



Marcelo Fonseca Betz

**Desenvolvimento de uma Ponte Dobrável
de Bambu de Rápida Montagem para
Situações Emergenciais**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil do Departamento de
Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso
Coorientador: Prof. Kent Alexander Harries
Coorientador: Prof. Lucas Alves Ripper

Rio de Janeiro
Janeiro de 2018



Marcelo Fonseca Betz

**Desenvolvimento de uma Ponte Dobrável
de Bambu de Rápida Montagem para
Situações Emergenciais**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Kent Alexander Harries

Coorientador

University of Pittsburgh

Prof. Lucas Alves Ripper

Coorientador

Escola Parque

Prof^a. Elisa Dominguez Sotelino

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof^a. Ana Maria Abreu Jorge Teixeira

Instituto Militar de Engenharia

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico
Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de Janeiro de 2018

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Marcelo Fonseca Betz

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2014. Principais áreas de interesse: Materiais não convencionais, estruturas de bambu e pesquisa experimental.

Ficha Catalográfica

Betz, Marcelo Fonseca

Desenvolvimento de uma Ponte Dobrável de Bambu de Rápida Montagem para Situações Emergenciais / Marcelo Fonseca Betz; Orientador: Daniel Carlos Taissum Cardoso/ coorientador: Kent Alexander Harries/ coorientador: Lucas Alves Ripper – 2018.

179 f. : il. color. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2018.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Pontes dobráveis. 3. Desastres naturais. 4. Bambu. I. Cardoso, Daniel Carlos Taissum. II. Harries, Kent Alexander. III. Ripper, Lucas Alves. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. V. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Na minha vida, é difícil saber onde começar e onde parar de dizer obrigado. Tenho que agradecer pelo privilégio raríssimo de ter tudo o que alguém poderia querer de um lar, e por todo amor que nele se expressa nos detalhes. Agradeço aos meus pais, minhas irmãs e minha família por todo apoio irrestrito, mesmo quando acharam que eu estava errado – e tantas vezes eu errei.

Agradeço a todos os professores e funcionários da PUC-RJ, em especial aqueles que me ajudaram com seus conselhos e conhecimentos. Ao Euclides, um agradecimento e um abraço que vai do Rio até Nilópolis. Ao Bruno, Carlos, Marques, Patrícia, Rogério e Zé, agradeço pela ajuda e pelos sorrisos, entre um café sepetibano e outro.

Às minhas amigas e amigos do mestrado, gratidão por me suportarem. Jamais poderia retribuir toda a ajuda e o carinho que recebi.

Agradeço a todxs amigxs da minha vida que me acolheram em seus corações e nas suas fragilidades sem restrições. Não sou muito, mas seria muito menos sem vocês.

Ao meu orientador, que é uma pessoa especial, que acreditou em mim e viu potencial quando nem eu seria capaz. Aprendi muito com você, inclusive sobre engenharia. Ao Lucas, a certeza de que essa dissertação não seria possível sem a sua boa vontade e alegria.

Não foram anos fáceis. Muita coisa mudou, nós mesmos principalmente, mas a sua companhia e seu amor foram o fio tênue que deu sentido ao que vai além dessa tese e dessas palavras. Carreguei a pedra por esta montanha apenas para recomeçar outra subida ao seu lado. Te amo Aline.

No mais, um muito obrigado a CAPES e ao CNPQ pelo apoio financeiro, e a instituição PUC-RJ pela oportunidade.

Resumo

Betz, Marcelo Fonseca; Cardoso, Daniel Carlos Taissum (Orientador); Harries, Kent A. (Coorientador); Ripper, Lucas Alves (Coorientador). **Desenvolvimento de uma Ponte Dobrável de Bambu de Rápida Montagem para Situações Emergenciais**. Rio de Janeiro, 2018. 179 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Pontes transportáveis para uso em caso de desastres naturais são geralmente estruturas pesadas, com altos custos de fabricação e exigem mão de obra qualificada para montagem, limitando o alcance de seu uso, especialmente em locais carentes de recursos. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma solução de ponte dobrável leve, fácil de construir, transportar e montar, sendo feita, principalmente, de bambu, um material com elevada relação resistência/peso e sustentável. O trabalho discute aspectos relevantes sobre o comportamento de estruturas pantográficas existentes, bem como sobre as principais características mecânicas e físicas do bambu, especificamente da espécie *Guadua Angustifolia* Kunth utilizada na pesquisa. Em uma primeira etapa, a fim de se avaliar a viabilidade do material escolhido, um programa experimental incluindo ensaios de flexão, fluência e dois diferentes tipos de ensaios de compressão foi conduzido. Ensaios feitos após ciclos de imersão e secagem com o intuito de avaliar o efeito de chuvas reincidentes sobre o material também foram realizados. Ensaios para determinação de coeficiente de atrito entre cordas de nylon e o bambu também foram realizados para estabelecer parâmetros adequados para avaliação da resistência das ligações amarradas. Num segundo estágio, o projeto da estrutura é apresentado e discutido, destacando o comportamento das ligações nas fases de desdobramento, protensão e final. Por fim, análises estruturais estáticas e dinâmicas foram realizadas com auxílio de modelos computacionais para as diferentes fases de montagem, apontando para a viabilidade da ponte proposta.

Palavras Chave

Pontes dobráveis; desastres naturais; bambu.

Abstract

Betz, Marcelo Fonseca; Cardoso, Daniel Carlos Taissum (Advisor); Harries, Kent A. (Co-Advisor); Ripper, Lucas Alves (Co-Advisor). **Development of a Quick Assembly Deployable Bamboo Bridge for Natural Disaster Relief**. Rio de Janeiro, 2018. 179 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Transportable bridges for natural disaster relief are usually heavy, have higher fabrication costs and demand qualified professionals for assembly. These disadvantages limit the reach of their benefits, especially in places with little available resources. The objective of this work is to develop a bridge designed to be lightweight, easy-to-build, -transport and -assembly and also mainly made of bamboo, a cheap sustainable material with high strength/weight ratio. This work discusses relevant aspects regarding the mechanics of existing pantographic structures, as well as the main mechanical and physical properties of bamboo, more specifically the species *Guadua Angustifolia* Kunth used in this research. At first, to evaluate the viability of the chosen material, an experimental program including bending, creep and two different types of compression tests was carried out. Tests after wet-and-dry cycles, considering the possible effects of repeated rain to exposed bamboo, were also performed. Tests to determine the friction coefficient between nylon ropes and bamboo were also carried to obtain parameters necessary to assess the strength of tied bamboo joints. After that, the structural design is presented and discussed, exploring the mechanics of the proposed connections and their behavior at the deployment stage, pre-stressing stage and final stage. At last, static and dynamic structural analysis were made with numeric models to all development stages, confirming the viability of the proposed bridge.

Keywords

Deployable bridges; natural disaster; bamboo.

Sumário

1.	Introdução	20
1.1.	Considerações Iniciais	20
1.2.	Motivação	22
1.3.	Objetivo	28
1.4.	Organização da Dissertação	30
2.	Propriedades Mecânicas do Bambu <i>Guadua Angustifolia</i> Kunth	31
2.1.	Generalidades	31
2.2.	Nós	34
2.3.	Diâmetro, Espessura, Volume de Fibras e Densidade.	36
2.4.	Umidade e Idade da Planta.	37
2.5.	Comportamento de Ruptura e Propriedades de Fratura	39
2.6.	Durabilidade	40
2.7.	Compressão Paralela às Fibras	42
2.8.	Flexão	44
2.8.1.	Colmo Inteiro	44
2.8.2.	Ensaio com Hastes	45
2.9.	Fluência	46
2.10.	Ligações	47
2.10.1.	Generalidades	47
2.10.2.	Ligações Amarradas e Pinadas	47
2.10.3.	Nós	48
2.10.4.	Coeficiente de atrito estático entre corda e objeto	49
2.10.5.	Nó do fiel (Clove Hitch)	50
3.	Estruturas Dobráveis – Revisão Bibliográfica	52
3.1.	Generalidades	52
3.2.	Condições geométricas das estruturas pantográficas	52
3.2.1.	Elementos tipo-tesoura	52
3.3.	Pontes transportáveis: materiais utilizados e ligações	54
3.4.	Análise Estrutural	58
3.4.1.	Mobilidade	58

3.4.2.	Equilíbrio de uma unidade de estrutura tipo-tesoura	60
4.	Programa Experimental	63
4.1.	Generalidades	63
4.2.	Avaliação da influência de imersão e secagem do material	65
4.3.	Ensaio de Compressão no Colmo na Direção Paralela às fibras	67
4.4.	Compressão utilizando o método CLC (Combined loading compression).	75
4.5.	Ensaio de Flexão	84
4.6.	Ensaio de Fluência	90
4.7.	Ensaio para determinar coeficiente de atrito entre cordas convencionais e de sisal e o bambu Guadua.	93
5.	Proposta de Ponte Dobrável de Bambu	97
5.1.	Descrição da Ponte	97
5.2.	Desenvolvimento da estrutura	98
5.2.	Ligações Utilizadas	101
5.2.1.	Detalhe 1: Ancoragem Ativa	104
5.2.2.	Detalhe 2: Apoio Fixo e Ancoragem Ativa	105
5.2.3.	Detalhe 3: pivot superior.	106
5.2.4.	Detalhe 3: pivot inferior.	107
5.2.5.	Pivot central: ligações amarradas.	107
5.2.6.	Detalhe 5: Ancoragem Passiva	109
5.2.7.	Apoio Móvel/Ancoragem Passiva	110
5.3.	Cálculo da força de protensão necessária nos cabos de banzo	110
5.4.	Manutenção	112
6.	Modelos Numéricos Estruturais	113
6.1.	Generalidades	113
6.2.	Viga em balanço	115
6.3.	Vigas biapoiadas	117
6.4.	Protensão nos cabos de banzo	119
6.5.	Ponte finalizada e dimensionamentos	121
6.5.1.	Carga Acidental de 30 Pessoas	121

6.5.2. Carga Acidental Assimétrica	124
6.5.3. Dimensionamento dos Pinos	124
6.5.4. Análise Modal	126
6.5.5. Efeitos de carga de longa duração	129
6.5.6. Carga de vento	130
7. Conclusões	132
7.1. Considerações Finais	132
7.2. Sugestão para trabalhos futuros	134
8. Referências Bibliográficas	136
9. Apêndice A – Armazenamento e Tratamento Bambu	145
10. Apêndice B – Dados dos ciclos de molhagem e seca	146
10.1. Estudo paralelo	146
10.2. Amostras Durabilidade Compressão Colmo	148
10.3. Amostras Durabilidade Compressão CLC	149
10.4. Amostras Durabilidade Flexão	150
10.5. Amostras Durabilidade Fluência	151
11. Apêndice C – Resultado dos gráficos de cada ensaio	152
11.1. Compressão Colmo (sem fator de correção k)	152
11.2. Compressão CLC	161
11.3. Flexão	170
11.4. Tabela de cargas ensaio fricção	179

Lista de Figuras

Figura 1.1. Tanque camuflado atravessando uma ponte Bayley (Imagem: http://www.thinkdefence.co.uk , acessado em 07/08/2017).	22
Figura 1.2. Protótipo da MB 4.0 e detalhes das ligações usadas (CHIKAHIRO et al., 2016).	22
Figura 1.3. a) Millenium Bridge - portfólio IBUKU (2017); b) Ponte Velez e c) Catedral Pereira, obras de Simón Velez (Divulgação).	25
Figura 1.4. Pegada de carbono ao longo do ciclo de carbono (kg CO ₂ eq/kg de produto de bambu) no estudo de caso de LUGT <i>et al.</i> (2012).	27
Figura 2.1. Composição microscópica de um feixe vascular de bambu. 1) feixe de fibra; 2) células Parênquima; 3) revestimento de células Esclerênquima; 4) floemas (tubos de seiva); 5) Metoxila (vasos); 6) grupos menores de Metoxila; 7) caminho intracelular (JANSSEN, 1981).	32
Figura 2.2. Feixe vascular do bambu <i>Guadua</i> , no centro da parede do colmo. A seta aponta para o lado externo da parede (Imagem: https://www.guaduabamboo.com , acessado em: 26/07/2017).	32
Figura 2.3. Seção de parede do bambu Moso (OBATAYA, 2007): a) vista ampla; b) parte externa do tecido conjuntivo; c) zona interna. Setas indicam os vasos de metaxila e as fibras de um feixe vascular.	32
Figura 2.4. Macroestrutura do colmo de bambu (adaptado de TRUJILLO <i>et al.</i> , 2016).	32
Figura 2.5. Características físicas do colmo: a) diâmetro em função da altura no colmo; b) espessura em função da altura; c) fração volumétrica de fibras em função da altura (AMADA et al., 1996). ..	36

Figura 2.6. Variação percentual do volume do colmo pela umidade relativa do ar (Adaptado de HAMDAM et al., 2007): a) amostras na base do colmo; b) amostras no meio do colmo.	38
Figura 2.7. Adaptado de JANSSEN (1981), comparando a resistência à compressão relativa ao teor de umidade de diferentes autores, sendo a resistência de 100% correspondente ao bambu seco.	39
Figura 2.8. Curvas Tensão x Deformação para espécimes testadas à compressão após a sua secagem, após 1 dia de imersão em água e após 7 dias imersas (adaptado de XU <i>et al.</i> , 2014).	42
Figura 2.9. Falhas típicas em amostras submetidas à compressão: a) por esmagamento; b) longitudinais; c) por corte; d) por flambagem geral das fibras na direção interna; e) por flambagem geral das fibras na direção externa (JARAMILLO et al., 2016).	44
Figura 2.10. Modo de ruptura na região nodal do colmo devido ao esforço de compressão (JARAMILLO et al., 2016).	44
Figura 2.11. Ensaio de flexão a quatro pontos (Norma ISO 21157-2004b). Indicados por seta: 1) mecanismo de distribuição de carga; 2) ponto central de aplicação de carga; 3) cavaletes para transferência entre rolete e superfície; 4) eixos, indicando cargas e apoios perto dos nós.	45
Figura 2.12. Modelo de ensaio com hastes para flexão a quatro pontos e possíveis orientações das amostras (adaptada de OBATAYA <i>et al.</i> , 2007).	46
Figura 2.13. Modelo reológico de Burger e suas 3 zonas de deformações (SANTOS, 2008).	47
Figura 2.14. Forças atuando numa corda em contato com um objeto circular (BAYMAN, 1977).	49
Figura 2.15. Topologia do nó do fiel (BAYMAN, 1977).	50
Figura 3.1. Desdobramento dos elementos de uma cobertura sobre uma piscina (KASSABIAN et al, 1999).	52
Figura 3.2. Tipos de componentes básicos de estruturas pantográficas: a) par de tesouras centrado; b) par de tesoura descentralizado; c) par de tesoura anguladas; d) par de tesouras genérico.	53

Figura 3.3. Geometria de estrutura pantográfica com pivot centralizado e barras simétricas (MADEN et al., 2011).....	54
Figura 3.4. Conexões da ponte de Lleida. a) conexões do arco; b) conexões do tabuleiro (SOBRINO et al., 2013).....	55
Figura 3.5. Detalhe de uma das conexões da ponte desmontável proposta por TEIXEIRA (2007).....	56
Figura 3.6. MobileBridge (CHIKAHIRO et al., 2013): a) detalhe de ligação com pino; b) pivot sem pino.	57
Figura 3.7. Proposta de junta de PVC para estruturas de bambu (ALBERMANI et al., 2007).....	57
Figura 3.8. Mobilidade de uma estrutura scissor-like plana em balanço (AKGÜN, 2010).....	59
Figura 3.9. Mobilidade de uma estrutura scissor-like plana fixa nas extremidades (AKGÜN, 2010).	59
Figura 3.10. Elemento tipo tesoura: a) estrutura; b) graus de liberdade de um elemento uniplet (KAVEHT and DAVARANLA, 1994).	60
Figura 3.11. Equilíbrio de unidade de estrutura tipo tesoura: a) equilíbrio do conjunto; b) equilíbrio de uma das barras; c) equilíbrio do nó A; d) equilíbrio da ligação de pino com excentricidade.	62
Figura 4.1. Amostras para ensaios submersas em solução de ácido bórico e bórax.....	64
Figura 4.2. Variação percentual do peso em relação ao inicial ao longo de ciclos de imersão e seca.	66
Figura 4.3. Set-up do ensaio a compressão do colmo inteiro com nó.....	69
Figura 4.4. Detalhe do posicionamento das fibras de carbono e do disco de plastique interno.....	69
Figura 4.5. Histórico do teor de umidade das amostras de compressão, do corte ao ensaio.....	70
Figura 4.6. Amostras rompidas: a) e b) esmagamento de fibras na extremidade; c) a g) detalhes de falhas na região nodal; h) aparecimento de algumas fissuras longitudinais, apesar do modo de falha, predominante, ser nodal.	73
Figura 4.7. Tensão x deformação dos ensaios de compressão de colmo inteiro: a) base; b) meio; c) topo.	74

Figura 4.8. Aparato utilizado no ensaio de CLC com dimensões em mm (CINTRA, 2017).....	76
Figura 4.9. Amostras CLC. a) Vista tridimensional; b) vista lateral.....	77
Figura 4.10. Modo de ruptura mostras CLC.....	77
Figura 4.11. Histórico do teor de umidade das amostras de CLC, do corte ao ensaio.....	78
Figura 4.12. Set-up do ensaio de CLC com haste de bambu e transdutores posicionados.....	78
Figura 4.13. Topo. a) Resultados strain gage; b) resultados LVDTs.....	79
Figura 4.14. Meio. a) Resultados strain gage; b) resultados LVDTs.....	80
Figura 4.15. Curvas Tensão x Deformação Base. a) Resultados strain gage; b) resultados LVDTs.....	81
Figura 4.16. Posição da linha neutra para viga sob flexão simples.....	85
Figura 4.17. Dispositivo de ensaio de flexão a quatro pontos com hastes de bambu.....	86
Figura 4.18. Amostras de flexão dos grupos de controle e durabilidade..	87
Figura 4.19. Amostras rompidas, após a parte mais rica em fibras ter sido solicitada à tração.....	87
Figura 4.20. Histórico do teor de umidade das amostras de flexão, do corte ao ensaio.....	87
Figura 4.21. Curvas momento x curvatura relativa ensaios de flexão. a) Amostras retiradas da base do colmo; b) meio do colmo; c) topo do colmo.....	89
Figura 4.22. Esquema do ensaio de flexão com carregamento de longa duração.....	92
Figura 4.23. Set-up ensaio de fluência.....	92
Figura 4.24. Evolução do fator de fluência relativo às curvaturas relativas.....	92
Figura 4.25. Valores absolutos de deformação para cada par de strain gage das amostras.....	93
Figura 4.26. Histórico do teor de umidade das amostras de fluência, do corte ao ensaio.....	93
Figura 4.27. Corda passando por um cilindro fixo circular de raio R (LUBARDA, 2014).....	94

Figura 4.28. Dispositivo de ensaio para determinar o coeficiente de atrito, com corda de sisal: a) vista tridimensional; b) vista frontal.....	95
Figura 4.29. Curvas carga da célula de carga x carga aplicada em dois pontos distintos. a) ponto 1; b) ponto 2.....	96
Figura 5.1. Ponte dobrável de bambu: a) vista frontal, b) vista tridimensional.....	98
Figura 5.2. Desenvolvimento da ponte de bambo em seus diferentes estágios: a) dobrada para transporte; b) durante o seu lançamento; c) biapoiada; d) durante a protensão dos cabos de aço; e) estrutura final.....	100
Figura 5.3. Vista geral da viga dobrável.	102
Figura 5.4. Barras verticais: a) barra ligada ao apoio de segundo gênero e ao contrapeso. b) vista frontal, com cantoneira ligada ao apoio para estabilidade lateral; c) barra ligada ao apoio de primeiro gênero.	104
Figura 5.5. Detalhe 1, ancoragem ativa.	104
Figura 5.6. Detalhe 2, apoio fixo e ancoragem ativa.	105
Figura 5.7. Detalhe 3, pivot superior.	106
Figura 5.8. Detalhe 3, pivot inferior.	107
Figura 5.9. Volta do Fiel (Imagem: http://www.pioneeringmadeeasy.co.uk , 28.06.2017).....	107
Figura 5.10. Ligação entre bambus que permite rotação através do nó do fiel (SEIXAS et al., 2014).....	108
Figura 5.11. Equilíbrio do nó da ligação amarrada.....	108
Figura 5.12. Ligações amarradas propostas para estruturas pantográficas: a) configuração geral; b) solução com pino permitindo rotação; c) solução com anel externo.	109
Figura 5.13. Detalhe 5, ancoragem passiva.....	109
Figura 5.14. Apoio móvel/ ancoragem passiva.....	110
Figura 5.15. Catenária em cabo horizontal uniformemente carregado...	111
Figura 6.1. Viga em balanço e seus respectivos diagramas.	116
Figura 6.2. Estrutura biapoiada e seus respectivos diagramas.	118
Figura 6.3. Viga dobrável durante fase de protensão e seus respectivos diagramas.	120

Figura 6.4. Diagrama da estrutura finalizada.....	122
Figura 6.5. Diagramas para carregamento acidental assimétrico:	
a) força axial (bambu = 10,9 kN, cabo banzo superior = 13 kN);	
b) momento fletor M3 (<i>pivot</i> : $M_{m\acute{a}x} = 0,34 \text{ kN.m}$).....	124
Figura 6.6. <i>Pivot</i> superior e diagramas: a) pino conectando	
bambus, tirantes e cabo; b) Momento $M_{2m\acute{a}x} = -1,3 \text{ kN.m}$; b) $M_{3m\acute{a}x} =$	
-3,2 kN.m; c) Cortante V2 (55 kN); d) V3 (-33 kN).....	125
Figura 6.7. Momentos usados no cálculo da resultante	
para dimensionamento do pino.	125
Figura 6.8. Análise modal com painéis e bambu pesado: a) Freq.:	
7,94 Hz; b) Freq.: 8,3 Hz; c) Freq.: 12,8 Hz; d) Freq.: 14,5 Hz.	128
Figura 6.9. Carregamento de temperatura (-8,09°C) aplicado às	
barras de bambu.	129
Figura 6.10. Carregamento de vento: a) <i>pivot</i> superior; b) <i>pivot</i> inferior.	131
Figura 6.11. Deformada devido à ação do vento ($u_{2m\acute{a}x} = 0,01 \text{ cm}$).....	131

Lista de Tabelas

Tabela 1.1. Comparação entre materiais em barras comprimidas. Adaptada de OBERMAN <i>et al.</i> (2004).....	26
Tabela 2.1. Propriedades mecânicas e físicas da matriz e da fibra do bambu (AMADA et al., 1996).....	33
Tabela 2.2. Resultado de ensaios de compressão e tração em cinco espécies de bambu, com nó e sem nó (adaptado de GHAVAMI, 2008).....	35
Tabela 2.3. Valores de resistência e rigidez à compressão paralela às fibras de estudos relevantes para compressão paralela às fibras.	43
Tabela 2.4 Resultado de resistência à flexão e módulo de Young encontrados por diferentes autores e diferentes espécies de bambu.	46
Tabela 4.1. Fatores de correção aplicados para diferentes teores de umidade em pequenas amostras (JG/T 199-2007).	64
Tabela 4.2. Grupos de amostras em relação à posição no colmo e processo de preparo.	65
Tabela 4.3. Dados médios de dimensão das amostras, em mm e mm²...	70
Tabela 4.4. Resultado dos ensaios de compressão.	72
Tabela 4.5. Resultados médios encontrados para E no ensaio CLC.	81
Tabela 4.6. Resultados médios encontrados para resistência máxima no ensaio de CLC.	82
Tabela 4.7. Dados amostras CLC.	82
Tabela 4.8. Dados das amostras para ensaios de flexão a quatro pontos.	88
Tabela 4.9. Resultados médios dos módulos de elasticidade dos testes de flexão com hastes.	88

Tabela 4.10. Dados das amostras para ensaios de fluência de flexão a quatro pontos.....	90
Tabela 4.11. Dados ensaio coeficiente de atrito.....	95
Tabela 5.1. Dimensionamento cabos de aço dos banzos com carregamento uniforme p de 0,077 kN/m. Diâmetro seguiu recomendações de SCALZI and TENG (1969).....	111
Tabela 6.1. Resultado esforços e deslocamento para a viga em balanço.....	116
Tabela 6.2. Resultado esforços e deslocamento para a viga biapoiada.	118
Tabela 6.3. Resultado esforços e deslocamento para a viga protendida.	121
Tabela 6.4. Dados para dimensionamento de passarelas de pedestres (MEYER, 2002).....	127
Tabela 6.5. Resultados de frequência para diferentes situações.	128

Lista de símbolos

Letras Romanas Minúsculas

d	distância em geral
e	excentricidade
f_u	resistência à ruptura do aço à tração
f_y	resistência ao escoamento do aço
k	coeficiente de correção do teor de umidade
λ	comprimento; vão
q	pressão de arrasto
r	raio de giração
s	espaçamento; distância
t	espessura do colmo
w	teor de umidade
x	eixo de coordenadas na direção do comprimento da ponte
y	eixo de coordenadas na direção da largura da ponte
z	eixo de coordenadas na direção perpendicular ao plano da ponte

Letras Romanas Maiúsculas

A	área
A_c	área da seção do colmo
C_a	coeficiente de força de arrasto do vento
D	diâmetro externo do colmo
E	módulo de elasticidade
F	força; resistência, fator de correção
G	módulo de elasticidade transversal; fator de correção
H	altura
I	momento de inércia
M	momento fletor; mobilidade

N	força axial
R_d	resistência de cálculo; solicitação resistente de cálculo
S_d	solicitação de cálculo
V	força cortante, velocidade
W	módulo de resistência elástico

Letras Gregas Minúsculas

α	coeficiente dilatação térmica, ângulo, profundidade da linha neutra
β	coeficiente de dilatação térmica
δ	deslocamento; flecha
ε	deformação
ϵ	parâmetro para equação de equilíbrio entre corda e objeto circular.
η	fator relacionado ao coeficiente de atrito e ângulo de contato.
λ	graus de liberdade, fator de ponderação
γ	peso específico
μ	coeficiente de atrito
ν	coeficiente de Poisson
ψ	fator de combinação de ações
σ	tensão normal
θ	ângulo
τ	tensão de cisalhamento

Letras Gregas Maiúsculas

Σ	somatório
----------	-----------

1. Introdução

1.1. Considerações Iniciais

Pontes ou viadutos de rápidas montagens são estruturas usadas há décadas com diversas aplicações e diferentes soluções de engenharia. São pontes que podem ser retráteis, dobráveis, desmontáveis ou flutuantes, feitas de diferentes materiais e envolvendo desafios operacionais específicos. Seu propósito, em linhas gerais, é suprir uma necessidade ou um apelo, circunstancial ou não, de vencer um determinado vão em um curto período de tempo. Essas necessidades ou apelos, juntamente com as características do local, é que deverão ser os parâmetros que irão definir o tipo de ponte a ser adotada.

Um dos principais exemplos de pontes transportáveis de rápida montagem modernas é a *Bayley Bridge*, desenvolvida pelos britânicos na Segunda Guerra Mundial (Fig. 1.1). Durante a Primeira Guerra, constatou-se que as pontes desse tipo existentes exigiam mobilização de grande número de trabalhadores e pesados equipamentos de montagem, o que dificultava o acesso e a viabilidade das operações (RUSSEL and THRALL, 2012). Sendo a *Bayley Bridge* uma treliça feita de painéis encaixados, seu projeto virou referência para grande parte das pontes desmontáveis da época e ainda hoje continuam sendo largamente utilizadas. O seu processo de fabricação foi pensado de forma a levar em conta todas as etapas construtivas, desde o material utilizado até a sua manutenção. Outra ponte transportável utilizada na época da Segunda Guerra, a *Small Box Girder Bridge*, transportada por tanque e também desenvolvida pelos ingleses, tinha o limite de alcance de vãos de cerca de 10 metros.

Muitas outras pontes de rápida montagem têm sido concebidas desde então, quase sempre no contexto de aumentar a mobilidade militar em casos de conflitos bélicos ou na defesa de territórios. Pontes anfíbias, como a alemã *M3 Amphibious Rig*, são pontes facilmente transportáveis e permitem que tropas avancem em grandes rios em pouquíssimo tempo. A EFA (*Engin de Franchissement de*

l'Avant), aparato retrátil e anfíbio criado pelo exército francês, pode ser utilizada tanto como ponte, como barca. Exemplos estrangeiros como a *Medium Girder Bridge*, a *PMP Floating Bridge*, os AVL B (*Armoured vehicle-launched bridge*), entre outros, são inúmeros, mostrando o interesse e os altos investimentos no tema.

No Brasil, as pontes existentes do exército militar seguem majoritariamente esses modelos. Recentemente, TEIXEIRA (2007) e TEIXEIRA *et al.* (2013) propuseram uma ponte desmontável feita com perfis pultrudados de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP). A proposta se diferencia pela utilização de uma alternativa ao aço usando um material de elevada relação resistência/peso, levando a uma estrutura de peso reduzido, facilitando seu transporte e montagem. O trabalho explora com detalhes o comportamento das ligações propostas, normalmente um ponto crítico no projeto de estruturas que usam GFRP.

