

Departamento de Engenharia Mecânica

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

SIMULAÇÃO DE PROCESSOS TECNOLÓGICOS

Análise Estrutural do Quadro de uma Bicicleta

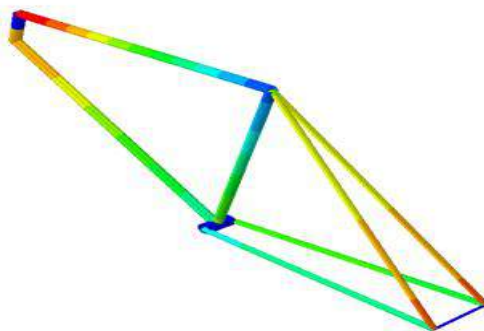
Grupo 2

Ana Dulce de Meneses Machado Silva

André Duarte Barros Lopes Ferreira

Mariana Inês Moura Costa

Sofia Alexandra Chaves Abreu



Docente: Abel Dias dos Santos

Abril 2014





Abstract

A generic road bicycle frame subject to boundary conditions and a vertical force to simulate real normalized tests which are conducted before they can put in the market, was analyzed by the finite element method. A basic study of the influence of the materials on the frame weight, mechanical resistance and cost was conducted. Moreover, the method itself was studied regarding the number and type of the mesh elements, as well as the refining of the mesh in critical places.

Resumo

Um quadro genérico de uma bicicleta de estrada sujeita a determinadas condições fronteira e a uma força vertical para simular testes reais normalizados que são efetuados aos quadros, foi analisado pelo método dos elementos finitos. Procedeu-se a um estudo básico da influência dos materiais do quadro no seu peso, resistência mecânica e custo. Analisou-se ainda características do método em si, como a influência do número e tipo de elementos, bem como o refinamento de certos locais da malha.



Índice de Figuras

Figura 1 Detalhe de uma imagem obtida através do Método dos Elementos Finitos, mostrando o pico de tensões perto do tubo frontal quando a forquilha é sujeita a um carregamento vertical. ^[1]	8
Figura 2 Quadro genérico de uma bicicleta com os comprimentos a utilizar.....	9
Figura 3: Condições de fronteira que vão ser utilizadas.	10
Figura 4: Diagrama de Gantt.	11
Figura 5 Comparação qualitativa de algumas propriedades entre o titânio, o aço, o alumínio e a fibra de carbono. ^[4]	12
Figura 6 Técnica de <i>Butting</i> . ^[3]	13
Figura 7 Bicicleta Trek 770 ^[5]	13
Figura 8 Quadro de bicicleta Trek 2000. ^[7]	15
Figura 9 Bicicleta Ghisallo. ^[12]	17
Figura 10 Curvas SN para os aços 18Cr 9Ni e aço estrutural, e ligas de alumínio.....	20
Figura 11 Quadro de bicicleta em Fibra de Carbono.....	22
Figura 12 Distribuição de tensões e deslocamentos verticais, assim como a localização dos respetivos valores máximos e mínimos para os quadros de aço e de fibra de carbono escolhidos.....	32
Figura 13 Distribuição de tensões e deslocamentos verticais, assim como a localização dos respetivos valores máximos e mínimos para os quadros de titânio e de alumínio escolhidos..	33
Figura 14 Valores obtidos da tensão de <i>Von Mises</i> máxima para diferentes dimensões da malha usando os elementos B31 e B33.	34
Figura 15 Representação da discretização da malha com 979 nós com visualização dos tubos críticos a rosa com distribuição não uniforme dos nós enquanto os tubos a preto apresentam distribuição uniforme.....	35
Figura 16 Valores obtidos da tensão de <i>Von Mises</i> máxima para diferentes dimensões da malha usando os elementos B31 e B33 e, refinando os tubos críticos.....	35
Figura 17 Representação da discretização da malha com tamanho global dos nós diferente nos tubos e, distribuição não uniforme dos nós nos tubos críticos. Malha com 141 nós (a) e malha com 979 nós (b).....	36
Figura 18 Valores obtidos da tensão de <i>Von Mises</i> máxima para diferentes dimensões da malha usando os elementos B31 e, refinando os tubos críticos.	37
Figura 19 Valores obtidos do deslocamento vertical máximo para diferentes dimensões da malha usando os elementos B31 e B33 e, refinando os tubos críticos.....	37
Figura 20 Variação do tempo de processamento com o número de nós.	38



Índice de Tabelas

Tabela 1	Legenda da figura 2, com as designações das várias partes constituintes do quadro de bicicleta.	9
Tabela 2	Composição química e propriedades mecânicas da liga <i>Reynolds 531</i> . ^[2,6]	14
Tabela 3	Composição química e propriedades mecânicas da liga de alumínio <i>TrueTemper T2 (7075-T6)</i> . ^[8]	15
Tabela 4	Propriedades Mecânicas da Fibra de Carbono (<i>Carbon Fiber STD UD</i>). ^[9]	16
Tabela 5	Composição química e propriedades mecânicas da liga de titânio <i>Ti-3Al-2.5V</i> . ^[10,11]	17
Tabela 6	Materiais considerados para o quadro da bicicleta e suas propriedades mecânicas.	18
Tabela 7	Dimensões dos tubos utilizados nas simulações preliminares de obtenção do valor máximo admissível do deslocamento vertical do assento.....	28
Tabela 8	Simulações realizadas e número de nós da malha correspondente.	29
Tabela 9	Dimensões do quadro comum da bicicleta.	30
Tabela 10	Resultados obtidos dos materiais estudados por ordem decrescente de módulo de elasticidade.	30
Tabela 11	Dimensionamento do quadro para os critérios $\sigma \leq \sigma_e$ e $\delta y \approx \leq 0,32mm$	31
Tabela 12	Caraterísticas dos quadros selecionados.....	34



Índice

Lista de Símbolos.....	7
1 Introdução.....	8
1.0 Enquadramento.....	8
1.1 Descrição do Problema	9
1.2 Objetivos do Trabalho	10
1.3 Metodologia	10
2 Revisão Bibliográfica	12
2.1 Materiais	12
2.2.1 Aço.....	12
2.2.2 Alumínio	14
2.2.3 Fibra de Carbono <i>Standard Grade Unidirectional (STD UD)</i>	16
2.2.4 Titânio.....	17
Resumo.....	18
2.3 Critérios de Dimensionamento	19
2.3.0 Introdução	19
2.3.1 Tensões Máximas Admissíveis	19
2.3.2 Deslocamento Vertical Máximo	22
3 Procedimentos	27
4 Resultados	30
4.1 Efeito do Material num Quadro Comum	30
4.2 Dimensionamento de Quadros para Cada Material	31
4.3 Resultados para Análise de Sensibilidades.....	34
5 Análise dos Resultados.....	39
5.1 Estudo do Efeito do Material num Quadro Comum	39
5.2 Análise do Dimensionamento de Quadros para Cada Material.....	40
5.3 Análise de Sensibilidades	43
6 Conclusões.....	45
7 Bibliografia	47
Anexo A	49



Lista de Símbolos

E: Módulo de Elasticidade

ρ : Densidade

σ_e : Tensão de limite elástico

σ_r : Tensão de rotura

$\sigma_{p0.2}$: Tensão limite de proporcionalidade a 0.2%

σ_{f0} : Tensão limite convencional de fadiga

ν : Coeficiente de Poisson



1 Introdução

1.0 Enquadramento

Em muitos problemas de engenharia é frequente recorrer-se ao uso da sua análise pelo Método dos Elementos Finitos para reduzir custos e acelerar o processo de projeto de produtos e componentes. Com o intuito de melhor conhecer esta poderosa ferramenta, foi-nos proposto um problema para analisar com esse método utilizando o *software Abaqus*®.

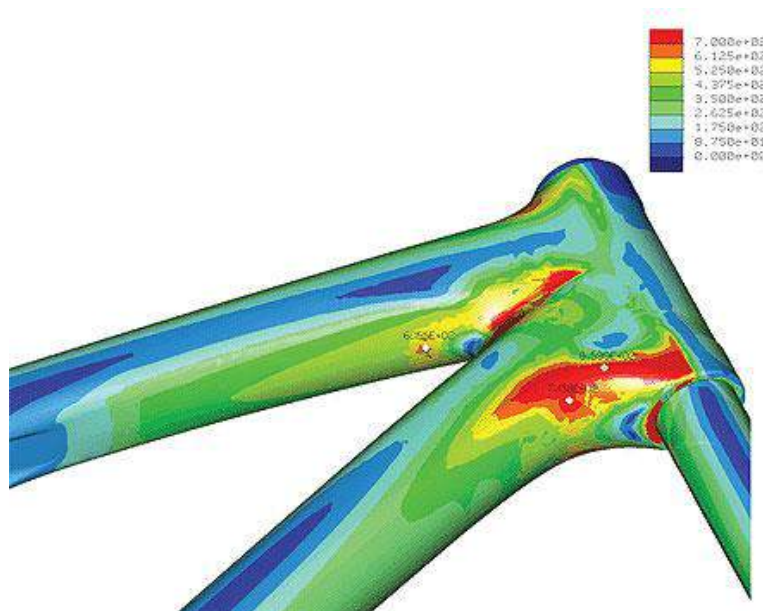


Figura 1 Detalhe de uma imagem obtida através do Método dos Elementos Finitos, mostrando o pico de tensões perto do tubo frontal quando a forquilha é sujeita a um carregamento vertical.^[1]

Imagem da análise dos elementos finitos mostra as áreas onde nos ensaios laboratoriais se verificou a fratura do componente. Neste caso, a mostrar o pico de tensões próximo do tubo frontal quando a forquilha é sujeita a um carregamento vertical.^[1]



1.1 Descrição do Problema

Foi proposto estudar um quadro genérico de uma bicicleta com comprimentos pré-definidos, e apresentados na Figura 2.

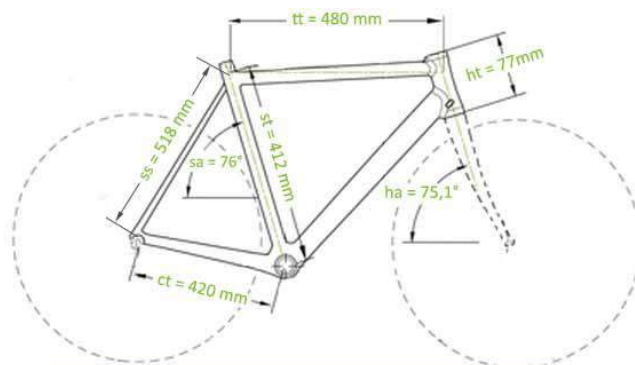


Figura 2 Quadro genérico de uma bicicleta com os comprimentos a utilizar.

Tabela 1 Legenda da figura 2, com as designações das várias partes constituintes do quadro de bicicleta.

Sigla	Nome em inglês	Nome em português
tt	<i>Top Tube</i>	Tubo superior
ht	<i>Head Tube</i>	Tubo frontal
ha	<i>Head Angle</i>	Ângulo frontal
ct	<i>Chain Stays</i>	-
ss	<i>Seat Stays</i>	-
st	<i>Seat Tube</i>	Tubo do selim
sa	<i>Seat Angle</i>	Ângulo do selim

Não representados estão ainda, perpendicularmente à figura, o eixo traseiro com 100mm de comprimento e o tubo do eixo dos pedais com 50mm de comprimento.

Este quadro será sujeito a uma força vertical correspondente a 120kg, peso de um ciclista, multiplicada por um fator de 4G, ($g = 9.806 \text{ m/s}^2$) para simular condições adversas de estrada, aplicada no local do selim, bem como às condições-fronteira representadas na Figura 3.

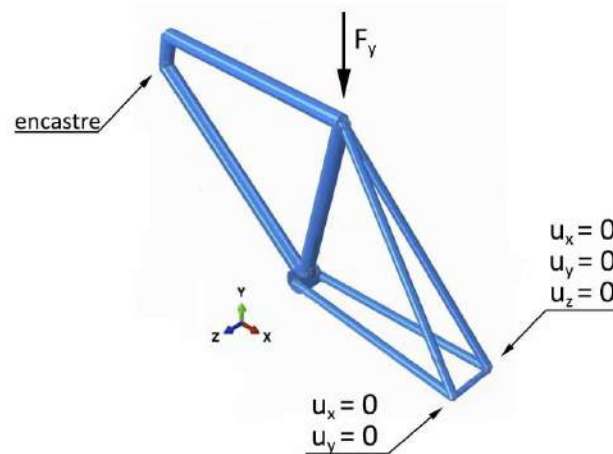


Figura 3: Condições de fronteira que vão ser utilizadas.

Os materiais para os quais se vai efetuar a análise são o Aço *Reynolds 531*, Alumínio *True Temper T2 (7075-T6)*, Fibra de Carbono e a Liga de Titânio *Ti-3Al-2.5V*.

1.2 Objetivos do Trabalho

Este trabalho tem como objetivos principais:

1. Definir os critérios a usar para a determinação das tensões e deslocamentos verticais máximos;
2. Estudar a influência do número e tipo de elementos da malha, bem como a influência do refinamento de locais críticos da malha;
3. Obter tabela/infográfico comparativo das características de cada quadro (peso, custo, resultados).

1.3 Metodologia

Depois de definidos os objetivos do trabalho, procurou-se definir também a sua metodologia, de forma a explicitar as etapas a seguir durante a realização do mesmo.



1. Procurar em bibliografia ou através de contactos ligados à área de projeto de quadros de bicicletas os valores aceitáveis das dimensões dos componentes do quadro (diâmetros e espessuras), fornecendo informação respeitante ao teste em causa;
2. Mantendo todas as restantes variáveis constantes, alterar ou o número de elementos, ou o tipo ou o refinamento localizado e comparar os resultados relativamente à veracidade dos resultados;
3. Para cada material iterar a análise em *Abaqus*® utilizando tubos comercialmente disponíveis até se encontrar uma combinação que garante a satisfação dos critérios de tensões e deslocamentos verticais máximas e o menor peso do quadro possível.

Com o intuito de melhor programar o plano de atividades, com vista a uma mais eficiente realização do trabalho, foi elaborado um diagrama de *Gantt* (Figura 4) com o planeamento e atribuição das atividades aos diferentes elementos do grupo.

