

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

PEDRO ARTHUR NOVAES MAGALHÃES

**CONFECÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL
DE QUADROS DE BICICLETA DE MADEIRA**

Belo Horizonte
2016

Pedro Arthur Novaes Magalhães

CONFECÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE QUADROS DE BICICLETA DE MADEIRA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre em Engenharia de Estruturas.

Área de concentração: Sistemas construtivos

Orientador: Edgar V. Mantilla Carrasco

BELO HORIZONTE
Escola de Engenharia da UFMG
2016

M188c

Magalhães, Pedro Arthur Novaes.

Confecção e avaliação do desempenho estrutural de quadros de bicicleta de madeira [manuscrito] / Pedro Arthur Novaes Magalhães. – 2016.

84 f., enc.: il.

Orientador: Edgar V. Mantilla Carrasco.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui anexos.

Bibliografia: f. 80-83.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Bicycletas - Teses. 3. Madeira - Estruturas - Teses. I. Carrasco, Edgar Vladimiro Mantilla. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624(043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Edgar V. M. Carrasco, pela dedicação, confiança e aprendizado ao longo do processo;

aos meu pais e minhas irmãs, pela cumplicidade e apoio;

ao Márcio Pinto, pela contribuição na confecção do protótipo;

ao Rodrigo, pelo companheirismo e ajuda na CNC;

à Laura, Guilherme, Thiago, Thaís e Elisa, pelo carinho e presença;

à Lara, que importou as fresas;

à Eduardo Shimano, que ajudou com as peças de alumínio;

à Lyptus, pela doação das madeiras;

à CAPES, por conceder a bolsa de estudos; à FAPEMIG e ao CNPq pela auxílio à pesquisa;

à coordenação, aos professores, aos colegas, e às secretárias, Inês e Patrícia, do PROPEEs; e aos técnicos do LAEES, Afonso e Geraldo, pela disponibilidade e atenção.

RESUMO

Atualmente tem-se utilizado a madeira em objetos que exigem matéria-prima com excelentes qualidades, objetos nos quais ela não era comercialmente empregada, como quadros de bicicletas, óculos e relógios. Quando bem utilizada, a madeira apresenta excelentes qualidades mecânicas, podendo ser uma alternativa ao emprego de materiais com menos apelo ambiental, como metálicos e compósitos; para isso a madeira deve receber tratamento adequado, que seja bem conhecido seu comportamento estrutural e as técnicas de marcenaria. Este estudo avalia o uso e desempenho estrutural da madeira em quadros de bicicleta, componente que apresenta elevadas solicitações mecânicas dinâmicas. Foi confeccionado um protótipo de quadro de bicicleta de madeira de eucalipto de reflorestamento e estudou-se o seu desempenho estrutural a partir de ensaio experimental proposto pela ABNT, juntamente com a técnica de extensometria. A madeira apresentou excelente desempenho quando empregada no quadro de bicicleta, com tensões axiais em seus componentes bem inferiores às tensões de ruptura do material.

Palavras-chave: bicicleta. madeira. sistema construtivo.

ABSTRACT

Currently it has used wood in objects that require raw material with excellent qualities, objects in which it was not used commercially, such as bicycle frames, sunglasses and watches. When properly used, the wood has excellent mechanical properties and can be an alternative to the use of materials with less environmental appeal, such as metallic and composite; for this wood should receive appropriate treatment, which is well known its structural behavior and joinery techniques. This study evaluates the use and structural performance of wood in bicycle frames, component that provides high dynamic mechanical stresses. A bicycle frame prototype of reforestation eucalyptus wood was made and studied their structural performance from experimental testing proposed by ABNT, along with the strain gage technique. Wood showed excellent performance when used in the bicycle frame, with axial stresses on their components and lower the ultimate stress of the material.

Keywords: bicycle. wood. constructive system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: a) e b) Quadros com pouca rigidez estrutural; c) quadro com peças de perfil retangular.	15
Figura 2: Bicicletas: a) Renovo, b) Axalco, c) Connor e d) Woodelo.	16
Figura 3: Sistema de coordenadas de forças modificado a partir de Hull (1999).	20
Figura 4: Bicicleta instrumentalizada com dinamômetros e sistema de aquisição de dados portátil.	21
Figura 5: principais medidas e ângulos da geométricas da bicicleta.	25
Figura 6: Principais medidas do protótipo.	27
Figura 7: Componentes principais do quadro.....	29
Figura 8: Componentes do quadro com metade explodida.	29
Figura 9: Layout de laminação de uma metade do triângulo principal; as setas indicam a direção das fibras da madeira.....	30
Figura 10: Corte das lâminas na serra de fita.	36
Figura 11: Aparelhamento final no desengrosso.	36
Figura 12: Lâminas cortadas em formato trapezoidal	37
Figura 13: CNC a laser utilizada para corte da prensa e dos gabaritos.....	38
Figura 14: Base da prensa do triângulo principal.....	38
Figura 15: Prensa dos apoios.....	39
Figura 16: Gabarito para corte dos sulcos.	40
Figura 17: Gabarito para corte do perfil do triângulo principal.	41
Figura 18: Tubo de direção com fresagem nas extremidades.	42
Figura 19: Tubo do selim com fenda para aperto da presilha.	42
Figura 20: Tubo do movimento central com rosca interna.	43

Figura 21: Rosca interna na gancheira.	44
Figura 22: Chanfro de 45° nas bordas do furo da gancheira.	44
Figura 23: Acerto dos ângulo de corte das lâminas.	45
Figura 24: Laminação do triângulo principal.	46
Figura 25: Cunhagem das peças no sentido transversal.	46
Figura 26: Prensa com as barras rosqueadas.	47
Figura 27: Lâminas desenformadas.	47
Figura 28: Lâminas dos apoios já com cola.	48
Figura 29: Lâminas dos apoios prensada.	48
Figura 30: Laminado curvado do apoio.	49
Figura 31: Tupia posicionada para corte dos sulcos para encaixe dos tubos.....	50
Figura 32: Detalhe final do corte do sulco.	50
Figura 33: Retirada do exceso de borda com serra tico-tico.....	51
Figura 34: Marcação feita nas lâminas para centralizar o desenho colado sobre elas.	52
Figura 35: Desenho do perfil dos apoios colados sobre as lâmina.....	53
Figura 36: Corte dos perfis dos apoios na serra de fita.....	53
Figura 37: Finalização do perfil do apoio na lixadeira.	54
Figura 38: Apoios com perfil finalizados.	54
Figura 39: Marcação para rebaixo no triângulo principal.	55
Figura 40: Rebaixo feito com tupia. A guia está presa com sargentos vermelhos. ..	56
Figura 41: Pré-montagem para marcação do rebaixo no apoio para encaixe da gancheira.....	57
Figura 42: Rebaixo feito com formão para encaixe da gancheira.....	57

Figura 43: Gancheira encaixada no apoio (ainda sem os furos dos parafusos).	58
Figura 44: Gancheiras coladas e aparafusadas.	58
Figura 45: Colagem das duas metades do triângulo principal.	59
Figura 46: Prensagem do triângulo principal.	60
Figura 47: Vazamento do excesso do adesivo epoxi.	60
Figura 48: Colagem do apoio da corrente.	61
Figura 49: Colagem do apoio do selim.	61
Figura 50: Bicicleta montada com quadro de madeira.	62
Figura 51: Ensaio de impacto contra conjunto - ABNT NBR 14714.	64
Figura 52: Ensaio de queda do conjunto - ABNT NBR 14714.	65
Figura 53: Ensaio de fadiga com forças aplicadas nos pedais - EN14781.	66
Figura 54: Ensaio de fadiga com forças horizontais - EN14781.	66
Figura 55: Ensaio com força aplicada no tubo do movimento central.	67
Figura 56: Localização dos extensômetros; medidas tomadas no eixo das peças. .	69
Figura 57: Extensômetros colados ao quadro - ainda sem a fiação.	70
Figura 58: Extensômetro na frente do tubo de direção na direção transversal.	70
Figura 59: Quadro com extensômetros conectados.	71
Figura 60: Célula de carga acoplada ao peso; garfo com rolete de aço; gabarito para medir distância de queda do peso.	71
Figura 61: Quadro posicionado no suporte para ensaio.	72
Figura 62: Gráfico de força aplicada em função do tempo; altura de queda de 18cm. .	73
Figura 63: Tensões com altura de queda de 18cm.	74
Figura 64: Deformações com altura de queda de 18cm.	75

Figura 65: Valores máximos de força de queda do pesos para as diferentes alturas....
76

Figura 66: Valores máximos de tensões medidos pelos diferentes extensômetros,
para as diferentes alturas de queda do peso.77

Figura 67: Valores máximos de deformação medidos pelos diferentes
extensômetros, para as diferentes alturas de queda do peso.77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quantitativo de lâminas.	31
Tabela 2: Tubos e chapas de alumínio utilizados.....	32
Tabela 3: Propriedades mecânicas da ligas de alumínio.	32
Tabela 04: Tubos e chapas da Nova Cycles Supply.....	33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Considerações iniciais	12
1.2 Utilização da madeira em quadros de bicicleta.....	14
1.3 Objetivos	18
2 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DOS QUADROS DE BICICLETA	19
2.1 Discretização plana dos esforços atuantes.....	20
2.2 Ensaaios experimentais	21
3 PROJETO DO QUADRO	24
3.1 Aspectos gerais da geometria dos quadros de bicicleta	24
3.2 Principais medidas do protótipo	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 Materiais.....	28
4.2 Processo de confecção do protótipo	35
4.3. Métodos de ensaios	63
5 ENSAIO	69
5.1 Instrumentação	69
5.2 Resultados do ensaio experimental	73
6 CONCLUSÕES.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
ANEXOS	84

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Os atuais problemas de mobilidade urbana nas grandes cidades estão fazendo com que as pessoas optem pela bicicleta como alternativa de transporte diário, assim como tem aumentado a demanda para uso de lazer e esporte. Essa procura crescente deve ser acompanhada por orientações àquelas pessoas que estão começando a utilizar a bicicleta, ainda não familiarizadas, por exemplo, com os tipos de equipamentos adequados para a finalidade de uso pretendido. Há diversos tipos de bicicletas disponíveis no mercado, para os mais variados usos. Entretanto, muitas pessoas compram bicicletas inadequadas e interrompem a atividade, acreditando que o problema se deve à falta de aptidão, e não na inadequação do equipamento às suas necessidades.

Os fabricantes e vendedores têm um papel importante no desestímulo aos iniciantes quando, por exemplo, insistem na venda de equipamentos e acessórios desenvolvidos para competições que não são necessários para pessoas comuns. Como enfatiza Magnani (2015), a *Union Cycliste Internationale* (UCI) limita o desenvolvimento tecnológico das bicicletas, com o argumento de que a competição deve se dar entre os ciclistas e não entre as bicicletas. Para o esporte essa resolução é bastante interessante, mas não é para o usuário comum, que tem a necessidade de um equipamento mais eficiente.

A pesquisa em desenvolvimento de bicicletas deve contribuir para que sejam disponibilizadas informações adequadas para os ciclistas amadores, pois é escassa a produção científica nacional a respeito do funcionamento de bicicletas. Isso ajudaria os consumidores a cobrar dos fabricantes o desenvolvimento de bicicletas que realmente atendam às especificidades do usuário comum, em vez de desenvolver bicicletas exclusivamente para o uso em competições.

No Brasil não há uma produção comercial de quadros de madeira, apesar de nos últimos anos ter havido um aumento de construtores de quadros artesanais feitos sob medida. Nos países com maior disponibilidade de recursos tecnológicos esse tipo de profissão já está bastante consolidado. Geralmente são confeccionadas bicicletas com tubos metálicos, principalmente com aço cromo-mobdilênio¹, acompanhado de serviços de *bikefit*². Para a produção nacional, geralmente os tubos e peças metálicas são importados e já vêm com as dimensões apropriadas para a construção dos quadros – muitos têm, por exemplo, variação de espessura da parede do tubo para reduzir o peso da peça onde ela é menos solicitada.

Essas bicicletas de aço cromo-mobdilênio são um pouco mais pesadas que as bicicletas de titânio, fibra de carbono e alumínio, mas têm uma vida útil maior, pois suportam maiores impactos, o que torna bastante recomendável para o usuário comum. Os construtores que trabalham com quadros sob medida de aço cromo-mobdilênio o fazem no nicho de mercado em que não há uma corrida desenfreada por leveza do quadro. Muitas vezes, a geometria do quadro é mais importante para maior eficiência de pilotagem do que o seu peso próprio.

Os usuários - pessoas muito altas ou baixas, por exemplo – optam por esse tipo de serviço porque necessitam de uma bicicleta com a geometria apropriada para o seu porte físico, e os grandes fabricantes geralmente oferecem poucas opções de tamanho de quadros³. Além, é claro, de vender produtos montados com peças relativamente caras que não atendem aos usuários urbanos, como, por exemplo, freios a disco e suspensão traseira.

¹ As bicicletas feitas com aço cromo-mobdilênio têm geralmente a metade do peso das bicicletas de aço carbono e duram mais devido a maior resistência a corrosão da liga.

² Bikefit é o ajuste da bicicleta ao ciclista levando em conta as características antropométricas. É importante para evitar lesões, melhorar o conforto e eficiência de pilotagem.

³ Os bons fabricantes de bicicletas geralmente têm a opção de comprar apenas o quadro e garfo, o que facilita montagens mais personalizadas.

1.2 Utilização da madeira em quadros de bicicleta

A madeira é um material que pode ser bem utilizado nessa demanda recente por bicicletas feitas sob medida. Suas propriedades mecânicas são de excelente qualidade, como a capacidade de absorção de impactos e vibrações, sem perder a rigidez imprescindível ao bom desempenho estrutural do conjunto. A madeira é um material com excelentes propriedades de resistência à fadiga, e segundo o Laboratório de Produtos Florestais (US, 1944):

“A madeira é menos sensível às cargas repetidas rapidamente do que são os materiais estruturais mais cristalinos (metais), resultando em um limite de resistência mais elevado em proporção à força máxima.” (pág. 40)

O esforço de fadiga está muito presente nas solicitações mecânicas nos quadros de bicicleta, e é um o esforço que mais causa danos ao longo da vida útil de um quadro.

Atualmente tem-se visto muitos lançamentos de bicicletas com quadros de madeira. Alguns têm seu principal apelo o design por ele mesmo, como se fosse algo absolutamente inovador. São bicicletas muito bonitas, que chamam muita atenção, mas que pecam na eficiência estrutural e, conseqüentemente na eficiência de pilotagem. Alguns quadros não possuem rigidez pela sua geometria (fig. 1, a e b), e parte da energia gasta pelo ciclista é absorvida na deformação do quadro.



Figura 1: a) e b) Quadros com pouca rigidez estrutural; c) quadro com peças de perfil retangular.

A despeito da suposta novidade no uso do material, sabe-se que as primeiras bicicletas foram construídas com madeira e reforçadas com componentes metálicos (Wilson, 2004; Herlihy, 2006), como nos primeiros veículos. Foi devido ao desenvolvimento da indústria metalúrgica e fabricação de perfis metálicos tubulares que a aplicação estrutural da madeira em bicicletas ficou por um longo período restrita à produção artesanal de *hobby*.

Alguns fabricantes estão apostando no desenvolvimento de quadros eficientes de madeira, como as empresas Renovo, Axalco, Connor e Woodelo⁴ (fig. 2). Cada fabricante possui um sistema construtivo próprio. De uma maneira geral, a Connor e a Woodelo constroem seus quadros a partir de madeiras maciças; a Axalco combina madeira maciça com alguns componentes laminados; e a Renovo utiliza madeira laminada.

Nesse cenário, destaca-se a Renovo, empresa que desenvolve modelos de bicicleta de alto desempenho, tecnologicamente competitivos com os quadros feitos com os materiais usualmente empregados. A empresa foi criada em 2007 por engenheiros mecânicos e designers, com larga experiência em trabalhos com madeira na indústria aeronáutica, que sustentam a opção por construir com madeira pelas suas propriedades mecânicas intrínsecas e não por serem entusiastas pelo material.

⁴ As empresas Renovo e Connor são norte-americanas; a Axalco é espanhola; e a Woodelo irlandesa.



Figura 2: Bicicletas: a) Renovo, b) Axalco, c) Connor e d) Woodelo.

O sistema construtivo da Renovo é bastante interessante pois com a laminação das peças possibilita a variação de direções das fibras da madeira. Isso ajuda na absorção dos esforços uma vez que a madeira tem grande resistência mecânica quando solicitada na direção das fibras e pouca - praticamente desprezável do ponto de vista estrutural - resistência quando solicitada perpendicularmente às fibras. Assim a variação de direção das fibras acompanha a variação de direções de esforços solicitantes no quadro, o que, conseqüentemente, ajudará na absorção de esforços nessas diversas direções. No seu sistema construtivo, a Renovo ainda faz uma fresagem interna das peças de madeira, para aliviar o seu peso próprio.

Portanto a madeira possui propriedades mecânicas que são apropriadas às solicitações de esforços às quais um quadro está submetido. Segundo o fabricante Renovo, suas bicicletas são testadas para possuírem rigidez torcional, momento no plano do quadro e peso pelo menos igual ao de uma *mountain bike* com tubos de alumínio Easton; e rigidez das bicicletas de fibra carbono.

A produção de quadros de madeira pode entrar no nicho de mercado de bicicletas por encomenda – no qual os ciclistas têm a possibilidade de escolher um equipamento de acordo com as suas medidas antropométricas - uma vez que na sua fabricação é difícil eliminar processos produtivos manufaturados, que prescindem de linha de montagem e processos industrializados. Ainda pode ser uma alternativa para incrementar a produção de bicicletas feitas sob medida sem a necessidade de se importar toda a matéria-prima necessária à confecção dos quadros, uma vez que os tubos de cromo-molibdênio e alumínio são todos importados.

Outro aspecto importante é que produtos de marcenaria com alto grau de complexidade no processo produtivo pode contribuir para fortalecer o ofício do marceneiro que se encontra atualmente com grandes alterações. Como analisa ANDRADE (2012), a introdução do MDF, *Medium Density Fiberboard*, no Brasil têm modificado o trabalho dos marceneiros, tirando seu ofício do campo da *construção* para inseri-lo no da simples *montagem*, com a conseqüente desvalorização do ofício.

1.3 Objetivos

O objetivo dessa dissertação é propor um sistema construtivo de um quadro de bicicleta de madeira e avaliá-lo estruturalmente a partir de ensaios experimentais. Busca-se analisar a viabilidade do processo produtivo de bicicletas com quadros de madeira.

Os objetivos específicos são:

- 1) Avaliar a viabilidade técnica da madeira de eucalipto em quadros de bicicletas.
- 2) Propor uma metodologia de fabricação de quadros de bicicletas de madeira laminada colada.
- 3) Verificar experimentalmente o comportamento mecânico de um quadro de bicicleta de madeira.

2 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DOS QUADROS DE BICICLETA

As referências do comportamento estrutural de quadros de bicicletas foram feitas a partir de estudos com quadros de materiais usualmente empregados, pois não foram encontradas publicações sistematizadas do emprego da madeira em quadros de bicicletas.

A geometria consagrada de dois triângulos para quadros, largamente empregada, será nosso referencial de desenho. Ela responde à um comportamento estrutural bastante satisfatório ao longo da história da bicicleta, tanto que a referência clássica para desenho e dimensionamento de bicicletas (SHARP 2011), com primeira edição em 1896, já fazia referência ao seu potencial.

A bicicleta possui uma estrutura leve que suporta um peso muito maior, o do ciclista. É um sistema caracterizado por equilíbrio fortemente dinâmico, e determinar o comportamento do carregamento em um quadro é tarefa bastante complexa (WILSON, 2004; BURROWS, 2008; XIANG 2011); as principais influências para o carregamento, variam segundo a forma de pilotagem, se mais ou menos agressivo, a velocidade, o terreno e a resposta de frenagem.

A geometria do quadro e dos componentes da bicicleta, irá influenciar fortemente na distribuição do carregamento e esforços solicitantes; assim como a escolha dos materiais influenciará no seu dimensionamento e desenho.

2.1 Discretização plana dos esforços atuantes

Uma discretização simplificada para estudo do carregamento no quadro é feita a partir do plano principal da bicicleta. Hull (1999) propõe um sistema de coordenadas para as forças (fig. 3), com forças aplicadas no pedal e no guidão; as forças de reação na gancheira⁵ traseira e na gancheira do garfo; e as forças do freio dianteiro – a força aplicada no selim é desprezada, pois, para uma pilotagem agressiva, o piloto fica praticamente de pé – para quantificação, do carregamento estrutural, reduzido ao plano da bicicleta, em uma *mountain bike*.

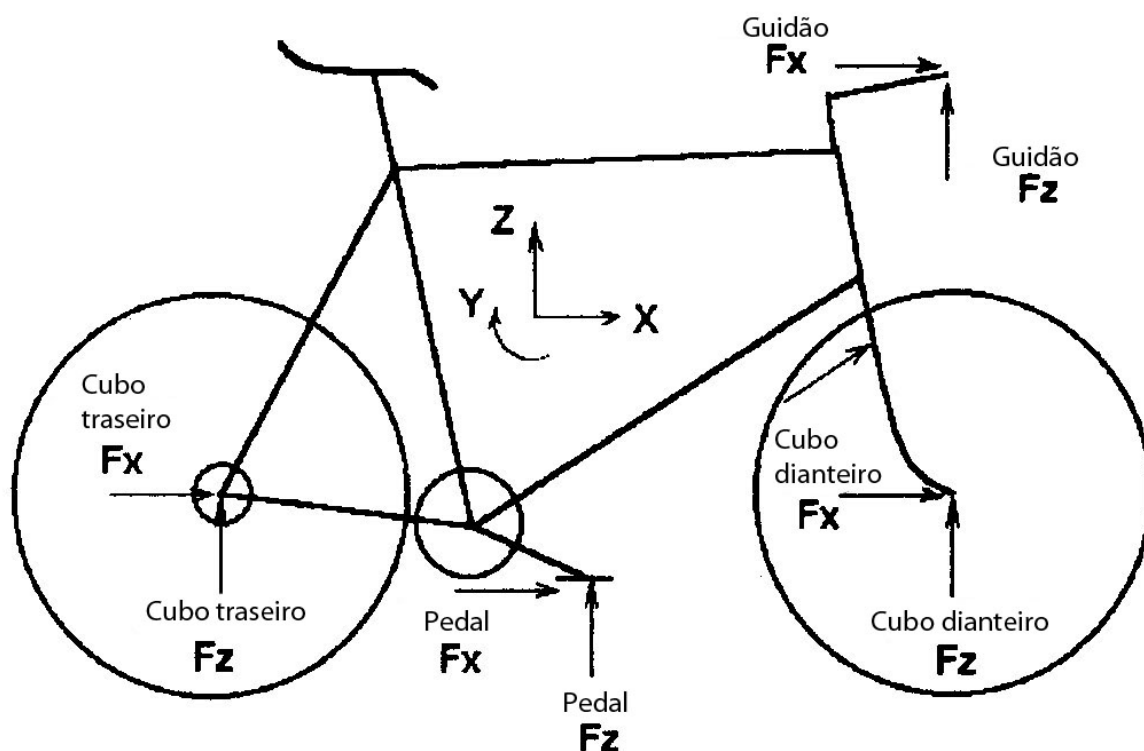


Figura 3: Sistema de coordenadas de forças modificado a partir de Hull (1999).

