletas é um fator regularmente mencionado como desejável. No entanto, tais menções raramente vêm com uma explicação científica do porquê de assim o ser. Muito rapidamente, tentei procurar alguma explicação para o desejo de altos valores de rigidez.

Quando um ciclista pedala, uma parte do trabalho efetuado pelo movimento da perna é transmitido para o quadro, pela sua deflexão e armazenado sob a forma de energia potencial elástica. No entanto, nem toda a energia é convertida em energia potencial elástica, alguma será perdida por efeitos dissipativos (o deslocamento dos átomos dos tubos aumenta temporariamente a sua energia cinética aumentando por sua vez a sua temperatura). Assim, uma parte do trabalho não-útil é convertido em energia interna dos tubos, portanto energia perdida. Além disso, não é claro até que ponto a energia potencial elástica é depois convertida em trabalho útil para a corrente, pelo que é de esperar que uma parte dessa energia não seja também transmitida à corrente.

Por outro lado, há que também ter em conta que idealmente a bicicleta transmitiria a energia potencial elástica à mesma frequência que o ciclista pedala em oposição de fase relativamente ao pedalar do ciclista. Em oposição de fase para que quando o ciclista fizesse força com o pé para baixo, o quadro estivesse a subir. Tal muito provavelmente não será o caso, pois seria necessário que o quadro fosse sub-amortecido e que a frequência natural amortecida fosse igual à frequência do pedalar do ciclista, que, ainda por cima, é variável.

2.2. Quando é que a leveza de uma bicicleta é mais desejada?

Quanto maior a massa de uma bicicleta maior a energia cinética que ela tem para uma velocidade constante e maior a energia potencial para uma altura constante. Assim, em caminhos onde haja constantemente mudanças de elevação o ciclista tem de despende mais energia numa bicicleta mais pesada. Em superfícies planas, o peso só se faz notar quando há mudanças de velocidade, visto que a inércia de uma bicicleta mais pesada é maior do que uma

mais leve. Além disso, em pisos irregulares, uma bicicleta pesada sujeita os seus componentes a maiores esforços, visto que as forças do piso sobre as rodas para alterar a trajetória da bicicleta também são maiores. Finalmente, em situações de competição, que geralmente envolvem ou pisos irregulares ou declives acentuados, o baixo peso é de extrema importância.

Portanto, o peso da bicicleta é menos importante em situações de lazer e em piso plano, e essa é uma das razões pela qual na Holanda as pessoas usam as bicicletas citadinas, que geralmente pesam mais de 15 kg, como um dos meios de transporte preferencial.

2.3. Os Índices de Mérito

Um conceito dos mais importantes em seleção de materiais é o de Índice de Mérito (IM), que é uma fórmula algébrica que expressa um compromisso entre duas características ou propriedades. Na sua forma mais simples um IM é geralmente uma fração, tendo no numerador a propriedade que se quer maximizar e no denominador a que se deseja minimizar. Assim, o material que tiver um índice de mérito maior é o mais desejado.

Exemplo:

Digamos que temos uma viga encastrada de secção quadrada de lado H e de comprimento L , na qual está a ser aplicada uma força F . A deflexão é dada por

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI}$$

Como

$$I = \frac{H^4}{12}$$

Então

$$\delta = \frac{4FL^3}{EH^4}$$

Agora o objetivo é tentar por à vista a influência das propriedades dos materiais na deflexão. A massa da viga pode ser dada por

$$m = \rho V = \rho AL = \rho H^2 L$$

Pondo a equação de cima em ordem a H e substituindo na equação da deflexão

$$\delta = \frac{4FL^6 \rho^2}{m^2 E}$$

Parâmetros de engenharia

Parâmetros dos materiais

Em seleção de materiais o que nos interessa são os efeitos das propriedades dos materiais no problema em estudo. Na equação de cima as únicas propriedades de materiais presentes são ρ e E . Então para minimizar a deflexão, temos de maximizar E/ρ^2 . Como o objetivo é o de minimizar a deflexão, a esta fração, e para este caso, damos o nome de índice de mérito à deflexão.

3. Estudo do Mercado

3.1. Materiais

3.1.1. Quadros em Aço

A empresa imaginária Duarte & C^a é a principal fabricante de quadros para bicicleta em aço. As propriedades químicas são as da Tabela 1. A Duarte & C^a obtém esse aço sob duas formas: estirado sem costura, que usa na bicicleta FD, e temperado e revenido, que usa na bicicleta FDGT, o que lhe confere propriedades mecânicas diferentes, Tabela 2. A 2^a bicicleta, pela adição de GT, Grand Touring ou Turismo, deverá significar que se trata de uma bicicleta de alta performance, pelo menos comparativamente à sua irmã FD, portanto a menos que esse aumento de performance seja obtido exclusivamente por meios geométricos será de esperar melhores propriedades mecânicas do aço fornecido sob a 2^a forma.

Tabela 1: Composição química dos aços utilizados pela Duarte & C^a.

Elemento	C(%)	Mn(%)	Mo(%)
	0,3	1,3	0,15

Tabela 2: Propriedades mecânicas dos aços utilizados pela Duarte & C^a.

	E (GPa)	ρ (kg/m ³)	σ_e (MPa)	Dureza (HV)
FD	210	7870	695	259
FDGT	210	7870	927	446

3.1.2. Quadros em Alumínio

Há duas firmas que fabricam em alumínio, a Faria & Amaral que fabrica o modelo BIK, e a Teixeira & C^a Ld^a que fabrica o modelo ALTL. Ambas usam o Al-6061 no estado envelhecido, cujas propriedades químicas e mecânicas fornecidas pelas empresas se encontram na Tabela 3 e na Tabela 4.

Tabela 3: Composição química do alumínio utilizado pela Faria & Amaral e pela Teixeira & C^a Ld^a.

Elemento	Al (%)	Si (%)	Cu (%)	Mg (%)	Cr (%)	Outros (%)
	≈97,25	0,6	0,27	1	0,2	≈0,68%

Valores a cinzeno estimados pelo cálculo dos valores médios do alumínio 6061 T6.^[4]

Tabela 4: Propriedades mecânicas do alumínio usado pela Faria & Amaral e pela Teixeira & C³ Ld^a.

Propriedade	E (GPa)	ρ (kg/m ³)	σ_e (MPa)
	70	2800	350

3.1.3. Quadros em Titânio

A única empresa a fabricar em titânio é a Cunha V. Ld^a, que fabrica o modelo TREPA TI, e que utiliza um dos titânios comercialmente puros, o IMI 125 ou de grau 2.

Tabela 5: Composição química do titânio utilizado pela Cunha V. Ld^a.

Elemento	Ti (%)	O (%)	N (%)	Outros (%)
	99,4	0,13	0,008	0,462

Tabela 6: Propriedades mecânicas do titânio utilizado pela Cunha V. Ld^a.

Propriedade	E (GPa)	ρ (kg/m ³)	σ_e (MPa)
	105	4500	300

3.2. Comparação dos Modelos Existentes

3.2.1. Cálculos

Para os cálculos mais adiante vai-me facilitar a vida trabalhar com fórmulas simplificadas. No entanto quis primeiro verificar a sua precisão para ter uma ideia com o erro com que irei trabalhar. Assim, calculei tanto a área como o momento de inércia das formas exatas e aproximada.

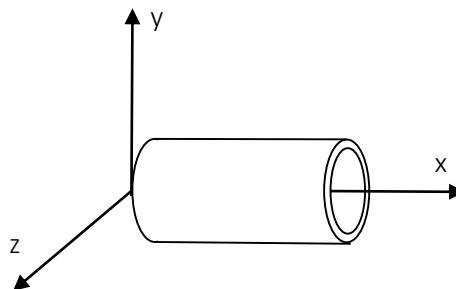


Figura 2: Sistema de eixos usado.

$$A = \pi(r_e^2 - (r_e - t)^2) = \pi(r_e^2 - r_e^2 + 2r_e t - t^2) = \pi(2r_e t - t^2)$$

Se considerarmos $r_e \gg t$

$$A \approx 2\pi r_e t$$

Relativamente ao momento de inércia

$$I_z = I_y = \frac{\pi(r_e^4 - (r_e - t)^4)}{4} \rightarrow$$

$$(r_e - t)^2(r_e + t)^2 = (r_e^2 - 2r_e t + t^2)^2$$

Se considerarmos $r_e \gg t$

$$= r_e^4 - 4r_e^3 t + 4r_e^2 t^2$$

$$I = \frac{\pi(4r_e^3 t - 4r_e^2 t^2)}{4}$$

E mais uma vez se considerarmos $r_e \gg t$ então $4r_e^3 t \gg 4r_e^2 t^2$

$$I_z = I_y \approx \pi r_{ext}^3 t$$

$$Erro = \frac{|exato - aprox. |}{exato} (\%)$$

Tabela 7: Dimensões, propriedades dos materiais e resultados dos cálculos apresentados anteriormente.

Material Ligação dos tubos	Aço	Aço	Al	Al	Ti	
	brasagem	brasagem	paraf. e adesivos	soldadura	soldadura	
	Duarte FD	Duarte FDGT	Faria BIK	ALTL Teixeira	TREPATI Cunha	
$r_{ext} =$	12,72	12,81	12,39	18,44	12,34	mm
$d_{ext} =$	25,44	25,62	24,78	36,88	24,68	mm
$t =$	0,56	0,38	1,22	1,22	0,71	mm
$A \approx$	44,8	30,6	95,0	141,4	55,0	mm ²
$A =$	43,8	30,1	90,3	136,7	53,5	mm ²
Erro =	2%	2%	5%	3%	3%	
$I \approx$	3621	2509	7290	24031	4191	mm ⁴
$I =$	3389	2400	6282	21751	3843	mm ⁴
Erro =	7%	5%	16%	10%	9%	
$\sigma_E =$	695	927	350	350	300	MPa
E	210	210	70	70	105	GPa
$\rho =$	7870	7870	2800	2800	4500	kg/m ³
$\rho A =$	0,3522	0,241	0,266	0,3958	0,248	kg/m
$EI =$	760,3	527,0	510,3	1682,2	440,1	Nm ²
$Ert^2 =$	837,7	388,5	1290,9	1921,2	653,2	Nm
$\sigma_E r^2 t =$	62,97	57,80	65,55	145,19	32,43	Nm
$E/\rho =$	26,68	26,68	25,00	25,00	23,33	Nm/mg
$\sigma_E/\rho =$	88,31	117,79	125,00	125,00	66,67	Nm/g

3.2.2. Peso

O índice que representa o peso é ρA . Este índice dá-nos o peso do quadro por unidade de comprimento. Visto que estamos a considerar as dimensões (em comprimento) dos tubos que constituem os quadros, todas iguais, então este índice fornece-nos uma medida do peso do quadro sem ser necessário calcular o seu peso total.

O quadro mais leve é o FDGT, o mais pesado o da ALTL. O 1º é leve exclusivamente devido à pequena área da sua secção reta ($44,8 \text{ mm}^2$) uma vez que o aço de que é feito é o material com maior densidade. Por sua vez, o ALTL possui uma área de secção reta muito elevada ($141,4 \text{ mm}^2$) o que tornou este quadro o mais pesado mesmo sendo feito do material menos denso.

Nota: Irei sempre ordenar os materiais, nos gráficos, do melhor para o pior.

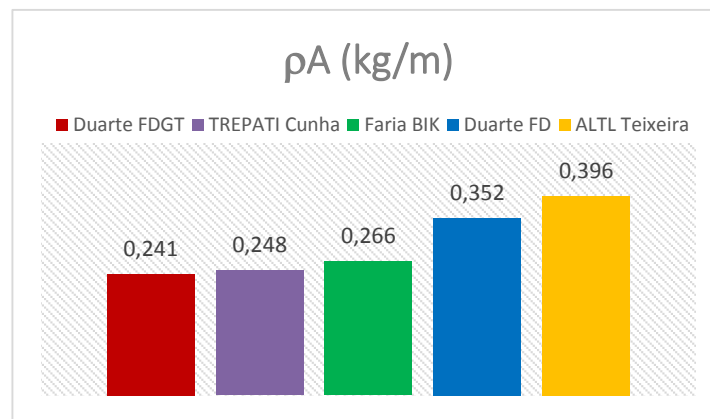


Figura 3: Comparação do índice ρA .

3.2.3. Comparação dos quadros FD e FDGT

i) Resistência mecânica à flexão

A resistência mecânica à flexão pode ser expressa de uma forma simplificada por $\sigma_e r^2 t$ (demonstração no cap. 3.3).

Das duas em análise vemos que a versão GT tem menos resistência à flexão. Isto deve-se ao elevado foco na leveza do quadro, como podemos ver no gráfico comparativo dos ρA , que neste caso específico foi conseguido à custa de uma espessura do tubo muito reduzida. Os construtores tentaram minimizar os efeitos danosos nas restantes propriedades do quadro utilizando um aço com melhores propriedades mecânicas. Assim, com uma redução no peso do quadro de

$$\frac{0,352 - 0,241}{0,352} (\%) = 32\%$$

apenas reduziram a resistência à flexão em

$$\frac{62,97 - 57,8}{62,97} (\%) = 8\%$$

o que se pode considerar um sucesso. Já o custo não terá tanto sucesso.

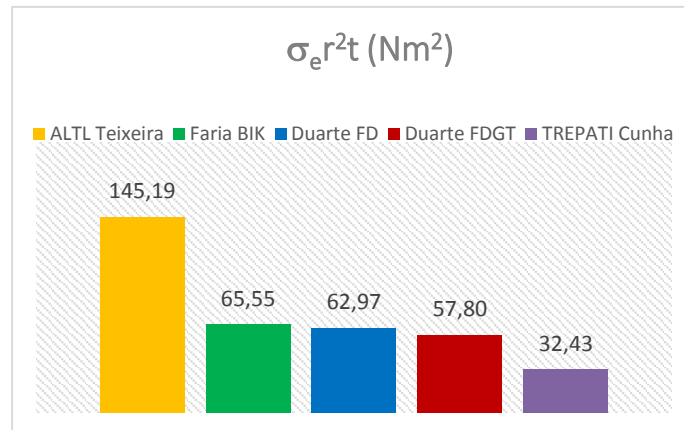


Figura 4: Comparação do índice $\sigma_e r^2 t$.

ii) Rigidez à flexão

A rigidez à flexão pode ser traduzida pelo produto EI , calculado anteriormente. Neste caso a redução da rigidez à flexão foi na mesma ordem que a redução do peso, 31%. O departamento de I&D da Duarte e C^a poderia ter aumentado um pouco o raio e conseguia uma redução bastante menos brusca neste parâmetro, conseguindo ainda uma boa redução no peso. Com efeito, como $\rho A \approx 2\pi r t$ e $EI \approx \pi r^3 t$, se aumentassem em 10% o raio, o peso aumentava 10% mas EI aumentava 33%. Mas parece que a proposta de valor de venda deste quadro deverá ser realmente o baixo peso, algo facilmente colocado como informação nos quadros publicitários ao contrário de EI .

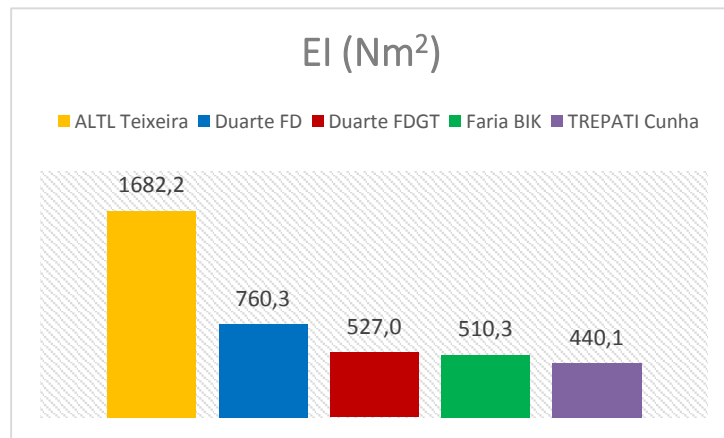


Figura 5: Comparação do índice EI .

iii) Resistência à encurvadura

A resistência à encurvadura pode ser traduzida simplificada por Ert^2 (demonstração no cap. 3.3). Aqui foi onde o quadro FDGT realmente foi atingido, visto que a redução de peso foi conseguida à custa da redução da espessura, o qual está ao quadrado na fórmula de cima e portanto é a variável que mais influencia a resistência à encurvadura. Da versão normal para a GT esta resistência vê-se reduzida em 54%. O quadro ALTL sendo o mais espesso e mais largo,

naturalmente compensou o baixo módulo de elasticidade do alumínio. O quadro da BIK obteve um bom resultado devido a ser o mais espesso dos quadros juntamente com o ALTL, variável que está ao quadrado e portanto compensou também o menor valor de E (70GPa) e um raio dos tubos ao nível dos restantes materiais.

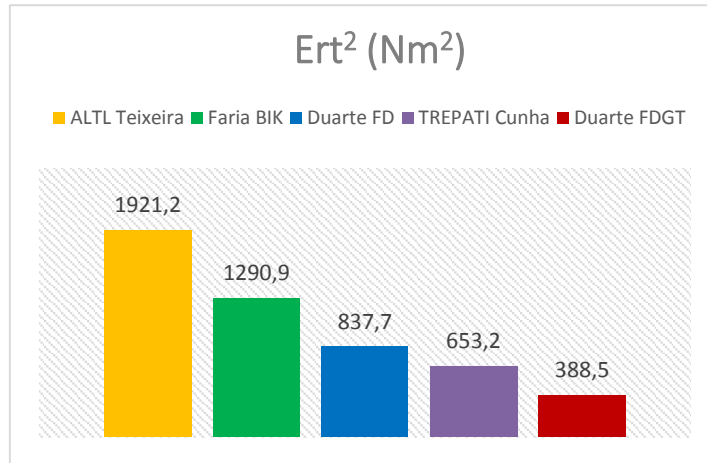


Figura 6: Comparação do índice Ert^2 .

Finalmente apresenta-se o conjunto dos resultados obtidos para cada um dos índices analisados.

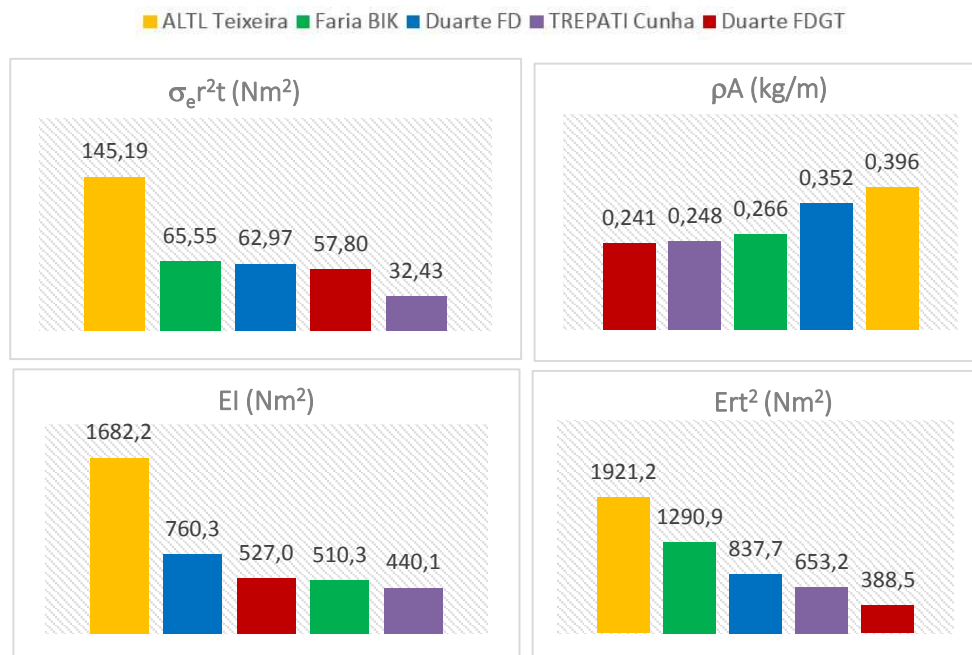


Figura 7: Resumo dos resultados dos índices analisados para os 5 quadros em estudo.

3.2.4. O quadro TREPATI

O quadro da Cunha V. Ld^a é um quadro de titânio leve com resistência à encurvadura, à flexão e rigidez modestas. De seguida pretende-se reinventar este modelo de modo a estudar as vantagens e desvantagens das alterações propostas.

i) Alterações à geometria do quadro

Admitindo que a resistência à encurvadura mais baixa dos quadros estudados é aceitável, portanto a do FDGT pretende-se redesenhar a secção do tubo TREPATI não alterando o peso mas permitindo que a resistência à encurvadura baixe até valores idênticos ao da bicicleta FDGT. Pondo isto na forma matemática, o que se pretende é que

$$\begin{aligned}(\rho A)_{TREPATI} &= (\rho A)_{TREPATI, modificada} \\ 2\pi(rt)_{TREPATI} &= 2\pi(rt)_{TREPATI, m} \\ (rt)_{TREPATI} &= (rt)_{TREPATI, m}\end{aligned}$$

Assim garante-se pesos iguais. Para igualarmos a resistência à encurvadura dos dois quadros temos de garantir que

$$(Ert^2)_{FDGT} = (Ert^2)_{TREPATI, m}$$

Assim é necessário resolver o seguinte sistema de equações. Retirei o índice TREPATI, para se melhor entender o que está escrito.

$$\begin{cases} \frac{(Ert^2)_{FDGT}}{E} = r_m t_m^2 \\ rt = r_m t_m \end{cases}$$

Assim, o que terá de acontecer é uma redução da espessura e um aumento em igual proporção do raio. Deste modo a resistência à encurvadura reduz-se visto que a espessura é um fator mais poderoso na mesma do que o raio por estar ao quadrado, mas o peso mantém-se igual. Vamos ver se não é isso que vai acontecer. Resolvendo,

$$\begin{cases} \frac{(Ert^2)_{FDGT}}{E} = \frac{rt}{t_m} t_m^2 \\ \frac{rt}{t_m} = r_m \end{cases} \rightarrow \begin{cases} t_m = \frac{(Ert^2)_{FDGT}}{Ert} \\ r_m = \frac{Ert}{(Ert^2)_{FDGT}} \end{cases}$$

Entrando com os valores, chega-se a

$$\begin{aligned}t_m &= 0,42 \text{ mm} \\ r_m &= 20,75 \text{ mm}\end{aligned}$$

Ver tabela no final com todas as modificações

Vantagens:

- maior rigidez à flexão (83% maior);
- maior resistência à flexão (68% maior);

Desvantagens:

- perfil mais esbelto, logo menos resistente à encurvadura (41% menor).

ii) Alterações ao material do quadro

Alternativamente, (ou em conjunto, mas para já é melhor analisar uma variável de cada vez), também se pode melhorar os índices indicados atrás utilizando uma liga de titânio mais resistente. De seguida, investiga-se essa hipótese.

3. Procedimentos

Existem muitas formas de atacar o assunto. Uma maneira de o fazer é, por exemplo, se não nos preocuparmos com o preço e ir ver o melhor que o Ti e suas ligas atualmente têm para dar em termos dos índices que temos vindo a analisar. Assim analisemos as três propriedades dos materiais a que temos vindo a dar enfoque, ρ , E e σ_e , que têm influência nos tais índices.

Tabela 8: Melhoria máxima possível pelo uso de Ti com melhores propriedades.

Variação da propriedade	entre (...) – (...)	valor atual	Melhoria máxima
ρ (MPa)	4350 - 5100	4500	(-) 3%
E (MPa)	63 - 130	105	24%
σ_e (MPa)	172 - 1260	300	320%

Como nos índices estudados as propriedades dos materiais têm sempre expoente um, um aumento de x% da mesma, traduz-se numa melhoria de x% do índice. Então o maior potencial para melhoria pela alteração do titânio encontra-se no aumento da resistência à encurvadura por 320%, seguido do aumento da rigidez à flexão por 24% e uma diminuição do peso em 3%.

Podemos juntar os dois fatores que têm menos influência, ρ e E, que convenientemente dá resistência específica se colocarmos sob a forma E/ρ e usar esse parâmetro num eixo e no outro eixo σ_e .

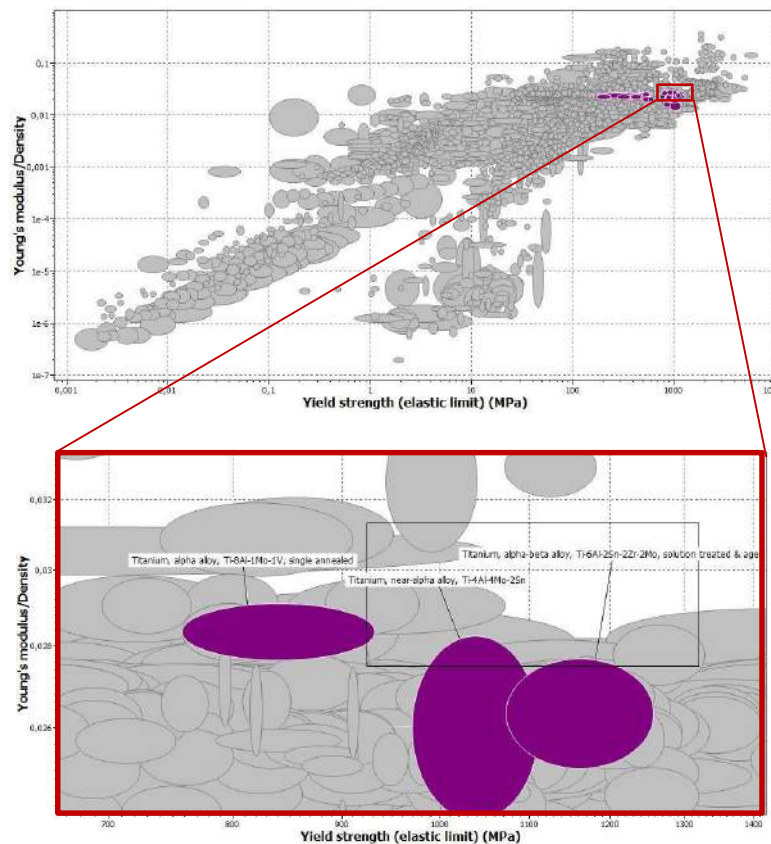


Figura 8: Seleção de ligas de titânio para melhoria das propriedades do quadro TREPATI.

3. Procedimentos

Por outro lado, não queremos ter de usar ligas de titânio feitas em laboratório ou com baixa capacidade de produção em massa e alto preço. Como o preço é geralmente um fator de peso, para essa maioria dos casos consideremo-lo então. Pode-se observar um *cluster* de titânios a rondar o preço 7,5-8,5, que é a zona onde se encontra o Ti usado pela TREPA TI.

Neste momento só deixamos passar Ti com potencial para nos darem um quadro melhor principalmente na resistência à encurvadura.

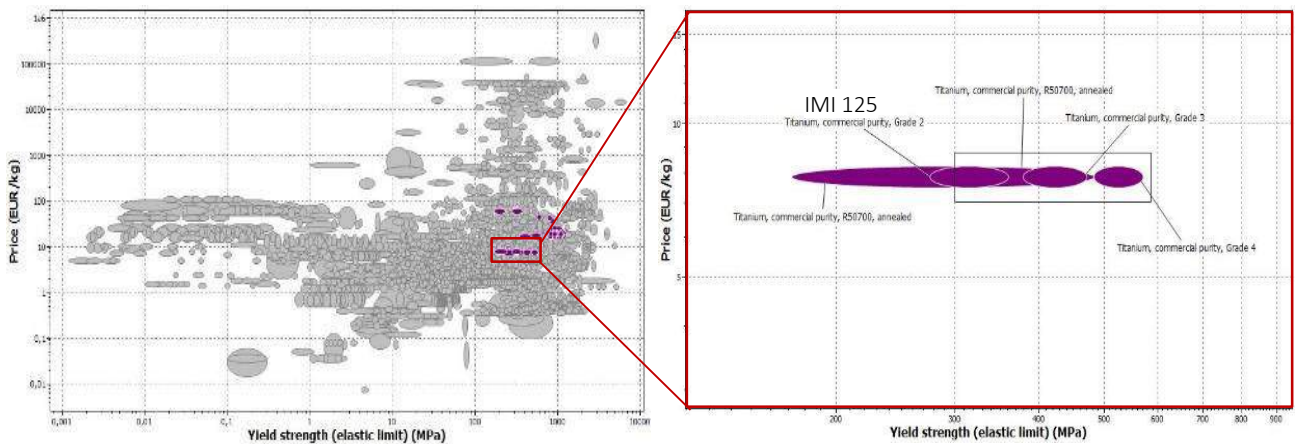


Figura 9: Seleção de ligas de titânio para melhoria das propriedades do quadro TREPATI, enfoque em σ_e .