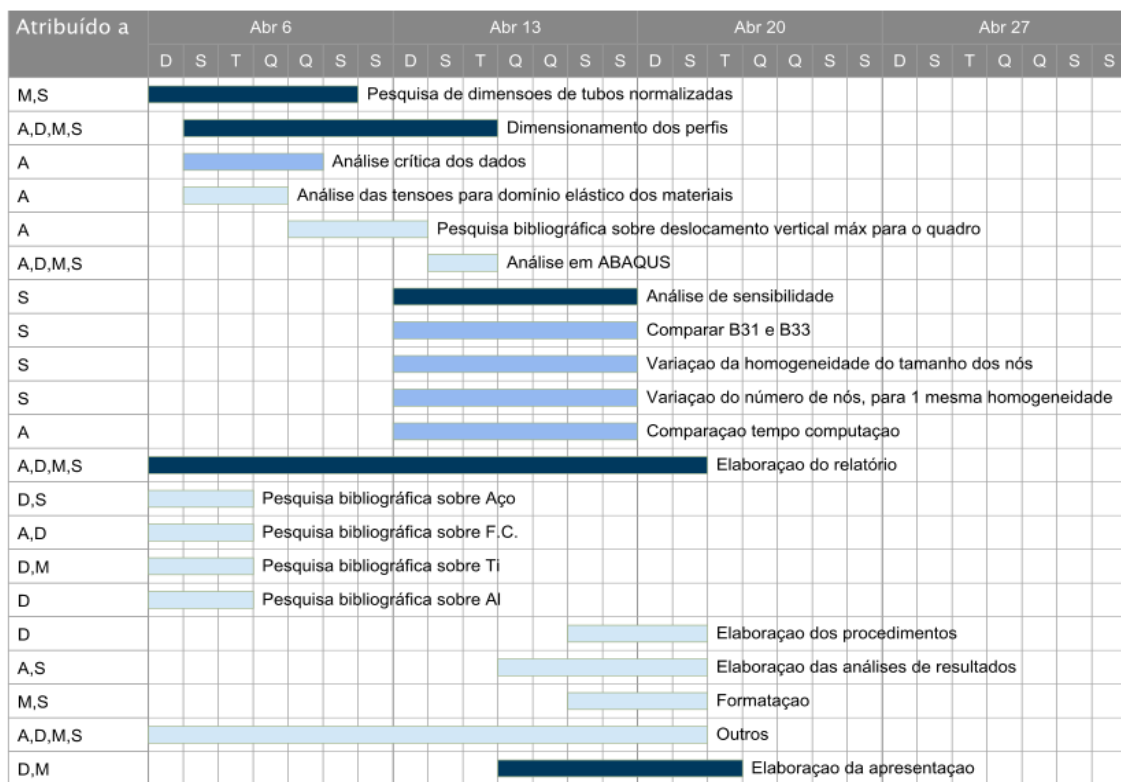


Figura 4: Diagrama de Gantt.

- A: André Ferreira
- D: Ana Dulce
- M: Mariana Costa
- S: Sofia Abreu



2 Revisão Bibliográfica

2.1 Materiais

Um dos objetivos deste trabalho prende-se com a análise do efeito do material constituinte do quadro na distribuição de tensões e deformadas obtidas. Deste modo, realizar-se-á uma pesquisa bibliográfica sobre os materiais em estudo, nomeadamente o aço (liga *Reynolds531*), a fibra de carbono (liga *Carbon Fiber STD UD*), o alumínio (liga *TrueTemper T2 (7075-T6)*) e o titânio (liga *Ti-3Al-2.5V*).

Na figura seguinte (Figura 5), é possível comparar algumas características dos referidos materiais (embora não estejam todos representados, elucidam claramente as propriedades concedidas pelo aço, pela fibra de carbono, pelo alumínio e pelo titânio).

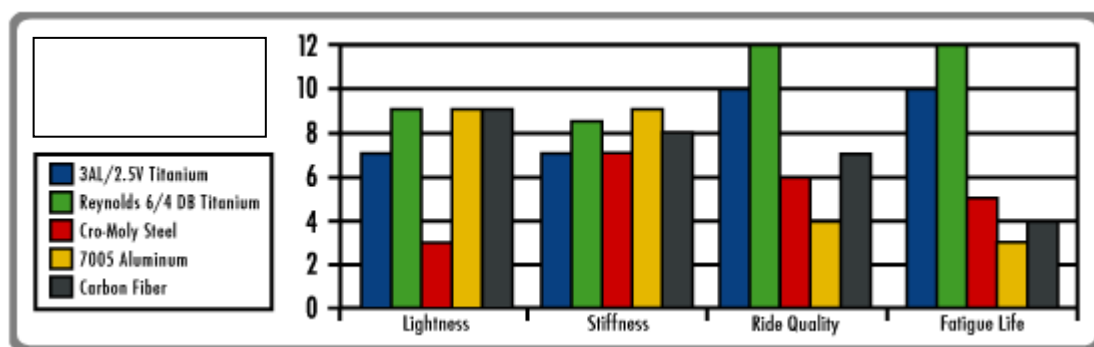


Figura 5 Comparação qualitativa de algumas propriedades entre o titânio, o aço, o alumínio e a fibra de carbono.^[4]

2.2.1 Aço

O aço é uma liga de ferro e carbono (0,008% a 2,11%) cujas propriedades podem ser alteradas com a adição de elementos de liga. Tradicionalmente, as primeiras bicicletas foram construídas em aço, e embora a evolução tecnológica este material continua a ser bastante popular na indústria do ciclismo, já que as bicicletas construídas em aço são as que proporcionam maior prazer e facilidade de condução. Este facto é suportado pela elevada densidade do aço, o que poderia indicar que estas bicicletas se tornariam demasiado pesadas. No entanto, isso não se verifica, porque os fabricantes utilizam uma técnica que consiste na utilização de 3 diâmetros distintos em cada tubo, cingindo-se as maiores espessuras às zonas



de maior exigência. Na Figura 6 pode verificar-se o princípio básico desta técnica, vulgarmente designada por *Butting*, que permite reduzir até 15% o peso da estrutura-

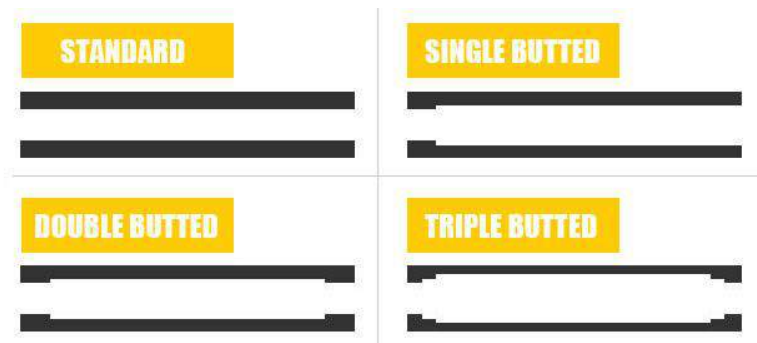


Figura 6 Técnica de *Butting*.^[3]

A utilização de elementos de liga na produção do aço permite a obtenção de quadros de bicicleta altamente resistentes, com excelentes propriedades mecânicas, nomeadamente no que concerne à resistência à fadiga e ao suporte de elevadas cargas torsionais sem danificar a estrutura (devido à elevada tensão de limite elástico do aço). Simultaneamente, o aço apresenta características apreciáveis de absorção de impacto, proporcionando um alto nível de conforto ao condutor, na medida em que este não sente de forma tão abrupta os ressaltos e as irregularidades do terreno. Por outro lado, ainda no que se insere no plano da satisfação do condutor, as bicicletas com quadro de aço normalmente imitem, na iminência de falha, alguns estalidos, prevenindo o ciclista para uma eventual reparação. Estas bicicletas revelam ainda uma elevada longevidade (podem atingir os 30 anos, em perfeitas condições).

No presente trabalho, o quadro usado foi o da *Trek 770* (Figura 7) que é produzido na liga *Reynolds 531*. A composição química e as principais propriedades mecânicas deste material encontram-se na Tabela 2.



Figura 7 Bicicleta Trek 770^[5]



Tabela 2 Composição química e propriedades mecânicas da liga *Reynolds 531*.^[2,6]

Elementos de liga do aço <i>Reynolds 531</i> [%]					
C	Si	Mn	Mo	P	S
0,23-0,29	0,15-0,35	1,25-1,45	0,15-0,25	0,045 máx.	0,045 máx.
Principais propriedades mecânicas					
ρ [kg/m ³]	E [GPa]	ν	σ_e [MPa]	σ_r [MPa]	ϵ [%]
7800	210	0.29	540	770	10

Como se observa pela tabela anterior, esta liga não contempla o crômio. Esta característica pode tornar o aço, e conseqüentemente o quadro da bicicleta, mais vulnerável à corrosão. Contudo, a presença de molibdênio compensa de certa forma essa debilidade e, a utilização de tratamentos superficiais de proteção permite aumentar a resistência à corrosão do quadro provada por agentes ambientais, como o sol ou a água.

2.2.2 Alumínio

O alumínio é um material proveniente do mineral bauxite, muito utilizado na construção de quadros de bicicleta. Inicialmente era considerado um metal de elite utilizado apenas nos quadros de bicicleta mais caros, no entanto atualmente pode até ser mais económico que o aço, dependendo da instabilidade do mercado.

As bicicletas cujo quadro é constituído por alumínio ou numa das suas ligas apresentam, para a mesma carga aplicada, tubos de diâmetros superiores aos utilizados nas tradicionais bicicletas de aço, devido à tensão de cedência do aço ser bastante superior à do alumínio.

As características destes quadros, associadas à sua leveza, tornam estas bicicletas especialmente apropriadas para atividades de *sprint*, mas bastante inadequadas para percursos de longa distância ou em terrenos acidentados, devido à rigidez do material não permitir a absorção de choques e vibrações.

Relativamente à durabilidade, e contrariamente ao que ocorre nas bicicletas de aço, as bicicletas de alumínio resistem bastante menos ao desgaste e à fadiga, durando cerca de 20 mil quilómetros, sem grandes exigências de manutenção. Em certa forma, esta particularidade



é tida como encorajadora a nível económico, permitindo uma venda de um maior número de bicicletas de alumínio comparativamente às de aço, visto que as primeiras se danificam mais rapidamente e são mais difíceis de reparar. Na Figura 8 representa-se o quadro *Trek 2000* que será alvo de estudo neste trabalho. Este quadro é constituído por uma liga de alumínio designada *TrueTemper T2 (7075-T6)*¹.



Figura 8 Quadro de bicicleta Trek 2000.^[7]

Na Tabela 3, encontra-se a composição química e as principais propriedades mecânicas da liga de alumínio *TrueTemper T2* (semelhante a 7075-T6).

A liga seleccionada pertence à série 7000, que se caracteriza por englobar na sua composição magnésio e zinco. Além disso, esta liga contempla ainda cobre o que torna esta liga uma das mais resistentes ligas de alumínio. Este duralumínio pode ser tratado termicamente e pode ser endurecido pelo processo de precipitação. Desta forma, é possível

Tabela 3 Composição química e propriedades mecânicas da liga de alumínio *TrueTemper T2 (7075-T6)*.^[8]

Elementos de liga do alumínio <i>TrueTemper T2 (7075-T6)</i> [%]							
Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
0,18-0,28	1,2-2	0,5 máx.	2,1-2,9	0,3 máx.	0,4 máx.	0,2 máx.	5,1-6,1
Principais propriedades mecânicas							
ρ [kg/m ³]	E [GPa]	ν	σ_e [MPa]	σ_r [MPa]	ϵ [%]		
2700	70	0.33	359	565	11		

obter uma estrutura quase tão resistente como o aço, mas com 1/3 da densidade.

¹ O tratamento T6 consiste num tratamento de homogeneização, a 450 °C, durante várias horas, e é seguido de um outro tratamento de envelhecimento, a 120 °C, durante um dia.



2.2.3 Fibra de Carbono *Standard Grade Unidirectional* (STD UD)

A fibra de carbono é um termo simplista para designar aquilo que é um material compósito de matriz polimérica reforçada com fibras de carbono. O polímero é geralmente epóxico, poliéster e viniléster.

Apesar de haver uma grande diversidade de fibras de carbono caracterizam-se geralmente pela sua excelente relação resistência mecânica/peso (resistência específica) a qual é superior à do aço embora com módulo de elasticidade inferior. Pelo facto de ser bastante leve permite a obtenção de estruturas muito resistentes e leves, razão pela qual é muito desejada na estrutura das bicicletas.

Para este trabalho estamos interessados especificamente na fibra de carbono *standard* com fibras dispostas unidireccionalmente com uma matriz de epóxico. Apresentam-se de seguida as suas propriedades mecânicas.

Tabela 4 Propriedades Mecânicas da Fibra de Carbono (*Carbon Fiber STD UD*).^[9]

$E (0^\circ)$ [GPa]	135
$E (90^\circ)$ [GPa]	10
ν	0,3
$\sigma_r (0^\circ)$ [MPa]	1500
$\sigma_r (90^\circ)$ [MPa]	50
$\epsilon (0^\circ)$ [%]	0,6
ρ [kg/m ³]	1600

Como se pode observar facilmente a fibra de carbono é altamente anisotrópica, pelo que quando a fibra é uni- ou apenas bi-direccional o seu sentido deve ser cuidadosamente calculado relativamente aos esforços a que a fibra vai estar sujeita.

Para este estudo vamos assumir, como simplificação, que a fibra é isotrópica e usar portanto as suas propriedades a 0° em relação com a direcção da fibra.



2.2.4 Titânio

O titânio, metal não ferroso e conhecido como “indestrutível”, tornou-se um dos materiais mais cobiçados na indústria do ciclismo. No entanto, a sua raridade, complexidade de fabrico, bem como a dificuldade na sua manipulação (dobragem, corte e soldadura), faz com que este se torne muito dispendioso.

O titânio possui uma elevada resistência mecânica, podendo ser utilizado no fabrico de tubos com espessura reduzida, obtendo-se, deste modo, quadros muito leves. A título de exemplo, em 2007, a marca *Litespeed* produziu o modelo *Ghisallo* (Figura 9), uma bicicleta de estrada com aproximadamente 770 gramas.

Tabela 5 Composição química e propriedades mecânicas da liga de titânio Ti-3Al-2.5V.^[10,11]

Elementos de liga do titânio Ti-3Al-2.5V [%]							
Al	V	C	H	Fe	N	O	Y
2,5-3,5	2,0-3,0	0,05	0,015	0,30	0,02	0,12	0,005
Principais propriedades mecânicas							
ρ [kg/m ³]	E [GPa]	ν	σ_e [MPa]	σ_r [MPa]	ϵ [%]		
4500	110	0.30	724	860	15		



Figura 9 Bicicleta Ghisallo.^[12]

Geralmente, os quadros de titânio usam ligas de titânio que foram inicialmente desenvolvidas para a indústria aeroespacial. Este elemento é imune à corrosão, muito resistente ao atrito, apresenta uma elevada tensão de limite elástico e um baixo módulo de Young. O titânio apresenta resistência e leveza superiores ao aço e é mais pesado que o



alumínio. Em termos de flexibilidade, é semelhante à do aço, pelo que absorve alguma da vibração provocada por irregularidades da superfície.

A liga de titânio mais utilizada na construção de quadros de bicicletas é a Ti-3Al-2.5V, cuja composição química e propriedades mecânicas se representam na Tabela 5.

Por vezes, também se utiliza a liga Ti-6Al-4V, no entanto, esta é mais difícil de maquinar e soldar.

De um modo geral, os tubos são constituídos pela liga Ti-3Al-2.5V, no entanto o *drop-out* (componente da bicicleta) e outras secções envolventes são constituídas pela liga Ti-6Al-4V. A soldadura TIG (*Tungsten Inert Gas*) é a mais utilizada para a união dos tubos do quadro.

O titânio, que proporciona uma resistência à fadiga considerável, é ainda frequentemente utilizado noutros componentes de bicicletas, tais como parafusos, cassetes, forquetas, guiadores, raios e correntes.

Resumo

Tabela 6 Materiais considerados para o quadro da bicicleta e suas propriedades mecânicas.

Material	Liga	E [GPa]	ν	ρ [kg/m ³]	σ_r [MPa]	$\sigma_{p0,2}$ [MPa]	ϵ	σ_{f0} (5 · 10 ⁸ ciclos) [MPa]	$\frac{E}{\rho}$ [kJ/ton]	$\frac{\sigma_e E}{\rho}$	Preço ^[14] [€/kg]
Aço	Reynolds 531	210	0,29	7800	770	540	10%	414,69	26,9	14,5	0,5
Fibra de Carbono	CarbonFiber STD UD	135	0,30	1600	1500		0,6 %		84,4		33
Alumínio	TrueTemper T2 (7075-T6)	70	0,33	2700	565	359	11%	165,47	25,9	17,7	1,9
Titânio	Ti-3Al-2.5V	110	0,30	4500	862	724	10%		24,4	9,3	20,5



2.3 Critérios de Dimensionamento

2.3.0 Introdução

Existe muita literatura sobre a resistência dos materiais para quadros de bicicleta de estrada, sendo basicamente os dois critérios principais os seguintes:

1. Devem possuir resistência mecânica suficiente para aguentar esforços ocasionais de elevado valor e resistência à fadiga suficiente para ter uma durabilidade longa para uso normal;
2. Não se devem deformar mais do que determinados valores, para que o quadro absorva o mínimo possível de energia proveniente do pedalar do ciclista.