⁵ Gancheira é a parte do quadro ou do garfo da bicicleta onde se engata os eixos das rodas.

2.2 Ensaios experimentais

As pesquisas recentes nesse campo instrumentam as bicicletas com dinamômetros e extensômetros nos seus componentes, como pedais, guidões, cubos e freios (Hull et al. 1988; Champoux 2004, Giannetti 1998) para verificar a distribuição dinâmica de aplicação de forças e as deformações nos componentes da bicicleta.

Destaca-se no campo de pesquisa do funcionamento estrutural das bicicletas, o grupo de pesquisa canadense VÉLUS, especializado em metrologia e experimentação *in situ*; comportamento dinâmico das estruturas e vibrações; análise com elementos finitos e otimização estrutural dos componentes mecânicos. O grupo fez uma instrumentação completa em uma bicicleta (fig. 4) para quantificar as variáveis dinâmicas de carregamento e esforços atuantes. Nesse experimento, parte do sistema utilizou transdutores de forças comerciais, enquanto outros componentes foram instrumentados com extensômetros elétricos.



Figura 4: Bicicleta instrumentada com dinamômetros e sistema de aquisição de dados portátil.

Nessa pesquisa do grupo VÉIUS, no pedal e no tubo do selim foram instaladas células de carga (de aço para o pedal e alumínio para o selim) em formato de C, com quatro extensômetros em ponte completa na face horizontal superior e quatro na face vertical, conseguindo assim decompor as forças verticais das horizontais, independentemente do ponto de aplicação. Para o guidão foram medidas as forças horizontais e verticais aplicadas nos dois braços. Usaram um tubo reto para o guidão, com 16 extensômetros, oito em cada braço. Para cada componente de força (vertical esquerda; vertical direita; horizontal esquerda; e horizontal direita) utiliza 4 extensômetros em ponte completa. Para medir as forças transmitidas pelos eixos da roda dianteira foi retirada uma gancheira (parte do quadro onde é fixado o eixo da roda) e instalado um transdutor de força (PCB 3D ICP), a partir de uma estrutura rígida ligada ao garfo. Assim conseguiram decompor as forças horizontais através da força de cisalhamento entre o transdutor e os elementos conectados. As forças aplicadas pelo freio foram medidas através de uma pinça fixada num braço de alavanca pivotante de maneira que, quando freia, essa alavanca pressiona um transdutor (PCB Quartz force). A força é medida quando pressiona o transdutor e calculada pelo braço de alavanca de onde a força é aplicada.

Também foram utilizados transdutores de deslocamentos para as suspensões traseira e dianteira. A orientação dos pedais foi medida com potenciômetros rotativos, instalados em cada pedal. Para localizar a posição do pedal com relação ao quadro, foi instalado um potenciômetro numa engrenagem adicional, fixada no quadro e acionada por corrente com ligação à coroa. Nas duas rodas, foram instalados velocímetros comerciais. Os sinais provenientes dos seus transdutores magnéticos foram conectados no sistema de aquisição de dados por contagem de impulsos. Utilizaram um sistema de aquisição de dados portátil, Somatec de 32 canais. Os transdutores de força ICP foram alimentados por um alimentador caseiro com 12 canais. Os resultados alcançados nesse estudo não foram divulgados de forma completa. Alguns picos de força apresentados são: 850N de carga vertical no braço direito do guidão; 295N de força horizontal no braço esquerdo do guidão; 590N de força vertical no selim.

Outro método muito empregado para análise estrutural de quadros de bicicletas fabricadas com materiais convencionais, é o Método de Elementos Finitos. Ele é empregado para reduzir custos e acelerar o processo de projeto e dimensionamento dos quadros. É um método mais utilizado em estruturas de materiais isotrópicos, mas poderia ser utilizado em laminados de madeira, desde que se conheça bem as propriedades físicas da madeira a ser utilizada.

3 PROJETO DO QUADRO

3.1 Aspectos gerais da geometria dos quadros de bicicleta

A geometria do quadro da bicicleta é definida para cada finalidade de uso e comportamento de pilotagem. O ângulo e o comprimento das peças são dimensionados a partir das medidas antropométricas para uma maior eficiência de pilotagem e conforto para o ciclista. Para as bicicletas de linha de produção, os fabricantes usam, geralmente, três ou quatro tamanhos diferentes de quadro. Os ajustes são feitos, basicamente, com regulagem na altura do selim; com uso de diferentes tipos de guidão; e no comprimento e ângulo da mesa do guidão. Já para os quadros personalizados, pode-se alterar a sua geometria para um ajuste mais adequado às medidas do ciclista.

O dimensionamento das bicicletas deve ser cuidadosamente avaliado para cada ciclista, pois a postura do tronco, se ereto ou em flexão, assim como o alongamento dos músculos devem estar de acordo com padrões ergonômicos para evitar lesões e patologias relacionadas à prática do ciclismo (PEQUINI, 2005).

As principais medidas e ângulos dos quadros de bicicleta são mostrados na figura 5.

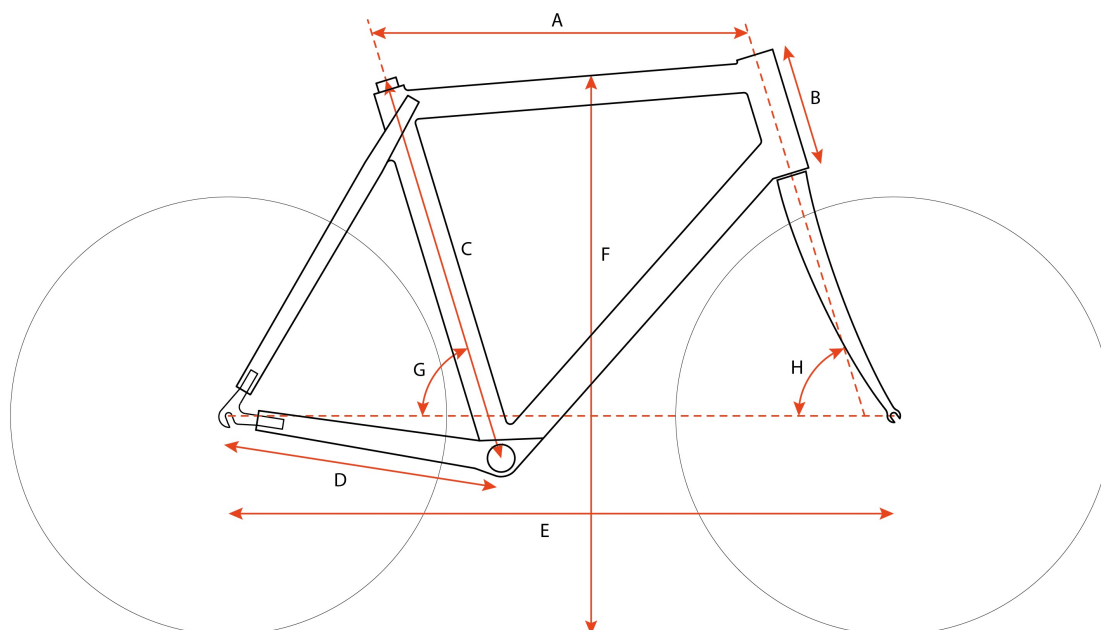


Figura 5: principais medidas e ângulos da geométricas da bicicleta.

(A) Comprimento do tubo superior: essa medida é tomada do centro do tubo da direção ao centro do tubo do selim, em linha reta paralela ao chão. Essa medida é usada para definir o tamanho da bicicleta para o ciclista, de acordo com o tamanho do seu tronco. Bicicletas com mesmo tamanho nominal - mesmo tamanho do tubo do selim - podem apresentar diferenças na sua geometria, e conseqüente alteração no tamanho do tubo superior. O tubo superior menor é ideal para uso no plano, urbanos. Deixa o ciclista numa posição mais ereta, o que facilita a pilotagem no trânsito e o pescoço é menos exigido. Porém, na posição mais ereta, o ciclista fica mais exposto ao vento e dificulta a realização de subidas. Com o tubo superior maior, o ciclista tem mais facilidade nas arrancadas, subidas e mudanças bruscas de direção, permitindo uma condução mais agressiva.

(B) Comprimento do tubo da direção: medido do início ao final do tubo. Nesse tubo se encaixa o movimento de direção e, por sua vez, o garfo.

(C) Comprimento do tubo do selim: é medido do centro do tubo do movimento central até o final do tubo - alguns fabricantes tomam a medida do centro do movimento central até o eixo do tubo superior. O comprimento do tubo do selim é importante pois defini o tamanho nominal da bicicleta. Há dois padrões para essa medida, em polegadas para as *mountain bikes*, e em centímetros para as bicicletas *speed*, de estrada ou híbridas. Assim, uma *mountain bike* tamanho 17, tem o comprimento do tubo do selim com 17 polegadas.

(D) Comprimento do apoio da corrente: é medido a partir do eixo do tubo do movimento central e o final do tubo. Quanto maior o apoio inferior, maior o conforto pela maior absorção de impactos na traseira, porém mais lenta é a bicicleta. O apoio inferior apresenta um melhor desempenho quanto menor for.

(E) Distância entre eixos: Distância medida entre os eixos das rodas da bicicleta. Quanto mais longa a distância entre eixos proporciona maior estabilidade, pois a bicicleta tem reações mais lentas ao movimento do ciclista; e maior conforto, pois absorve melhor os impactos do solo. As bicicletas de competição têm, em geral, o entre eixos mais curto.

(F) Altura do tubo superior: é medido do chão até o ponto do tubo superior. Essa medida deve ser inferior a altura do cavalo do ciclista - é a distância da virilha até o chão, tomada com o ciclista de pé - para evitar desconforto e acidentes.

(G) Ângulo do tubo do selim: o ângulo do tubo do selim é medido entre seu eixo e a linha paralela ao chão. Variações no ângulo do tubo do selim mudará a postura do ciclista e o conjunto muscular para pedalar.

(H) Ângulo do tubo da direção: o ângulo do tubo de direção é medido entre seu eixo e a linha paralela ao chão. Por sua vez, a medida do ângulo do tubo de direção influenciará na equilíbrio dinâmico da bicicleta.

3.2 Principais medidas do protótipo

Optou-se pelo dimensionamento de um protótipo de quadro grande para que os esforços solicitantes fossem maiores. Assim, se o protótipo do quadro manter-se íntegro depois do ensaio, teoricamente um protótipo de menor dimensão também o fará.

As principais medidas do quadro são - o projeto completo se encontra no anexo 01:

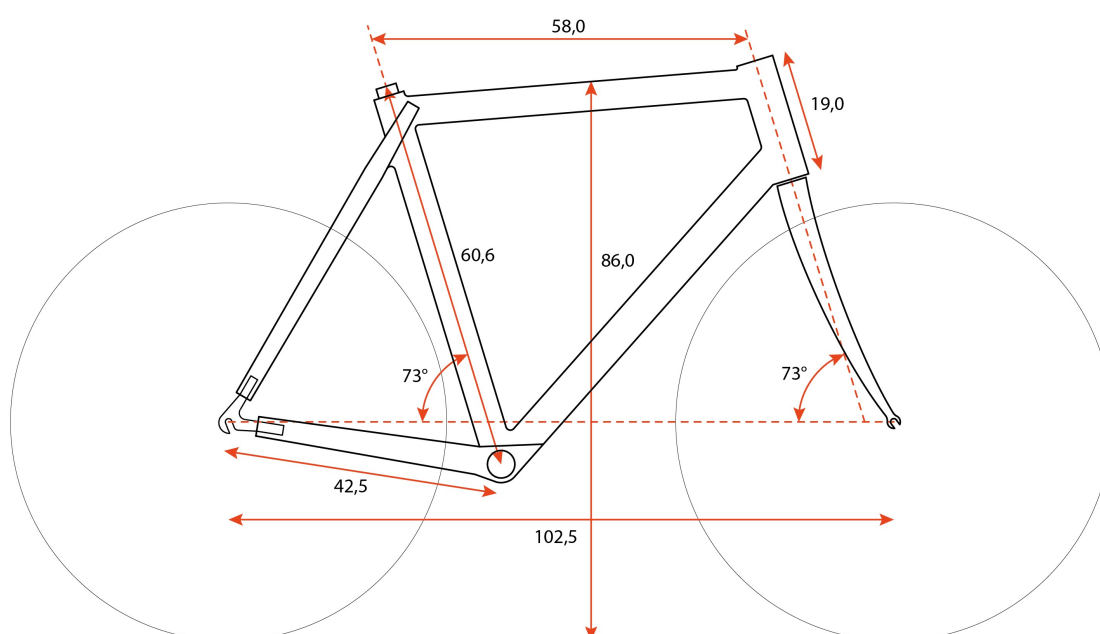


Figura 6: Principais medidas do protótipo.

- Comprimento do tubo superior: 58,0cm
- Comprimento do tubo da direção: 19,0cm
- Comprimento do tubo do selim: 59,1cm
- Comprimento do apoio da corrente: 42,5cm
- Distância entre eixos: 102,5cm
- Altura do tubo superior: 86,0cm
- Ângulo do tubo do selim: 73°
- Ângulo do tubo da direção: 73°

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

O quadro foi construído, basicamente, com madeira, alumínio e adesivos estruturais. A construção do protótipo é dividida em duas partes. Primeiro é feito o triângulo principal, onde são acoplados três tubos de alumínio que têm a função de receber o tubo do selim, o movimento central (do pedal) e o movimento da direção - esses tubos não têm função propriamente estrutural, mas de suportar componentes mecânicos metálicos que gerariam desgaste na madeira. O triângulo principal é feito a partir de duas metades de madeira laminada colada, com sulcos entre elas, para aliviar o peso e para acoplar os tubos de alumínio. Esses são colados à madeira com colas epóxi bicomponente, devido a diferença de polaridade entre o alumínio e da madeira.

Na figura 8, nota-se as duas metades do triângulo principal - uma metade com as lâminas explodidas - com os tubos do selim e do movimento central posicionados, e os sulcos para receber os tubos. Em seguida as duas metades são coladas com cola estrutural para madeira. Logo são colados ao triângulo principal os apoios do selim e os apoios da corrente, que, por sua vez, já estarão unidos à gancheira - peça que suporta o eixo da roda traseira (fig. 7 e 8). A gancheira também é metálica por causa do desgaste que ocorreria à madeira pelo eixo metálico da roda.

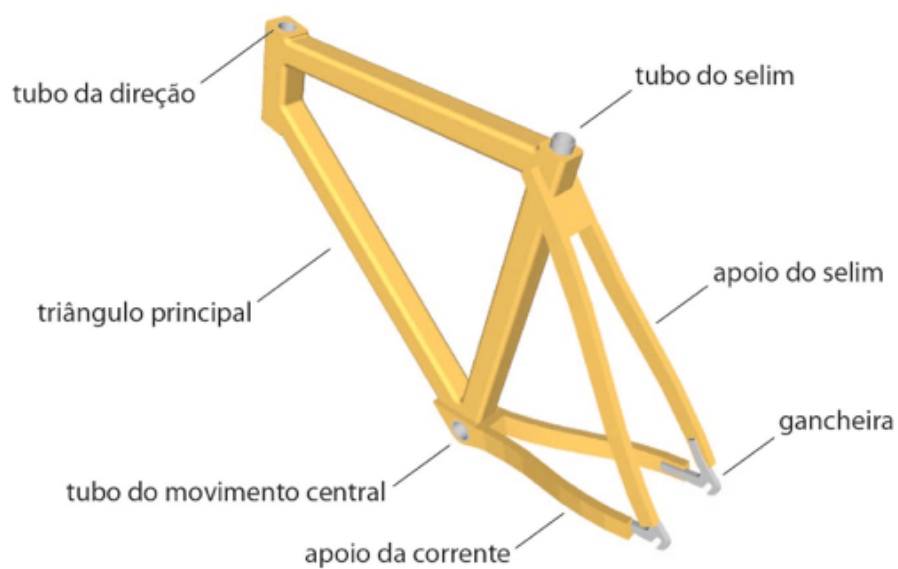


Figura 7: Componentes principais do quadro.

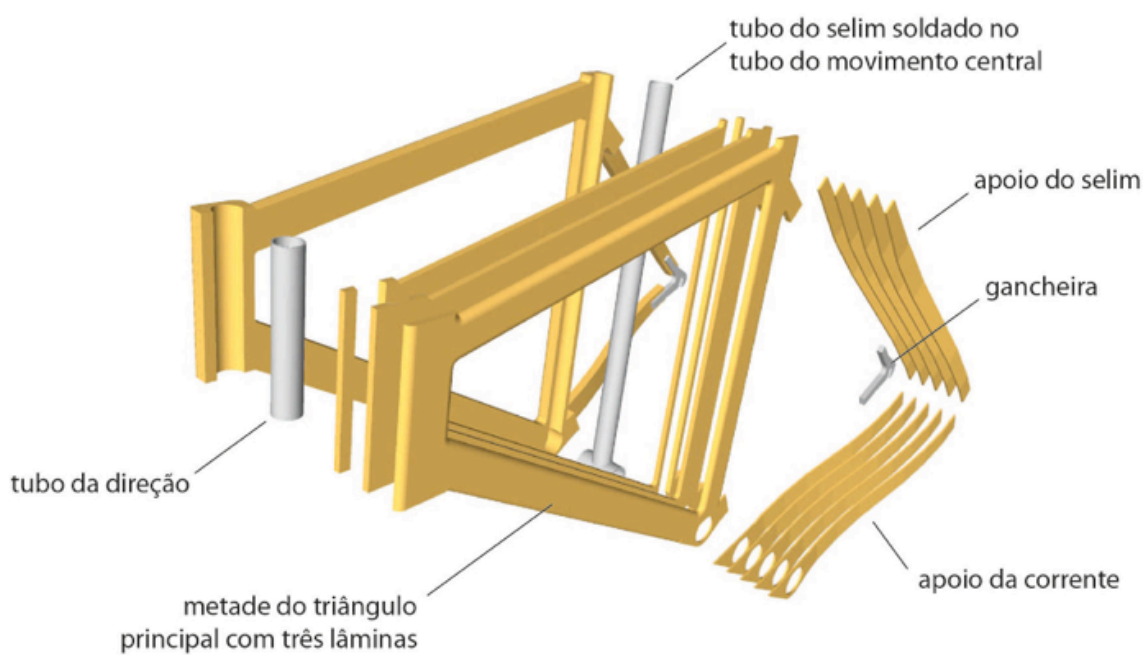


Figura 8: Componentes do quadro com metade explodida.

O triângulo principal foi feito a partir de um layout de colagem das lâminas de madeira (fig. 09) de forma a obter variação da direção das fibras da madeira, para que as lâminas trabalhem em diferentes direções de esforços solicitantes. A prensa utilizada para o triângulo principal foi feita por duas chapas de MDF comprimidas com barras rosqueadas. Para conformar e fazer a pressão nas peças na direção transversal, a prensa foi desenvolvida com cunhas nas bordas.

Para laminação do apoio do selim e do apoio da corrente não há a necessidade de alternar a direção das fibras das lâminas, pois os esforços principais ocorrem ao longo do seu eixo.

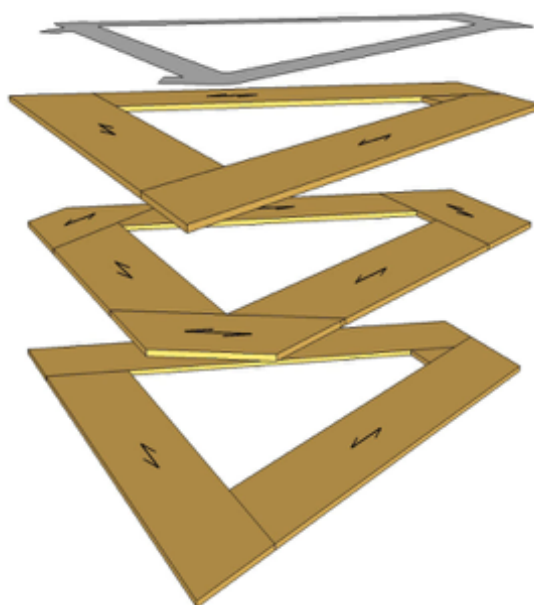


Figura 9: Layout de laminação de uma metade do triângulo principal; as setas indicam a direção das fibras da madeira.

Na confecção do protótipo foi utilizado eucalipto de reflorestamento (*Eucalyptus grandis*), que é uma madeira leve e com elevada resistência mecânica. A madeira utilizada foi da empresa Lyptus. Parte da madeira foi doada pela empresa, que foi utilizada no apoio da corrente e no apoio do selim, onde precisou de largura menor. A madeira doada não tinha largura suficiente para as lâminas do triângulo principal. Assim foram encontradas no mercado local pranchas mais largas da mesma empresa.

As lâminas em estado bruto do triângulo principal, foram feitas com 120 mm de largura e 8 mm de espessura e comprimento variável - no anexo 02 se encontra o desenho com as medidas estas das lâminas do triângulo principal com os ângulos de corte. As lâminas dos apoios da corrente foram feitas com 80 mm de largura, 3 mm de espessura, e 500 mm de comprimento. As lâminas dos apoios do selim foram feitas com 50 mm de largura, 3 mm de espessura, e 550 mm de comprimento. Na Tabela 1 encontra-se o quantitativo de madeira utilizada:

Tabela 1: Quantitativo de lâminas.

	Largura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Quantidade
Triângulo principal	120	8.0	8470 (maior comprim.)	24.0
Apoio da corrente	80	3.0	500	10.0
Apoio do selim	50	3.0	550	10.0

Para os componentes metálicos foram utilizados três perfis de tubos de alumínio e um perfil de chapa de alumínio. Não foram encontradas no mercado brasileiro as ligas de alumínio usualmente empregadas em bicicletas - 6061 T6 e 7075 T6. Foram selecionadas ligas que mais se assemelhavam às propriedades mecânicas das ligas 6061 T6 e 7075 T6; e de acordo com a disponibilidade do fornecedor.

Para o tubo do selim e o tubo da direção foi utilizada liga 6063 T5; para o tubo do movimento central foi utilizada a liga 6101 T6; e para as gancheiras foi utilizada liga 6351 T6, conforme Tabela 2:

Tabela 2: Tubos e chapas de alumínio utilizados.