Observando agora os outros dois parâmetros, temos duas (boas) opções. Se escolhermos o Ti comercialmente puro grau 4 sacrificamos um pouco o peso com a possibilidade de melhorar um pouco a rigidez à flexão. Se escolhermos o Ti R50700 recozido, aumentamos a rigidez à flexão com a possibilidade de diminuir / risco de aumentar o peso.

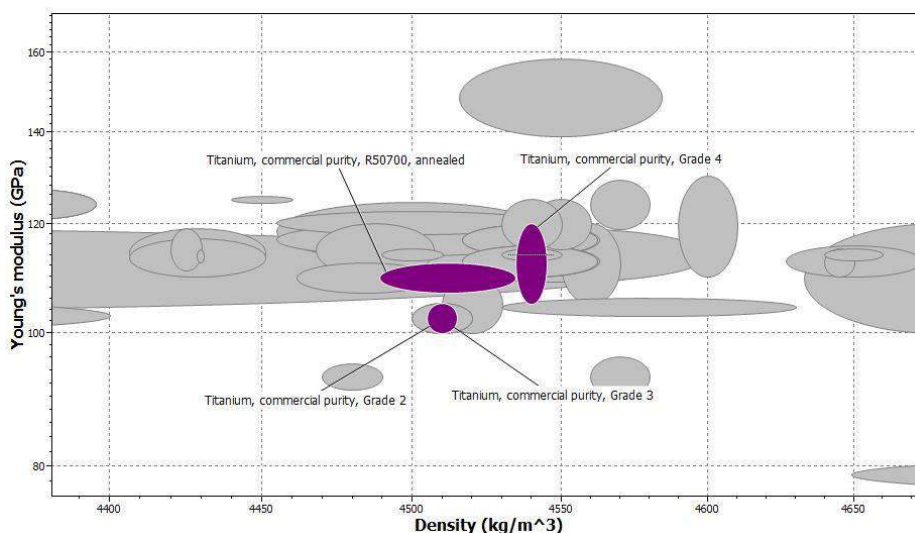


Figura 10: Seleção de ligas de titânio para melhoria das propriedades do quadro TREPATI, enfoque em ρ e E.

Tendo em conta este gráfico nos dizer que as densidades e módulos de elasticidade entre os 4 titânios apresentados variam muito pouco, escolho então o titânio comercialmente puro grau 4 por apresentar uma σ_e bastante maior que os restantes.

Tabela 9: Propriedades do quadro resultantes utilizando os materiais selecionados.

	Duarte FDGT	TREPATI Cunha	TREPATI mod	α - β	qs α	α	Grau 4	
r=	12,8	12,3	20,7	12,3	12,3	12,3	12,3	mm
t=	0,4	0,7	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7	mm
A≈	30,6	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	mm ²
I≈	2509	4191	11850	4191	4191	4191	4191	mm ⁴
σ_E =	927	300	300	1165	1040	844	621	MPa
E	210	105	105	119	120	124	113	GPa
ρ =	7870	4500	4500	4505	4600	4375	4545	kg/m ³
ρA =	0,241	0,248	0,248	0,248	0,253	0,241	0,250	kg/m
EI=	527,0	440,1	1244,2	496,7	502,9	519,7	471,5	Nm ²
Ert ² =	388,45	653,16	388,45	737,14	746,47	771,35	699,82	Nm
$\sigma_E r^2 t$ =	57,80	32,43	54,54	125,95	112,44	91,25	67,14	Nm

Comparando as alterações dos índices dos quadros com Ti diferente relativamente ao quadro original TREPATI obtive a Tabela 10.

Tabela 10: Melhorias percentuais relativamente ao quadro original.

	TREPATI	TREPATI mod	α - β	qs α	α	Grau 4
ρA =	0,248	0%	0%	2%	-3%	1%
EI=	440,1	183%	13%	14%	18%	7%
Ert ² =	653,16	-41%	13%	14%	18%	7%
$\sigma_E r^2 t$ =	32,43	68%	288%	247%	181%	107%
Total =	—	210%	314%	277%	215%	122%
Preço €/m ³	1,98	1,98	4,56	4,65	4,17	2,00

Desta análise posso concluir que sim, é possível uma melhoria significativa dos índices de rigidez à flexão, resistência à flexão e sobretudo à encurvadura utilizando outros tipos de titânio. As maiores alterações registam-se ao nível da resistência à encurvadura devido ao aumento tão grande de σ_E dos 3 materiais caros. Aparentemente a liga $\alpha - \beta$ analisada parece ser a melhor, mas convém não esquecer que as ligas de Ti bifásicas são pouco soldáveis, e sendo esse o método preferido de junção dos tubos quando estes são de Ti, eu apontaria antes para a liga quase α ou α os quais apresentam boa soldabilidade. Ao nível do preço de 8 €/kg, essa melhoria é menos acentuada e é ao custo de um aumento ligeiro do peso.

3.2.5. Os quadros BIK e ALTL

i) Resistência Mecânica à Flexão

Em termos deste parâmetro estes dois quadros são os vencedores, especialmente o ALTL com um valor 2,2 vezes superior ao da BIK. Este soberbo resultado pode ser atribuído ao raio do tubo do quadro que é de longe o maior de todos os quadros, mantendo-se a espessura próxima das dos outros quadros.

ii) Rigidez à Flexão

O quadro da ALTL volta a ficar em 1º lugar também com um avanço considerável relativamente ao outro quadro de Al, a BIK, com 3,3 vezes mais rigidez à flexão. Mais uma vez é o valor alto do raio o grande responsável por este valor fabuloso, que fornece a este quadro também o maior momento de inércia dos quadros analisados, uma vez que o valor do módulo de elasticidade é o mesmo do quadro da BIK.

iii) Resistência à Encurvadura

Continuando com os pódios o quadro da ALTL toma o 1º lugar seguido da BIK. A razão para isto prende-se com a espessura dos tubos destes dois quadros ser a maior por um fator que compensa o mais baixo módulo de elasticidade relativamente aos aços e ao Ti. Dentro dos quadros em Al, a ALTL toma a fronteira porque apresenta a mesma espessura e módulo de elasticidade mas bem maior raio que a BIK.

iv) Novo quadro em Al

É agora pedido que se redesenhe um quadro em Alumínio com um peso de 0.25 kg/m e com uma resistência à encurvadura igual à do modelo FD, ou seja,

$$\begin{cases} \rho A = 2\rho\pi r t = 0,25 \\ E r t^2 = (E r t^2)_{FD} \end{cases}$$

Resolvendo,

$$\begin{cases} \frac{0,25}{2\rho\pi t} \\ t^2 = \frac{(E r t^2)_{FD} \cdot 2\rho\pi}{0,25E} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} r = \frac{0,25}{2\rho\pi \left(\frac{(E r t^2)_{FD} \cdot 2\rho\pi}{0,25E} \right)} \\ t = \frac{(E r t^2)_{FD} \cdot 2\rho\pi}{0,25E} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} r = \frac{0,25^2 E}{(E r t^2)_{FD} \cdot 4\rho^2 \pi^2} \\ t = \frac{(E r t^2)_{FD} \cdot 8\rho\pi}{E} \end{cases}$$

Entrando com os valores, tiramos que

$$\begin{aligned} r &= 16,87 \quad \text{mm} \\ t &= 0,84 \quad \text{mm} \end{aligned}$$

Relativamente aos dois quadros de Al, a redução da resistência à encurvadura para o valor do quadro FD foi conseguida essencialmente à custa da redução da espessura, a qual tem um peso mais importante nesse parâmetro.

Conseguimos assim uma bicicleta com as propriedades constantes na tabela em baixo.

Tabela 11: Tabela comparativa do quadro de Al resultante das modificações propostas com o FD, BIK e ALTL.

	Duarte FD	Faria BIK	ALTL Teixeira	Al mod	
r=	13	12	18	16,87	mm
t=	0,56	1,22	1,22	0,84	mm
A≈	44,8	95,0	141,4	89,3	mm ²
I≈	3621	7290	24031	12711	mm ⁴
σ _E =	695	350	350	350	MPa
E	210	70	70	70	GPa
ρ=	7870	2800	2800	2800	kg/m ³
ρA=	0,352	0,266	0,396	0,250	kg/m
EI=	760	510	1682	890	Nm ²
Ert ² =	838	1291	1921	838	Nm
σ _E r ² t=	62,97	65,55	145,19	83,92	Nm
E/ρ=	2,7E+07	2,5E+07	2,5E+07	2,5E+07	Nm/kg
σ _E /ρ=	8,8E+04	1,3E+05	1,3E+05	1,3E+05	Nm/kg

3.3. Índices de Mérito de Materiais

De seguida é pedido para se analisar os índices de mérito relativos

à rigidez

$$EI \approx \pi E r^3 t$$

$$EI \propto E r^3 t$$

ao peso

$$m = \rho A$$

$$m \approx 2\pi r t$$

$$m \propto r t$$

à resistência à flexão

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

Podemos chamar ao momento que faz com que se atinja a tensão de limite elástico no tubo, de momento crítico. À flexão isso acontece na periferia do tubo. Então,

$$\sigma_e = \frac{Mr}{I} \approx \frac{Mr}{\pi r^3 t}$$

$$M \approx \pi \sigma_e r^2 t$$

$$M \propto \sigma_e r^2 t$$

à resistência à encurvadura, que pode ser dado pelo momento crítico à encurvadura:

$$M \propto Ert^2$$

Tendo por base as relações acima, determina-se os índices de mérito para dois casos: 1) não nos importa qual é a espessura dos tubos, portanto os parâmetros a definir são o peso e o raio 2) não nos importa qual é o raio dos tubos, onde os parâmetros definidos são o peso e a espessura. Explicando de outra forma, por exemplo para o caso 1), sendo o raio e o peso (massa) do quadro impostos, qual o material que permite maximizar por exemplo a rigidez, se não nos importarmos com o raio final dos tubos? A resposta é o que tiver o maior índice de mérito para essa situação (E/ρ como se verá).

Tabela 12: Determinação dos índices de mérito para espessura e raio constante.

r fixo (peso fixo, t qualquer)			
Rigidez	$\propto Er^3t$	m	$\propto prt$
	$\propto \frac{E}{\rho}r^2m$	t	$\propto \frac{m}{\rho r}$
	$\propto \frac{E}{\rho}$		
Resistência à encurvadura	$\propto Ert^2$	Resistência à flexão	$\propto \sigma_e r^2 t$
	$\propto \frac{Erm^2}{\rho^2 r^2}$		$\propto \frac{\sigma_e r^2 m}{\rho r}$
	$\propto \frac{E}{\rho^2}$		$\propto \frac{\sigma_e}{\rho}$
t fixo (peso fixo, r qualquer)			
Rigidez	$\propto Er^3t$	m	$\propto prt$
	$\propto \frac{Em^3}{\rho^3 t^3}$	r	$\propto \frac{m}{\rho t}$
	$\propto \frac{E}{\rho^3}$		
Resistência à encurvadura	$\propto Ert^2$	Resistência à flexão	$\propto \sigma_e r^2 t$
	$\propto \frac{Em}{\rho t}$		$\propto \frac{\sigma_e m^2}{\rho^2 t^2}$
	$\propto \frac{E}{\rho}$		$\propto \frac{\sigma_e}{\rho^2}$

Tabela 13: Tabela resumo dos índices de mérito determinados.

	r fixo	t fixo
Rigidez	E/ρ	E/ρ^3
Resistência à flexão	σ_e/ρ	σ_e/ρ^2
Resistência à encurvadura	E/ρ^2	E/ρ

Tabela 14: Índices de mérito dos materiais do estudo do mercado.

		Material >>	Aço	Aço	Al	Al	Ti
			Duarte FD	Duarte FDGT	Faria BIK	ALTL Teixeira	TREPATI Cunha
Rigidez	r fixo	$10^3 E/\rho=$	26,7	26,7	25,0	25,0	23,3
	t fixo	$10^{11} E/\rho^3=$	43,1	43,1	318,9	318,9	115,2
Resistência à flexão	r fixo	$10^3 \sigma_e/\rho=$	88,3	117,8	125,0	125,0	66,7
	t fixo	$10^6 \sigma_e/\rho^2=$	11,2	15,0	44,6	44,6	14,8
Resistência à encurvadura	r fixo	$10^7 E/\rho^2=$	33,9	33,9	89,3	89,3	51,9
	t fixo	$E/\rho=$	26,7	26,7	25,0	25,0	23,3

As cores foram colocadas dependendo dos resultados para cada índice de mérito, verde o melhor, seguido de amarelo, depois laranja e vermelho o pior. De seguida calculei a diferença relativa ao melhor de cada índice de mérito e somei a distância a um material imaginário cujos índices de mérito seriam os melhores valores obtidos.

Tabela 15: Alterações percentuais relativamente ao melhor índice de mérito de cada material.

		Material >>	Aço	Aço	Al	Al	Ti
			Duarte FD	Duarte FDGT	Faria BIK	ALTL Teixeira	TREPATI Cunha
Rigidez	r fixo	E/ρ	0%	0%	-6%	-6%	-13%
	t fixo	E/ρ^3	-86%	-86%	0%	0%	-64%
Resistência à flexão	r fixo	σ_e/ρ	-29%	-6%	0%	0%	-47%
	t fixo	σ_e/ρ^2	-75%	-66%	0%	0%	-67%
Resistência à encurvadura	r fixo	E/ρ^2	-62%	-62%	0%	0%	-42%
	t fixo	E/ρ	0%	0%	-6%	-6%	-13%
		Total=	-253%	-221%	-13%	-13%	-244%

O que podemos tirar destas tabelas?

- 1) O aço é o que tem melhor rigidez específica algo que se verifica no IM rigidez para r fixo e IM resistência à encurvadura para t fixo.
- 2) O alumínio é o que apresenta os melhores restantes índices de mérito.
 - a. Relativamente aos aços, tal facto deve-se essencialmente à baixa densidade do Al, cerca de 1/3 da dos aços, enquanto as propriedades a maximizar do Al, em numerador, são sempre no mínimo 1/3 das dos aços. O resultado disto é que sempre que a densidade estiver com algum fator de potência a diferença entre ela e a propriedade em numerador exacerba-se e portanto o Al tem tendência a ficar com um índice de mérito superior. Repare-se que a única altura em que o Al não tem IM superior ao dos aços é quando a densidade tem o fator de potência 1.

- b. Relativamente ao titânio, este tem todos os índices de mérito piores que os do alumínio porque possui σ_e inferior ao alumínio mas ρ superior e E muito próximo.

Analisemos a título exemplificativo uma célula, para se perceber o tipo de análise detalhada que é possível extrair das tabelas.

O Al tem IM de resistência à flexão de 44,6 enquanto que o aço da FD tem 11,2, para espessura fixa. Como dissemos anteriormente, a resistência à flexão $\approx \frac{\sigma_e}{\rho^2} \cdot \frac{m^2}{t^2}$ o que resultou no índice de mérito da resistência à flexão ser diretamente proporcional a $\frac{\sigma_e}{\rho^2}$. Isto significa que, se mantivermos a massa e a espessura constante dos dois tubos, o tubo do alumínio terá $44,6/11,2 = 3,98$ vezes a resistência à flexão da do aço – ou se quisermos ler como está na tabela de baixo, o aço terá 75% a menos da resistência à flexão do alumínio. Igualando então as espessuras e massas, podemos observar isso mesmo. O rácio das duas resistências à flexão, cada uma dada por $\sigma_e r^2 t$, é precisamente $250.5/62.97 = 3.98$ (ou então, para se usar a percentagem da tabela, $250.5-250.5*0.75 = 62.97$)

Tabela 16: Cálculo exemplificativo do significado prático dos índices de mérito com a comparação da resistência à flexão do aço da FD e do Al.

	Duarte FD	ALTL Teixeira	
$r_{ext} =$	12,72	35,75	mm
$t =$	0,56	0,56	mm
$A \approx$	44,8	125,8	mm ²
$\sigma_E =$	695	350	MPa
$\rho =$	7870	2800	kg/m ³
$\rho A =$	0,3522	0,3522	kg/m
$\sigma_E r^2 t =$	62,97	250,50	Nm

Isto por exemplo permite-nos concluir que os tubos no aço FD, para conseguirem as mesmas propriedades que os do Al, excetuando rigidez para r fixo e resistência à encurvadura para t fixo, precisam de ser mais pesados, mais espessos ou mais largos.

3.4. Outras Propriedades a Considerar

Existem outras propriedades dos materiais que têm uma influência mais subtil e cujo efeito se faz sentir com o tempo ou com certas situações específicas como velocidade de impacto ou efeito da variação da temperatura. Assim, pode-se também, numa análise de seleção de materiais considerar

- 1) a sua resistência à corrosão, essencial para uma boa longevidade da bicicleta em ambientes húmidos, perto do mar e/ou chuvosos ;
- 2) tenacidade ao choque, resistência à fadiga e resiliência, para as pessoas que irão pagar uma quantia avultada pela bicicleta e tão cedo não querem ter problemas, mas ainda assim lhe dão um uso intensivo, e/ou que frequentemente ciclam por pisos acidentados;

- 3) propriedades de visco elasticidade caso estejamos a falar de quadros em polímero ;
- 4) fluência, e aqui lembro-me das pessoas que vivem no equador sob temperaturas um pouco mais altas e que usam a bicicleta com frequência para o transporte frequente de cargas

3.5. Processo de União dos Tubos

Tabela 17: Tabela resumo de algumas informações relevantes para o estudo do processo de união dos tubos dos quadros do estudo do mercado.

Quadro	Material	Estado fornecido	Processo de união dos tubos
FD	Aço	Estirado sem costura	Brasagem dos tubos em encaixes
FDGT	Aço	Temperado e revenido	Brasagem dos tubos em encaixes
BIK	Al	Envelhecido	Parafusos e adesivos
ALTL	Al	Envelhecido	Soldadura MIG, proteção árgon
TREPA TI	Ti		Soldadura

3.5.1. Brasagem dos Quadros em Aço

A brasagem é a ligação de dois elementos metálicos por meio de um metal de adição no estado líquido, cuja temperatura de fusão é inferior à dos metais de base, os quais, portanto, não participam por fusão na constituição da junta. Quando a temperatura de fusão do metal de adição é superior a 450°C temos a brasagem, e a penetração do metal de adição entre as superfícies a ligar dá-se por capilaridade.

Como **vantagens** temos:

- 1) possibilidade de ligação de materiais heterogéneos ;
- 2) fácil automatização ;
- 3) possibilidade de combinação da brasagem com tratamento térmico ;
- 4) baixos níveis de tensões residuais e empenos ;
- 5) não necessita de limpeza da junta.

Como principais **desvantagens**:

- 1) a necessidade da junta de ter uma forma apropriada para que se obtenha o efeito de capilaridade ;
- 2) a possível ocorrência de corrosão galvânica devido à combinação de diferentes materiais e quando na presença de um meio corrosivo.

3. Procedimentos

Relativamente aos materiais de adição estes são geralmente à base de prata, cobre, alumínio, ou níquel. Os dois quadros em estudo foram submetidos a testes em que se utilizou a brasagem com materiais de adição à base de prata e cobre mais especificamente os eutéticos Ag-Cu e Cu-Zn e depois se mediu a dureza.

Como se pode ver na Figura 11, das 4, as ligas baseadas em cobre são as mais baratas, algo que é maximizado quando se trata de uma liga de Cu-Zn. Apesar da temperatura de fusão do cobre rondar os 1100°C a adição de zinco permite a utilização de temperaturas mais baixas. É de lembrar que temos de trabalhar com o metal de adição a uma temperatura acima da fusão, portanto acima de 1100°C. Ainda assim este abaixamento não é tão notável como com a adição de prata, Figura 12, pelo que geralmente na brasagem de aços com ligas Cu-Zn ocorre um tratamento térmico na zona afetada pelo calor.

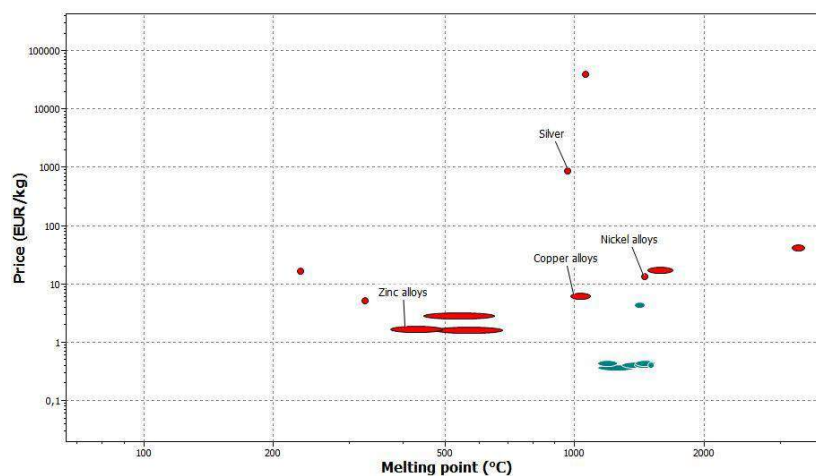


Figura 11: Preço e temperatura de fusão dos quatro principais elementos usados na brasagem como metais de adição.

Este efeito pode ser aumentado pelo sobreaquecimento da liga. Este tratamento térmico pode ou não ser desejável conforme o aço em questão. Por exemplo no caso do quadro FDGT cujo aço que já vem com um tratamento térmico que lhe aumenta a dureza, submete-lo a este novo tratamento desfaz parcial ou totalmente esse efeito, e possivelmente outros como o aumento da resistência mecânica, dependendo do local, diminuindo a dureza do aço. Por esse motivo para este quadro usaram um metal de adição baseado em prata, que permite o uso de temperaturas mais baixas.

Já para o quadro FD, o tratamento térmico é conveniente, sendo que quanto maior a temperatura de aquecimento maior é a dureza final. Assim faz sentido na união dos tubos do quadro FD usar o eutético Cu-Zn com sobreaquecimento.

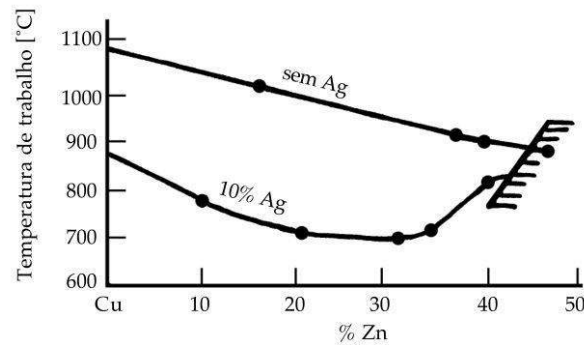


Figura 12: Variação da temperatura de fusão de ligas baseadas em cobre.^[5]

Tabela 18 – Durezas obtidas para a brasagem com os eutéticos Ag-Cu e Cu-Zn.

Quadro	Estado Fornecido	Dureza (HV)	Ag-Cu	Cu-Zn	Cu-Zn com sobreaquecimento
FD	Estirado sem costura	259	248	272	280
FDGT	Temperado e revenido	446	311	277	302

3.5.2. Soldadura dos Quadros em Alumínio

Quanto aos quadros em alumínio estes foram soldados pela técnica MIG cujo gás inerte de proteção foi o argon. O que isso significou para estes dois quadros é que não foi necessário remover escória, o processo pode ser automatizado, caso desejassem, e com um tempo de execução curto. Por outro lado devido à necessidade de utilização de um gás inerte, bem como de amortizar o alto custo do equipamento e sua manutenção é um processo comparativamente caro em relação a outros métodos de soldar, pelo que este processo acrescentará um custo ao quadro maior que a brasagem acrescentou ao custo dos dois quadros anteriores.

A somar a isso há ainda que ter em conta que o alumínio do quadro foi fornecido no estado envelhecido, isto é, passou por um tratamento térmico de endurecimento por precipitação. Ora vendo na Figura 13 há uma queda acentuada de dureza junto da toma afetada pelo calor. Essa queda deve-se ao facto da eliminação do efeito do aumento da dureza obtido pelo tratamento térmico por precipitação. O que significa que, para evitar ficar com uma junta que pode comprometer a integridade estrutural da bicicleta, se deve proceder a novo tratamento para repor os valores de dureza obtidos anteriormente. Assim, não só é necessário um processo de soldadura que já não é barato, ainda é preciso fazer novo tratamento térmico e sujeitar todo o quadro a esse tratamento, o que irá encarecer os quadros. Juntamente com o preço do alumínio, esta será outra razão porque as bicicletas de alumínio geralmente são mais caras que as de aço.

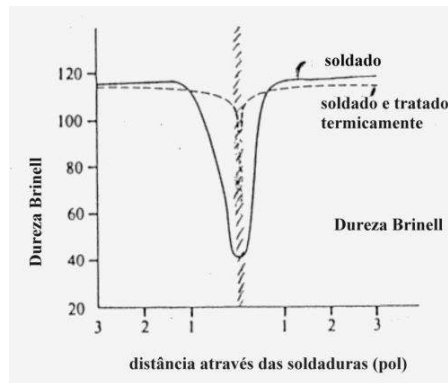


Figura 13 - variação da dureza do alumínio junto da ZAC

Assim, depois de feita a soldadura, os técnicos da ALTL e da BIK deverão submeter o quadro a um tratamento de solubilização seguido de endurecimento por precipitação.

4. Seleção e Estudo de Materiais para a Bicicleta MA2000

4.1. Introdução

O estudo do mercado não foi mais do que um meio de obter termos de comparação para as análises que forem feitas a seguir. Além disso, ficamos a saber melhor as características dos quadros conforme o seu segmento de mercado, o que ajudará a posicionar a bicicleta no seu. Por exemplo, como não é pretendido uma bicicleta de competição, não é necessário que os índices se aproximem dos da FDGT, bastará que estejam perto por exemplo da FD ou da BIK. É claro que “perto” significa que deverão ser no mínimo iguais ou superiores aos valores piores obtidos, a menos que tenha alguma outra característica (beleza de design, custo, funcionalidade) que de alguma forma compense esse facto.

Com este estudo pretende-se o estudo comparativo com o que existe no mercado. Pretende-se analisar a viabilidade da construção de bicicletas em alguns materiais poliméricos e madeiras, dando-se ênfase a estas últimas. Assim, em vez de seleccionar apenas um material, serão seleccionados vários, e para todos eles será estudada a viabilidade da construção e da produção de quadros.