Estes dois requisitos traduzem-se em linguagem técnica por impor ao quadro que passe em testes normalizados, onde é sujeito a determinados esforços, sem que ocorram fissuras visíveis ou roturas no conjunto tanto para baixo ou elevado número de ciclos. Também as deformações máximas permanentes, bem como as instantâneas devem estar entre os limites previstos.

No presente trabalho, como se irão realizar simulações e não testes, será necessário impor valores para as tensões máximas admissíveis e deslocamentos verticais máximos, acima dos quais não se aceita determinado quadro.

2.3.1 Tensões Máximas Admissíveis

Visto estar fora do tema deste trabalho fazer uma análise do quadro à fadiga, os limites máximos para as tensões a admitir nas simulações deverão ter por base de partida as tensões de limite elástico dos materiais. Ainda assim, convém fazer uma referência muito breve ao problema da fadiga em qualquer quadro de bicicleta, visto ser uma falha muito comum em bicicletas.



A rotura por fadiga ocorre quando um componente é sujeito a uma carga cíclica média abaixo da tensão limite de elasticidade do material, mas que possui algumas zonas onde, devido a irregularidades na superfície, ou bruscas variações de secção, ou ainda defeitos microscópicos ou tensões residuais do processo de fabrico, que causam fatores de concentração de tensões, se verificam tensões acima da tensão de limite elástico do material. Nestas zonas desenvolvem-se micro fendas que aumentam ainda mais o dito fator, iniciando-se assim um ciclo vicioso, em que a cada ciclo a fenda aumenta de tamanho e a secção resistente diminui. Esse aumento da fenda diminui a secção resistente do componente, até ao ponto em que este atinge a tensão de rotura e o componente quebra.

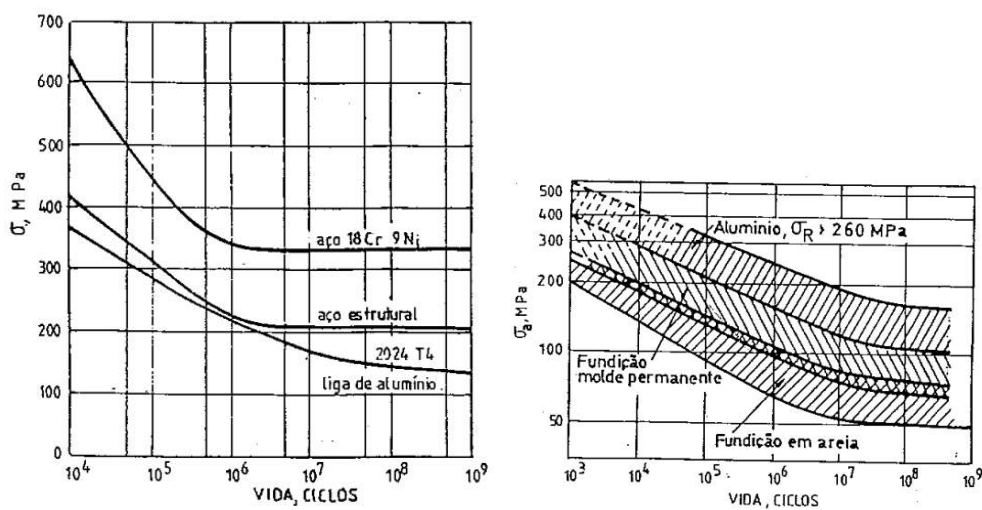


Figura 10 Curvas SN para os aços 18Cr 9Ni e aço estrutural, e ligas de alumínio.

Notar a inexistência de um patamar de fadiga para os alumínios e o facto destas tensões se situarem muito abaixo da tensão limite de elasticidade do respetivo material.^[15]

Assim, para evitar falha por fadiga, todos os componentes devem ser projetados para uma tensão abaixo da tensão de limite elástico do material. Para certos materiais como o aço e o titânio existe uma tensão muito definida a partir da qual o material nunca irá exibir sinais de fadiga, para outros, como o alumínio, tal tensão não existe, pelo que terão sempre uma vida finita. Para estes casos costuma-se definir uma tensão limite convencional de fadiga para 107 ciclos.

O alumínio é o material aqui referido mais suscetível a falhar por fadiga, visto que não apresenta um patamar de fadiga definido, ao contrário dos outros três materiais. Como se pode ver na Tabela 6 o limite convencional de fadiga a 10^8 ciclos é 165 MPa, a mais baixa dos



materiais em estudo dos quais temos informação. Esta é, pois, uma das principais desvantagens do uso do alumínio em bicicletas onde a durabilidade é um fator primordial. [16,17]

Chegamos assim à conclusão que as tensões máximas a admitir, poderão ser, numa primeira aproximação as tensões de limite elástico.

No entanto, há ainda que ter em conta que a simulação não tem em conta vários aspetos do quadro real² e que podem influenciar, dependendo do material e dos processos de fabrico utilizados na obtenção do quadro, a sua resistência. Uma pesquisa por vários fornecedores de quadros e de bicicletas revela que na sua grande maioria os tubos são ligados por soldadura, e desta, por TIG ou brasagem. Para este trabalho, como é óbvio, não consideraremos um quadro com os tubos ligados por brasagem, caso contrário, teríamos que entrar também com as propriedades do material de adição. Ora os valores tabelados para as resistências são para os materiais no estado tal e qual vem do fornecedor. Admitindo que a soldadura é livre de defeitos, isto é, sem fissuras, cavidades, inclusões sólidas, etc, ao ser soldado o material na zona afetada pelo calor (ZAC) sofre um ciclo de aquecimento-arrefecimento que desfaz eventuais tratamentos térmicos ou plásticos que o material tinha no seu estado fornecido alterando as suas propriedades.

Assim, deveríamos considerar tensões admissíveis máximas ligeiramente inferiores à tensão de limite elástico de cada material nas simulações. Contudo, existem processos de fabrico que permitem eliminar as desvantagens da soldadura (aumentando o processo), como por exemplo, a produção do quadro em monocoque. Assim, e como não foi especificado o processo de fabrico de ligação das juntas dos tubos, e o objetivo do trabalho se prende mais com a análise dos elementos finitos do que com a produção de um quadro real, e para a simplificação do problema, tratar-se-á o estudo, como se realmente as ligações entre os tubos fossem perfeitas, e portanto a resistência máxima a considerar seja a de tensão de limite elástico de cada material.

²Se assim não fosse poderíamos também ponderar utilizar tubos de secção variada. Em cima altos e delgados, com maior momento de inércia segundo zz para absorver as solicitações verticais do *Head Tube*, e em baixo com a forma espalmada para ter maior momento de inércia segundo xx para melhor resistir ao momento fletor segundo o mesmo eixo causado pelo movimento do pedalar. Ver figura 11.



Figura 11 Quadro de bicicleta com DT de secção variada.

2.3.2 Deslocamento Vertical Máximo

Apesar de existirem vários ensaios normalizados e particulares para quadros de bicicletas, apenas se encontrou um ensaio semelhante ao caso em estudo, isto é, com a aplicação de uma força vertical no assento e com as condições fronteira apresentadas, em 1986.^[13] Com efeito, uma grande parte dos ensaios a quadros inclui a forquilha.^[19,20,Anexo A] Os que não incluem, são por exemplo, os de análise à fadiga, rigidez torsional, e lateral, ou análise vertical apenas a um dos triângulos do quadro, onde este é preso pelo eixo dos pedais e carregado no tubo frontal ou na intersecção dos 4 tubos traseiros ou com a forquilha e outros elementos da bicicleta incluídos.

O motivo da ausência de ensaios semelhantes ao simulado no presente trabalho é o seguinte:

- Considerar apenas uma carga aplicada no assento é uma grande simplificação porque a carga vertical do peso do ciclista e da bicicleta é sempre aplicada tanto no assento como no volante;
- O assento, por sua vez, possui um *offset* relativamente ao tubo do assento, pelo que não se deveria considerar apenas uma força vertical mas também um momento, juntamente com uma força no volante;



- Para efeitos de uma análise minimamente realista não se deveria considerar o tubo do eixo traseiro e o tubo frontal igualmente fixos. Na verdade, com uma carga vertical o entre-eixo aumentará (algo que é objeto de testes normalizados, Anexo A);
- Ensaios referidos anteriormente são mais indicativos da *performance* da bicicleta do que o ensaio vertical aqui considerado, o qual seria, caso fosse utilizado, para testar o conforto do ciclista. Mas para tal, seria mais indicado fazer o teste vertical com a forquilha e ainda com outros elementos da bicicleta do que apenas o quadro.

Segue-se uma citação de um engenheiro da *Cervélo* a respeito do assunto:

“After chatting with our engineering department, I think I should post a clarification. It is not accurate to say that we do not have a definitive test for Vertical Compliance. In fact, this is something that is relatively easy to measure. However, we do not treat this test as a definitive answer to the question of ride quality. Remember; the frame is just one part of the whole bike + rider system. All of the parts that make up the system play a role in the characteristics of the ride. “

David Byer, Cervélo (empresa de bicicletas de topo de gama) ^[21]

Irá ser realizado de seguida uma análise teórica simples com o intuito de explicitar melhor os conceitos e assim prosseguir com a determinação de um valor para o deslocamento vertical máximo admissível, para um correto dimensionamento dos tubos constituintes do quadro.

Sabe-se que a flecha depende da carga aplicada pela seguinte relação

$$\{F\} = [k]\{\delta\} \quad (1),$$

onde $[k]$ é a matriz de rigidez do componente. Para uma dada direção e condições fronteira, tem-se para vigas sujeitas à flexão que,

$$k_{flexao} = constante \cdot EI/l^3 \quad (2)$$

$$I_{tubo,flexao} = \pi(d_{ext}^4 - d_{int}^4)/64 \quad (3)$$

Não só as cargas dos ensaios disponíveis são diferentes da usada neste trabalho, mas também o são as dimensões dos tubos, sendo que dos fornecedores de quadros de bicicletas pesquisados, nenhum disponibilizava as dimensões das secções dos tubos dos seus quadros,



apenas alguns disponibilizam resultados de testes, e desses nenhum explicitava exatamente o material do quadro. Assim, tivemos que prosseguir com a análise por outro caminho.

O consenso geral parece ser de que quanto mais rígido for o quadro (coeficientes de rigidez, k_{ij} , da matriz respetiva, mais elevados) melhor. Esse aumento de rigidez, pode ser obtido à custa de:

- Diminuição do tamanho do quadro (equação 2);
- Aumento do 2º momento de área dos tubos à custa de um aumento da dimensão dos tubos e sua espessura (equação 3);
- Usando um material com maior módulo de elasticidade (equação 2).

O 1º ponto nem sempre é possível por razões óbvias. Um aumento descuidado da dimensão e espessura dos tubos causa um aumento do preço e do peso, portanto deve ser ponderado tendo em conta a densidade do material em causa e o uso final da bicicleta a que se destina o quadro. Finalmente, a escolha de um material não pode ter só em conta o seu módulo de elasticidade, pois também especialmente a sua densidade, tensão de limite elástico, tensão limite de fadiga influenciam na hora da escolha do material. Assim, os fabricantes geralmente, optam por compromissos entre estes vários fatores, consoante o utilizador final.

Prosseguindo com a análise, falta ainda responder às questões, porque é que um aumento de rigidez é visto como desejável, e depois qual o valor a atribuir para deslocamento vertical máximo.

A resposta à primeira questão pode ser abordada em termos físicos. Quando um ciclista pedala, uma parte do trabalho efetuado pelo movimento da perna é transmitido para o quadro, pela sua deflexão (definição de trabalho, equação 4) e armazenado sob a forma de energia potencial elástica (1ª Lei da Termodinâmica, equação 5).

$$W = F \times d \quad (4)$$

$$W + Q = \Delta U + \Delta E_{p,elástica} + \Delta E_{p,gravítica} + \Delta E_c + \dots \quad (5)$$

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 convertida 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 correia, pelo é de esperar que uma parte dessa energia não seja também transmitida à correia.

Seguindo este raciocínio, seria então conveniente minimizar a deflexão ao máximo, com o intuito de minimizar estas perdas.

Num teste realizado à *Trek 770* a máxima energia elástica armazenada correspondeu apenas a 4% da energia total de *output* do ciclista, corresponde a 400W.^[13] De acordo com certas fontes, um ciclista de *elite* tem um *output* médio de 300W.^[22] Outra fonte, refere que até 99% da energia transferida pelo ciclista para os pedais é transmitida às rodas sendo a principal fonte de perdas as engrenagens.^[23,24,25]

Infelizmente, os estudos disponíveis sobre este tema são escassos, pelo que esta análise tem de ser muito restrita. Assim, tendo em conta apenas este estudo, dir-se-ia que o fator de flexão do quadro não é significativo em termos de perdas energéticas do *output* do ciclista. No entanto, é de notar que todas as opiniões encontradas sobre o assunto de ciclistas sugerem que estes preferem quadros mais rígidos, mesmo que os grandes produtores de bicicletas gastam grande parte do seu orçamento na tentativa de melhorar a rigidez das suas bicicletas tentando manter o peso ao mínimo.^[26]

Há ainda que ser referido, que apesar de estarmos a falar de rigidez relativamente ao pedalar, à qual nesta área se costuma referir por rigidez torsional, os materiais em estudo, com a exceção da fibra de carbono, são relativamente isotrópicos em termos das suas propriedades, e um aumento da rigidez torsional corresponde a um aumento da rigidez na direção considerada para o impacto vertical.

Conclui-se então que teoricamente, e com base em apenas um estudo muito limitado, parece, em termos energéticos, não haver grande preocupação em limitar muito inflexivelmente o deslocamento vertical máximo. Por outro lado, a opinião de vários ciclistas é de queixas relativamente à falta de responsividade de bicicletas muito flexíveis,^[27,28] e ainda de empresas que mencionam a rigidez como o parâmetro a considerar^[29] levam-nos a ponderar seriamente a encontrar um meio termo, mesmo havendo também quem diga que a rigidez é mais uma parte do senso comum do ciclista que deveria ser revista, sendo principalmente um efeito psicológico.^[30]



Finalmente, chega-se à conclusão que será melhor realizar alguns testes preliminares, a partir daí definir um deslocamento vertical máximo de maneira que seja um valor facilmente atingível, para que no final tenhamos tubos dos materiais todos que se aproximem desse valor e assim estes possam ser melhor comparados. Se optarmos por um deslocamento máximo apenas atingido pelos materiais com menor rigidez, os materiais mais rígidos podem não chegar a esse valor e no final não será possível realizar uma adequada comparação.

Como nota adicional, achou-se por bem falar em “deslocamento vertical” por oposição a “flecha” e “deformada” nas análises a serem feitas em ABAQUS, visto que para o caso em estudo, aquilo que será indicado no ABAQUS são precisamente os deslocamentos verticais nos nós do quadro. É de esperar que o máximo ocorra no assento. Este é, por sua vez, é devido à flexão de vários tubos e à compressão do tubo do assento, pelo que é soma das flechas dos vários tubos e da compressão do referido tubo que lhe darão origem. Torna-se então mais correto falar limitar o deslocamento vertical máximo do assento do que “flecha” ou “deformada” máxima admissível.