	Liga	Diâmetro externo (mm)	Espessura da parede (mm)	Diâmetro interno (mm)	Comprimento (cm)
Tubo do selim	6063 T5	31.75	2.0	27.75	59.3
Tubo da direção	6063 T5	38.1	2.38	33.34	19.0
Tubo do movimento central	6101 T6	41.27	4.85	36.42	73.0
Gancheiras	6351 T6	-	9.5		-

As propriedades mecânicas (Alcoa, 2010) das diferentes ligas utilizadas e das ligas usualmente empregadas em quadros de bicicleta estão apresentadas na tabela abaixo:

Tabela 3: Propriedades mecânicas da ligas de alumínio.

Liga	Limite de Resistência a Tração (mín.) (MPa)	Limite de Escoamento (mín.) (MPa)	Resistência máxima ao cisalhamento
6063 T5	175	130	-
6101 T6	200	170	-
6351 T6	300	255	-
6061 T6	260	240	207
7075 T6	560	500	331

No dimensionamento geométrico dos tubos foi levado em conta os perfis de alumínio usualmente empregados em quadros de bicicleta. No mercado brasileiro, além da falta de disponibilidade das ligas usualmente empregadas, não foram encontradas peças vendidas no varejo - comprou-se seis metros de cada tubo e da chapa de alumínio. Para dimensionamento das peças, tomou-se como referência os perfis de alumínio que são fornecidos pela empresa norte-americana Nova Cycles Supply - muitos fabricantes de bicicletas por encomenda importam peças dessa empresa.

Para o selim foi utilizado um tubo com espessura de parede um pouco menor, mas com diâmetro interno compatível com o diâmetro externo do canote do selim. Para a direção também foi utilizado um tubo com menor espessura de parede e que foi torneado internamente, para aumentar seu diâmetro interno e poder acoplar o movimento central. Já para o movimento central utilizou-se um tubo com diâmetros externo e interno equivalente ao fornecido pela Nova Cycles. O uso de tubos com espessura de parede menor não acarretará problemas estruturais, pois, nos locais que esses são empregados, a madeira ajudará a suportar o carregamento - na verdade, como foi dito anteriormente, a proposta é que a madeira exerça a função estrutural.

Abaixo segue a tabela de tubos de alumínio com as dimensões oferecidas pela empresa norte-americana:

Tabela 04: Tubos e chapas da Nova Cycles Supply.

	Liga	Diâmetro externo (mm)	Espessura da parede (mm)	Diâmetro interno (mm)
Tubo do selim	7005 T6	31.8	2.3	27.2
Tubo da direção	7005 T6	41.4	4.0	33.4
Tubo do movimento central	7005 T6	41.3	-	-

Para a colagem madeira com madeira foi utilizado o adesivo Cascophen RS-216-M, da Hexion. É uma resina sintética a base de resorcinol-formaldeído, em solução álcool/água, recomendada para colagens exteriores, resistente à água, ao calor e a muitos solventes orgânicos. A resina é usada com o endurecedor FM-60-M, com proporção de 100 partes da resina para 20 do endurecedor. O adesivo preparado tem uma vida útil de duas horas numa temperatura de 20°C, e uma hora a 30°C; e rendimento de 300g/m². Ao receber o adesivo, a madeira deve ser unida o mais rápido possível, evitando a secagem precoce. É importante que ao aplicar a pressão, o adesivo não esteja seco ao tato e que se tenha um pequeno escorrimento dele ao longo da linha de colagem. O tempo mínimo de prensagem é de 10 horas a temperatura de 20°C.

Para colagem madeira com alumínio foi utilizado o adesivo epóxi bicomponente, Adesivo-314, da Tubolit. É um adesivo utilizado para união dos mais diversos materiais de grande poder de adesão. A superfície a ser colada deve estar seca isenta de óleos graxas ou corpos estranhos. Recomenda-se a limpeza com thinner. A mistura é feita na proporção de cinco partes para o componente A e quatro partes para o componente B. O tempo de vida útil da mistura é de duas horas a temperatura de 25°C. As peças só podem ser manuseadas depois de oito horas de colagem.

4.2 Processo de confecção do protótipo

Nesse item há a descrição detalhada de cada passo do processo de confecção do protótipo, do maquinário e das técnicas de marcenaria utilizadas.

4.2.1 Preparação das lâminas

- 1) Limpeza das pranchas de madeira: foi feita limpeza das pranchas de madeira com escova de aço para retirada de sujeira e ferpas.
- 2) Retirada dos defeitos da madeira: a madeira de eucalipto utilizada no triângulo principal foi comprada no comércio local, fornecida para emprego na construção civil, por isso ela apresentou uma considerável quantidade de defeitos. Foram retirados nas pranchas, os nós e fendas dando um aproveitamento de 80% de madeira apropriada para uso. Nesse processo utilizou-se uma esquadrejadeira para a retirada dos defeitos na direção do comprimento. A madeira de eucalipto utilizada nos apoios foi de qualidade melhor - classe Superior A, da Lyptus - e não apresentou nós e fendas.
- 3) Aparelhamento das pranchas e das lâminas: depois de retirado os nós e fendas da madeira, no aparelhamento retirou-se os outros defeitos como encurvamento, abaulamento, arqueamento e torcimento. Para aparelhamento das peças utilizou-se serra circular, plaina e desengrosso. Como ainda iria retirar as lâminas das pranchas, aparelhou-se apenas três faces, de maneira que a madeira tivesse esquadro para servir de referência para corte das lâminas na serra de fita. O corte na serra de fita (fig. 10) foi feito na direção da largura para retirada das lâminas. Esse corte na serra de fita é bastante irregular e deixa a superfície com muitas ranhuras. Cortou-se primeiro as lâminas com espessura maior, aproximadamente 10mm, para depois aparelha-las no desengrosso (fig. 11), até chegar na espessura final de 8mm.



Figura 10: Corte das lâminas na serra de fita.

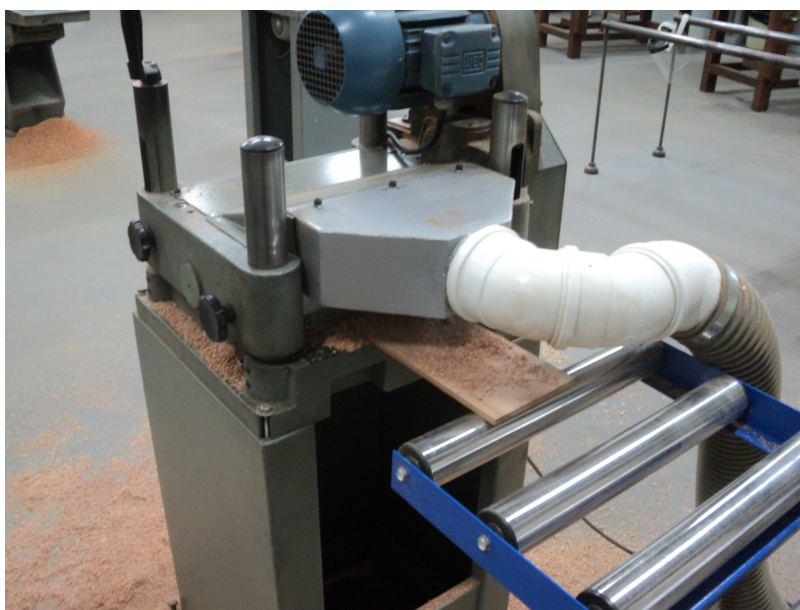


Figura 11: Aparelhamento final no desengrosso.

- 4) Corte no comprimento das lâminas do triângulo principal: as lâminas do triângulo principal têm formato trapezoidal (fig. 12), com as duas faces do comprimento paralelas entre si e as faces da largura em ângulos variados. Para esse corte em ângulo utilizou-se serra 1/2 esquadria. É necessário que essa serra tenha uma boa capacidade de corte e regulação precisa dos ângulos de corte - no anexo 02 encontra-se a relação das lâminas com seus respectivos ângulos de corte.

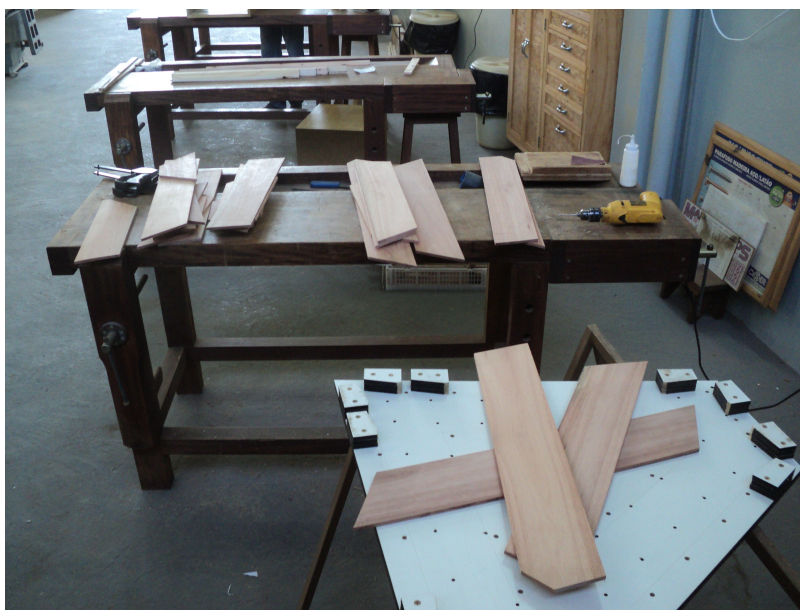


Figura 12: Lâminas cortadas em formato trapezoidal

4.2.2 Confeção das prensas e gabaritos

- 1) Confeção da prensa do triângulo principal: a prensa para colagem das metades do triângulo principal foi feita em MDF, com espessura de 10mm. Utilizamos MDF por ser a chapa que tínhamos disponível, porém para melhor resistência e reutilização é indicado utilizar chapas de compensado naval. Os cortes das peças da prensa foram feitos numa CNC a laser (fig. 13), que tinha capacidade de corte na espessura limitada, por isso utilizamos a chapa com 10mm. Para conseguir melhor resistência, foram utilizadas duas chapas em cada lado da prensa. Essas chapas foram coladas com cola branca e parafusadas, assim

como os batentes das cunhas nas bordas (fig. 14) - no anexo 03 encontra-se o desenho técnico da prensa.



Figura 13: CNC a laser utilizada para corte da prensa e dos gabaritos



Figura 14: Base da prensa do triângulo principal.

- 2) Confecção das prensas dos apoios: as prensas dos apoios foram feitas de madeira (fig. 15). Essas prensas tinham a função de curvar e colar as lâminas dos apoios. As prensas do apoio do selim e do apoio da corrente têm uma pequena diferença quanto a curvatura e comprimento. Na largura elas foram feitas com dimensões iguais, pois ambas foram feitas com folgas. Primeiro fizemos um bloco com três peças de 04x12x58cm. Nesses blocos foi colada a impressão em papel das curvas dos apoios, para em seguida executar esses perfis na serra de fita. Depois foi acertado o perfil da curva com lixadeira oscilante de bancada.



Figura 15: Prensa dos apoios.

- 3) Confecção do gabarito para corte dos sulcos: o gabarito de corte dos sulcos (fig. 16) para encaixe dos tubos da direção e tubo do selim foi feito em MDF de 10mm, sendo cortado em CNC a laser a partir de desenho em formato CAD. Esse gabarito foi feito a partir da dimensão da base da tupa de pinça de 1/2", para que a máquina corresse livremente dentro do seu limite. Além do corte para encaixe da tupa, foram feitos cortes retangulares para afixar, com grampos, o gabarito na madeira.



Figura 16: Gabarito para corte dos sulcos.

- 4) Confecção do gabarito para corte do perfil da metade do triângulo principal: o gabarito para corte do perfil da metade do triângulo principal (fig. 17) também foi feito por corte a laser em CNC, porém foi feito de compensado de 10mm de espessura.

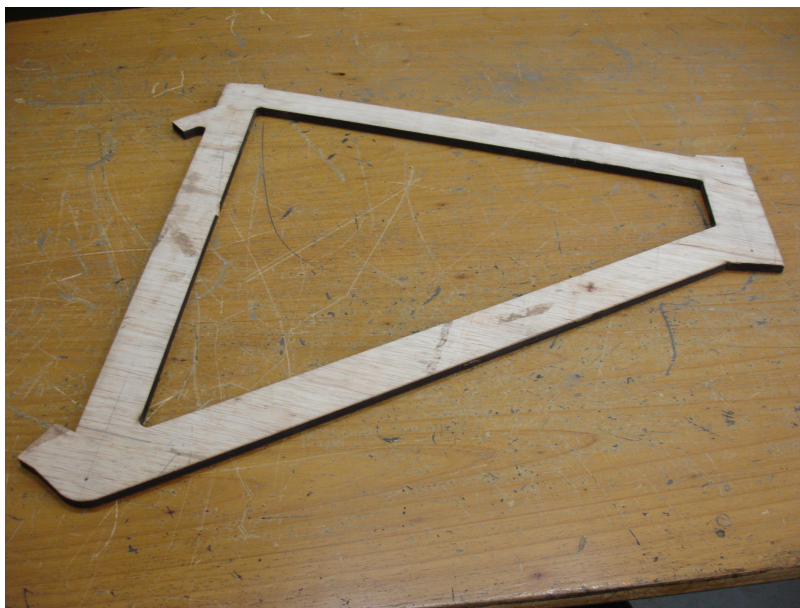


Figura 17: Gabarito para corte do perfil do triângulo principal.

4.2.3 Preparação das peças de alumínio

- 1) Tubo de direção: o tubo de direção foi torneado por dentro (fig. 18), em suas extremidades, para aumento do seu diâmetro interno e encaixe do movimento de direção. O diâmetro externo do movimento central é de 34mm e o diâmetro interno do tubo de alumínio era de 33,34mm. Portanto precisou-se retirar menos de 1mm de espessura.



Figura 18: Tubo de direção com fresagem nas extremidades.

- 2) Tubo do selim: no tubo do selim foi feita uma fenda de 1,5cm na direção do comprimento, na sua parte superior, para que a presilha pudesse fazer o aperto do tubo no canote do selim.



Figura 19: Tubo do selim com fenda para aperto da presilha.

- 3) Tubo do movimento central: no tubo do movimento central foi feita a rosca padrão inglês para encaixe do movimento central. Essa rosca é feita dos dois lados do tubo sendo que do lado esquerdo da bicicleta ela é invertida. Assim o “copo” do movimento central menor se encaixa no lado esquerdo da bicicleta e é instalado no sentido anti-horário. Por sua vez, o “copo” maior é instalado no lado direito, girando no sentido horário.



Figura 20: Tubo do movimento central com rosca interna.

- 4) União do tubo do movimento central ao tubo do selim: para união do tubo do movimento central com o tubo do selim foi realizado o corte curvo na extremidade do tubo do selim para acomodar ao tubo do movimento central. Depois os tubos foram soldados, com soldador TIG (gás inerte de tungstenio) - a solda para metais leves, como alumínio, requer mão de obra especializada pois precisa de máxima precisão para garantir união forte.
- 5) Corte das gancheiras: o corte das gancheiras foi feito com jato de água por empresa especializada, a partir de desenho em formato CAD. Esse tipo de corte não tem um acabamento muito bom, mas para utilização no protótipo se mostrou satisfatório.

- 6) Furo e rosca nas gancheiras traseiras: as gancheiras traseiras foram coladas e parafusadas à madeira. As pontas que ficaram em contato com a madeira foram furadas e nesses furos foi feita rosca para prender os parafusos. Utilizamos parafusos *allen*, com cabeça abaulada, de 16mm de comprimento, 4mm de diâmetro, e rosca MA-0,70. Ainda foi feito chanfro de 45° nas bordas do furo, do lado da gancheira que está encostada à madeira, para que o parafuso encontrasse facilmente o furo.



Figura 21: Rosca interna na gancheira.



Figura 22: Chanfro de 45° nas bordas do furo da gancheira.

4.2.4. Laminação

- 1) Laminação do triângulo principal: para colagem do triângulo principal foi seguido o layout de laminação como proposto no item 4.1, (fig. 7). Primeiro fez-se uma montagem sem cola para verificar os encaixes das lâminas. Nessa etapa fez-se um acerto nos ângulos de corte por acúmulo de pequenos erros e para ajuste na prensa (fig. 23).

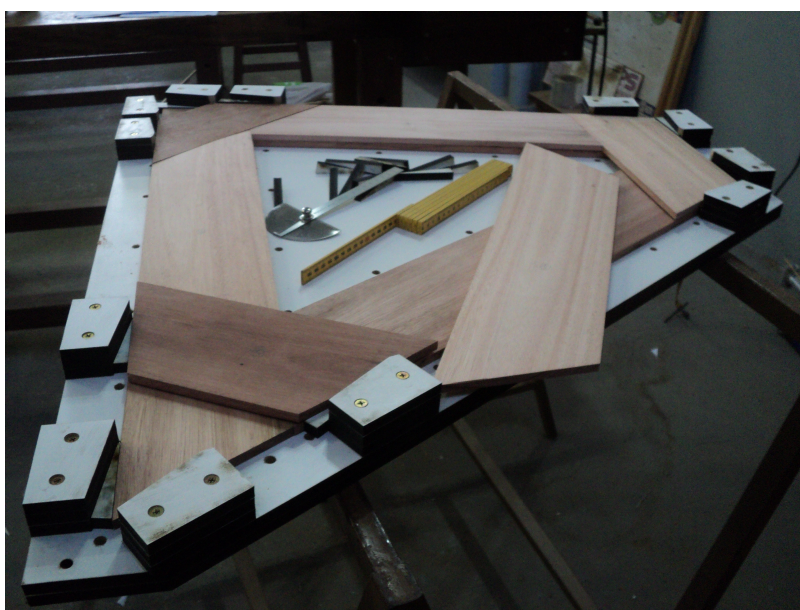


Figura 23: Acerto dos ângulo de corte das lâminas.

Colocou-se a primeira camada de lâminas na prensa - é importante isolar as lâminas da prensa com papel para não colarem entre si e não ter problema em desenformar - e nessa primeira camada foram coladas apenas as bordas das lâminas que se encostavam. Depois passou-se cola na superfície das lâminas e colocou-se a segunda camada, e assim sucessivamente. É importante espalhar bem a camada de cola, deixando pouco excesso para que na prensagem vaze pouca cola.



Figura 24: Laminação do triângulo principal.

Depois de disposta as lâminas com a cola, foi feita a cunhagem das peças para pressão no sentido transversal (fig. 25).



Figura 25: Cunhagem das peças no sentido transversal.

Coladas as lâminas, a prensa foi apertada com barras rosqueadas (fig. 26) distribuindo bem a pressão - o ideal é que se utilize um torquímetro para que o aperto fique por igual.



Figura 26: Prensa com as barras rosqueadas.

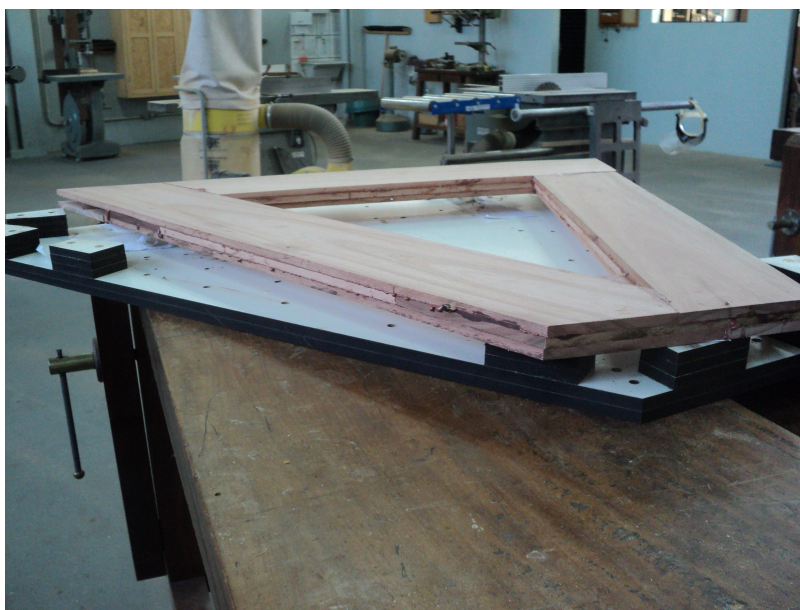


Figura 27: Lâminas desenformadas.

- 2) Laminação dos apoios: a colagem dos apoios foi feita primeiro aplicando cola entre todas as lâminas e depois colocada na prensa envoltas em papel para que não colassem na prensa (fig. 28) . É importante aplicar força uniformemente com os grampos ao longo da prensa, pois as lâminas deslizam muito entre si quando estão sendo curvadas (fig. 29).



Figura 28: Lâminas dos apoios já com cola.



Figura 29: Lâminas dos apoios prensada.



Figura 30: Laminado curvado do apoio.

4.2.5 Corte dos sulcos do tubo de direção e tubo do selim

- 1) O corte dos sulcos do tubo de direção e tubo do selim foram feitos a partir de um gabarito único (fig. 31). Para isso posicionou-se o gabarito sobre a lâminas com auxílio de grampos, de modo que ficasse bem firme. Para cada o corte do tubo da direção foi usada uma fresa⁶ de 41,28mm de diâmetro, e para o tubo do selim uma fresa de 31,75mm, ambas com haste de 1/2".

⁶ Essas fresas tiveram que ser importadas, da empresa norte-americana MLCS Woodworking, pois o maior diâmetro de fresa para tupia manual que encontramos no mercado brasileiro foi de 25,4mm.

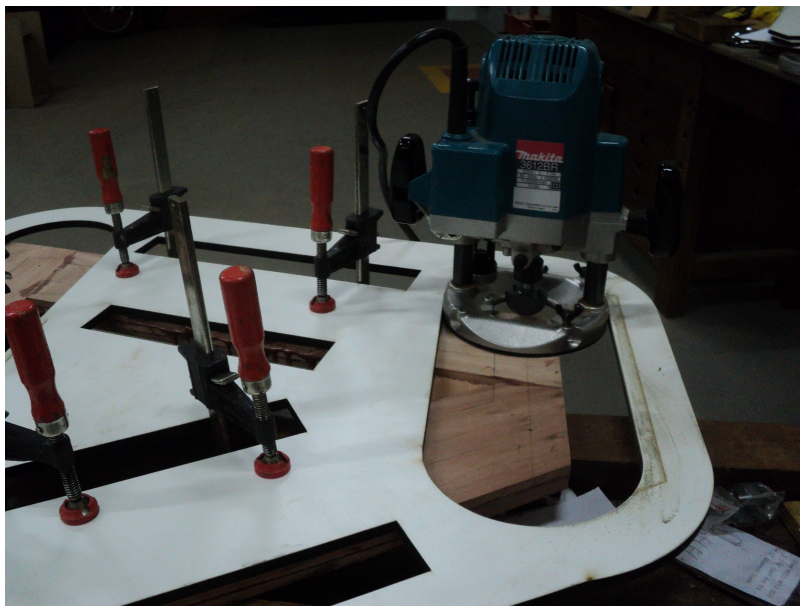


Figura 31: Tupia posicionada para corte dos sulcos para encaixe dos tubos.