4.2. Seleção de materiais para estudo

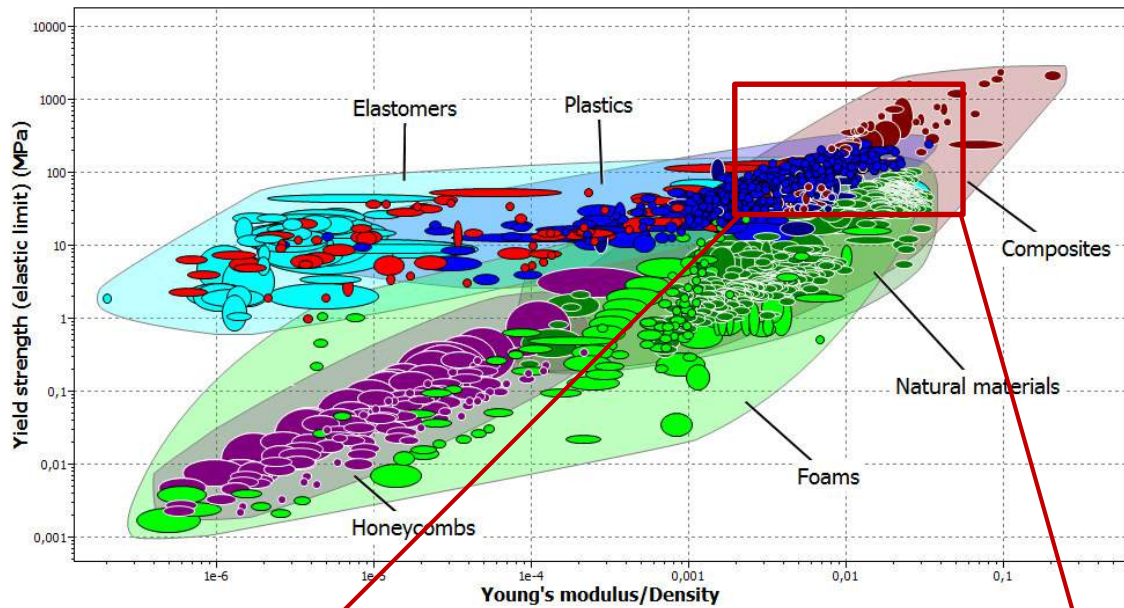
Optei por eliminar os seguintes materiais da análise

- 1) Metais: muito comuns, soluções óbvias passam por aço, alumínio, titânio e magnésio;
- 2) Cerâmicos e vidros: elevada fragilidade;
- 3) Fibras e partículas, pós: grande parte não é apropriado como material estrutural, muitos com preço elevado.

Para além destas razões, por uma questão de preferência pessoal, preferi cingir-me aos materiais poliméricos e naturais. Os primeiros porque são muito raras as bicicletas feitas desse material. Os segundos porque a bicicleta é um meio de transporte muito ecológico e no qual o ciclista se move em um com a natureza, apenas com a força dos seus músculos. Aqueles que frequentemente andam de bicicleta sabem do sentimento de que falo. Assim, andar numa bicicleta feita de materiais dados diretamente pela natureza é muito apelativo. Além disso, as bicicletas de madeira são muito bonitas, e apesar de não ser um material apropriado para produção em larga escala devido aos problemas ambientais que isso causaria bem como devido às dificuldades de fabrico inerentes ao tratamento e processamento da madeira e fabrico da bicicleta, como se verá mais à

frete, é um material que é efetivamente usado no fabrico de bicicletas por alguns produtores independentes e algumas pequenas empresas.

Utilizando o CES Edupack, e limita-se então os materiais a polímeros (plásticos e elastómeros) e híbridos (compósitos de polímero e de materiais naturais, espumas, materiais para estruturas ninho de abelha e materiais naturais). Como está é uma fase de “desbaste” para selecionar apenas alguns materiais com boas propriedades de interesse, analise-se a resistência mecânica e a rigidez específica.



Introduzindo os limites:

Preço < 10€/kg

$\sigma_e > 20$ MPa

$E > 20$ GPa

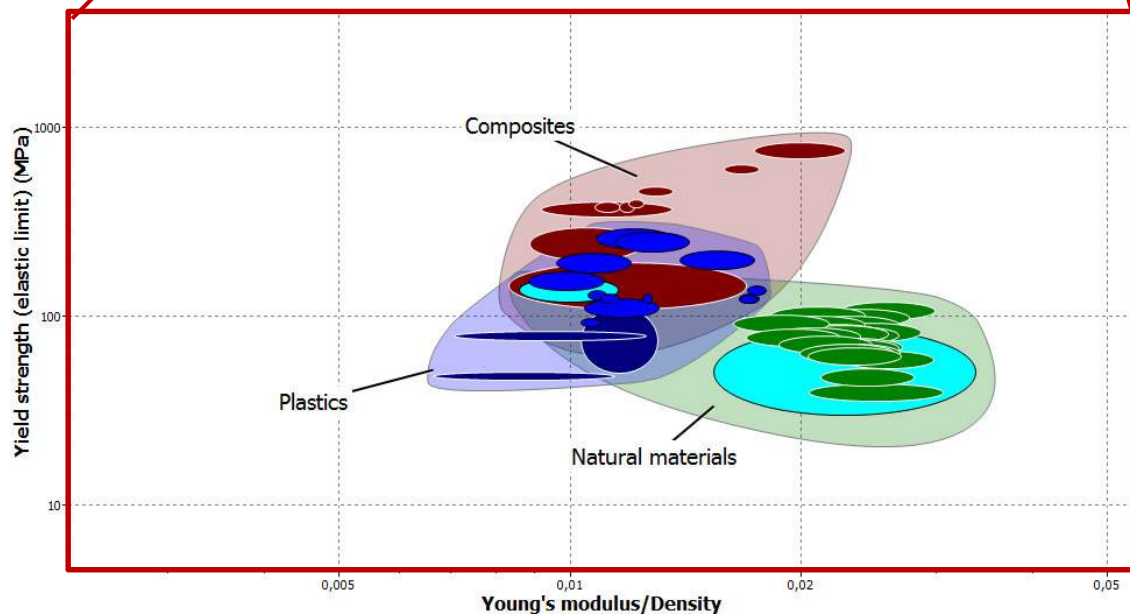


Figura 14: Escolha de materiais para análise com base em E/ρ e σ_e .

Nesta fase, devido à existência de bastantes materiais, resolvi separar o seu estudo de acordo com o respetivo grupo.

4.2.1. Poliméricos

Antes de continuar com a análise fiz um brevíssimo estudo do mercado para saber a existência ou não de bicicletas feitas nestes materiais. Encontrei alguns modelos, sendo os mais conhecidos os seguintes:

Frii: feita de plástico reciclado injetado em molde, desmontável. Projetado em 2011, a autora, Dror Peleg, era estudante de design industrial em Israel conseguiu construir um protótipo em escala real, mas observou que só poderia ser usada em terreno plano para lazer e ainda eram necessários ajustes de engenharia para ser poder ser introduzido ao público. Desde a altura do anúncio da construção desse 1º protótipo não existem mais notícias da bicicleta.

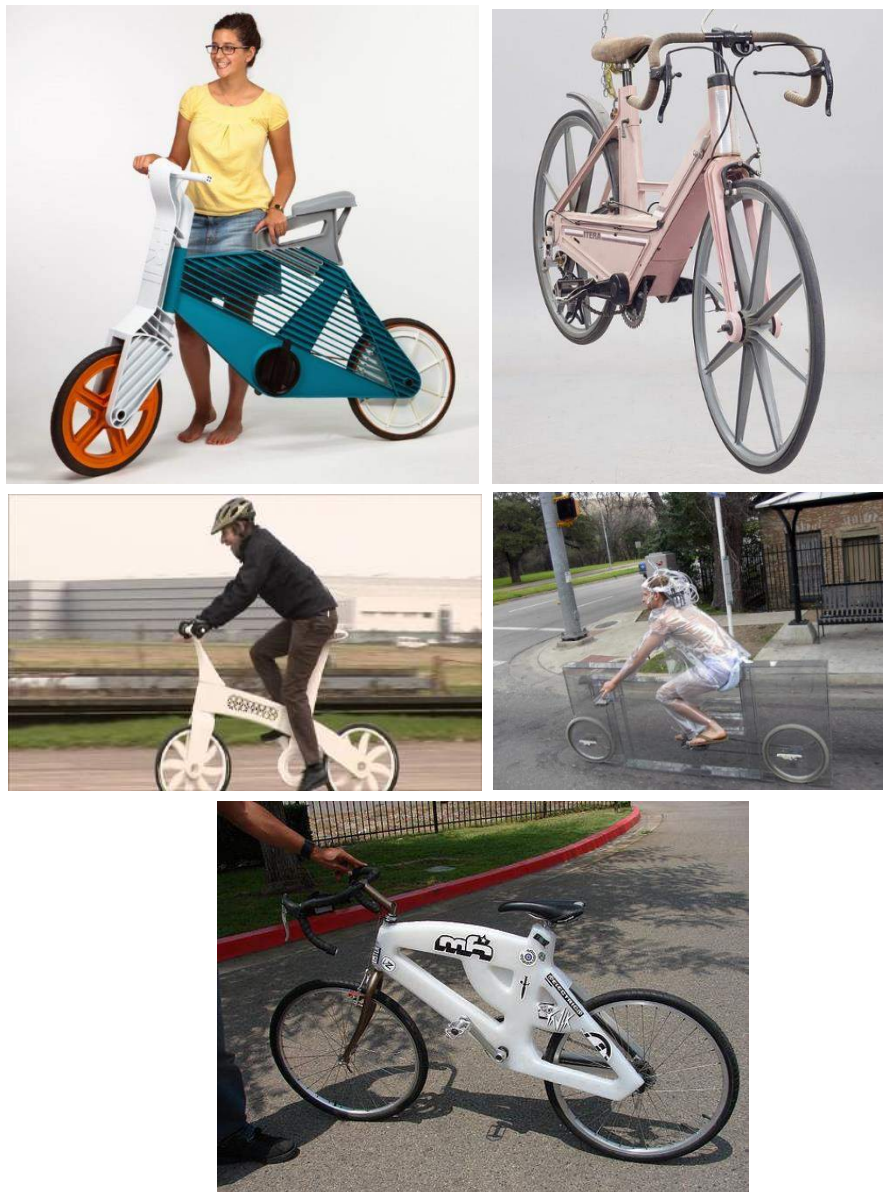


Figura 15: Algumas bicicletas de material polimérico atualmente existentes, a Frii, a Itera, a Airbike, a “Bicicleta Invisível” e a Innervision.^{[6],[7],[8],[9],[10]}

Itera: Desenvolvida pela Volvo, tendo sido o 1º protótipo revelado ao público em 1981. Era feita de plástico reforçado com fibra de vidro. As vendas parecem não ter sido as melhores, tendo sido uma das causas apontadas o facto de que no kit de montagem nem sempre virem incluídas todas as peças necessárias à sua montagem.

Airbike: Desenvolvida por dois engenheiros aeroespaciais a trabalhar na EADS, é fabricada em pó de nylon, fundido a laser. É seguidamente impressa por ALM — Additive Layer Manufacturing —, camada a camada como na prototipagem rápida. O quadro da bicicleta possui uma estrutura sob a forma de treliça para ficar mais leve mas manter a resistência. A proposta de valor mencionada é ser uma bicicleta leve, resistente feita em material polimérico com tecnologia aeroespacial.

Bicicleta Invisível: Pensada por um artista chamado Jimmy Kuehnle feita de painéis de um material polimérico chamado Lexan. Parece ter apenas função como obra de arte e não como bicicleta para venda ao público.

Innervision: Projetada pelo designer industrial Matt Clark da Califórnia do Sul, feita de PP comercial. A estrutura é produzida por conformação a quente e as partes unidas por fusão com ar quente e ultra-sons. O quadro é constituído por uma estrutura interior que confere ao quadro a sua rigidez e uma carcaça que confere o visual. O objetivo principal foi o de obter uma bicicleta totalmente reciclável cujo processo de fabrico e montagem seja altamente automatizável. Desde a altura de fabrico do 4º protótipo, em 2008, não existem mais notícias do progresso da bicicleta.

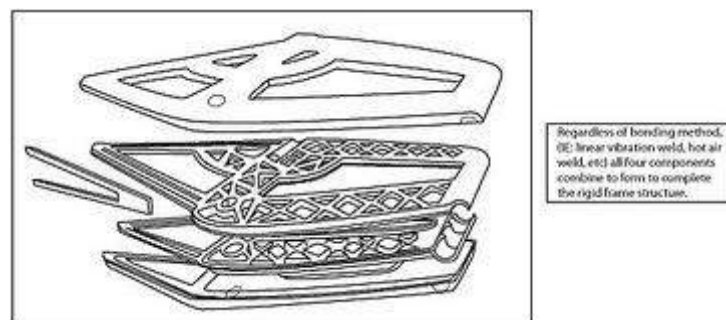


Figura 16: Esquema representativo da estrutura do quadro da bicicleta Innervision. [10]

Estando realizado o breve estudo de mercado, continuemos com a análise de seleção de materiais.

Os únicos plásticos que sobreviveram às restrições impostas no capítulo anterior foram os reforçados ou com fibra de vidro ou com fibra de carbono. Isto deve-se ao facto de que os plásticos por eles mesmos têm módulos de elasticidade bastante inferiores ao limite imposto de 20 GPa.

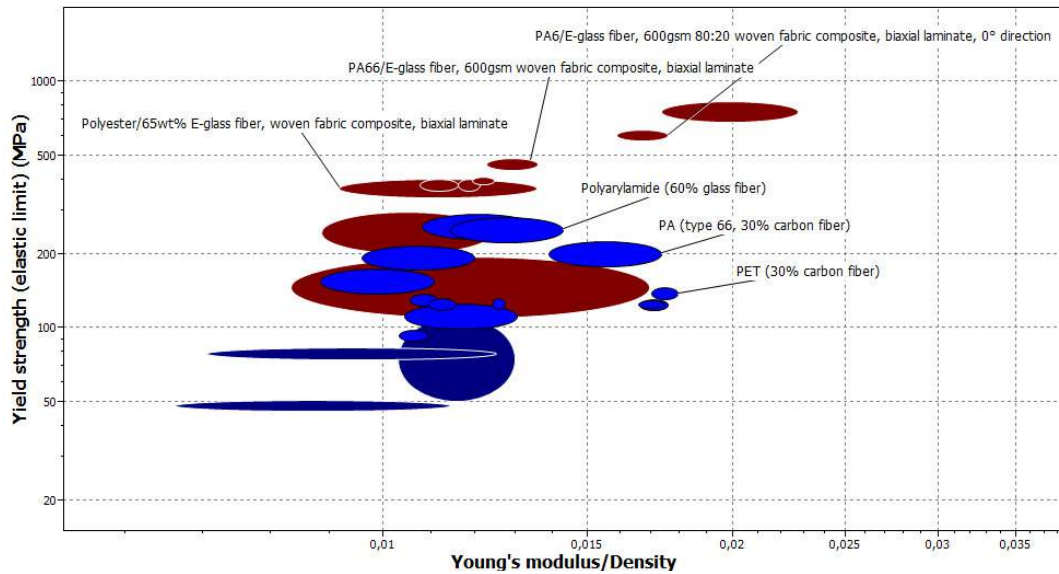


Figura 17: Seleção de materiais poliméricos para estudo aprofundado com base em σ_e e E/ρ .

O material mais acima e à direita é produzido sob a forma de varão e portanto nesta fase em que interessa comparar os materiais entre si sob a forma de tubos ocos não o incluírei na análise. Assim selecionei os 4 materiais seguintes mais promissores: PET + 30% FC, PA + 30% FC, PA+ 60% FV e Poliéster + 65% FV. Prefiro o compósito de poliéster porque tem 20% do preço do compósito de PA6 apesar de manter 67% da sua σ_e e do seu E. Selecionei ainda a fibra de carbono visto pertencer à classe de polímeros reforçados com fibras e ser “o” material de referência no que respeita a quadros de bicicleta. Assim teremos um material bastante usado, com o qual comparar os restantes polímeros reforçados com fibras.

Nesta seleção aparentemente trivial surgiu o problema de saber qual a FC comumente usada nos quadros. Na procura da resposta descobri algo que pode ser útil na construção do quadro final independentemente do material, que é a grande variação da FC usada. Com efeito,

- 1) Utilizam-se no mesmo tubo FC com feixes com números de filamentos diferentes – o chamado *tow*. Geralmente as fibras usadas têm entre 12 000 a 1 000 filamentos por feixe;
- 2) Ao contrário de muitos materiais, as fibras são materiais anisotrópicos. Para se poder obter resistência em todas as direções ou em direções pretendidas os tubos têm de ter as fibras alinhadas segundo direções diferentes, conforme a direção da solicitação;
- 3) Nas FC a resistência mecânica e o módulo de elasticidade são quase inversamente proporcionais. Então costuma-se adicionar, no mesmo tubo, fibras com alta resistência (HS) e fibras com alto módulo (HM). Nos quadros de gama baixa, bem como bens relacionados com desporto, costuma-se usar apenas os HS visto serem mais baratos.



Figura 18: Diferentes tipos de configuração dos tecidos de FC.^[11]

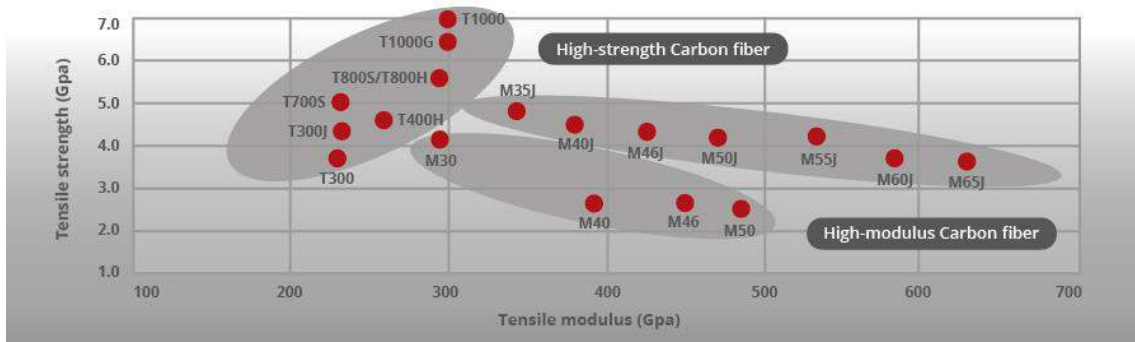


Figura 19: Gráfico representativo das várias qualidades comerciais de FC.^[11]

Como este não é um estudo exclusivo sobre a fibra de carbono, nem sequer é ele o material principal e por consulta de um site sobre ciclismo, verifiquei que um quadro de gama de entrada em FC apresenta propriedades semelhantes ao *Epoxy / HS carbon fiber, UD composite, 0° lamina* encontrado no CES Edupack, e portanto escolho esse material como aproximação para este estudo.

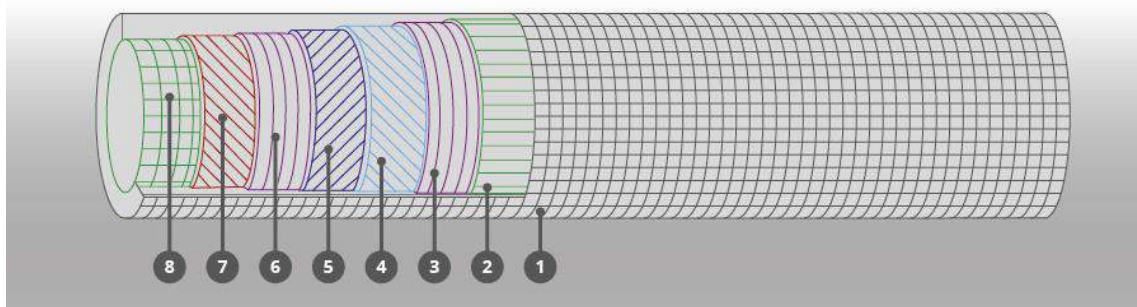


Figura 20: Sobreposição dos tecidos com diferentes orientações da fibra em várias camadas.^[11]

4.2.2. Naturais

Passando para a escolha dos materiais naturais, comecei por escolher o material com melhores resistência mecânica e rigidez específica, que é a madeira Kaneelhart.

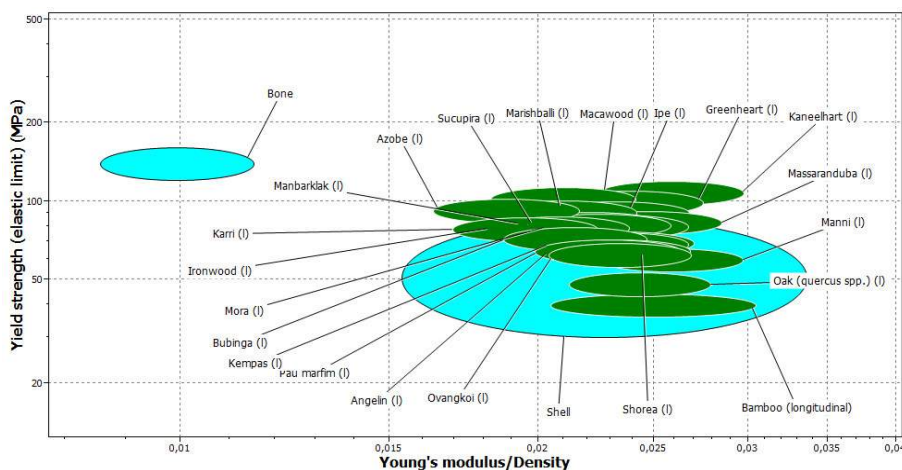


Figura 21: Seleção de um material natural dos que passaram as restrições impostas no início do cap. 4.2 para estudo mais aprofundado.

Como na análise dos polímeros também inclui um material selecionado com base no preço, entrei com esse fator na análise, Figura 22, ou seja mais para cima e para a direita, e portanto escolhi o Manbarklak.

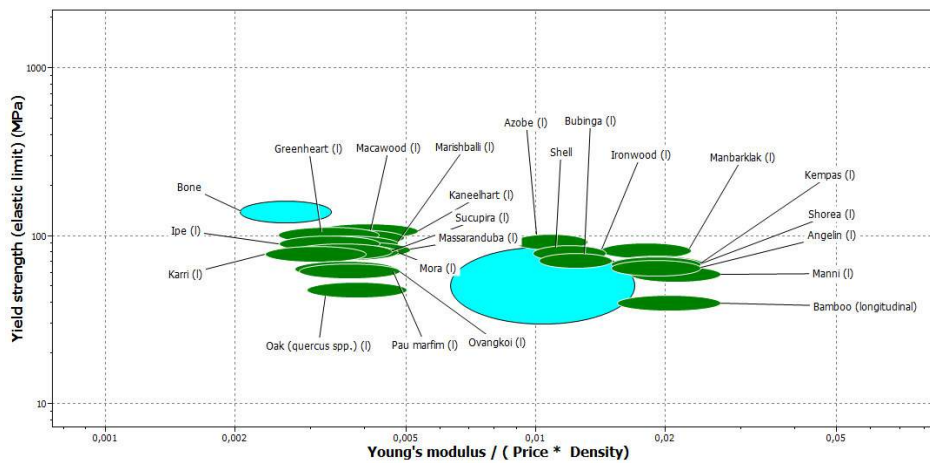


Figura 22: Seleção de um material natural incluindo o preço como fator a ter em conta.

Estas duas madeiras são utilizadas na construção de barcos, mobílias e tacos para soalho. A Kaneelhart é uma madeira difícil de trabalhar mas as superfícies depois cortadas ficam suaves o que minimiza a necessidade de acabamentos. Além disso é resistente a vários tipos de fungos e formigas de madeira seca. Existe essencialmente na Nova Guiné e na Papua Nova Guiné.^[12] A Manbarklak existe principalmente no este do Brasil, na bacia do amazonas e na Costa Rica. Tem uma textura fina e uniforme, mas é um pouco difícil de ser trabalhada. São ambas madeiras exóticas, de crescimento lento e densas.

Entretanto, tal como fiz para os polímeros, procedi à elaboração de um breve estudo do mercado para obter informações sobre as bicicletas atualmente feitas em madeira e para incluir algumas das suas madeiras usadas no seu fabrico neste estudo. Deste estudo do mercado surgiram o carvalho, o bambu e o mogno. Outra madeira muito usada é o freixo mas visto que tem propriedades mecânicas muito semelhantes ao pinheiro – outra madeira a ser estudada, explicação mais à frente – optei por manter o pinheiro que é uma espécie mais comum em Portugal.

Carvalho

Existe uma empresa que comercializa bicicletas em carvalho francês, a Boughbikes, criada pelo artista holandês Jan Gunneweg. Os pesos das bicicletas varia entre os 20kg (modelo de cima à esquerda) até aos 9.5kg (modelo em baixo à direita). A mais barata ronda os 1350€.

Na escolha do carvalho, visto haverem várias variedades, surgiu a ideia de escolher uma espécie comum em Portugal. Verificou-se também que o carvalho e o pinheiro são as espécies de árvore mais comuns em Portugal e decidi escolher também o pinheiro como material a estudar.

Como existem muitas espécies de carvalhos houve que saber seleccionar espécies que existissem em Portugal e fossem comuns. Então a espécie escolhida foi o *Quercus Robur*, carvalho roble bem representado em Portugal.



Figura 23: Bicicletas em carvalho comercializadas pelo artista Jan Gunneweg.^[13]

Bambu

Relativamente ao bambu, este é outra das madeiras usadas na construção de bicicletas. As razões do seu uso são essencialmente o possuir boas propriedades mecânicas, comparativamente às restantes madeiras, e de ser um material que permite o fabrico de bicicletas de uma maneira mais fácil do que as restantes, muito adaptado à filosofia *do-it-yourself* vendo-se inúmeros *instructables* espalhados pela internet explicando os passos em como fazer a sua própria bicicleta de bambu em casa, alguns deles até mesmo vendendo em conjunto o kit dos componentes necessários para tal.^[14]



Figura 24: Duas bicicletas em bambu comercializadas pela BambooBikeMaker.^[15]

Outras vantagens relativamente a estas bicicletas é a sua boa capacidade de amortecimento de vibrações — ou assim o dizem os fabricantes — e o facto de que qualquer pessoa, com materiais facilmente disponíveis, pode construir uma. Assim o preço delas varia entre poucas dezenas de euros se for feita pela própria pessoa, até acima de 3000€ se for feita à medida. De qualquer maneira, muito poucos (de momento nenhum?) outros materiais se podem gabar de serem suscetíveis de poder ser usados tão facilmente no fabrico de uma bicicleta como o bambu.



Figura 25: Duas bicicletas em bambu comercializadas pela Bamboosero e pela CalfeeDesign.^{[16],[17]}

Desde julho de 2010 até março de 2012 dois aventureiros viajaram desde o norte do Alasca até à península da antártica em bicicletas de bambu fabricadas pela CalfeeDesign. Tendo passado por condições de gelo, ambiente florestal e estrada, é um testemunho à potencialidade deste material na construção de bicicletas.



Figura 26: Joost Notenboom e Michiel Roodenburg numa jornada em bicicletas de bambu que durou 20 meses.^[18]

O mogno

O construtor de navios japonês Sueshiro Sano utiliza esta madeira na construção de bicicletas quase totalmente feitas apenas nesse material. Cada bicicleta leva pelo menos três meses para ser produzida e pode custar até 18 k€.

A mogno utilizada é importada de Honduras, cuja espécie se chama *Swietenia macrophylla*. É uma madeira prezada pela sua beleza e durabilidade. É utilizada na construção de barcos, mobílias e instrumentos musicais visto ser muito boa para ser cortada, aplainada e lixada.



Figura 27: Sueshiro Sano e uma das suas bicicletas em mogno.^[19]

A bicicleta da Figura 27 pesa 7.5kg. Os tubos são ocos e são feitos pela sobreposição de até 14 camadas finíssimas de mogno laminado colocadas umas em cima das outras até formar a secção do tubo pretendida. A bicicleta da imagem, em específico, foi usada em competição, numa prova de estrada de longa duração.^[19] Existem mais bicicletas neste material como é o caso das fabricadas pelo designer industrial Zheng Chin que na sua página detalha todo o processo de fabrico das suas bicicletas sob a forma de vídeos timelapse.^[34] As suas bicicletas ao contrário do

normal, apesar de também usar madeira micro-laminada, são feitas em varões (madeira maciça). Nenhuma menção é feita ao seu peso.



Figura 28: Duas bicicletas em mogno do designer industrial Zheng Chin produzidas em 2014.^[95]

O pinheiro

Como existem muitas espécies de pinheiros pelo mundo fora, houve que saber selecionar espécies que existissem em Portugal e fossem comuns. Então a espécie escolhida foi o *Pinus Sylvestris*, o pinheiro-silvestre, uma espécie bem representada em Portugal.

Apesar de ser uma espécie comum em Portugal, o pinheiro não é uma árvore apropriada para reflorestamento visto ser como um fósforo, por causa das agulhas secas, e não preservar tanto o solo como os carvalhos, os castanheiros ou as azinheiras. Historicamente Portugal era aliás um país de florestas de castanheiros e carvalhos. Além disso madeira do castanheiro vale 600€/ton enquanto que a pinheiro 35€/ton.^[20] Por estes motivos, a construção de bicicletas nesta madeira deverá ter outras vantagens em relação às do carvalho para ser selecionada em vez dele.