3 Procedimentos

Esta secção pretende explicar os pressupostos seguidos ao longo das diversas simulações efetuadas no *software Abaqus*[®], tanto no que concerne à análise do comportamento dos vários materiais quando sujeitos à aplicação de uma mesma carga ($F = 4704 \text{ N}$), como no que respeita à metodologia da análise de sensibilidades.

1. Efetuaram-se algumas simplificações: o comprimento de cada um dos tubos foi sempre constante em cada simulação, a ligação entre os tubos foi rígida e o eixo traseiro foi considerado maciço e apresenta uma secção circular de diâmetro 10 mm.
2. As simulações efetuadas nos diferentes quadros foram realizadas com elementos de viga B31³ e o número total de nós da estrutura foi mantido constante (malha composta por 72 nós).
3. Efetuaram-se diversas simulações preliminares em *Abaqus*[®], com tubos disponíveis nos fornecedores na bibliografia para obter valores para os deslocamentos obtidos para os diferentes materiais.
4. Visto ser extremamente difícil senão impossível, encontrar tubos exatamente das mesmas dimensões para os diferentes materiais, foram arbitrados tamanhos para os tubos tendo como base as dimensões dos tubos disponíveis dos diferentes materiais, para se proceder à análise da influência do material no deslocamento vertical e na distribuição de tensões. Esses valores encontram-se na tabela 7.
5. Com base nesses valores, arbitrou-se um valor para o deslocamento vertical atingível por todos os quadros dos quatro materiais, esse valor foi $\delta_{y,m\acute{a}x,arb} = 0,32\text{mm}$.
6. Seguidamente foram selecionados tubos existentes no mercado e, através de um processo iterativo, foram realizadas várias simulações até serem encontradas as dimensões que efetivamente permitiam respeitar o critério de deslocamento vertical em causa e cujo valor de $\delta_{y,m\acute{a}x} \approx \delta_{y,m\acute{a}x,arb}$. Os quadros que tais requisitos respeitaram foram selecionados para a análise ao custo.
7. Procedeu-se ao cálculo do custo relativo dos quadros selecionados para os diferentes materiais. Para tal foi necessário fazer algumas simplificações, nomeadamente:
 - a. Preços não consideram custos de:
 - i. Soldadura / ligação dos tubos;

³B31 (2 node linear beam) - apenas uma integração por elemento.



- ii. Processo de fabrico dos tubos (passagem de lingotes a tubos);
- iii. Secção não constante;
- iv. Transportes, etc.

b. Os tubos de fibra de carbono apresentam um processo de fabrico bastante diferente dos outros e, não é geralmente unidirecional.

Tendo o preço do material (€/kg) obteve-se um custo fictício de cada quadro, que refletem qual as diferenças relativas dos custos dos quadros quando o critério é $\delta_{y,máx} \approx \leq 0,32mm$.

Tabela 7 Dimensões dos tubos utilizados nas simulações preliminares de obtenção do valor máximo admissível do deslocamento vertical do assento.

Tubo	Diâmetro [mm]	Espessura [mm]
DT (Down Tube)	44	1,2
TT (Top Tube)	35	1,2
ST (Seat Tube)	32	1,5
CS (ChainStays)	28	1,3
SS (SeatStays)	20	0,7
HT (Head Tube)	38	1,3
Pedal Tube	25	2,5

8. Consequentemente, realizou-se a análise de sensibilidades para diferentes discretizações das malhas ao quadro de bicicleta constituído pelo aço *Reynolds 531*. De forma, a efetuar-se esta análise foram realizadas nove malhas compostas por elementos de viga em que a sua dimensão foi diminuindo (Tabela 8). Para estudar a influência do tipo de elemento na modelação do quadro para além do elemento B31 considerou-se também o elemento B33⁴. Ademais, analisando quais os tubos que revelaram maiores valores de tensões de *Von Mises* (críticos), realizaram-se ainda outras simulações em que o refinamento da malha é mais evidente nessas regiões.

⁴ B33 (2 node cubic bem) – três pontos de integração por elemento.

**Tabela 8** Simulações realizadas e número de nós da malha correspondente.

Simulação	Número de nós da malha	<i>Approximate Global Size</i>
1	72	50
2	141	25
3	280	12,5
4	563	6,25
5	979	3,6
6	3523	1
7	7045	0.5
8	10062	0.3
9	35223	0.1



4 Resultados

4.1 Efeito do Material num Quadro Comum

As primeiras simulações realizadas consistiram em usar o mesmo quadro da bicicleta alterando apenas o material constituinte. Na tabela 9 encontram-se as dimensões dos diferentes tubos e, na tabela 10 os resultados obtidos em termos do deslocamento vertical máximo e da tensão de *Von Mises* máxima dos quatro materiais testados.

Tabela 9 Dimensões do quadro comum da bicicleta.

Tubo	Diâmetro [mm]	Espessura [mm]
DT	44	1,2
TT	35	1,2
ST	32	1,5
CS	28	1,3
SS	20	0,7
HT	38	1,3
Pedal Tube	25	2,5
Rear Axle	10	-

Tabela 10 Resultados obtidos dos materiais estudados por ordem decrescente de módulo de elasticidade.

	$\delta_{y\max}$ (mm)	σ_{\max} (MPa)	Peso (kg)
Aço	0,1619	36,51	2,81
FC	0,2519	36,58	0,577
Ti	0,3092	36,63	1,62
Al	0,4865	36,79	0,973



4.2 Dimensionamento de Quadros para Cada Material

Posteriormente, realizaram-se várias simulações para dimensionar os perfis tubulares de cada quadro da bicicleta.

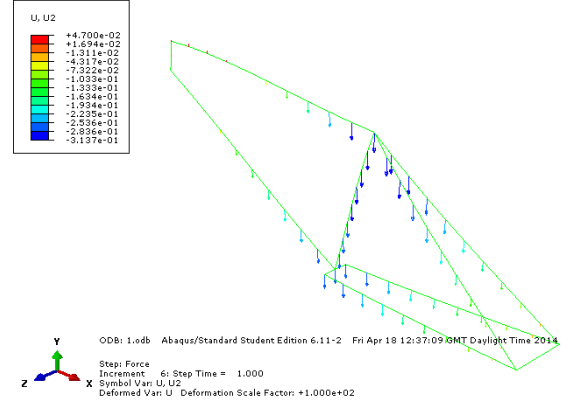
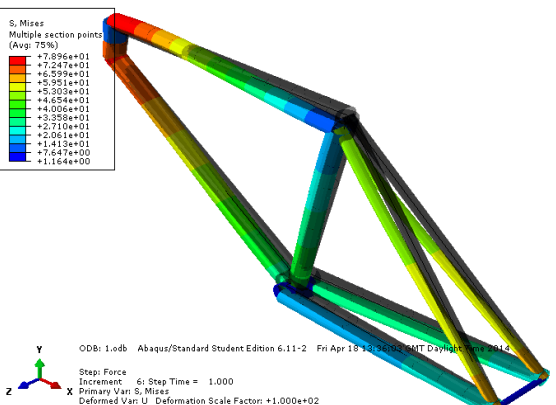
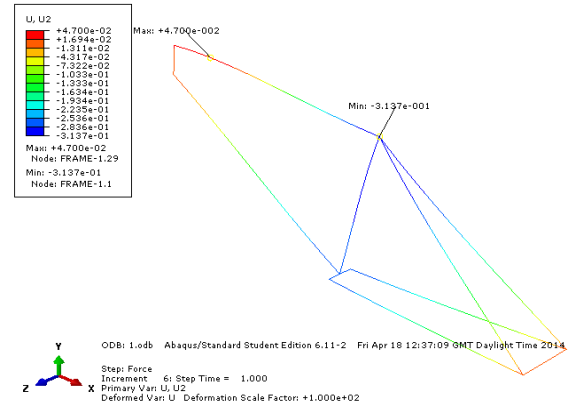
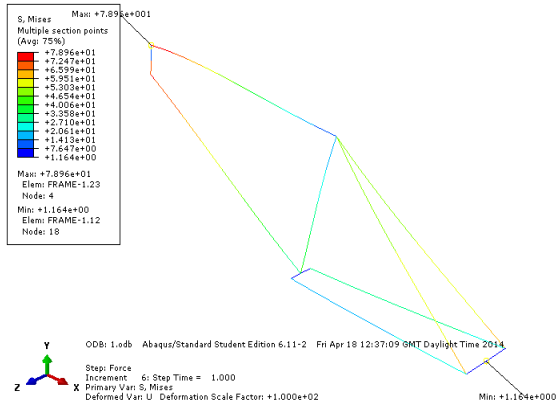
Tabela 11 Dimensionamento do quadro para os critérios $\sigma \leq \sigma_e$ e $\delta_y \approx \leq 0,32mm$.

	DT d _{ext}	DT t	TT d _{ext}	TT t	ST d _{ext}	ST t	CS d _{ext}	CS t	SS d _{ext}	SS t	HT d _{ext}	HT t	Pedal Tube	δ_{ymax} (mm)	σ_{max} (MPa)	Peso (kg)	Volume (cm ³)
Aço 1	31,8	0,5	28,6	0,4	28,6	0,4	30	0,5	17	0,5	31,8	1	r=24,7 t=2	0,3954	104,0	1,198	153,5
Aço 2	28,6	0,6	25,4	0,6	28,6	0,6	22,2	0,8	14	0,8	31,8	1	r=24,7 t=2	0,3314	102,3	1,42	181,8
Aço 3	35	0,5	31,7	0,5	31,7	0,6	30	0,6	17	0,6	36	1,1	r=24,7 t=2	0,3137	78,96	1,458	186,95
FC 1	44,5	0,9	38,1	0,9	38,1	0,9	22,2	0,9	16	0,9	38	2,15	r=25 t=2,5	0,307	44,00	0,46	288,377
FC 2	38	0,9	35	0,9	32	0,9	22	0,9	19	0,9	38	2,15	r=25 t=2,5	0,289	43,92	0,457	285,698
FC 3	38	0,9	35	0,9	32	0,9	22	0,9	19	0,9	38	2,15	r=20 t=2	0,290	44,15	0,446	278,983
FC 4	38	0,9	35	0,9	31,8	0,9	22	0,9	16	0,9	38	2,15	r=20 t=2	0,313	43,70	0,432	270,000
Ti 1	44,5	1,37	38,1	0,9	44,5	0,9	19,05	0,991	19,05	0,991	50,8	1,778	r=25 t=2,5	0,2888	34,37	1,5788	350,847
Ti 2	44,5	0,9	38,1	0,9	44,5	0,9	22,2	0,9	19	0,9	44	2,15	r=25 t=2,5	0,32	38,01	1,43	317,577
Al 1	48	1,5	35	1,5	35	1,7	28	1,5	19	1	39,4	3,2	r=25 t=2,5	0,365	28,56	1,3	481,686
Al 2	44	1,8	35	1,2	31,7	2,25	28	1,5	19	1	39,4	3,2	r=25 t=2,5	0,358	27,18	1,32	489,631
Al 3	40	2	35	1,3	31,8	2,5	30	1,5	19	1	50,8	3,7	r=25 t=2,5	0,3354	27,22	1,4199	525,921
Al 4	42	1,8	35	1,3	31,8	2,5	31	1,3	19	1,4	41,1	4	r=25 t=2,5	0,31	23,47	1,42	524,541

Tendo em conta os critérios de tensão e de deslocamento vertical máximos permitidos seleccionou-se o quadro para cada material e, posteriormente obteve-se os seguintes resultados da distribuição de tensões e deslocamentos verticais assim como a localização dos respetivos valores máximos .



Aço



Fibra de Carbono (F.C.)

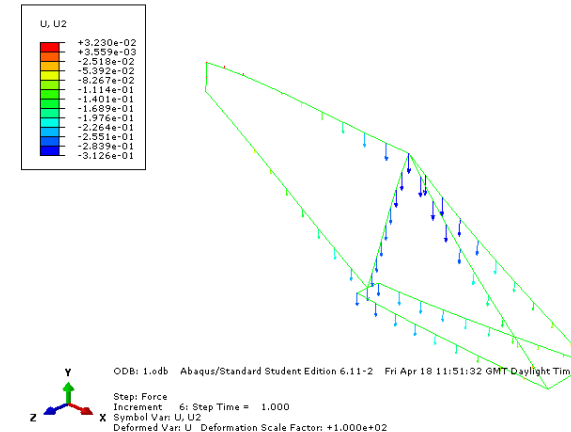
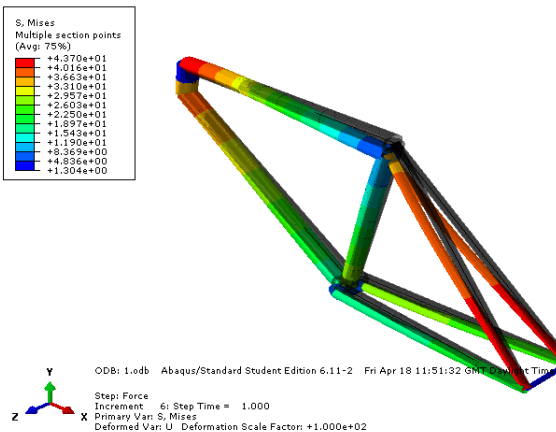
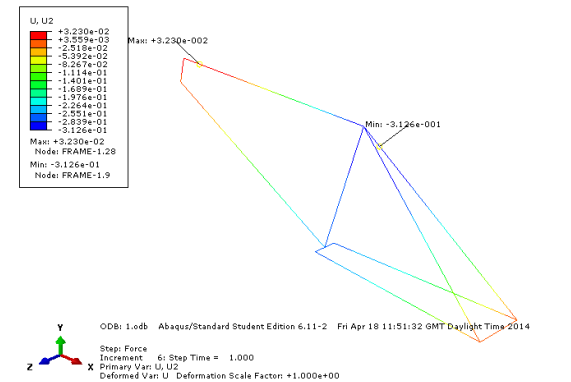
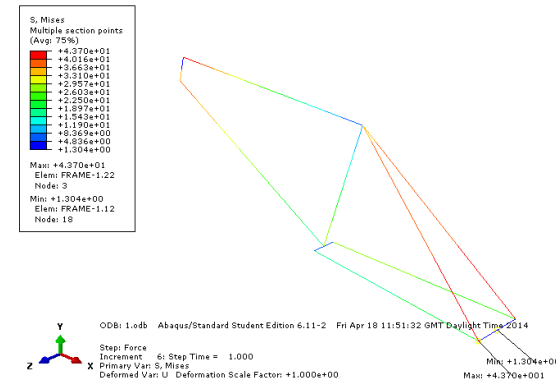
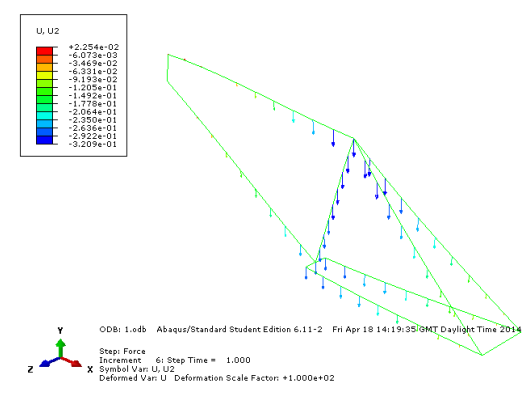
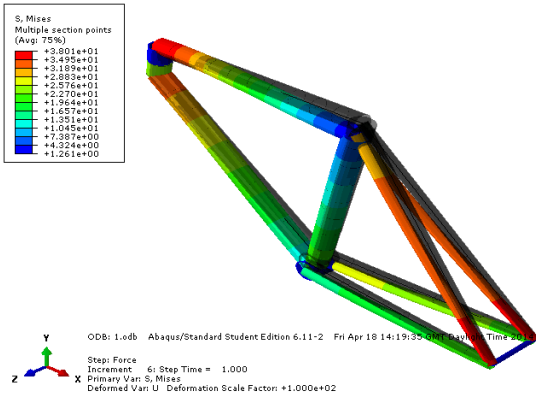
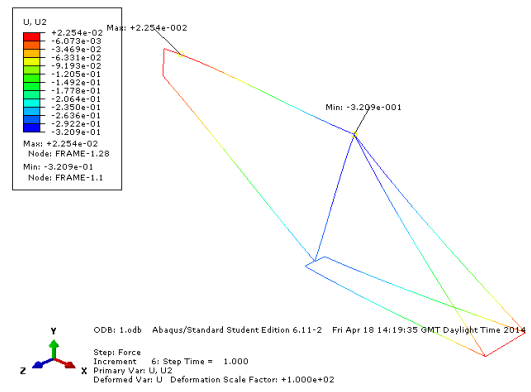
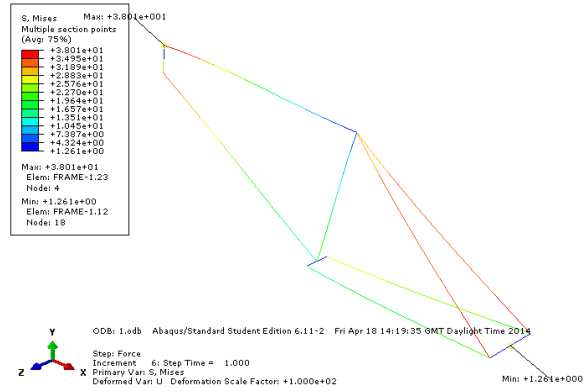


Figura 12 Distribuição de tensões e deslocamentos verticais, assim como a localização dos respectivos valores máximos e mínimos para os quadros de aço e de fibra de carbono escolhidos.