Figura 32: Detalhe final do corte do sulco.

4.2.6 Corte do perfil das metades do triângulo principal

- 1) Para corte do perfil das metades do triângulo principal marcou-se a lápis com o gabarito para desbastar o excesso de borda com serra tico-tico (fig. 33) e assim não forçar o corte final com a tupia manual. Depois o gabarito foi fixado ao triângulo principal com fita adesiva dupla face para corte final com a tupia. Desse modo o gabarito serve de guia para o rolamento da fresa da tupia - é importante usar uma fresa com o comprimento da lâmina maior que a espessura da madeira a ser cortada para fazer o corte de uma só vez - foi utilizada uma fresa com lâmina de 1" de comprimento.

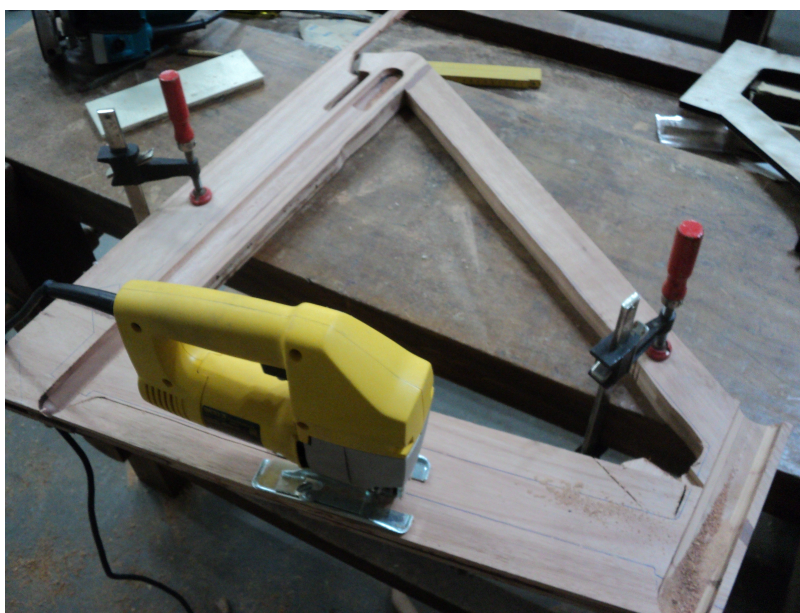


Figura 33: Retirada do excesso de borda com serra tico-tico.

4.2.7 Corte dos perfis dos apoios

- 1) Para corte dos perfis dos apoios (fig. 38) foi colado o desenho do perfil impresso sobre as laminas já curvadas (fig. 35). Esse desenho serve de marcação para corte na serra de fita (fig. 36). Para centralizar o desenho sobre as lâminas e marcar os eixos, foi usado outro desenho da curva (fig. 34) com as medidas. O corte na serra de fita é feito com sobras nas bordas e posteriormente se faz acabamento e finalização do perfil na lixadeira (fig. 37). O furo do apoio da corrente, para encaixe do tubo do movimento central, foi feito com furadeira vertical e broca *fostner* de 41,2mm.

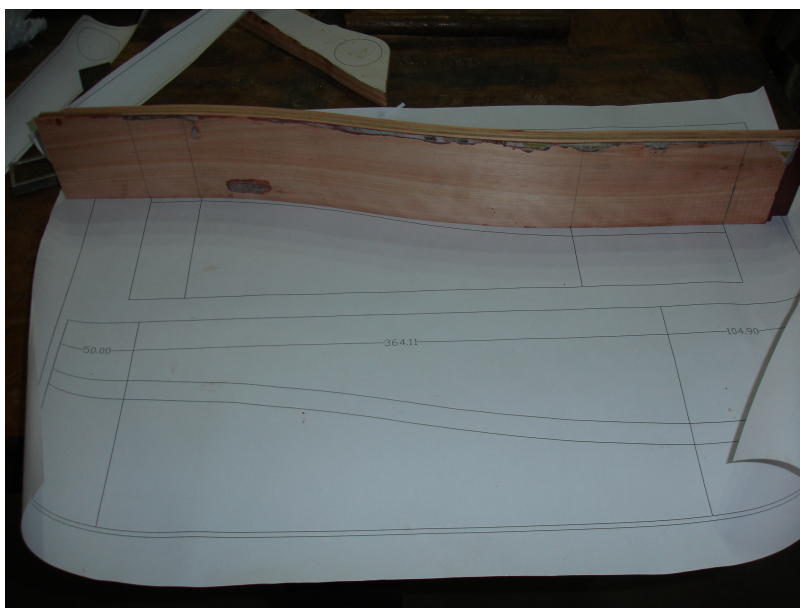


Figura 34: Marcação feita nas lâminas para centralizar o desenho colado sobre elas.



Figura 35: Desenho do perfil dos apoios colados sobre as lâmina.

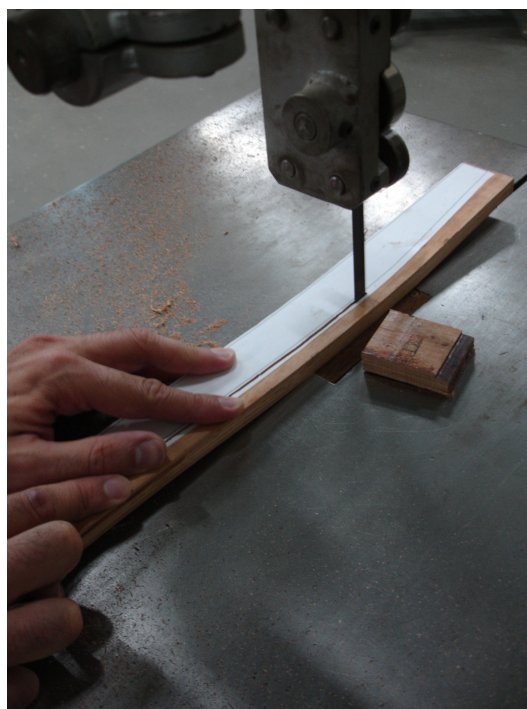


Figura 36: Corte dos perfis dos apoios na serra de fita.



Figura 37: Finalização do perfil do apoio na lixadeira.



Figura 38: Apoios com perfil finalizados.

4.2.8 Rebaixo no triângulo principal para encaixe do apoio da corrente

Foi feito um rebaixo de 5mm em cada metade do triângulo principal para encaixe do apoio da corrente. Primeiro foi feita uma marcação a lápis (fig. 39) com o próprio apoio da corrente. Posteriormente colocou-se uma guia (fig. 40), para corte com tupia. A distância da guia até a marcação é determinada pela distância entre a extremidade da fresa e a base da tupia.



Figura 39: Marcação para rebaixo no triângulo principal.



Figura 40: Rebaixo feito com tupa. A guia está presa com sargentos vermelhos.

4.2.9 Encaixe da gancheira

Para o encaixe das gancheiras, foi feito um rebaixo (fig. 42) de 5mm nos apoios com formão - esse rebaixo poderia ter sido feito a partir de um gabarito para tupa, pois é difícil conseguir com o formão um acabamento regular. Para marcação do rebaixo, foi feita uma pré-montagem (fig. 41) do quadro utilizando uma barra rosqueada para alinhar as gancheiras.



Figura 41: Pré-montagem para marcação do rebaixo no apoio para encaixe da gancheira.



Figura 42: Rebaixo feito com formão para encaixe da gancheira.



Figura 43: Gancheira encaixada no apoio (ainda sem os furos dos parafusos).



Figura 44: Gancheiras coladas e aparafusadas.

4.2.10 Colagem das duas metades do triângulo principal e montagem final

A colagem das duas metades do triângulo principal foi feita com dois tipos de cola, a resorcinol-formaldeído, para colagem madeira com madeira e adesivo epoxi bicomponente para colar os tubos à madeira. Primeiro aplicou-se as colas em ambas as metades (fig. 45) e depois juntou-se as partes. Essa colagem não foi muito boa no do tubo de direção. Como o diâmetro do sulco feito na madeira era um pouco maior que o diâmetro do tubo de direção, colocou-se excesso de cola para preencher o vazio que ficaria entre a madeira e o tubo. O problema foi que o adesivo epoxi que utilizamos tem alta viscosidade e parte do adesivo vazou (fig. 47) para as partes vizinhas que tinha a cola resorcinol-formaldeído. Nesse caso seria recomendado utilizar massa epoxi, menos viscosa, para a colagem do tubo. Depois de coladas as metades do triângulo principal, colou-se os apoios ao triângulo principal (fig. 48 e 49).



Figura 45: Colagem das duas metades do triângulo principal.



Figura 46: Prensagem do triângulo principal.



Figura 47: Vazamento do excesso do adesivo epoxi.



Figura 48: Colagem do apoio da corrente.



Figura 49: Colagem do apoio do selim.

4.2.11 Montagem final da bicicleta

Depois de finalizada a construção do quadro, a bicicleta foi montada para conferir o acoplamento com os demais componentes e testar seu funcionamento.



Figura 50: Bicicleta montada com quadro de madeira.

4.3. Métodos de ensaios

Há vários métodos de ensaio normatizados para quadros de bicicleta. A normatização utilizada como referência nesse estudo é a *ABNT NBR 14714:2013: Veículos de duas rodas – Bicicleta – Quadro e garfo rígido – Requisitos de segurança*.

A ABNT NBR14714:2013 apresenta os requisitos de segurança para quadro e garfo, e é uma apropriação das normas internacionais - *EN 14781 – Racing bikes – Safety requirements and test methods*; e *ASTM F2711-08(2012), Standard Test Methods for Bicycle Frames*. Não existe norma que analise o quadro isoladamente e as forças são aplicadas nos seus componentes, pedal e garfo.

A norma brasileira possui três métodos de ensaio. O primeiro (fig. 51) é um ensaio destrutivo de peso contra um rolete fixado no garfo, que simula um choque frontal. Nesse ensaio o quadro é fixado sobre um suporte pela gancheira da roda traseira; um rolete metálico é colocado no lugar da roda da frente e seu eixo alinhado com o eixo da gancheira traseira; solta-se em queda-livre um peso de 22,5Kg sobre o rolete, a uma distância de 18cm.

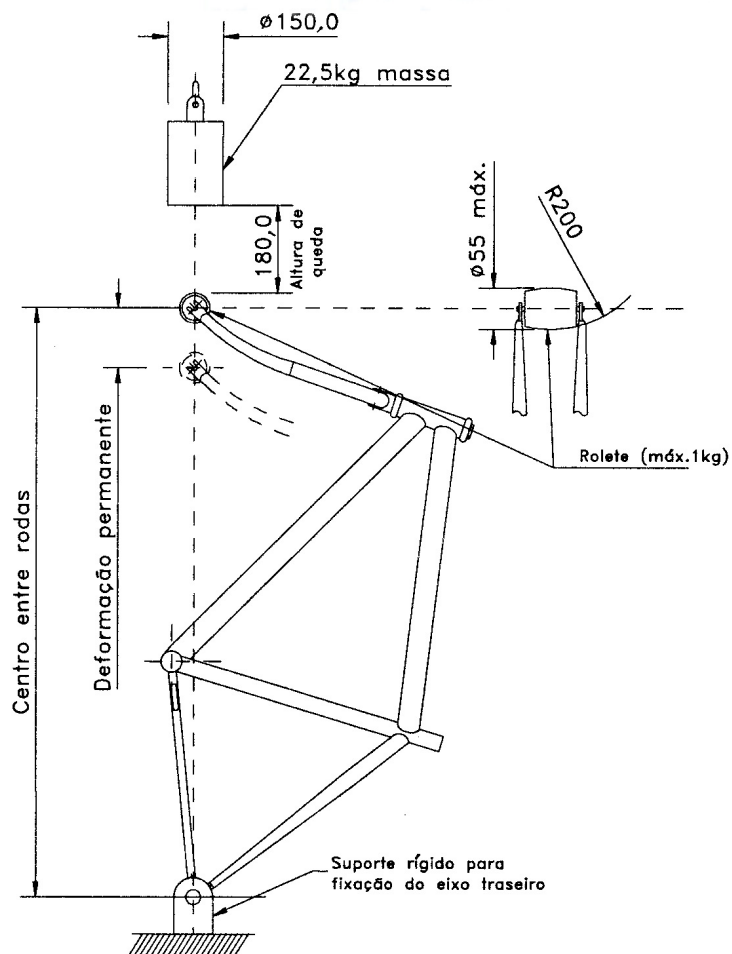


Figura 51: Ensaio de impacto contra conjunto - ABNT NBR 14714.

O segundo (fig. 52) é um ensaio destrutivo de queda do quadro. O quadro também é fixado pela gancheria traseira sobre um suporte, porém podendo girar; ao tubo do selim é colocado uma massa de 70kg, alinhando seu centro de gravidade com o eixo da gancheria. O quadro é solto e o rolete do garfo sofre impacto sobre uma base de aço.

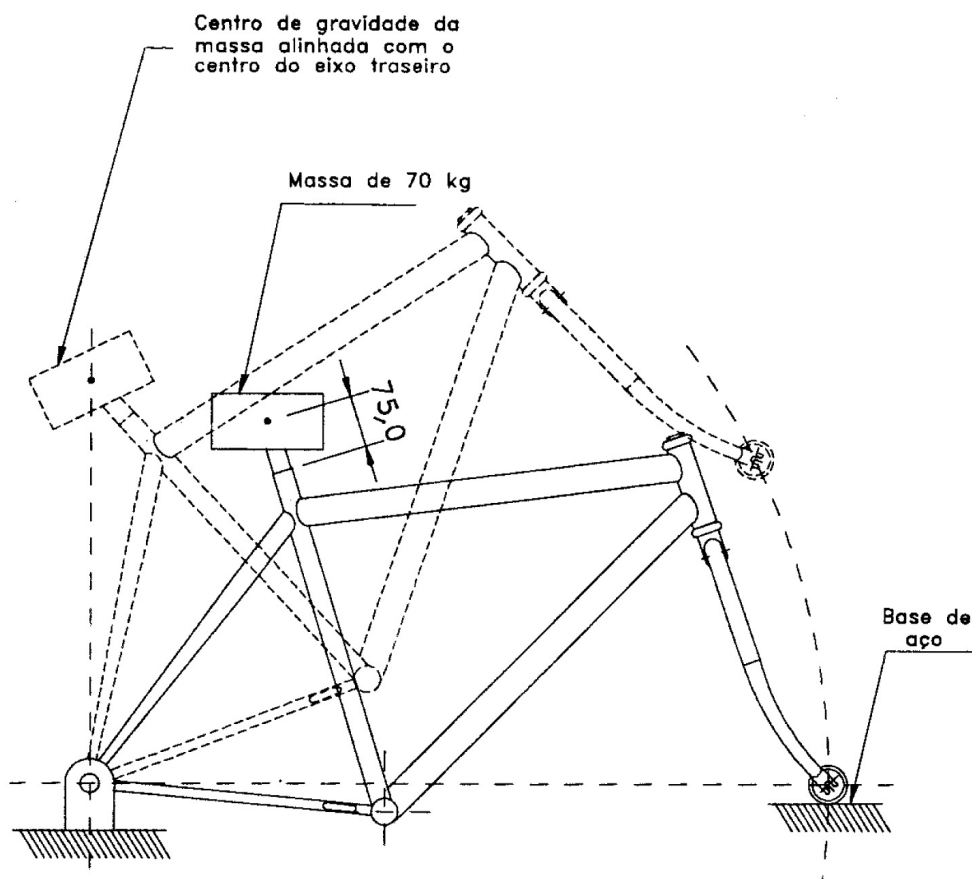


Figura 52: Ensaio de queda do conjunto - ABNT NBR 14714.

Nos dois primeiros ensaios o quadro não deve apresentar sinais visíveis de fratura e/ou deformação permanente. O terceiro ensaio proposto pela norma brasileira verifica a conformidade apenas do garfo, não sendo interesse desse estudo.

As normas internacionais prescrevem esses mesmos três ensaios, mais outros dois ensaios de fadiga para o quadro. No primeiro (fig. 53), o quadro é fixado sobre um apoio articulado pela gancheira traseira e fixo no garfo, e aplica-se uma força inclinada da de 1100N nos pedais, durante 100.000 ciclos.

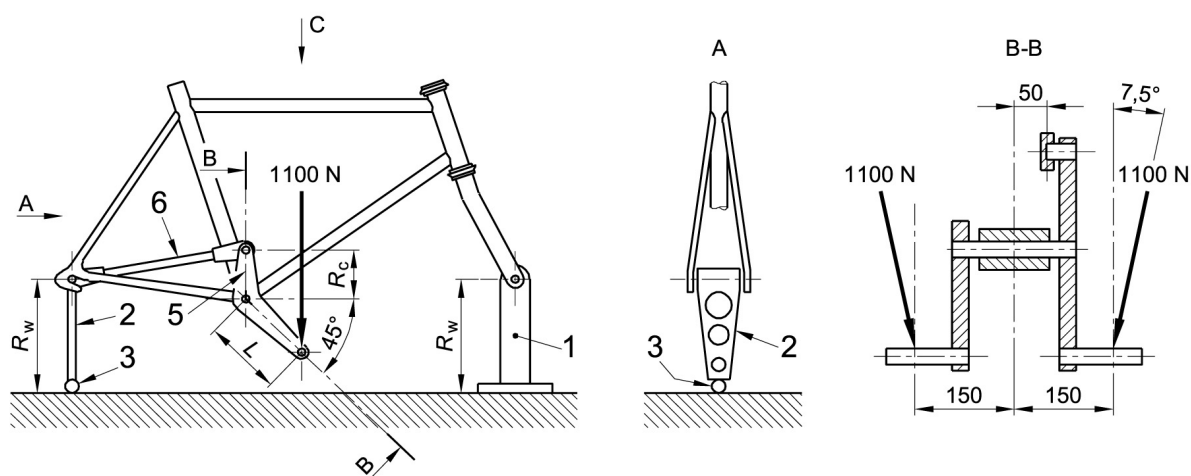


Figura 53: Ensaio de fadiga com forças aplicadas nos pedais - EN14781.

No segundo ensaio (fig. 54) o quadro é fixo pela gancheira traseira e no garfo coloca-se o rolete entre duas chapas de forma que ele possa se movimentar na direção horizontal. Aplica-se uma força de 600N, alternada para frente e para trás, também de 100.000 ciclos.

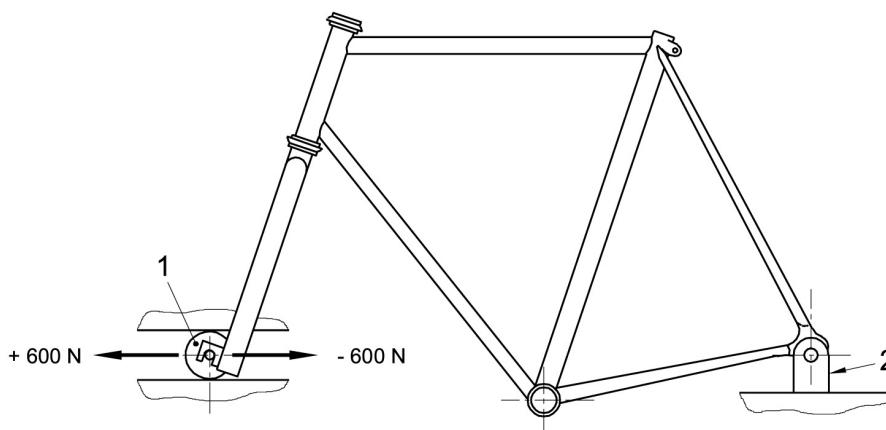


Figura 54: Ensaio de fadiga com forças horizontais - EN14781.

Ainda existe um ensaio que, apesar de não estar normatizado, é comumente empregado por diversos fabricantes, em que se pode medir o limite de ruptura do quadro. Consiste na aplicação de força no tubo do movimento central (fig. 55) até a ruptura, com o conjunto quadro-garfo apoiado pelas gancheiras dos apoios traseiros e pelo garfo.



Figura 55: Ensaio com força aplicada no tubo do movimento central.

A norma não prevê a força aplicada no *Ensaio de impacto contra o conjunto*, pois ela depende da deformação, isto é, de quanto que o rolete de aço desloca durante o impacto. Assim, quanto mais rígido o conjunto quadro-garfo, maior será a força aplicada pela queda de massa sobre o rolete.

Para calcular a força exercida pela massa sobre o rolete, utilizou-se a relação de Conservação Trabalho-Energia, onde:

$$W = Ug$$

$$Ug = mgh$$

$$W = FD$$

W: Trabalho

Ug: Energia potencial gravitacional

m: Massa

g: aceleração gravitacional

h: altura

F: Força

D: Deslocamento

Dessa relação tem-se:

$$F = mgh/D$$

Para um deslocamento hipotético do rolete de 1cm, teríamos:

$$F = 22,5 \times 9,8 \times 0,18 / 0,01$$

$$\mathbf{F = 3969N}$$

Para um deslocamento hipotético do rolete de 3cm, teríamos:

$$F = 22,5 \times 9,8 \times 0,18 / 0,03$$

$$\mathbf{F = 1323N}$$

Ou seja, tomando uma variação de deslocamento hipotética de 1cm a 3cm para o ensaio proposto, espera-se que a força aplicada pela queda do peso sobre o rolete esteja num intervalo de 1323N a 3969N.

5 ENSAIO

5.1 Instrumentação

Foi realizado o *Ensaio de impacto contra o conjunto*, da ABNT NBR 14714:2013, com o quadro instrumentado com sete extensômetros⁷ elétricos ligados em 1/4 de ponte; e o peso com uma célula de carga⁸ (fig. 59). Seis extensômetros foram colados no meio dos tubos (fig. 55), no sentido do comprimento - no tubo de direção (E1), no tubo superior (E3), no tubo inferior (E4), no tubo do selim (E5), no apoio da corrente (E7), e no apoio do selim (E6) - e um extensômetro no tubo da direção (E2), na frente, no sentido transversal. Na figura 56 encontra-se a numeração e localização dos sete extensômetros.