Nota sobre escolha das madeiras no CES Edupack

A madeira é um produto natural com uma estrutura complexa e, por isso, não podemos esperar que com ela se possa obter um produto homogéneo, como é, por exemplo, uma barra de aço ligado ou uma peça de um termoplástico moldado por injeção. A resistência mecânica da madeira é altamente anisotrópica, sendo a sua resistência à tração muito maior segundo a direção paralela ao tronco da árvore, isto é, na direção longitudinal. Por isso várias vezes se encontra no CES Edupack duas versões da mesma madeira, uma transversal e outra longitudinal. Os testes efetuados à madeira segundo a direção das fibras, longitudinal, apresenta portanto melhores propriedades do que em direções perpendiculares. O fabrico de um quadro em madeira deverá ter este facto em conta, para poder tirar melhor partido da madeira. Portanto para esta análise escolhi, das versões presentes no programa, a longitudinal.

4.3. Estudos das propriedades dos quadros e dos materiais

4.3.1. Introdução

Para além das 4 características analisadas anteriormente na parte A, comparei ainda os materiais relativamente a:

Rigidez e Resistência Específica

Quando o peso é um fator crítico ou de grande importância no projeto de algum componente ou produto, geralmente as características específicas entram em campo. Tal é o caso dos quadros de bicicleta, e portanto analiso aqui estas duas propriedades dos materiais. De certo modo elas são como que a eficiência de um material na geração de resistência e rigidez a partir dos seus componentes. Aumentando a densidade é uma maneira fácil de aumentar várias propriedades mecânicas de um material. Um material que consiga pesar pouco (ou seja tenha pouca matéria) mas a pouca matéria que tem, tem boa resistência e rigidez, então é eficiente.

Utilizando uma analogia, duas pontes fabricadas com a mesma quantidade do mesmo material, sendo que uma foi projetada e montada com uma configuração das vigas que melhor transmite os esforços. Para o mesmo material, essa ponte tem maior resistência e rigidez que a ponte montada ao acaso. De certo modo pode-se dizer que tem maior resistência e rigidez específica.

Quanto maiores forem estas duas propriedades melhor, visto que se quer sempre as bicicletas o mais leves possível, ou para o mesmo peso, mais rígidas e mais resistentes.

Resiliência

É a propriedade que um material que absorva muita energia por unidade de volume tem. O que é que isto quer dizer? Dois quadros iguais, mas um deles é feito de material com maior resiliência. Esse quadro é capaz de absorver impactos mais severos em termos energéticos antes de se deformar plasticamente. Quer isto dizer que o impacto pode-se dar à mesma velocidade, mas por exemplo se o ciclista for mais pesado, como $E_c = \frac{1}{2}mv^2$, é necessária maior absorção de energia por parte do quadro. Materiais tipicamente resilientes são os usados em molas. Idealmente terão baixo E e alta σ_e . Se a alta resiliência de um material for obtida à custa de baixo E, é preciso ter em conta que o quadro da bicicleta que o use será menos rígido.

Por outro lado se o material for pouco resiliente à custa de alto E, por um lado será rígido, vantagem aparentemente apreciada pelos ciclistas, mas por outro terá pouca capacidade para absorver energia em regime elástico, o que significa que não poderá levar pancadas tão fortes como outros quadros sob o risco de se danificar — entrar em regime plástico se for material dúctil ou mesmo fraturar se for material frágil.

Resistência à fadiga

Diz-nos a tensão abaixo da qual o material aguenta um número infinito, ou convencionalmente, de ciclos sem romper. Os quadros de bicicletas são componentes sujeitos a várias cargas dinâmicas. Algumas transientes como vibrações de piso acidentado, outras periódicas, como o pedalar

rítmico do ciclista. Sempre que o ciclista efetua meia rotação com os pedais o quadro sofre um ciclo de carregamento. Qual o número de rotações que o quadro aguenta até partir em algum local? A resposta não é simples, mas é a responder a essa pergunta que esta propriedade tenta dar uma ajuda.

Tenacidade ao impacto

Traduz a capacidade de um material em absorver energia quando sujeito a um impacto com ocorrência de fenda. Importante para prever a ocorrência de falha catastrófica nos tubos.

Preço por unidade de comprimento do tubo

O preço por massa de material, €/kg, não é o mais adequado para a comparação do preço final do quadro. Imagine-se dois quadros feitos de dois materiais com a mesma densidade e mesmo preço/kg, mas um deles, A, tem maior resistência e rigidez específica que o B. Ora com o material A, para se obter as mesmas propriedades que o quadro com B, pode-se ter uma área da secção menor, e portanto ser mais leve. Sendo mais leve fica mais barato. Ora apesar de os materiais terem o mesmo preço/kg tal não tem relação com o preço do quadro.

Consequentemente, é mais útil utilizar o preço por unidade de comprimento, €/m, como índice comparativo do custo entre quadros de materiais diferentes. Como estamos a admitir no estudo dos materiais para a MA2000 que os tubos do quadro têm o mesmo comprimento, então o comprimento deixa de ser um fator, e este índice diz-nos diretamente o custo da matéria-prima necessária para o fabrico do quadro (ignorando eventuais desperdícios que advêm dos processos de fabrico usados).

Ductilidade e Energia Necessária para Produção

São parâmetros de interesse para a análise que optei por incluir neste estudo. A ductilidade é importante na medida em que materiais pouco dúcteis poderão sofrer falhas catastróficas sem aviso prévio uma vez que há muitos materiais que não aparentam sinais visuais de falha iminente. O surgimento de folgas e aumento dimensional seria um deles e acontece em materiais dúcteis.

Relativamente à energia necessária para produção, esta inclui a energia necessária para a obtenção do material bem como do seu processamento e transporte. Penso ser um assunto importante porque nos dias de hoje a preocupação com o ambiente nunca é demais, e quanto menor for a energia que é necessário despende na produção de um material, mais amigo do ambiente será.

Notas finais

Em baixo de cada análise inclui um gráfico com todos os materiais no nível 1 do CES Edupack para o leitor enquadrar melhor o gráfico dos materiais em estudo na visão geral do conjunto de todos os materiais.

Para melhor se ter noção da real diferença entre os valores das propriedades de cada material, tentei usar escalas lineares sempre que possível.

Em cada gráfico com os materiais escolhidos, incluí também o material que obteve melhores e o material que obteve piores resultados dos do estudo do mercado e linhas que delimitam os valores respetivos valores máximo e mínimo.

4.3.2. Resistência à fadiga

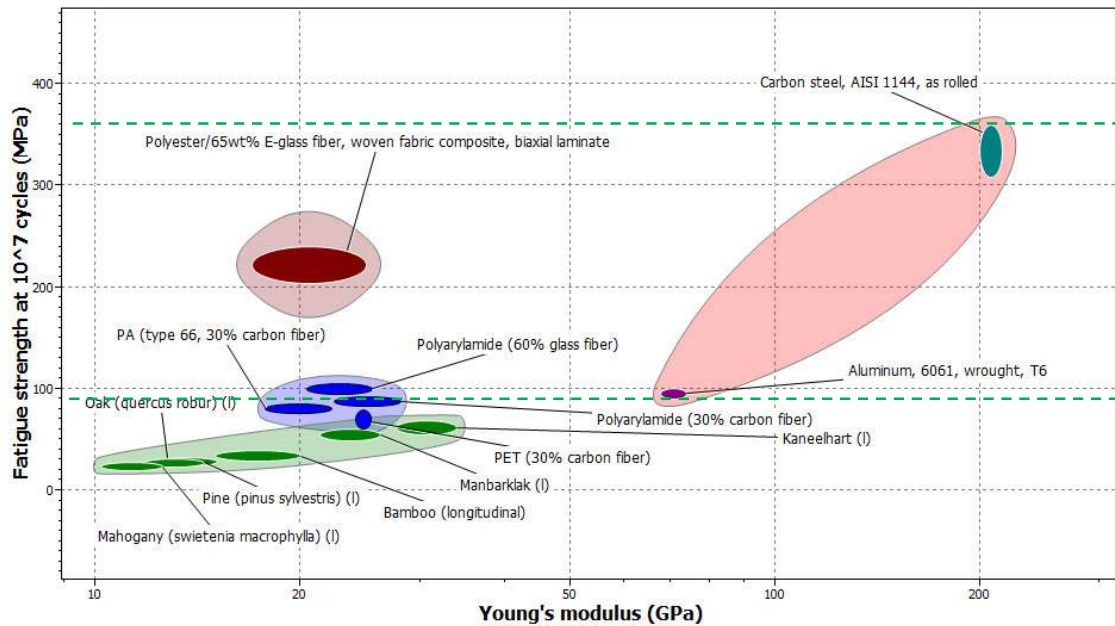


Figura 29: Resistência à fadiga dos materiais em estudo e o melhor e o pior do estudo do mercado.

Apenas o compósito de poliéster, o PA66 e a poliarilamida têm valores aceitáveis, de acordo com o estudo do mercado, de resistência à fadiga, o que significa que nenhum dos outros materiais será aconselhável para uso intensivo e/ou de longa duração. Podemos até ver que as três madeiras usadas no fabrico de bicicletas têm resultados bastante insatisfatórios a este respeito. Ainda assim, os seus valores de resistência à fadiga parecem ser suficientes para uma viagem de 11 meses à volta do mundo e para uma prova de alta competição.

Para termos quadros com elevadas resistências à fadiga, e portanto bicicletas de longa durabilidade, o melhor é mesmo utilizar os metais. Nos círculos de conhecimento dos ciclistas continua a ser axiomático que as bicicletas mais duráveis são as de aço e as de titânio.

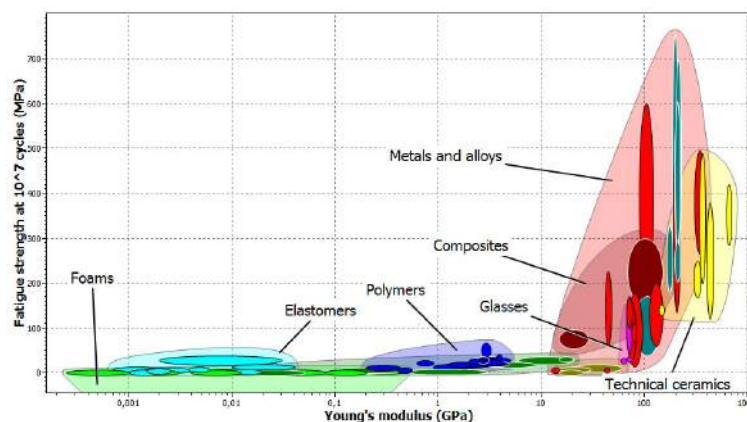


Figura 30: Resistência à fadiga de todos os materiais (nível 1).

4.3.2.1. Resiliência

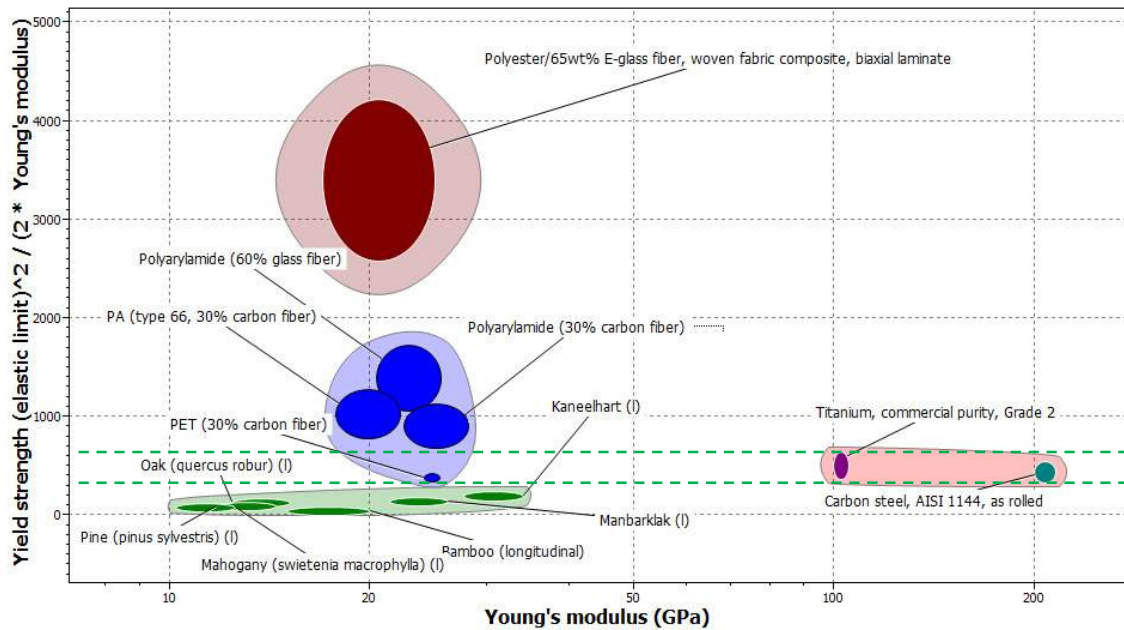


Figura 31: Resiliência dos materiais escolhidos.

Os materiais naturais estão todos eles abaixo do limite do marginalmente aceitável ditado pelo estudo do mercado. Isto deve-se ao valor muito baixo de σ_e destes materiais que ronda os 60 MPa. Os restantes materiais encontram-se acima ou dentro da gama do estudo do mercado, porque o seu módulo de elasticidade apresenta-se ao mesmo nível dos materiais naturais mas com um σ_e bastante mais alto. Estes resultados significam que ao conduzir uma bicicleta de madeira devemos trata-la como uma chávena de porcelana. A sua baixa capacidade de absorver choques significa que facilmente fratura (as madeiras são materiais frágeis, pelo que $\sigma_e \approx \sigma_r$).

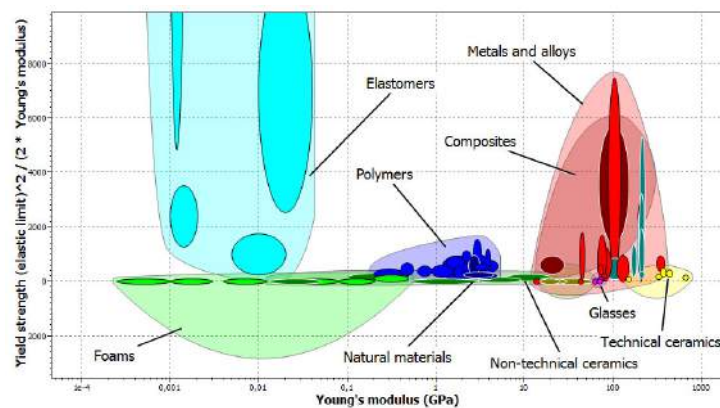


Figura 32: Resiliência de todos os materiais (nível 1).

4.3.3. Tenacidade ao choque

Todos os materiais à exceção do poliéster com FV possuem tenacidade ao choque inferior ao

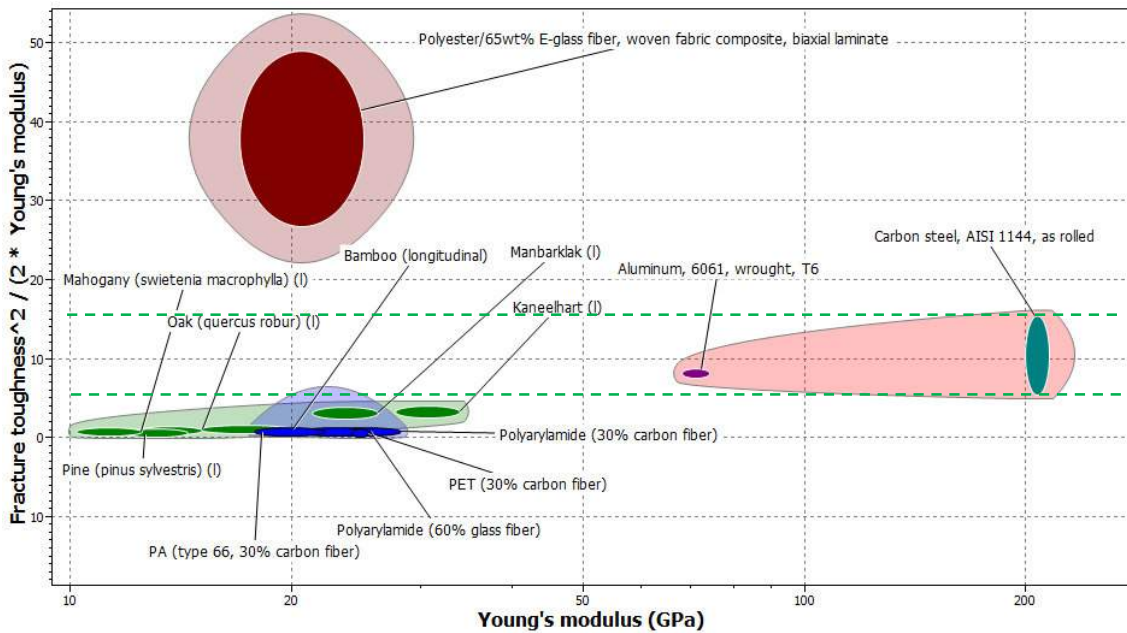


Figura 33: Tenacidade ao choque dos materiais escolhidos.

marginalmente aceitável todos eles devidos a baixa tenacidade à fratura, na casa dos 5 MPa.m^{0,5}. Uma vez iniciada uma fenda, estes materiais dificilmente conseguirão impedir a continuação do seu crescimento. Isto significa que o projeto e o fabrico dos quadros terá de ser feito minimizando ao máximo fatores de concentração de tensões.

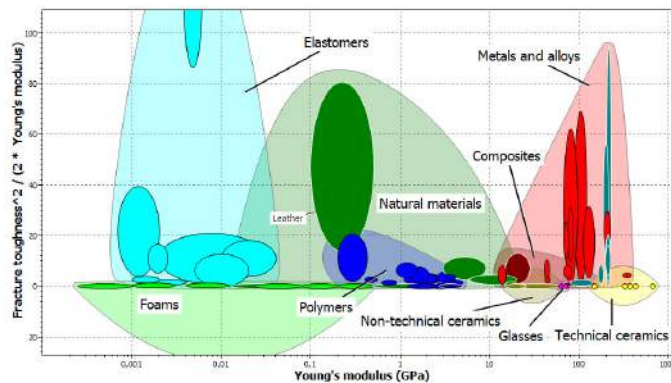


Figura 34: Tenacidade ao choque de todos os materiais (nível 1).

4.3.4. Rigidez e resistência específica

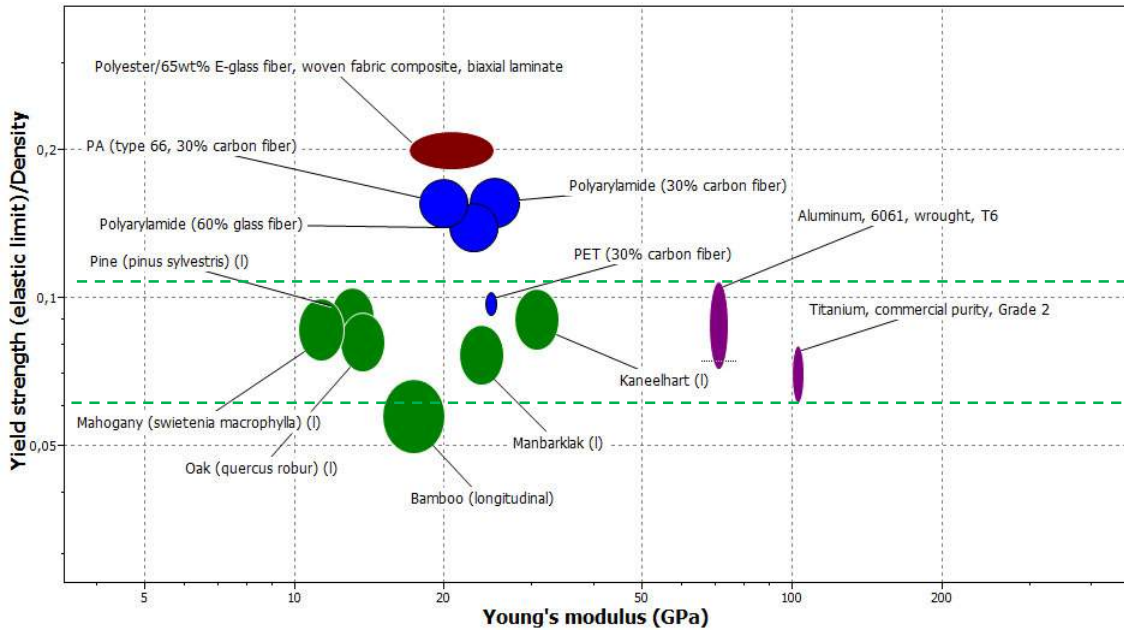


Figura 35: Resistência específica dos materiais escolhidos.

Todos os materiais, com exceção do bambu, apresentam valores iguais ou superiores de resistência específica aos dos materiais do estudo do mercado. A razão de tal situação é o bambu ter a mais baixa resistência mecânica de todos os materiais aqui analisados, e uma densidade mediana comparativamente às outras madeiras.

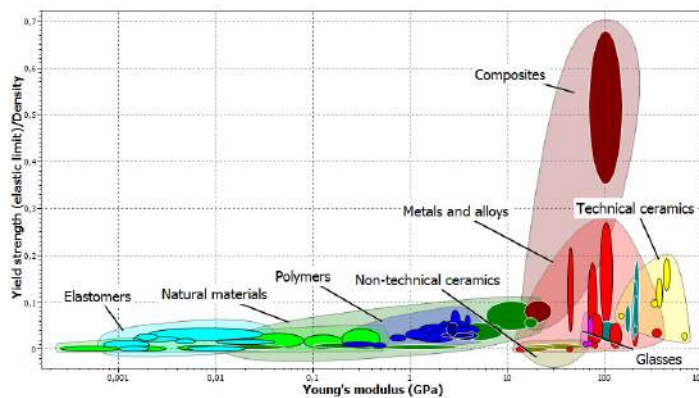


Figura 36: Resistência específica de todos os materiais (nível 1).

4. Seleção e Estudo de Materiais para a Bicicleta MA2000

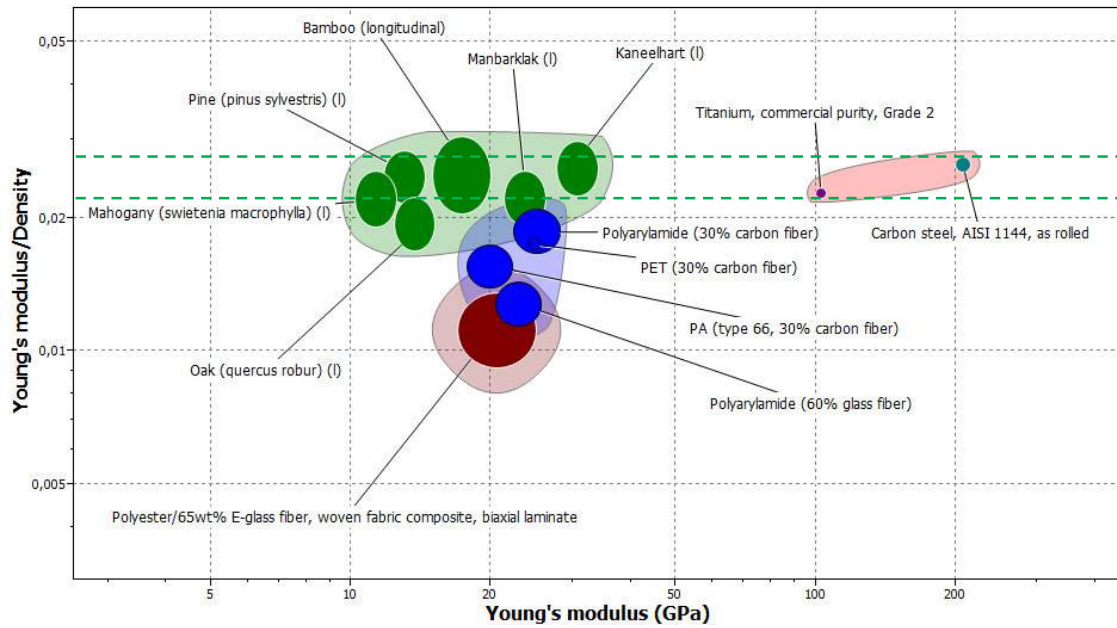


Figura 37: Rigidez específica dos materiais escolhidos.

Para uma mesma rigidez (EI), os quadros de materiais poliméricos têm de ser mais pesados que os de materiais naturais. Esta é um ponto bastante desfavorável para os materiais poliméricos uma vez que envolve duas propriedades de grande importância para os quadros. Dos fatores encontrados pelos fabricantes para não se usar materiais poliméricos na construção de quadros de bicicletas, este certamente será um dos mais importantes.

Note-se ainda que na seleção dos materiais para estudar, este foi um dos fatores a ter em conta – o outro foi σ_e – e, assim, estes materiais poliméricos que estão a ser analisados, são já dos melhores polímeros em termos de rigidez específica, e mesmo assim apresentam valores abaixo do marginalmente aceitável.

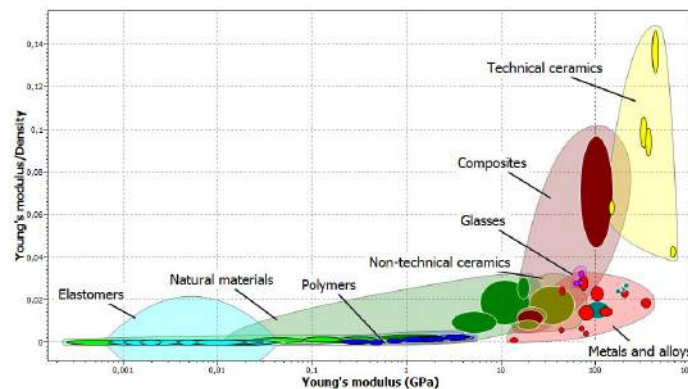


Figura 38: Rigidez específica de todos os materiais (nível 1).

Ductilidade e Energia Necessária para Obtenção do Material

Ductilidade

Comos podemos ver todos os materiais em estudo são bastante menos dúcteis que os do estudo do mercado. Tanto as madeiras como os polímeros reforçados apresentam valores de alongamento após rotura entre 1-4%, valores muito baixos. Já os metais estudados apresentam valores na ordem dos 12-25%.

Energia

Em termos energéticos as madeiras são as que menos energia necessitam, seguido dos aços, polímeros e finalmente Al, Ti, FC e o poliéster reforçado com FV. A maior parte da energia gasta na produção da madeira estará relacionada com a sua plantação, colheita e tratamento. Já nos polímeros sintéticos é necessário o transporte de óleos para a fábrica, a sua mistura, sintetização de polímeros, o seu corte, o transporte. De qualquer maneira é importante reconhecer que estes valores são apenas aproximações visto que os gastos energéticos dependem obviamente de muitos fatores e não é fácil quantifica-los.