Titânio



Alumínio

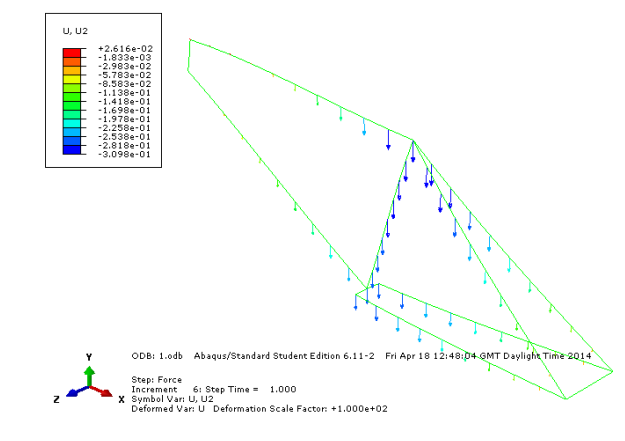
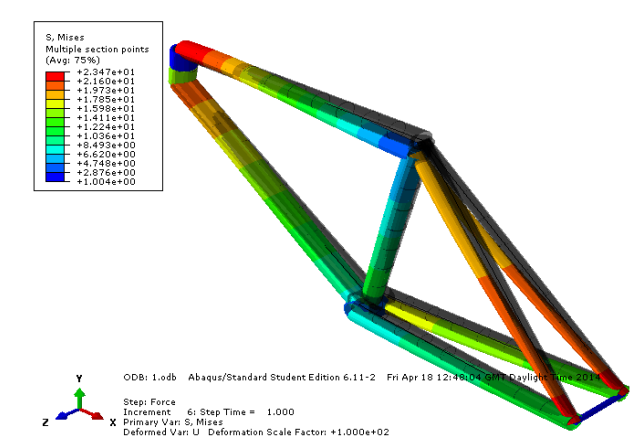
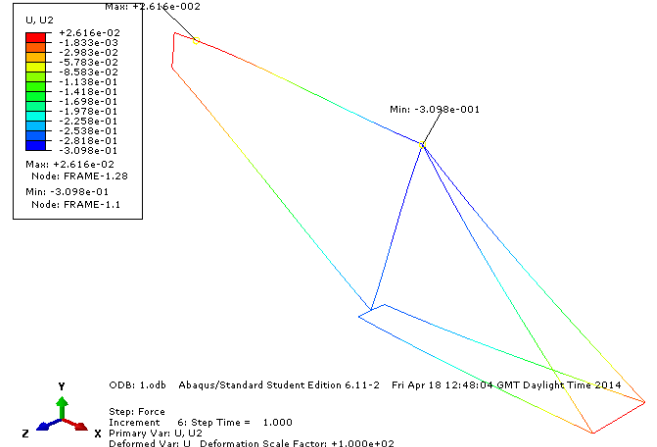
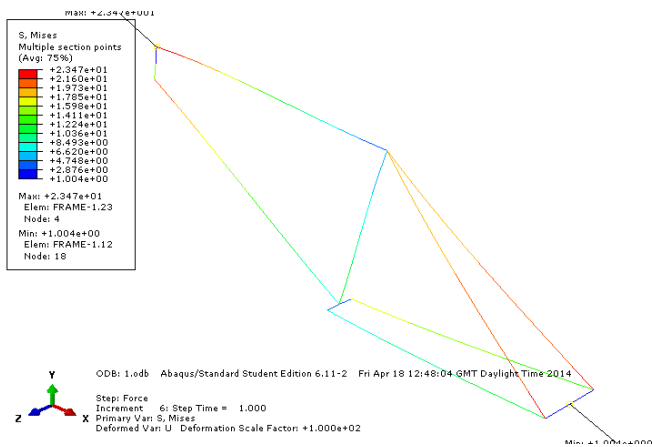


Figura 13 Distribuição de tensões e deslocamentos verticais, assim como a localização dos respectivos valores máximos e mínimos para os quadros de titânio e de alumínio escolhidos.



Encontra-se de seguida a tabela 12 que resume as principais características dos quatro quadros seleccionados para análise.

Tabela 12 Características dos quadros seleccionados.

	δy_{max} (mm)	σ_{max} (MPa)	Volume (cm ³)	Peso (kg)	Preço (€)
Aço	0,3137	78,96	186,95	1,458	0,729
FC	0,313	43,70	270,00	0,438	14,256
Ti	0,32	38,01	317,577	1,43	29,315
Al	0,31	23,47	524,541	1,42	2,698

4.3 Resultados para Análise de Sensibilidades

Na figura 14 é possível observar os resultados obtidos da tensão de *Von Mises* máxima para diferentes dimensões da malha usando os elementos B31 e B33.

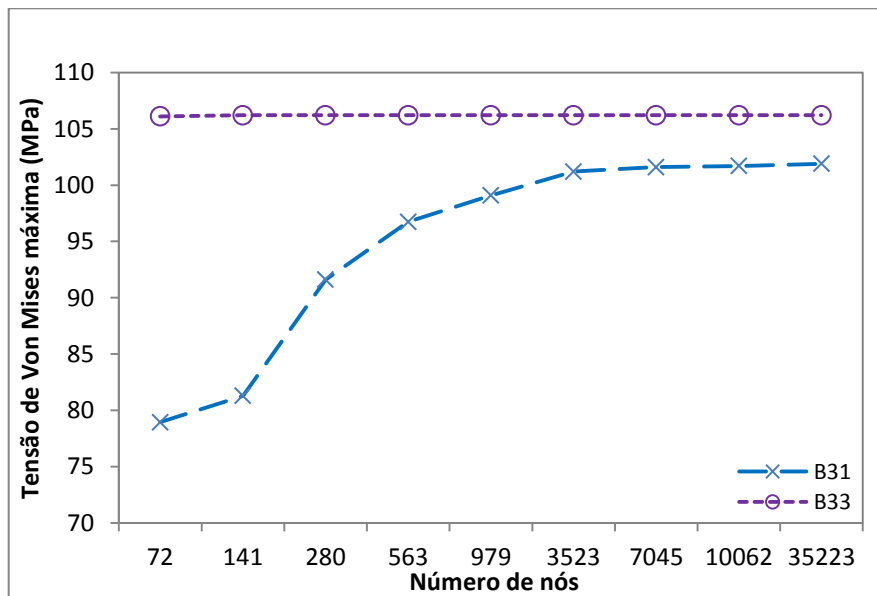


Figura 14 Valores obtidos da tensão de *Von Mises* máxima para diferentes dimensões da malha usando os elementos B31 e B33.



Após a análise da figura 14 observa-se que os tubos críticos, relativamente à tensão de *Von Mises*, são os *DT*, os *TT*, os *HT*. O refinamento destes tubos consistiu inicialmente em manter o número de nós total de cada tubo alterando apenas a sua distribuição, ou seja, nas regiões críticas o espaçamento entre nós é reduzido como se observa na figura 15.

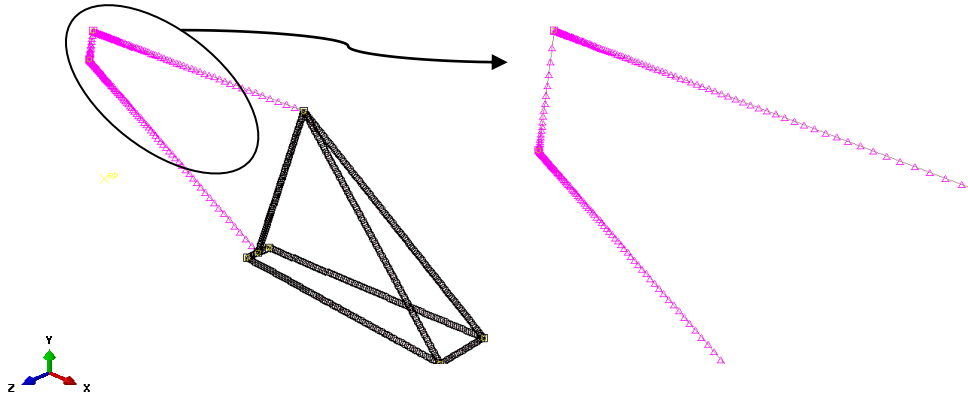


Figura 15 Representação da discretização da malha com 979 nós com visualização dos tubos críticos a rosa com distribuição não uniforme dos nós enquanto os tubos a preto apresentam distribuição uniforme.

De seguida observam-se os resultados obtidos com este refinamento aplicado aos tubos críticos.

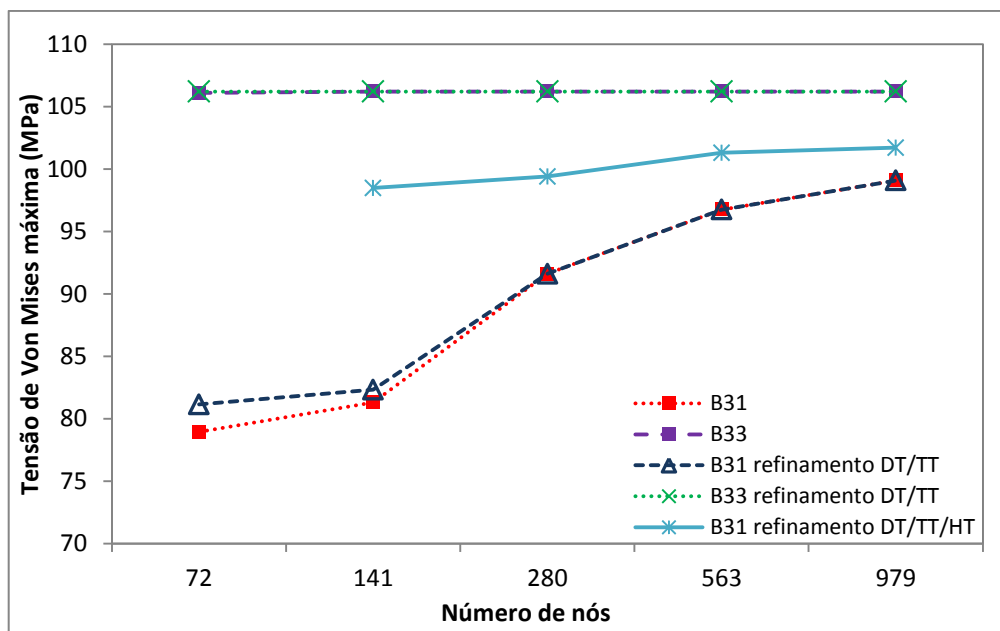


Figura 16 Valores obtidos da tensão de *Von Mises* máxima para diferentes dimensões da malha usando os elementos B31 e B33 e, refinando os tubos críticos.



De seguida, efetuou-se uma análise em que se alterou o tamanho global dos nós, aproximado, nos diferentes tubos, ou seja, nos tubos não críticos reduziu-se para, aproximadamente, metade o número de nós aumentando assim o número de nós para discretizar os tubos críticos (figura 17). O número total de nós da estrutura manteve-se igual ao usado nos testes de sensibilidade anteriores e, nos tubos críticos continuou-se a usar uma distribuição não uniforme (figura 17).

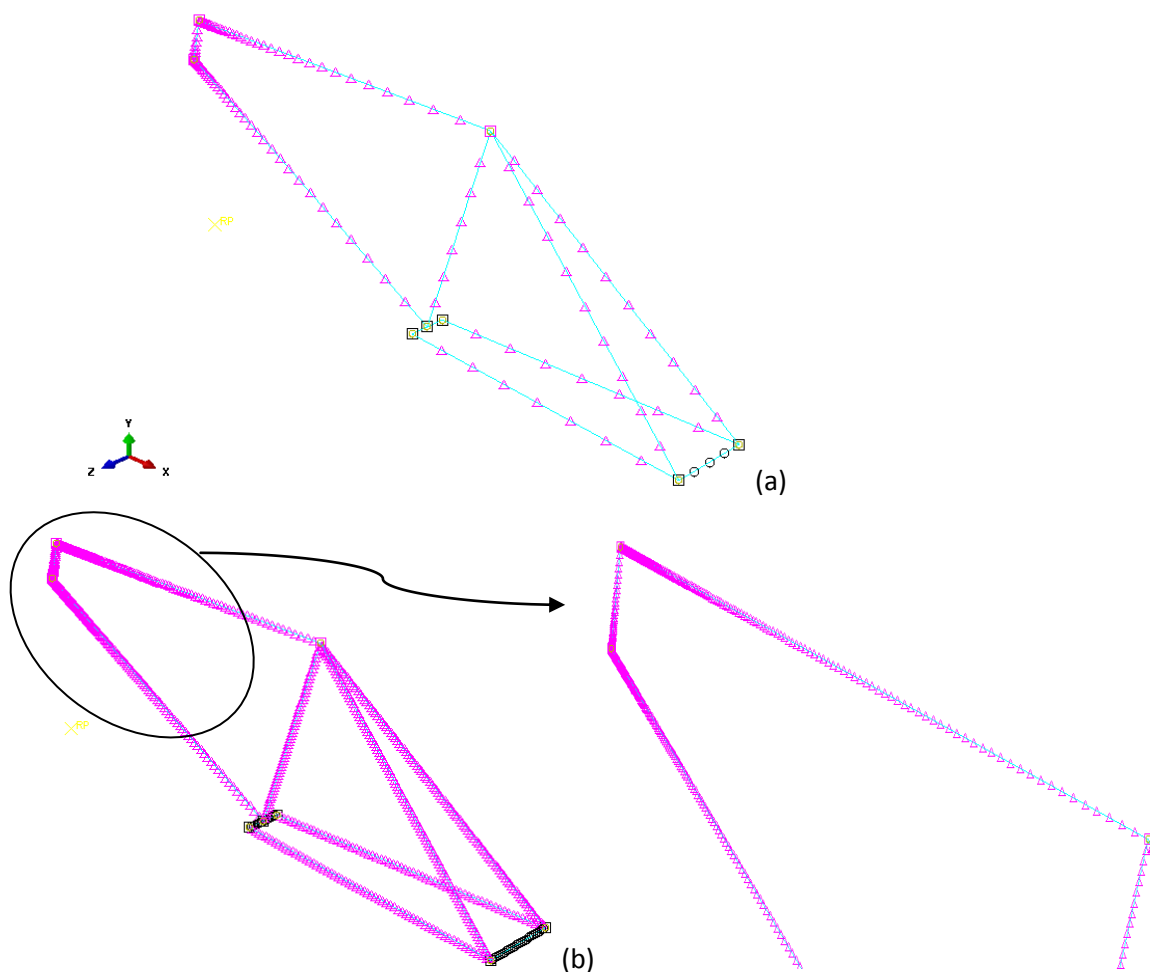


Figura 17 Representação da discretização da malha com tamanho global dos nós diferente nos tubos e, distribuição não uniforme dos nós nos tubos críticos. Malha com 141 nós (a) e malha com 979 nós (b).