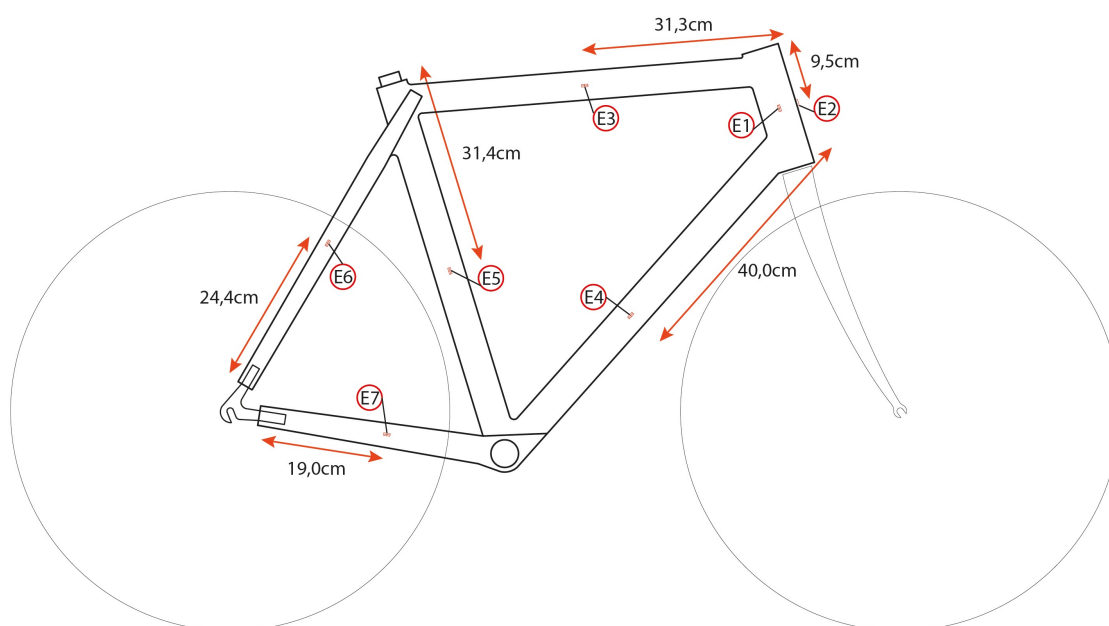


Figura 56: Localização dos extensômetros; medidas tomadas no eixo das peças.

⁷ Os extensômetros elétricos de resistência são usados para medir a deformação a partir da variação da resistência de um condutor elétrico causada pela aplicação de uma tensão mecânica.

⁸ A célula de carga é um transdutor que transforma uma grandeza física (força) em um sinal elétrico por meio de extensômetros elétricos.



Figura 57: Extensômetros colados ao quadro - ainda sem a fiação.



Figura 58: Extensômetro na frente do tubo de direção na direção transversal.



Figura 59: Quadro com extensômetros conectados.



Figura 60: Célula de carga acoplada ao peso; garfo com rolete de aço; gabarito para medir distância de queda do peso.



Figura 61: Quadro posicionado no suporte para ensaio.

Utilizou-se um peso de 25,8kg, ou seja, 3,3kg acima do que a NBR 14714:2013 estabelece. O ensaio foi realizado com queda do peso de seis alturas diferentes: 4, 8, 12, 16, 18 e 20cm - lembrando que a norma determina a queda de 18cm - para uma melhor amostragem dos efeitos de queda do peso sobre os componentes do quadro.

Foi utilizada uma placa conversora A/D para permitir a leitura dos dados pelo programa Lynx AqDados, versão 7.2.

5.2 Resultados do ensaio experimental

Foram gerados gráficos de forças, tensões e deformações em função do tempo para as seis alturas de queda do peso sobre o rolete. Nesse item analisou-se apenas os gráficos de altura de queda a 18cm prescrita pela norma - os gráficos de todas as alturas de queda se encontram no anexo 07. O módulo de elasticidade utilizado para a madeira de eucalipto foi de 16.000MPa. Os picos apresentados nos gráficos correspondem às sucessivas batidas que o peso transmite ao rolete até parar.

Para o ensaio de queda do peso a 18cm, obteve uma força máxima de 1857N, (fig. 62). Esse valor corresponde ao intervalo de força esperado, como calculado no item 4.3.

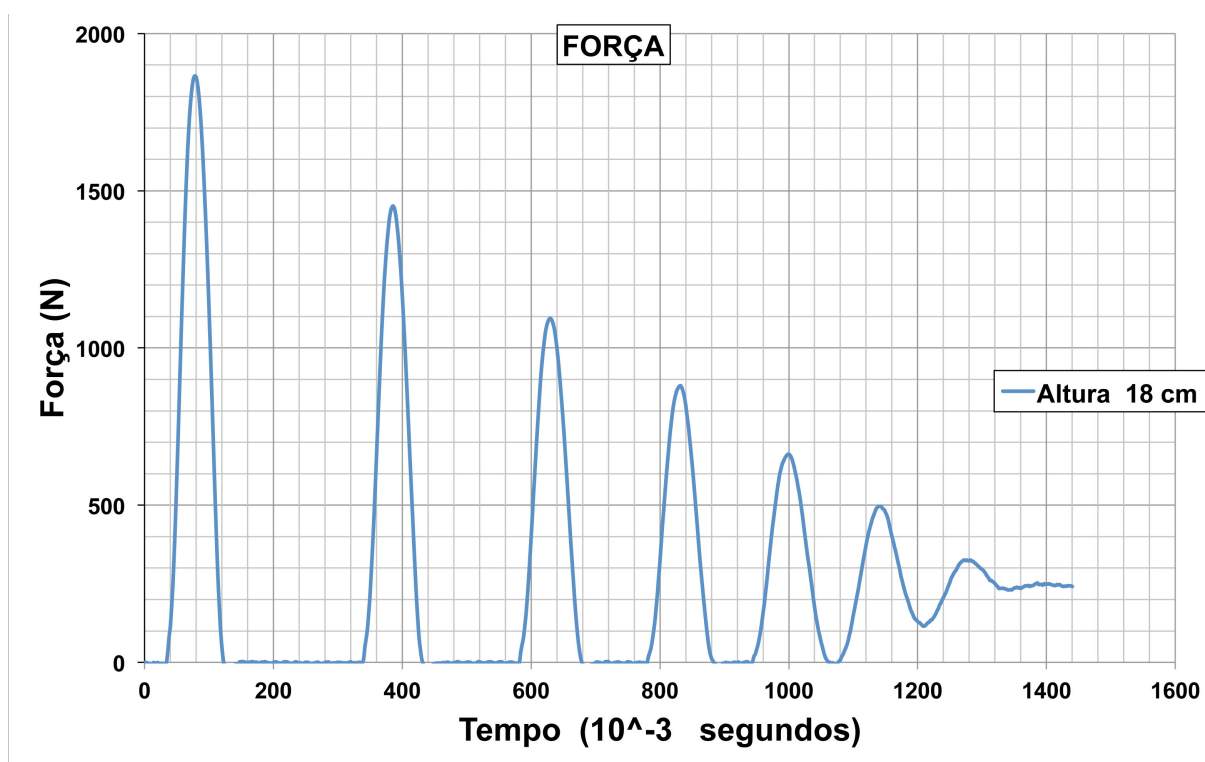


Figura 62: Gráfico de força aplicada em função do tempo; altura de queda de 18cm.

Ainda para a queda de 18cm pode-se analisar as tensões (fig. 63) e deformações (fig. 64) máximas em cada extensômetro. A tensão foi maior no tubo de direção (E2), na direção transversal, apresentando um máximo de 12,77MPa; seguido do E7, no apoio da corrente, com um máximo de 3,69MPa. As tensões dos outros quatro extensômetros foram inferiores a 1,0MPa.

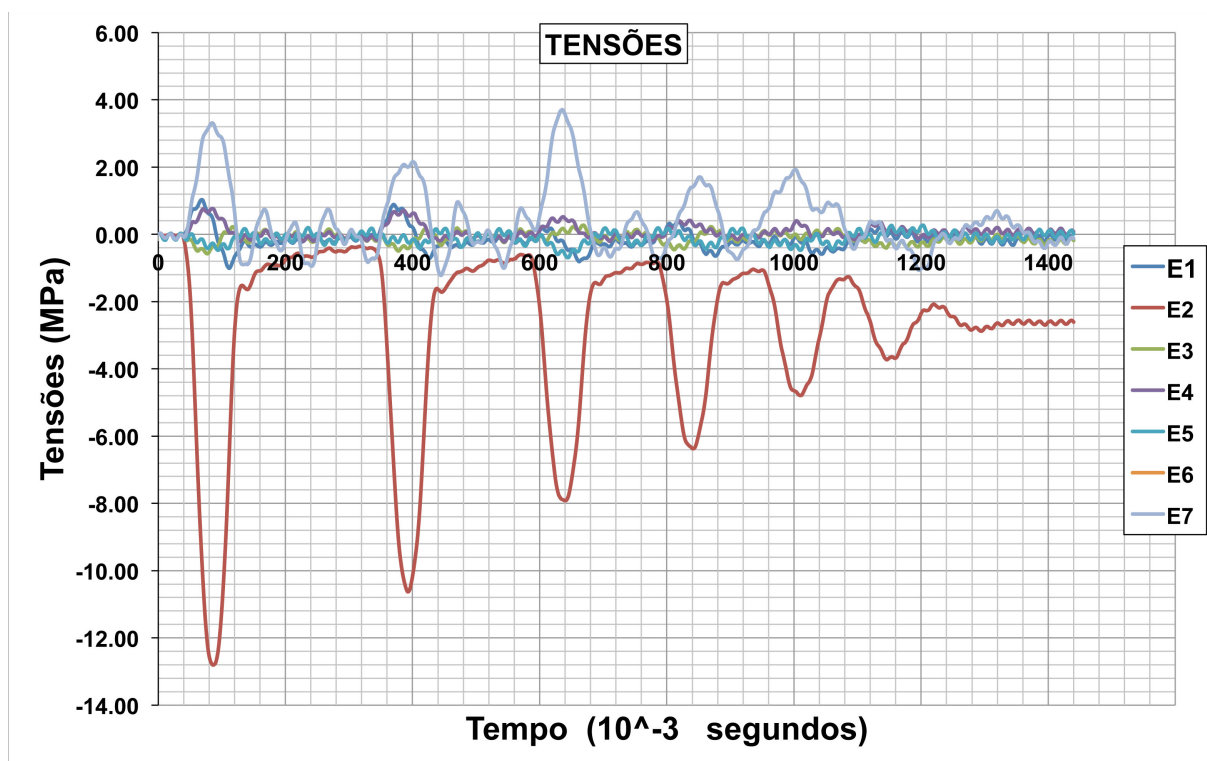


Figura 63: Tensões com altura de queda de 18cm.

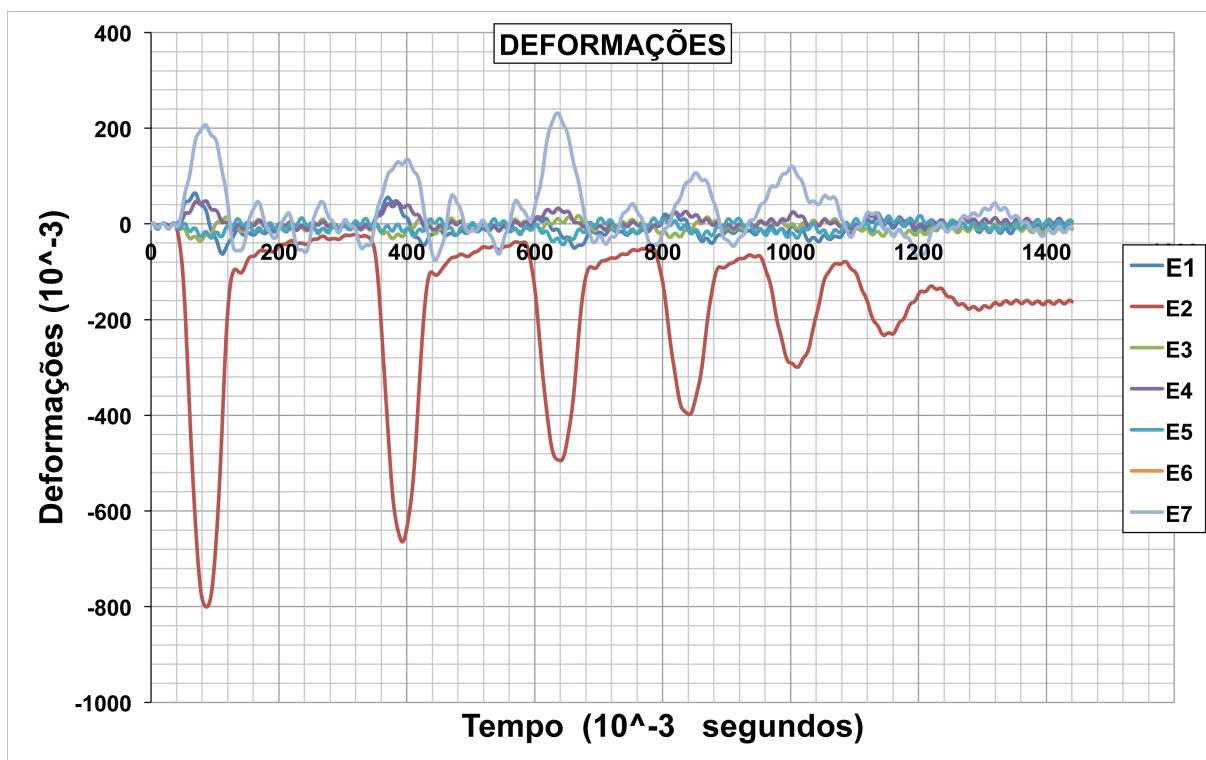


Figura 64: Deformações com altura de queda de 18cm.

Também foram gerados os gráficos de força máxima (fig. 65), tensão máxima (fig. 66) e deformação máxima (fig. 67) para as seis alturas de queda.

A força aplicada variou de 693N a 1960N (fig. 65) para as seis diferentes alturas. O gráfico de forças máximas em função da altura de queda apresentou um coeficiente de linearidade de $R^2 = 0.9918$, portanto exibindo uma boa correlação.

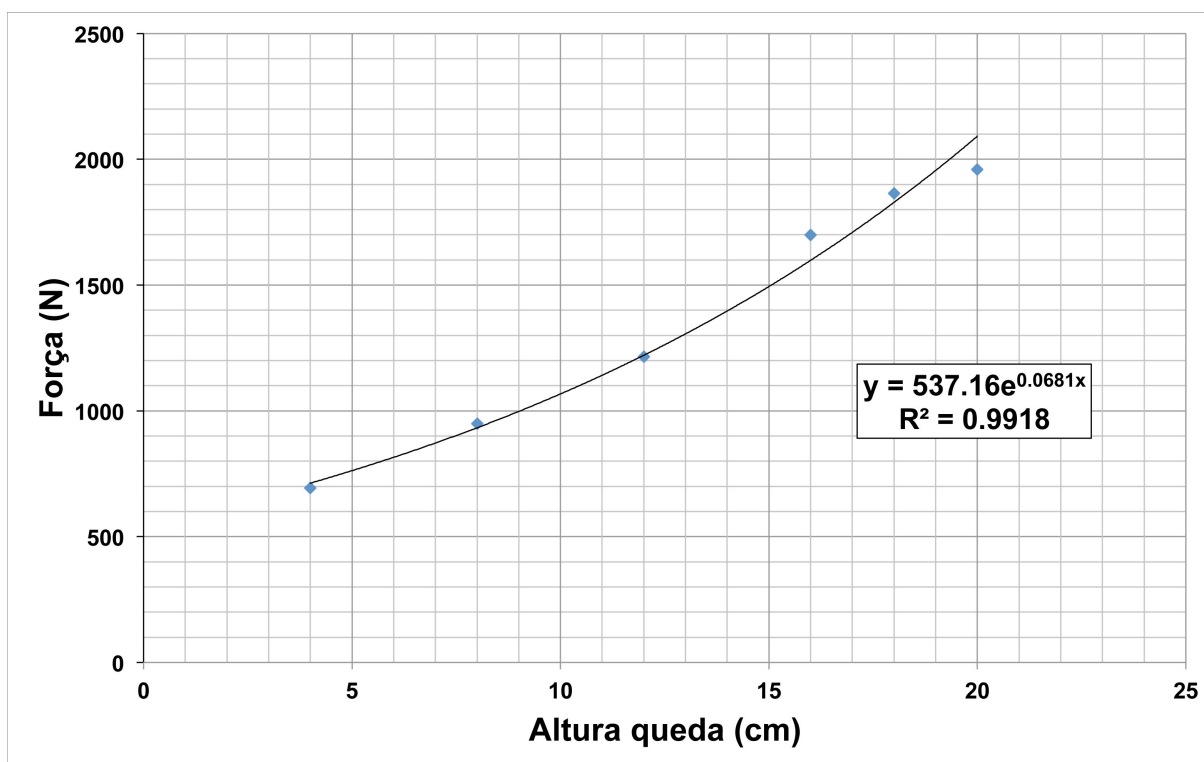


Figura 65: Valores máximos de força de queda do pesos para as diferentes alturas.

Os gráficos das figuras 65 e 66 apresentam, respectivamente, as tensões e as deformações máximas para as diferentes alturas de queda do peso. Os extensômetros E2 (tubo direção - transversal) , E3 (tubo superior) e E5 (tubo do selim) apresentam uma força de tração, portanto o tubo de direção na frente, na direção transversal; o tubo superior e o tubo do selim foram tracionados no ensaio. Por sua vez, o tubo de direção (E1), o tubo inferior (E4), o apoio do selim (E6), e o apoio da corrente (E7) foram submetidos ao esforço de compressão. A tensão máxima apresentada para altura de queda do peso de 20cm, foi de 14,2MPa, no tubo de direção no sentido transversal. A tensão máxima ao longo dos eixos das peças ocorreu no apoio da corrente, com medida de 4,0MPa.

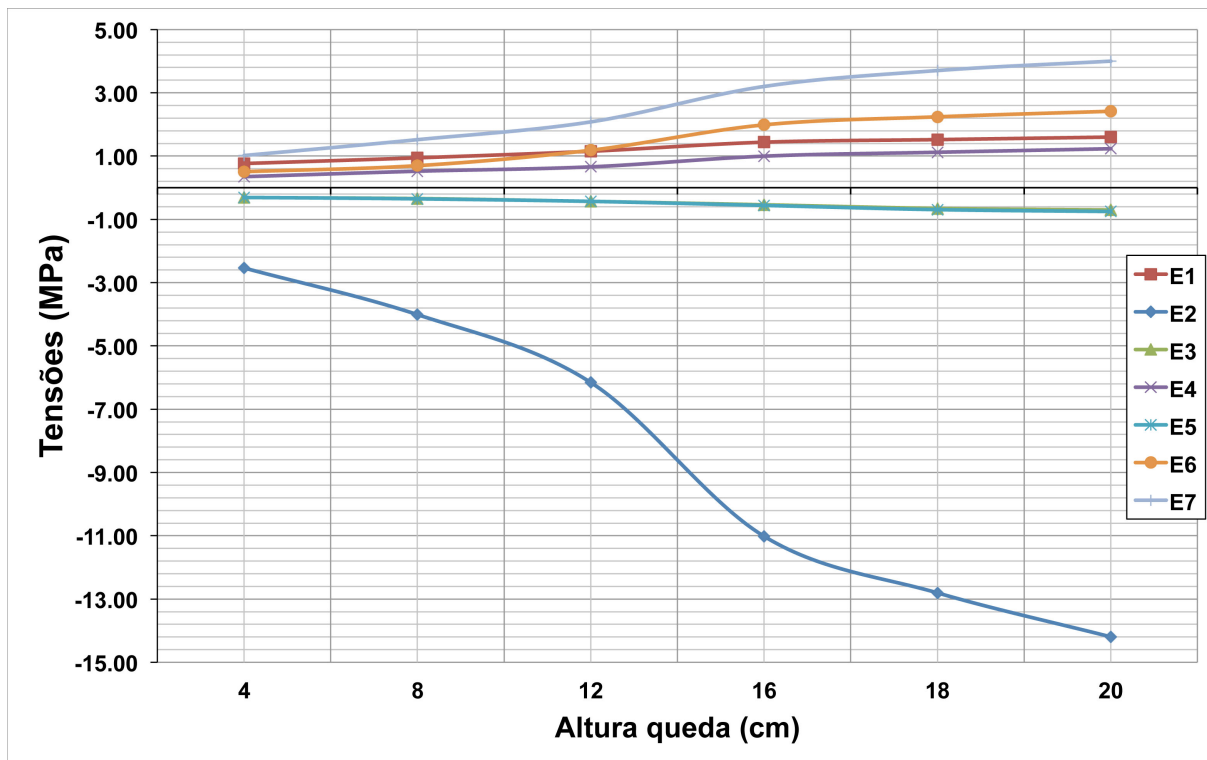


Figura 66: Valores máximos de tensões medidos pelos diferentes extensômetros, para as diferentes alturas de queda do peso.

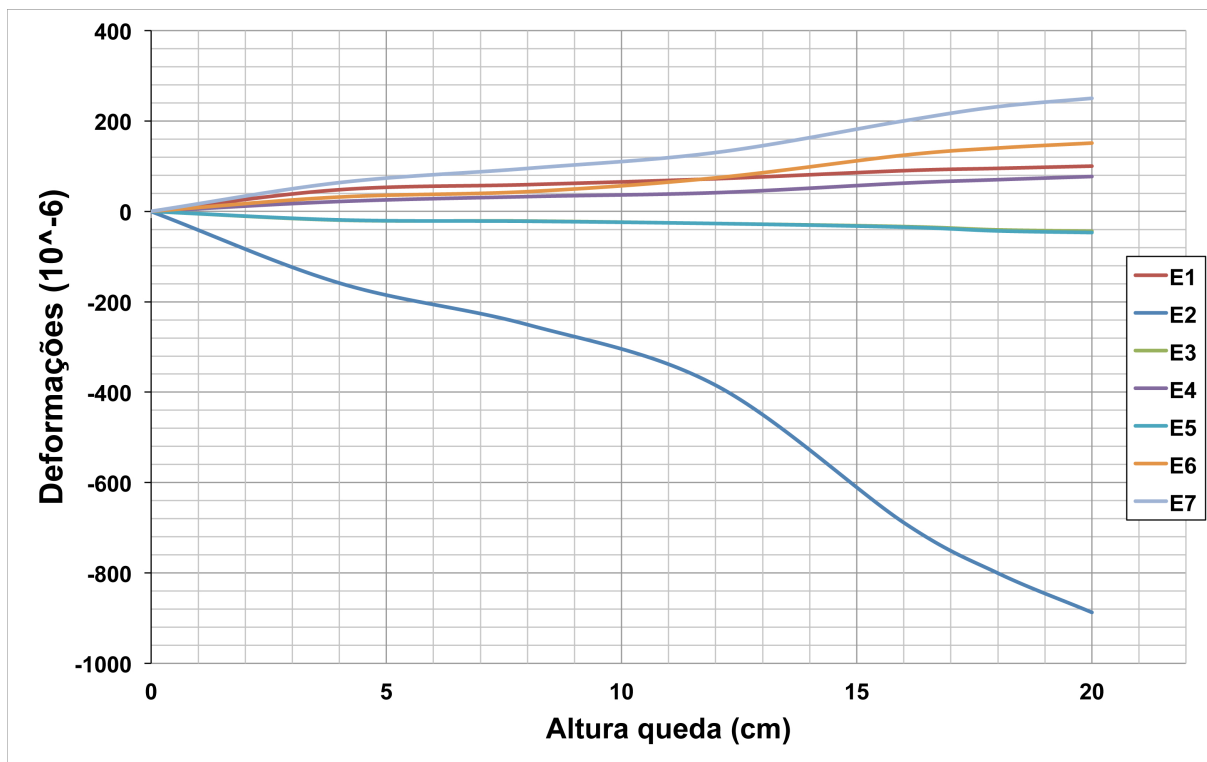


Figura 67: Valores máximos de deformação medidos pelos diferentes extensômetros, para as diferentes alturas de queda do peso.