Outro tipo de ponte de rápida montagem são as pontes dobráveis. Um dos exemplos mais recentes, ainda em fase de protótipo, é a *Mobile Bridge*, desenvolvida pelo programa da Universidade de Hiroshima, Japão (CHIKAHIRIO *et al.*, 2016). Sua estrutura pantográfica consiste na associação de unidades de aço do tipo *scissor-like* (tesoura) e pode ser transportada em um trailer (Fig. 1.2). O tempo de montagem é de cerca de uma hora e a ponte pode suportar o peso de até um veículo leve. O mecanismo de tesoura se mostrou simples e consistente nos modelos teóricos e numéricos, sendo estes compatíveis com os resultados experimentais.

No caso das pontes de bambu existentes, elas são estruturas de uso civil e, em geral, projetada apenas para pedestres. Muitas das pontes de bambu se destacam pela sua estética, leveza e rapidez de execução, como a *Millennium Bridge*, localizada em Bali, e construída em apenas quatro meses pela empresa IBUKU (Fig.1.3a) e a ponte de Simon Vélez, na Colômbia (Fig. 1.3b). PARASKEVA *et al.* (2017) estudaram o projeto e o protótipo de uma ponte de fácil construção para utilização em zonas rurais, onde são levantadas as questões dos desafios das ligações, os modos de falha predominantes e os fatores de segurança a serem utilizados, além de discutir a influência de carregamentos de longa duração. Já SEIXAS *et al.* (2014) mostraram a viabilidade de se construir estruturas pantográficas de bambu com ligações amarradas.



Figura 1.1. Tanque camuflado atravessando uma ponte Bayley (Imagem: <http://www.thinkdefence.co.uk>, acessado em 07/08/2017).

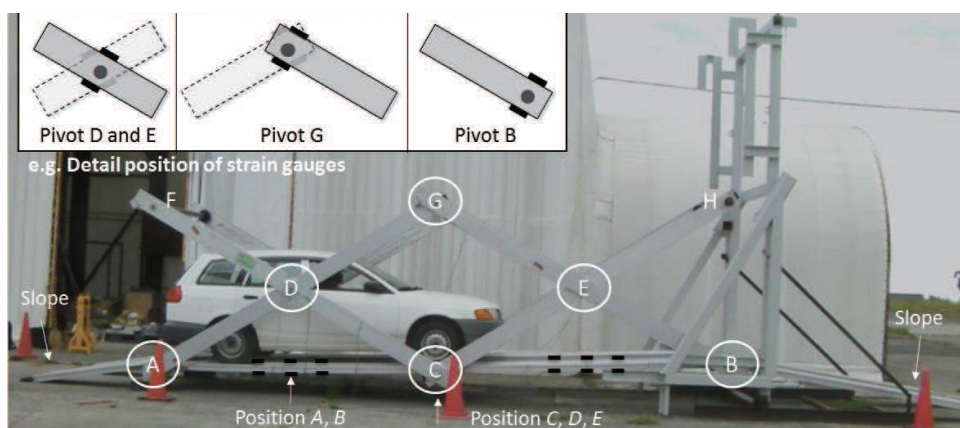


Figura 1.2. Protótipo da MB 4.0 e detalhes das ligações usadas (CHIKAHIRO et al., 2016).

1.2. Motivação

A engenharia para o uso civil, geralmente, se restringe a estruturas que demandam muito tempo de construção, precisam de muita mão de obra, gastam muita energia e geram poluição, em especial no Brasil. As estruturas, em geral, são projetadas serem rígidas e para uma vida útil longa. No entanto, em muitos casos, como o de acidentes e desastres naturais, não é possível esperar por soluções demoradas ou onerosas e as prerrogativas de um projeto convencional não se aplicam. Muitas vezes, as regiões mais afetadas nessas situações são justamente as mais carentes em termos de infraestrutura e mobilidade. Assim, os efeitos dos danos iniciais se prolongam com custos altíssimos de segurança,

aumentando o risco das pessoas envolvidas, tanto no local, quanto nas operações de resgate.

As atuais pontes móveis utilizadas, principalmente, pelo Exército Brasileiro são soluções excelentes para criar uma alternativa para mobilidade em zonas não urbanas em boa parte dos casos. São pontes feitas majoritariamente de aço, que conseguem vencer vãos com mais de 60 metros de largura e são instaladas com grande rapidez, sendo muito úteis em situações de acesso a regiões remotas. Porém, estas pontes são, em geral, estruturas de custo relativo alto e pesadas, o que dificulta a logística de transporte e instalação.

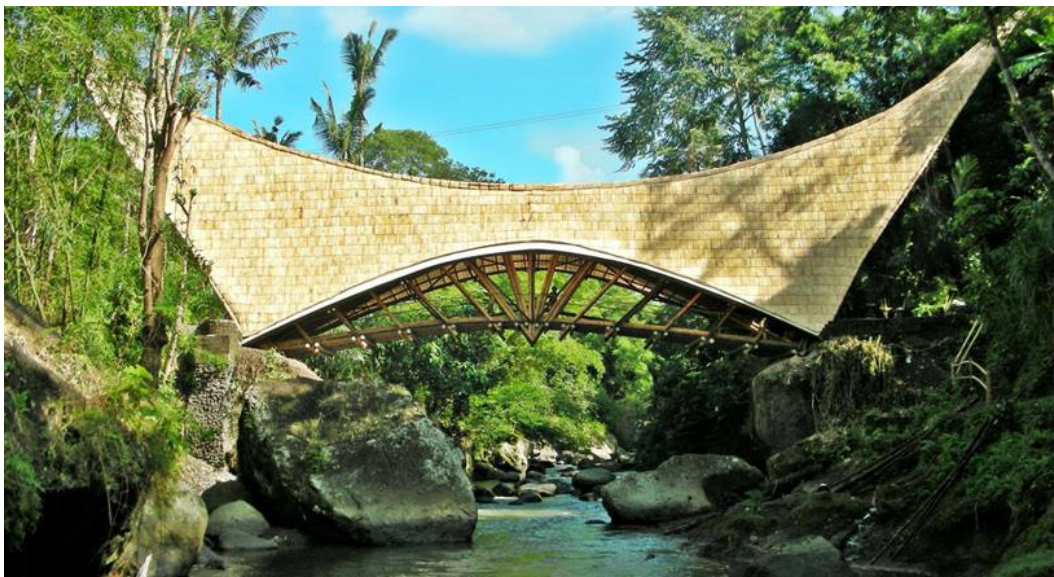
Como exemplo recente de desastre de grande impacto no Brasil, vale citar as fortes chuvas na região serrana do Rio de Janeiro em 2011. Na ocasião, de acordo com o governo brasileiro, mais de 100 pontes de diferentes tamanhos e tipologias foram destruídas ou seriamente danificadas (Fonte: <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/01/reconstrucao-de-pontes-atingidas-na-regiao-serrana-do-rio-deve-comecar-no-fim-de-semana> - acessado em 09/06/2017). Em 2015, foram outras 22 pontes afetadas em diferentes níveis na mesma região (Fonte: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2015-05/regiao-serrana-do-rio-tem-mais-22-pontes-destruidas-pela-chuva-recuperadas> - acessado em 09/06/2017). Esses exemplos de grandes tempestades se repetem ciclicamente e por grande parte do território nacional. Em outros países, desastres como terremotos geram problemas semelhantes, mostrando-se necessária uma flexibilização dos modelos e criação de alternativas mais acessíveis para contornar situações de crise como estas, considerando a disponibilização de materiais locais para as construções emergenciais.

Estruturas pantográficas são, historicamente, utilizadas para diversas finalidades. Suas vantagens são, justamente, a praticidade da sua instalação e a rapidez de execução. No caso de pontes, existem projetos e protótipos de utilização dessa forma de concepção estrutural, sendo desenvolvidos justamente em países mais suscetíveis a desastres como terremotos e tsunamis. Quanto a adotar o bambu como principal material, a escolha se baseia no atual conhecimento científico de que este é um material construtivo renovável, com propriedades físicas e mecânicas excelentes, com baixo custo de cultivo, de manufatura e energético.

Por ser uma planta nativa em praticamente todos os continentes, existem registros do uso de bambu como material construtivo em culturas milenares, em especial na Ásia (China e Índia) e em boa parte da América Latina (Colômbia e Peru). Recentemente, sua utilização na construção civil vem se expandindo graças ao interesse de alguns nomes como o arquiteto colombiano Simón Veléz (Fig. 1.3c) e devido à contínua evolução do conhecimento sobre as diferentes espécies e suas propriedades. São décadas de estudos que envolvem a sua anatomia de biocompósito, sua geometria não uniforme, sua durabilidade, suas propriedades mecânicas variáveis e os pontos positivos e negativos de seus inúmeros tipos de ligações. Sem dúvidas, a iniciativa de se pensar em uma estrutura pantográfica feita, principalmente, de bambu é uma estrada repleta de desafios.

Um dos principais diferenciais a favor do bambu em relação ao aço e aos materiais compósitos modernos é a sua leveza e seu custo. As comparações comuns entre a resistência do aço e do bambu são improvidentes em termos absolutos, tendo em vista que o bambu é um material natural. No entanto, quando as análises são feitas baseadas nas relações de resistência/peso ou resistência/custo, as comparações mostram uma grande vantagem do bambu. O estudo de MAHZUZ *et al.* (2013), comparando os dois materiais, encontrou uma relação mais de duas vezes maior de resistência por densidade e uma relação nove vezes maior de resistência por custo.

Embora no Brasil ainda não existam fornecedores de bambu para construção em grande escala, a Tabela 1.1 (OBERMAN *et al.*, 2004) apresenta uma comparação superficial de vários parâmetros entre a espécie de bambu *Guadua Angustifolia Kunth*, a madeira e o aço, considerando as realidades da Colômbia e da Alemanha e valores retirados dos EUROCODE 3 (2005) e EUROCODE 5 (1994). Os cálculos foram feitos levando em consideração uma barra comprimida desses materiais com mesmo comprimento e peso. Mesmo não existindo uma indústria nem de perto tão bem estabelecida como a siderúrgica, em relação ao preço, na Colômbia o bambu custa a metade do preço da madeira e um quarto do preço do aço-carbono do tipo A36. Na Alemanha, as razões são de 0,6 e 0,37, respectivamente. A densidade do *Guadua* é até 11 vezes menor do que a do aço e, considerando os gastos energéticos de produção, seu custo ambiental 50 é vezes menor.



(a)






(b)



(c)

Figura 1.3. a) Millenium Bridge - portfólio IBUKU (2017); b) Ponte Velez e c) Catedral Pereira, obras de Simón Velez (Divulgação).

Tabela 1.1. Comparação entre materiais em barras comprimidas. Adaptada de OBERMAN *et al.* (2004).

Compressão: barra de 2,5 m e 8,7 kg de diferentes materiais	Guadua EC5	Madeira - tipo B EC5 - S10/MS10	Aço - A36 - EC3 - S235
Densidade - g/cm ³	0,7	0,55	7,8
Módulo de Young - MPa	6000	7400	210000
Seção			
	D = 12/9 cm	D = 9 cm	D = 5,1/4,5 cm
Área - cm ²	49,5	63,6	4,4
Peso - kg	8,7	8,7	8,7
Carga Máxima - kN	25,6	15,1	27,6
Custo (€/m) Colômbia/Alemanha	1 / 3	2 / 5	4 / 8
Custo Ambiental (MJ/m ³)/MPa	30	80	1500

Além das propriedades mecânicas e dos aspectos de custo financeiro, é importante ressaltar o bambu como material sustentável e ecologicamente benéfico. Devido a sua alta taxa de renovação, o aumento do uso de bambu em substituição à madeira pode diminuir os níveis de desmatamentos nas florestas tropicais (ATANDA, 2015). LUGT *et al.* (2012) realizaram um trabalho analisando o ciclo de vida completo e o sequestro de carbono de produtos feitos de bambu laminado nos Países Baixos, considerando o estudo de caso de uma empresa europeia, que importava o bambu da China e fabricava os produtos laminados localmente. O bambu natural consegue armazenar CO₂ na sua estrutura, numa razão de 0,61 kg de CO₂ para cada kg de bambu industrializado. Além disso, ao fim da vida, a bioenergia do bambu pode ser aproveitada para reduzir o uso de combustíveis fósseis. Com esses dados, o estudo de LUGT *et al.* (2012) conclui que, mesmo considerando o transporte e o processo de fabricação, a emissão de CO₂ pode ser considerada “*neutra, ou melhor*”, conforme mostrado na Fig. 4.

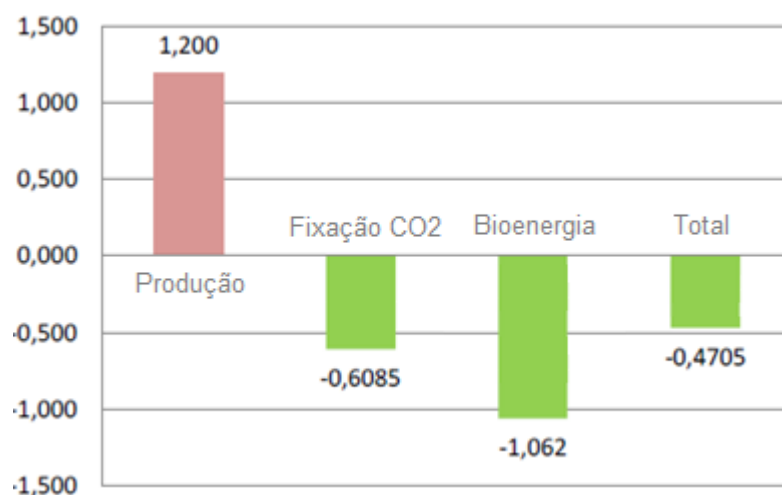


Figura 1.4. Pegada de carbono ao longo do ciclo de carbono (kg CO2eq/kg de produto de bambu) no estudo de caso de LUGT *et al.* (2012).

O planejamento das ações em situações de emergência depende dos recursos socioeconômicos da região afetada e precisa ser adaptado de acordo com o local (ALEXANDER, 2002), o que se alinha com as características do bambu de material não convencional amplamente disponível, mais sustentável e de menor custo que os convencionais. O bambu, historicamente, foi e continua sendo usado em grandes estruturas temporárias, como galpões e pontes, portanto, a sua escolha justifica-se e se sustenta como possível. É também verdade que a escolha do bambu para a construção de pontes se demonstra um desafio uma vez que foram notadas ainda certas lacunas na literatura técnica e a não existência de normas completas sobre o assunto, além de poucos dados de projetos técnicos construtivos, nativos ou estrangeiros.

Em JANSSEN (1981), o autor comenta uma crítica, que dizia ser frequentemente ouvida pelos pesquisadores. Em livre tradução: “*O que se precisa não é de mais pesquisa em técnicas, mas de boas ideias para se aproveitar estas técnicas e levá-las para fora do laboratório, em programas reais de construção*”. Em seguida, o autor argumenta que o caso do bambu ainda não era este e que as informações à época eram muito escassas, mas que esperava que, em um futuro próximo, o conhecimento técnico seria já suficiente. Este passo, segundo o próprio, poderia ser ainda mais difícil do que todo o trabalho laboratorial.

1.3. Objetivo

O objetivo do presente trabalho consiste em propor e desenvolver o projeto de uma ponte para atender a demandas emergenciais. O projeto envolve uma estrutura leve, dobrável, facilmente transportável e de rápida montagem, com vão variável para ser adaptável às necessidades locais. A ponte deve também ser projetada da maneira mais simples, mais sustentável e o menos onerosa possível. Para se avaliar a viabilidade estrutural da ponte dobrável proposta, modelos numéricos utilizando o software SAP2000 (v.14) foram realizados representando diferentes estágios de funcionamento da ponte, desde o início do seu processo de abertura até estrutura completa finalizada.

Neste estudo, optou-se pela utilização de uma espécie de origem latino americana, o *Guadua Angustifolia Kunth*. Foram feitos ensaios convencionais e não convencionais, de modo que o programa experimental se aproximasse o máximo possível do que seria encontrado no campo. Para todos os ensaios verificou-se a resposta mecânica do bambu após ciclos de molhagem e secagem, num esforço de se simular os efeitos de chuvas, uma vez que o material estará exposto assim que a ponte for funcional. As propriedades mecânicas relevantes, de curta e longa duração, utilizadas no projeto foram obtidas por caracterização mecânica, possibilitando um projeto mais realista. As amostras dos ensaios de compressão com colmo inteiro incluíram a presença de nós. Para melhorar os resultados, foram desenvolvidas novas técnicas de confinamento para evitar o esmagamento das fibras nas extremidades. Devido às imperfeições inerentes do material *in natura*, foram feitos ensaios de *Combined Loading Compression* com hastes retiradas dos entrenós do bambu, procedimento ainda não realizado com este material, até onde vai o conhecimento do autor. Foi também desenvolvido um ensaio para se chegar ao coeficiente de atrito estático entre o bambu e a corda, de forma a criar parâmetros de segurança ainda não determinados para estas ligações.

Certamente ainda existem muitos desafios para o bambu conseguir um espaço como alternativa aos materiais convencionais, mas muito se avançou na área. O que este trabalho se propõe é, portanto, usar o conhecimento acumulado e ampliá-lo a fim de se chegar a uma solução viável para uma ponte de rápida montagem, segura, barata e sustentável. Para isso, foram desenvolvidas propostas de novas

ligações para construções de estruturas pantográficas de bambu, combinadas com as tradicionais ligações amarradas.

O Brasil, por muito tempo, se contentou em manter certas tradições construtivas e continuam a serem poucas as alternativas comerciais apresentadas nos dias de hoje. Esse pensamento se reproduz, com suas bem vindas exceções, mesmo nos meios acadêmicos, onde o pensamento inovador e criativo deveria ser ainda mais estimulado. No processo de colonização e posterior modernização industrializada, foram eliminadas técnicas nativas e importadas culturas, métodos e materiais estrangeiros, sem que houvesse o questionamento se estas realmente se aplicavam à realidade local. Muitas vezes, os olhos permanecem fechados para outras possíveis soluções, por isso, é preciso questionar sempre o que se impõe por naturalização, a fim de se criar uma cultura de independência intelectual que expanda os limites pré-estabelecidos. Citando GALEANO (1980), “a verdade é que não erram os arcanjos blindados que custodiam a ordem estabelecida; a política cultural autônoma requer e promove, quando é autêntica, profundas mudanças em todas as estruturas vigentes”.

1.4. Organização da Dissertação

Esta dissertação foi organizada em sete capítulos, sendo o primeiro este introdutório.

- Capítulo 2 trata de fazer uma revisão bibliográfica de alguma das principais propriedades anatômicas e mecânicas do bambu e, em específico, da espécie *Guadua Angustifolia Kunth*. São descritos os mecanismos de ensaios já estabelecidos e em desenvolvimento, além da revisão de algumas das características de ligações nas estruturas feitas com esse material.

- Capítulo 3 é uma revisão bibliográfica do histórico, características e estado atual do desenvolvimento das estruturas pantográficas na engenharia, com ênfase nas pontes transportáveis.

- Capítulo 4 descreve os ensaios realizados no programa experimental para a caracterização do bambu em relação a sua durabilidade, quando exposto a ciclos de imersão e pela determinação do coeficiente de atrito entre o bambu *Guadua* e cordas de dois tipos: sisal e convencionais.

- Capítulo 5 apresenta soluções para o projeto de uma ponte de bambu dobrável auto-equilibrada. Descreve o passo a passo do funcionamento da ponte e propõe ligações que permitem que o sistema seja funcional, levando em consideração as limitações e qualidades do material.

- Capítulo 6 demonstra o trabalho de modelagem numérica das vigas e da estrutura macro da ponte em suas diferentes fases de concepção e considerando diferentes tipos de solicitações.

- Capítulo 7 conclui alguma das discussões, apresentando os resultados obtidos e abrindo sugestões para trabalhos futuros.

2. Propriedades Mecânicas do Bambu *Guadua Angustifolia* Kunth

2.1. Generalidades

O bambu, nome que popularmente se dá às plantas da subfamília Bambusoideae, da família das gramíneas, é um dos primeiros materiais construtivos de que se tem registro e suas propriedades mecânicas são determinadas por sua anatomia estrutural (LIESE, 1985). A macroestrutura do colmo é composta basicamente por nós e entrenós, sendo os nós correspondentes aos diafragmas sólidos transversais ao eixo longitudinal do colmo que separam as regiões ocas ao longo do comprimento cilíndrico da cana (Fig 2.4). Nos entrenós, diferentemente da anatomia radial da maioria das espécies de árvores, as fibras são orientadas apenas no eixo longitudinal de crescimento do colmo (LI et al., 2011). Na região do nó, ocorre um fenômeno de ramificação dos conjuntos vasculares, aos quais as fibras são associadas (LIESE, 1985).

As partes externas do colmo são formadas por duas camadas de células epidérmicas. A casca, parte mais externa do colmo, é coberta por uma camada cutânea de cobertura encerada. As partes interiores do colmo são formadas por células esclerênquimas. As fibras, que dão a resistência natural do bambu, estão agrupadas ao redor dos feixes vasculares, envolvidas por uma matriz de lignina (GHAVAMI *et al.*, 2004), como pode ser visto nas Figuras 2.1, 2.2 e 2.3.

A seção transversal de um colmo tem sua estrutura determinada pela forma, tamanho, arranjo e número de conjuntos vasculares (Fig. 2.1). Neles, estão contidas as fibras que dão a resistência ao material e caracterizam o bambu como biocompósito (Tabela 2.1). Estes conjuntos se concentram mais e são menores no terço externo da parede do colmo, enquanto as células esclerênquimas e os tecidos condutores se concentram nos dois terços internos. (Fig. 2.3). A densidade das fibras é diretamente proporcional à resistência do bambu (LO *et al.*, 2004). O diâmetro das fibras varia entre 10 e 20 μm e seu comprimento é de cerca de 2 mm (JAIN *et al.*, 1992).

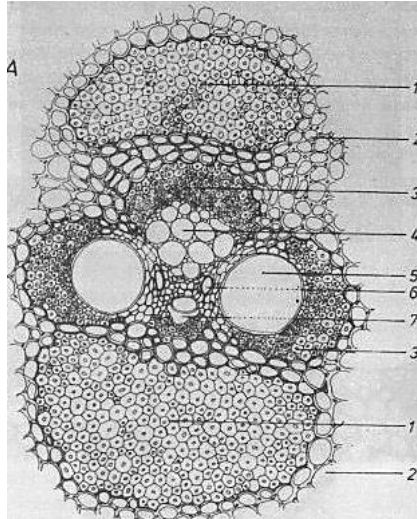


Figura 2.1. Composição microscópica de um feixe vascular de bambu. 1) feixe de fibra; 2) células Parênquima; 3) revestimento de células Esclerênquima; 4) floemas (tubos de seiva); 5) Metoxila (vasos); 6) grupos menores de Metoxila; 7) caminho intracelular (JANSSEN, 1981).

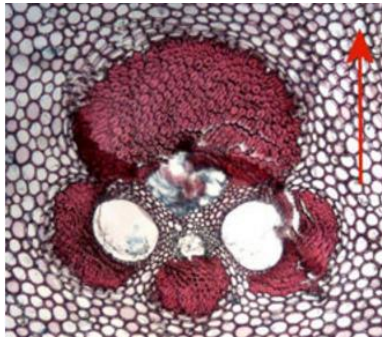


Figura 2.2. Feixe vascular do bambu *Guadua*, no centro da parede do colmo. A seta aponta para o lado externo da parede (Imagem: <https://www.guaduaibamboo.com>, acessado em: 26/07/2017).

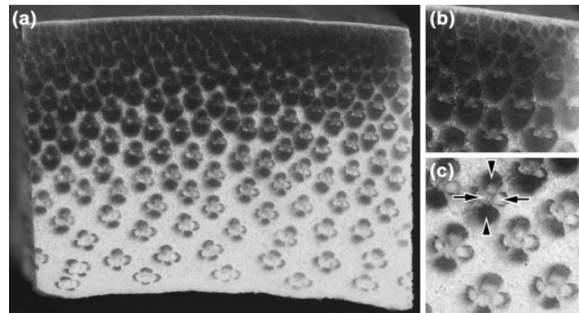


Figura 2.3. Seção de parede do bambu *Moso* (OBATAYA, 2007): a) vista ampla; b) parte externa do tecido conjuntivo; c) zona interna. Setas indicam os vasos de metaxila e as fibras de um feixe vascular.

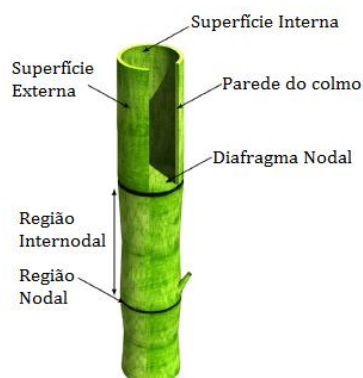


Figura 2.4. Macroestrutura do colmo de bambu (adaptado de TRUJILLO *et al.*, 2016).

Tabela 2.1. Propriedades mecânicas e físicas da matriz e da fibra do bambu (AMADA et al., 1996).

Propriedades	Matriz	Fibra
Resistência Tração (MPa)	50	610
Módulo de Young (GPa)	2,0	46
Densidade (g/cm ³)	0,67	1,16

Em geral, o diâmetro e a espessura da parede do bambu são maiores em sua base do que no topo. A estrutura do colmo se apresenta de forma que a fração volumétrica de fibras aumenta ao longo de sua altura, compensando esse efeito cônico e resultando em propriedades de rigidez e resistência relativamente uniformes em todo o bambu (AMADA *et al.*, 1996). A antiga prática de descartar o topo do bambu se demonstra, portanto, um desperdício.

Uma das principais características do bambu é ser uma matéria prima renovável e de alta velocidade de crescimento. Enquanto a colheita da madeira pode levar de 20 a 40 anos, o intervalo entre o plantio e a colheita pode ser de apenas um ano no caso do bambu (JANSSEN, 1981). Sua biomassa também é muito menor, entre 2–5%, ao contrário da madeira, que fica entre 10–30% (American Bamboo Society, 2018). A colheita do bambu nos trópicos, segundo o *Department of Science and Technology* do governo Indiano (2017), deve ser feita idealmente nos meses de inverno, pois são os períodos de estiagem e, portanto, menor umidade e menor teor de amido no bambu *in natura*, reduzindo a probabilidade de ocorrência de fungos e insetos pragas, como o *Dinoderus minutus* (“broca do bambu” ou “Caruncho”). A cultura popular recomenda também que a colheita seja feita em época de lua minguante, embora ainda não haja estudos científicos que suportem essa tradição.

Um dos fatores que fazem da normatização e entendimento do bambu uma tarefa difícil é o número e a variabilidade de espécies existentes. Existem cerca de 100 gêneros e mais de 1000 espécies de bambu, cada uma com um tipo estrutural e comportamento mecânico distintos. A escolha da espécie para construção deve ser feita de forma a considerar as características e as condições de cada projeto. Devem ser levadas em consideração as condições de execução, disponibilidade de matéria prima e dos tratamentos, além das condições ambientais locais. Levando em consideração todos esses fatores e o extenso histórico de sua utilização, a escolha do bambu no presente trabalho recaiu sobre o *Guadua Angustifolia Kunth*, uma espécie nativa latino-americana. Alguns aspectos gerais do *Guadua* são

descritos a seguir: a planta obtém sua maturidade entre os três e quatro anos (OBERMAN, 2004); entre o seu terceiro e sexto ano, sua altura varia entre os 18 e 30 metros, seu diâmetro externo varia de 8 a 18 cm e sua espessura de 1 a 2,5 cm; e a distância entre os nós varia de 7 a 10 cm na base e de 25 a 35 cm no meio (DELGADO, 2008).

As propriedades mecânicas de cada espécie são diretamente e indiretamente ligadas a variáveis como a idade da planta, posição no colmo (base, meio, ou topo), quantidade e espaçamento entre seus nós, diâmetro do colmo, local de extração e plantio, umidade relativa do ar, entre outros. Essa grande oscilação de resultados torna a caracterização mecânica e anatômica do bambu um complexo trabalho. O conhecimento dessa variabilidade pode ser empregado para otimizar o uso do bambu de acordo com cada um de seus parâmetros. Esse capítulo, portanto, pretende investigar alguns deles.

2.2. Nós

A influência do nó na resistência mecânica do bambu ainda é uma discussão em andamento. O bambu na natureza pode ser considerado uma estrutura engastada e livre, sendo a ação do vento o principal carregamento. Esta configuração faz com que os nós do bambu se concentrem principalmente na base do colmo e diminuam sua concentração em direção ao topo, com consequente variação no comprimento dos entrenós. Na literatura, alguns estudos apontam que a resistência à força axial decresce com a presença de um nó, como pode ser exemplificado na Tabela 2.2 (GHAVAMI, 2008):

Tabela 2.2. Resultado de ensaios de compressão e tração em cinco espécies de bambu, com nó e sem nó (adaptado de GHAVAMI, 2008).