De seguida observam-se os resultados obtidos com este segundo refinamento aplicado aos tubos críticos.

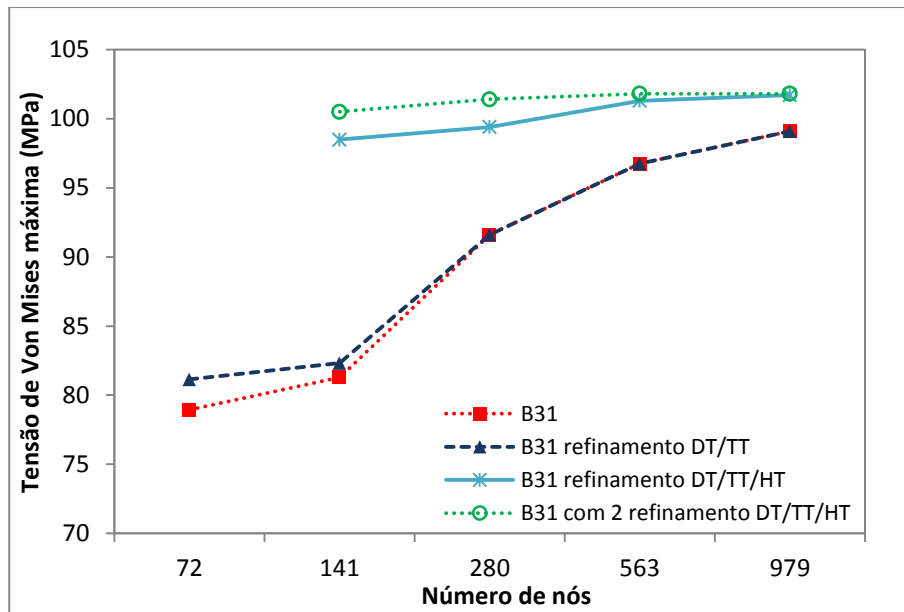


Figura 18 Valores obtidos da tensão de *Von Mises* máxima para diferentes dimensões da malha usando os elementos B31 e, refinando os tubos críticos.

De seguida realizou-se a análise de sensibilidade relativamente à variável deslocamento vertical com procedimento idêntico ao anterior. Na figura 19 observam-se os resultados obtidos.

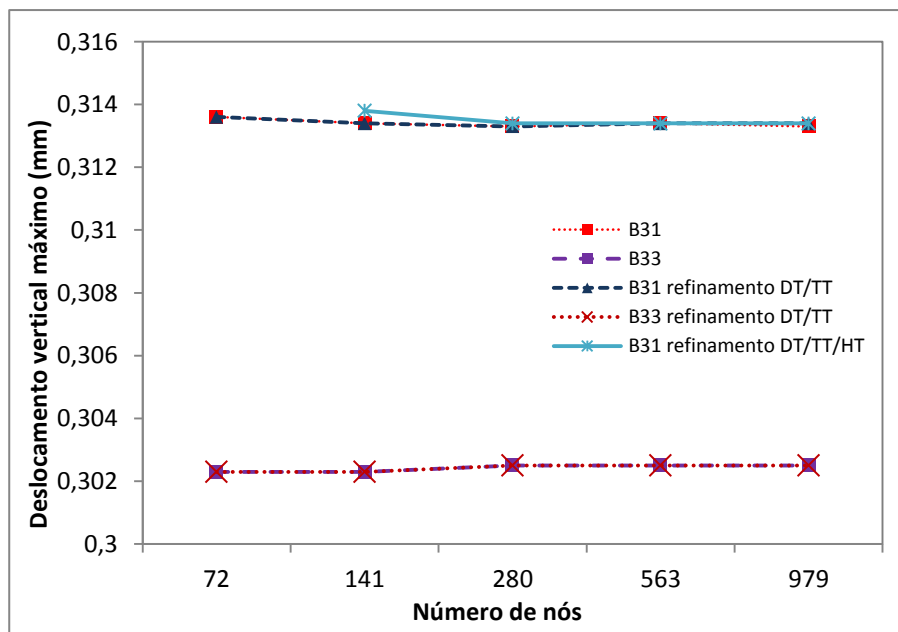


Figura 19 Valores obtidos do deslocamento vertical máximo para diferentes dimensões da malha usando os elementos B31 e B33 e, refinando os tubos críticos.

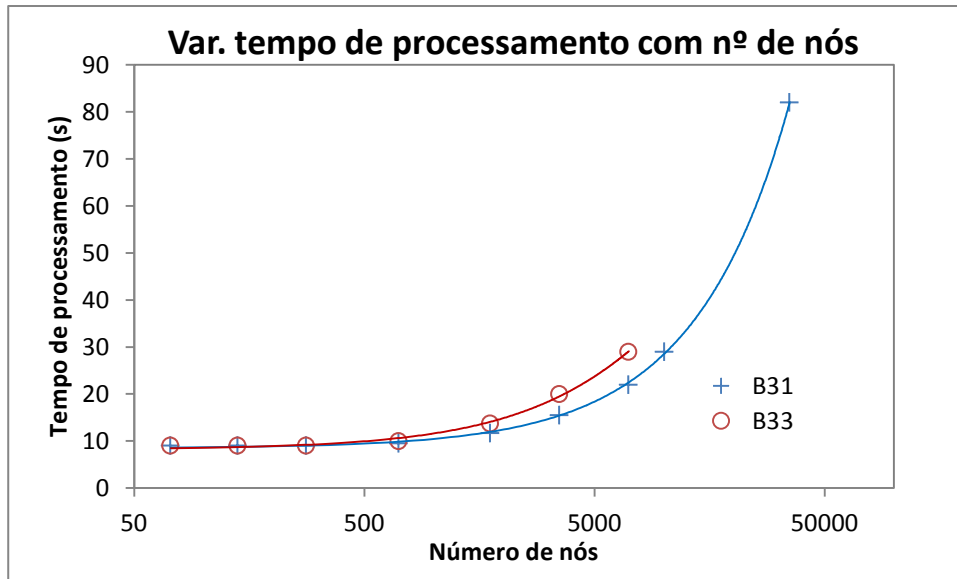


Figura 20 Variação do tempo de processamento com o número de nós.



5 Análise dos Resultados

5.1 Estudo do Efeito do Material num Quadro Comum

Da análise da tabela 10 é possível observar o seguinte:

1. A tensão mantém-se constante para os quatro quadros testados, o que está de acordo com o esperado (equação 5.1) pois a tensão depende apenas das dimensões e os quadros apresentam as mesmas dimensões;

$$\sigma_{\text{flexao}} = \frac{M_f \cdot y}{I} = \frac{64M_f}{\pi(d_{\text{ext}}^4 - d_{\text{int}}^4)} \quad (5.1)$$

2. Um aumento do deslocamento vertical com a diminuição do módulo de elasticidade, que por sua vez diminui a rigidez do quadro (matriz 5.3). Esta observação está de acordo com o esperado (equação 5.2);

$$\{F\} = [k]\{\delta\} \quad (5.2)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

3. O quadro em aço é o mais pesado e o menos flexível, enquanto que o de fibra de carbono é o mais leve e apresenta flexibilidade baixa-intermédia;
4. Em todos os quadros está-se longe de atingir a tensão de limite elástico;



	$\sigma_{m\acute{a}x}/\sigma_{p0.2}$
Aço	0,19
FC	0,029 ⁽⁵⁾
Ti	0,05
Al	0,079

Onde $\sigma_{m\acute{a}x}$ corresponde ao maior valor da tensão máxima para todos os ensaios do material.

5.2 Análise do Dimensionamento de Quadros para Cada Material

Da análise da tabela 11, é de notar os seguintes pontos:

1. O aumento das dimensões dos tubos traduz se numa diminuição da tensão máxima, e vice-versa. Esta observação pode ser explicada pelo aumento do 2º momento de área (equação 5.4) que irá reduzir o valor da tensão dado pela equação 5.1;

$$I_{tubo,flexao} = \frac{\pi(d_{ext}^4 - d_{int}^4)}{64} \quad (5.4)$$

2. Alguns tubos apresentam maior influência no deslocamento vertical que outros:
 - a. Do FC2 para o FC3 alterou-se apenas o tubo do pedal, com uma variação negativa de volume igual a 6,715 cm³, e a variação do deslocamento vertical resultante foi de $\Delta\delta_y = 0,001$ mm;
 - b. Do FC3 para o FC4 alterou-se (relativamente ao FC3), com uma variação negativa de volume igual a 8,983 cm³, e a variação do deslocamento vertical resultante foi de $\Delta\delta_y = 0,023$ mm.

⁵ Para o caso da F.C. foi utilizada a σ_r visto que se trata de um material frágil, não existindo distinção entre σ_e ou $\sigma_{p0.2}$ e σ_r .



Embora a redução de volume do FC3 para FC4 fosse apenas 1,3 vezes maior que de FC2 para FC3, o aumento de deslocamento vertical foi 23 vezes maior. Esta observação pode ser explicada porque todos os tubos exceto o tubo do pedal, o eixo traseiro e o tubo do assento, contribuem grandemente para o deslocamento vertical total do assento, uma vez que a deformada destes tubos à flexão é sem dúvida maior que a redução do tamanho do tubo do assento devido à compressão ou à deformada do tubo do pedal, que é dos tubos mais largos mas mais curtos (logo elevada rigidez, ver equação 5.3). O tubo do eixo traseiro apenas está sujeito à tração por isso não contribui sequer diretamente para o deslocamento vertical. Isto pode ser confirmado pelo facto dos tubos referidos estarem coloridos a azul, significando isso que estão sob baixas tensões.

Assim, uma redução de espessura das paredes ou do diâmetro de um dos tubos que contribui grandemente para o deslocamento vertical do assento, como os seat stays (SS) para estas condições fronteira, implica que o aumento do deslocamento vertical seja maior do que para um tubo com pouca influência.

Relativamente aos gráficos há os seguintes pontos a mencionar:

1. Tal como esperado, as tensões máximas verificam-se sempre junto aos locais onde existem deslocamentos e/ou rotações restringidas;
2. A distribuição de tensões de Von Mises e deslocamentos verticais não é semelhante para os mesmos tubos de cada material.

Utilizando dois tubos onde é mais notória esta observação, os SS, pode-se verificar que enquanto na simulação do aço os tubos SS se encontram coloridos a verde/amarelo estando portanto confortavelmente abaixo da tensão máxima obtida para o quadro, para a F.C. ou para o Ti isto já não é verdade. A explicação encontra-se na tabela 11, no tamanho dos tubos do aço para os outros 2 materiais. Com efeito, para o caso do aço os tubos SS têm um tamanho relativamente ao Ti e à F.C., maior. Enquanto que para a simulação do aço 3 os tubos SS correspondem a 17,1% do volume total dos tubos, para as simulações da F.C. 4 e do Ti2 corresponde a 16,3% e 16,7% respetivamente. Não é uma diferença significativa para o deslocamento vertical, mas é para os tubos SS porque estes passam a estar sujeitos a menores deformações, porque o aumento dos outros tubos assim o impõe, e assim, a menores esforços (equações 5.1 e 5.2).



Da análise da tabela 12, é de notar os seguintes pontos:

1. Relativamente à análise dos custos, uma vez que os custos presentes nessa tabela foram obtidos por "tremendas" simplificações, a única análise que se pode fazer que poderá resultar em valores relativamente sensatos é o cálculo do preço de um quadro relativamente ao de outro.

Usando o preço do quadro em aço como referência obtêm-se as seguintes informações.

Quadro em FC custa	19,5	vezes mais que o em aço
Quadro em Ti custa	40,2	vezes mais que o em aço
Quadro em Al custa	3,7	vezes mais que o em aço

É de referir que estes custos relativos são para uma imposição de deslocamento vertical máximo (e uma imposição de $\sigma_{máx} < \sigma_e$ que nunca é atingida em nenhuma simulação para a força considerada, e portanto trata-se de uma imposição secundária). O critério de deslocamento vertical máximo é apenas um dos usados pelos fabricantes de quadros, outro seria obter o menor peso possível, ou elevada rigidez torsional, ou horizontal, podendo estas imposições terem mais ou menos prevalência no quadro final.

2. Relativamente à tabela 10 onde as dimensões dos tubos são as mesmas para os diferentes materiais, se o critério for o deslocamento vertical o ranking dos quadros relativamente aos pesos mantém-se verificando-se apenas que a diferença entre o quadro de F.C., o de Ti e o de Al diminui drasticamente.

Apesar de serem resultados baseados em várias simplificações, não deixam de corresponder à realidade do que é a utilização destes materiais nos quadros de bicicletas. Com efeito, analisando a tabela 12 verificam-se várias correspondências com aquilo que se verifica na realidade

- a. **Aço:** este material continua a ser usado em bicicletas baixa-média gama, devido ao seu baixo custo mas boas propriedades mecânicas se bem que a custo do seu elevado peso. O peso, como se sabe, é um dos fatores de maior importância no ciclismo competitivo, para o qual as bicicletas de mais alta gama são fabricadas. É o material que permite bicicletas mais compactas.



- b. **Fibra de Carbono:** os quadros em F.C. são apenas, mas muito, utilizados em quadros de gama média-alta-topo, devido ao seu elevado preço mas excelentes propriedades mecânicas, bem como baixa densidade, o que permite obter quadros muito leves, mas não por isso menos resistentes.
- c. **Titânio:** Juntamente com o aço, é um material menos usado que a F.C. e que o Al devido especialmente ao seu custo proibitivo, apesar da sua excelente resistência mecânica à corrosão, elevadíssima rigidez (E/ρ) e resistência específicas ($\sigma_e E/\rho$) O que se verifica no mercado é que são as bicicletas de titânio as menos procuradas.
- d. **Alumínio:** usado em quadros de baixa-alta gama combina boas propriedades mecânicas com baixa densidade. A grande vantagem é "o poder" a um custo acessível permitindo bicicletas leves mas resistentes. Uma desvantagem aparente é o volume do quadro. Com efeito, para um quadro em alumínio apresentar a mesma rigidez (N/mm) que um quadro num dos outros materiais, é necessário tubos maiores/mais espessos.