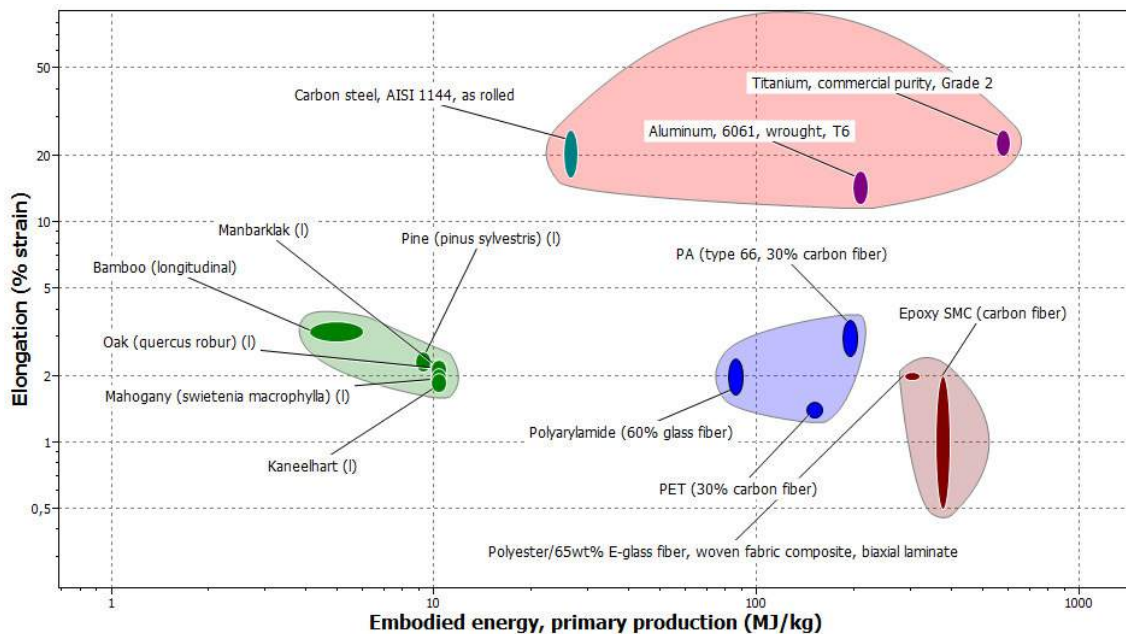


Figura 39: Extensão após rotura e energia necessária para produção de 1kg para os materiais estudados.

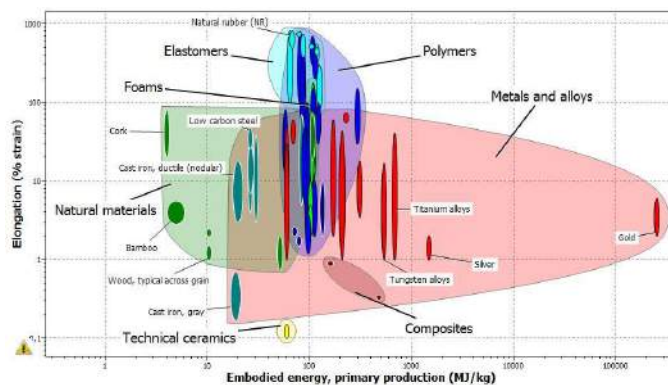


Figura 40: Extensão após rotura e energia necessária para produção de 1kg para os todos os materiais (nível 1).

4.3.5. Comparação de EI , $\sigma_e r^2 t$, ρA e Ert^2 .

As tabelas seguintes incluem os valores numéricos da análise feita em cima: $\frac{\sigma_e}{\rho}$, $\frac{E}{\rho}$, σ_f , U_e e tenacidade ao choque bem como os valores numéricos de EI , $\sigma_e r^2 t$, ρA e Ert^2 . Para a comparação dos quadros feitos dos materiais em estudo relativamente aos materiais existentes no mercado, é necessário estabelecer uma base comum. Podia ter forçado algum dos parâmetros – rigidez e resistência à flexão ou resistência à encurvadura ou peso – a ser igual ao pior dos materiais do mercado e observado o tamanho do quadro necessário. Optei por outra via que foi dizer que todos os tubos têm as maiores dimensões dos tubos existentes, ou seja do ALTL, e verificar se com esse tamanho conseguem ser melhores nas restantes características que o pior do mercado em cada uma delas.

Fórmula de cálculo das melhorias, para cada propriedade / característica

$$\text{Melhoria(\%)} = \frac{\text{valor atual} - \text{pior valor do estudo do mercado}}{\text{pior valor do estudo do mercado}} \cdot 100$$

No cálculo da melhoria (1) entrou a soma das melhorias relativas a ρA , EI , Ert^2 e $\sigma_e r^2 t$. No cálculo da melhoria (2) entrou a soma das melhorias relativas a todos os restantes parâmetros coloridos.

Polímeros

ρA

Todos os polímeros apresentam valores de peso ao nível do melhor do mercado. A sua baixa densidade é responsável por estes resultados.

EI

Todos os polímeros apresentam valores de rigidez acima do limite mínimo aceitável.

Ert^2

Todos os polímeros apresentam valores de resistência à flexão acima do limite mínimo aceitável.

$\sigma_e r^2 t$

Todos os polímeros apresentam valores de resistência à encurvadura acima do limite mínimo aceitável.

Madeiras

ρA

Todas as madeiras superaram o peso do melhor do mercado. Isto deve-se à muito baixa densidade destes materiais. Como se verá, nas restantes propriedades obtiveram resultados negativos ou na melhor das hipóteses satisfatórios. O que isto significa é que os quadros em madeira precisam sempre de ser mais espessos e/ou maiores que os tradicionais em metal ou polímeros reforçados com fibra. Ver-se-á essa situação na fase seguinte de dimensionamento dos quadros.

EI

Apenas as madeiras exóticas e muito densas, a Kaneelhart e Manbarklak estiveram acima do mínimo aceitável. Todas as restantes possuem valores de rigidez inferiores ao mínimo do mercado.

Ert²

As madeiras Kaneelhart, Manbarklak e o bambu é que obtiveram valores de resistência à flexão superiores ao mínimo do mercado. São as 3 madeiras com maior módulo de elasticidade.

σ_Er²t

Só a madeira Kaneelhart e a Manbarklak obtiveram valores aceitáveis de resistência à encurvadura. Todas outras têm um grande défice. Estas duas madeiras possuem de longe a maior tensão limite de elasticidade.

Tabela 19: Resumo dos resultados e propriedades dos materiais poliméricos escolhidos e respetivos quadros.

Material	Polímeros - Compósitos								
	Melhor	Pior	FC			FV			
			FC	PET + 30%FC	PA + 30%FC	PA + 60% Fvidro	Poliéster 65%wt E-FV		
r _{ext} =	12,34	18,44	18,44	18,44	18,44	18,44	18,44	18,44	mm
t=	0,38	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	mm
A≈			141,4	141,4	141,4	141,4	141,4	141,4	mm ²
I≈			24031	24031	24031	24031	24031	24031	mm ⁴
σ _E =		300	1955	138	200	250	370	370	MPa
E	210	70	142	25	20	23	21	21	GPa
ρ=			1565	1420	1280	1790	1850	1850	kg/m ³
ρA=	0,241	0,396	0,221	0,201	0,181	0,253	0,262	0,262	kg/m
EI=	1682,0	440,0	3400,4	596,0	480,6	552,7	504,7	504,7	Nm ²
Ert ² =	1921,0	388,0	3883,6	680,7	548,9	631,3	576,4	576,4	Nm
σ _E r ² t=	145,19	32,43	811,01	57,25	82,97	103,71	153,49	153,49	Nm
E/ρ=	26,7	23	90,4	17,5	15,6	12,8	11,4	11,4	Nm/mg
σ _E /ρ=	130	67	1249	97	156	140	200	200	Nm/g
σ _E ² /2E=	2,05	0,43	13,51	0,38	1,00	1,36	3,26	3,26	10.kJ/m ³
K _{1c} =	107	28,5	66,85	5,77	5,9	6,06	38,95	38,95	MPam ^{0,5}
K _{1c} ² /2E=	27,26	5,80	15,79	0,67	0,87	0,80	36,12	36,12	10.kJ/m ³
σ _r =	600	81	1184	69,6	80	100	222	222	MPa
Preço=	1	8,5	29,5	2,40	9,9	4,80	1,68	1,68	€/kg
Preço/m=	0,24	3,37	6,53	0,48	1,79	1,21	0,44	0,44	€/m
Melhoria (1) =	342%	0%	1457%	210%	232%	211%	247%	247%	
Melhoria (2) =	1480%	0%	6538%	-7%	194%	281%	1590%	1590%	
Melhoria (tot) =	1822%	0%	7996%	204%	426%	492%	1837%	1837%	
			1º	5º	4º	3º	2º		

Tabela 20: Resumo dos resultados e propriedades das madeiras escolhidas e respectivos quadros.

Material			Naturais - Madeiras						
	Melhor	Pior	Kaneelhart	Mogno	Pinheiro	Carvalho	Manbarklak	Bambu	
$r_{ext} =$	12,34	18,44	18,44	18,44	18,44	18,44	18,44	18,44	mm
$t =$	0,38	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	mm
$A \approx$			141,4	141,4	141,4	141,4	141,4	141,4	mm ²
$I \approx$			24031	24031	24031	24031	24031	24031	mm ⁴
$\sigma_E =$			107	44	48	58	82	40	MPa
E			31	11	13	14	24	17	GPa
$\rho =$			1190	515	530	710	1075	700	kg/m ³
$\rho A =$	0,241	0,396	0,168	0,073	0,075	0,100	0,152	0,099	kg/m
$EI =$	1682,0	440,0	740,2	272,8	310,0	330,4	571,9	408,5	Nm ²
$Ert^2 =$	1921,0	388,0	845,3	311,5	354,1	377,4	653,2	466,6	Nm
$\sigma_E r^2 t =$	145,19	32,43	44,53	18,34	20,08	23,85	34,02	16,59	Nm
$E/\rho =$	26,7	23	25,9	22,0	24,3	19,4	22,1	24,3	Nm/mg
$\sigma_E/\rho =$	130	67	90	86	91	81	76	57	Nm/g
$\sigma_E^2/2E =$	2,05	0,43	0,19	0,09	0,09	0,12	0,14	0,05	10.kJ/m ³
$K_{1c} =$	107	28,5	14	4	4	5	30	6	MPam ^{0,5}
$K_{1c}^2/2E =$	27,26	5,80	3,23	0,70	0,68	1,02	18,91	1,19	10.kJ/m ³
$\sigma_f =$	600	81	61,85	23,8	27	29,1	54,8	34,3	MPa
Preço =	1	8,5	6,54	6,54	0,75	1,75	1,25	1,25	€/kg
Preço/m =	0,24	3,37	1,10	0,48	0,06	0,18	0,19	0,12	€/m
Melhoria (1) =	459%	0%	247%	211%	218%	206%	219%	213%	
Melhoria (2) =	745%	0%	-40%	-80%	-66%	-59%	32%	-70%	
Melhoria (tot) =	1204%	0%	207%	131%	152%	147%	252%	143%	
			2º	6º	3º	4º	1º	5º	

4.3.6. Análise dos índices de mérito

Nos gráficos decidi não incluir a F.C. porque de todos os materiais é o que apresenta, de longe, valores mais altos em todos os índices de mérito. Portanto em todos os gráficos seguintes, se estivesse representado, estaria sempre por cima de todos os outros. De qualquer maneira está incluída na tabela resumo no final deste capítulo.

Rigidez

Raio fixo

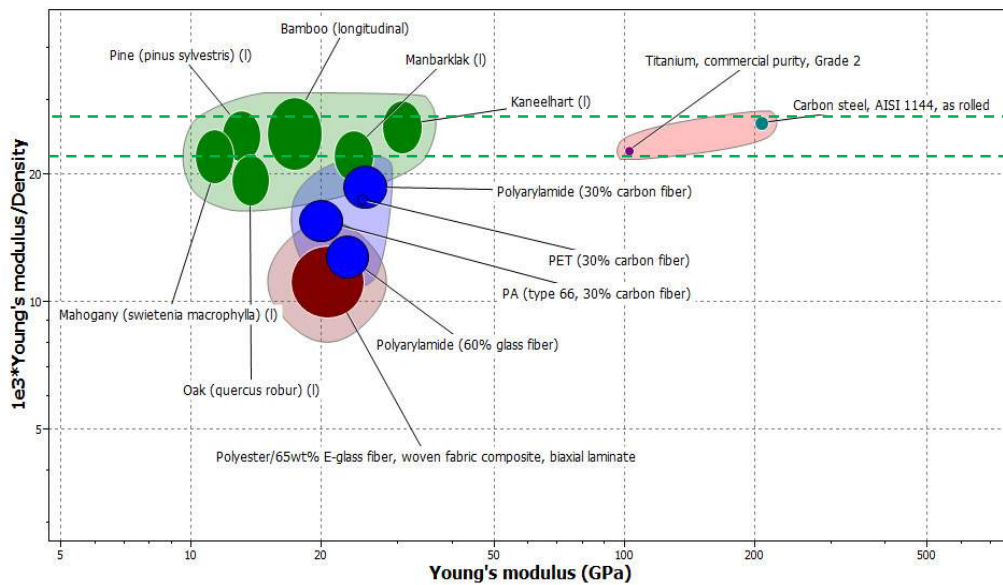


Figura 41: Índice de mérito da rigidez com raio fixo para os materiais escolhidos.

Espessura fixa

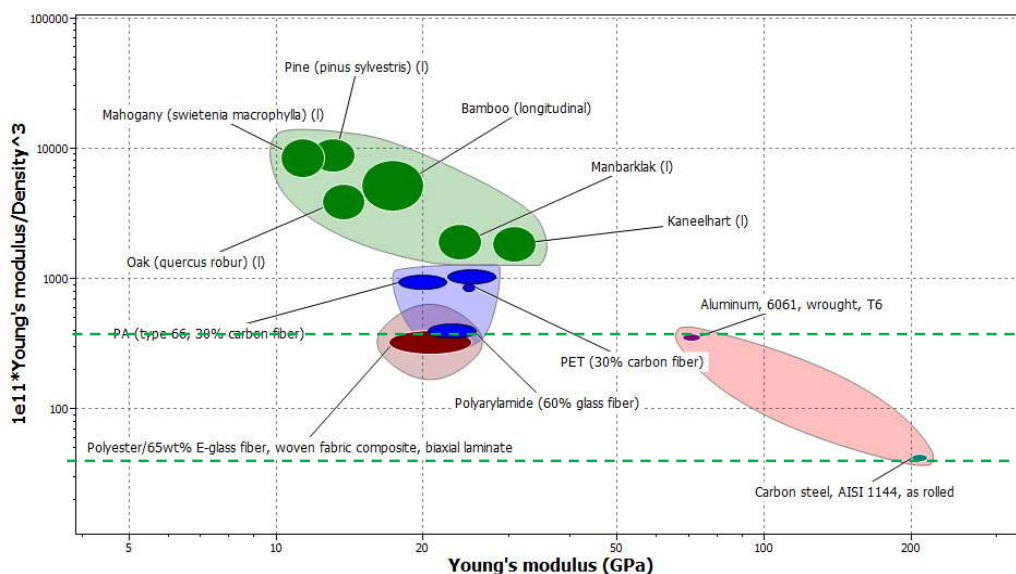


Figura 42: Índice de mérito da rigidez com espessura fixa para os materiais escolhidos.

Os materiais naturais são os que possuem maior rigidez à flexão especialmente no caso de se aumentar o raio dos tubos. Isto deve-se essencialmente à sua baixa densidade. Isto é

especialmente nítido no caso do pinheiro e do mogno que aumentaram em 20 vezes o IM de resistência à rigidez relativamente ao valor do aço. Para todos os materiais o maior aumento de todos os IM é verificado aqui com o aumento do raio dos tubos.

Resistência à flexão

Raio fixo

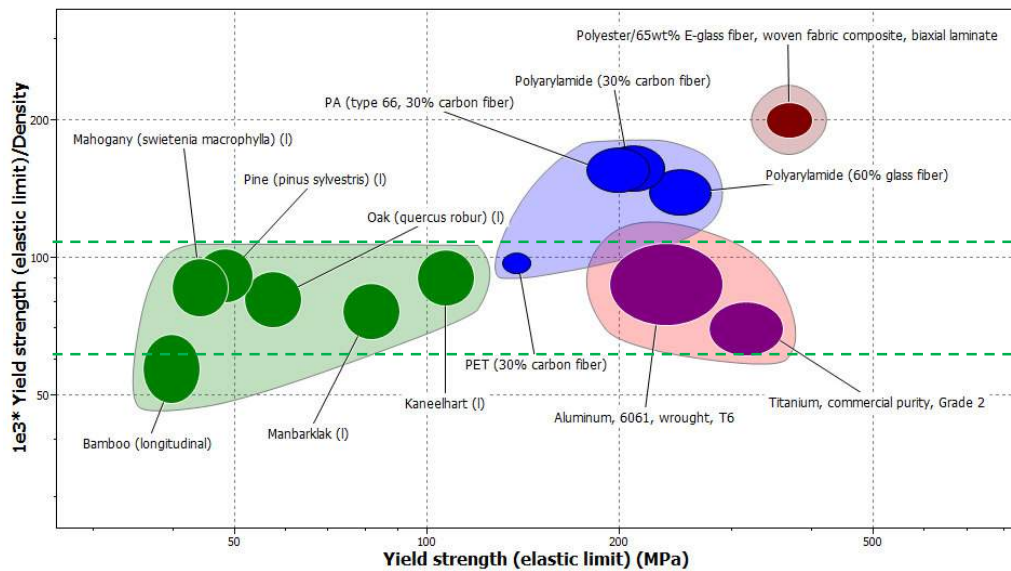


Figura 43: Índice da resistência à flexão com raio fixo para os materiais escolhidos.

Espessura fixa

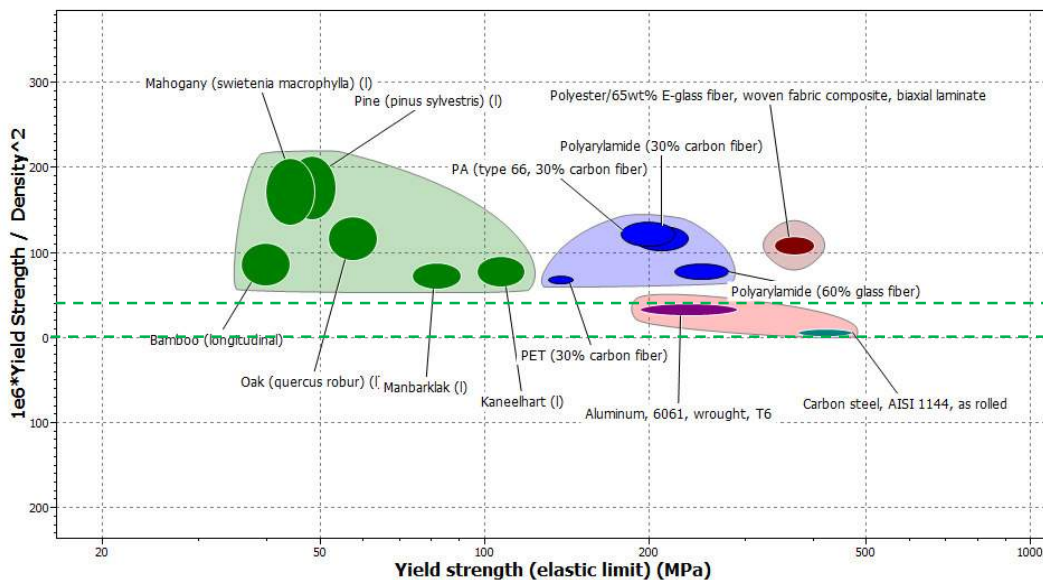


Figura 44: Índice da resistência à flexão com espessura fixa para os materiais escolhidos.

Mais uma vez é mantendo a espessura constante que os materiais menos densos aumentam outro IM desta vez resistência à flexão. Com efeito, se mantivermos a espessura constante todos os materiais têm valores de resistência à encurvadura superiores aos materiais dos quadros do

estudo do mercado. No caso de raio constante os materiais naturais apresentam valores de resistência à flexão entre o maior e menor valor encontrado no estudo do mercado.

Resistência à encurvadura

Raio fixo

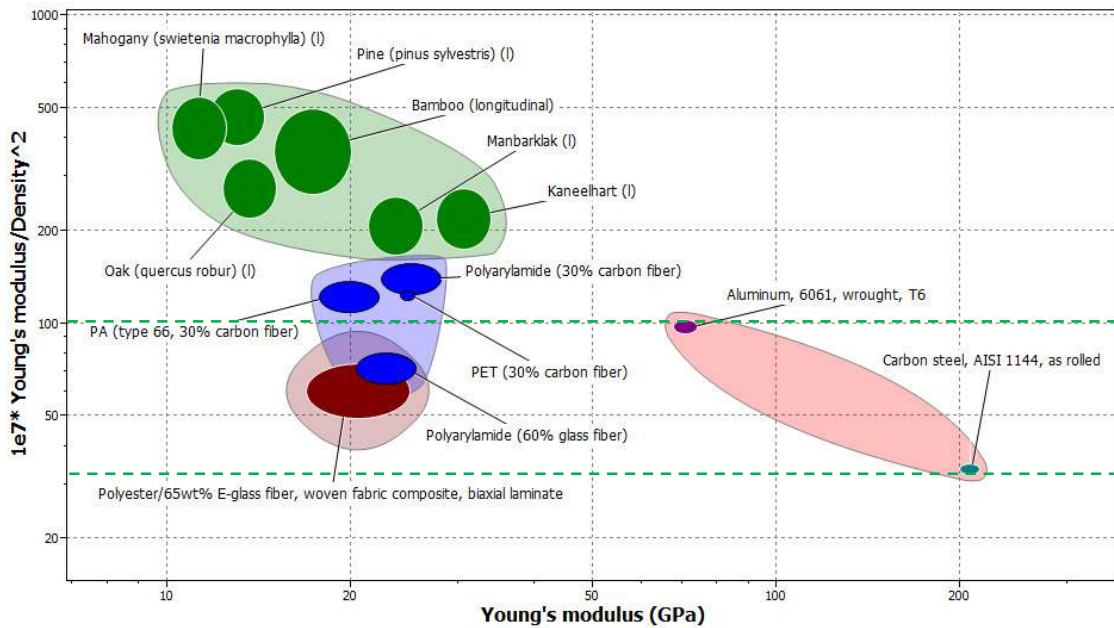


Figura 45: Índice da resistência à encurvadura com raio fixo para os materiais escolhidos.

Espessura fixa

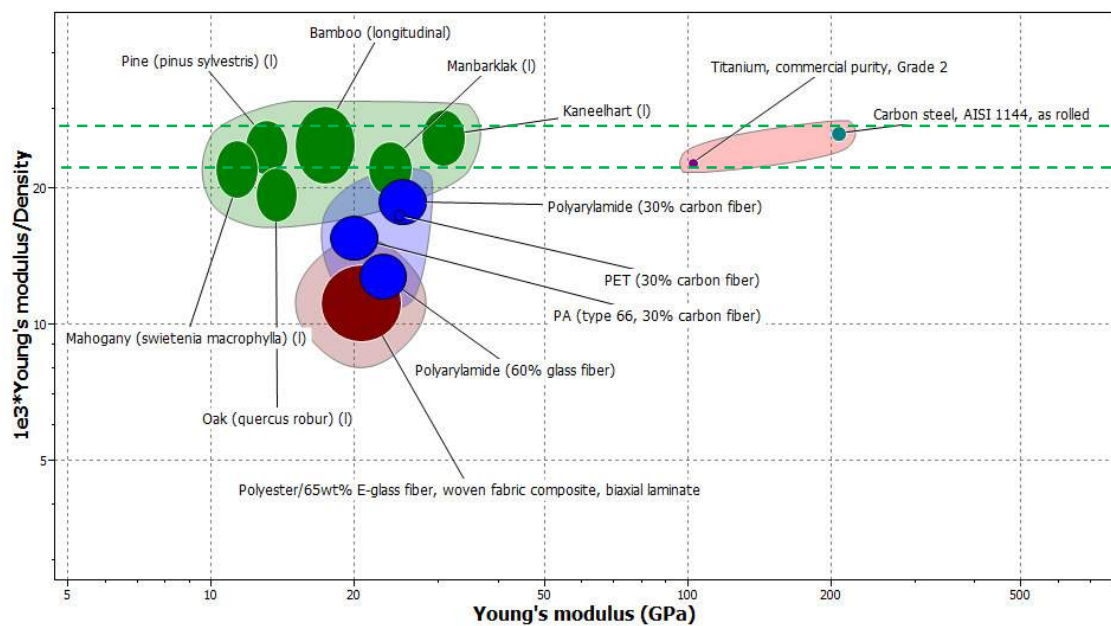


Figura 46: Índice da resistência à encurvadura com espessura fixa para os materiais escolhidos.

Para raio constante apenas a poliarilamida e o poliéster se encontram dentro dos valores máximo e mínimo do estudo do mercado, tendo todos os restantes materiais valores superiores. Já para espessura constante os materiais naturais encontram-se muito perto de estar na faixa de valores encontrados para os materiais de estudo enquanto os restantes se encontram abaixo. Tal pode ser confirmado nas tabelas observando a proximidade a 0% dos IM desses materiais.

Note-se também que a gama de valores dos IM dos materiais do estudo do mercado é muito pequena comparativamente à variedade de valores encontrados nos materiais estudados. Por outro lado não nos podemos esquecer que na realidade a F.C. é tido como o melhor material para o fabrico de bicicletas, e que portanto fosse incluído na classe dos do estudo do mercado esse leque abriria para valores acima.

4.3.7. Resumo da Análise Relativa ao Índices de Mérito

Na página seguinte apresentam-se os valores dos índices de mérito para cada um dos materiais escolhidos e na parte inferior o aumento percentual em relação ao pior valor.

Análise dos Resultados

Materiais poliméricos

Como era de esperar a F.C. ficou em 1º lugar em todos os índices de mérito e sempre por uma larga margem. Em 2º e 3º ficaram os dois polímeros reforçados com F.C. e nos últimos lugares os reforçados com F.V.

Com exceção da F.C. todos os materiais poliméricos têm IM à rigidez para raio fixo e resistência à encurvadura para espessura fixa piores que o pior do mercado, sendo os restantes IM dos polímeros reforçados melhores que os melhores do mercado. Isto deve-se ao facto de estes materiais terem baixo E e ρ mas relativamente alto σ_e .

Madeiras

Apesar das melhorias percentuais superarem largamente as dos materiais poliméricos, tal deve-se maioritariamente à melhoria verificada na resistência à rigidez para espessura fixa que por sua vez se deve principalmente às baixas densidades que estes materiais possuem, e que neste IM está ao cubo. Precisamente, o pinheiro e o mogno são os menos densos e tomaram os 2 primeiros lugares. Segue-se o carvalho e o bambu, com densidades rondando os 700 kg/m^3 e tomando as seguintes posições. As madeiras mais pesadas tomaram os últimos lugares.

Excetuando os IM em que a densidade está ao cubo ou ao quadrado, nota-se uma melhoria satisfatória ou negativa destes materiais relativamente ao valor do pior do mercado.

Ainda assim, no geral, as madeiras obtiveram resultados bastante satisfatórios, confirmando mais uma vez a viabilidade destes materiais na construção de quadros para bicicletas.

4. Seleção e Estudo de Materiais para a Bicicleta MA2000

Tabela 21: Resumo dos valores dos índices de mérito dos materiais poliméricos escolhidos.

		Material >>	Melhor	Pior	FC	PET + 30% FC	PA + 30% FC	PA + 60% FV	Poliéster 65%wt E-FV		
Rigidez	r fixo	$10^3 E/\rho=$	26,7	23,3	90,4	17,5	15,6	12,8	11,4		
	t fixo	$10^{11} E/\rho^3=$	318,9	43,1	3691,6	866,1	953,7	401,0	331,7		
Resistência à flexão	r fixo	$10^3 \sigma_e/\rho=$	125,0	66,7	1249,2	97,2	156,3	139,7	200,0		
	t fixo	$10^6 \sigma_e/\rho^2=$	44,6	11,2	798,2	68,4	122,1	78,0	108,1		
Resistência à encurvadura	r fixo	$10^7 E/\rho^2=$	89,3	33,9	577,7	123,0	122,1	71,8	61,4		
	t fixo	$10^3 E/\rho=$	26,7	23,3	90,4	17,5	15,6	12,8	11,4	Total	
Rigidez	r fixo	$10^3 E/\rho=$	15%	0%	288%	-25%	-33%	-45%	-51%	134%	5º
	t fixo	$10^{11} E/\rho^3=$	640%	0%	8465%	1910%	2113%	830%	670%	13987%	1º
Resistência à flexão	r fixo	$10^3 \sigma_e/\rho=$	87%	0%	1773%	46%	134%	109%	200%	2262%	4º
	t fixo	$10^6 \sigma_e/\rho^2=$	298%	0%	7027%	511%	990%	597%	865%	9990%	2º
Resistência à encurvadura	r fixo	$10^7 E/\rho^2=$	163%	0%	1604%	263%	260%	112%	81%	2320%	3º
	t fixo	$10^3 E/\rho=$	15%	0%	288%	-25%	-33%	-45%	-51%	134%	5º
		Total=	1218%	0%	19445%	2679%	3431%	1559%	1713%		
					1º	3º	2º	5º	4º		

Tabela 22: Resumo dos valores dos índices de mérito dos materiais naturais escolhidos.