Espécie/local		Tensão				Compressão			
		Resistência (MPa)		Mód. Elasticidade (GPa)		Resistência (MPa)		Mód. Elasticidade (GPa)	
		Com nó	Sem nó	Com nó	Sem nó	Com nó	Sem nó	Com nó	Sem nó
Bambusa multiplex Disticha (RJ)	Base	68,80	98,00	11,11	14,08	20,60	30,00	3,05	4,15
	Meio	-	-	-	-	-	-	-	-
	Topo	79,80	108,4	11,95	14,92	20,00	26,50	3,54	4,27
	Média	74,30	103,2	11,53	14,50	20,30	28,25	3,29	4,21
Bambusa tuldoide (RJ)	Base	112,0	140,5	9,99	12,66	30,20	37,80	2,97	3,24
	Meio	-	-	-	-	-	-	-	-
	Topo	95,80	98,00	8,55	11,19	30,00	38,30	3,83	2,78
	Média	103,9	119,2	9,27	11,92	30,10	38,05	2,90	3,01
Guadua superba (RJ)	Base	108,8	142,6	8,33	10,48	36,40	50,60	2,46	3,12
	Meio	-	-	-	-	-	-	-	-
	Topo	115,8	151,0	9,42	11,83	35,00	45,00	2,83	3,55
	Média	112,3	146,8	8,87	11,15	35,70	47,80	2,64	3,33
Bambusa vulgaris Schard (RJ)	Base	131,6	176,4	8,46	10,02	37,50	53,00	2,59	2,86
	Meio	106,1	153,5	8,50	10,22	39,50	46,00	2,36	3,19
	Topo	145,6	182,0	9,45	12,67	42,00	59,00	2,80	3,67
	Média	127,7	170,6	8,80	10,97	39,66	52,66	2,58	3,24
Dendrocallamus gigantus (RJ)	Base	106,8	147,0	12,98	19,11	58,66	56,61	12,07	15,29
	Meio	143,6	188,1	16,73	15,70	53,96	63,77	15,15	11,26
	Topo	114,0	157,6	13,44	10,71	54,04	72,87	9,79	10,41
	Média	121,5	164,2	14,38	15,17	55,55	64,42	12,34	12,32

A tabela mostra que a presença dos nós diminuiu o módulo de elasticidade e a resistência das amostras de Guadua em até 30% para tração e compressão. Já VILLALOBOS (1993) reportou que o elemento de bambu tracionado com nó pode ter apenas 30% da resistência à tração do entrenó. Como explicado anteriormente, o nó provoca uma mudança local nas direções da fibra. Nos esforços axiais, esta mudança provoca um efeito de cisalhamento local. As forças são desviadas e surge uma componente na direção transversal das fibras, onde o bambu apresenta maior fragilidade (JANSSEN, 2000). Segundo AMADA *et al.* (1996), a função das fibras na região dos nós seria apenas ligá-los aos colmos, e não reforçá-lo. O alinhamento unicamente longitudinal das fibras produz uma grande diferença entre as resistências mecânicas na direção longitudinal e transversal do bambu.

Entretanto, a presença do nó pode exercer uma função estrutural positiva. Essa anatomia e a não linearidade das fibras na região do nó, embora diminuam bastante a resistência axial dos elementos, também dificultam a propagação de fissuras (GOTTRON *et al.*, 2014). O trabalho de TAYLOR *et al.* (2014) conclui em duas medições que o parâmetro Kc , relativo a resistência a fissuras, aumentou em 1.55 e 1.72 na presença de nós. Conclusões parecidas foram tiradas em

WANG *et al.* (2014). Por esse motivo e pela reorganização da orientação das fibras nos nós, as ligações com pino e amarradas devem ser sempre feitas na região nodal. Nas ligações amarradas, a presença do nó pode também aumentar a aderência e a presença de fibras transversais locais aumenta também a capacidade de torque que pode ser aplicado. Por esses motivos, recomenda-se, quando possível, que um projeto estrutural de bambu preveja o posicionamento de nós em locais de ligação e o mínimo possível de nós ao longo das áreas sob solicitação axial.

2.3. Diâmetro, Espessura, Volume de Fibras e Densidade.

A geometria tubular natural do colmo do bambu é um dos diferenciais para a sua boa relação entre peso próprio e resistência do material (WEGST and ASHBY, 2007). Mas esta geometria não é constante e o diâmetro e espessura da parede diminuem em direção ao topo do colmo. Já o volume de fibras aumenta neste sentido, mas pode ser considerado constante ao longo da altura, em uma simplificação. Analisando a seção transversal da parede, a fração de fibras varia consideravelmente através da mesma, sendo de 15 a 20% junto à superfície interna e de 60 a 65% junto à superfície externa (AMADA *et al.* 1996). Os gráficos abaixo fornecem as relações entre a altura do colmo e o diâmetro, espessura e volume de fibras.

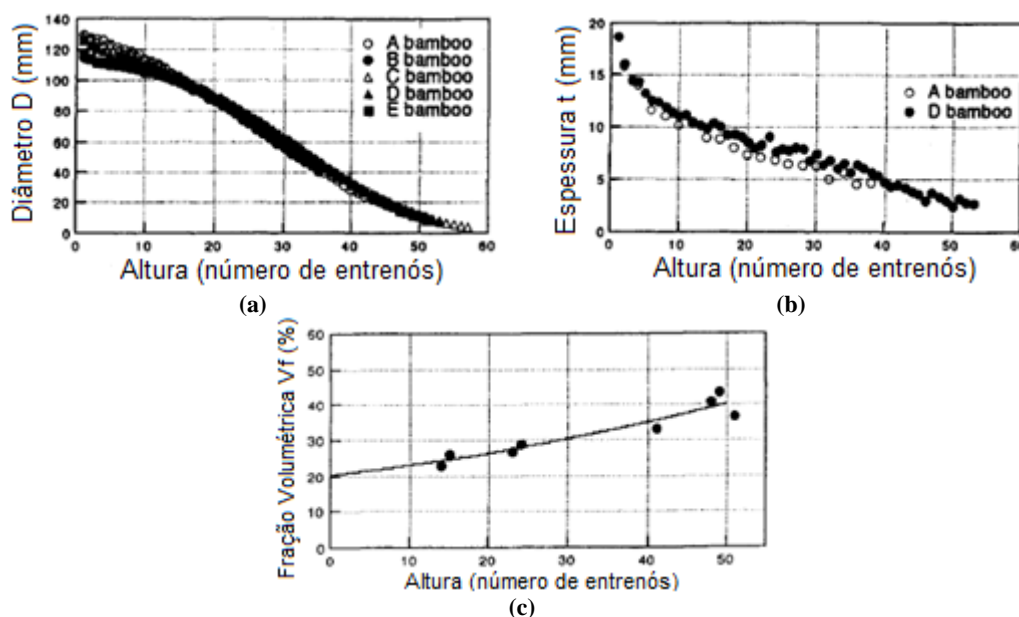


Figura 2.5. Características físicas do colmo: a diâmetro em função da altura no colmo; b) espessura em função da altura; c) fração volumétrica de fibras em função da altura (AMADA *et al.*, 1996).

Para a utilização estrutural, a Norma Técnica Peruana E.100 (2012) recomenda o limite de aceitação de até 1% para a conicidade dos diâmetros externos dos elementos. Vale ressaltar a importância de que todos os bambus utilizados em um projeto estejam dentro de um padrão para que o fluxo de tensões seja o mais contínuo possível e para auxiliar no funcionamento das ligações. O trabalho de GHAVAMI *et al.* (2005) fornece equações empíricas (Eq. 2.1; Eq. 2.2) para estimativa do diâmetro e espessura do *Guadua Angustifolia* ao longo do colmo.

$$D = -0,0654z^2 - 4,596z + 142,62. \quad (\text{Eq. 2.1})$$

$$t = 15,93z^{-0,2257} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

onde D é o diâmetro externo (mm), t é a espessura (mm) e z é a altura (m). A partir dessas equações, é possível tentar prever os intervalos para utilização do bambu *Guadua* já maduro, o que pode ser útil para a escolha do material para um projeto que necessita de um bambu de uma determinada seção. Utilizando essa ferramenta, é possível estimar que a espessura e o diâmetro externo nos primeiros 7 m do colmo variam de 26,8 mm (em z = 0,1 m) e 142,2 mm até 107,24 e 10,3 mm (z = 7,0 m).

A densidade do material pode variar bastante de acordo com a espécie, com o teor de umidade, com sua idade, com a sua posição radial e sua altura, variando em média entre 0,4 g/cm³ até 0,8 g/cm³ (AZZINI and NAGAI, 1977, TRUJILLO, 2016, JANSSEN, 2000). Em geral, a densidade no entrenó aumenta da base para o topo, e da parte interna para a parte externa da parede do colmo (LIESE, 1998).

2.4. Umidade e Idade da Planta.

O teor de umidade é um fator importantíssimo para as propriedades mecânicas do bambu. O teor de umidade (*moisture content*, ou “M.C.”) nos ensaios é feito para cada espécime, aquecendo-a a 103^o±2°C e comparando sua massas anterior e pós-secagem (ISO 22157-1 2004b), por meio da Eq. 2.3:

$$MC(\%) = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100 \quad (\text{Eq. 2.3})$$

onde m_0 : massa inicial pré-secagem e m: massa final pós-secagem.

Por ser um material lignocelulósico, o bambu é higroscópico, ou seja, perde ou absorve a umidade do ar até que eles estejam em equilíbrio. Quando o material atinge a saturação de suas fibras, similarmente à madeira, ele atinge o seu FSP (*fiber saturation point*). Este ponto é importante e varia de acordo com a espécie e a posição do colmo, devido às variações na fração volumétrica das fibras (CHEN *et al.*, 1998). Acima do FSP, a água se acumula nas cavidades dos feixes vasculares e as propriedades mecânicas não variam muito com a variação do teor de umidade. Já abaixo do FSP, as propriedades mecânicas são bastante afetadas pelo teor de umidade (XU *et al.*, 2014).

Isso pode afetar o material de diversas formas. Por exemplo, a quantidade de amido reservado está relacionada ao teor de umidade do material, o que aumenta a suscetibilidade ao ataque de pragas. Quanto às propriedades mecânicas, é possível afirmar que, quanto maior o teor de umidade, menor a resistência axial do material (LAKKAD *et al.* 1981). Em seus ensaios, WAKCHAURE *et al.* (1991) concluíram que um decréscimo de 6% no teor de umidade resultou (de 16.09% à 9.98%) em um aumento de aproximadamente 29% na capacidade de resistência a compressão. Em termos de suas dimensões, notou-se que, embora a absorção de água seja menor em bambus mais verdes, a seção expandia-se mais do que em bambus mais secos. HAMDAM *et al.* (2007) demonstra a relação entre a variação volumétrica e a umidade relativa do ar:

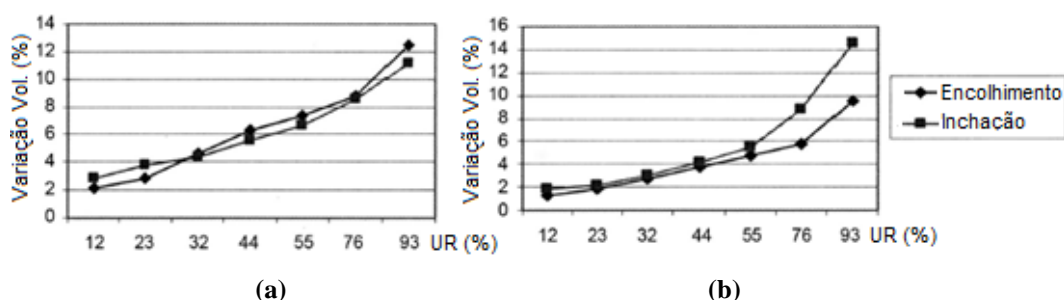


Figura 2.6. Variação percentual do volume do colmo pela umidade relativa do ar (Adaptado de HAMDAM *et al.*, 2007): a) amostras na base do colmo; b) amostras no meio do colmo.

É recomendado para o uso estrutural do bambu que a secagem dure o mínimo de quatro semanas, idealmente com o bambu na posição vertical, em um local ventilado, protegido do sol e da chuva (LÓPEZ, 1981). O uso do bambu verde (recém-cortado) diminui em até 50% a sua resistência mecânica à compressão, como mostram estudos feitos por JIANG *et al.* (2012). O gráfico da Figura 2.6,

apresentado por JANSSEN (1981), também chega à mesma conclusão, comparando diversos estudos anteriores.

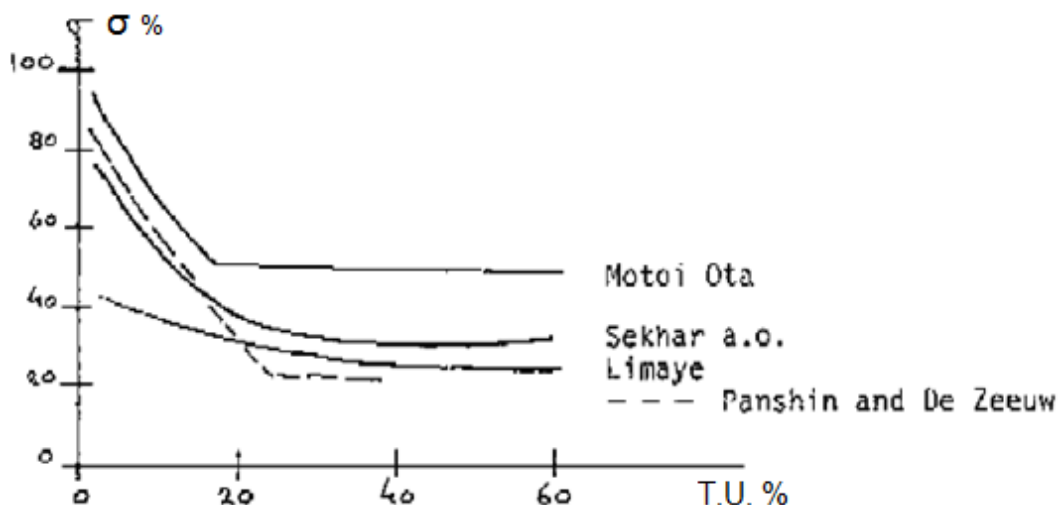


Figura 2.7. Adaptado de JANSSEN (1981), comparando a resistência à compressão relativa ao teor de umidade de diferentes autores, sendo a resistência de 100% correspondente ao bambu seco.

Quanto à idade da planta, a resistência do bambu cresce com o tempo, até a planta atingir sua maturidade, entre 2,5 e 4 anos (LOW *et al.*, 2006). Grande parte dos estudos, como a Norma Técnica Peruana E.100 (2012), recomendam a utilização do bambu Guadua como elemento estrutural apenas depois de maduro e com idade entre 4 e 6 anos. LIESE (1985), porém, observou que as resistências à compressão e à tração do bambu são maiores dos quatro aos seis anos, enquanto amostras com idade superior de até oito anos apresentam uma resistência mais elevada à flexão. JIANG *et al.* (2012) também demonstraram que existe uma relação entre a idade da planta e a influência da umidade no desempenho mecânico. É necessário conhecimento prévio sobre as condições climáticas e de plantio, uma vez que estas exercem considerável influência ao longo do processo de envelhecimento do bambu. Com essas informações sobre as variáveis, é possível melhor aproveitar bambus de diferentes idades de acordo com o carregamento em que estes estarão submetidos.

2.5. Comportamento de Ruptura e Propriedades de Fratura

Em termos de resistência, o estudo de AMADA e UNTAO (2001) chegou ao resultado de que a tenacidade de ruptura do bambu é aproximadamente 25% da do aço e maior do que grande parte das madeiras. Entretanto, apesar disso, uma das propriedades mais vantajosas do bambu como material construtivo são as

características de ruptura e sua grande capacidade de deformação previamente ao colapso total, típico de materiais compósitos reforçados por fibras. Em ensaios de flexão de colmo inteiro em vigas, normalmente o elemento estrutural rompe por descolamento das fibras e, não, por ruptura das mesmas (JANSSEN, 2000), sendo difícil a determinação da deformação última.

Isso se dá pelo fato de que as fissuras se propagam não linearmente, de forma a evitar as fibras, através de complexos mecanismos de dissipação de energia. Essa característica provoca descolamento, deslizamento interfacial e ocorrência de fenômenos de arrancamento das fibras (LOW *et al.*, 2006). Essas características explicam porque o uso do bambu é recomendado em regiões afetadas por terremotos. Em 1991, na Costa Rica, cerca de 20 casas de bambu sobreviveram próximas ao epicentro de um terremoto de grau 7,5 na escala Richter (JANSSEN, 2000).

2.6. Durabilidade

Durabilidade como termo para este trabalho engloba todos os aspectos do bambu exposto, incluindo sua suscetibilidade a pragas e o comportamento com o tempo quando exposto a intempéries. Em geral, a durabilidade do material é garantida, principalmente, por meio do seu tratamento e dos cuidados adotados pós-colheita. Existem diversas técnicas para se aumentar a durabilidade do bambu e variáveis como a idade do colmo são importantes. Bambus verdes, devido ao seu alinhamento de vasos, tem um fluxo interno mais rápido, facilitando o transporte e a absorção dos tratamentos (WAHAB, 2005).

Sem o devido tratamento, a exposição direta ao meio ambiente reduz a vida útil do material exposto a apenas um ano, evidenciando o seu caráter provisório. Já em ambientes protegidos, a vida útil é estendida a cerca de 4 a 5 anos (LIESE, 2015). Uma estrutura feita de bambu tratado com soluções fixadoras tem uma vida útil muito mais prolongada, embora os efeitos nocivos ao meio ambiente destas soluções sejam consideráveis e, muitas vezes, proibitivos. A Norma Técnica Colombiana NTC 6100 (2014) cita a seguinte regra para o tratamento adequado, em livre tradução:

“Para o controle de pragas e enfermidades, deve-se usar produtos biodegradáveis e/ou de origem vegetal, ou controladores biológicos”.

Infelizmente, ainda hoje, não existe uma solução padronizada, ecológica e que seja funcional para todos os casos. As pesquisas sugerem tratamentos físicos ou químicos, sendo estes últimos os que apresentam melhores resultados em longo prazo. Tendo em vista essas características e bom senso da regra na norma, uma das escolhas mais adotadas para uso não exposto é o tratamento da solução de borato de sódio (bórax) e ácido bórico. Em boas condições, o bórax apresenta bons resultados, é seguro ao meio ambiente, e tem custo relativamente baixo. No entanto, por não ser um tratamento que se fixa ao material, seus efeitos são anulados quando o bambu é exposto a chuvas (TANG *et al.*, 2012).

Para tratamentos em solução, é necessária a perfuração dos diafragmas do colmo em toda a sua extensão para a absorção interna. SULTHONI (1981) recomenda que, em tratamentos de imersão, o bambu deva ficar por um mínimo de sete dias imerso e depois secar verticalmente ao ar livre durante pelo menos quatro semanas. Entretanto, o tratamento com esta solução garante apenas o uso interno do bambu, uma vez que o tratamento com ácidos não permanece fixo no material quando exposto a repetidas chuvas. LIESE e KUMAR (2003) e LIESE (2005) observaram que a base do bambu possui maior durabilidade do que o restante do colmo e que rachaduras pré-existentes diminuem a vida útil do bambu, pois permitem a penetração da água no interior do colmo, onde a suscetibilidade às pragas é maior. Internamente, a estrutura oca pode fornecer um ambiente favorável para o desenvolvimento de fungos. A qualidade do bambu adotado deve, portanto, sempre ser observada cuidadosamente para o uso estrutural.

Os ensaios para teste da durabilidade do bambu estão geralmente relacionados ao tratamento prévio dado ao bambu e à resposta do material a estes tratamentos. A causa principal da degradação do bambu é a sua exposição à água. Como já dito, o comportamento mecânico do bambu é muito sensível ao teor de umidade, que está ligado diretamente à umidade relativa do ambiente.

XU *et al.* (2014) realizaram ensaios de caracterização de amostras imediatamente após serem imersas em água limpa durante períodos de um e sete dias, a fim de entender o comportamento de uma estrutura de bambu após eventos de chuva intensa. Na Fig. 2.7, é facilmente notada a influência de um dia e de uma sequência de dias de chuva na resposta do material. Os resultados de XU *et al.* (2014) sugerem também que a rigidez e a resistência são mais sensíveis ao aumento do teor de umidade para os esforços de compressão, pois as células das

fibras seriam mais afetadas do que a matriz de lignina, mais associada às propriedades de resistência transversais.

Outras importantes pesquisas sobre a degradação do bambu podem ser encontradas em WILLEITNER and LIESE (1992), KIM *et al.* (2011), SUPRAPTI (2010) e TANG (2009). Não foram encontradas, nas bases de dados consultadas no presente trabalho, pesquisas e investigações sobre os efeitos de eventos cíclicos de imersão em água na degradação do material ou no seu comportamento mecânico.

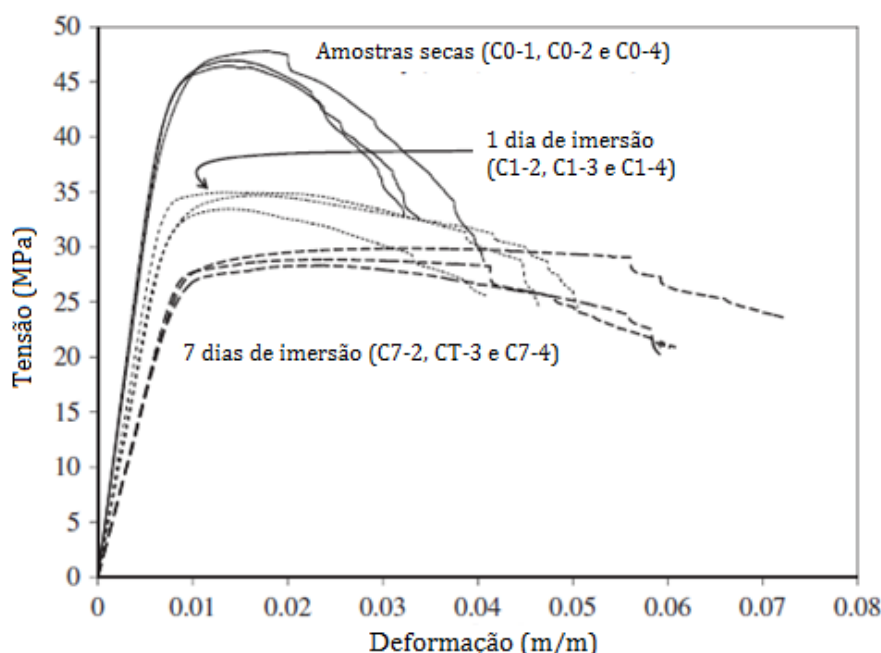


Figura 2.8. Curvas Tensão x Deformação para espécimes testadas à compressão após a sua secagem, após 1 dia de imersão em água e após 7 dias imersas (adaptado de XU *et al.*, 2014).

2.7. Compressão Paralela às Fibras

A Norma ISO 22157-2004b, baseada nos estudos de JANSSEN (1999), VILLALOBOS (1993) e outros, define o ensaio de compressão paralela às fibras com o uso do colmo inteiro. Algumas recomendações da norma são aqui listadas:

- as amostras não devem possuir nó.
- comprimento da amostra deve ser igual ao diâmetro externo do colmo.
- controle por deslocamento (diferentemente da NT Colombiana).
- velocidade recomendada: 0,01mm/s (0,06mm/min).
- tolerância de velocidade: 20%
- pré-carregamento: 1 kN.

Imperfeições existentes nos colmos são as principais causas de problemas em ensaios deste tipo, onde o principal tipo de falha ocorre por esmagamento das fibras no contato com as placas. A tabela 2.3 mostra alguns resultados da literatura, comparando diferentes autores e diferentes espécies.

Tabela 2.3. Valores de resistência e rigidez à compressão paralela às fibras de estudos relevantes para compressão paralela às fibras.

Compressão Paralela	Ghavami (2005)	Richard (2013)	Janssen (1981)	Culzoni (1986)	Chung (2002)	E.100 (2012)
Espécie	Guadua	Tre Gai	Blumeama	Guadua	Mao Jue	Guadua
Resistência (MPa)	25,3-34,6	54,7	60-110	112,3	50-70	13
Módulo E (GPa)	12,58	13,45	-	8,9	5-10	7,3-9,5

A resistência à compressão do bambu pode ser considerada menor do que a sua resistência à tração (JANSSEN, 1981). As amostras submetidas à compressão apresentam certos tipos de falha, sendo alguns exemplificados na Fig. 2.8. Em geral, o que se observa historicamente é que o modo de falha governante é o representado na Fig. 2.8a, em que o esmagamento no topo e na base ocorre no contato com as placas (CHUNG *et al.*, 2001). No caso das amostras que possuem nó, é possível que a ruptura ocorra conforme ilustrado na Fig. 2.9. Neste caso, é possível, com a inclinação da falha na amostra, saber qual porcentagem da força paralela às fibras se desviou para transversal, provocando a ruptura. Devido à diferença de densidade das fibras, a resistência é máxima no raio mais externo e decresce em direção ao interno. O rompimento esperado, portanto, ocorre primeiramente na zona externa, em seguida na intermediária e por fim na face interna do colmo (JARAMILLO *et al.*, 2016).

A fase inicial de compressão do bambu se aproxima do comportamento elástico linear, portanto é possível aplicar a Lei de Hooke para deformações. O módulo de elasticidade E_c pode ser calculado por meio da curva tensão x deformação provida do ensaio em regime elástico, sendo normalmente selecionado o intervalo entre 20% e 80% da curva (HARRIES *et al.*, 2012). Até onde vai o conhecimento do autor, outros tipos de ensaio que utilizem forças de

compressão combinadas como o *Combined Loading Compression* (CLC) não foram realizados com o bambu.

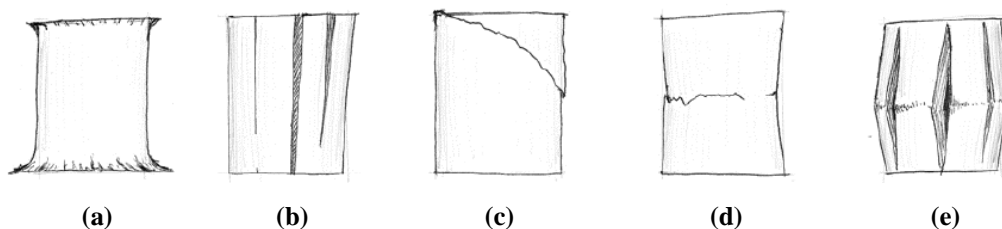


Figura 2.9. Falhas típicas em amostras submetidas à compressão: a) por esmagamento; b) longitudinais; c) por corte; d) por flambagem geral das fibras na direção interna; e) por flambagem geral das fibras na direção externa (JARAMILLO et al., 2016).

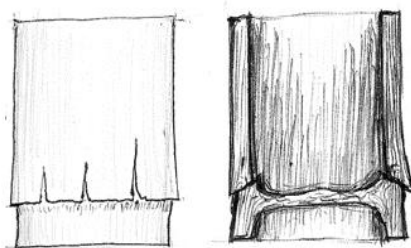


Figura 2.10. Modo de ruptura na região nodal do colmo devido ao esforço de compressão (JARAMILLO et al., 2016).

2.8. Flexão

2.8.1. Colmo Inteiro

O ensaio proposto pela norma ISO 21157:2004b para flexão no colmo de bambu é bem simples, consistindo em uma viga carregada em quatro pontos através de selas, como demonstra a Fig. 2.10. Normas e estudos de ensaios à flexão estipulam um vão livre mínimo de trinta vezes o diâmetro externo do colmo - ISO 21157-2004b, NTP E.100 (2012), JANSSEN (1981). Existem diversos estudos consagrados com uma vasta gama de discussões e resultados para diversas espécies de bambu neste tipo de ensaio (ver Tabela 2.4).

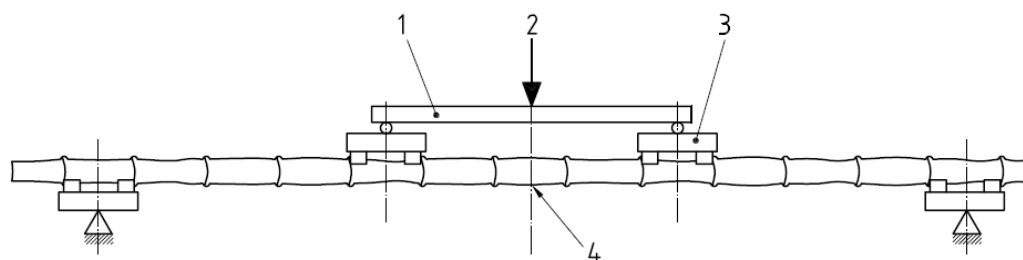


Figura 2.11. Ensaio de flexão a quatro pontos (Norma ISO 21157-2004b). Indicados por seta: 1) mecanismo de distribuição de carga; 2) ponto central de aplicação de carga; 3) cavaletes para transferência entre rolete e superfície; 4) eixos, indicando cargas e apoios perto dos nós.

2.8.2. Ensaios com Hastes

Nos ensaios a flexão a quatro pontos de OBATAYA *et al.* (2007) foram utilizadas hastes retiradas dos entrenós da espécie *Phyllostachys pubescens* com dimensões descritas de 240 mm (comprimento); 8–9 mm (espessura); 8 mm (largura). Com os dados de extensômetros colocados na parte superior e inferior, é possível traçar gráficos de momento x curvatura relativa, considerando regime linear elástico. Neste caso, a curvatura relativa é calculada multiplicando a curvatura pelo momento de inércia da seção, já que as amostras podem ter variações de geometria intrínsecas e relevantes.