5.3 Análise de Sensibilidades

Pela análise da figura 14 verifica-se que o tipo de elemento de viga usado na modelação é importante nos resultados obtidos. Os resultados da tensão de *Von Mises* máxima usando os elementos B33 mantêm-se estáveis assumindo o valor de, aproximadamente, 106 MPa com o aumento do número de nós usados na discretização. Por outro lado, os resultados obtidos com os elementos B31 são sensíveis ao número de nós usados. Pelo gráfico da figura x observa-se que a tensão máxima só estabiliza com 3523 nós registando um valor de, aproximadamente, 102 MPa. Apesar desta observação as simulações realizadas anteriormente foram efetuadas com apenas 72 nós para todos os quadros, devido à análise de sensibilidades ser realizada após os testes efetuados aos diferentes quadros. O número de nós usados nas diferentes simulações deveria ter sido superior, no entanto como foi igual para todos os resultados apresentam o mesmo fator de erro e deste modo as análises não deveram ser muito afetadas.

Como seria de esperar, a tensão máxima exercida no quadro da bicicleta com os dois tipos de elementos de viga é inferior à tensão de cedência do material, garantindo que esta se encontra no domínio elástico. Relativamente ao tempo de processamento, a partir da sexta malha (constituída por 3523 nós) observou-se que as simulações com os elementos B33



tiveram uma duração superior aos elementos B31, sendo que o ABAQUS abortou as simulações acima de aproximadamente 10000 nós.

O refinamento nos tubos críticos nas malhas constituídas por elementos B33, como seria de esperar, não teve qualquer efeito devido aos resultados estarem já estabilizados (figura 16).

Por outro lado, na discretização da malha usando os elementos B31 observa-se que o refinamento localizado dos três tubos críticos afetou significativamente os valores máximos da tensão de *Von Mises*. Nesta situação, os valores de tensão vão convergindo gradualmente com o aumento do número de nós para o valor obtido da situação em que se aumentou significativamente o número de nós (Figura 14), ou seja, aproximadamente 102 MPa.

Pela análise da figura 18 observa-se que o aumento do número de nós nos tubos críticos associado a uma distribuição mais concentrada nas regiões críticas conduz a que os resultados não sejam muito afetados pelo aumento do número de nós, isto é, com apenas 141 nós o valor da tensão máxima assume o valor de 100,5 MPa sendo o erro relativo de 1,5%.

Tal como se verificou na análise das tensões máximas de *Von Mises*, os resultados dos deslocamentos verticais máximos (Figura 19) são diferentes consoante o tipo de elemento de viga considerado na modelação. No entanto, os resultados obtidos de deslocamento vertical mantêm-se estáveis com o aumento do número de nós para os elementos B31 e B33. Usando os elementos B31 o deslocamento vertical máximo obtido é, aproximadamente, 0,313mm enquanto que usando os elementos B33 o valor obtido diminui para, aproximadamente, 0,302mm.

Como seria de esperar, o refinamento nos tubos críticos nas malhas não teve qualquer efeito devido aos resultados estarem já estabilizados.



6 Conclusões

No decurso deste trabalho, foi possível conhecer e analisar alguns dos conceitos em que assentam o dimensionamento, a conceção e a construção de um quadro de uma bicicleta.

As simulações preliminares efetuadas no *software Abaqus*[®] (em que os tubos constituintes da estrutura, por simplificação, se aproximam a elementos de viga), considerando um quadro de dimensões fixas, fabricado em qualquer um dos materiais em estudo (aço, fibra de carbono, titânio e alumínio), permitiram compreender que o valor de 0,32 mm poderia coerentemente ser aceite como critério de deslocamento vertical máximo admissível, após aplicação de uma carga vertical de módulo 4704 N.

No domínio do dimensionamento dos perfis tubulares (estrutura distinta para todos os materiais), concluiu-se que as estruturas fabricadas nos materiais mais rígidos, são aquelas que obrigam a um menor volume e, conseqüentemente, paredes tubulares menos espessas. Contudo, isso não implica que a mesma ilação possa ser associada à análise do peso, visto que o quadro em fibra de carbono se revela uma exceção, na medida em que consegue ser 3 vezes mais leve que qualquer dos outros quadros de bicicleta em estudo (que apresentam pesos semelhantes, embora o de aço suporte bastante mais carga e tenha menor volume). Tornou-se ainda possível, determinar que o quadro da bicicleta que se tornaria mais económico seria o de aço, ao invés do de titânio, que se mostraria o mais dispendioso.

No que respeita à análise de sensibilidades realizada ao quadro em aço, as discretizações efetuadas permitiram verificar que os elementos B31 são mais sensíveis ao número de nós adotado que os B33, pelo que no primeiro caso a tensão de *Von Mises* máxima tende para um valor ligeiramente inferior ao inferido pela simulação com elementos B33, e no segundo caso esta permanece estável (sendo quase independente do número de nós). Em ambos os casos, a tensão máxima não excede a tensão de cedência do material. Porém, e embora não existam quaisquer cálculos analíticos (inadequados, devido à complexidade da estrutura), é de esperar que os resultados mais fidedignos sejam relatados pela análise com elementos B33, já que são menos sensíveis à variação do número de nós, fruto do maior número de integrações por ponto.

Simultaneamente, ao reduzir localmente o espaçamento entre nós (nas zonas críticas), demonstrou-se que esta alteração não é significativamente alterada com o aumento do



número de nós. A mesma analogia pode também aplicar-se ao estudo do deslocamento vertical.



7 Bibliografia

- [1] Graney J. (2010). "Mountain Bike Company Uses FEA to Design Fast Bikes Faster". <http://www.designworldonline.com/mountain-bike-company-uses-fea-to-design-fast-bikes-faster/> (acedido a 12 de Abril de 2014).
- [2] Reynolds Technology FAQ, <http://reynoldstechnology.biz/faqs/materials/2> (acedido a 12 Abril 2014).
- [3] Ramos, A. (2013) "Conheça as ligas utilizadas na construção dos quadros de alumínio" <http://mtbbrasil.com.br/2013/10/11/conheca-as-ligas-utilizadas-na-construcao-dos-quadros-de-aluminio/> (acedido a 15 de abril de 2014).
- [4] Casa Nova Adventures. "Bike Frame Technology Info" <http://casanovasadventures.com/catalog/bike/p2014.htm#.U1oJlPldUrU> (acedido a 15 de abril de 2014).
- [5] Hillbubba. <https://www.flickr.com/photos/45758191@N04/5646424657/> (acedido a 12 de abril e 2014)
- [6] Brooks (2013). "Reynolds 531 Classic Tubes". <http://bikeretrogrouch.blogspot.pt/2013/12/reynolds-tubing.html> (acedido a 12 de Abril de 2014).
- [7] Matt Churches. <https://www.flickr.com/photos/bigmatt17073/1128829885/> (acedido a 12 de abril de 2014)
- [8] Aerospace Specification Metals Inc.: Aluminum 7075-T6 <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075T6> (acedido a 12 de abril de 2014)
- [9] Performance Composites: Mechanical Properties of Carbon Fibre Composite Materials http://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties_2.asp (acedido a 10 de abril de 2014)
- [10] Aircraft Materials. "Titanium Alloy Grade 9 / Ti-3Al-2.5V" <http://www.aircraftmaterials.com/data/titanium/ti3al2-5v.html> (acedido a 12 de abril de 2014)
- [11] Aircraft Materials. "Titanium Ti-3Al-2.5V, alpha annealed" <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MTA321> (acedido a 12 de abril de 2014)
- [12] Bicycle Blue Book. "2007 Litespeed Ghisallo (Force)" <http://www.bicyclebluebook.com/searchlistingdetail.aspx?id=3030385> (acedido a 14 de abril de 2014)
- [13] Peterson, Leisha A., Londry., Kelly J. (1986) "Finite-Element Structural Analysis: A New Tool for Bicycle Frame Design". Bike Tech Magazine. Vol. 5 No.2. Disponível também em <http://www.sheldonbrown.com/rinard/fea.htm> (acedido a 12 de abril de 2014)
- [14] Granta CES Edupcack 2014.



- [15] Juvinall, R.C. (1967) "Engineering Considerations of Stress and Strength". McGraw-Hill.
- [16] RoyMech Fatigue Notes.
http://www.roytech.co.uk/Useful_Tables/Fatigue/Fatigue.html Acedido a 12 de Abril de 2014.
- [17] de Castro, P.T. "Introdução do Dimensionamento à Fadiga"
- [19] Mechanical and Hardgoods Lab Test Report <http://www.mekkem-parts.com/image/RFM-MF18-2012-EN14781Frame.pdf> acedido a 13 de Abril de 2014 p.4
- [20] Bike Testing Inc. <http://www.biketesting.com/TestList.html> (acedido a 14 de abril de 2014).
- [21] Cervélo Forum. <http://forums.cervelo.com/forums/p/8604/59658.aspx> (acedido a 14 de Abril de 2014)
- [22] Lindsey, J. "Guide to Power Meter Metrics" <http://www.bicycling.com/training-nutrition/training-fitness/guide-power-meter-metrics> acedido a 13 de Abril de 2014
- [23] Wilson, David Gordon; Jim Papadopoulos (2004). *Bicycling Science* (Third ed.). Massachusetts Institute of Technology.p. 343.ISBN0-262-23111-5.
- [24] Phil Sneiderman Homewood (August 30, 1999). "Pedal Power Probe Shows Bicycles Waste Little Energy". *Johns Hopkins Gazette*. Archived from the original on 1 February 2010. Retrieved 2010-02-21.
- [25] Wilson, David Gordon; Jim Papadopoulos (2004). *Bicycling Science* (Third ed.). The MIT Press.p. 318.ISBN0-262-73154-1. "When new, clean, and well-lubricated, and when sprockets with a minimum of 21 teeth are used, a chain transmission is highly efficient (at a level of maybe 98.5 percent or even higher)."
- [26] "About Frame Stiffness – What is Stiff?" <http://blog.velocite-bikes.com/2013/04/about-frame-stiffness-what-is-stiff/#sthash.GN8JeAlk.dpbs> (acedido a 13 de Abril de 2014).
- [27] Tour International. http://tour-int.com/?page_id=101 (acedido a 13 de abril de 2014).
- [28] Major, V. (2011) "Bicycle Stiffness: Why Does it Matter?"
- [29] Cervelo. <http://www.cervelo.com/en/engineering/core-design-features.html?category=stiffness> (acedido a 13 de abril de 2014).
- [30] Brown, S. (2003) "Frame Materials for the Tourist". *Adventure Cyclist*, (Abril), p.34.
<http://www.adventurecycling.org/default/assets/resources/framematerials.pdf> (acedido a 13 de abril de 2014).

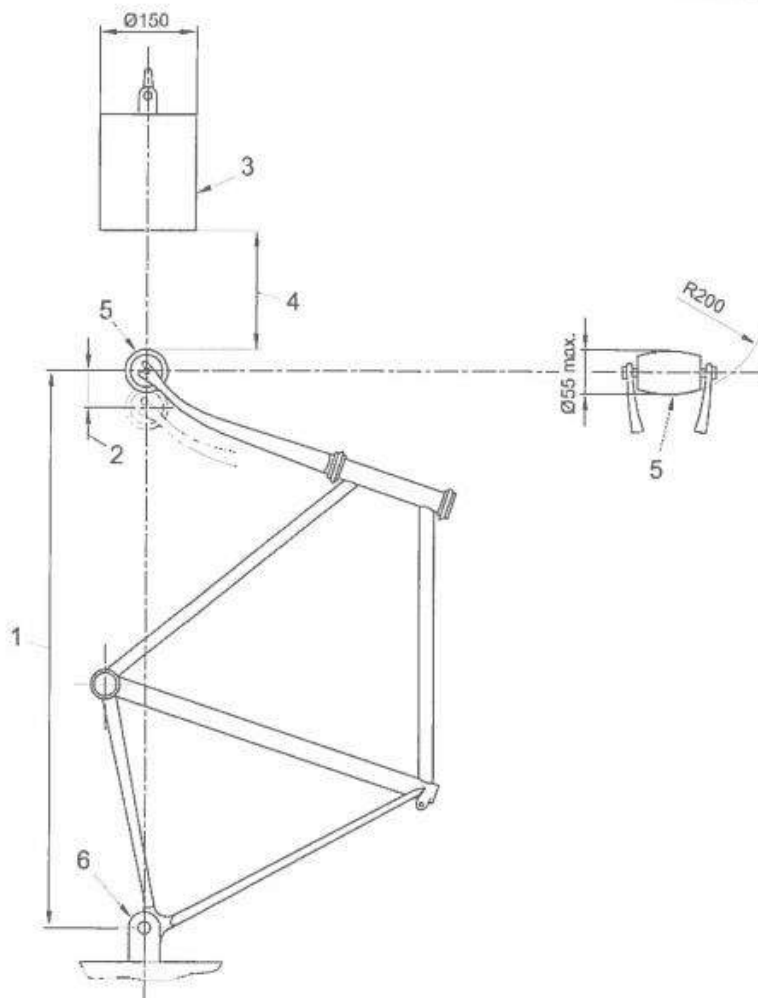


Anexo A

NP
EN 14781
2006

p. 50 de 91

Dimensões em milímetros



Legenda:

- 1 Distância entre-eixos
- 2 Deformação permanente
- 3 Peso de 22,5 kg
- 4 Altura de queda de 212 mm
- 5 Rolo de massa (1 kg max)
- 6 Montagem rígida para ligação do acessório do eixo de trás

Figura 25 – Conjunto quadro-forqueta – Ensaio de impacto (queda de uma massa)



4.8.2.2 Requisitos

Quando ensaiado de acordo com o método descrito em 4.8.2.3, não devem existir fissuras visíveis ou roturas no conjunto e não deve ocorrer separação de qualquer parte da suspensão.

A deformação permanente medida entre os eixos das rodas (entre-eixo - ver 3.23) não deve exceder os seguintes valores:

- a) 30 mm quando está montado com a forqueta;
- b) 15 mm quando a forqueta é substituída por uma barra rígida.

4.8.2.3 Método de ensaio

Montar um rolo na forqueta, com uma massa de mais ou menos 1 kg e com as dimensões conforme aquelas que são indicadas na Figura 26. Se for utilizada uma barra de aço, em substituição da forqueta, a barra deve ter uma extremidade arredondada equivalente à forma do rolo. Fixar o conjunto quadro/forqueta ou quadro/barra verticalmente, apertando numa base rígida através dum acessório no eixo de trás, tal como indicado na Figura 25.

Pousar o peso com a massa de 22,5 kg, no rolo colocado na extremidade da forqueta ou na extremidade arredondada da barra rígida, e medir a distância entre eixos. Levantar o peso para uma altura de 212 mm entre o rolo e a base do peso e libertá-lo contra o rolo ou a barra de aço, num ponto em linha com o centro da roda na direcção da inclinação da forqueta ou da inclinação da barra. O peso vai saltar, o que é normal. Quando o peso voltar a pousar no rolo ou na barra rígida, medir novamente a distância entre eixos.

4.8.3 Conjunto quadro-forqueta – Ensaio de impacto (queda do quadro)

4.8.3.1 Generalidades

Quando é ensaiada uma bicicleta completa, o ensaio deve ser realizado num quadro com a forqueta apropriada.

Quando o quadro é ensaiado separadamente, se a forqueta prevista para o quadro não está disponível, é admissível realizar o ensaio com uma forqueta que esteja conforme com os requisitos do ensaio de impacto da forqueta descrito em 4.9.5.