		Material >>	Melhor	Pior	Kaneelhart	Mogno	Pinheiro	Carvalho	Manbarklak	Bambu		
Rigidez	r fixo	$10^3 E/\rho=$	26,7	23,3	25,9	22,0	24,3	19,4	22,1	24,3		
	t fixo	$10^{11} E/\rho^3=$	318,9	43,1	1827,7	8309,5	8664,9	3841,7	1915,8	4956,3		
Resistência à flexão	r fixo	$10^3 \sigma_e/\rho=$	125,0	66,7	90,2	85,8	91,3	81,0	76,3	57,1		
	t fixo	$10^6 \sigma_e/\rho^2=$	44,6	11,2	75,8	166,7	172,3	114,1	71,0	81,6		
Resistência à encurvadura	r fixo	$10^7 E/\rho^2=$	89,3	33,9	217,5	427,9	459,2	272,8	205,9	346,9		
	t fixo	$10^3 E/\rho=$	26,7	23,3	25,9	22,0	24,3	19,4	22,1	24,3	Total	
Rigidez	r fixo	$10^3 E/\rho=$	15%	0%	11%	-5%	4%	-17%	-5%	4%	-8%	5º
	t fixo	$10^{11} E/\rho^3=$	640%	0%	4141%	19180%	20004%	8814%	4345%	11399%	67882%	1º
Resistência à flexão	r fixo	$10^3 \sigma_e/\rho=$	87%	0%	35%	29%	37%	21%	14%	-14%	122%	4º
	t fixo	$10^6 \sigma_e/\rho^2=$	298%	0%	577%	1388%	1438%	918%	534%	629%	5484%	2º
Resistência à encurvadura	r fixo	$10^7 E/\rho^2=$	163%	0%	542%	1162%	1255%	705%	508%	923%	5094%	3º
	t fixo	$10^3 E/\rho=$	15%	0%	11%	-5%	4%	-17%	-5%	4%	-8%	5º
		Total=	1218%	0%	5317%	21748%	22743%	10424%	5390%	12946%		
					6º	2º	1º	4º	5º	3º		

5. Dimensionamento, Produção e Montagem

5.1. Dimensionamento

5.1.1. Método de dimensionamento

No dimensionamento do quadro dos diferentes materiais, assumiu-se que os tubos seriam todos ocos, com $d \gg t$. Utilizou-se a programação linear, implementada com o solver do MS Excel para obter rapidamente soluções, ótimas quando possível.

Existem vários critérios que podemos ter em conta no dimensionamento dos perfis, e que dependem do mercado alvo. Minimizar o peso, aumentar a resistência e/ou rigidez, etc. Seria interessante proceder ao dimensionamento utilizando diferentes critérios, ficará a sugestão feita para um futuro trabalho. Neste, optei por tentar encontrar dimensões para os tubos de forma a terem índices ρA , Ert^2 , $\sigma_e r^2 t$ e EI pelo menos tão bons como os do estudo do mercado, e de forma a minimizar o peso total da bicicleta. Assim, programou-se o seguinte:

Variáveis de decisão

r – raio do tubo

t – espessura do tubo

Restrições

$$\begin{aligned} EI_{MA2000} &\geq EI_{piorEM} \\ Ert_{MA2000}^2 &\geq Ert_{piorEM}^2 \\ \sigma_e r^2 t_{MA2000} &\geq \sigma_e r^2 t_{piorEM} \\ r &\leq 25mm \end{aligned} \quad \boxed{(EM = \text{Estudo do Mercado})}$$

O maior tubo do estudo do mercado tem 18.5 mm. Resolvi aumentar a margem até 25mm visto 18.5 ser bastante restritivo estando nós a trabalhar com materiais naturais com propriedades mecânicas fracas-medianas. Se impusesse tal restrição iríamos obter tubos mais espessos e bastante mais pesados.

Exclusiva para o caso das madeiras:

$$t \geq 2mm$$

Não há o perigo de deixar que se verifique $r \gg t$ porque nestes cálculos uso as fórmulas exatas para cálculo de A e I, apresentadas no 1º capítulo.

$$r \geq t$$

No limite de ser tubo maciço, $r = t$, caso contrário $r > t$. De qualquer maneira nunca pode acontecer que $r < t$.

Função objetivo

$$\min(Z = \rho A)$$

com A calculado da forma exata apresentada no cap. 1.

Desta forma consegui obter o peso ótimo — ou seja o mínimo possível — para as restrições colocadas em cima. Por outras palavras, para cada material obtive as dimensões que os tubos devem ter para, sendo no mínimo tão bons quanto os quadros do estudo do mercado relativamente à rigidez e resistência à flexão e resistência à encurvadura, sejam o mais leves possível.

5.1.2. Resultados

		r=	t=	$\rho A=$	EI=	$Ert^2=$	$\sigma_{Er}t=$	Preço/m
		mm	mm	kg/m	Nm ²	Nm	Nm	€/m
	Melhor	12,34	0,38	0,241	1682,0	1921,0	145,19	0,24
	Pior	18,44	1,22	0,396	440,0	388,0	32,43	2,11
<i>t qualquer</i>	FC	12,90	0,46	0,058	440,0	388,0	150,00	1,73
	PET + 30%FC	18,28	0,93	0,151	440,0	388,0	42,65	0,36
	PA + 30%FC	19,08	1,01	0,155	440,0	388,0	73,41	1,53
	PA + 60% FV	18,55	1,16	0,199	440,0	388,0	82,06	0,96
	Poliéster 65%wt E-FV	18,89	1,54	0,217	440,0	388,0	130,61	0,36
	<i>t qualquer</i>	Kaneelhart	19,35	0,81	0,114	531,2	388,0	32,43
	Mogno	25,00	1,17	0,093	609,4	391,0	32,43	0,61
	Pinheiro	24,62	1,11	0,089	624,9	388,0	32,43	0,07
	Carvalho	22,42	1,12	0,109	506,6	388,0	32,43	0,19
	Manbarklak	21,25	0,88	0,123	590,5	388,0	32,43	0,15
	Bambu	25,00	1,30	0,139	1001,1	715,2	32,43	0,17
<i>t ≥ 2</i>	Kaneelhart	14,12	2,00	0,196	440,0	1740,1	42,83	1,28
	Mogno	19,32	2,00	0,119	440,0	877,3	33,01	0,78
	Pinheiro	18,56	2,00	0,117	440,0	957,5	33,33	0,09
	Carvalho	18,19	2,00	0,153	440,0	1000,2	38,03	0,27
	Manbarklak	15,31	2,00	0,193	440,0	1457,2	38,42	0,24
	Bambu	20,13	2,00	0,168	750,3	1369,1	32,43	0,21
<i>maciço</i>	Kaneelhart	11,61	11,61	0,504	440,0	48240,3	168,14	3,30
	Mogno	14,91	14,91	0,359	440,0	37585,6	146,37	2,35
	Pinheiro	14,44	14,44	0,347	440,0	38804,8	145,59	0,26
	Carvalho	14,21	14,21	0,450	440,0	39431,9	164,90	0,79
	Manbarklak	12,39	12,39	0,518	440,0	45228,9	155,83	0,65
	Bambu ¹	13,47	13,47	0,399	440,0	41580,0	97,84	0,50

¹ Muito certamente não existem troncos de bambus maciços, o resultado é apenas indicativo.

Pode-se observar que com todos os materiais foi possível obter tubos bastante leves, mais do que o mais leve do estudo do mercado, mas à custa de dimensões elevadas, tanto espessuras como raios. Ainda assim, nenhum dos quadros dimensionados é, ao nível das quatro propriedades analisadas, pior do que o pior do estudo do mercado. Mesmo a nível de preço, são para já bastante competitivos. Já se sabe, que por exemplo no caso das madeiras, o tratamento e cuidados necessários no seu fabrico e montagem, serão um fator de encarecimento muito grande.

As dimensões necessárias para um tubo em fibra de carbono igualar o pior do EM são pequeníssimas. E ainda assim consegue ser mais barato que o Ti.

Bambu foi o material com maiores dimensões necessárias para satisfazer os requisitos com $t \geq 2$. Isto deve-se ao facto de estar limitado pela resistência mecânica à flexão. Sendo o material com mais baixo σ_e de todos, é natural que tenha sido limitado por esse fator.

As duas madeiras exóticas são as mais pesadas mas também que permitiram obter quadros com menor atravancamento e melhores propriedades, especialmente o Kaneelheart, sendo contudo o preço da Manbarklak bastante mais competitivo.

Relativamente à opção de fazer o quadro com varões (maciço) nota-se que o fator limitante é sempre a rigidez. Mesmo tentando minimizar o peso, quase todos os quadros a serem construídos deste modo ficarão mais pesados que o mais pesado do estudo do mercado. O mogno e o pinheiro, as duas madeiras menos densas (515 kg/m^3 e 530 kg/m^3), seriam as únicas a ter pesos aceitáveis. Obviamente que, tal como foi mencionado na revisão bibliográfica, se a bicicleta for para ser usada em piso plano sem grandes variações de velocidade, possivelmente também as outras madeiras poderão ser usadas. Ainda assim, a solução construtiva em tubo oco, em termos de propriedades mecânicas, é sem dúvida superior e deverá ser a solução preferida a menos que haja algum impedimento a nível de produção ou montagem.

Talvez a conclusão mais importante que podemos tirar deste dimensionamento é que é possível ter, pelo menos teoricamente, tubos com tamanhos aceitáveis e que são no mínimo tão bons mecanicamente como os quadros mais fracos do estudo do mercado. O que significa que a menos que haja impedimentos devido à produção, montagem e/ou custo, todos estes materiais permitem, à partida, a construção de um quadro apropriado para competir com o quadro das bicicletas BIK e FD.

5.2. Produção

Nesta fase vi-me obrigado a escolher entre os dois grandes grupos até agora analisados, as madeiras e os materiais poliméricos, uma vez que possuem métodos de produção e montagem muito distintos e merecem cada um, uma análise separada. Assim, optei por prosseguir com o estudo da opção de construir a bicicleta em qualquer uma das maneiras estudadas.

Com exceção dos quadros em bambu, uma grande parte dos restantes quadros em madeira parece ser fabricado sob a forma de folhas de madeira com as fibras na direção longitudinal unidas umas às outras por alguma resina. A este tipo de madeira é dado o nome de micro laminada ou lamelada colada (*laminated veneer lumber*). A razão prende-se com o facto de que um mesmo maciço de madeira laminada e colada tem maior tenacidade e resistência mecânica do que um maciço de madeira serrada ou roliça. Além disso é possível dar formas aos laminados que seriam muito difícil ou até impossível com madeira maciça.

Estas, denominações – madeira laminada, serrada e roliça – resultam dos métodos de

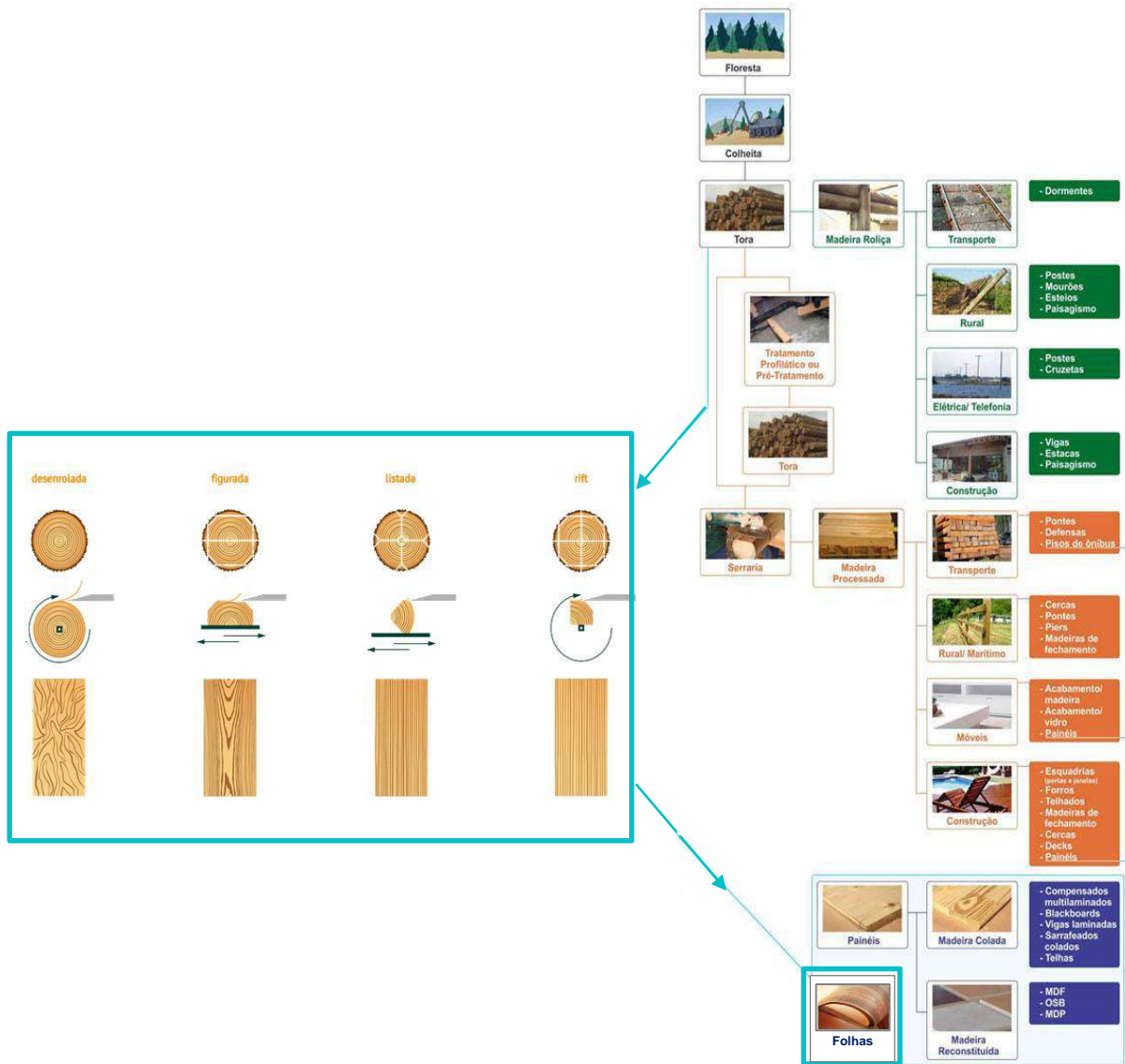


Figura 47: Fluxograma do processamento da madeira^[21]

processamento da madeira, como se pode ver na figura acima. A azul está enquadrado o método de processamento que resulta na obtenção de folhas, usado na construção de tubos de madeira para bicicletas. Chama-se folhas às placas ou lâminas finas – entre 0,5mm e 0,7 mm – que resultam da faqueagem do toro.

As folhas de madeira são unidas umas às outras por uma resina ou adesivo, são conformadas na forma pretendida por meio de ferramentas de aperto e a resina é deixada endurecer por alguns dias.



Figura 48: Esq.: Folhas de mogno coladas, antes de serem cortadas com a forma da forqueta. Dª. Forqueta acabada.^[22]



Figura 49: Construção do assento em madeira pelo método de junção de folhas de madeira com resina.^[23]

Para conferir melhores propriedades de absorção de vibrações e alguma rigidez à estrutura é possível a adição de espumas no interior dos tubos.



Figura 50: Cortes de tubos de folhas de mogno, 2.5mm de espessura, com usados na construção de um quadro de bicicleta. Espuma de poliestireno extrudido (*Styrofoam*) no interior.^[22]

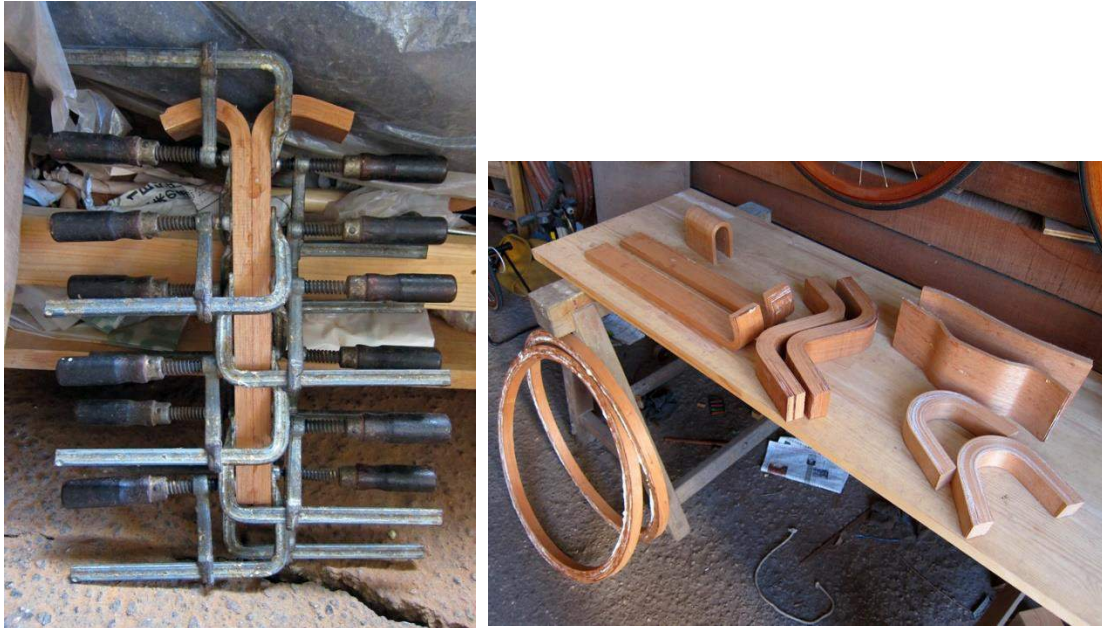


Figura 51: Esq.: Conformação do tubo do assento. Dª: Alguns tubos antes de serem cortados sob a forma circular.^[22]

Antes e depois da conformação e união das folhas da madeira, esta deve ser tratada de modo a aumentar a sua longevidade.

5.2.1. Tratamento da Madeira

A madeira pode ser atacada por diversos inimigos sendo que o mais destrutivo é o da podridão gerado pelo excesso de humidade. Como outros agressores naturais temos os carunchos ou térmitas (chamadas formigas brancas). O objetivo mais comum da aplicação destes tratamentos é o de prolongar a vida útil. Outro objetivo é o de melhorar as propriedades mecânicas da madeira.

Cada vez mais a necessidade de aplicar tratamento se faz sentir, pois com o aumento da procura da madeira, a madeira preterida tem passado a ser a de rápido crescimento, a qual é por natureza menos resistente a agentes destrutivos.

Agentes destrutivos:

- Sol – os raios ultravioletas destroem a lenhina à superfície da madeira, que resulta num acinzentar irregular da madeira à superfície.
- Humidade e água – a madeira sujeita a níveis de humidade variável racha quando a humidade baixa, havendo risco de desenvolvimento de fungos nas fendas.
- carunchos – que são insetos xilófagos cujas larvas se alimentam da madeira. Mantêm-se no seu interior até se transformarem em inseto adulto, altura em que emergem da madeira por orifícios por eles construídos;
- térmitas brancas – inseto que vive permanentemente no interior da madeira atacada, exceto na época de enxameação, em que se transforma em formiga voadora para colocar os seus ovos em madeiras húmidas e criando assim novas termiteiras.

- temperatura – grandes amplitudes térmicas (>10°C) entre o interior e o exterior traduzem-se em variações dimensionais devendo os acabamentos utilizados seguirem esses movimentos sob pena da exposição de madeira não tratada aos agentes destrutivos.

Classificação dos tratamentos quando à aplicação de pressão

Sem aplicação de pressão

- escovas;
- sprays;
- mergulho;
- banho – mergulho que dura dias ou semanas.

Tratamentos manuais geralmente observados em carpintarias e trabalhos de garagens e oficinas encontram-se neste grupo.

Estes tratamentos só fornecem penetração superficial. Não são adequados para madeiras estruturais para longo tempo de serviço previsto.

Com aplicação de pressão

- célula completa – madeira mergulhada em reservatório cheio de óleo / agente preservativo sob pressão;
- pressão flutuante – pressão varia entre vácuo e pressão pré-determinada em poucos segundos;
- processo Boucherie – utiliza a pressão hidrostática em placas de madeira verde colocadas de forma inclinada numa câmara pressurizada para a penetração do agente de tratamento e de preservação.

Agentes químicos

É neste grupo que se encontram os tratamentos mais eficazes na proteção à madeira, não só em termos de qualidade da proteção mas também na área de atuação, uma vez que geralmente podem ser usados com a aplicação de pressão e portanto pode-se obter penetrações na madeira mais elevadas. Podem ser divididos em dois grandes grupos:

- metálicos – a maioria destes são baseados em cobre, :
 - arseniato de cobre cromatado (CCA) – foi o preservativo mais usado durante décadas tendo sido abolido o seu uso na EU devido a preocupações ambientais e de segurança em aplicações domésticas; o qual se fixa na madeira após o processo de tratamento
 - quaternário de cobre alcalino – os componentes ativos são óxido de cobre (67%) e um composto de amónia quaternária. Existem várias formulações, designadas por tipo A, B, ... com diferentes níveis de penetração na madeira;
 - cobre azole – composição baseada em carbonato de cobre e compostos orgânicos, chamados azóis. Foi o principal substituto do CCA a nível mundial para o tratamento de madeira com usos residenciais.

- não-metálicos – usados devido a preocupações ambientais trazidas pelos agentes metálicos.
 - boratos – têm muito baixa toxicidade e são baratos, no entanto são apenas para ser usados em aplicações onde a madeira não contacte com água;
 - baseados em silicatos de sódio – dão à madeira um aspeto vitrificado;
 - baseados em silicatos de potássio – de ação principalmente superficial.

Agentes naturais

- lama – molhar a madeira em lama é uma técnica usada no Vietname na construção de casas para a proteção da madeira contra os vários agentes destrutivos. Não será um dos métodos mais apropriados na construção das bicicletas, apenas em casos críticos de viagens em que ocorra a abertura de fendas na madeira e seja necessário improvisar para prevenir o apodrecimento da madeira na zona da fenda;
- tratamento térmico – área ainda em investigação e em expansão. No tratamento a madeira é submetida a temperaturas entre os 160°C e 260°C, alterando-lhe a composição química e estrutural. O módulo de elasticidade aparenta aumentar para tratamentos suaves a temperaturas mais baixas e diminuir para tratamentos a temperaturas altas. A tensão de rotura parece baixar consideravelmente (entre 20-80%),^[25]
- óleo de tungue – óleo extraído da árvore tungue e encontrado em vários centros de comércio adaptado ao tratamento de madeira. Este óleo penetra na madeira endurecendo e formando uma camada hidrofóbica de cerca de 5mm de espessura à superfície.
- óleo de linhaça – usado também apenas como tratamento superficial, é hidrofóbico e impede a penetração de carunchos e outros agentes vivos destruidores.

5.2.2. Seleção de Adesivos

Mais atrás mencionou-se o facto de as folhas serem, neste tipo de aplicações, coladas. Então coloca-se a pergunta: Porquê o uso de adesivos em vez de outros tipos de ligações?

Ficam aqui alguns dos motivos:

- Menores concentrações de tensões uma vez que não são criados furos nem qualquer tipo de alteração à placa de madeira;
- Distribuição uniforme das cargas;
- O material compósito resultante é muitas vezes mais resistente que a própria madeira;
- Permite o uso de espessuras mais finas. Por exemplo para ligações aparafusadas existem valores mínimos de espessura que as peças a ligar devem ter;
- Permite formas que não são possíveis ou que são difíceis de conseguir com outros métodos de ligação.

Assim, os adesivos são largamente usados na ligação das folhas de madeira e pelas razões apresentadas penso ser o método mais apropriado.

Enquadrando um pouco o uso dos adesivos, podemos dizer que até cerca de meados do século 20 eram baseados em materiais naturais resultantes de subprodutos de processamento animal. A partir dos inícios dos anos 30 os adesivos sintéticos começaram a ser desenvolvidos e são agora os mais usados na colagem de madeira.

A principal vantagem de muitos dos adesivos sintéticos relativamente aos naturais é a sua excelente durabilidade, tornando os produtos de madeira colados passíveis de serem usados em quase todas as condições às quais a própria madeira pode ser usada. Quando aplicados corretamente, a maioria dos adesivos sintéticos são capazes de oferecer juntas com resistências ao corte tão ou mais altas que a própria madeira.

A maior parte das colas sintéticas para madeiras em uso atualmente endurecem por reação química. A taxa de endurecimento depende da temperatura à qual a junta é exposta. O aumento da temperatura aumenta essa taxa bem como, em certos casos, a resistência mecânica da junta.

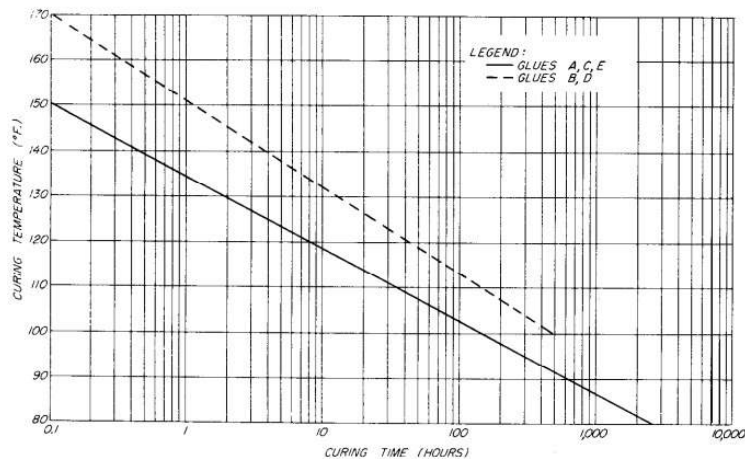


Figura 52: Tempo de cura vs temperatura necessário para 5 diferentes colas fenólicas em carvalho branco (*Quercus Alba*)^[27].

Alguns fatores a ter em conta na seleção do adesivo

Preparação da superfície

Para existir boa molhagem, a superfície deve estar limpa de detritos, óleos, gorduras ou fibras de madeira soltas. Certos adesivos são mais sensíveis à preparação da superfície que outros. Assim, consoante o cuidado que se vai ter na limpeza e polimento das placas de madeira se deve escolher o adesivo.

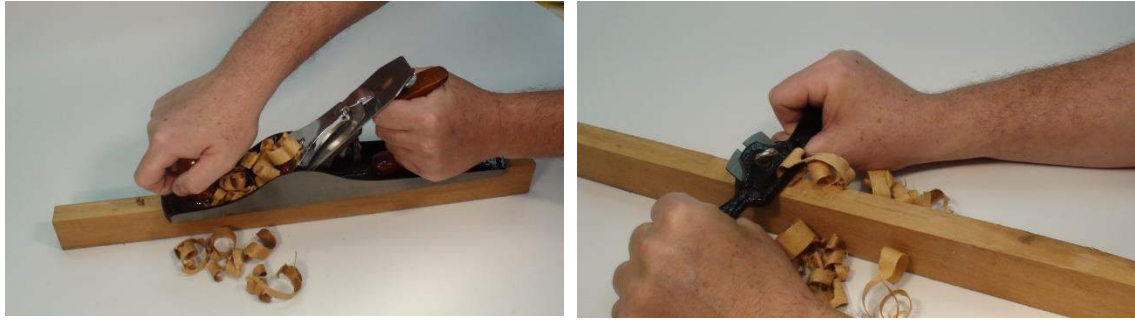


Figura 55: Plaina e raspador: ferramentas usadas na preparação da superfície para a aplicação do adesivo.