Pelo fato do bambu ser um material funcionalmente graduado (*functionally graded material*, FGM), OBATAYA *et al.* (2007) procuraram diferenças na resposta destas hastes de acordo com as suas orientações e dividindo-as em seções de acordo com a sua quantidade de fibra. Devido às diferentes densidades de células parênquimas e de fibras ao longo da espessura da parede do colmo, a orientação do material na haste faz com que existam dois tipos de ensaios, como mostra a Fig. 2.12. Neste estudo, concluiu-se que eram desconsideráveis as diferenças quanto à orientação da amostra em relação à rigidez, apesar da diferença de volume de fibras nas zonas tracionadas e comprimidas. Já a ductilidade foi observada como sendo muito maior nas amostras do Tipo 1, onde a parte com maior concentração de fibras é tracionada e a parte interna é comprimida. Já GOTTRON *et al.* (2015) fez ensaios com hastes sob flexão e concluiu que a orientação das hastes, ao contrário do que o estudo de OBATAYA *et al.* (2007) indicara, altera o resultado também em termos de rigidez e confirma a maior ductilidade das amostras do Tipo 1.

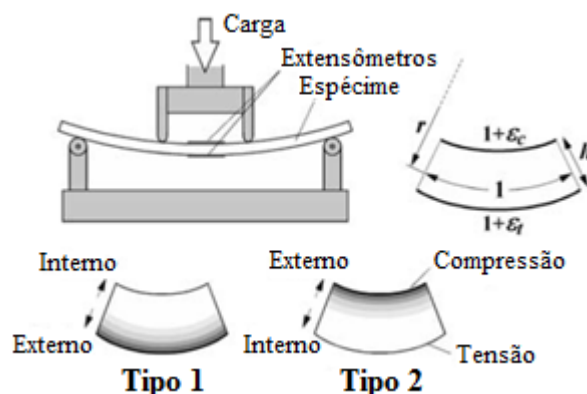


Figura 2.12. Modelo de ensaio com hastes para flexão a quatro pontos e possíveis orientações das amostras (adaptada de OBATAYA *et al.*, 2007).

Tabela 2.4 Resultado de resistência à flexão e módulo de Young encontrados por diferentes autores e diferentes espécies de bambu.

Flexão	<i>Dixon (2015)</i>	<i>Janssen (1981)</i>	<i>Chung (2002)</i>	<i>Obataya* (2007)</i>	<i>Gottron* (2014)</i>	<i>E.100 (2012)</i>
Espécie	Guadua	Blumeama	Kao Jue	Mosso	Tre Gai	Guadua
Resistência (MPa)	100-325	84	82	-	73-123	13
Módulo E (GPa)	10-35	20,5	18,5	15-16	26,8-36,2	7,3-9,5

* estudos feitos com amostras retiradas do entrenó.

2.9. Fluência

JANSSEN (1981) realizou o primeiro estudo de fluência em bambu com colmo inteiro e concluiu que carregamentos de longa duração têm pouco efeito no material. Segundo ele, o comportamento viscoelástico do material pode ser estudado segundo o modelo reológico de Burger, que consiste na associação de um elemento de Kelvin (mola e amortecedor em paralelo) a um elemento viscoso e outro elástico em série (Fig. 2.12). A deformação plástica devido a carregamentos de longa duração é de apenas 3-5% da deformação elástica inicial (JANSSEN, 2000). Em AOYAGI and NAKANO (2009), estudou-se a fluência no bambu para determinados teores de umidade e os autores concluíram que a fluência no bambu era governada pela razão entre o tecido parênquima e os conjuntos vasculares, que determinam a fração de volume de fibra. Quanto maior for a fração, menor o grau de relaxação. KANZAWA *et al.* (2011) realizaram um estudo com hastes retiradas dos entrenós e avaliaram a relação entre as

propriedades de relaxação e a área e o formato dos conjuntos vasculares. Foi concluído que o aumento da densidade dos conjuntos provoca uma queda na taxa de fluência.

GOTTRON *et al.* (2014), também utilizando hastes, fizeram um estudo comparando amostras de bambu com a madeira. O valor encontrado da taxa de fluência (1,29) após 90 dias foi maior do que aqueles sugeridos por JANSSEN (1981, 2000), mas ainda são pequenos, principalmente na comparação com a madeira. Deve ser ressaltado, no entanto, que esses valores não podem ser imediatamente extrapolados para o uso do colmo inteiro, já que a geometria e a macroestrutura do colmo afetam diretamente o comportamento mecânico do material.

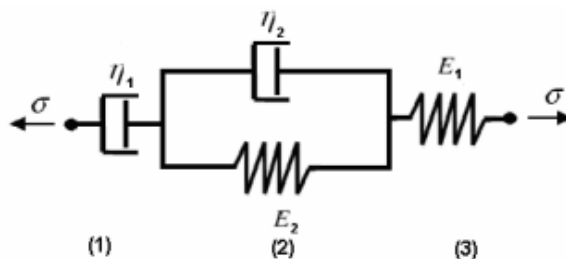


Figura 2.13. Modelo reológico de Burger e suas 3 zonas de deformações (SANTOS, 2008).

2.10. Ligações

2.10.1. Generalidades

As ligações são alvo de grande interesse para os estudos da área, pois todas as alternativas têm seus prós e contras e devem ser analisadas caso a caso. Este trabalho apresenta algumas discussões sobre dois conceitos gerais de ligação, amarradas e parafusadas. Estas podem ser descritas como flexíveis e rígidas, respectivamente.

2.10.2. Ligações Amarradas e Pinadas

As conexões amarradas são as principais e mais antigas soluções para transferência de carga entre elementos de bambu. Existe uma série de problemas envolvidos no corte e na perfuração do bambu, devido à orientação exclusivamente axial de suas longas fibras e sua baixa resistência ao

cisalhamento, como já mencionado. Além disso, o bambu é um material com um coeficiente de dilatação térmica variável. O estudo de BEDOYA *et al.* (2016), usando técnicas fotoacústicas, encontrou um coeficiente de expansão térmica linearizado na ordem de $(2,7 \pm 0,7) \times 10^{-5}/C$, consideravelmente maior do que o coeficiente de dilatação do aço ($1,2 \times 10^{-5}/C$), dificultando novamente a utilização de ligações de pino sem reforço ou materiais que possam absorver esse gradiente.

A amarração, que pode ser feita com diversos tipos de materiais, naturais ou sintéticos, preserva a estrutura física natural do colmo e permite uma pequena, porém bem-vinda, flexibilidade na ligação, evitando rachaduras e aparecimento de fissuras. No entanto, a variação de volume de acordo com o teor de umidade relativo do ar também apresenta dificuldades para as ligações amarradas, uma vez que essa movimentação contínua ocasiona afrouxamento do nó com o tempo. O trabalho manual envolvido, a baixa resistência à tração das cordas e a alta sensibilidade ao fogo são outros problemas relacionados ao uso de ligações amarradas (DAVIES, 2008).

Desenvolvidas empiricamente, é possível encontrar nos manuais de construção de bambu uma grande variabilidade de tipos para ligações amarradas e de nós possíveis para a conexão de dois ou mais colmos. Como muitas vezes o ideal é partir sempre da solução mais simples, foi escolhido para estudo de caso o chamado “nó do fiel”, ou “*clove hitch*”. Usar o nó do fiel permite conectar os elementos de bambu e, ao mesmo tempo, permitir a rotação relativa entre eles. Para entender o funcionamento do nó e assegurar a sua segurança e eficiência, é necessário estabelecer o coeficiente de atrito estático entre a corda empregada e o bambu, como será detalhado na seção 2.10.3. Também é necessário entender a distribuição e o equilíbrio de forças atuantes no bambu e no nó. A partir desses conhecimentos, é possível chegar a um ensaio que determine qual intensidade e quais tipos de carregamentos essas conexões podem ser submetidos de maneira segura.

2.10.3. Nós

Nó pode ser definido como um enlaçamento de fios, ou cordas, fazendo com que suas extremidades passem uma pela outra, amarrando-as. Cotidianamente, os nós são em geral aplicados para conectar dois objetos naturalmente separados.

Enquanto na língua portuguesa não há uma diferenciação, na língua inglesa, utiliza-se da palavra “*knot*” como o termo geral para nó, enquanto “*hitch*” se refere aos nós práticos. Um “*knot*”, ou nó matemático, embora inspirado nos nós do dia a dia, é definido de outra forma, e pode ser estudado pela Teoria dos Nós. Para o caso deste projeto, o foco é o estudo do “*hitch*”, em específico, o *clove hitch*.

Embora os nós estejam presentes há milhares de anos em praticamente todas as sociedades, a formalização de seus estudos começou por BAYMAN (1977). Para o entendimento da segurança de um nó, alguns parâmetros devem ser estabelecidos. A topologia do nó é o que o define e o diferencia. Existem nós complicadíssimos de se executar, mas que não necessariamente são mais eficientes do que outros mais simples. É preciso ter o entendimento de como funciona o equilíbrio de forças no nó e como o diâmetro da corda, o formato do objeto e o coeficiente de atrito estático entre a corda e o objeto influenciam na eficácia da amarração.

2.10.4. Coeficiente de atrito estático entre corda e objeto

A Fig. 2.12 a seguir exemplifica como pode ser medido o coeficiente de atrito estático entre a corda e um objeto circular de qualquer diâmetro. A corda tangencia o objeto e é submetida a um puxão T_2 em uma das extremidades e a força resultante na outra extremidade é dada por T_1 . O ângulo θ é medido do centro do objeto circular e é definido pela superfície em contato com a corda (Eq. 2.4). Assim sendo,

$$T_2 \leq T_1 e^n, \quad (\text{Eq. 2.4})$$

para n voltas em volta do objeto, $e = \exp(2\pi\mu)$ e μ o coeficiente de atrito estático.

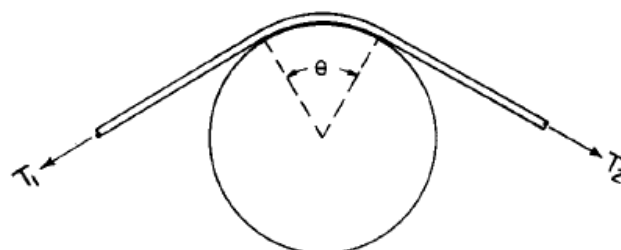


Figura 2.14. Forças atuando numa corda em contato com um objeto circular (BAYMAN, 1977).

2.10.5. Nó do fiel (*Clove Hitch*)

O nó do fiel tem sua topologia exemplificada na Fig. 2.13. Como é possível notar, o nó é de razoável simplicidade de execução. Como a figura mostra, existe uma variação na força atuante ao longo da corda, devido ao entrelaçamento e ao coeficiente de atrito. Um pedaço de corda que está embaixo do outro no nó fica mais comprimido contra o objeto e aumenta a sua aderência. Nesse caso, da extremidade que pode ser considerada solta até a outra extremidade a corda deu duas voltas. Portanto, é possível afirmar que, em equilíbrio, as forças devem se comportar da forma dada pela Eq. 2.5:

$$t_0 \leq t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq t_4, \quad (\text{Eq. 2.5})$$

onde t é a tração imposta e os índices são as posições relativas na corda do nó. Levando em consideração o coeficiente de atrito, temos que as igualdades (Eqs. 2.6).

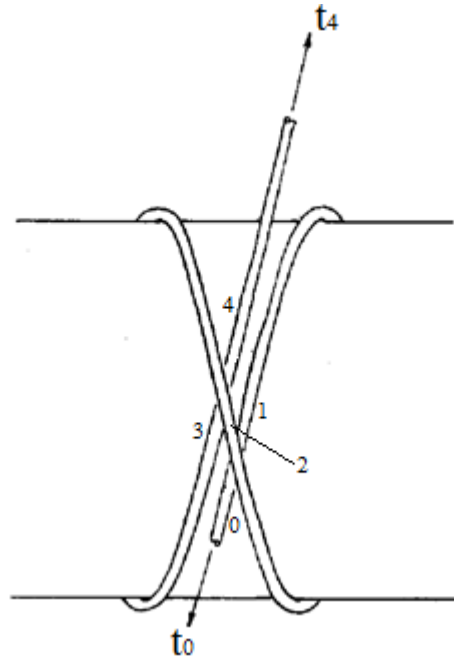


Figura 2.15. Topologia do nó do fiel (BAYMAN, 1977).

$$t_1 \leq t_0 + \eta t_2 \quad (\text{Eq. 2.6a})$$

$$t_2 \leq \epsilon t_1 \quad (\text{Eq. 2.6b})$$

$$t_3 \leq \epsilon t_2 \quad (\text{Eq. 2.6c})$$

$$t_4 \leq t_3 + \eta t_2 \leq (\epsilon + \eta) t_2 \quad (\text{Eq. 2.6d})$$

onde μ e η são fatores relacionados ao coeficiente de atrito estático, e $\epsilon = \exp(2\pi\mu)$. Combinando, portanto, as equações dadas em 2.7, têm-se que:

$$t_2 \leq \epsilon(t_0 + \eta t_2) \quad (\text{Eq. 2.7a})$$

$$t_2(1 - \eta\epsilon) \leq \epsilon t_0 \quad (\text{Eq. 2.7b})$$

É possível observar que o resultado varia de acordo com o coeficiente de atrito estático. Foram definidas duas classificações para os casos de atrito baixo e alto. Se $\eta\epsilon < 1$, a atrito é considerada baixo e é necessária fazer a seguinte verificação para saber se o nó sustenta o puxão:

$$t_2 \leq [\epsilon/(1 - \eta\epsilon)]t_0, \quad (\text{Eq. 2.8a})$$

$$t_4 \leq [\epsilon(\epsilon + \eta)/(1 - \eta\epsilon)]t_0. \quad (\text{Eq. 2.8b})$$

Portanto, segundo a teoria de Bayman, para o nó do fiel não escorregar, é necessário que a força em t_4 não exceda o lado direito dado na Eq. 2.8b. Se $\eta\epsilon > 1$, é possível afirmar que o atrito entre a corda e o bambu é alta e o nó do fiel é seguro, independentemente de quão forte é o puxão. Fica evidente, então, a importância de se conhecer o coeficiente de atrito entre o bambu e a corda para entender o funcionamento das ligações amarradas.

3. Estruturas Dobráveis – Revisão Bibliográfica

3.1. Generalidades

Por definição, estrutura dobrável é aquela que pode ser dobrada em uma forma compacta, que ocupe um volume consideravelmente inferior no espaço em comparação com a sua forma desdobrada. Assim, a estrutura dobrada pode ser facilmente armazenada, transportada e toda a sua estrutura básica já está pronta antes de chegar ao local, economizando tempo de implementação. As estruturas pantográficas constituem uma das mais importantes e tradicionais formas de se obter estruturas dobráveis. Tais estruturas são formadas por pares de barras rígidas conectadas uma à outra por uma rótula intermediária, chamada *pivot*, em torno da qual os elementos podem girar livremente (Fig. 3.1).



Figura 3.1. Desdobramento dos elementos de uma cobertura sobre uma piscina (KASSABIAN et al, 1999).

3.2. Condições geométricas das estruturas pantográficas

3.2.1. Elementos tipo-tesoura

Scissor-like elements (elementos tipo-tesoura, SLE) são constituídos por duas vigas conectadas por uma junta intermediária, que permite rotação relativa entre elas, ao mesmo tempo em que é capaz de transferir forças (TEMMERMAN and MIRA, 2011). Conectando os SLE através de rótulas aos outros pares, forma-

se uma estrutura pantográfica capaz de se dobrar e desdobrar de acordo com a necessidade, adicionando-se restrições, caso necessário, para que seja possível suportar carregamentos. Existem três tipos de unidades pantográficas que podem ser definidos de acordo com a função de sua junta intermediária: translacional, polar e anguladas. Estas podem classificadas conforme a posição do *pivot* e a geometria das barras (Fig. 3.2):

a) Par de Tesouras Centrado (PTC): sistema caracterizado por barras retas idênticas simetricamente conectadas por *pivot* localizado na metade do comprimento das mesmas.

b) Par de Tesouras Descentrado (PTD): sistema caracterizado por barras retas idênticas assimetricamente conectadas por *pivot* localizado fora da metade do comprimento das mesmas.

c) Par de Tesouras Anguladas (PTA): sistema caracterizado por barras idênticas compostas por dois segmentos de reta formando um ângulo entre si e com *pivot* localizado no ponto de interseção desses segmentos.

d) Par de Tesouras Genérico (PTG): sistema genérico caracterizado por barras não idênticas compostas por dois segmentos de reta formando um ângulo entre si e com *pivot* localizado no ponto de interseção desses segmentos.

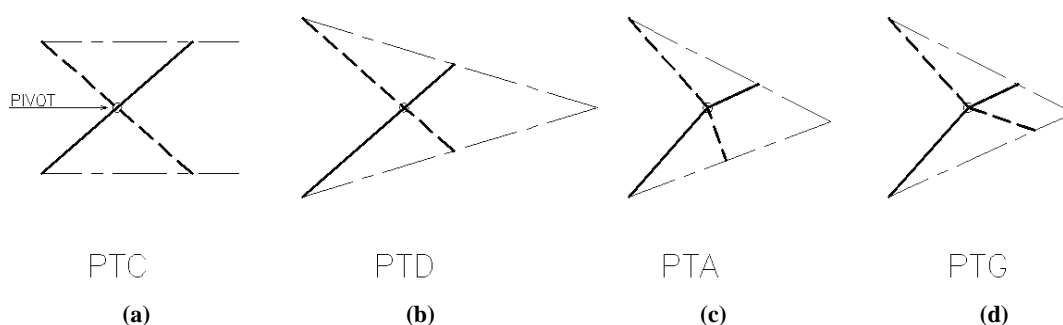


Figura 3.2. Tipos de componentes básicos de estruturas pantográficas: a) par de tesouras centrado; b) par de tesoura descentralizado; c) par de tesoura anguladas; d) par de tesouras genérico.

A escolha de qual geometria adotar depende da aplicação da estrutura pantográfica. Para vigas e estruturas treliçadas, o uso mais comum são as unidades translacionais com o *pivot* centralizado e barras de mesmo tamanho, onde seus parâmetros podem ser vistos na Figura 3.3. Neste caso, a condição existente é que as unidades permaneçam paralelas entre si durante todo o desdobramento da

estrutura, cuja geometria é dada pela Eq. 3.1 (MADEN *et al.*, 2011). Por meio destes parâmetros é possível definir a quantidade e a angulação das unidades desejadas para um determinado vão S .

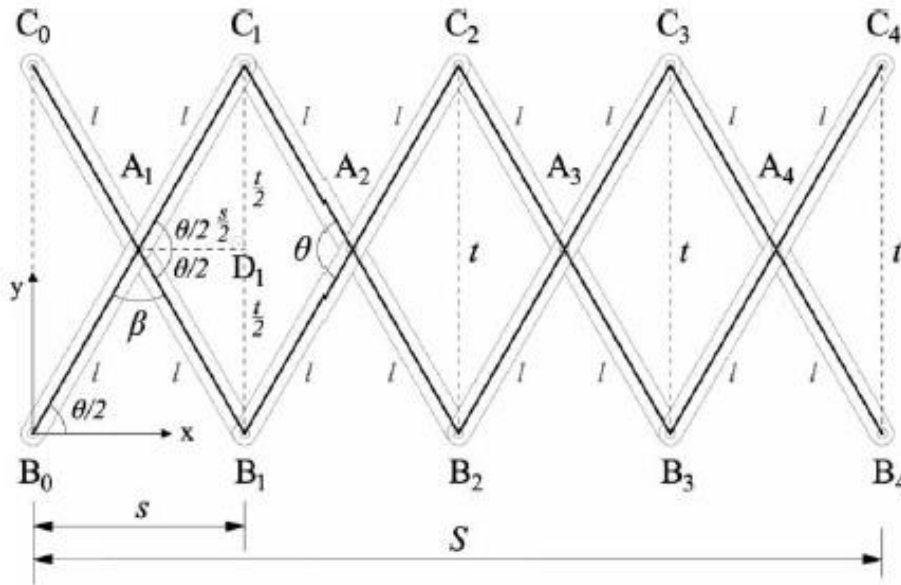


Figura 3.3. Geometria de estrutura pantográfica com pivot centralizado e barras simétricas (MADEN *et al.*, 2011).

$$s = 2l \cos \frac{\theta}{2}, \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde:

s = comprimento no eixo principal,

l = metade do comprimento de cada viga,

θ = ângulo de abertura entre as unidades.

3.3. Pontes transportáveis: materiais utilizados e ligações

Um dos primeiros projetos de ponte transportável foi a ponte *Bayley*, baseada no modelo da *Callender-Hamilton Bridge*, desenvolvida em 1941 para aumentar a velocidade de construção das pontes de rápida montagem. Uma das revoluções da ponte *Bayley* foram os avanços de suas conexões. Suas partes podiam ser conectadas por conexões pinadas em furos pré-existentes nos seus painéis, aumentando a velocidade de montagem (RUSSEL *et al.*, 2013). Os painéis da ponte *Bayley* são pré-fabricados, de aço e pesam cerca de 270 kg cada. Desse modelo, diversas outras soluções de ponte foram concebidas durante o século XX.

Atualmente, com a evolução dos estudos dos materiais, as pontes de rápida montagem começaram a se desenvolver na direção dos materiais compósitos (ROBINSON *et al.*, 2008). No caso de pontes transportáveis por veículos, o uso de compósitos reduz em 20% o custo e 25% o peso próprio em relação a uma solução similar que emprega alumínio (KOSMATKA e POLICELLI, 1999; KOSMATKA, 2011). Nesta área, boa parte dos estudos recentes se volta para o uso de perfis pultrudados de fibra de vidro (GFRP) em estruturas de ponte treliçadas. Um exemplo do uso deste material é a ponte localizada próxima a cidade de Lleida, na Espanha. Ela foi pré-montada no chão para 38 metros de vão em 2001 e erguida em três horas devido a leveza do material (SOBRINO *et al.*, 2013). O principal desafio com estruturas GFRP é o projeto de suas ligações, devido ao comportamento anisotrópico dos perfis de fibra de vidro (SOBRINO *et al.*, 2013). Por conta disso, as juntas da ponte de Lleida foram aparafusadas utilizando suportes e parafusos de aço (Fig. 3.4). As pontes da empresa E.T. Techtonics (<https://www.ettechtonics.com>) podem ser transportadas a locais remotos e montadas em um dia, no caso de pequenos vãos (13 metros), e de dois a três dias para vãos até 25 metros.



Figura 3.4. Conexões da ponte de Lleida. a) conexões do arco; b) conexões do tabuleiro (SOBRINO *et al.*, 2013).

No Brasil, foi desenvolvido um modelo de escala reduzida para uma ponte desmontável utilizando GFRP para um vão de 30 metros, sem utilizar conexões parafusadas (TEIXEIRA, 2007; TEIXEIRA *et al.*, 2013). Neste trabalho, as longarinas assumem o formato de treliças através de partes individuais rapidamente montadas. As conexões desenvolvidas incluem tendões de aço protendidos ancorados nos perfis tubulares de GFRP, ligados por juntas de aço, para condicionar à estrutura um necessário estado global de compressão durante todas as fases do projeto (Fig. 3.5). Análises experimentais da estrutura e do

funcionamento das ligações foram feitos, com resultados favoráveis e compatíveis com as previsões teóricas, indicando um avanço na tecnologia existente na área.

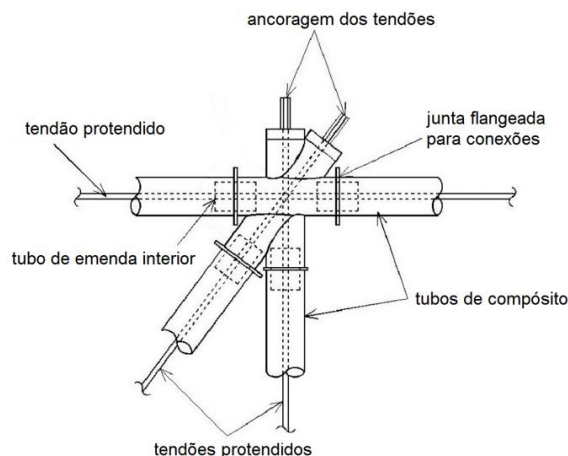


Figura 3.5. Detalhe de uma das conexões da ponte desmontável proposta por TEIXEIRA (2007).

Um dos projetos de ponte dobrável utilizando unidades tipo-tesoura mais recente é a *MobileBridge* (CHIKAHIRO *et al.*, 2016). A sua forma estrutural possui duas unidades tipo-tesoura formadas por barras conectadas no centro por um *pivot* e rotuladas nas extremidades (Fig. 3.6). Todos os elementos são conectados por pinos e eixos, utilizando-se de buchas para reduzir o atrito, o que torna suas ligações bem simples. Com um tempo de montagem de uma hora com pouca mão de obra necessária, o protótipo em escala real construído, junto com as respectivas análises numéricas, teve bons resultados para cargas estáticas e dinâmicas, para um veículo civil leve.

Algumas desvantagens de aplicação da *MobileBridge* é o seu alto custo de fabricação, já que para reduzir o peso próprio, o principal material estrutural de seu quadro é uma liga de alumínio extrudida (A6N01). A ponte não possui uma estrutura de banzo superior ou inferior, o que reduz a sua capacidade de carga. E, embora a estrutura das transversinas acompanhe as longarinas, a formação dobrável do seu deque não permite que o vão de utilização seja variável.

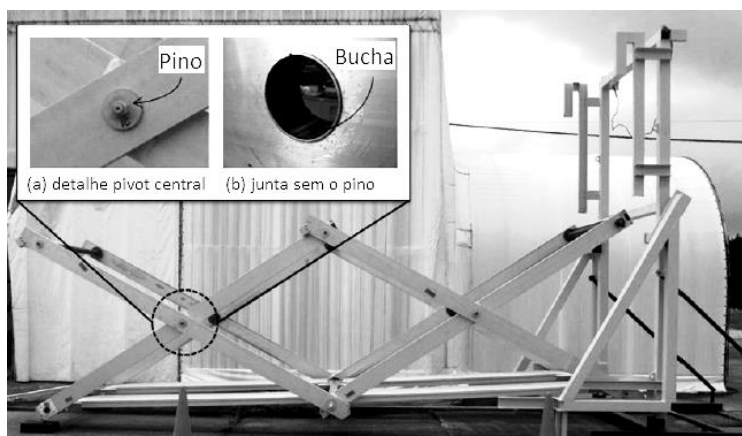


Figura 3.6. MobileBridge (CHIKAHIRO et al., 2013): a) detalhe de ligação com pino; b) pivot sem pino.

Existem diversos outros estudos propondo novas ligações e avanços para estruturas pantográficas (AKGÜN e KORKMAZ, 2016; THOMAS e SIA, 2013; TEMMERMAN e MIRA, 2011). Em construções de bambu, estruturas pantográficas costumam utilizar ligações amarradas para o erguimento de domos temporários ou fixos. SEIXAS *et al.* (2014) descreve como nós simples como a volta do fiel permitem ligações articuladas em painéis e a formação de grandes treliças espaciais pantográficas, sem danificar os colmos e sem utilizar ligações parafusadas. Além das ligações amarradas, o estudo de ligações de bambu ainda evolui procurando ampliar as alternativas construtivas do material. ALBERMANI *et al.* (2007) propuseram juntas de PVC (Fig. 3.7) que são leves e preservam o material, com bons resultados experimentais. Os bambus são acomodados nestas juntas com megapoxy injetado nos espaços entre o bambu e a junta. Outros exemplos de avanços nessa área podem ser vistos em VILLEGAS *et al.* (2015) e AWALUDIN and ANDRIANI (2014).

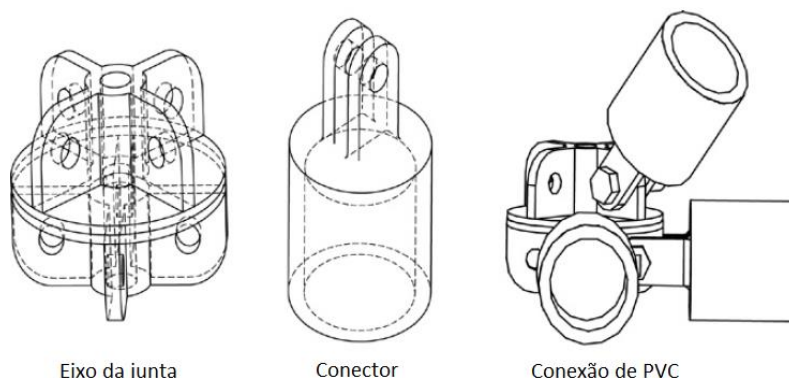


Figura 3.7. Proposta de junta de PVC para estruturas de bambu (ALBERMANI et al., 2007).

3.4. Análise Estrutural

3.4.1. Mobilidade

Uma estrutura pantográfica é um mecanismo estrutural, pois se comporta tanto como um mecanismo durante a sua fase de desdobramento, tanto como uma estrutura fixa na sua fase final (CHEN, 2003). Um sistema pantográfico durante a fase de desdobramento precisa, necessariamente, possuir mobilidade maior do que zero. A mobilidade (M) de um sistema é uma função dos graus de liberdade que ele possui (AKGÜN, 2010). Ela pode ser definida pela Eq. 3.2 (FREUDENSTEIN e ALIZADE, 1975).

$$M = \sum_{i=1}^j f_i - \lambda L + q - j_p, \quad (\text{Eq. 3.2})$$

onde:

M = Mobilidade,

$\sum_{i=1}^j f_i$ = Soma dos graus de liberdade de todas as juntas,

λ = Graus de liberdade no espaço onde o mecanismo atua,

L = Número de *loops* fechados no sistema,

q = Número de ligações restringidas,

j_p = Mobilidade passiva das juntas.