6 CONCLUSÕES

Atualmente a madeira está sendo empregada em quadros de bicicleta de alta performance acrescentando excelentes atributos mecânicos e interessantes aspectos plásticos. Suas propriedades mecânicas, sobretudo a elevada resistência à fadiga, são compatíveis com os esforços dinâmicos a que um quadro está submetido. Avaliou-se que a madeira de eucalipto de reflorestamento pode ser empregada na confecção de quadros de bicicleta.

Foi proposto um sistema construtivo que pode ser incorporado ao nicho de mercado das bicicletas feitas por encomenda, no qual os usuários requerem um objeto compatível com suas necessidades de uso. Esse sistema construtivo pode ser incorporado sem dificuldades por uma marcenaria com recursos técnicos e equipamentos tradicionais.

O quadro respondeu bem ao *Ensaio de impacto contra o conjunto*, proposto pela ABNT NBR147145, não apresentando nenhum sinal de trinca, de fratura ou de deformação permanente.

Não foi possível realizar o *Ensaio de queda* proposto pela norma, pois o *Ensaio de impacto contra o conjunto* é caracterizado como destrutivo. O comportamento esperado naquele ensaio é que as tensões ao longo dos eixos dos componentes do quadro não tenha discrepância com o apresentado no ensaio de impacto. Espera-se que a tensão mais acentuada ocorra também no tubo de direção, entretanto com menos intensidade, uma vez que o ângulo de ataque no rolete do garfo tem uma componente de força perpendicular menor.

As tensões observadas ao longo dos eixos dos componentes do quadro, todas inferiores a 5MPa, estão muito abaixo do limite de ruptura da madeira de eucalipto, o que não causa nenhum comprometimento estrutural. A tensão mais elevada, de 14,2MPa, foi observada no tubo de direção, na direção transversal. Nesse ponto, o

tubo de alumínio ajudou na resistência mecânica do conjunto, já que essa tensão se deu perpendicular às fibras das lâminas de madeira.

PERSPECTIVAS FUTURAS

A produção acadêmica sobre o comportamento estrutural de quadros de bicicleta é muita escassa - no caso da madeira não encontramos nenhuma - e o desenvolvimento de técnicas para confecção de quadros de madeira pode ser bastante extensa. Futuros trabalhos podem ser desenvolvidos dentro deste tema, uma vez que as possibilidades são bastante amplas.

A prensagem das lâminas se mostrou bastante satisfatória. Para uma diminuição no número de fôrmas, pode-se utilizar a prensagem a vácuo, ainda pouco difundida na marcenaria tradicional. Essa técnica é bastante simples e de baixo custo. Muito utilizada na produção de carenagens de fibra de vidro e na indústria naval. Para a prensagem do triângulo principal do quadro a prensagem a vácuo é interessante pois não necessitaria cunhar para conseguir a pressão transversal. Possibilitaria também diversificar os layouts de laminação, sem precisar adaptar a fôrma; e não necessita de fôrmas diferentes para tamanhos e geometrias de quadros diversos.

O emprego das ligas de alumínio encontradas no mercado brasileiro, com menor resistência mecânica que as ligas usualmente empregadas em quadros de bicicleta, se mostrou satisfatório, visto que os tubos estão envolvidos pela madeira, por isso trabalham estruturalmente menos do que nos quadros de alumínio. Para uma produção de *hobby* ou de pequenas unidades, deve-se levar em conta a possibilidade de importar os tubos, que já veem no tamanho exato e com roscas. Para a gancheira deve-se avaliar melhor o emprego de ligas menos resistente, pois elas são submetidas à esforços concentrados de reação do eixo da roda traseira e trabalham isoladamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR14714:2013: Veículos de duas rodas – Bicicleta – Quadro e garfo rígido – Requisitos de segurança. Rio de Janeiro, 2013. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR7190: 1997: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, F2711-08(2012), Standard Test Methods for Bicycle Frames, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ANDRADE, P. V., “Da construção à montagem.” 2012. Dissertação (Mestrado) Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

ATKINSON, G., DAVISON, R., JEUKENDRUP, A., PASSFIELD, L., “Science and cycling: current knowledge and future directions for research”. *Journal of Sports Sciences*, 21, 767-787, 2003.

BAIRD, S., “Performance Cycling: A Scientific Way to Get the Most Out of Your Bike,” *Van der Plas*, 2010.

BURKE, E., “High-Tech Cycling,” *Human Kinetics*; second edition, 2003.

BURROWS, M., “Bicycle Design: The Search for the Perfect Machine,” *Snowbooks*, 2008.

CARRASCO, E. V. M., “Ligações Estruturais de madeira por adesivo”. São Carlos: EESC/USP, 1984. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 1984.

CHAMPOUX, Y., VITTECOQ, P., MALTAIS, P., AUGER, E., GAUTHIER, B., "Measuring the dynamic structural load of an off-road bicycle frame," *Experimental Techniques*, 28, 2004.

CHAMPOUX, Y., "Bicycle Structural Dynamics" *Sound and Vibration*, 2007.

CUNHA, Luiz Antônio. O ensino de ofícios artesanais e manufatureiros no Brasil escravocrata. São Paulo: Ed. Unesp, 2000.

DE LORENZO, D.S., HULL, M. L., "Quantification of structural loading off-road cycling," *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 121, 1999.

EUROPEAN STANDARDS, EN 14781:2005, Racing bicycles – Safety requirements and test methods.

GIANNETTI, R., "Low-cost lightweight strain measurement system for bicycle application," *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, vol. 47, 1998.

HERLIHY, D., "Bicycle: The History," *Yale University Press*, 2006.

HINAULT, Bernard; GENZLING, Claude. "Ciclismo de estrada." Lisboa: Editorial Presença, 1988.

HULL, M. L., BOULOURCHI, F. "Contributions of rider-induced loads to bicycle frame stress," *Journal of strain analysis*, vol. 23, 1988.

IIDA, Itiro. "Ergonomia, Projeto e Produção". 4. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1997.

LIU, T. J., WU H.C., "Fiber direction and stacking sequence design for bicycle frame made carbon/epoxy composite laminate", *Material and Design*, Elsevier, 2009.

LOBÃO, M. S., LÚCIA, R. M. D., MOREIRA, M. S. S., GOMES, A., "Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades", *Revista Árvore*, V. 28, Viçosa, 2004.

MAGNANI, F.S. "Tecnologia da bicicleta." (Disponível em: http://blog.fabiomagnani.com/?page_id=14841, acessado em 17/03/2015)

MAPES, J., "Pedaling Revolution: How Cyclists Are Changing American Cities," *Oregon State University Press*, 2009.

MARIÑO, S., MORAES, A., PEQUINI, P., "Bicicletas para uso personalizado: Recomendações antropométricas". 9° *Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design*, São Paulo, 2010.

MASCIA, N. T. "Considerações a respeito da anisotropia na madeira." São Carlos: EESC/USP, 1991. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo, São Carlos, 1991.

MORGAN, J. E., "The recurrent failure of modern bicycle components", *The engineering of sports*, S. J. Haake, ed., Blackwell Science, 1998.

PEQUINI, S. Mariño. "Ergonomia aplicada ao design de produtos: Um estudo de caso sobre o design de bicicletas." 2005. Tese (Doutorado) FAU/USP, São Paulo, 2005.

RAUCK, M. J. B.; GERD, V.; PATURI, F. R. *Historia de la bicicleta*. Barcelona: Ed. Blume, 1981.

SENNETT, Richard. *O Artífice*. Rio de Janeiro: Record, 2009.

SHARP, A., "Bicycles & tricycles: a classic treatise on their design and construction", *Dover Publications*, 2011.

U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY. (1944). Design of wood aircraft structures / War Department, Army Air Forces. Navy Department, Bureau of Aeronautics. Department of Commerce, Civil Aeronautics Administration.

XIANG, Z., et al., "Load on Bicycle frame during Cycling with Different speeds and gestures". *Journal of Tianjin University*, 2011.

WILSON, D. G., "Bicycling Science," *MIT Press*, third edition, 2004.

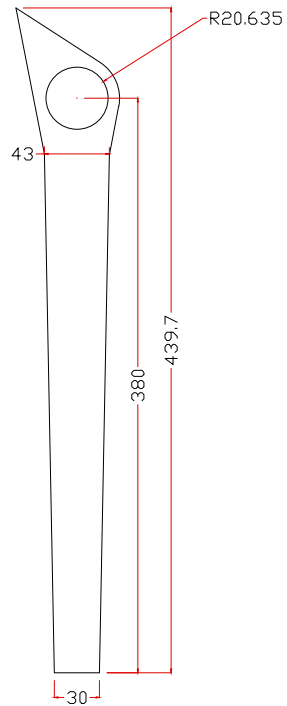
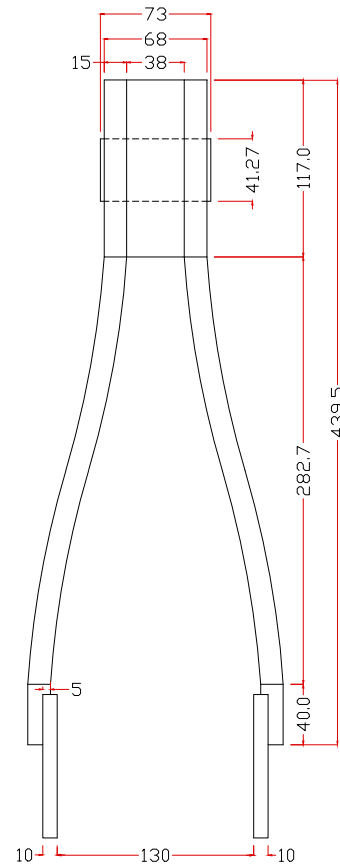
Disponível em: <http://www.escoladebicicleta.com.br>. Acessado em 03 de março de 2015.

Fornecedor norte-americano de tubos para quadros de bicicleta. Disponível em: <http://www.cycle-frames.com/>. Acessado em 25 de abril de 2015.

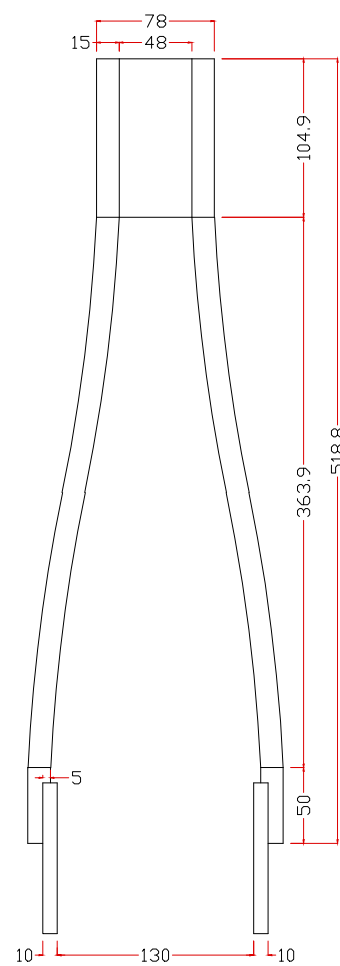
Fornecedor de madeira de eucalipto: Disponível em : <http://www.lyptus.com.br/>. Acessado em 18 de maio de 2015.

Catálogo Alcoa, "Ligas e Têmperas de Extrusão", 2010. Disponível em: https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo_ligas_temperas_2010.pdf. Acessado em 25 de maio de 2015.

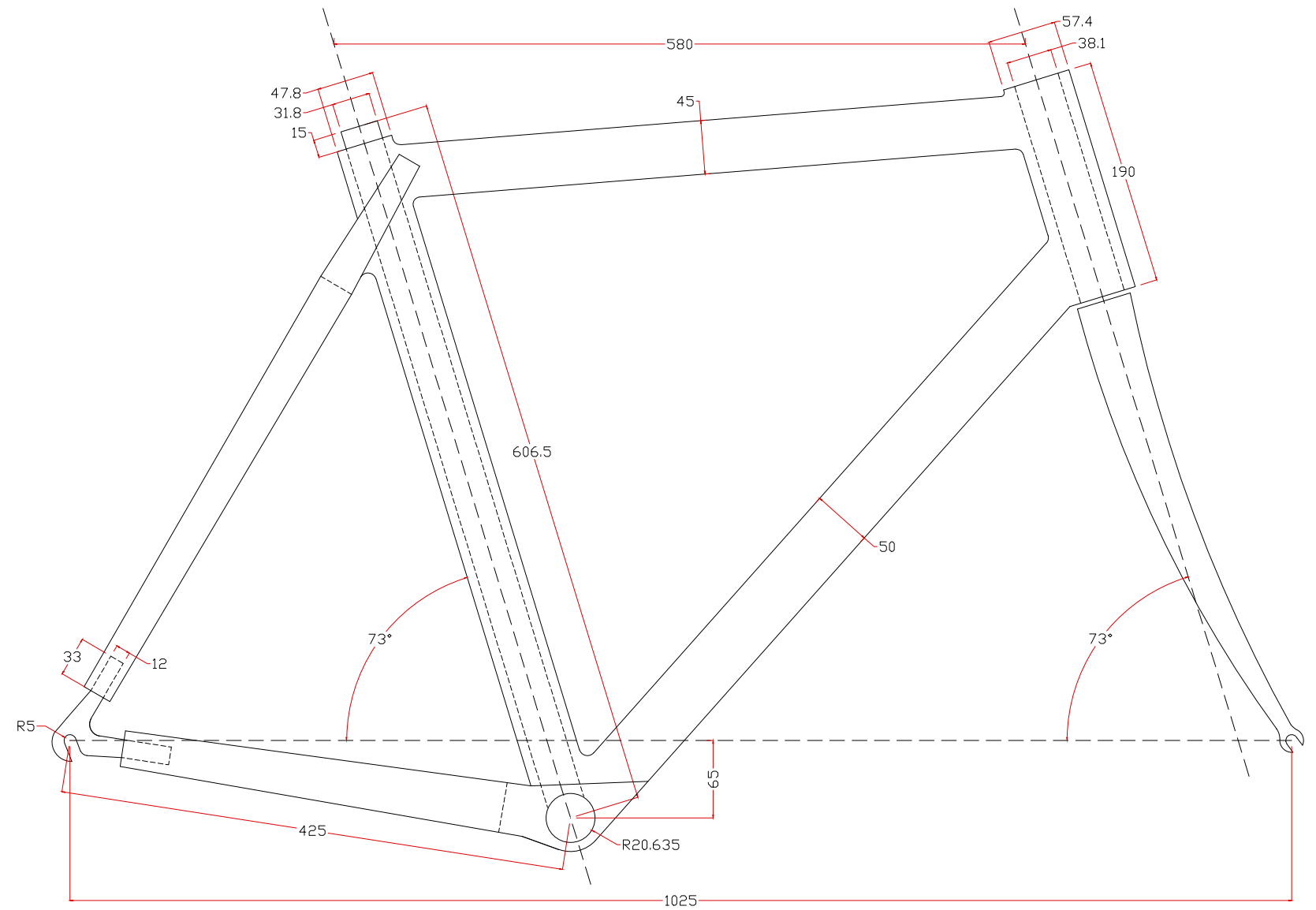
ANEXOS



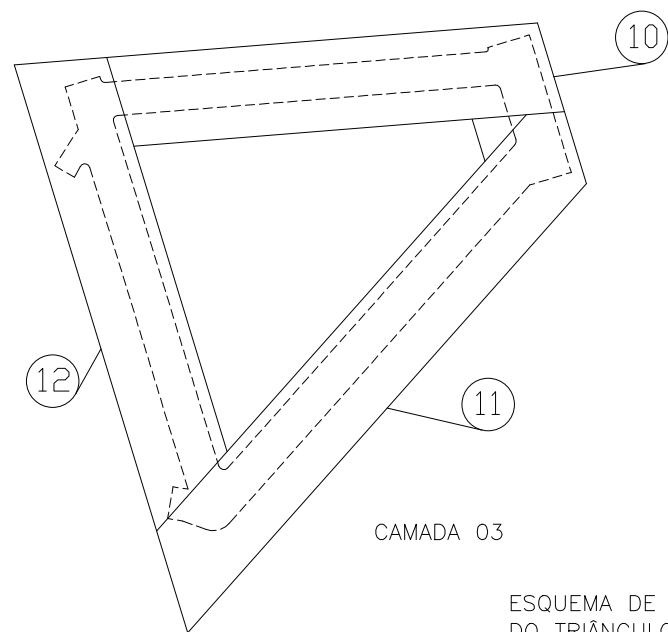
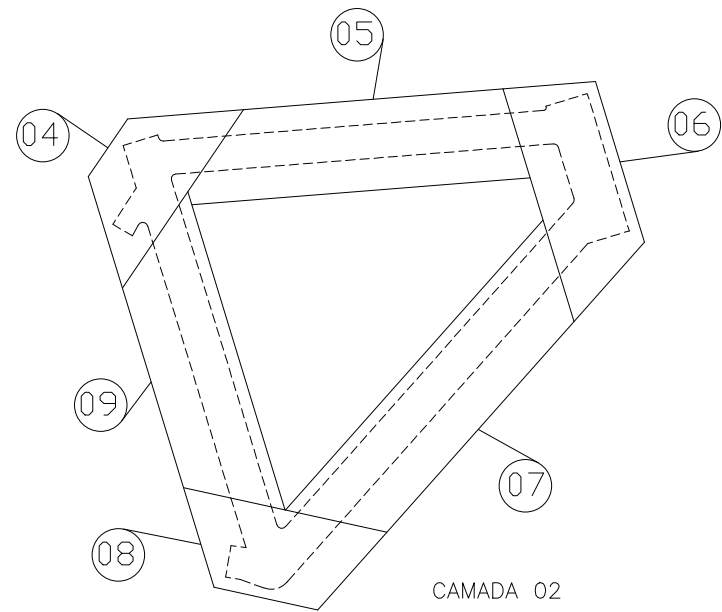
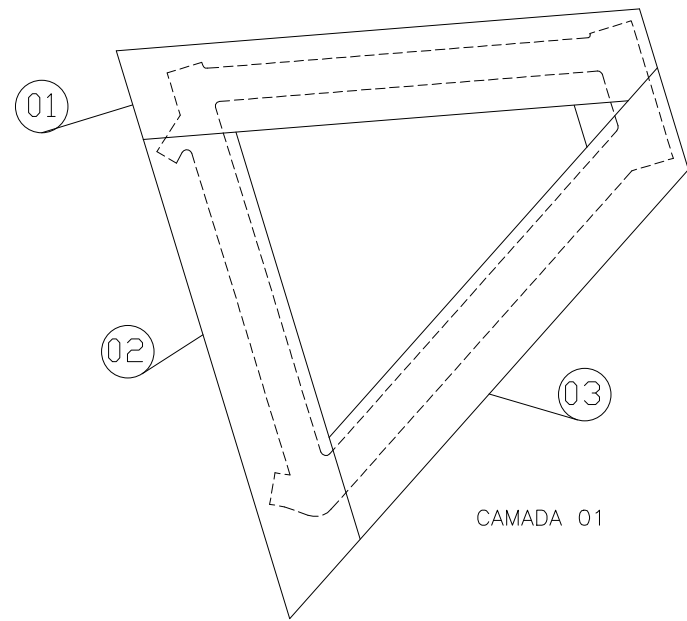
VISTA DO APOIO DA CORRENTE
 ESCALA 1 : 50