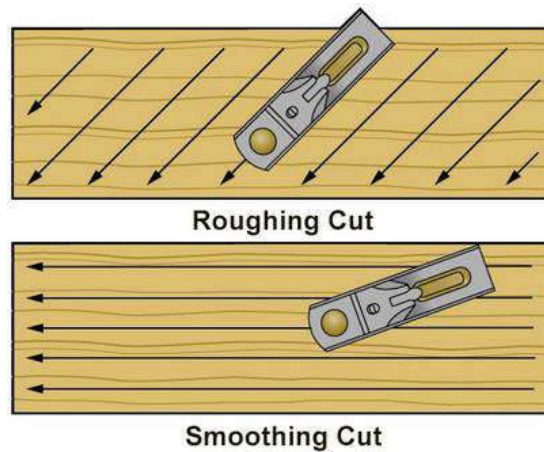


Figura 54: Nesta fase tanto o raspador como a plaina deverão ser usados longitudinalmente às fibras da madeira. [29]

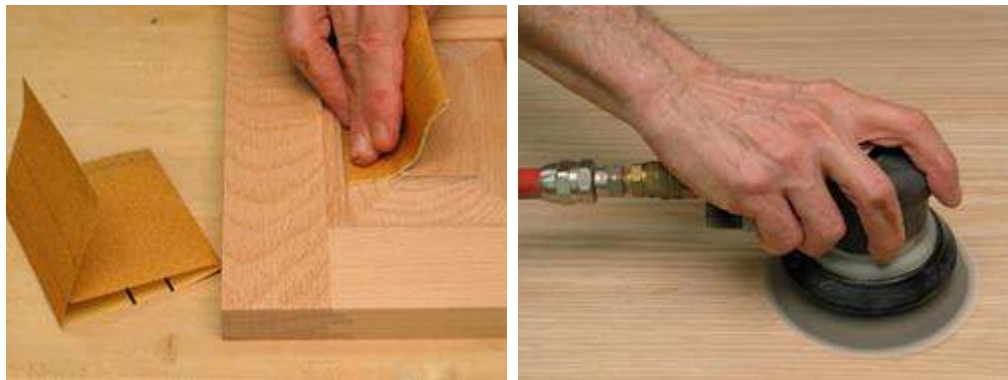


Figura 53: Lixa e lixadeira orbital. [30]

Necessidade da Aplicação de Pressão

Aplicação de pressão 1200 kPa - 1750 kPa para madeiras folhosas e 870kPa – 1050 kPa para madeiras resinosas². Além disso, quanto maior a densidade maior deverá ser a pressão aplicada.

² Todas as madeiras derivam de duas amplas categorias de plantas, as gimnospermas e as angiospermas. Estas categorias também se designam comumente por resinosas (*softwoods*) e folhosas (*hardwoods*), respetivamente. Esta terminologia refere-se à origem botânica da madeira e não tem relação com a dureza da madeira – como se poderia levar a crer pela terminologia inglesa.

O tempo de aplicação de pressão depende do adesivo. Todos os adesivos solúveis em água precisam de tempo para a água se difundir para a madeira, e para o adesivo catalisar e criar uma forte ligação entre as duas folhas de madeira.

Espessura da camada de adesivo

Ver recomendações do fabricante do adesivo, se bem que 6-8 mm são suficientes para a maioria das aplicações. Independentemente da espessura da camada, e do método utilizado no espalhamento, escova, rolete, entre outros, a camada deverá ser o mais homogênea possível ao longo da zona de aplicação.

Humidade da madeira

Este fator quase mereceria um capítulo só para ele tão importante que é relativamente à influência que tem nas propriedades da madeira.

Relativamente à sua importância no que concerne aos adesivos, a sua maioria destes não se liga corretamente à madeira se esta possuir valores de humidade acima de 20%, sendo os valores ideais entre 6-17%, pelo que antes de se proceder à ligação das chapas de madeira esta deve ser secada, se ainda não o tiver sido, para reduzir a humidade para valores inferiores. É preciso ter em atenção que, ao secar, a madeira encolhe, portanto caso se compre as placas de madeira não secas, é necessário ter essa variação dimensional em conta. Idealmente a secagem deve ser imediatamente seguida da aplicação do adesivo, para evitar nova reumidificação da madeira.

Relativamente à importância da secagem da madeira noutros aspetos, ao secar a madeira, o conteúdo de humidade final deve ser o mais próximo possível, dos valores de humidade de equilíbrio, Equilibrium Moisture Content (EMC), que o produto vai experienciar em serviço. Nas regiões costeiras do Atlântico esse valor ronda os 11%.^[27]

Outra das razões para secar a madeira é o facto de a humidade presente nesta ser um dos fatores mais importantes para a variabilidade das suas propriedades mecânicas. Como se pode ver na Figura 56 geralmente quando mais seca estiver a madeira melhores são as suas propriedades de resistência e rigidez.

Outra desvantagem de não secar a madeira é que em vez dos poros estarem preenchidos por ar, passam a estar preenchidos por água, o que pode elevar a sua densidade até mais de 100% do valor inicial, caso por exemplo do *Pinus caribea*, como se pode ver na mesma figura. Deste modo, a aplicação final da resina deverá ser totalmente impermeável à água sob pena de a bicicleta se tornar inutilizável devido à grande diminuição das propriedades da madeira causada pelo aumento da humidade.

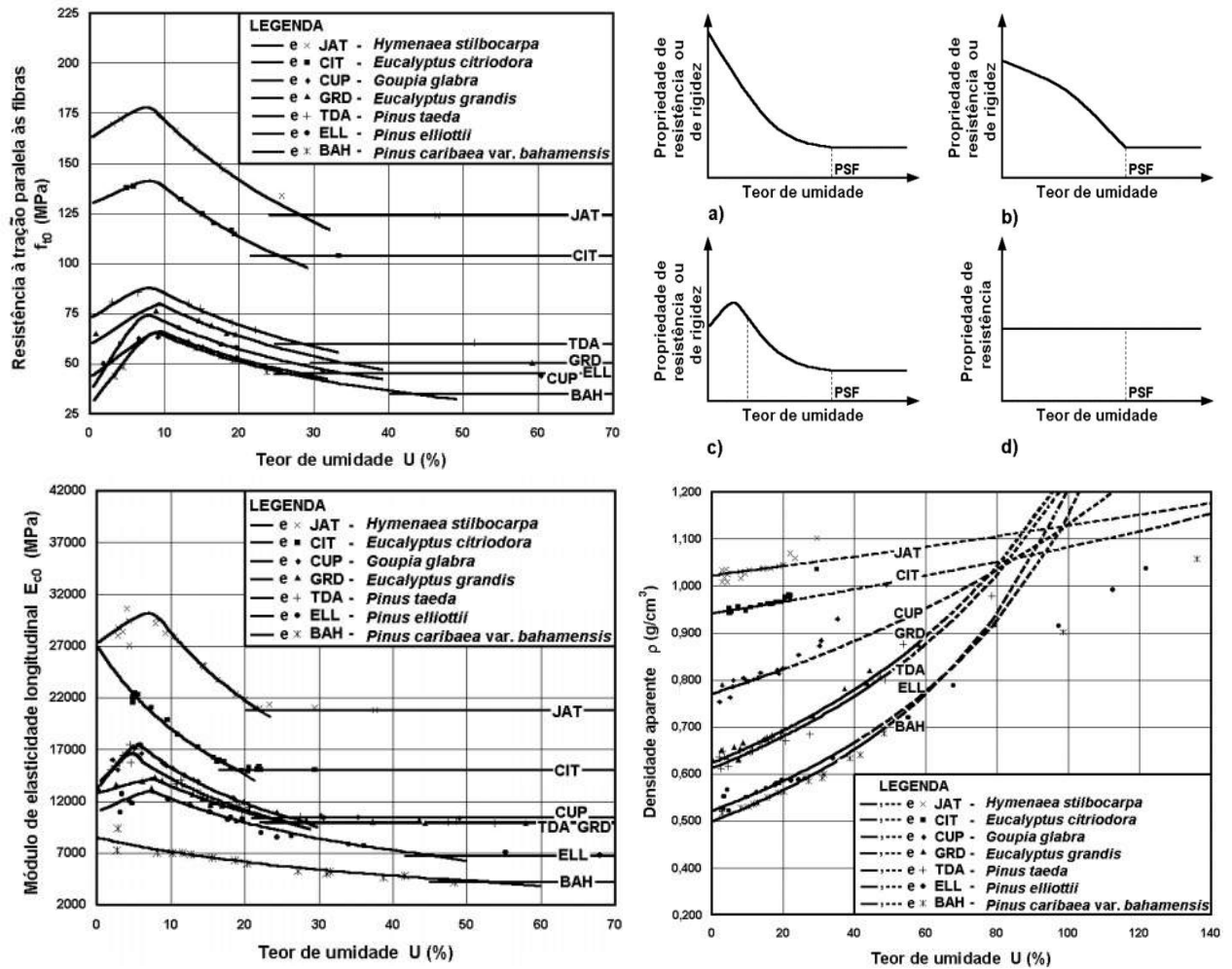


Figura 56: Esq. Influência do teor de humidade na resistência à tração longitudinal em algumas espécies de madeiras. D²: Curvas típicas utilizadas para representar a influência do teor de humidade sobre as propriedades de resistência e rigidez, sendo as curvas a) e c) as mais frequentes. Baixo esq.: Influência do teor de humidade no módulo de elasticidade. Baixo d²: influência do teor de humidade na densidade aparente.^[33]

Custo

Visto que os adesivos são mais caros que as madeiras de crescimento rápido, o custo do adesivo bem como da mão-de-obra e equipamento necessário para a aplicação devem ser tidos em conta. Sendo que para um tubo de 3mm de espessura se chegam a sobrepor 15 camadas de folhas de madeira, o investimento em matéria-prima de adesivo não é de menosprezar, visto que cada um desses tubos tem de levar 13 camadas de adesivo.

Segurança, Ambiente e Saúde

Muitos adesivos curam por reação química, sendo necessários cuidados especiais antes e durante a mistura dos adesivo e endurecedor. Cuidados devem ser tidos com possíveis fumos ou o toque com a pele. Por exemplo, certos adesivos baseados em água têm componentes orgânicos que evaporam, suscitando problemas para a saúde de quem estiver a trabalhar com ele.

Temperatura

É necessário ter em conta as temperaturas de serviços do adesivo a aplicar e das condições de uso da bicicleta. Há adesivos mais apropriados que outros consoante a gama de temperaturas de serviço a que se destina a aplicação.

Adesivos de epóxidos modernos são bastante resistentes e altamente à prova de água, bem como a variações de temperatura. São mais relaxadas relativamente aos níveis de humidade da madeira podendo-se obter boas ligações com valores até 25%.

Taxa de Deterioração do Adesivo com o Tempo

Uma grande parte dos adesivos deteriora as suas propriedades mecânicas com a exposição prolongada a certas condições ambientais. Sob altas temperaturas e humidade, as propriedades da madeira degradam-se mais rapidamente que adesivos rígidos termo-endurecíveis como os resorcinol-, fenol-, e melamina- formaldeídos. Nestes casos o fator limitante é a madeira. Mas há adesivos como os ureia-formaldeído para os quais isso não é verdade.

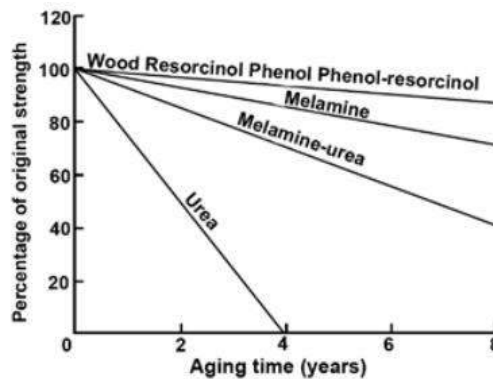


Figura 57: Taxas de deterioração de alguns adesivos expostos diretamente ao ambiente. [31]

Se tivermos os fatores acima em conta na seleção do adesivo para ligação das placas de constituirão os tubos, evitar-se-ão a esmagadora maioria dos problemas decorrentes desta fase.

De seguida apresentam-se alguns adesivos sintéticos com aplicação usual em madeiras.

Tabela 23: Alguns adesivos utilizados na colagem de madeira, aplicações, processos e vantagens / desvantagens.

Adesivo	Aplicações	Processo de aplicação	Vantagens / Desvantagens
Acetato de Polivinila (PVA)	Produtos de madeira de interiores	Líquido aplicado diretamente sob superfície, 40 min. sob pressão a temperatura ambiente	+ fácil de trabalhar; - fraca resistência à humidade; - fraca resistência a altas T ^a s; - baixa resistência à fadiga.
Epóxido	Contraplacado e madeira laminada para diversos usos incluindo construção naval,	Misturar resina e endurecedor nas proporções adequadas. Curar a T ^a ambiente ou alta T ^a , aplicação de	+ boa molhagem, sem necessidade de grande preparação da superfície; + boas propriedades mecânicas;

	equipamento desportivo, mobílias.	pressões baixas para melhorar a molhagem.	+ resistência à água; + grande adesão a vários tipos de substratos (versáteis); + baixa variação dimensional aquando do endurecimento;
Poliuretano	Usos diverso em mobílias e colagem de contraplacado.	Aplicar o adesivo diretamente na superfície. Cura à Tª ambiente. Necessita da aplicação de altas pressões.	+ boa molhagem; + boas propriedades mecânicas; - Fraca resistência à água (molhagens e secagens repetidas);
Fenol formaldeído	É o principal adesivo usado em contraplacado de madeira macia	Sob a forma líquida ou pó. Cura a 120-150°C sob a aplicação de altas pressões.	+ excelente resistência à água; + barato; + boa resistência a altas Tªs.
Emulsão de polímero isocianato	Placas laminadas para uso interior e exterior. Grande uso em portas e outros elementos arquitetónicos.	Mistura de polímero e endurecedor. Endurecido a Tª ambiente, necessita da aplicação de altas pressões.	+ boa resistência à água, atmosfera húmida e ciclos repetidos de secagem e molhagem;

A escolha segura seria usar uma resina de epóxido. É um adesivo muito versátil, muito usado em várias aplicações e bastante bem estudado. É também o adesivo utilizado no fabrico de bicicletas em mogno pelo processo de colagem de folhas de madeira pelo Sr. Sueshiro Sano [22]. Outras escolhas são possíveis, mas é também necessário considerar se o uso a que se destina a bicicleta. Se for para ser usada à chuva, ou em condições de elevada humidade não é conveniente usar PVA nem poliuretano. Se a bicicleta for para ser montada numa garagem ou oficina de carpintaria simples, possivelmente não será conveniente o uso de adesivos que requeiram a aplicação de gamas de pressões pré-determinadas ou temperaturas de cura elevadas como o fenol formaldeído ou a emulsão de polímero isocianato.

5.3. Montagem

Depois de fabricados os tubos é necessário uni-los. Existem várias formas de o fazer conforme a madeira e o local de união. As maneiras mais comuns e o fazer encontram-se representadas na figura seguinte e são os parafusos, fibras, adesivos para juntas em madeira, tubos e juntas metálicas.

5. Dimensionamento, Produção e Montagem

Os principais inconvenientes do uso de parafusos prende-se com a criação de concentrações de tensão gerados nos furos bem como a necessidade da madeira ser maciça. Esta última é uma limitação visto que geralmente prefere-se, como foi verificado na análise de dimensionamento, tubos ocos para se obter quadros mais leves para as mesmas propriedades mecânicas.



Figura 58 – Alguns dos métodos empregues na ligação de tubos de madeira: Fibras naturais e sintéticas, parafusos, adesivos para juntas em madeira, tubos e juntas metálicas.

No caso da união de tubos de madeira micro-laminada, há que ter em atenção o tipo de junta, para preparar o fim do tubo de acordo com o mesmo. Na Figura 58, na 3ª imagem a contar de cima, pode-se claramente ver uma junta do tipo F unindo o tubo do assento com o tubo de topo e os *seat stays*. Na 4ª imagem a ligação mais comum para o *top* e *down tube* é a do tipo C (lado dº) por pinos.

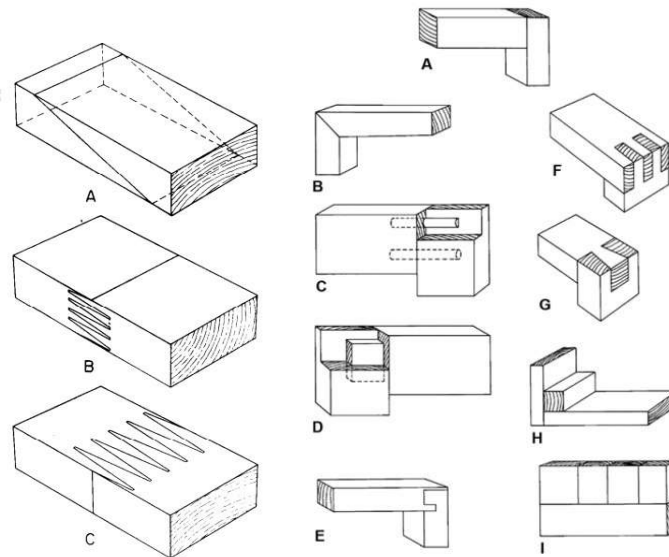


Figura 59: Vários tipos de juntas utilizadas na ligação de peças de madeira. Esq. juntas entre fins de grão, *end-grain joints*. Dº: Juntas entre fim de grão e canto, *end-to-edge-grain joints*. [27],[31]

As juntas têm estes nomes devido às direções das fibras dos tubos a ser unidos como se poder ver na Figura 60.

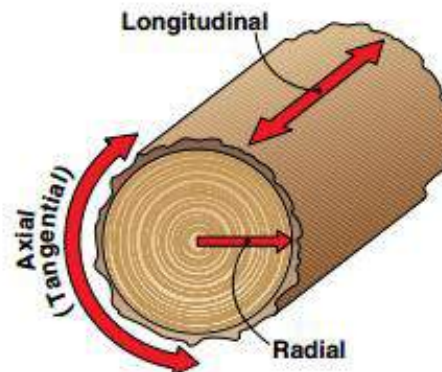
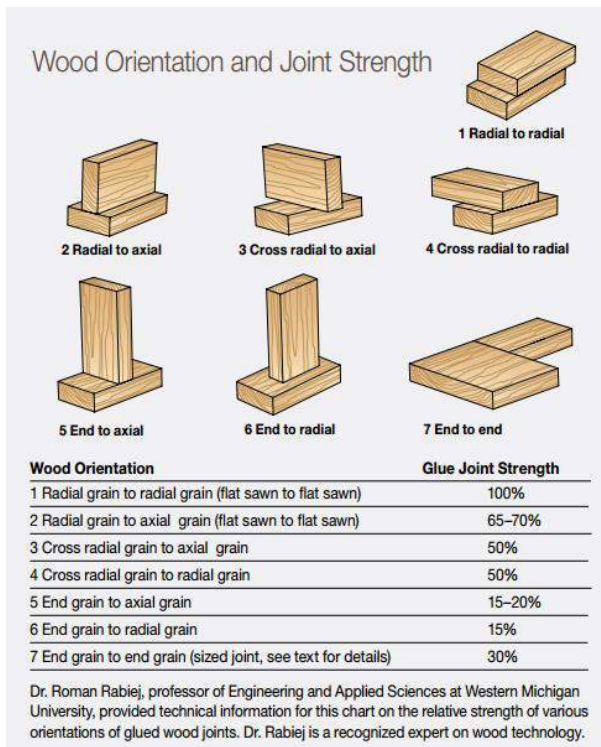


Figura 60: Orientação das fibras da madeira e a sua resistência. [32]

Em certas zonas do quadro sujeitas a grandes esforços e de grande número de ciclos como é o caso da zona da pedaleira, ou dos *dropouts* será aconselhado a introdução de um tubo metálico e ligações por peças metálicas, respetivamente.



Figura 61: Esq.: Vista de cima do tubo da pedaleira. Dª: Ligação dos *dropouts* por junta de superalumínio, obtido por fundição.^[22]

Relativamente aos quadros em bambu, não é prático ou mesmo impossível criar juntas como se faz para os laminados de madeira. Então o que se faz é unir os tubos ou por juntas artificiais de algum compósito ou material metálico.

No entanto, quando é usado um método de junção dos tubos com um material diferente do dos tubos, há que ter em atenção o coeficiente de dilatação térmica dos tubos. Se com uma variação de temperatura, um material expandir ou contrair mais do que outro podem-se gerar tensões ou folgas indesejadas, que podem levar ao comportamento indevido do quadro.

Por esse motivo fiz uma pequena análise dos coeficientes de expansão térmica dos materiais em estudo, começando pelas fibras que seriam usadas na ligação dos quadros em bambu. Incluí os restantes materiais para efeitos comparativos.

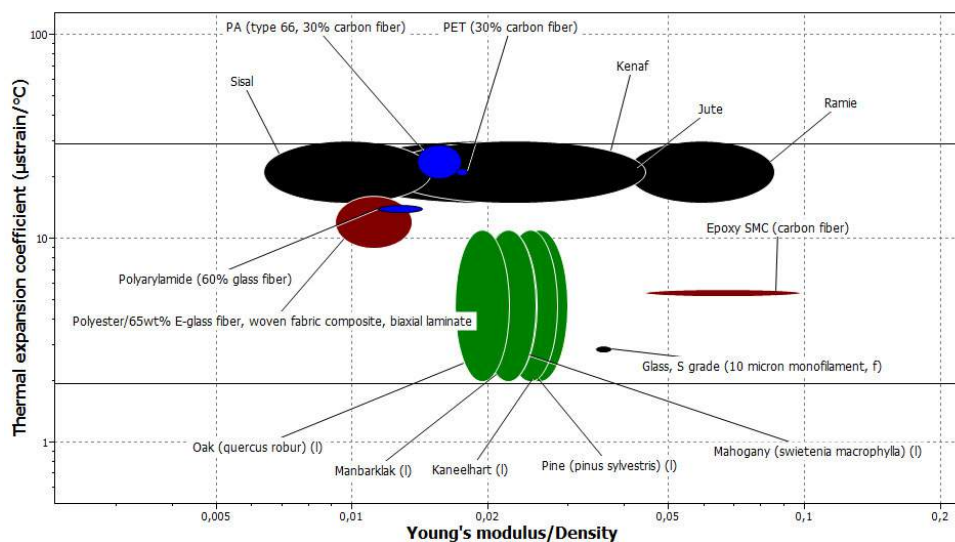


Figura 62: Coeficientes de expansão térmica dos materiais em estudo comparativamente a possíveis fibras para a união dos tubos.

Podemos ver que as fibras têm coeficientes de expansão térmica iguais ou superiores aos materiais aqui estudados. Todas elas têm valores superiores ao bambu, o que significa que em ambientes quentes será preciso ter cuidado com a formação de eventuais folgas e em ambientes frios com a rotura da fibra, uma vez que vai estar sob mais tensão e também porque todas elas possuem alongamentos após rotura de apenas, no máximo, 10%.

Relativamente aos metais, a serem usados nas aplicações mencionadas anteriormente, verifica-se uma oferta muito larga. Assim limitei o preço a 5€/kg, $E > 50\text{GPa}$, $\sigma_e > 50\text{MPa}$, com nota de excelente e bom relativamente à resistência à água salgada e à radiação UV, e limitando a gama de coeficientes de expansão térmica aos valores máximo e mínimo dos materiais estudados, tirados do gráfico anterior. A escolha parece assim recair para os aços inox visto que os bronzes e cobsres têm resistências específicas bastante (aprox. 56%) menores e com os inox conseguimos valores de expansão térmicos mais próximos dos materiais estudados.

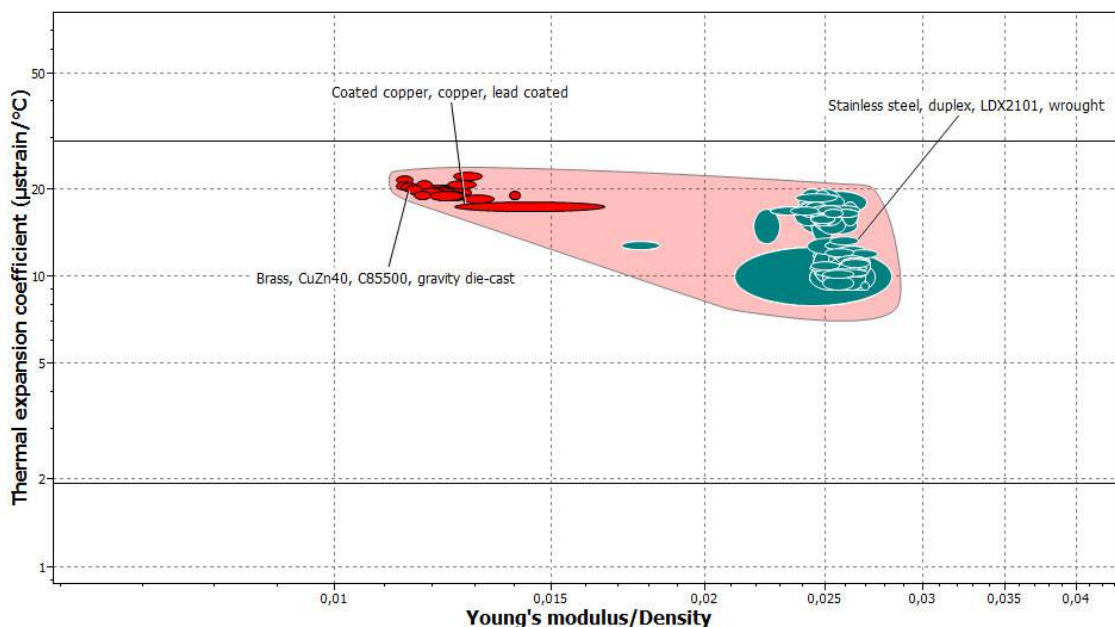


Figura 63: Coeficientes de expansão térmica de metais e ligas metálicas.

Na Figura 64 exemplifica-se a conjugação de alguns dos métodos de união de tubos aqui mencionados num quadro de mogno na obtenção da versão final do quadro.

Encerrando este capítulo ficam assim dimensionados os tubos para um possível quadro para cada uma das madeiras estudadas, respeitando todos eles as exigências do mercado em termos de rigidez, resistência à encurvadura e flexão. Verificou-se que tanto as madeiras apresentadas como alguns materiais poliméricos são viáveis como matéria-prima na construção de um quadro para a MA2000, uma bicicleta de lazer.

Ficaram também definidas algumas sugestões de meios de produção para os tubos de madeira a constituir o quadro, tendo-se observado a grande prevalência do uso de micro-laminados de madeira colados com adesivos, e deram-se algumas sugestões viáveis para possíveis métodos de união dos tubos.