Através dessa fórmula, é possível calcular a mobilidade de diferentes sistemas, somente através da geometria e dos tipos de ligação entre os elementos. Por exemplo, uma viga treliçada pantográfica, em balanço, demonstrada na Figura 3.8. Neste caso, existem 10 juntas com 1 grau de liberdade cada, 1 junta restringida no apoio, 3 *loops* fechados e são 3 os graus de liberdades possíveis em um mecanismo bidimensional (não há mobilidade passiva). Os outros parâmetros, neste caso, estão zerados. Portanto: $M = 11 - 3 \times 3 = 2$, uma vez que o sistema pode se movimentar tanto horizontalmente quanto verticalmente.

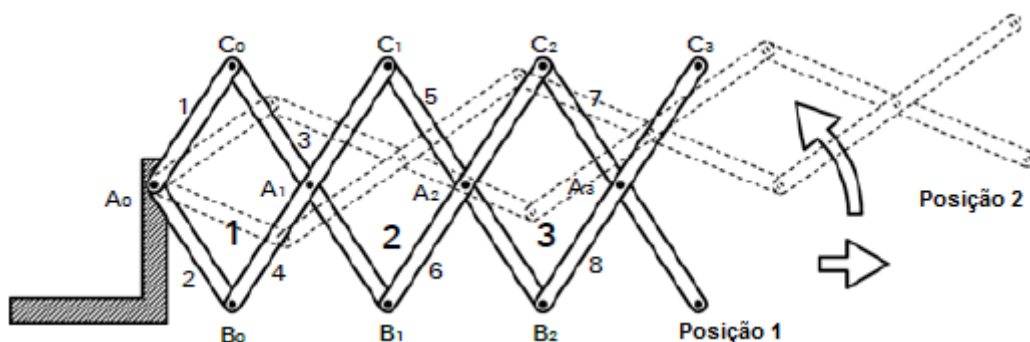


Figura 3.8. Mobilidade de uma estrutura scissor-like plana em balanço (AKGÜN, 2010).

Já ao final da fase de desdobramento, a viga composta por unidades tipo-tesoura deve ter a sua mobilidade reduzida à zero para que ela se comporte como estrutura e possa suportar carregamentos. A Figura 3.9 representa uma viga apoiada em suas extremidades, com formato arqueado, que tem 19 graus de liberdade em suas juntas, 2 restrições em seus apoios e 7 *loops* fechados independentes, sendo o sétimo *loop* o que representa o sistema global fechado. Aplicando a Eq. 3.2 a esse sistema, temos que $M = 21 - 3 \times 7 = 0$. Ou seja, é um sistema que não precisa de nenhum outro elemento para ser considerado uma estrutura rígida (AKGÜN, 2010).

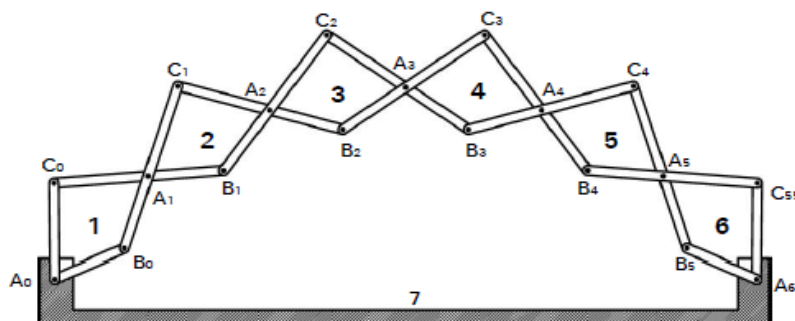


Figura 3.9. Mobilidade de uma estrutura scissor-like plana fixa nas extremidades (AKGÜN, 2010).

Como se pode ver, a análise estrutural de uma estrutura pantográfica depende da definição geométrica e da fase de desdobramento da mesma. Outros parâmetros para projetar estruturas deste tipo são estudados em MIRA *et al.* (2014), como as relações existentes entre altura, comprimento e distância entre os nós. KAVEHT and DAVARANLA (1994) formularam a matriz de rigidez de elementos tipo-tesoura (*duplets*) utilizados em estruturas pantográficas (Fig. 3.10), mostrando que o uso desses elementos reduz o número de nós da estrutura e consequentemente o número de graus de liberdade, diminuindo o esforço computacional dos modelos numéricos. Outro trabalho relevante para o

desenvolvimento de projetos de estruturas pantográficas é o de GANTES *et al.* (1994), onde modelos de unidades tipo-tesoura unidimensionais equivalentes são apresentados, com resultados interessantes.

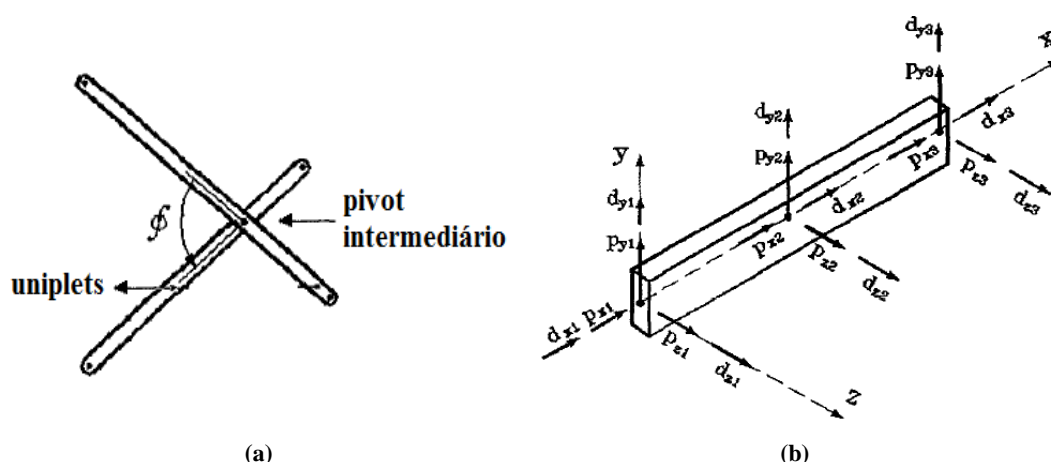


Figura 3.10. Elemento tipo tesoura: a) estrutura; b) graus de liberdade de um elemento uniplet (KAVEHT and DAVARANLA, 1994).

3.4.2. Equilíbrio de uma unidade de estrutura tipo-tesoura

Para entender a mecânica das estruturas tipo tesoura e projetar suas ligações, é necessário antes entender o seu equilíbrio. Considerando uma unidade de estrutura tipo tesoura com *pivot* centralizado, barras simétricas de tamanho L no mesmo plano e uma abertura θ , temos as seguintes relações geométricas:

$$D = L \cos \theta \quad (\text{Eq. 3.3})$$

$$H = L \sin \theta \quad (\text{Eq. 3.4})$$

onde D é a distância horizontal entre dois pontos de extremo adjacentes e H a altura do par de elementos. A Figura 3.11a demonstra o equilíbrio do conjunto da unidade considerada sobre flexão simples, onde atuam o momento M e o binário de forças verticais V . Nesse caso, o equilíbrio do conjunto é dado pela parcela dada pela Eq. 3.5:

$$\Delta M = V \times D \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Para garantir o equilíbrio estrutural, é preciso também fazer a análise das suas partes separadamente. Na Fig. 3.11b, a Barra 1 é dividida em três nós, sendo A o correspondente ao seu *pivot* superior, B o seu *pivot* central e C o seu *pivot*

inferior. Com isso, vemos que no nó A surge uma força horizontal M/H e uma vertical $V/2$. O nó C é análogo, com o acréscimo da parcela de $\Delta M/H$ na força horizontal. Para o equilíbrio do momento nos nós A e C, surge uma força horizontal no nó B equivalente a $(2M + \Delta M) / H$. A ligação central deve, portanto, ser capaz de transferir esta força, além de permitir a livre rotação. Fazendo o equilíbrio de forças verticais e horizontais no nó A (Fig. 3.11c), temos que as parcelas de cortante e força normal V_b e N_b atuando na barra, são, respectivamente, dadas pelas Eqs 3.6a, 3.6b, 3.6c e 3.6d.

$$\sum F_V = \frac{V}{2} - N_b \sin \theta - V_b \cos \theta = 0 \quad \text{Eq. 3.6a}$$

$$\sum F_H = \frac{M}{H} + N_b \cos \theta - V_b \sin \theta = 0. \quad \text{Eq. 3.7b}$$

$$N_b = \frac{V}{2} \sin \theta - \frac{M}{H} \cos \theta \quad \text{Eq. 3.8c}$$

$$V_b = \frac{V}{2} \cos \theta + \frac{M}{H} \sin \theta \quad \text{Eq. 3.9d}$$

Esse é o equilíbrio de forças no nó A admitindo que o par de elementos da unidade tipo tesoura está conectado sem que haja excentricidade na ligação dos *pivots*. No entanto, ao se acrescentar uma excentricidade e entre os eixos dos elementos, um pino fazendo essa ligação e ainda permitindo a rotação desimpedida, deve-se considerar o acréscimo de outros esforços de momento no plano, fora do plano e de torção nas barras, como pode ser visto na Fig. 3.11d, representando o nó A. A resultante destas solicitações devem ser levadas em conta para o dimensionamento das ligações e das barras para estruturas deste tipo submetidas à flexão simples.

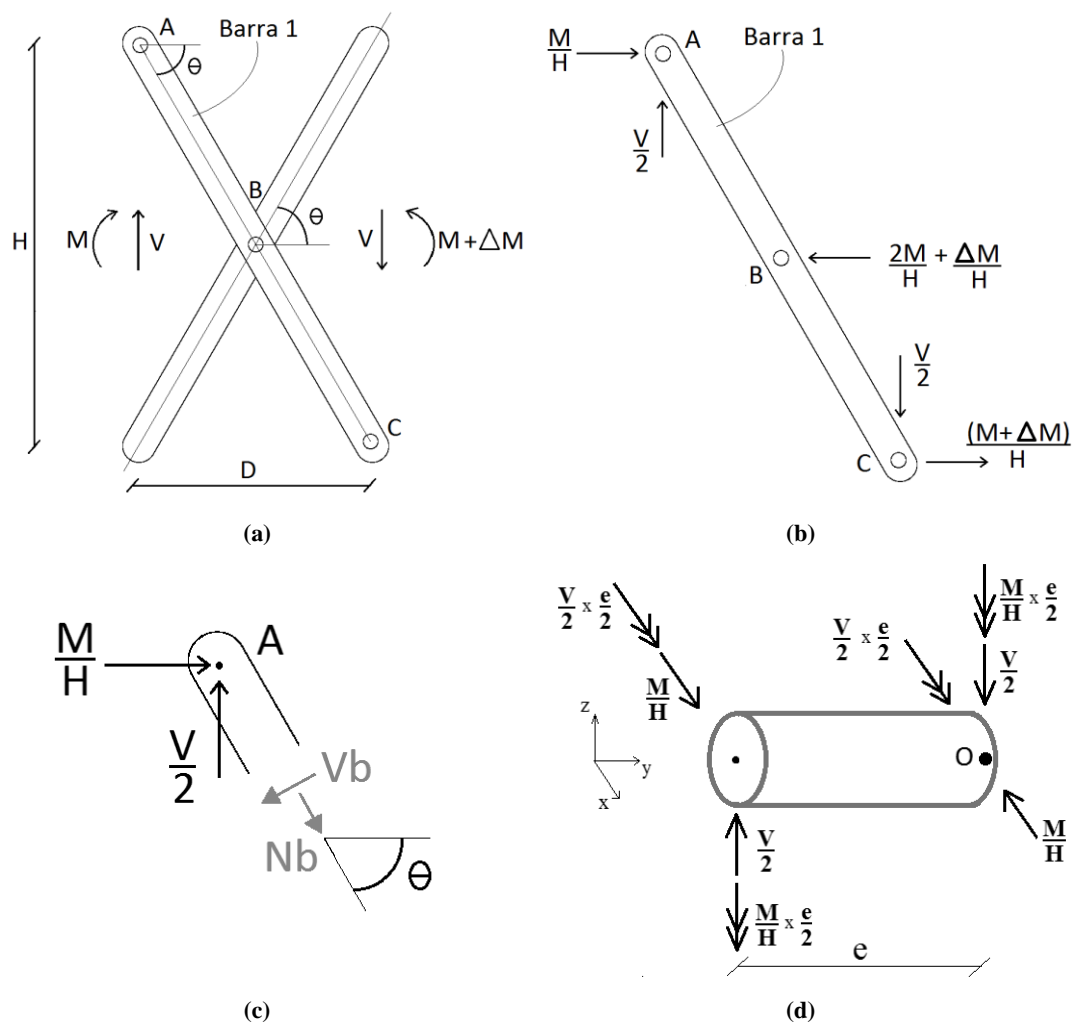


Figura 3.11. Equilíbrio de unidade de estrutura tipo tesoura: a) equilíbrio do conjunto; b) equilíbrio de uma das barras; c) equilíbrio do nó A; d) equilíbrio da ligação de pino com excentricidade.

4. Programa Experimental

4.1. Generalidades

A fim de evitar o efeito das variáveis presentes no material e padronizar o máximo possível os resultados, foram escolhidas amostras provindas de locais onde existem boas informações disponíveis sobre todo seu processo de plantação e obtenção. Os exemplares para os ensaios mecânicos descritos nas seções 4.3 até 4.6 foram recolhidos do bambuzal de *Guadua Angustifolia* presente em um terreno de extensão da PUC-Rio no município de Vargem Grande, Rio de Janeiro, localizado nas coordenadas 22°59'24.4"S de latitude e 43°29'38.5"W de longitude. O local fica aproximadamente ao nível do mar. Os bambus para estes ensaios fossem recolhidos em março, quando os níveis pluviométricos do Rio de Janeiro estão mais altos, aumentando o teor de umidade inicial após o corte.

Para os ensaios descritos na seção 4.7, referente aos ensaios para a determinação do coeficiente de atrito, os colmos foram extraídos do espaço Graziela Maciel Barroso, do departamento de Biologia da PUC-Rio, nas coordenadas 22°58'49.1"S e 43°14'26.9"W, a 91 metros de altura em relação ao nível do mar. Neste caso, os bambus foram extraídos em agosto, mês mais seco e, portanto, mais adequado para a coleta. A densidade final foi medida em todas as amostras e pode ser arredondada para o valor médio de 0.7 g/cm³.

Todos os espécimes foram cortados e preparados seguindo as recomendações gerais e secados em local protegido, ao ar livre, durante o período mínimo de quatro semanas, no Laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (LEM/DEC), no campus Gávea da PUC-Rio. Após este período, os espécimes foram tratados. O tratamento adotado para a preservação das amostras foi de imersão em uma solução de bórax e ácido bórico (Fig. 4.1) durante 10 dias, seguidos de mais um período de 4 semanas de seca em ambientes internos. A solução utilizada para os ensaios foi feita na concentração de 1:1 recomendada na literatura (KUMAR *et al.*, 1994):

1 kg de Borato de Sódio : 1 kg de Ácido Bórico : 50 litros de água.



Figura 4.1. Amostras para ensaios submersas em solução de ácido bórico e bórax.

Em cada etapa relevante, as amostras tiveram seus teores de umidade aferidos. A sensibilidade das propriedades mecânicas do bambu ao teor de umidade (*moisture content, M.C.*) abaixo do ponto de saturação das fibras afeta a padronização dos resultados e dificulta a comparação entre diferentes grupos. A Norma Chinesa JG/T 199-2007 contém fatores de ajuste, traduzidos para o inglês por Kent Harries, utilizados para normalizar os resultados dos ensaios de acordo com o valor referencial de 12% de teor de umidade (w) e foi utilizada nesse trabalho, quando necessário. As expressões para os diversos fatores de correção K a serem multiplicados pela resistência e módulo de elasticidade na direção paralela às fibras são apresentadas na Tabela 4.1. Os gráficos apresentados neste capítulo foram todos multiplicados por esses fatores, para que a comparação entre os grupos e as amostras não fosse influenciada pelos diferentes valores dos teores de umidade. Os gráficos originais são apresentados no Apêndice B.

Tabela 4.1. Fatores de correção aplicados para diferentes teores de umidade em pequenas amostras (JG/T 199-2007).

Resistência à compressão paralela às fibras, f_c	$K_{fc} = (0.79 + 1.5e^{-0.16w})^{-1}$	$5\% < w < 30\%$
Rigidez à compressão paralela às fibras, E_c	$K_{Ec} = (0.89 + 0.36e^{-0.10w})^{-1}$	$5\% < w < 30\%$
Resistência à flexão paralela às fibras, f_m	$K_{fm} = (0.971 + 0.317e^{-0.20w})^{-1}$	$5\% < w < 20\%$
Rigidez à flexão paralela às fibras, E_f	$K_{Em} = (0.91 + 0.3e^{-0.10w})^{-1}$	$5\% < w < 30\%$

4.2. Avaliação da influência de imersão e secagem do material

Para cada ensaio foram retiradas 18 amostras, igualmente divididas entre as regiões de base, meio e topo. Para se testar os efeitos da chuva em relação à durabilidade e ao desempenho do bambu exposto, em todos os ensaios metade das amostras foram submetidas a ciclos de imersão e seca. Durante 24 horas estas amostras foram imersas em água e posteriormente colocadas em uma estufa com temperatura de 37°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) por 24 horas. Este ciclo completo foi repetido quatro vezes. Após os ciclos, algumas semanas se passaram antes dos ensaios, para que os exemplares tivessem o teor de umidade estabilizado naturalmente. O restante das amostras foi mantido em condições normais, para controle. A tabela 4.2 a seguir relaciona as quantidades e perfil das amostras para cada ensaio. Esta divisão foi realizada em todos os ensaios deste trabalho.

Tabela 4.2. Grupos de amostras em relação à posição no colmo e processo de preparo.

Base	Meio	Topo
3 amostras controle (CB1, CB2, CB3)	3 amostras controle (CM1, CM2, CM3)	3 amostras controle (CT1, CT2, CT3)
3 amostras durabilidade (DB1, DB2, DB3)	3 amostras durabilidade (DM1, DM2, DM3)	3 amostras durabilidade (DT1, DT2, DT3)

Todos os dados de variação de peso de cada amostra e em cada fase do ciclo e suas respectivas fotos foram conferidos e podem ser verificados no Apêndice B. Amostras submetidas ao ciclo de imersão em água e seca mostraram um crescimento contínuo de fungos. As amostras foram limpas constantemente, porém não foi possível quantificar o quanto a presença desses fungos afetou o desempenho das amostras nos ensaios, nem identificar quais as espécies dos fungos, embora seja plausível afirmar que havia mais de uma, devido à coloração difusa (branca e marrom). As amostras mantidas em condições protegidas não demonstraram crescimento de fungos esbranquiçados, apenas leves manchas amarronzadas em algumas amostras. Como antecipado, esses resultados sugerem que o tratamento com a solução de Bórax e Ácido Bórico não é permanente quando expostos a processos de lixiviação.

4.2.1. Variação percentual do peso devido a ciclos de imersão e seca em diferentes temperaturas

Paralelamente às amostras designadas aos ensaios mecânicos, foi feito um estudo com outras amostras para se analisar a capacidade de absorção e perda de água em ciclos de imersão e seca. As amostras foram retiradas dos entrenós e totalmente submersas em água durante 24 horas seguidas por 24 horas de secagem em uma estufa. Nesse caso, a análise foi feita para diferentes temperaturas. Na Figura 4.2 é possível verificar a variação percentual do peso das amostras em duas situações de temperatura de estufa (45°C até o 14º dia e 35°C em diante), onde os dias ímpares representam os eventos de imersão e os pares de seca. Todos os dados podem ser conferidos no Apêndice B.

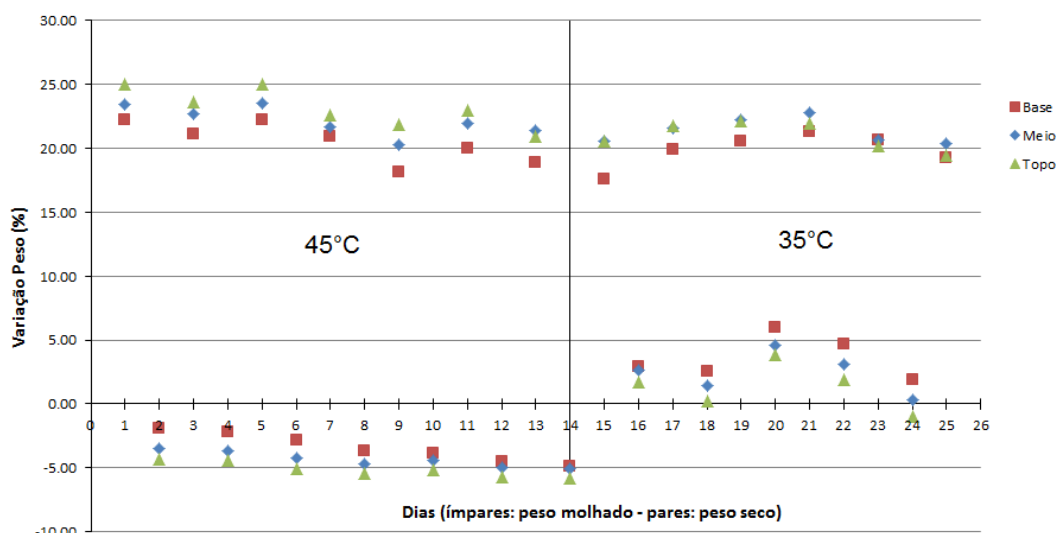


Figura 4.2. Variação percentual do peso em relação ao inicial ao longo de ciclos de imersão e seca.

Para analisar os gráficos, é preciso ressaltar que a espessura das amostras decresce ao longo do colmo, tendo maior volume na base. Essa característica faz com que a relação da área de superfície pelo volume (área superficial específica) seja maior quanto mais distante a amostra for da base, justificando o fato das amostras provindas da região do topo apresentarem maior variação de peso tanto para a absorção quanto para a perda de água. Como esperado, o material é bastante suscetível às condições externas. Deve ser feita a ressalva que a estrutura do bambu de colmo inteiro tem uma camada cutânea encerada que protege e

minimiza a absorção de água da chuva, caso o material esteja intacto e, neste experimento, as amostras estavam completamente submersas.

É possível analisar que a imersão prolongada chegou a aumentar 20% do peso da amostra. Essa variação considerável no peso próprio era esperada e deve ser considerada para o cálculo estrutural dos esforços do bambu exposto. É possível também notar que o material é bastante sensível à temperatura do ambiente, apresentando resultados distintos para 45°C, 40°C e 35°C. Após absorver a água partir de 40°C, o peso próprio do bambu tende a diminuir enquanto em temperaturas menores do que 40°C o peso próprio tende a se estabilizar. Esses resultados podem diferir de acordo com a origem da espécie estudada.

4.3. Ensaios de Compressão no Colmo na Direção Paralela às fibras

Na lista a seguir, constam algumas das recomendações da norma ISO 22517-1 (2004b) para os ensaios de compressão de toda a seção transversal do colmo inteiro:

- As amostras não devem possuir nó.
- Comprimento da amostra deve ser igual ao diâmetro externo do colmo.
- Controle por deslocamento (diferentemente da NT Colombiana).
- Velocidade recomendada: 0,01mm/s (0,6mm/min).
- Tolerância de velocidade: 20%
- Pré-carregamento de contato: 1 kN.

Apesar de a norma especificar o uso de amostras sem nó, optou-se por ensaiar amostras contendo nó na meia altura. A justificativa encontra-se no fato de que praticamente todas as estruturas de bambu possuem seus elementos estruturais com vários nós e já é sabido que isso afeta diretamente o seu desempenho. É interessante, portanto, verificar a resistência nas condições reais de aplicação do bambu. Para o pré-carregamento, escolheu-se usar a recomendação de JARAMILLO *et al.* (2016), que demonstra que entre 1 kN e 5 kN o comportamento apresenta irregularidades devido à acomodações, com tendência a

estabilização após uma força de 5 kN. Esse comportamento foi confirmado nos ensaios realizados e o valor de 5 kN foi adotado para os gráficos apresentados.

Em relação aos demais aspectos de execução, os ensaios seguiram as recomendações da ISO 22517 (2004b). Para minimizar qualquer irregularidade, as superfícies de topo e base foram regularizadas com uso de uma camada de resina plástica de alto desempenho, quando necessário. O ensaio foi realizado com controle de deslocamento a uma velocidade de 0.6 mm/min até a ruptura e o equipamento utilizado em todos os ensaios foi a máquina MTS modelo 311, com capacidade de carga de 1000 kN. Nela, foi usada uma rótula para melhor distribuição do carregamento durante o ensaio (Fig. 4.3).

Para aferição dos dados de deformação, dois extensômetros elétricos de resistência (*strain gages*, marca EXCEL, tipo PA-06-250BA-120-L) foram posicionados em lados opostos do colmo, com certa distância do nó para evitar distorções localizadas. O encurtamento axial foi medido através do transdutor interno da máquina. A detecção de ruptura mínima foi escolhida como equivalente a queda de 40% da tensão máxima atingida. Para a determinação da tensão, a área do colmo é definida através da Eq. 4.1.

$$A_{colmo} = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2t)^2] , \quad (\text{Eq. 4.1})$$

onde D e t representam respectivamente as médias do diâmetro externo e da espessura, medidos em quatro diferentes pontos nas amostras. Antes dos ensaios, todas as amostras foram medidas, conforme reportado na Tabela 4.3. As medidas representam a média de leituras tomadas em quatro diferentes posições do colmo.



Figura 4.3. Set-up do ensaio a compressão do colmo inteiro com nó.

A falha por esmagamento das fibras da extremidade é a mais recorrente no caso de ensaios a compressão com o colmo inteiro (JARAMILLO *et al.* 2016). Para que a ruptura ocorresse no nó, cordões de fibra de carbono foram posicionados ao redor dos perímetros de extremidade (Fig. 4.4) e fixados com uma resina epóxi (Sicadur 32). No anel interior, o vazio foi preenchido com uma mistura de cerca de dois centímetros de espessura de massa de reparo à base de epóxi (marca Iberê, comumente chamado de plastique) e areia. Para a aferição do teor de umidade, as amostras foram pesadas logo após cada ensaio. A evolução do teor de umidade ao longo do processo de imersão e seca pode ser conferida na Figura 4.5 e sua influência será discutida adiante.



Figura 4.4. Detalhe do posicionamento das fibras de carbono e do disco de plastique interno.

Tabela 4.3. Dados médios de dimensão das amostras, em mm e mm².

Controle					
Amostras	Diâmetro Externo	Diâmetro Interno	Espessura	Comprimento	Área
CB1	100.5	73.8	13.4	116.3	1971
CB2	103.8	72	15.9	118.3	2389
CB3	103.3	77.5	12.9	112.3	1958
CM1	92.3	75.3	8.5	120.3	1175
CM2	99.5	76.3	11.6	119.5	1711
CM3	96	76	10	119.5	1429
CT1	69.5	54.3	7.6	117.5	787
CT2	85.3	68	8.6	121	1097
CT3	82.3	65.3	8.3	119	1012
Durabilidade					
DB1	100	59.8	20.1	119.8	2843
DB2	104.5	73.8	15.4	116.3	2338
DB3	104	74.3	14.9	122.3	2256
DM1	93.5	73.5	10	119.3	1390
DM2	92.8	72.5	10.1	120.5	1395
DM3	91.5	71.8	9.9	121.3	1343
DT1	85.3	69.8	7.9	120.3	991
DT2	80.8	63.3	8.5	119.5	1021
DT3	85.8	68.3	8.8	120.5	1118

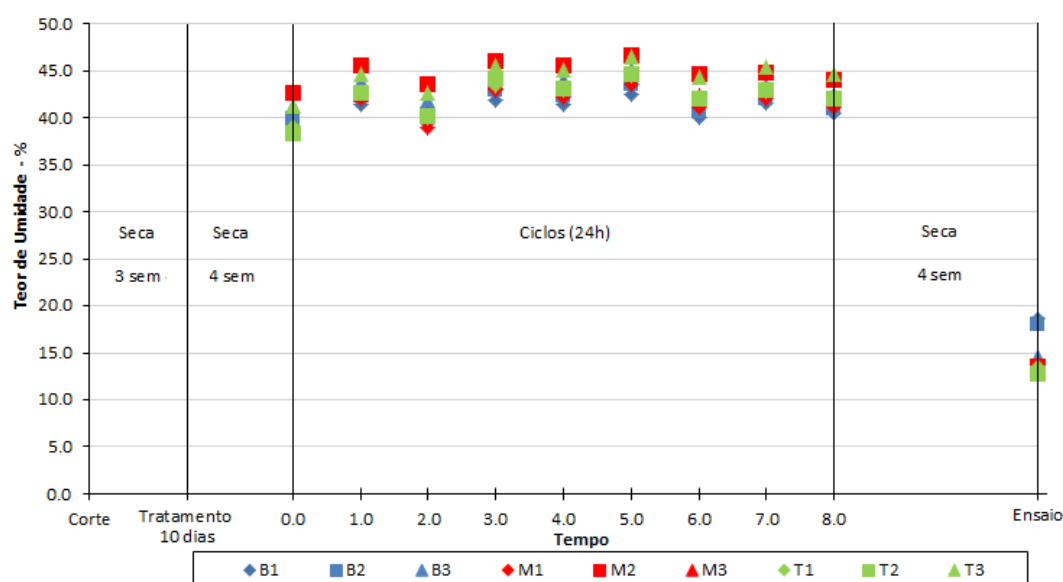


Figura 4.5. Histórico do teor de umidade das amostras de compressão, do corte ao ensaio.