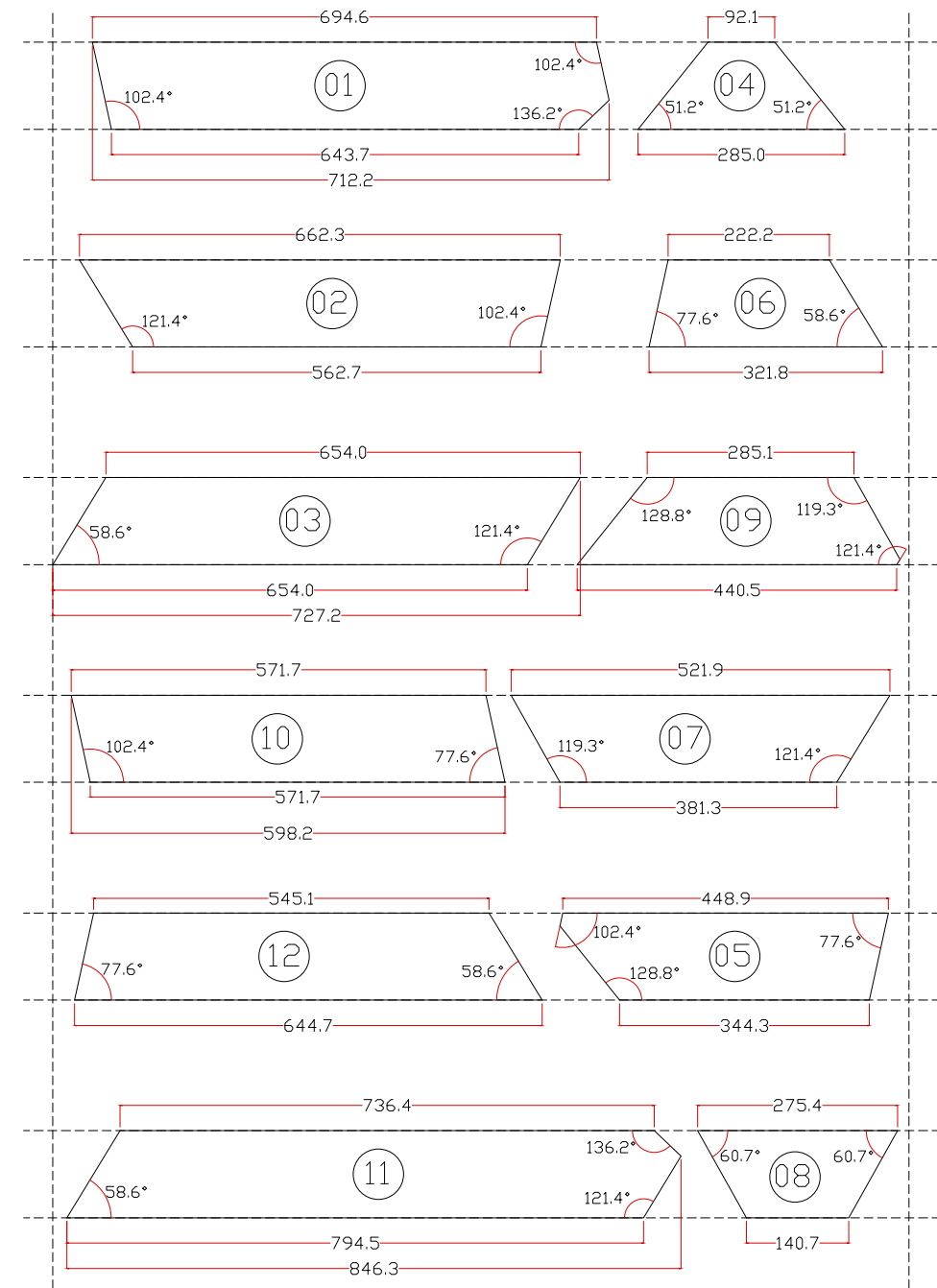
VISTA DO APOIO DO SELIM
 ESCALA 1 : 50

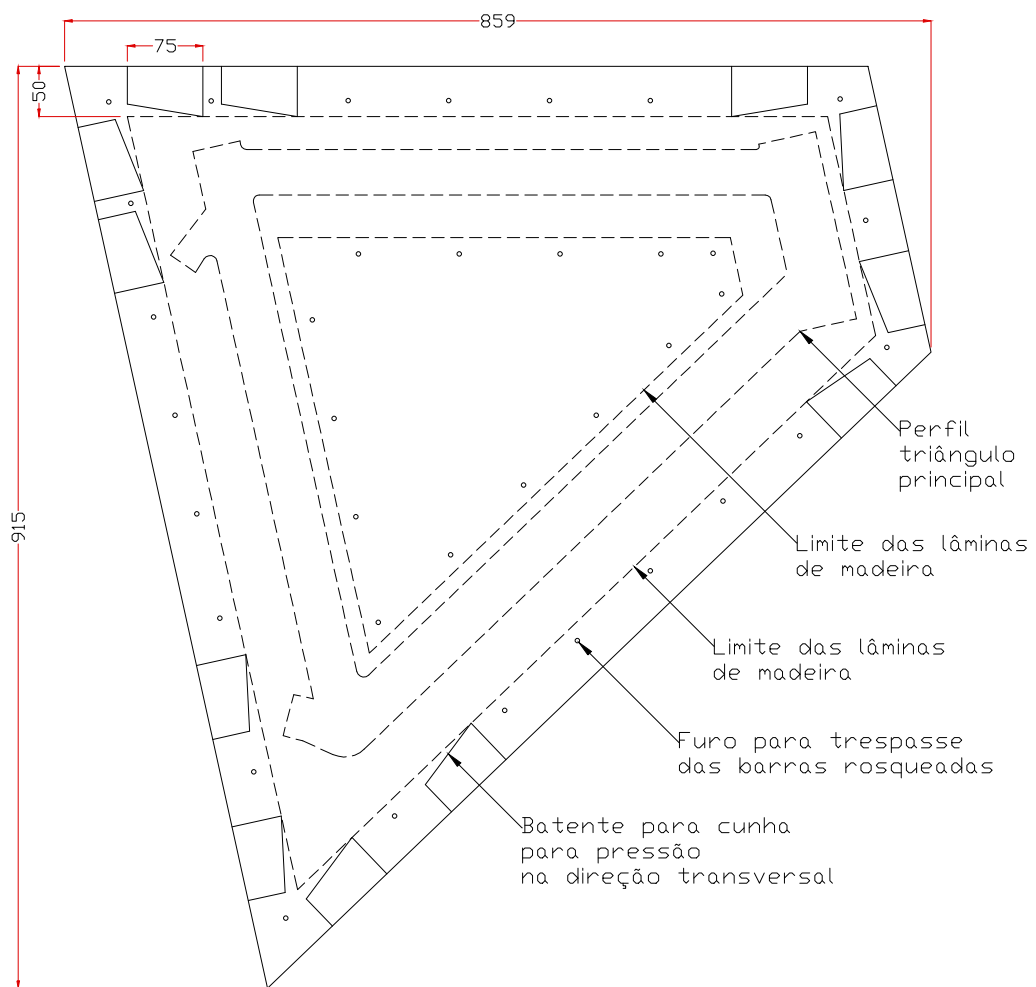


PROTÓTIPO QUADRO MADEIRA
 ESCALA 1 : 50



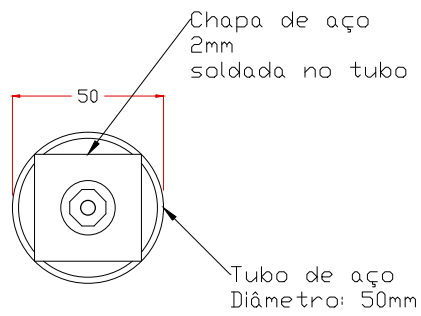
ESQUEMA DE LAMINAÇÃO
DO TRIÂNGULO PRINCIPAL
ESCALA 1 : 100



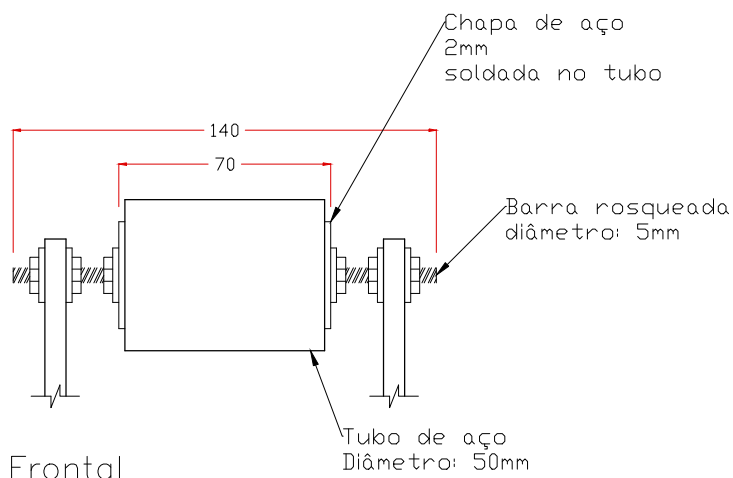


Prensa para laminação
do triângulo principal

ESCALA 1 : 75



Lateral

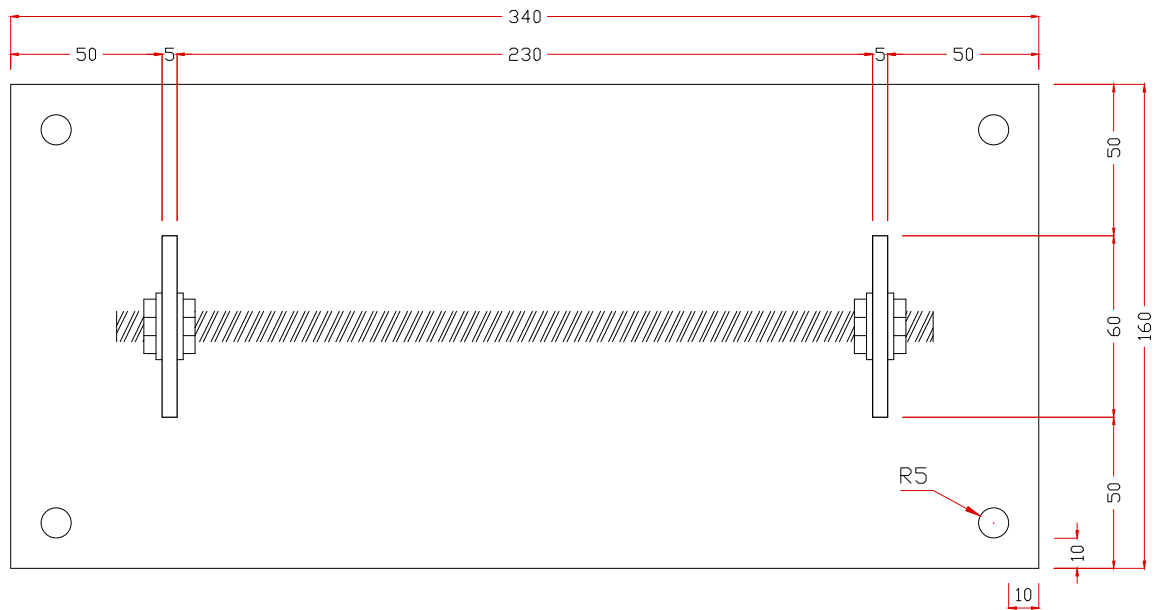
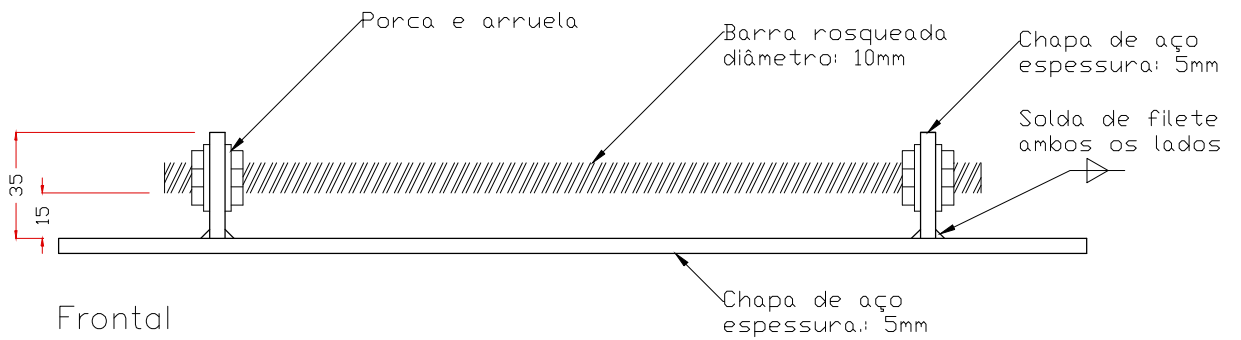
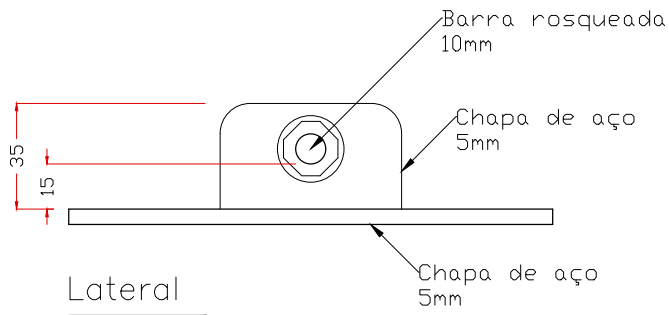


Frontal

Rolete (garfo) ensaio NBR14714

ESCALA

1 : 25

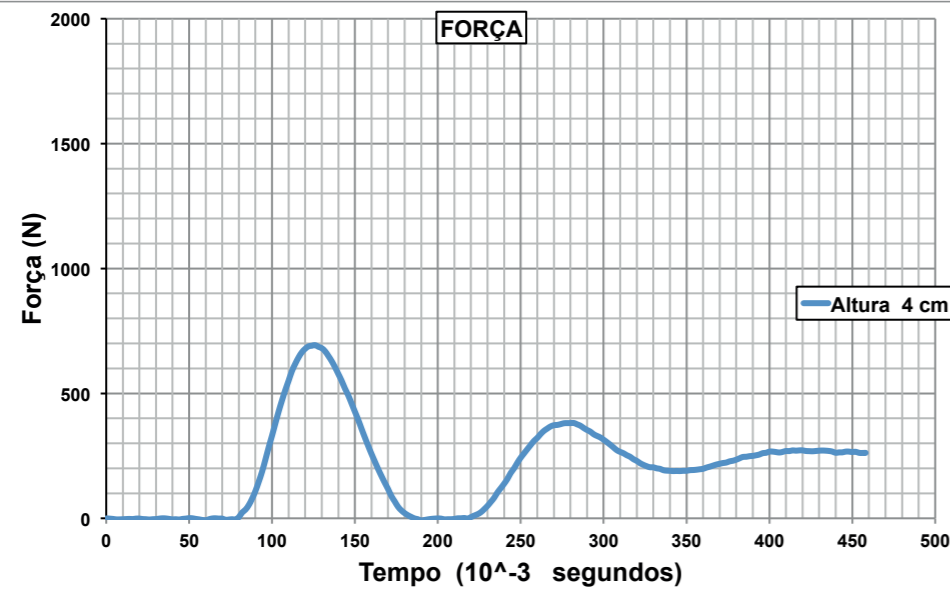


Topo

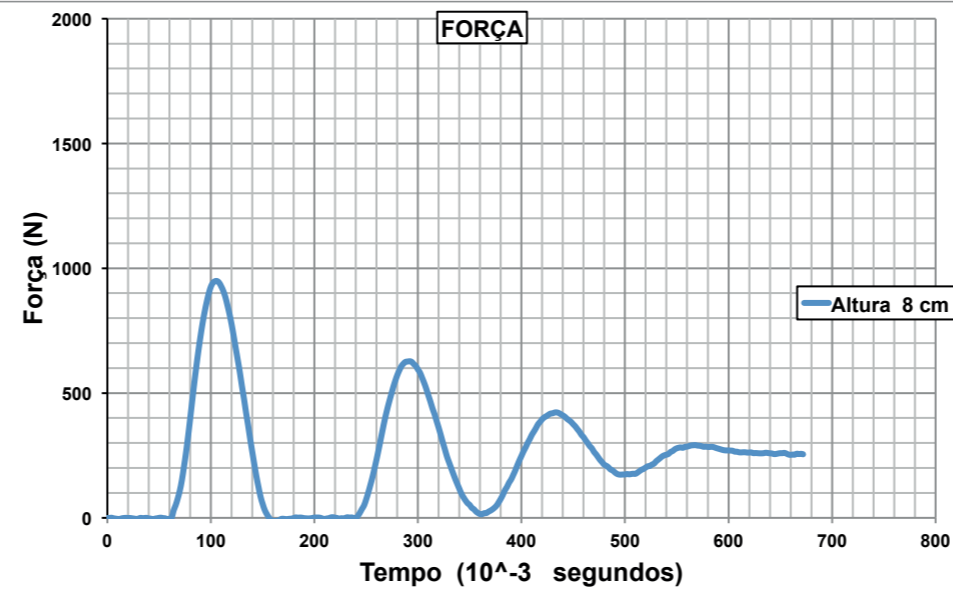
Suporte ensaio NBR14714

ESCALA

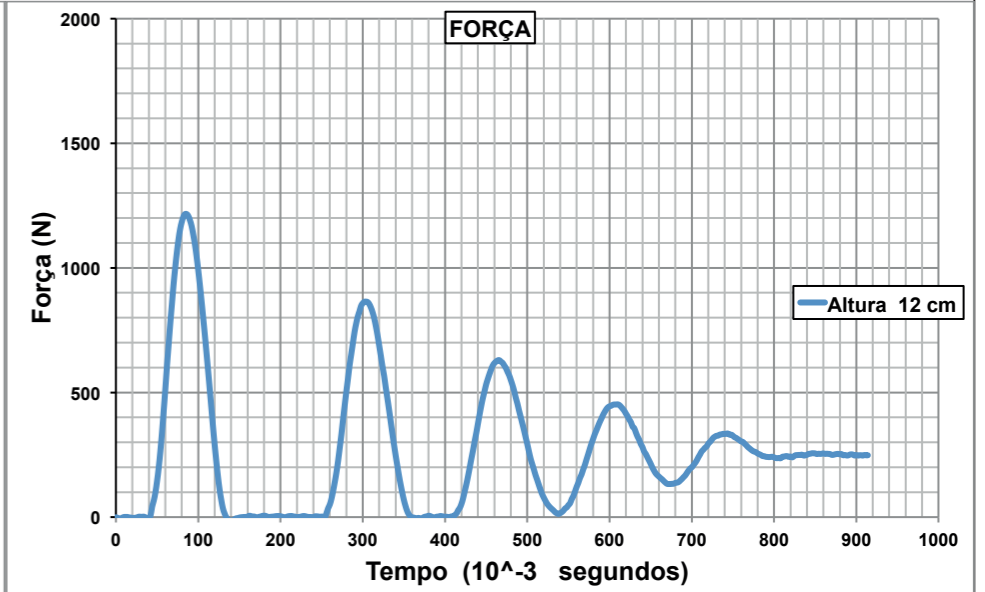
1 : 25



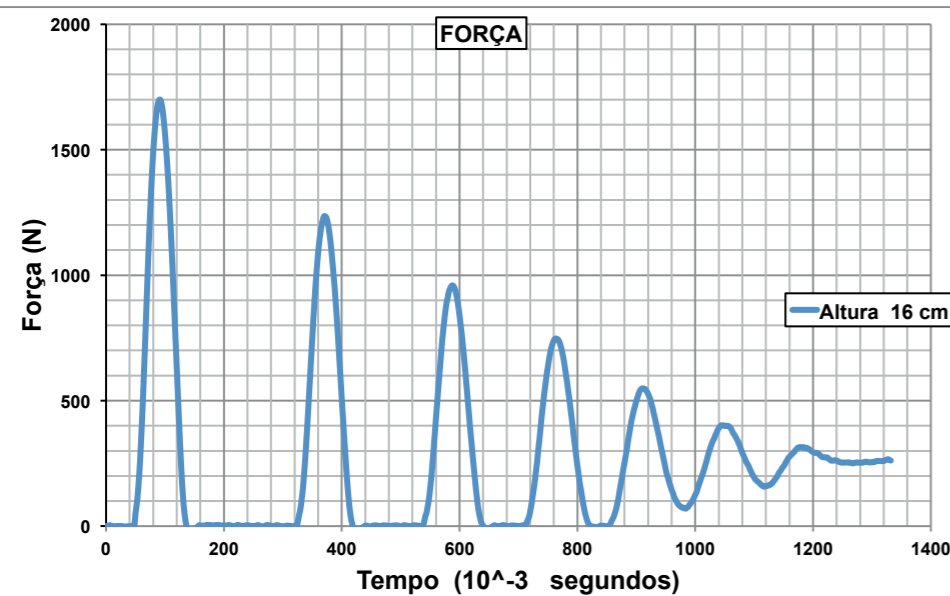
Altura da queda do peso sobre o rolete: **4cm**



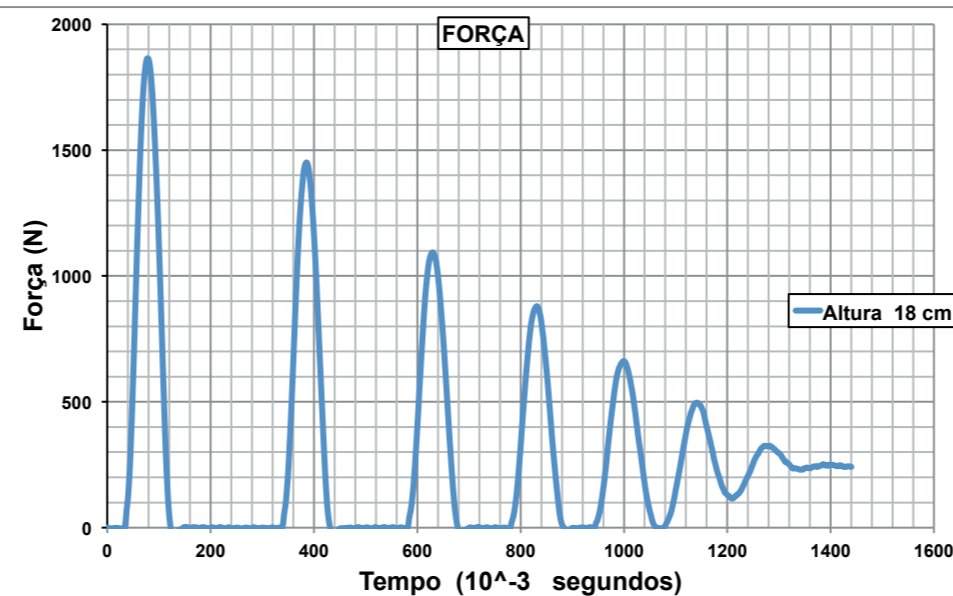
Altura da queda do peso sobre o rolete: **8cm**



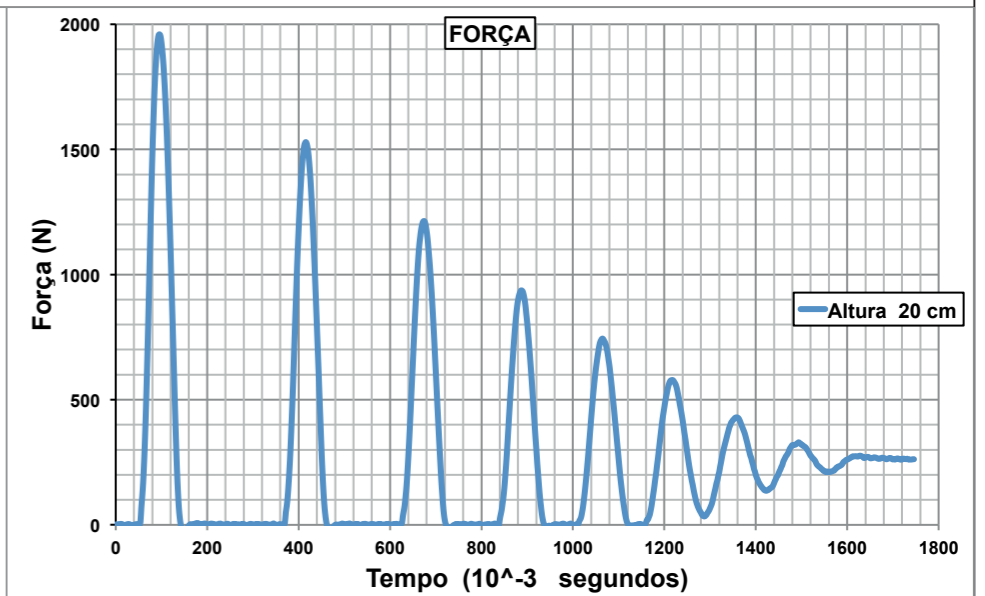
Altura da queda do peso sobre o rolete: **12cm**