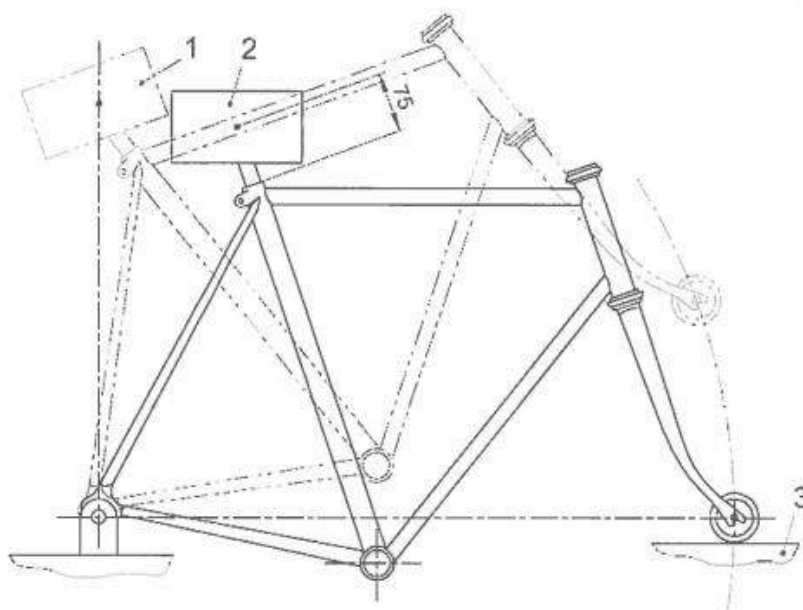
Quando está instalada uma forqueta com suspensão, o conjunto deve ser instalado com uma forqueta conforme com os requisitos do ensaio de impacto da forqueta descrito em 4.9.5. Quando o quadro possui um sistema de suspensão traseiro, fixar a suspensão na posição equivalente àquela que ocorre com um ciclista de 80 kg, sentado na posição normal de condução. Se o tipo de sistema de suspensão não permite ser bloqueado, então substituir a unidade mola/amortecedor por uma ligação sólida, de dimensões apropriadas e extremidades idênticas às extremidades da unidade mola/amortecedor.



NP
EN 14781
2006

p. 52 de 91

Dimensões em milímetros



Legenda:

- 1 Massa verticalmente acima do eixo de trás
- 2 Massa de 70 kg
- 3 Bigorna de aço

Figura 26 – Conjunto quadro-forqueta – Ensaio de impacto (queda do quadro)

4.8.3.2 Requisitos

Quando ensaiado de acordo com o método descrito em 4.8.3.3, não devem existir fissuras visíveis ou roturas no conjunto e após o segundo impacto, a deformação permanente, medida entre o eixo da roda (entre-eixo - ver 3.23) não deve exceder 15 mm para o conjunto quadro-forqueta e não deve ocorrer separação de qualquer parte do sistema de suspensão.

4.8.3.3 Método de ensaio

Realizar o ensaio no mesmo conjunto que foi utilizado no ensaio descrito em 4.8.3.1.

Tal como indicado na Figura 26, montar o conjunto quadro/forqueta através do seu eixo traseiro, de forma que possa rodar livremente no plano vertical, em torno do eixo de trás. A forqueta da frente deve estar apoiada sobre uma bigorna plana em aço, de forma que o quadro permaneça na sua posição normal de utilização. Colocar, de forma rígida, uma massa de 70 kg no espigão do selim, tal como mostrado na Figura 26, com o centro de gravidade a 75 mm ao longo do eixo do espigão do selim, a partir do ponto de inserção.

Medir a distância entre-eixos com a massa instalada. Rodar o conjunto em torno do eixo de trás até atingir o ponto de equilíbrio, depois deixar o conjunto cair em queda livre sobre a bigorna.



NP
EN 14781
2006

p. 53 de 91

Repetir o ensaio e medir novamente a distância entre-eixos com a massa instalada e o rolo pousado sobre a bigorna.

4.8.4 Quadro – Ensaio de fadiga com forças de pedalar

4.8.4.1 Generalidades

Nos ensaios com quadros de suspensão com juntas de rotação, afinar a mola, a pressão do ar, ou o amortecedor para fornecer a resistência máxima, ou, para um amortecedor pneumático, no qual a pressão do ar não possa ser ajustada, substituir a unidade de suspensão por uma ligação rígida, assegurando que as suas extremidades e rigidez lateral simulam exactamente as originais. Para os quadros com suspensão, nos quais as escoras inferiores não tenham junta articulada mas fixação flexível, assegurar que todos os amortecedores estejam afinados para garantir a resistência mínima, a fim de assegurar a realização adequada do ensaio do quadro.

4.8.4.2 Requisitos

Quando ensaiado de acordo com o ponto 4.8.4.3, não devem existir fissuras visíveis ou roturas no quadro e não deve haver separação de nenhuma parte do sistema de suspensão. Para quadros em fibra de carbono, a deflexão máxima durante o ensaio, no ponto onde as forças de ensaio são aplicadas, não deve aumentar mais de 20 % em relação ao valor inicial.

4.8.4.3 Método de ensaio

Utilizar para o ensaio um conjunto quadro/forqueta novo, com o tubo de testa e os rolamentos normais. A forqueta da frente pode ser substituída por uma forqueta de substituição com o mesmo comprimento e que tenha pelo menos a mesma resistência que a forqueta original.

NOTA: Se é utilizada a forqueta original, são admissíveis falhas da forqueta, conseqüentemente, recomenda-se que a forqueta de substituição seja mais rígida e mais resistente que a forqueta original.

Quando o quadro é convertível de quadro de homem para quadro de senhora por remoção de uma barra, o ensaio deve ser realizado com a barra retirada.

Montar o conjunto do quadro na base, conforme indicado na Figura 27, com a forqueta de substituição fixa pelo seu eixo a uma base rígida com altura R_w (o raio do conjunto roda/pneu de ± 30 mm) e com o cubo livre a girar no eixo. Fixar as pates do quadro através de um eixo rígido, ligação vertical com a mesma altura que a montagem rígida da ligação vertical da frente. A conexão superior da ligação deve estar livre para girar em torno do eixo axial, mas possuindo uma rigidez no plano lateral, e a extremidade inferior deve estar ligada através de uma junta articulada.

Colocar um crenque e a roda pedaleira (ou um crenque e o conjunto da roda pedaleira) com o conjunto da corrente, ou preferivelmente, um conjunto de substituição do centro pedaleiro robusto e rígido, tal como mostrado na Figura 27 e descrito em a) ou b) a seguir:

- a) se é utilizado um conjunto crenque/pedaleira, inclinar ambos os crenques para a frente e para baixo com um ângulo de 45° (precisão de $\pm 0,5^\circ$) com a horizontal e fixar a extremidade da frente da corrente na roda pedaleira do meio se existirem três, na roda pedaleira mais pequena se existirem duas ou, na única roda pedaleira. Ligar a extremidade traseira da corrente no eixo de trás e perpendicular ao eixo axial.



NP
EN 14781
2006

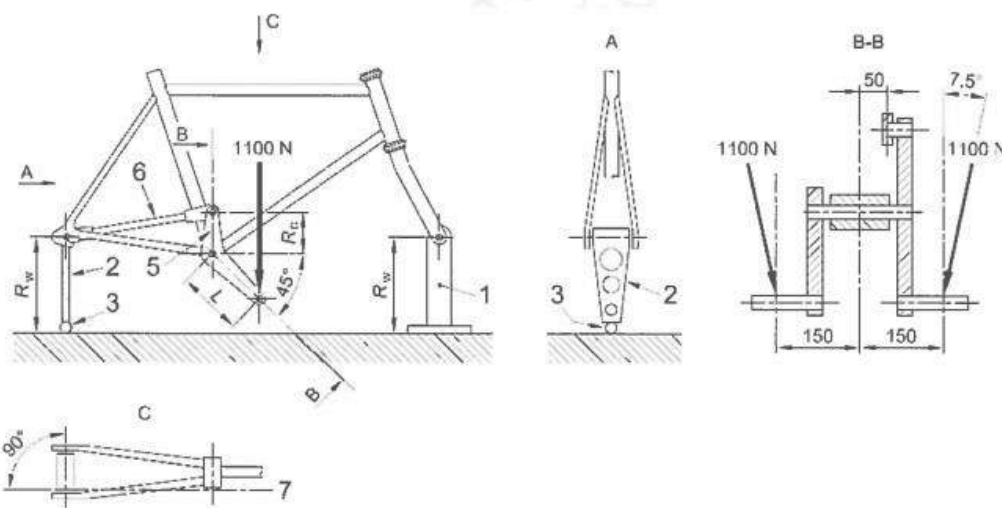
p. 54 de 91

b) se é utilizado um conjunto adaptador (tal como mostra a Figura 27), assegurar que o conjunto roda livremente sobre o eixo do centro pedaleiro e ambos os crenques de substituição têm 175 mm de comprimento (L) e que ambos estão inclinados para a frente e para baixo com um ângulo de 45° (precisão de $\pm 0,5^\circ$) com a horizontal. Fixar a posição do crenque de substituição pelo braço-alavanca vertical (o qual substitui a roda pedaleira) e uma barra de ligação com juntas articuladas em ambas as extremidades e as quais estão ligadas ao eixo traseiro perpendicularmente ao eixo do eixo traseiro. O comprimento do braço alavanca vertical (R_c) de ser de 75 mm e o eixo da barra de ligação deve estar paralelo a este e a 50 mm do plano vertical da linha central do quadro.

Submeter o eixo do pedal (ou componente equivalente de ensaio) a uma força repetida de 1100 N, numa posição de 150 mm a partir da linha central do quadro, num plano vertical transverso e inclinado de $7,5^\circ$ (precisão entre $\pm 0,5^\circ$), relativamente ao plano longitudinal do quadro, tal como mostrado na Figura 27. Durante a aplicação destas forças, assegurar que a força no “eixo do pedal” reduza em 5 % ou menos da força máxima, antes de iniciar a aplicação da força de ensaio no outro “eixo de pedal”.

Aplicar a força de ensaio durante 100 000 ciclos, em que um ciclo de ensaio consiste na aplicação e remoção das duas forças de ensaio.

Dimensões em milímetros



Legenda:

- R_w Altura da montagem rígida e ligação vertical
- R_c Comprimento do braço-alavanca vertical (75 mm)
- L Comprimento do crenque de substituição (175 mm)
- 1 Montagem rígida
- 2 Ligação vertical
- 3 Junta articulada
- 4 Conjunto adaptador
- 5 Braço-alavanca vertical
- 6 Barra de ligação
- 7 Linha central da barra de ligação

Figura 27 – Quadro – Ensaio de fadiga com forças de pedalar



4.8.5 Quadro – Ensaio de fadiga com forças horizontais

4.8.5.1 Generalidades

Todos os tipos de quadros devem ser submetidos a este ensaio.

Não é necessária a realização do ensaio na forqueta original, pode ser utilizada uma forqueta de substituição com o mesmo comprimento da forqueta prevista, estando esta correctamente instalada nos rolamentos da série de direcção. Para forquetas com suspensão, bloquear a forqueta com um comprimento equivalente ao que é provocado por um ciclista com 80 kg sentado na bicicleta, ajustando o conjunto mola/amortecedor ou por um meio externo.

Quando um quadro com suspensão tem suportes ou sistemas articulados ajustáveis, para variar a resistência da bicicleta, de acordo com as forças de contacto com o piso, ou para variar a altura da bicicleta, ajustar a posição destes componentes de forma a assegurar a maximização das forças no quadro.

4.8.5.2 Requisitos

Quando ensaiado de acordo com o método descrito em 4.8.5.3, não devem existir fissuras visíveis ou roturas no quadro e não deve haver separação de nenhuma das partes do sistema de suspensão.

Para quadros em fibra de carbono, a deflexão máxima durante o ensaio em cada direcção, medida relativamente à posição média, não deve aumentar mais de 20 % em relação ao valor inicial.

4.8.5.3 Método de ensaio

Para um quadro rígido, montar o quadro na sua altura normal e fixar através das partes do quadro, de modo a não restringir o movimento de rotação (isto é, preferencialmente através do eixo de trás), tal como mostrado na Figura 28.

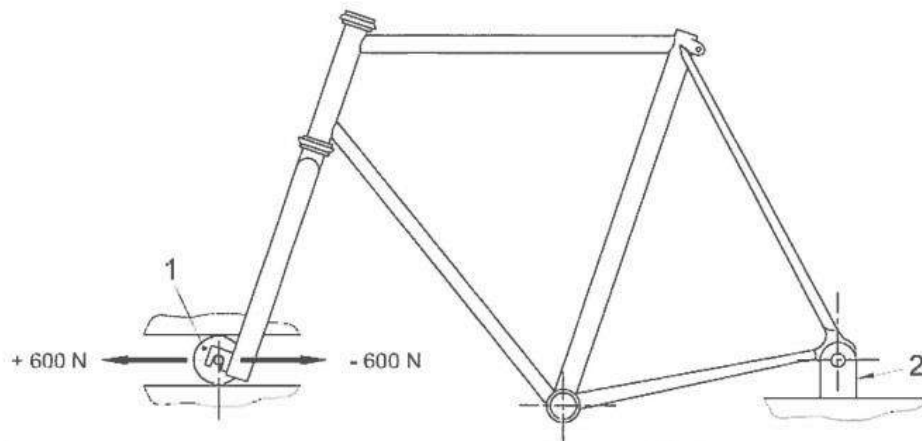
Para os quadros equipados com um sistema de suspensão traseira, bloquear o movimento das partes do quadro para uma posição equivalente àquela que é provocada por um ciclista de 80 kg sentado na bicicleta. Esta posição deve ser obtida através de bloqueio da unidade de suspensão numa posição apropriada ou, se o tipo de sistema de suspensão não permite ser bloqueado, então o sistema de suspensão pode ser substituído por uma ligação sólida de tamanho adequado ao comprimento em compressão. Assegurar que os eixos da frente e de trás estão alinhados horizontalmente, tal como mostra a Figura 28.

Aplicar ciclos dinâmicos, com uma força horizontal para a frente de +600 N e de -600 N na direcção horizontal para trás, nas ponteiras da forqueta da frente, alinhada com os eixos da frente e de trás, durante 100 000 ciclos, tal como mostra a Figura 28, com o movimento vertical da forqueta da frente restringido mas com movimento livre para a frente e para trás, na direcção de aplicação das cargas. A frequência máxima de ensaio não deve exceder os 25 Hz.



NP
EN 14781
2006

p. 56 de 91



Legenda:

- 1 Rolo de deslocamento livre
- 2 Montagem rígida para fixação articulada do eixo de trás

Figura 28 – Quadro – Ensaio de fadiga com forças horizontais

4.9 Forqueta da frente

4.9.1 Generalidades

As secções 4.9.2, 4.9.4, 4.9.5 e 4.9.6, aplicam-se a todos os tipos de forquetas.

Nos ensaios de resistência, secções 4.9.4, 4.9.5, 4.9.6 e 4.9.7, uma forqueta com suspensão deve ser ensaiada no seu comprimento livre, condição de comprimento sem carga.

4.9.2 Meios de posicionamento do eixo e retenção da roda

As ponteiras ou outro meio de posicionamento do eixo da roda da frente na forqueta, devem estar alinhadas de forma que quando o eixo ou os cones são pressionados contra o fundo das aberturas das ponteiras, a roda da frente permaneça centrada na forqueta.

A forqueta da frente e a roda, devem também cumprir os requisitos das secções 4.10.4 e 4.10.5.

4.9.3 Forqueta com suspensão - Requisitos especiais

4.9.3.1 Requisitos para garantir segurança em caso de falha

A concepção da forqueta deve ser tal que, em caso de falha das molas ou amortecedores, o pneu não deve entrar em contacto com a barra de suspensão da forqueta, nem os componentes da forqueta se devem separar.