A Tabela 4.4 resume os resultados para os ensaios de compressão das amostras de base (B), meio (M) e topo (T) para os grupos de controle (C) e durabilidade (D). São comparados os valores individuais e médios dos grupos

para os módulos de elasticidade E (sendo E_{TRANS} os módulos obtidos através dos transdutores e E_{SG} os módulos obtidos com os extensômetros), resistência σ_u e os respectivos desvios-padrão e coeficientes variacionais. Os dados coletados dos extensômetros produziram curvas de tensão x deformação com níveis de rigidez muito superiores das esperadas, conforme se verifica na Tab. 4.4. Isso se deve ao fato de que as placas de extremidade agem como reforço lateral e o atrito entre as placas e as amostras gera um efeito de abaulamento no centro do corpo de prova, gerando um alívio da compressão junto à face externa do bambu, o que resulta numa superestimação na rigidez local do material (VILLALOBOS, 1993). Já o transdutor interno costuma medir valores superiores de deslocamento devido às folgas no sistema, resultando em dados de rigidez menores do que os reais. Por conta disso, para gerar os gráficos da Fig. 4.9, foi considerada apenas a deformação retirada pela razão entre o deslocamento obtido com o transdutor interno e a altura total de cada amostra. Os gráficos comparativos com os dados dos strain gages podem ser conferidos no Apêndice C.

No início das curvas apresentadas nos gráficos da Figura 4.7, todas as amostras do grupo de durabilidade demonstraram um padrão de prolongamento da fase de ajuste inicial de ensaio. Este efeito pode estar associado a danos localizados nos extremos causados pelos ciclos, porém, até onde vai o conhecimento do autor, esse comportamento não foi estudado anteriormente e não foi encontrada uma explicação definitiva para o mesmo. Apesar dos cuidados no preparo das amostras, o uso do colmo inteiro implica em uma inerente gama de incertas e variáveis, já que cada exemplar tem sua própria geometria e podem existir falhas pré-existentes, visíveis ou não, que modificam o resultado final.

Em relação ao módulo de elasticidade e a tensão máxima resistida pelas amostras dos dois grupos, é possível observar que houve pouca ou quase nenhuma variação. Como pode ser observado na Figura 4.5, os ciclos de imersão e seca não afetaram muito a variação do teor de umidade. O teor de umidade no ponto de saturação das fibras de bambu gira em torno de 30% e é possível notar que no início dos ciclos as amostras estavam com seus teores acima deste valor. Este resultado indica que o material, quando exposto a estes ciclos com seus valores de teor de umidade acima do ponto de saturação, não sofre alterações relevantes em termos de resistência e rigidez. Para confirmar este padrão de comportamento e de

quanto o processo afetaria o desempenho de ensaios com o colmo, mais testes com amostras com diferentes níveis iniciais de teor de umidade são necessários.

Tabela 4.4. Resultado dos ensaios de compressão.

	CB1	CB2	CB3	CM1	CM2	CM3	CT1	CT2	CT3	Total
σ_u (MPa)	81,6	78,5	88,4	122,5	108,7	119,3	100,8	118,6	123	-
E_{TRANS} (GPa)	7,48	6,89	5,31	9,93	10,50	13,01	6,78	8,43	13,16	-
$E_{S. G.}$ (GPa)	55,7	102,7	192,7	843	404	162,2	355	117,5	350	-
MC (%)	11,5	9,9	13,3	13,7	14,5	13,9	11,6	11,5	11,5	-
K	0,97	0,91	1,03	1,05	1,07	1,05	0,98	0,97	0,97	-
σ_u (MPa)	82,8			116,8			114,1			105
DP	5,06			7,22			11,75			8,01
CV	0,06			0,06			0,1			0,08
$E_{T. Méd.}$ (MPa)	6559			11129			9456			9048
DP	1125			1646			3309			2026
CV	0,17			0,15			0,35			0,2
	DB1	DB2	DB3	DM1	DM2	DM3	DT1	DT2	DT3	Total
σ_u (MPa)	93,3	92,3	87,6	112,3	113,7	123,1	105	101,7	103,7	-
E_{TRANS} (GPa)	8,68	4,3	8143	8,51	12,04	12,0	7,38	7,78	9,47	-
$E_{ST. G.}$ (GPa)	111,6	199,9	60,2	78,6	42,3	81,6	999,3	56,3	77,8	-
MC (%)	18,6	17,9	14,6	12,6	13,6	13,1	13,5	12,8	13,5	-
k	1,15	1,14	1,07	1,01	1,04	1,03	1,04	1,02	1,04	-
$\sigma_{méd}$ (MPa)	91,1			116,4			103,5			104
DP	3,04			5,87			1,66			3,05
CV	0,03			0,05			0,02			0,03
$E_{T. Méd.}$ (MPa)	7041			10845			8212			8699
DP	2387			2027			1107			1840
CV	0,34			0,19			0,13			0,2

Quanto ao uso de fibra de carbono e resina plástica para confinar as extremidades das fibras, os resultados foram muito eficazes para prevenir a ruptura nas extremidades. Enquanto os ensaios de JARAMILLO *et al.* (2016), sem nenhum confinamento, obtiveram 47% de ruptura por esse motivo em amostras sem nó, apenas uma das dezoito amostras (5,5%) exibiu o efeito de “vassoura” nas fibras (*brooming failure*). Vale ressaltar que, neste caso específico, notou-se, posteriormente ao ensaio, que as tiras de fibras de carbono não foram posicionadas corretamente nesta amostra. Todas as outras amostras apresentaram falha na região do nó, com aparecimento de fissuras longitudinais (Fig. 4.6). Apesar de bem sucedido, esse procedimento aumenta o custo e diminui consideravelmente a praticidade dos ensaios de colmo inteiro.

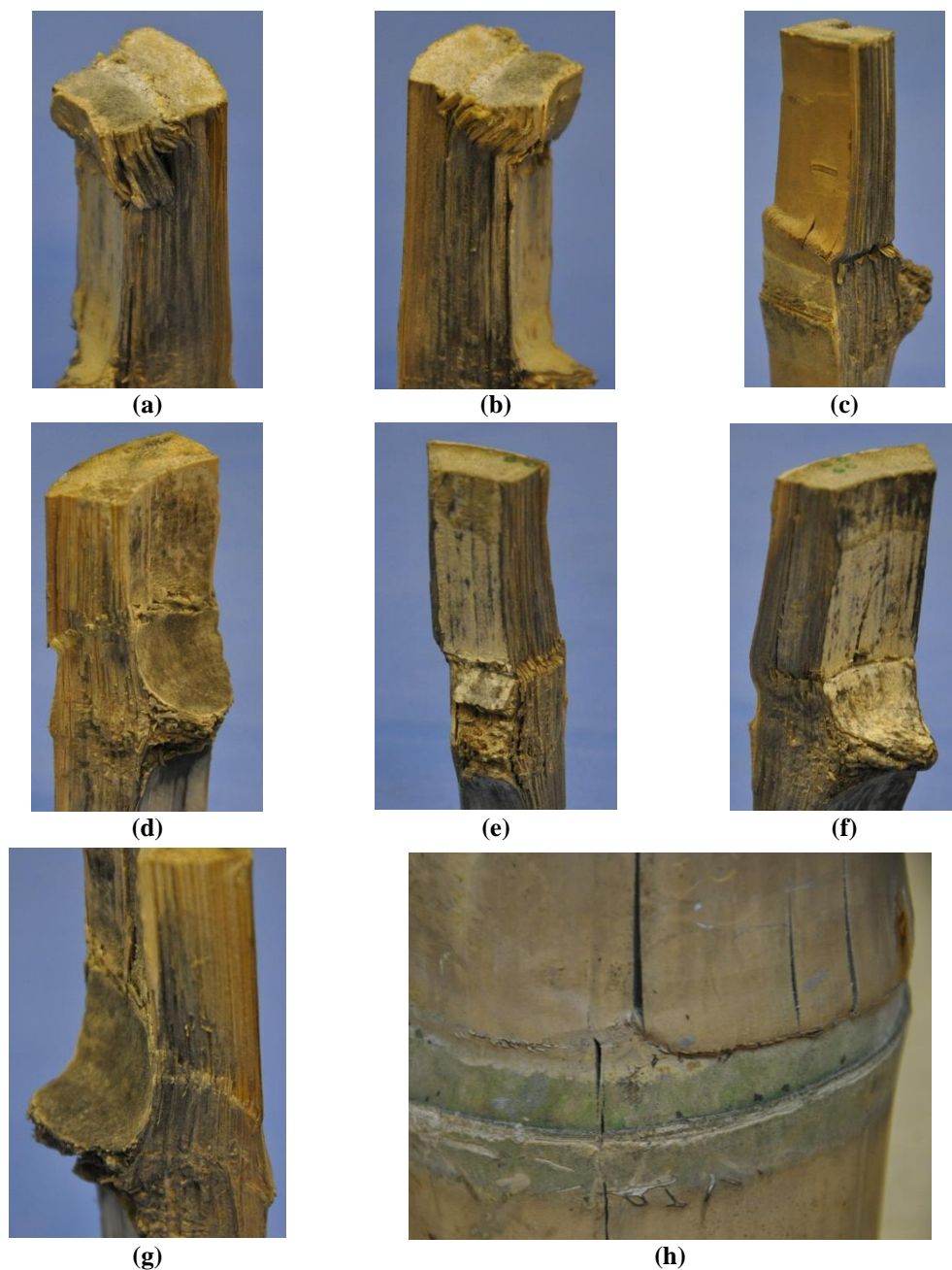


Figura 4.6. Amostras rompidas: a) e b) esmagamento de fibras na extremidade; c) a g) detalhes de falhas na região nodal; h) aparecimento de algumas fissuras longitudinais, apesar do modo de falha, predominante, ser nodal.

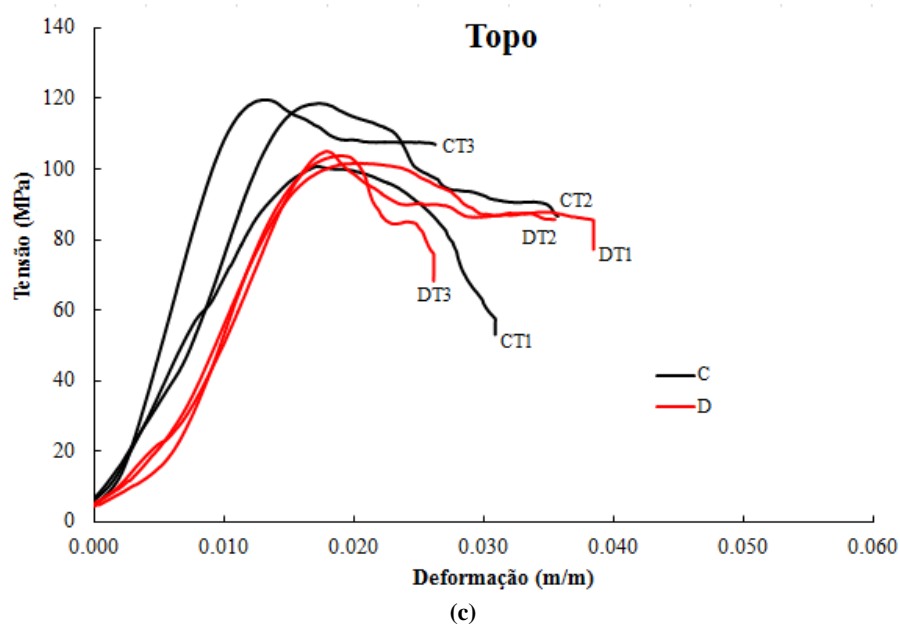
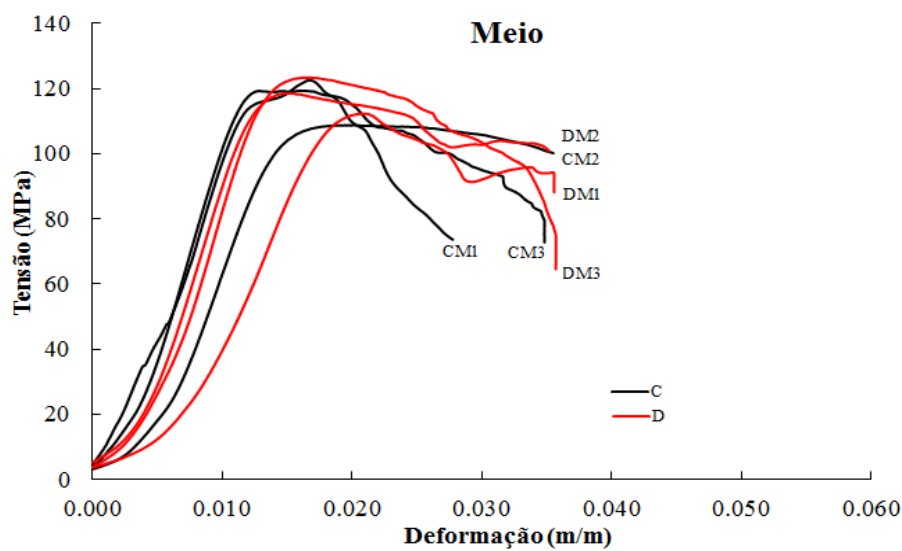
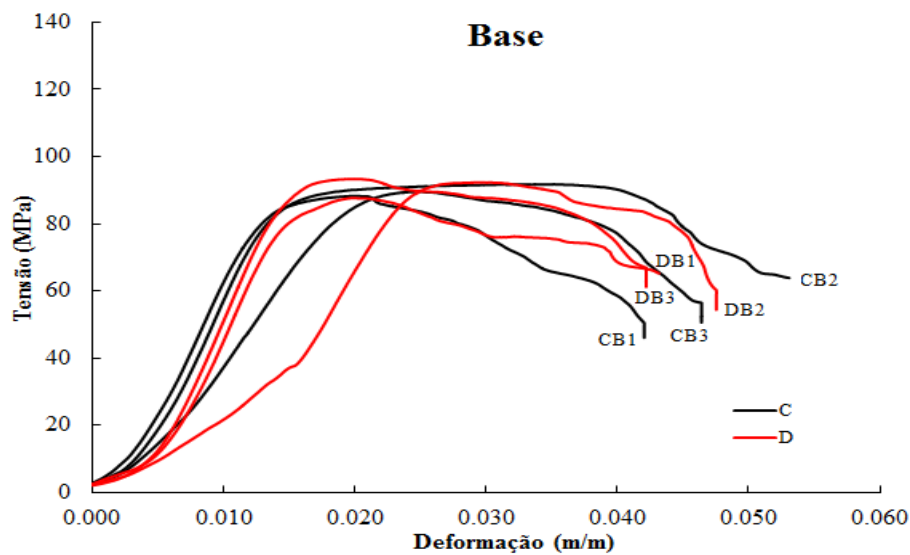


Figura 4.7. Tensão x deformação dos ensaios de compressão de colmo inteiro: a) base; b) meio; c) topo.

Os resultados estão dentro do esperado para compressão com o colmo inteiro com a presença de um nó. Devido às dificuldades de se registrar perfeitamente a evolução das deformações no bambu, como já dito anteriormente, os valores dos módulos de elasticidade encontrados a partir do transdutor interno da máquina são possivelmente menores do que os reais. Foi possível confirmar que a tendência de conicidade do colmo gera amostras de meio e topo com maior densidade e maior volume de fibras do que as amostras de base e que, conseqüentemente, possuem valores maiores de resistência e rigidez. Os valores encontrados para resistência foram consideravelmente superiores aos encontrados por GHAVAMI (2004), possivelmente devido ao procedimento de confinamento das amostras.

4.4. Compressão utilizando o método CLC (*Combined loading compression*).

Embora importantes, as conclusões retiradas dos ensaios realizados de compressão paralela às fibras com o colmo inteiro são limitadas pelas variáveis inerentes dos defeitos intrínsecos do material no estado natural, que são difíceis de mensurar. Uma forma de diminuir essa variabilidade é usar amostras mais padronizadas e homogêneas. Para isso, foram extraídas amostras retangulares de mesmo comprimento e formato dos entrenós do colmo de bambu. Essas amostras foram, então, ensaiadas segundo o método de teste de compressão com carregamento combinado (CLC, *combined loading compression*), comumente utilizado para caracterização à compressão de polímeros reforçados com fibra (PRF).

Com este método, ensaios de compressão podem ser feitos em pequenas amostras esbeltas sem que ocorra flambagem devido a excentricidades ou modos de falha localizados nas extremidades devido à concentração de esforços (CARLSSON *et al.*, 2014). A combinação dos carregamentos nas pontas e de cisalhamento associado a um determinado torque aplicado nos parafusos das placas de aço do aparato permite ensaios de compressão mais precisos (CARLSSON *et al.*, 2014). O aparato utilizado para este ensaio e suas respectivas dimensões pode ser visto na Figura 4.8. As dimensões das amostras tanto dos grupos de controle e durabilidade foram adaptadas às dimensões do aparato e

podem ser conferidas na Tabela 4.7. Placas de alumínio foram posicionadas para aumentar a seção nas extremidades e uniformizar possíveis irregularidades nas faces das amostras (Fig. 4.9).

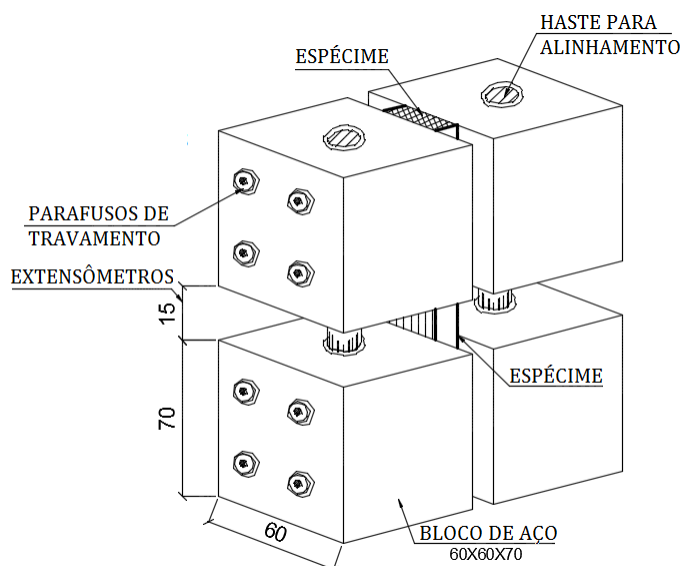


Figura 4.8. Aparato utilizado no ensaio de CLC com dimensões em mm (CINTRA, 2017).

O ensaio foi conduzido em máquina de teste universal MTS, modelo 810, de capacidade de carga de 500 kN, com uma taxa de deslocamento aplicada de 0,3 mm/min, metade da velocidade do ensaio padrão para compressão no bambu. As deformações foram medidas por meio de dois extensômetros elétricos de resistência (marca EXCEL, tipo PA-06-250BA-120-L), posicionados no centro das amostras, em lados opostos. Na orientação das amostras, optou-se por colocar as placas de reforço de alumínio e os extensômetros nas regiões correspondentes às faces externas e internas do colmo.

Uma das dificuldades encontradas nos ensaios foi a aplicação do torque necessário para obter a proporção adequada de compressão por cisalhamento sem danificar a amostra. A face interna do colmo do bambu possui consideravelmente menos fibra do que a face externa, sendo constituída majoritariamente pela matriz de lignina, que possui baixa resistência mecânica. O torque a ser aplicado deve ser menor do que 5 N.m e foi feito manualmente, de modo a não danificar a amostra. Após alguns testes, outra placa de alumínio de menor dimensão foi posicionada por cima, para melhor distribuição do torque e evitar a concentração de esforços (Fig. 4.9). A falha esperada dessa forma ocorre na faixa central nos limites dos extensômetros (Fig. 4.10).

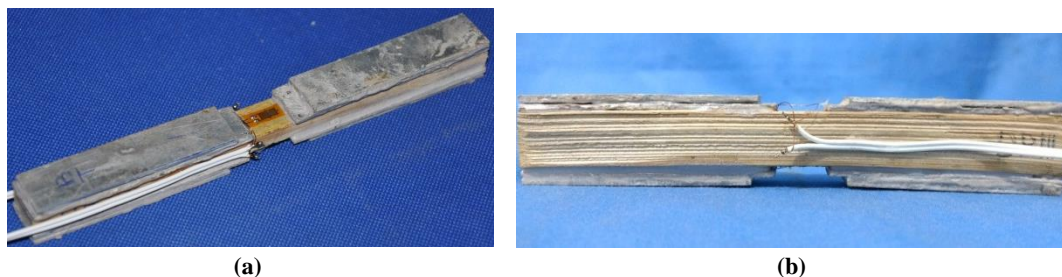


Figura 4.9. Amostras CLC. a) Vista tridimensional; b) vista lateral.

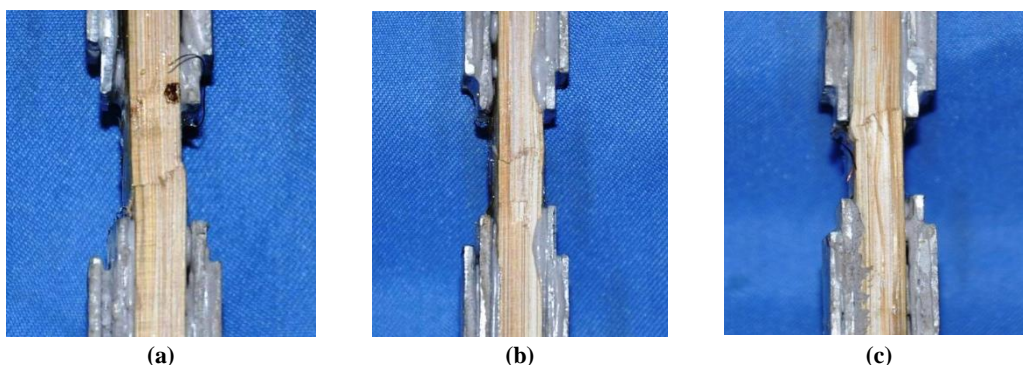


Figura 4.10. Modo de ruptura mostras CLC.

Para este ensaio, o gráfico de tensão por deformação foi obtido de três maneiras para a maior parte das amostras. Uma delas foi utilizando a média das deformações dos extensômetros. No entanto, analisando as amostras após o ensaio, o efeito de abaulamento também parece acontecer nesse tipo de ensaio. Nesse caso, a fim de evitar possíveis distorções nos dados dos extensômetros, também foram utilizados dois transdutores de deslocamento medindo o deslocamento relativo na parte central (Fig. 4.12). A média entre estes deslocamentos foi dividida pelo comprimento de cada amostra para obtenção da deformação. Por fim, para efeito de comparação, utilizou-se o transdutor interno da máquina para obter-se outra medida de deformação. A partir dos gráficos, com a inclinação da fase linear elástica e considerando o intervalo de deformações entre 20-80% da tensão máxima inicial obtida, foi possível obter os valores dos módulos de elasticidade. Os gráficos de cada exemplar com os três resultados estão no Apêndice C.

Antes dos ensaios, metade das amostras foi submetida a ciclos de molhagem e secagem semelhantes aos realizados nos ensaios de compressão com o colmo inteiro. A evolução do teor de umidade nestes ciclos e no momento do ensaio é apresentada na Fig. 4.11. Em relação às amostras de compressão de colmo inteiro, o teor de umidade das amostras do CLC antes do início dos ciclos era menor, entre 30 e 40%. Tanto a absorção de água na imersão quanto a perda de água na

secagem foram maiores do que com o colmo, o que pode ser explicado pela maior área superficial específica das hastes retiradas dos entrenós. Foi possível também notar uma perda na capacidade de absorção e uma tendência de diminuição do peso seco.

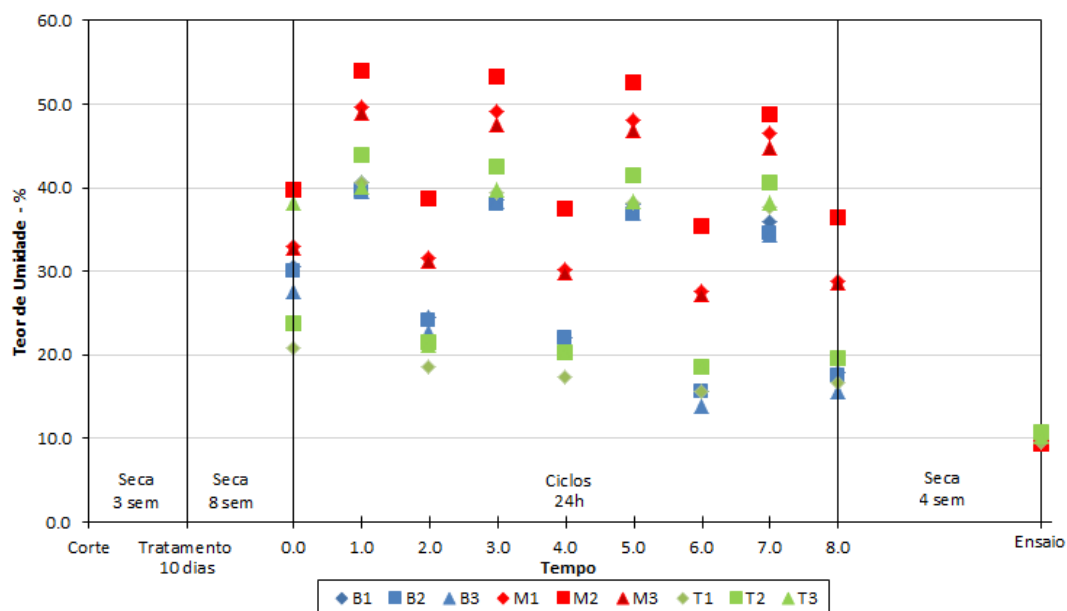


Figura 4.11. Histórico do teor de umidade das amostras de CLC, do corte ao ensaio.

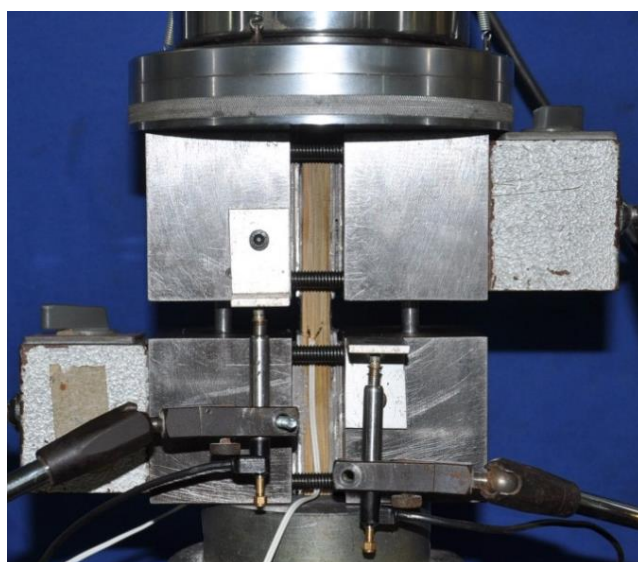
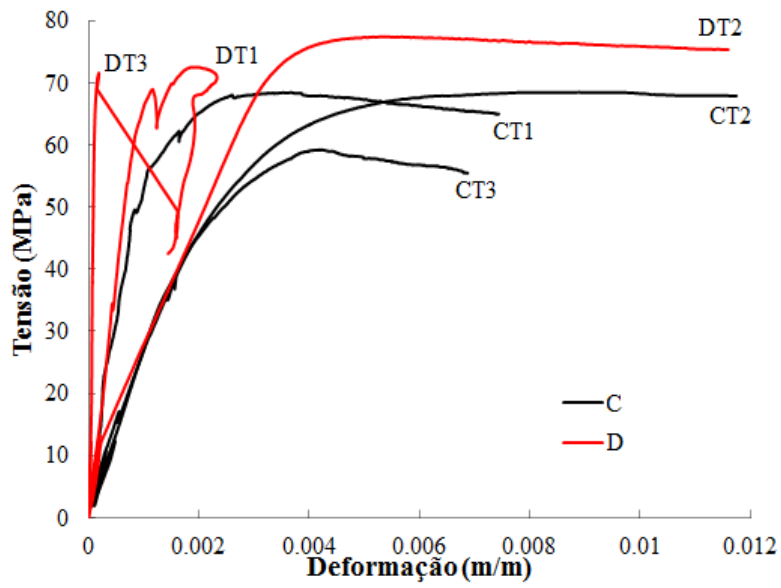
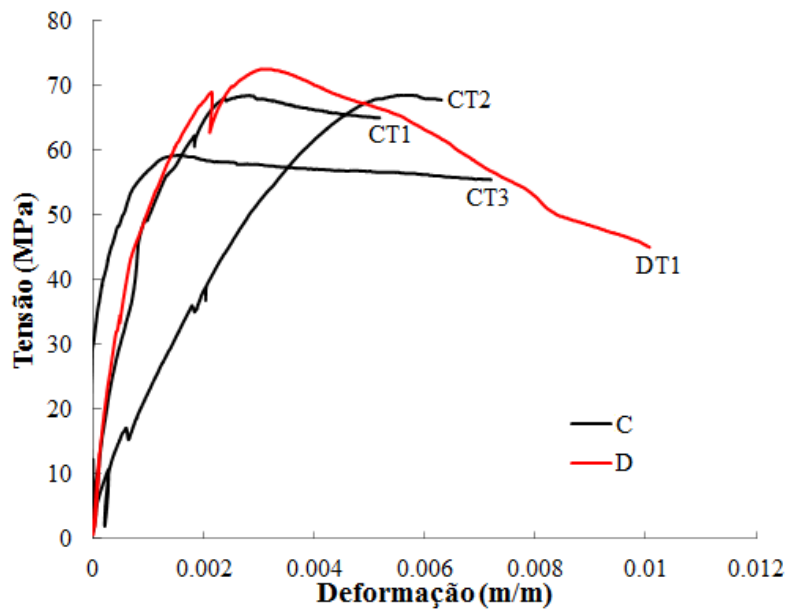


Figura 4.12. Set-up do ensaio de CLC com haste de bambu e transdutores posicionados.