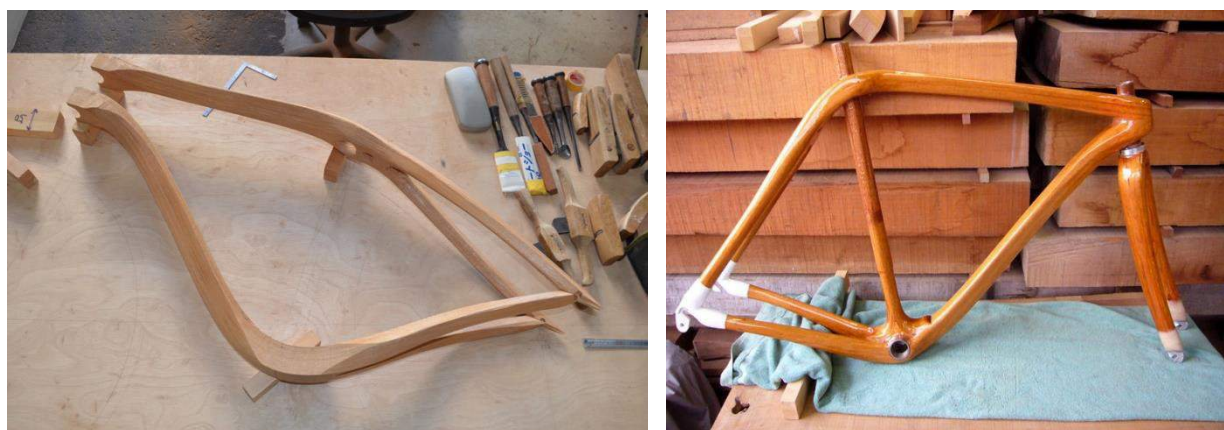


Figura 64: Esq.: Base do quadro em mogno. Dª quadro depois da introdução de *dropouts* em superalumínio, tubo de aço na pedaleira, união dos *top* e *down tubes*, adição da forqueta e do tubo do assento e envernizamento. [22]

6. Trabalhos Futuros e Conclusões

Sugestão de trabalhos futuros:

Como no final tive de escolher entre os materiais poliméricos e as madeiras, o estudo da viabilidade da produção e montagem dos quadros em materiais poliméricos ficou por fazer. No entanto gostava de ir mais à frente e sugerir o estudo comparativo de quadros de materiais poliméricos reforçados e não reforçados com fibras, quanto às propriedades analisadas neste trabalho, bem como comparação dos métodos de produção e montagem, tentando-se chegar a um quadro resumo das vantagens e desvantagens de cada uma das opções. Apesar de os materiais reforçados apresentarem melhores propriedades mecânicas, seria interessante ver de que modo a possível maior facilidade de produção e montagem dos quadros em materiais poliméricos não reforçados compensaria essa superioridade. Uma vez que dou bastante valor às preocupações ambientais, gostaria também de sugerir a elaboração do estudo da viabilidade da utilização de um polímero reciclado, PET por exemplo, reforçado com fibras de vidro. Finalmente, sugeria também a simulação numérica de ensaios normalizados, que se costumam fazer aos quadros das bicicletas para testar a sua aptidão à comercialização, para os materiais aqui estudados.

Conclusões:

Na elaboração deste estudo pode-se observar a elevada importância da análise do peso, da rigidez, e da resistência à encurvadura e à flexão no estudo da seleção de materiais para quadros de bicicleta, bem como a pertinência da inclusão dos índices de mérito na comparação de propriedades de interesse dos materiais.

Em termos de estudo comparativo e de seleção de materiais o CES Edupack revelou-se uma ferramenta bastante útil no processo de seleção de materiais não devendo os seus utilizadores, contudo, se restringir a ela. Pude verificar, por exemplo, que no campo das madeiras existem muitos tratamentos que lhes são necessários aplicar e processos que lhes alteram significativamente as propriedades e que não estão incluídos ou apenas mencionados de passagem neste software.

Relativamente aos materiais analisados, os compósitos de polímeros reforçados com fibras são viáveis como matéria-prima de quadros de bicicleta em termos de propriedades mecânicas. No entanto, uma grande fatia do elevado custo final das bicicletas de polímeros reforçados com fibras é devido ao custo de mão-de-obra necessário para produzi-las. Como este custo é muito semelhante entre todos os polímeros reforçados com fibra, os quadros em FC que possuem características largamente superiores, ganham nesta fase, uma vantagem, que um rápido estudo do mercado diria suficiente, para inviabilizar o uso de FV. Ainda assim, como o estudo ficou incompleto devido à necessidade da opção pelo estudo das madeiras, é uma discussão que permanece em aberto, e sugerida para ser estudada em mais detalhe.

No que respeita às bicicletas em madeira, pode-se constatar que existe viabilidade mas com algumas limitações. Um exemplo dessas limitações é o facto de estarem atualmente restringidas à produção em pequena escala e de possuírem propriedades mecânicas e custo de mão-de-obra que não conseguem competir com as soluções metálicas e de compósitos comumente empregues. Em termos estéticos talvez não seja assim, mas penso que mesmo que as bicicletas de madeira conseguissem competir ao nível económico e mecânico, a utilização da madeira para produção em grande escala traria mais problemas do que vantagens pois fomentaria a deflorestação de zonas na busca de madeiras folhosas, densas, de crescimento lento, que apresentam melhores propriedades mecânicas e a consequente reflorestação com árvores resinosas de rápido crescimento que desgastam rapidamente o solo. Deste modo, penso que bicicletas neste material serão mais apropriadas como obras de arte do que meios de transporte para uso generalizado.

Não obstante, mostrei que várias madeiras possibilitam a construção de bicicletas com boas propriedades de interesse para o ciclista comum, e em certos casos, para o ciclista de competição de nível iniciante. O tema da madeira é um tema muito complexo sobre o qual existe muito conhecimento estabelecido, mas onde também verifiquei que existem áreas interessantes por explorar, como é o caso dos tratamentos térmicos para melhoria das propriedades mecânicas da madeira, onde existe uma grande variabilidade conforme a espécie da madeira. Apenas raspei a superfície do tema, mas mostrei, tal como me propus inicialmente, que existem fortes possibilidades no fabrico de bicicletas em várias madeiras, entre as quais espécies comuns em Portugal.

7. Referências

- [1] S.S. Wilson (March 1973). "Bicycle Technology". Scientific American.
- [2] Wilson, David Gordon; Jim Papadopoulos (2004). *Bicycling Science* (Third ed.). The MIT Press. ISBN 0-262-73154-1.
- [3] J. H. O'Keefe, C. J. Lavie. Run for your life .. at a comfortable speed and not too far. *Heart*, 2012; DOI: 10.1136/heartjnl-2012-302886
- [4] CES Edupack v.2014.
- [5] A. A. Fernandes, Apontamentos da disciplina Processos de Fabrico II. Soldagem e Brasagem, Soldadura MIG/MAG.
- [6] Design Boom. "Dror Peleg – Plastic Bike." Disponível em <http://www.designboom.com/design/dror-peleg-frii-plastic-bike/> Acedido a 19 de Dezembro de 2014.
- [7] TWWHLSPLS. "Itera plastic bike." Disponível em <http://twwhlspls.com/itera/> . Acedido a 19 de Dezembro de 2014.
- [8] BBC News. "Bristol engineers invent super strong nylon bicycle". Disponível em <http://www.bbc.co.uk/news/uk-12664422> . Acedido a 19 de Dezembro de 2014.
- [9] Jimmy Kuehnle. "Invisible Bicycle Performance Ride." Disponível em http://www.jimmykuehnle.com/performance/invisible_bike/invisible_bike.php . Acedido a 19 de Dezembro de 2014.
- [10] Bike Commuters. "Matt Clark Design IV." Disponível em <http://www.bikecommuters.com/2008/07/17/exclusive-matt-clark-design-iv-1-prototype> . Acedido a 19 de Dezembro de 2014.
- [11] Velocite Bikes. "Carbon Fiber Composites Technology in the Bicycle Industry." Disponível em <http://www.velocite-bikes.com/carbon-fiber.html.html#> . Acedido a 20 de Dezembro de 2014.
- [12] U.S. Department of Agriculture. (2013) "The Encyclopedia of Wood." ISBN 9781626366718
- [13] Jan Gunneweg. Disponível em <http://www.jangunneweg.nl>. Acedido a 20 de Dezembro de 2014.
- [14] Bamboo Bicycle Club. "Build a Bamboo Bicycle". Disponível em <http://bamboobicycleclub.org/>. Acedido a 20 de Dezembro de 2014.
- [15] Bamboo Bike Maker. "Bikes". Disponível em <http://www.bamboobikemaker.com/bikes.html>. Acedido a 20 de Dezembro de 2014.
- [16] Bamboosero. "City Bikes." Disponível em <http://www.bamboosero.com/bikes/city-bikes/> . Acedido a 20 de Dezembro de 2014.
- [17] Calfee Design. Calfee Bamboo Bicycle Frames. Disponível em <http://calfeedesign.com/products/bamboo/>. Acedido a 20 de Dezembro de 2014.
- [18] Calfee Design. "18.5k Miles on Calfee Bamboo". Disponível em <http://calfeedesign.com/18-5k-miles-calfee-bamboo/>. Acedido a 21 de Dezembro de 2014.

7. Referências

- [19] Globo. “Japônês cria bicicleta de madeira pela bagatela de R\$ 50 mil”. Disponível em <http://g1.globo.com/planeta-bizarro/noticia/2014/10/japones-cria-bicicleta-de-madeira-pela-bagatela-r-50-mil.html>. Acedido a 21 de Dezembro de 2014.
- [20] Jornal de Notícias. “Governo deve proibir financiamento ao pinheiro”. Disponível em http://www.jn.pt/PaginalInicial/Interior.aspx?content_id=487378&page=-1. Acedido em 22 de Dezembro de 2014.
- [21] Montana Química. “Guia da Madeira”. Disponível em <http://www.montana.com.br/Guia-da-Madeira/Guia-da-Madeira>. Acedido a 27 de Dezembro de 2014.
- [22] Disponível em http://sanomagic.world.coocan.jp/Lineup/english_sanomagicbikelineup.htm. Acedido a 28 de Dezembro de 2014.
- [23] Disponível em <https://insidetheseboxes.wordpress.com/2014/07/24/need-an-idea-grab-this-one-4-wooden-bike-saddle/> Acedido a 10 de Janeiro de 2014.
- [24] United States Department of Agriculture. “Alternatives to Chromated Copper Arsenate for Residential Construction.” Disponível em [“http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrp/fpl_rp618.pdf](http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrp/fpl_rp618.pdf). Acedido a 10 de Janeiro de 2014.
- [25] Bruno M. Esteves, Helena M. Pereira. (2009). “Wood Modification by Heat Treatment: A Review”. BioResources. pp. 370-404. Disponível em http://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_04/BioRes_04_1_0370_Esteves_P_Wood_Mod_Heat_Treatment_Rev_367.pdf. Acedido a 10 de Janeiro de 2014.
- [26] Technology Profile (2009). “Using Adhesives on Wood – Best Practices”
- [27] U.S. Department of Agriculture. (1975) “Adhesive Bonding of Wood.” Technical Bulletin No. 1512 Disponível online em <http://www.woodcenter.org/docs/tb1512.pdf>. Acedido a 10 de Janeiro de 2014.
- [28] OficinaDeCasa. “Conheça Algumas Ferramentas que Não Podem Faltar em sua Oficina”. Disponível em <http://oficinadecasa.com.br/usuario/ferramentas-manuais/conheca-algumas-ferramentas-que-nao-podem-faltar-em-sua-oficina/#prettyPhoto>. Acedido a 10 de janeiro de 2014.
- [29] Workshop Companion. “Using a Hand Plane.” Disponível em http://workshopcompanion.com/KnowHow/Techniques/Jointing_Planing/4_Using_Hand_Plane/4_Using_Hand_Plane.htm. Acedido a 10 de Janeiro de 2014.
- [30] TheFinishingStore. “Preparing Wood for a Finish” Disponível em <http://news.thefinishingstore.com/?p=542>. Acedido a 10 de Janeiro de 2014.
- [31] U.S. Department of Agriculture. (2010) “Wood Handbook: Wood as an Engineering Material.” cap. 10 pp. 1-24. Cap. 10 disponível em http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr190/chapter_10.pdf Acedido a 10 de Janeiro de 2015.
- [32] Jim Rodgers. (2008) “Keeping it Together” American Woodturner Magazine. Disponível em <http://jlridders.com/pdf/revised-glue-grain.pdf>. Acedido a 10 de Janeiro de 2015
- [33] Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. (2002) “Cadernos de Engenharia de Estruturas: Estruturas de Madeira”. pp. 83, 94, 100. Disponível em <http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/pdf/cee18.pdf>. Acedido a 13 de Janeiro de 2015
- [34] Zheng Chin. (2014) “Craftsman Chin: Building a Wooden Bicycle – Timelapse” Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=XHbQJ0eTBXI>. Acedido a 13 de Janeiro de 2015.
- [35] Craftsman Chin. Disponível em <http://craftsmanchin.com/>. Acedido a 13 de Janeiro de 2015.





CASO-ESTUDO

SELECÇÃO DE MATERIAIS

A firma M&A – BICICLETAS Ld^a, deseja começar a fabricar bicicletas. Este mercado é completamente novo para a firma de modo que a primeira e importante tarefa a realizar é fazer um estudo comparativo dos modelos com mais êxito existentes no mercado.

As primeiras discussões sobre este estudo levaram à conclusão que o estudo comparativo incidirá primordialmente sobre a parte estruturalmente mais importante da bicicleta – O QUADRO - .

Você é o responsável pelo projecto da nova bicicleta MA2000 pelo que:

- A) Terá de analisar e interpretar os resultados deste estudo.
- B) Sugerir alternativas (dimensões e materiais) para a nova bicicleta.

A – ESTUDO DE MERCADO

1 – ESTRUTURA

Essencialmente O QUADRO é uma estrutura triangulada de tubos de suporte, entre dois apoios, do peso do ciclista (Fig. 1).

Neste conjunto triangulado, os seus elementos estão sujeitos essencialmente à tracção ou compressão formando uma estrutura extremamente “RESISTENTE” e “RIGIDA” no seu próprio plano. Contudo o gancho da frente actua como uma viga encastrada no quadro, aplicando um momento aos tubos que o suportam. Para além da situação descrita, com solicitações planas, existe a situação de forças existentes fora do plano da estrutura (Fig. 2) em que a resistência á deformação se faz por FLEXÃO E TORÇÃO dos respectivos elementos.

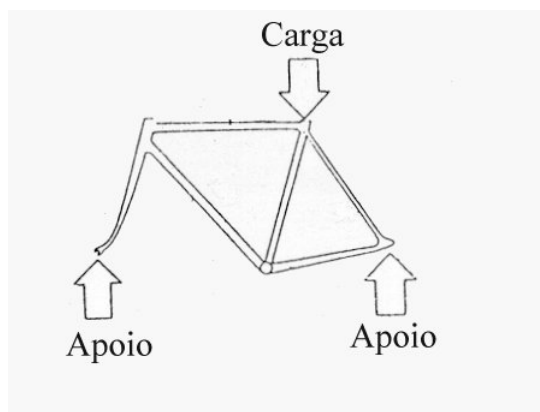


Fig. 1

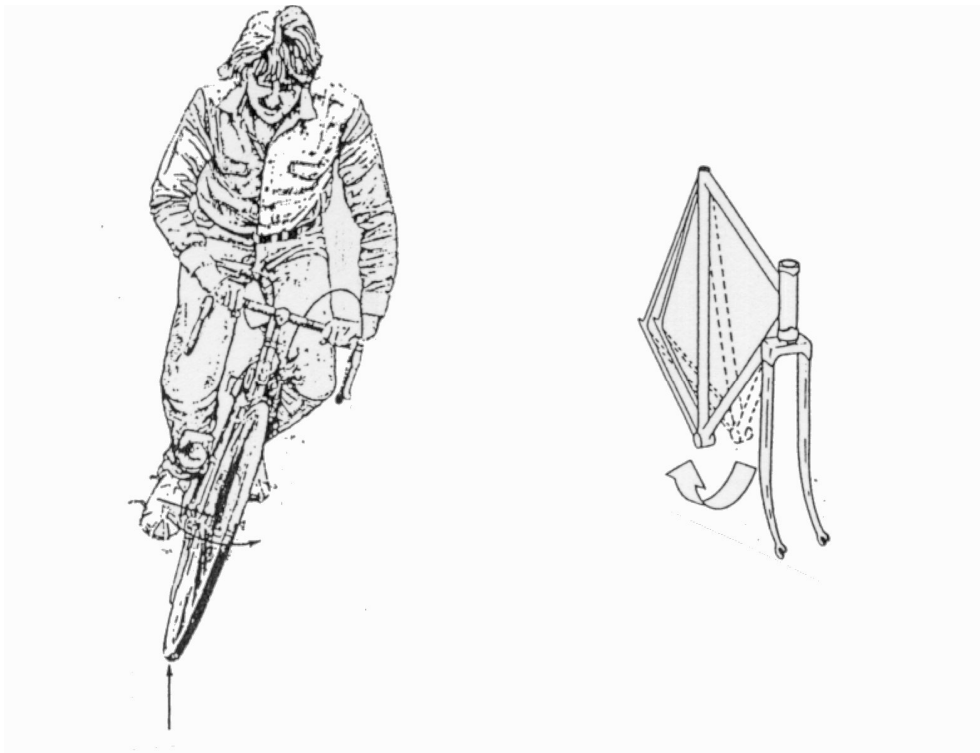


Fig. 2

2 – MATERIAIS

Analisaram-se cinco das mais importantes bicicletas do mercado que são feitas em três materiais: aço, titânio e alumínio (TAB. I). Duas delas, em aço, são feitas pela firma Duarte & C^a e designadas por FD e FDGT. Existem dois modelos em Alumínio um feito pela firma Faria & Amaral Ld^a e designada por BIK e outra, ALTL, manufacturada pela firma Teixeira & C^a. Esta última é a única com um diâmetro de tubo nada ortodoxo; é cerca de 50% mais largo do que o da concorrência. Existe só um modelo feito em titânio, o TREPA TI feito em Vila Real pela firma Cunha V. Ld^a.

Todos os fabricantes acreditam nos méritos da sua solução de combinação material/geometria. Existe um modelo, o mais antigo do mercado, a bicicleta FD que pode ser considerado como o modelo clássico a partir do qual os outros “*evoluíram*”.

As dimensões relevantes dos tubos de que são feitos os diferentes quadros estão indicados na Tabela I. Nesta tabela de projecto indicam-se vários cabeçalhos (A...E...Ert²) que se julgam ser importantes nos critérios de comparação (propriedades de peso I) dos vários materiais.

A fig. 3 é elucidativa quanto ao modo como se dá frequentemente a fractura em quadros de bicicletas.

São deixado contudo várias colunas em branco caso deseje acrescenta outras propriedades ou utilizar outro(s) critério(s).

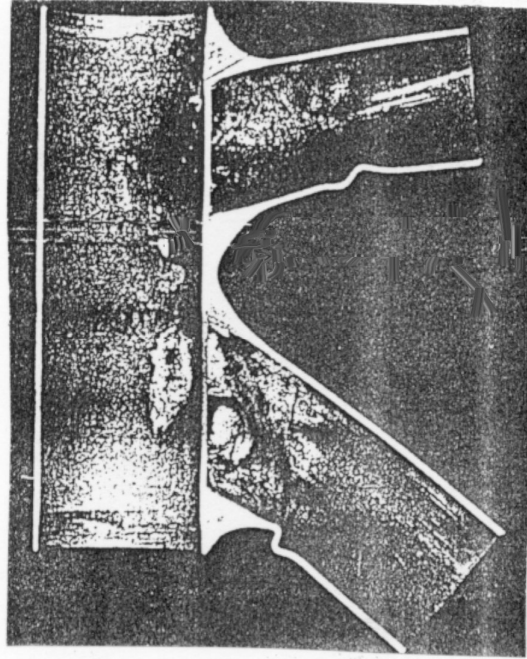


Fig. 3

Em primeiro lugar pretende-se que elabore comentários para as soluções já existentes no mercado com base em índices relevantes da Tab. I e que devem ser referidos para cada caso.

Q a) Como compara os quadros quanto ao seu peso?

Ex: de índice relevante - ρA

Q b) Compare as duas soluções em aço quanto:

(i) Resistência mecânica à flexão

(ii) Rigidez à flexão

(iii) Resistência à encurvadura $M \propto Ert^2$

Q c) (i) Faça idêntica análise para o quadro da bicicleta TREPA TI.

Se não se enganou a resistência mecânica e a rigidez à flexão são as mais pequenas de todas. Contudo a resistência à encurvadura está entre a dos dois quadros em aço. Suponha que a resistência à encurvadura dos tubos da bicicleta FDGT (menor de todas) é um valor aceitável.

Q (ii) Redesenhar a secção do tubo TREPA TI não alterando o peso mas permitindo que a resistência à encurvadura baixe até valores idênticos ao da bicicleta FDGT. Vê inconvenientes em adoptar-se esta solução? Justifique

Q (iii) Outro modo de melhorar os índices indicados atrás consiste em utilizar uma liga de titânio mais resistente. Investigue essa hipótese. Quais as vantagens e inconvenientes.

Q d) (i) Faça a mesma análise que fez em b) mas para os tubos da BIK e da ALTL

Q (ii) Redesenhe um quadro em Alumínio com um peso de 0.25 Kgm^{-1} com uma resistência à encurvadura igual à do modelo FD.

Q e) A tabela II indica alguns “Índices de Mérito” para um dado peso de material. Complete essa tabela sabendo que:

RIGIDEZ (tubo)	$\propto E r^3 t$	
PESO	$\propto \rho r t$	
Momento Crítico	$\propto \sigma_E r^2 t$	(à flexão)
Momento Crítico	$\propto E r t^2$	(à encurvadura)

Q Com esses índices construir Tab. III
Que conclusões tira da sua análise?

Q f) Indique nesta altura algumas propriedades de Peso II que tomaria em consideração numa fase mais avançada do exercício.

3 – MÉTODOS DE FABRICO

As restrições ao projecto vem não só como se viu da amplitude e tipo de solicitações exteriores (viu-se a importância neste caso, da resistência mecânica à flexão) mas também dos métodos de fabrico, neste caso dos métodos de união dos tubos.

Também no aspecto de fabrico dos quadros é importante conhecer o que se passa na concorrência. Como sabe esta análise é muito menos quantificável do que a feita para os materiais, no sentido de que não é possível arranjar critérios de escolha materializáveis em índices de mérito ou simples equações.

Contudo ela é importante porque:

- 1) há necessidade de garantir a estabilidade estrutural e
- 2) controlar o peso final da bicicleta.

Se o ponto 1 é comum a outras situações o ponto 2 é particularmente importante nesta análise. Tome-se como exemplo as duas bicicletas em Alumínio, modelos BIK e ALTL. Nos cálculos anteriores deve ter chegado à conclusão que o quadro BIK pesa cerca de $\frac{3}{4}$ do quadro da ALTL. Contudo esse cálculo tem em contra unicamente os materiais. Uma verificação dos pesos dos quadros depois de unidos os tubos mostra pesos sensivelmente iguais. A razão para isto está no facto de que enquanto na BIK os processos de união envolvem parafusos e adesivos, na ALTL os tubos são soldados.

Igualmente se comparar o peso dos materiais das bicicletas FDGT e TREPA TI (ver Tab. I) pode chegar à conclusão que o peso dos quadros são iguais. Não é assim porque enquanto o quadro da TREPA TI é totalmente soldado as bicicletas em aço usam a brasagem dos tubos em encaixes mostrados na Fig. 4. Daí resultam quadros TREPA TI mais leves.



Fig. 4

A facilidade com que é feita a brasagem do aço, quer em linhas de grande produção quer em pequenas oficinas justifica muito da supremacia em termos de percentagem de mercado dos quadros em aço.

Para completar o estudo de mercado resta acrescentar os materiais base e de adição e analisar como os materiais base reagem ao processo de união.

1 – Bicicletas em Aço

	C	Mn	Mo
Duarte & C ^a	0.3	1.3	0.15
FD	Estirado sem Costura		259 Hv
FDGT	Temperado e Revenido		446 Hv

Experiências de brasagem com o eutético Cu-Zn e com o eutético Ag-Cu resultaram em durezas (Hv) no aço a seguir quantificadas.

Modelo	Estado Fornecido	Ag-Cu	Cu-Zn	Cu-Zn com sobreaquecimento
FD	259	248	272	280
FDGT	446	311	277	302

Q Em face desta tabela pode justificar a facilidade de brasagem acima indicada e os materiais de adição usados em cada modelo?

2 – Bicicletas em titânio

Para o quadro da bicicleta TREPA TI é utilizado um dos titânios conhecidos por “comercialmente puros”, o IMI 125. Contudo pequenas alterações das percentagens de Oxigénio e Azoto tem grande influência nas propriedades mecânicas.

	IMI 110	IMI 125	IMI 155
% O	0.05	0.13	0.28
% N	0.005	0.008	0.01
σ_E (MPa)	130	290	460
A (%)	30	22	15

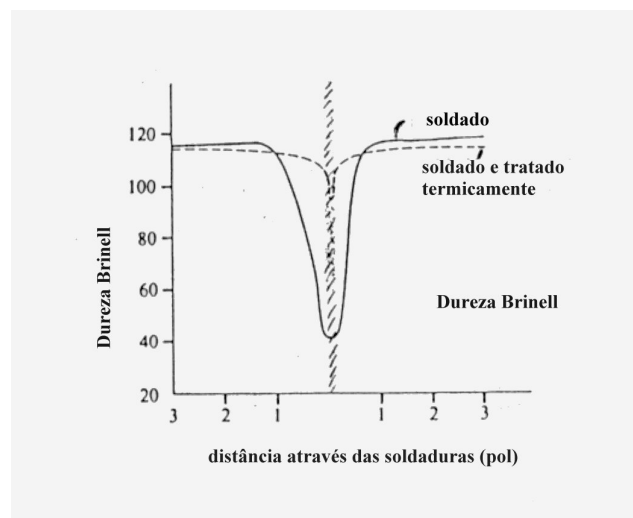


Fig. 5

3 – Bicicletas em Alumínio

Ambas as firmas que constróem quadros em Alumínio usam o Al 6061 (.6 Si, .27 Cu, 1 Mg, .2 Cr) no estado envelhecido. A soldadura nas ALTL é feita com MIG, protecção de Árgon. Depois da soldadura e devido ao Alumínio ser bom condutor de calor há perda de dureza (ver fig. 5). Há necessidade de tratar termicamente o quadro. Eis uma das razões pela qual o modelo ALTL é 50% mais caro que o modelo BIK.

Q Que tratamento antecipa, após soldadura para aqueles Quadros?

B – A BICICLETA MA 2000

A análise do que está disponível no mercado está feita. Como se viu, as restrições ao projecto de um quadro de bicicleta são várias, desde os materiais aos métodos de fabrico e ainda com problemas ligados à comercialização do produto final, que não foram tratados. Relativamente a este último aspecto há que chamar a atenção para o chamado “*conservadorismo*” do mercado estudado que justifica por exemplo a necessidade de um esforço muito maior de publicidade das bicicletas ALTL (material novo, tubos mais largos, bicicleta mais cara etc.) do que nas restantes.

Pretende-se uma bicicleta MV para toda a gente. Competirá mais com uma FD ou BIK do que com uma FDGT, esta mais virada para a competição.

Finalmente resta acrescentar que mais do que chegar a uma solução única, pretende-se o estudo comparativo com o que existe no mercado e que se veria com muito agrado o surgimento da primeira bicicleta portuguesa de material polimérico.

VA/ATM
2000

TABELA I

Fab. e Materiais	Geometria				Propriedades			Prop. Secção Tubular				Outras	
	r	t	A	I	ρ	σ_E	E	ρ_A	EI	Ert^{2**}	σ_{Er}^{2**}	E/ ρ	σ_E/ρ
	mm	mm	mm ²	mm ⁴	Kgm ⁻³	MNm ⁻²	GNm ⁻²	Kgm ⁻¹	Nm ⁻²	Nm	Nm	MNKg ⁻¹ m ⁻¹	KNKg ⁻¹ m ⁻¹
FD Duarte & C ^a Aço	12.72	0.56			7870	695	210						
FDGT Duarte & C ^a Aço	12.81	0.38			7870	927	210						
BIK Faria & Amaral Al	12.39	1.22			2800	350	70						
TREPATI Cunha V. Ld ^a Ti	12.34	0.71			4500	300	105						
ALTL Teixeira & C ^a . Ld ^a Al	18.44	1.22			2800	350	70						
MV 2000 M & A													

$$I = \pi r^3 t$$

* $r \gg t$,

** atenção, válidas só para tubos

r – raio do tubo

t – espessura do tubo

TABELA II

<u>Índices de Mérito de Materiais</u>		
	<u>r Fixo</u>	<u>t Fixo</u>
RIGIDEZ	$A' = E/\rho$	$B' =$
MOMENTO À FLEXÃO	$C' =$	$D' = \sigma_E/\rho^2$
MOMENTO À ENCURVADURA	$E' = E/\rho^2$	$A' = E/\rho$

TABELA III

*	AÇO (FD)	AÇO (FDGT)	Ti	Al	?
$E/\rho \times 10^3$					
$E/\rho^2 \times 10^7$					
$B' \times 10^{11}$					
$C' \times 10^3$					
$\sigma_E/\rho^2 \times 10^6$					

* Nota importante – Formulário desenvolvido para tubos $r \gg t$