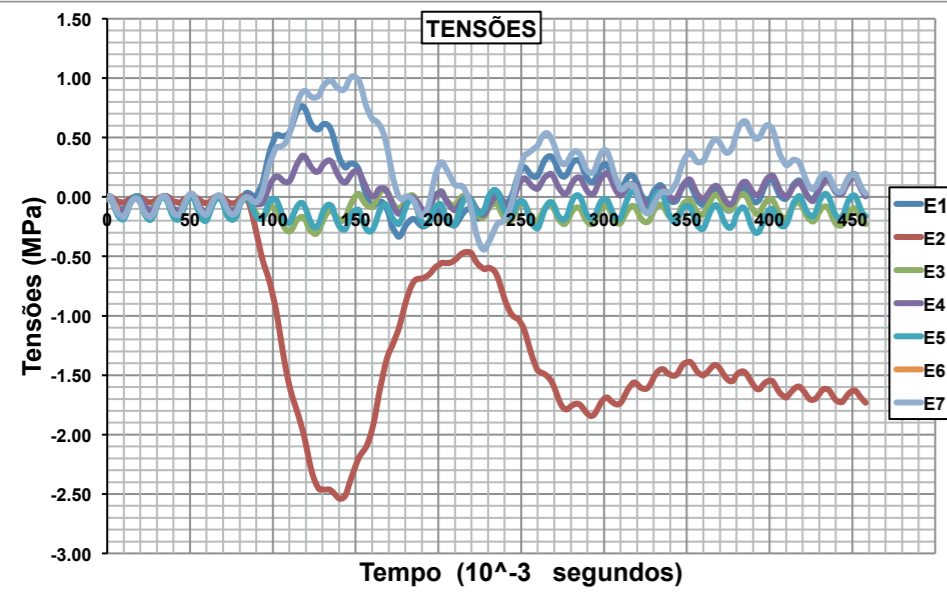
Altura da queda do peso sobre o rolete: **16cm**



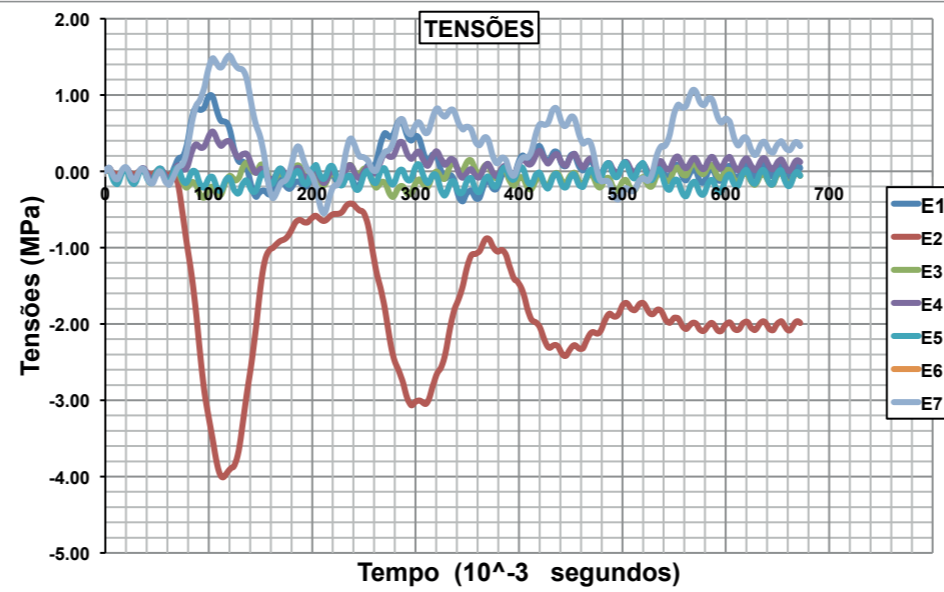
Altura da queda do peso sobre o rolete: **18cm**



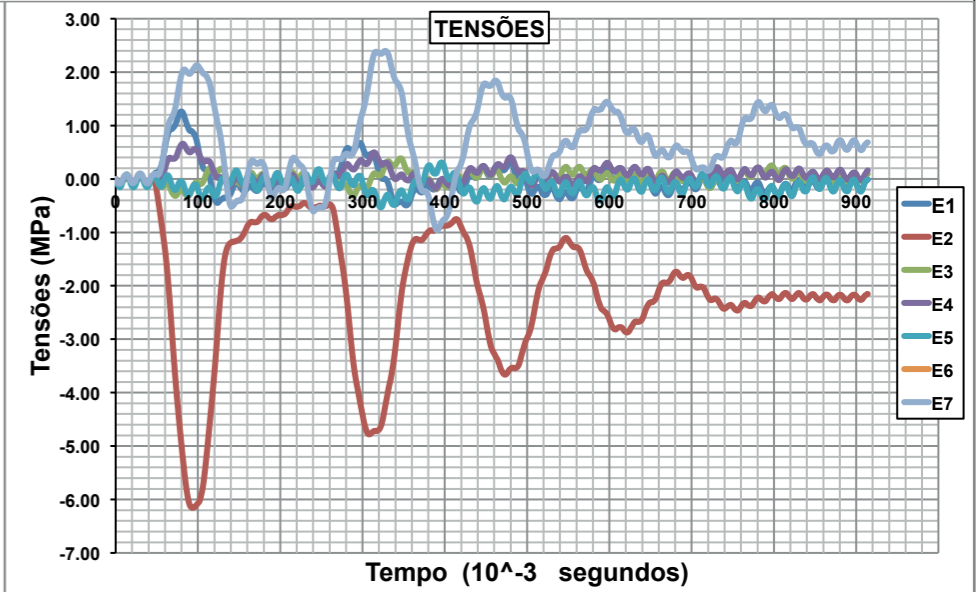
Altura da queda do peso sobre o rolete: **20cm**



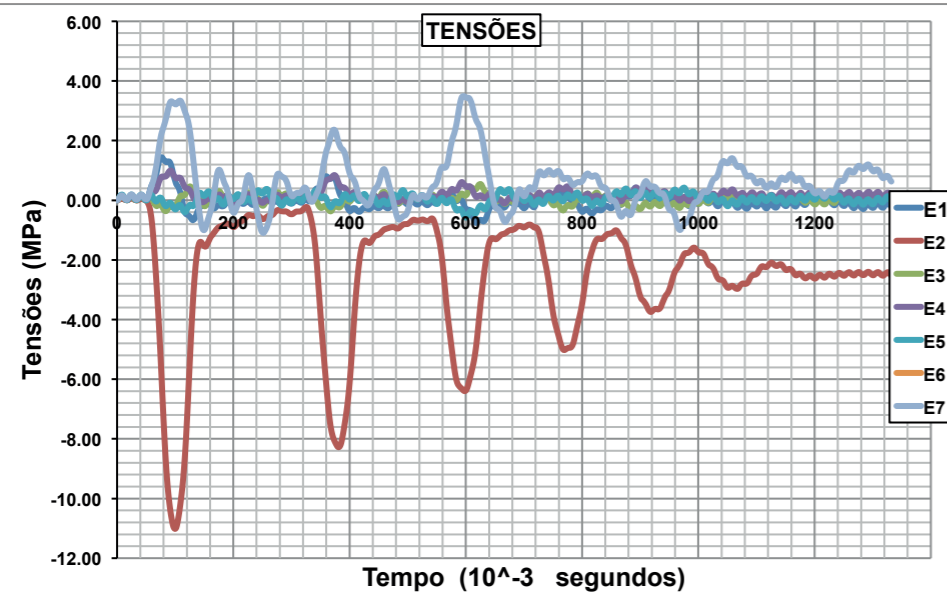
Altura da queda do peso sobre o rolete: **4cm**



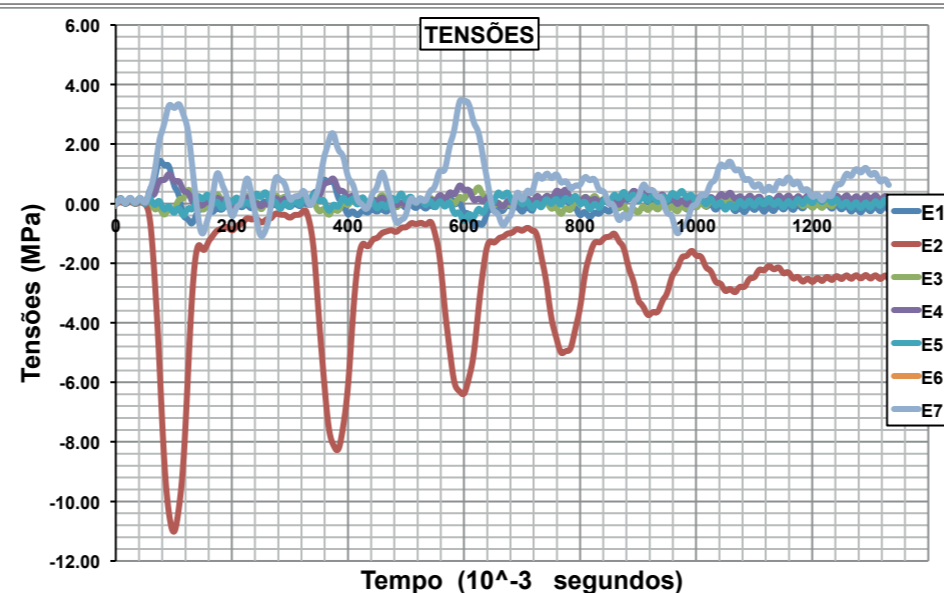
Altura da queda do peso sobre o rolete : **8cm**



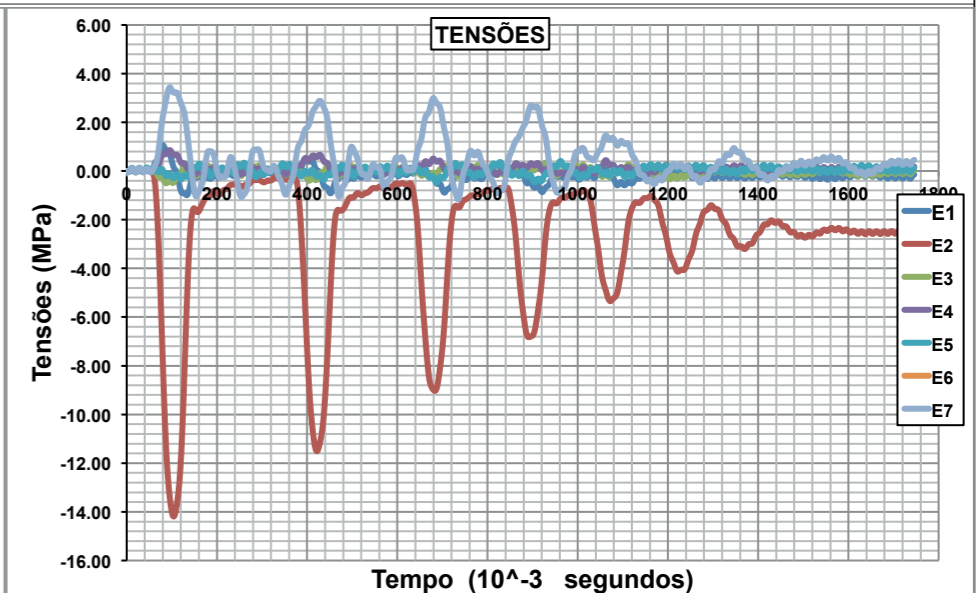
Altura da queda do peso sobre o rolete: **12cm**



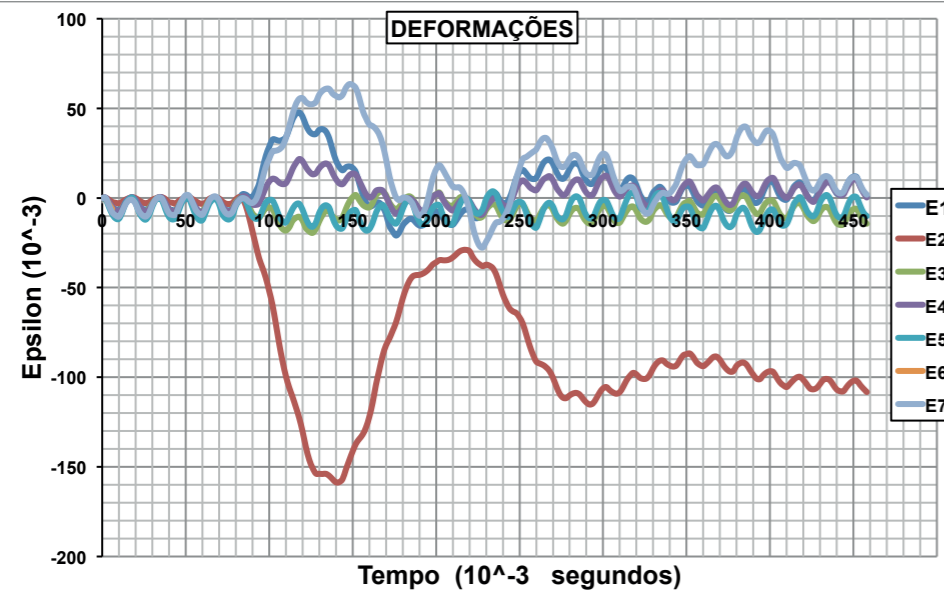
Altura da queda do peso sobre o rolete: **16cm**



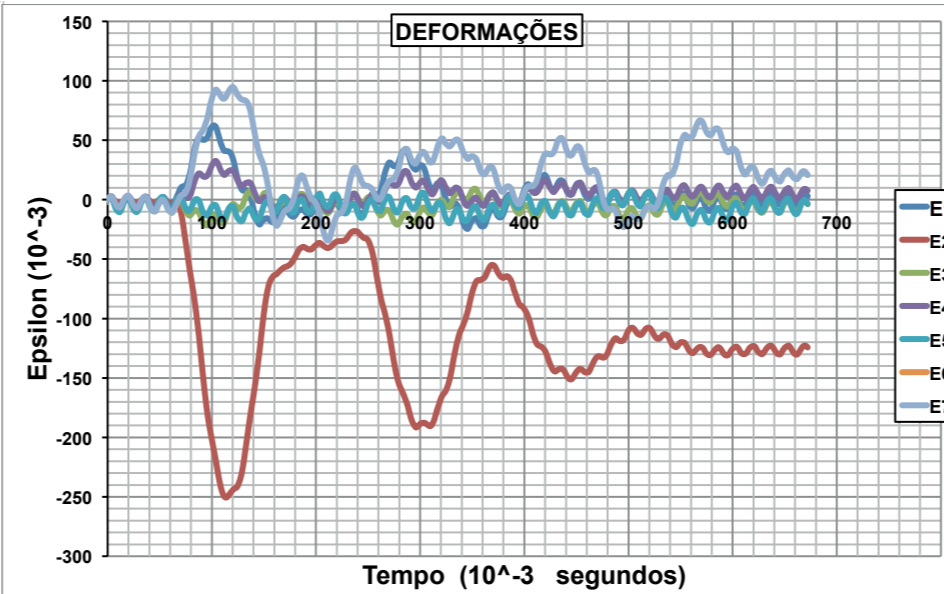
Altura da queda do peso sobre o rolete: **18cm**



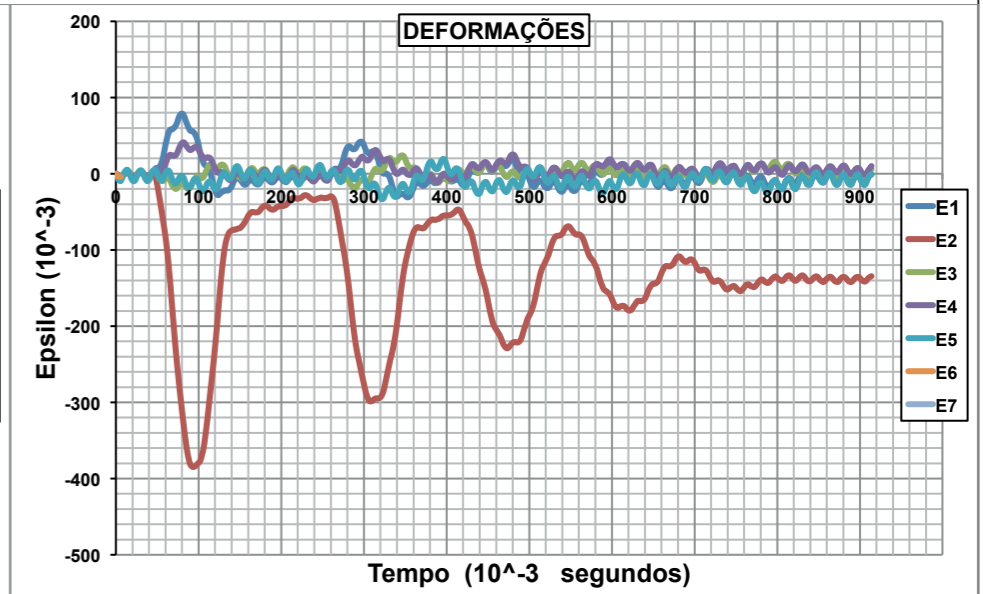
Altura da queda do peso sobre o rolete: **20cm**



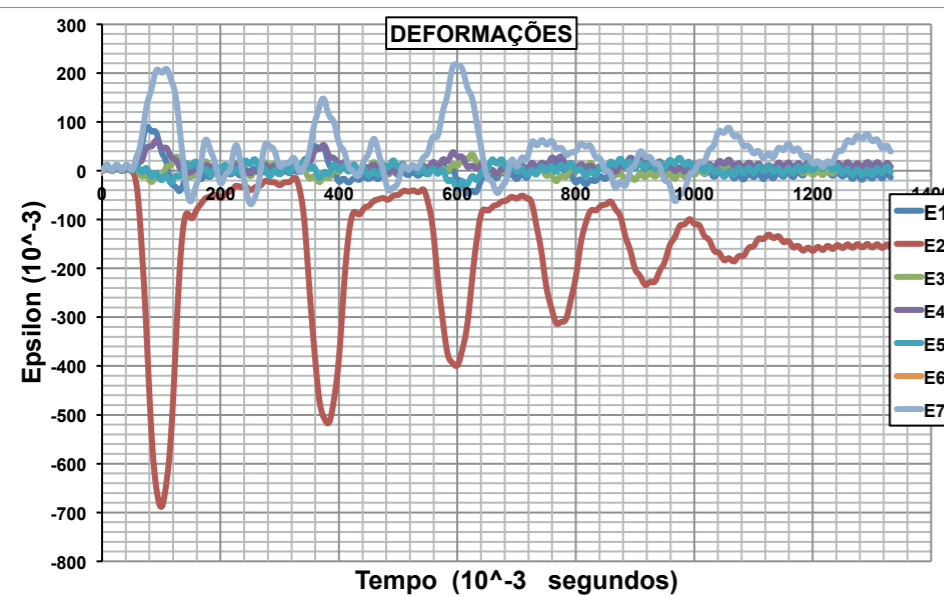
Altura da queda do peso sobre o rolete: 4cm



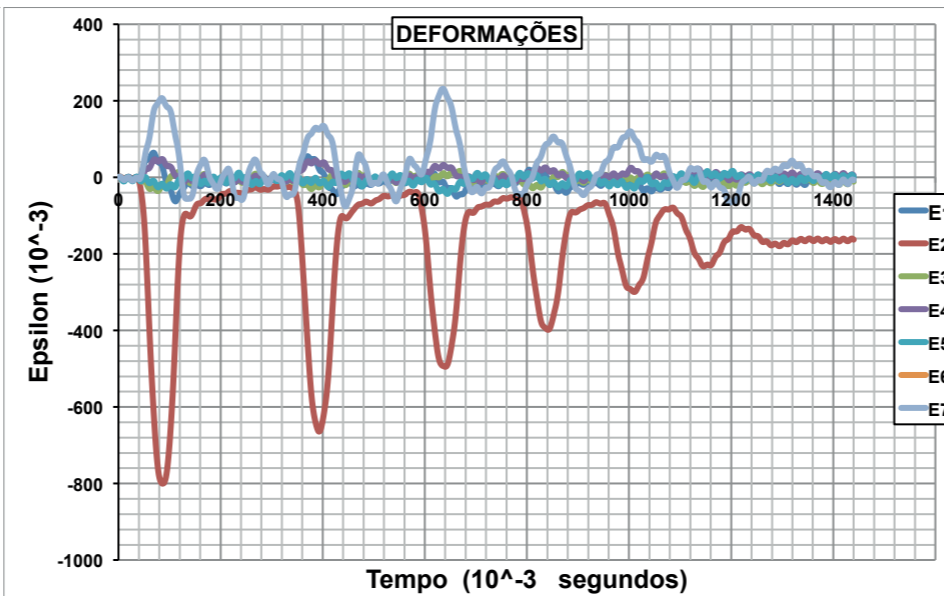
Altura da queda do peso sobre o rolete : 8cm



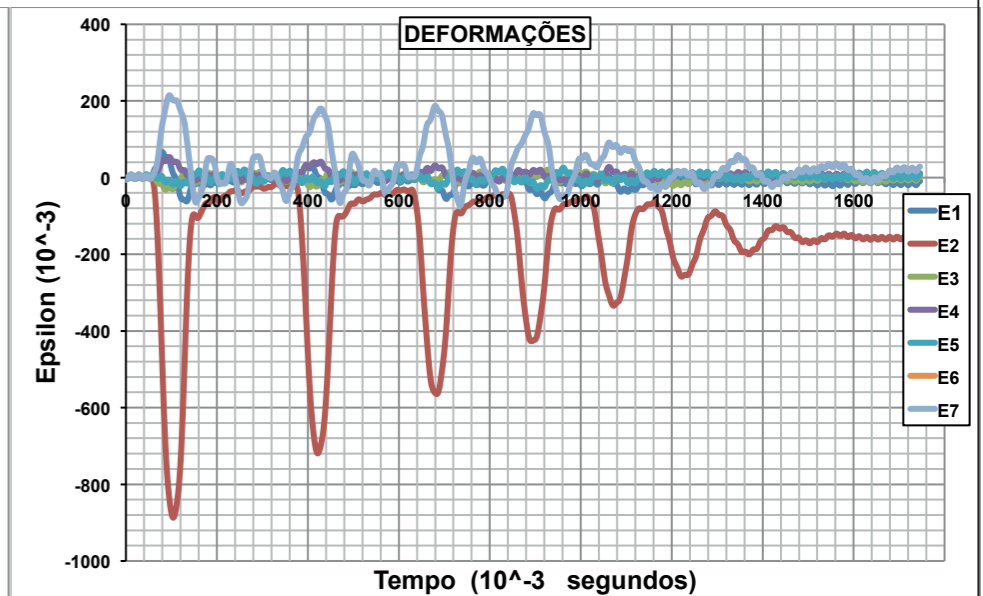
Altura da queda do peso sobre o rolete: 12cm



Altura da queda do peso sobre o rolete: 16cm



Altura da queda do peso sobre o rolete: 18cm



Altura da queda do peso sobre o rolete: 20cm