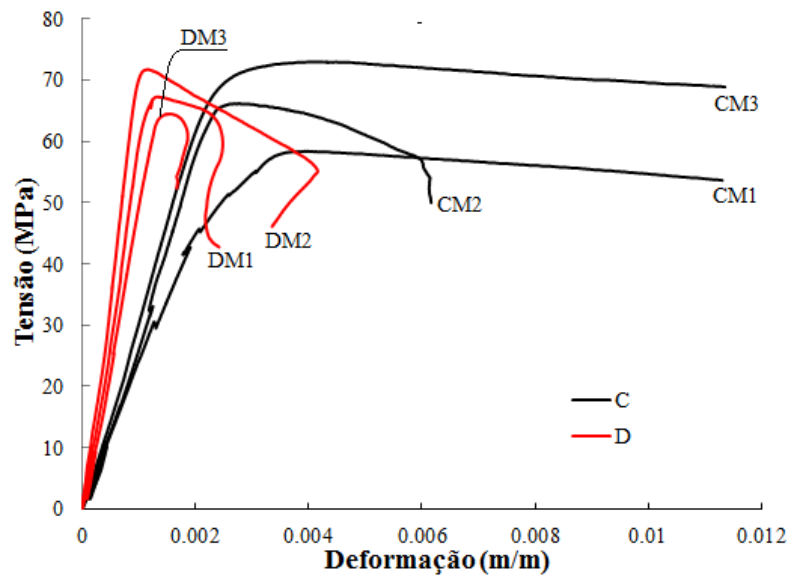


(a)

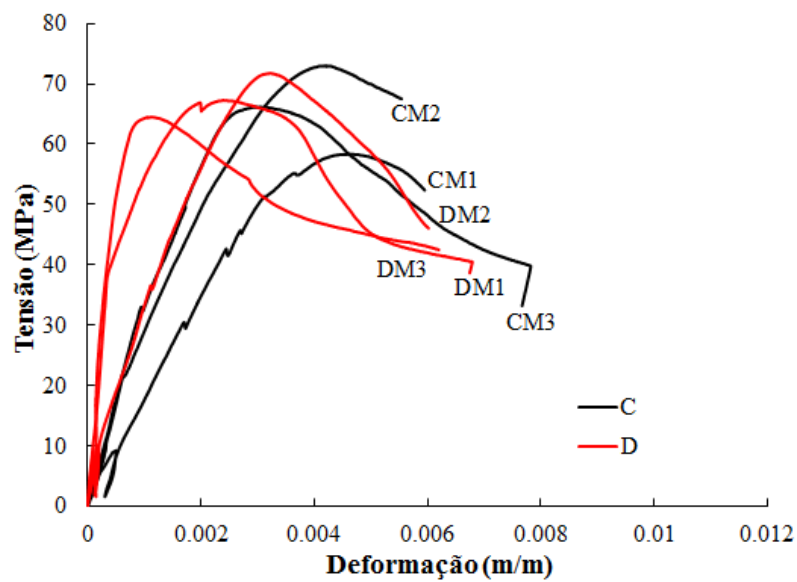


(b)

Figura 4.13. Topo. a) Resultados strain gage; b) resultados LVDTs.

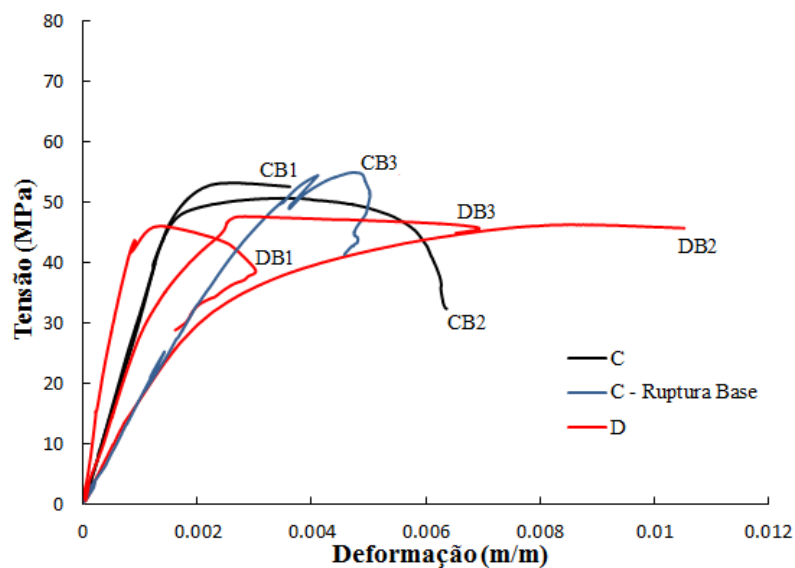


(a)

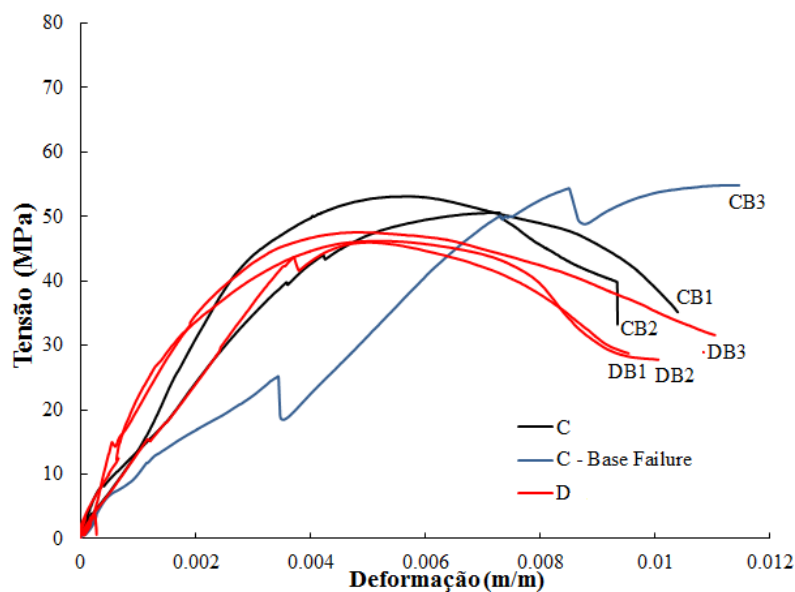


(b)

Figura 4.14. Meio. a) Resultados strain gage; b) resultados LVDTs.



(a)



(b)

Figura 4.15. Curvas Tensão x Deformação Base. a) Resultados strain gage; b) resultados LVDTs.

Tabela 4.5. Resultados médios encontrados para E no ensaio CLC.

Strain Gage	E (GPa)	DP	CV
Topo			
Controle	43,9	24,18	0,55
Durabilidade	48,1	39,66	0,82
Meio			
Controle	28,3	6,25	0,22
Durabilidade	65,6	11,80	0,18
Base			
Controle ²	31,8	0,40	0,01
Durabilidade	28,8	19,01	0,66

LVDTs	E (GPa)	DP	CV
Topo			
Controle	24,8	12,40	0,50
Durabilidade	35,2	NA ¹	NA ¹
Meio			
Controle	20,7	4,45	0,21
Durabilidade	56,9	37,84	0,66
Base			
Controle ²	13,3	5,37	0,40
Durabilidade	12,1	2,04	0,17

¹ Os dados com transdutores externos foram feitos para apenas uma das amostras neste grupo.

² Uma das amostras apresentou modo de ruptura na ponta, sendo desconsiderado para a média.

Tabela 4.6. Resultados médios encontrados para resistência máxima no ensaio de CLC.

Grupos	σ máx.	DP	CV
Topo			
Controle	65,4	5,32	0,08
Durabilidade	73,8	3,13	0,04
Meio			
Controle	65,8	7,30	0,11
Durabilidade	67,8	3,64	0,05
Base			
Controle	52,9	2,14	0,04
Durabilidade	46,6	0,85	0,02

Tabela 4.7. Dados amostras CLC.

Controle					
Amostras	Comp. (mm)	Larg. (mm)	Esp. (mm)	Área (mm ²)	M.C. (%)
<i>CB1</i>	155	19,2	13,2	253	9,6
<i>CB2</i>	154	19,0	13,4	255	9,8
<i>CB3</i>	155	17,5	14,7	257	9,4
<i>CM1</i>	157	13,9	7,7	107	10,0
<i>CM2</i>	157	15,4	6,4	98,2	9,6
<i>CM3</i>	157	14,6	6,3	91,7	10,9
<i>CT1</i>	156,5	13,6	6,0	81,6	10,4
<i>CT2</i>	157	13,5	6,0	80,7	10,3
<i>CT3</i>	157	14,7	6,0	87,9	10,0
Durabilidade					
<i>DB1</i>	156	18,8	15,8	297	10,2
<i>DB2</i>	156	18,95	14,8	280	9,4
<i>DB3</i>	156	17	15,5	264	9,7
<i>DM1</i>	157	16,2	6,5	105	9,8
<i>DM2</i>	157	13,35	7,2	96,1	9,3
<i>DM3</i>	157	14,95	7,3	108	9,8
<i>DT1</i>	157	12,95	5,8	75,1	9,5
<i>DT2</i>	157	14,6	6	87,6	10,7
<i>DT3</i>	157	14,2	5,8	82,4	10,2

Novamente, os dados obtidos pelos extensômetros obtiveram valores de rigidez acima do esperado, embora consideravelmente menores do que os obtidos no ensaio de compressão com o colmo inteiro. Ao se analisar os resultados de ambos os grupos, é possível notar um aumento substancial dos valores de rigidez e resistência máxima das amostras de durabilidade em relação às de controle. Estes resultados podem estar associados ao fenômeno de hornificação (FERREIRA *et al.*, 2017; KÖHNKE *et al.*, 2010). Em algumas fibras naturais, o processo de molhagem e secagem (hornificação) causa o enrijecimento da estrutura polimérica das fibrocélulas, quando as cadeias de polissacarídeos da celulose se estreitam após a remoção de água no ciclo de seca. Dessa forma, os vazios capilares da fibra ao longo dos ciclos são progressivamente fechados, fazendo com que o material perca também a sua capacidade anterior de absorção de água. Essa tendência de diminuição pôde ser observada em todos os gráficos de evolução de teor de umidade neste capítulo, criando evidências de que o comportamento das fibras de bambu se assemelha a outras fibras naturais, como as de sisal. Essa tendência pode ser relacionada diretamente a uma variação dimensional, associada a uma densificação da seção transversal. A não ocorrência desse ganho de rigidez no ensaio de compressão com colmo inteiro pode ser justificada justamente pelo ciclo não ter afetado de forma relevante o material, devido ao alto teor de umidade inicial.

A tendência de encontrar resultados de resistência e rigidez maiores no meio e do topo foi novamente confirmada. Também é possível notar que o suposto aumento de rigidez devido ao processo de hornificação também afetou mais as amostras de meio e topo do grupo de durabilidade, existindo leve decréscimo em relação às amostras de base. A maior proporção da matriz de lignina nas amostras de base pode diminuir os efeitos do enrijecimento da estrutura das células e ampliar os efeitos de biodegradação. Para os três métodos de instrumentação utilizados, o uso dos transdutores externos resultou em valores mais precisos. É importante notar que o transdutor interno da máquina resultou em uma rigidez média 2,05 menor (C.V: 0,23) para as amostras controle, em comparação com os externos. No grupo de durabilidade, a rigidez média foi 2,81 vezes menor (C.V: 0,48). Isso demonstra que a rigidez encontrada no ensaio com o colmo inteiro está, muito provavelmente, subvalorizada.

4.5. Ensaios de Flexão

Inicialmente, desejava-se estudar o comportamento a flexão no colmo inteiro. Entretanto, o critério para o bambu neste tipo de ensaio é de que o comprimento da amostra deve ser de pelo menos 30 vezes o do diâmetro externo (ICBO, 2000). Como o foco principal desse ensaio é a questão do desempenho do bambu exposto a um ciclo de imersão e seca, e aproveitando a base teórica criada pelos ensaios de OBATAYA (2007) e GOTTRON *et al.* (2014), decidiu-se, por praticidade, usar hastes retiradas das regiões internodais extraídas da base, do meio e do topo do colmo.

Analisando as conclusões de GOTTRON *et al.* (2014), decidiu-se por orientar as amostras de forma com que a parte externa do bambu estivesse virada para baixo, ou seja, tensionada quando submetida à flexão. Segundo GOTTRON *et al.* (2014), as amostras nesse sentido possuem maior módulo de ruptura, enquanto demonstram menor módulo de elasticidade, e capacidade de resistência residual no caso de longos carregamentos.

Os ensaios conduzidos foram de flexão em quatro pontos, com controle por deslocamento, a uma taxa de 10 mm/min, com uma rótula na face superior. Em todos os ensaios, o equipamento usado foi a máquina MTS modelo 811, com capacidade de carregamento de 500 kN (Fig. 4.17). O vão livre adotado foi de 180 mm, com 60 mm entre os pontos de aplicação de carga e os apoios. Extensômetros elétricos de resistência (marca EXCEL, tipo PA-06-250BA-120-L) foram colocados nas faces superior e inferior das hastes (Fig. 4.18), possibilitando a determinação das curvas de momento x curvatura relativa. A curvatura relativa é obtida ao se dividir a curvatura pelo momento de inércia da seção de cada espécime, que pode variar. Dessa forma, as comparações entre os ensaios podem ser feitas já que os valores obtidos são relativos à geometria de cada amostra.

O módulo de elasticidade foi calculado a partir do coeficiente angular da porção linear da curva de momento x curvatura relativa, considerando o intervalo entre 20% e 80% da carga máxima. Todas as informações e dados das amostras são apresentados na Tabela 4.8. A posição da linha neutra, devido à disposição não homogênea de fibras do bambu, não é centralizada e sua variação pode ser determinada através da Equação 4.2. Como existe uma variabilidade intrínseca na manufatura das hastes e do próprio material, GOTTRON *et al.* (2014) recomenda

normalizar os resultados usando o módulo de ruptura de ambas as faces (superior e inferior) da amostra, calculado através das Eqs. 4.3 e 4.4. Individualmente, as fibras iniciam a sequência de ruptura e a zona de fratura se espalha ao longo da região de momento constante. Nesse caso, não há um instante definido de ruptura, nem um plano de falha evidente. Infelizmente, devido à alta deformação encontrada durante os ensaios, os extensômetros não conseguiram medir toda a extensão dos carregamentos até a ruptura, fazendo com que as tensões de ruptura encontradas sejam inferiores às reais. Não foi possível extrapolar os valores devido à contínua variação de altura da linha neutra.

$$\alpha = \varepsilon_b / (\varepsilon_t - \varepsilon_b) \quad (\text{Eq. 4.2})$$

onde α é a profundidade relativa da linha neutra (L.N.) x/t (Fig. 4.16), ε_b a deformação na superfície inferior da haste e ε_t a deformação na face superior.

$$f_t = \frac{My}{I} = \left(\frac{Pa}{2}\right)((1-\alpha)t) / \left(\frac{bt^3}{12}\right), \quad (\text{Eq. 4.3})$$

$$f_b = \frac{My}{I} = \left(\frac{Pa}{2}\right)(\alpha t) / \left(\frac{bt^3}{12}\right), \quad (\text{Eq. 4.4})$$

onde M é o momento aplicado, α é o vão de cisalhamento (60 mm), P a carga de resistência, b é a largura e t a espessura da amostra.

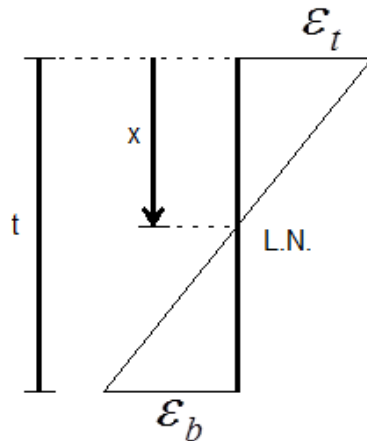


Figura 4.16. Posição da linha neutra para viga sob flexão simples.



Figura 4.17. Dispositivo de ensaio de flexão a quatro pontos com hastes de bambu.

Novamente, as amostras foram divididas em dois grupos, controle e durabilidade, destacando o local de extração em relação ao colmo original – base (B), meio (M) e topo (T). Os gráficos de momento x curvatura relativa são apresentados na Figura 4.21. O modo de ruptura em todas as amostras foi como esperado, com o descolamento das fibras na parte tracionada (Fig. 4.19). Na média, os espécimes de durabilidade exibiram uma maior rigidez e tensões normais de ruptura inferior e superior. Novamente, este resultado corrobora com a hipótese de que o fenômeno de hornificação ocasiona aumento de rigidez no bambu. Neste caso, o menor aumento comparado aos resultados no CLC pode ser relacionado ao maior teor de umidade inicial (Fig. 4.20). Comparando os resultados dos ensaios de flexão e CLC, os módulos de rigidez dos grupos controle foram semelhantes, similar ao que acontece em materiais compósitos reforçados com fibras.

É possível notar também que a variabilidade dos módulos de elasticidade cresceu substancialmente, com coeficientes variacionais 12, 13 e 2,6 vezes maiores do que os de controle nas regiões de base, meio e topo, respectivamente. Isso sugere que eventos cíclicos de molhagem e secagem podem também afetar a confiabilidade do material. No grupo controle, o resultado das médias dos módulos de Young e os modos de falha apresentados são compatíveis com aqueles encontrados em OBATAYA *et al.* (2007) (15-16 GPa, *Mosso*) e GOTTRON *et al.* (2014) (26,8-36,2 GPa, *Tre Gai*) para a mesma orientação das amostras. As diferenças encontradas podem ser explicadas pelos estudos utilizarem espécimes retirados de diferentes espécies de bambu e pela própria variabilidade do material.

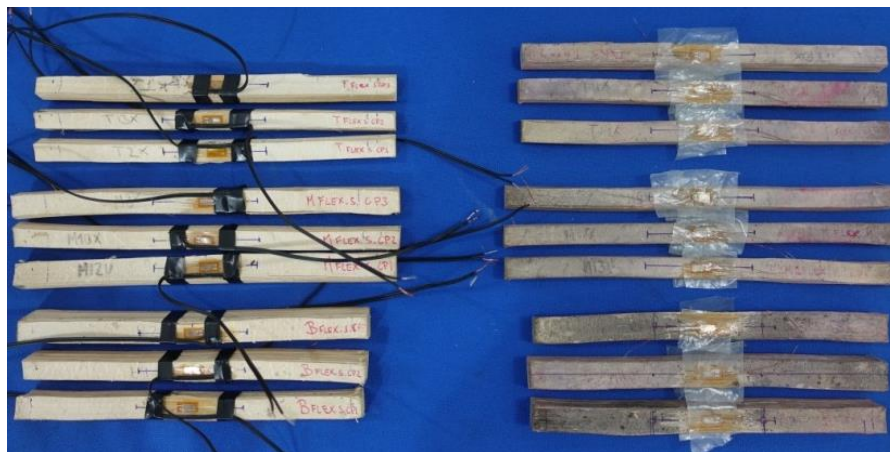


Figura 4.18. Amostras de flexão dos grupos de controle e durabilidade.



Figura 4.19. Amostras rompidas, após a parte mais rica em fibras ter sido solicitada à tração.

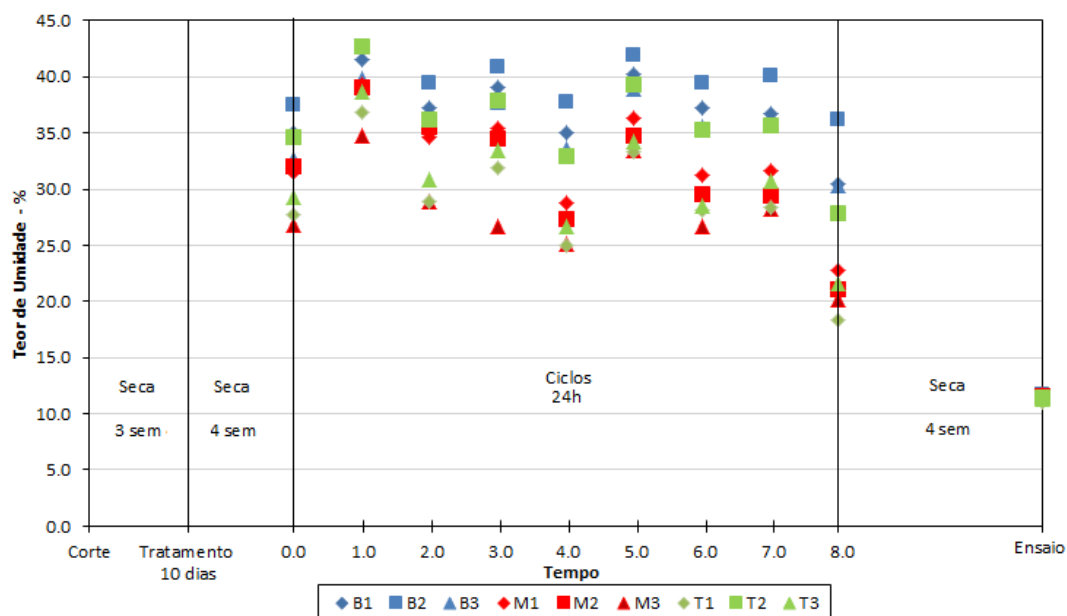


Figura 4.20. Histórico do teor de umidade das amostras de flexão, do corte ao ensaio.

Tabela 4.8. Dados das amostras para ensaios de flexão a quatro pontos.

Controle								
Amostras	Comp. (mm)	Larg. (mm)	Esp. (mm)	I (mm ⁴)	MC (%)	LN (1/t)	MOR S (MPa)	MOR I (MPa)
<i>CB1</i>	193	14,5	12,5	2360,0	11,4	0,41	126,1	54,6
<i>CB2</i>	194	14	14	3201,3	11,2	0,39	138,8	57,8
<i>CB3</i>	196	14	15	3937,5	11,5	0,35	164,6	48,4
<i>CM1</i>	221	13,8	8	586,7	11,2	0,36	191,4	64,33
<i>CM2</i>	224	12	8	512,0	11,2	0,35	177,1	42,6
<i>CM3</i>	223	13,8	9	729,0	11,4	0,41	167,5	107,3
<i>CT1</i>	211	12	8	512,0	11,2	0,38	171,4	70,6
<i>CT2</i>	212	9,8	8	416,0	11,2	0,40	112,1	76,2
<i>CT3</i>	211	14	8	597,3	11,2	0,37	152,1	63,9
Durabilidade								
<i>DB1</i>	193	14,5	14	3315,7	11,7	0,43	130,7	101,4
<i>DB2</i>	196	16	12	2304,0	11,7	0,31	172,8	98,9
<i>DB3</i>	195	15	12	2160,0	11,6	0,18	195,9	22,1
<i>DM1</i>	221	12,5	7	357,3	11,3	0,39	159,7	67,5
<i>DM2</i>	223	10,5	7	300,1	11,6	0,27	265,6	48,3
<i>DM3</i>	222	12	8	512,0	11,7	0,32	177,3	45,8
<i>DT1</i>	213	13	9	789,8	11,1	0,24	161,8	20,0
<i>DT2</i>	213	11,5	9	698,6	11,5	0,45	115,6	112,0
<i>DT3</i>	213	12,5	8	533,3	11,3	0,45	121,9	120,8

Tabela 4.9. Resultados médios dos módulos de elasticidade dos testes de flexão com hastes.

Valores Médios	Controle			Durabilidade		
	Base	Meio	Topo	Base	Meio	Topo
E (MPa)	16927	19835	18105	23404	23029	21860
C.V. (%)	2,20	2,96	15,7	26,4	38,5	41,3

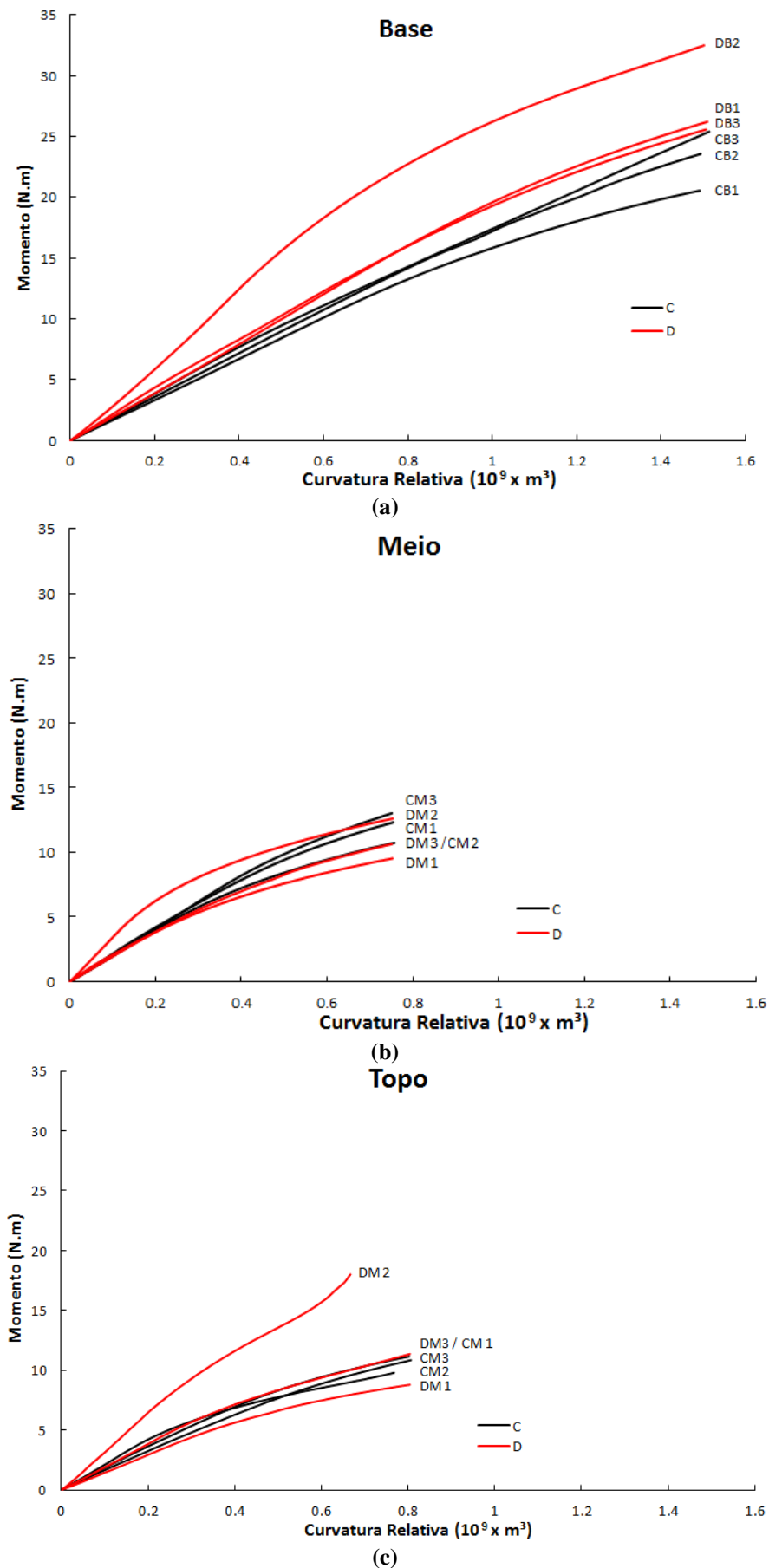


Figura 4.21. Curvas momento x curvatura relativa ensaios de flexão. a) Amostras retiradas da base do colmo; b) meio do colmo; c) topo do colmo.

4.6. Ensaios de Fluência

Os ensaios de fluência foram realizados em um ambiente com temperatura ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) e umidade ($54 \pm 3\%$) controladas. Para facilitar a comparação entre os grupos, assim como no caso dos ensaios de flexão, foi adotado o padrão bem sucedido estabelecido por GOTTRON *et al.* (2014) e KANZAWA *et al.* (2011). Neste caso, foram testadas amostras retiradas apenas de um entrenó da região do meio do colmo, em um total de seis amostras (três para controle e três para durabilidade). A orientação do lado da haste com maior densidade de fibras sendo tracionado também foi mantida em relação aos ensaios de flexão.

Os dados das dimensões de cada amostra podem ser conferidos na Tabela 4.10. Todas as amostras foram ensaiadas com um carregamento equivalente a 35% da carga de ruptura obtida previamente nos ensaios de flexão, considerando a média encontrada nos grupos de controle e durabilidade para as amostras de meio de colmo (Tabela 4.10). As cargas foram aplicadas da forma mais gradual possível com os pesos disponíveis. Estes carregamentos foram aplicados em um ensaio de quatro pontos, com cuidados para não se danificar as amostras. O vão entre os apoios foi definido com 150 mm e a distância entre a aplicação dos pontos de carga e os apoios de 50 mm (Fig. 4.22 e 4.23).

Tabela 4.10. Dados das amostras para ensaios de fluência de flexão a quatro pontos.

Controle								
Amostras	Comp. (mm)	Larg. (mm)	Esp. (mm)	I (mm ⁴)	MC (%)	Carga (N)	T _f (ρ_f/ρ_i)	Tr (ρ_r/ρ_f)
CM1	224	14,75	9	896,1	9,1	236,3	1,18	0,20
CM2	222	14,75	8,5	754,9	13,2	235,7	1,14	0,17
CM3	225	12,625	8,5	646,1	9,1	231,4	1,25	0,24
Durabilidade								
DM1	225	13,25	9	804,9	9,3	180,5	0,13	-0,14
DM2	224	15	8,5	767,7	9,4	179,4	0,95	0,12
DM3	225	14,25	9	865,7	9,4	180,7	1,53	0,41

Foram colocados extensômetros (marca EXCEL, tipo PA-06-250BA-120-L) embaixo e em cima das amostras, na região central. O fator de fluência foi calculado pela evolução da curvatura relativa de cada amostra em relação às curvaturas iniciais (Fig. 4.24 e 4.25). Após 80 dias, os carregamentos foram retirados e os dados dos extensômetros foram coletados por 10 dias para análise de deformação residual.

A curvatura ao final do carregamento deve ser avaliada para o ensaio ser considerado satisfatório. Após 80 dias, a taxa relativa à curvatura final (ρ_f) deve ser menor ou igual a duas vezes a inicial (ρ_i) (GOTTRON *et al.*, 2014). Neste critério, todas as amostras apresentaram resultados positivos. A taxa média encontrada para o grupo controle foi de 1,19 (D.P. = 0,5) e o pior caso foi encontrado na amostra DM3, com taxa de 1,52. Outro critério para o ensaio ser considerado adequado é de que os incrementos da taxa de fluência sejam decrescentes, como mostra a Eq. 4.5:

$$T_{f30} - T_{fi} > T_{f60} - T_{f30} > T_{f90} - T_{f60}, \quad (\text{Eq. 4.5})$$

onde T_f é a taxa e os índices representam os dias.

É possível notar que os resultados das amostras DM1 e DM2 não se encaixam nesse critério, já que registraram curvaturas decrescentes ao longo do tempo. Em ambos os casos, ocorreu um pico na curvatura inicial, seguido por uma diminuição rápida e contínua dos valores. As deformações absolutas encontradas nas amostras DM1 e DM2 também foram consideravelmente menores do que as das outras amostras, o que também pode estar associado a um ganho de rigidez devido aos ciclos de molhagem e secagem (Fig. 4.26).

Oito dias após serem retiradas as cargas, as curvaturas residuais (ρ_r) ficaram dentro do esperado na comparação com os resultados de GOTTRON *et al.* (2014). Nas amostras controle, a curvatura média residual foi de 20,3%. Nas de durabilidade, a amostra DM3 apresentou 41% de curvatura residual, enquanto nas outras amostras não foi possível extrair dados concretos já que não foi configurado o aumento de deformação durante o período de carregamento.

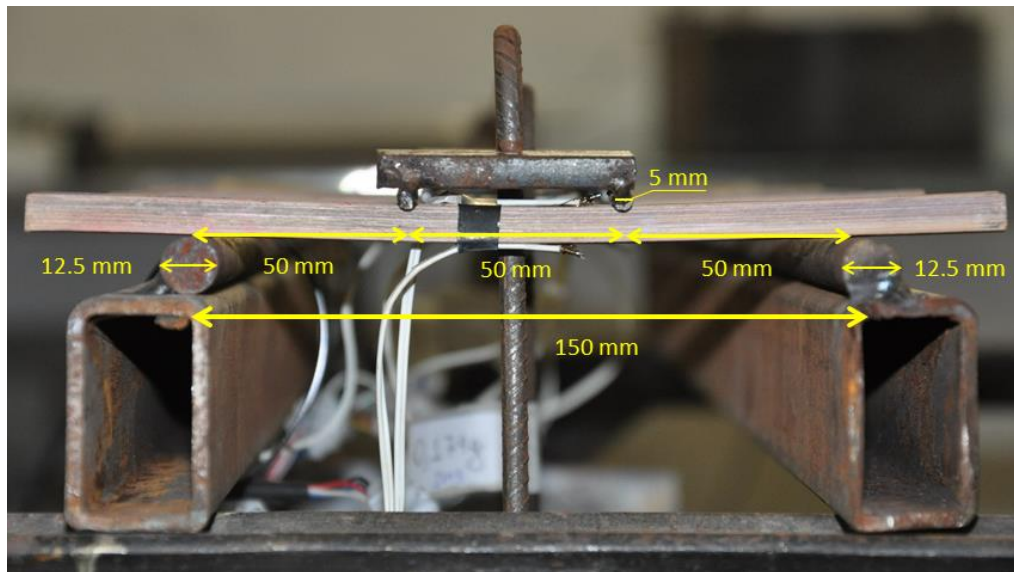
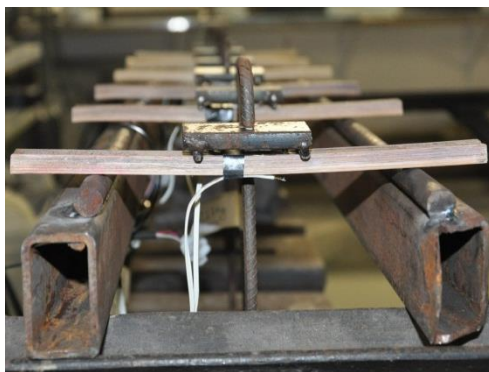


Figura 4.22. Esquema do ensaio de flexão com carregamento de longa duração.



(a)



(b)

Figura 4.23. Set-up ensaio de fluência.

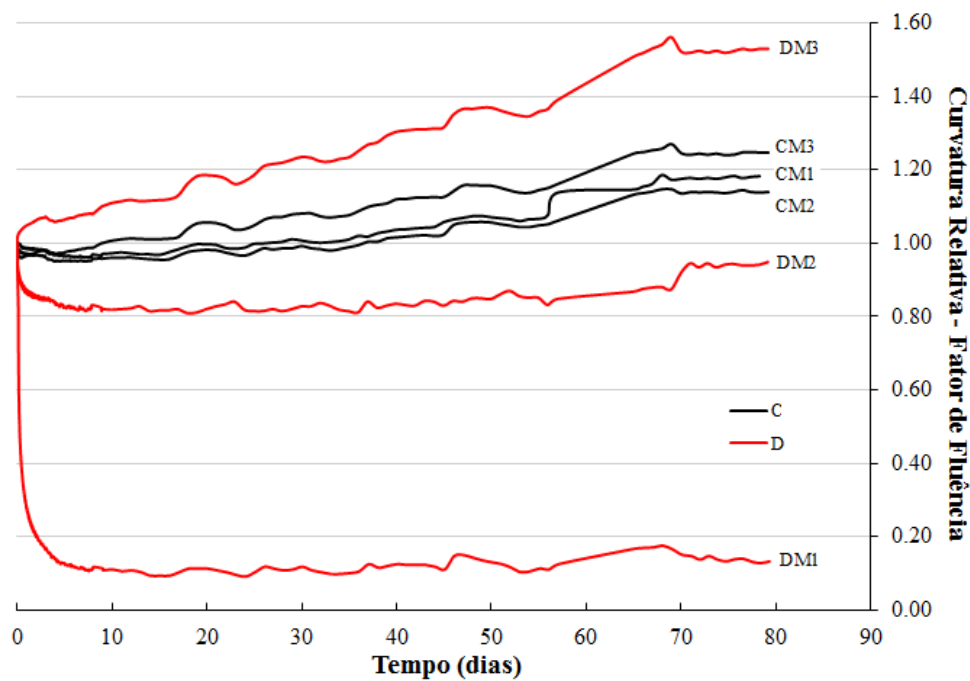


Figura 4.24. Evolução do fator de fluência relativo às curvaturas relativas.

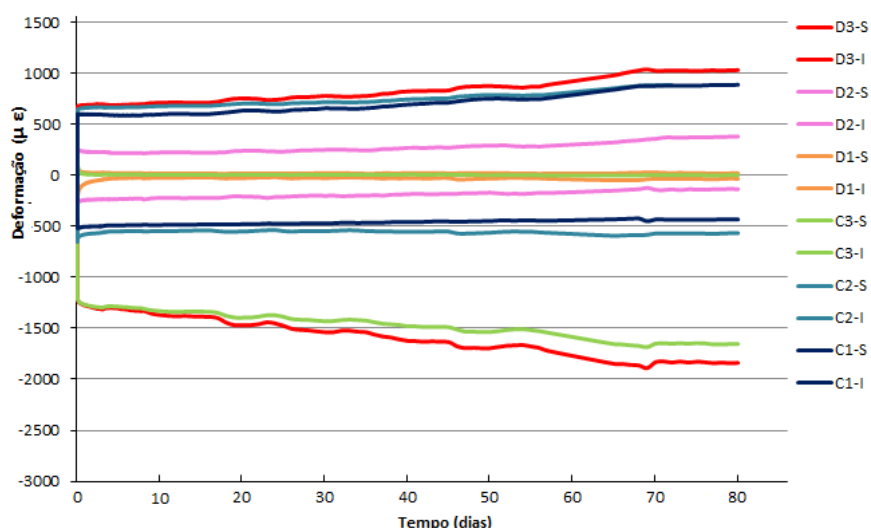


Figura 4.25. Valores absolutos de deformação para cada par de strain gage das amostras.

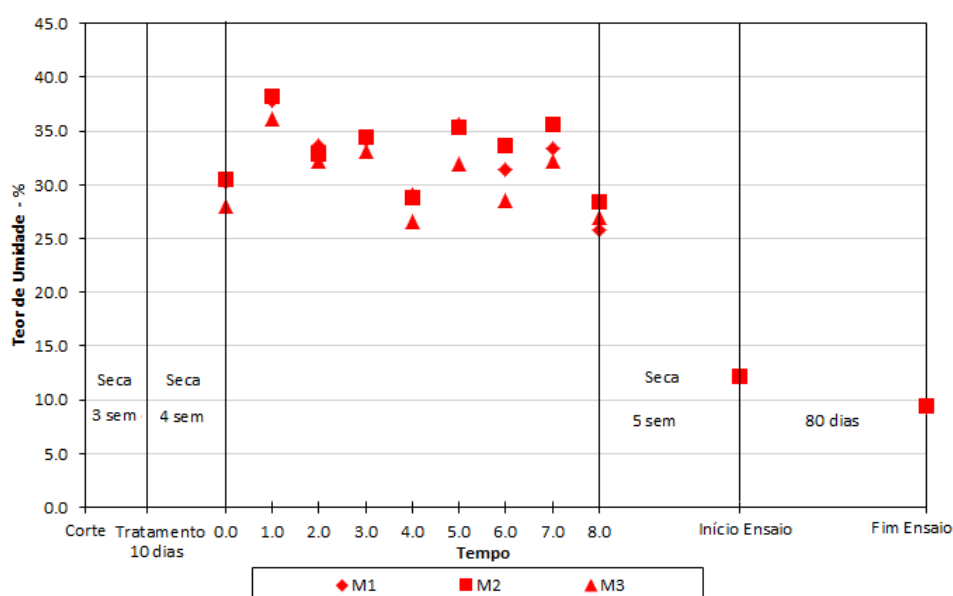


Figura 4.26. Histórico do teor de umidade das amostras de fluência, do corte ao ensaio.

4.7. Ensaio para determinar coeficiente de atrito entre cordas convencionais e de sisal e o bambu Guadua.

O ensaio para determinação dos coeficientes estáticos de atrito foi realizado baseado na fórmula de Euler–Eytelwein (Eq. 4.6) e nas considerações de LUBARDA (2014). É interessante notar que o coeficiente de atrito não depende do diâmetro da corda e do objeto. O comportamento da corda nesta equação é simplificado, e assume-se que ela permanece indeformável e não apresenta alongamento. A rigidez da corda e sua influência são estudadas em STUART

(1961). O módulo de elasticidade de uma corda aumenta se a corda é pré-tracionada (STEWART, 1937). Por conta disso, para minimizar o efeito de alongamento durante os ensaios, antes de cada teste as cordas foram tracionadas com cargas proporcionais às que, posteriormente, seriam aplicadas.

$$T_1 = T_2 e^{\mu\theta}, \quad (\text{Eq. 4.6})$$

onde, T_1 é a força de tração em uma extremidade, T_2 a força de tração na outra extremidade ($T_1 > T_2$), μ é o coeficiente de atrito e θ o ângulo de contato entre a corda e o objeto circular, em radianos:

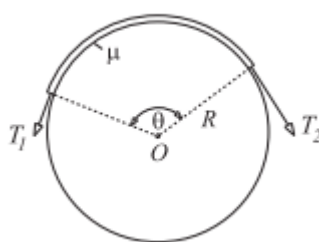


Figura 4.27. Corda passando por um cilindro fixo circular de raio R (LUBARDA, 2014).

O dispositivo do ensaio realizado consiste de uma corda que circunda um elemento de bambu fixado em um pórtico rígido. A corda é fixada através de olhais em um suporte para posicionamento de cargas em uma de suas pontas e em uma célula de carga de 200 N em outra. Esta é ligada através de uma barra de aço ($d = 12,5$ mm) a uma cantoneira de aço fixa no mesmo pórtico (Fig. 4.28). O sistema é zerado em equilíbrio e cargas com peso conhecido são posicionadas no suporte e o valor correspondente registrado pela célula de carga é anotado (Apêndice C). Foram tomados os devidos cuidados para que não ocorresse nenhuma movimentação na peça de bambu durante o ensaio. Dois tipos de cordas foram inicialmente testados, de nylon e de sisal. As cordas de nylon são cordas trançadas em espiral que envolvem a alma, também composta por fios de nylon. Cordas de sisal não possuem alma. O ensaio foi feito em 2 pontos, em duas posições distintas do colmo com 5 medidas para cada posição e cada carga. O Das medidas foram excluídos os maiores e menores valores e feita a média. O ângulo foi determinado pelo arco de contato entre a corda e o bambu. A inclinação da reta célula de carga x carga aplicada representa a relação T_1/T_2 . A partir dessa relação é possível extrair o coeficiente μ (Fig. 4.29). Na Tabela 4.11 são apresentados os dados dos ensaios e os resultados de coeficiente de atrito obtidos.

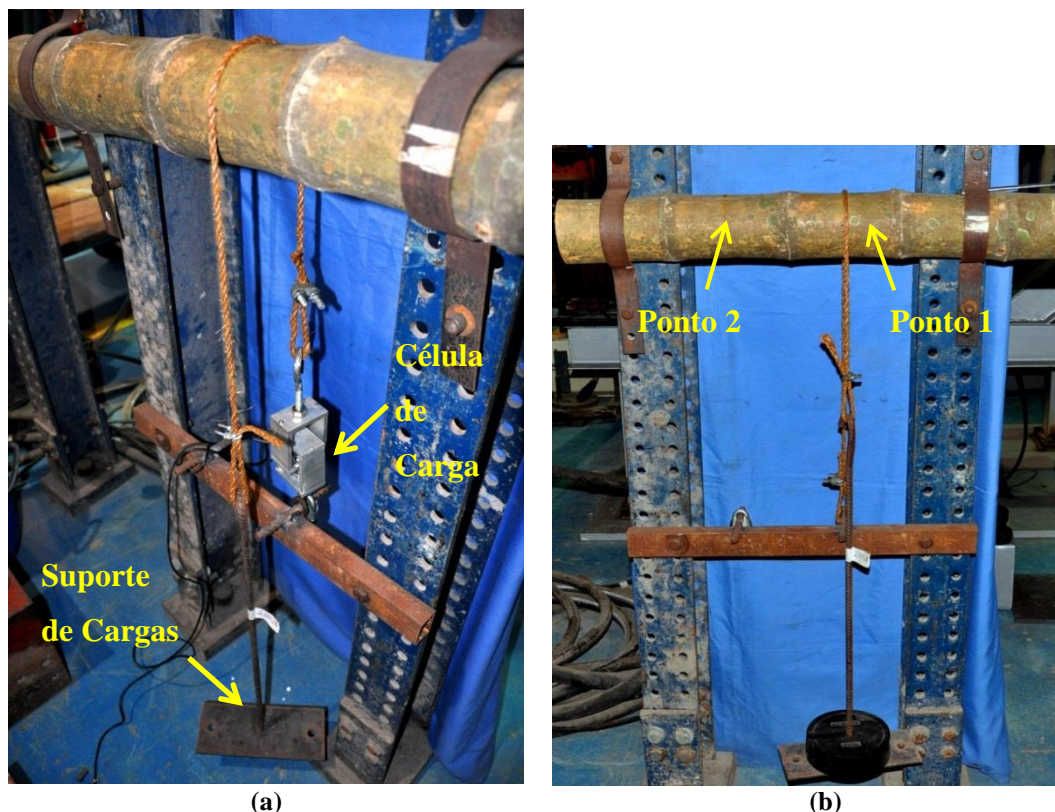
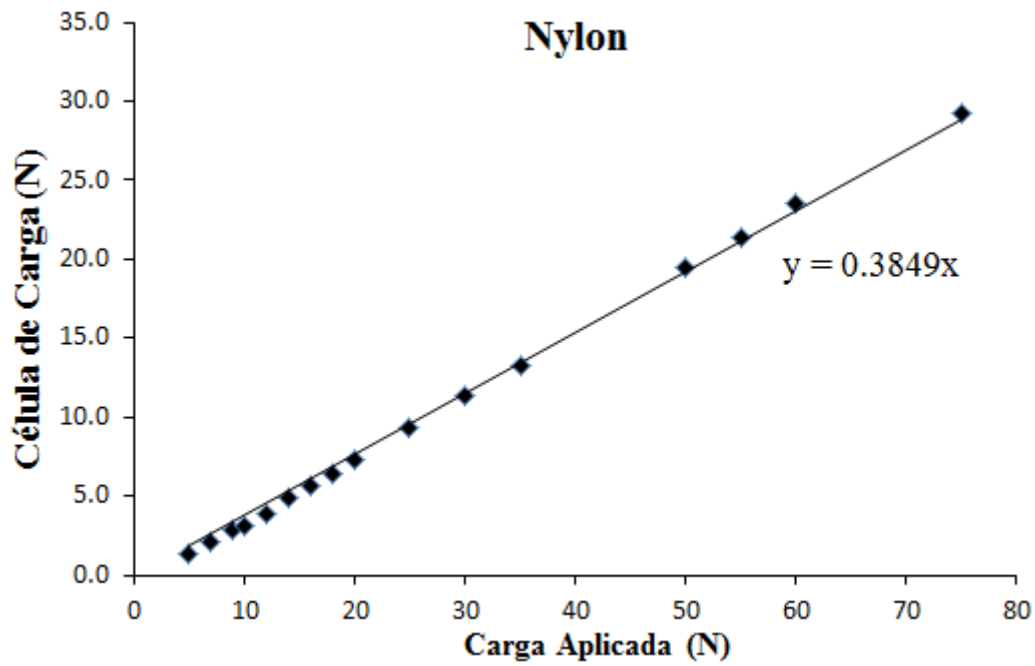


Figura 4.28. Dispositivo de ensaio para determinar o coeficiente de atrito, com corda de sisal: a) vista tridimensional; b) vista frontal.

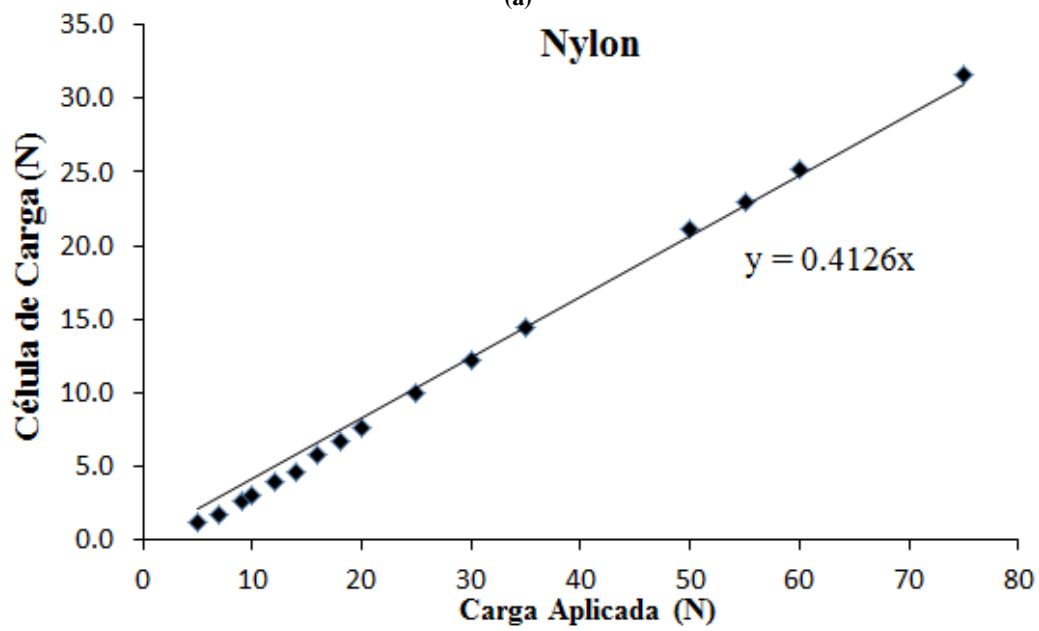
Tabela 4.11. Dados ensaio coeficiente de atrito.

Corda Convencional	Ângulo (rad)	Inclinação (T_1/T_2)	Coeficiente de Atrito	Coeficiente Médio de Atrito (Coef. Variacional)
Ponto 1	2,671	0,412	0,332	0.335 (1,3%)
Ponto 2	2,827	0,385	0,338	

Só foi possível realizar com êxito o ensaio com cordas convencionais de nylon. As cordas de sisal, aparentemente, apresentaram coeficientes altos de atrito, porém não foi possível traçar uma curva coerente com este tipo de ensaio, uma vez que para a mesma carga eram obtidos valores diferentes na célula de carga. O trançado da própria corda, quando esta é carregada, gera um alongamento que impede que seja determinado com precisão o coeficiente de atrito. O ensaio BUT (*Bending Under Tension Test*), utilizado para estampagens (FOLLE, 2012), pode ser uma alternativa para casos assim, uma vez que considera a força de dobramento na corda. Ao se aplicar o coeficiente encontrado no ensaio na Eq. 2.8b (BAYMAN, 1977), tem-se que o nó do fiel apresenta um fator de 2,31, podendo ser considerado portanto um nó seguro (>1).



(a)



(b)

Figura 4.29. Curvas carga da célula de carga x carga aplicada em dois pontos distintos. a) ponto 1; b) ponto 2.

5. Proposta de Ponte Dobrável de Bambu

5.1. Descrição da Ponte

O projeto da ponte dobrável proposta no presente trabalho consiste em uma estrutura pantográfica dobrável (*scissor-like structures*), que assume configuração em treliça na sua forma final. A ponte finalizada é composta por duas treliças longitudinais, cada uma composta por diagonais formadas por barras de bambu predominantemente comprimidas e tirantes verticais de aço que funcionarão tracionados. Já os banzos são compostos por cabos de aço pré-tensionados, responsáveis por darem a rigidez necessária ao sistema e estabilizarem lateralmente a estrutura (Fig. 5.1). É importante observar que o banzo superior sofre alívio de tração quando a ponte é carregada. As ligações são parte primordial do projeto e envolvem grandes desafios. Assim sendo, é interessante usar todas as ferramentas disponíveis de construção com bambu e não se limitar ao convencional. Será analisado o uso de ligações amarradas e parafusadas, bem como serão desenvolvidos novos tipos de ligação.

Por ser ainda a concepção teórica de uma ponte, cartesianamente a ideia precisa começar pelo problema ainda simples antes de se pensar em projetos maiores. Por isso, a ponte foi pensada apenas para pedestres, com limite de carga máximo de 30 pessoas trafegando simultaneamente sobre a ponte, altura de 1,73 metros, largura de 1,5 metros para permitir fluxo nos dois sentidos e vão livre da ordem de 10 metros, apesar da estrutura permitir flexibilização do vão. Dessa forma, cada uma das vigas longarinas será formada por 20 barras de bambu com comprimento total de 2 metros cada. Como o vão é variável, nestas condições fica definida a abertura angular da tesoura como 60°. Considerando a densidade do bambu seco retirada do programa experimental de 0,7 g/cm³, diâmetro externo e interno de 12 e 10,5 cm, respectivamente, cada viga da ponte teria apenas 138 kg, sem contar com os cabos de aço e os elementos de ligação.

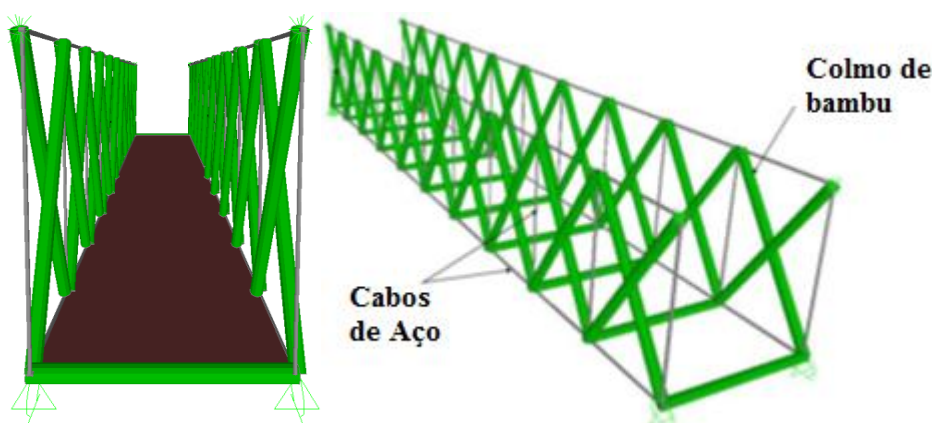


Figura 5.1. Ponte dobrável de bambu: a) vista frontal, b) vista tridimensional.

5.2. Desenvolvimento da estrutura

Para o melhor entendimento de como funciona o projeto, o processo de desenvolvimento da ponte pode ser dividido em um passo a passo. A maior parte dos conceitos será apresentada superficialmente antes de se detalhar melhor o funcionamento dos mecanismos estruturais, principalmente, em relação às ligações.

5.2.1. Estágio 1

A estrutura dobrada é transportada para o local de instalação (Fig. 5.2a). Esse formato reduz o volume e a natureza leve do bambu possibilita a utilização de caminhões simples ou mesmo helicópteros para o traslado. Para a viga considerada, o comprimento dobrado esperado situa-se entre 1,50 e 2 metros, ou de 15% à 20% do tamanho máximo da viga desdobrada. No local, deve ser feito o posicionamento da estrutura e o preparo prévio das fundações. O projeto prevê que as vigas longarinas sejam desdobradas em balanço, em processos independentes. Nesse caso, o apoio de onde cada viga será lançada deve ser de segundo gênero. Para controle dos deslocamentos no plano, neste apoio há uma barra vertical que liga as duas pontas e conecta a parte superior a um sistema de contrapeso (Fig 5.2b).

Nas juntas e nos *pivots* centrais, os bambus estão unidos por conexões que permitem a livre rotação durante todos os estágios. O processo de abertura pode

ser realizado através de um dispositivo que force o movimento vertical relativo entre as extremidades superior e inferior da primeira unidade tipo-tesoura, em um movimento análogo à abertura de uma tesoura. Quando a viga atinge o vão desejado, ela pode ser simplesmente apoiada na outra extremidade, tornando-se biapoiada (Fig. 5.2c). Assim como na primeira extremidade, a última unidade de par de tesouras é então conectada a outra barra vertical. A função dessas barras é criar mais um *loop* fechado, já que, devido à mobilidade do sistema ser maior do que zero, surge uma tendência de abertura da estrutura. Portanto, para impedir esse movimento, ao final do desdobramento, os elementos são fixados nessas barras e a viga pode ser desconectada do dispositivo de suporte.

Durante todo esse estágio, os cabos do sistema estão frouxos e correm livremente pelas juntas, com exceção dos pontos de ancoragem nos cantos. No entanto, antes dos cabos superior e inferior serem protendidos, é necessário esticar os cabos verticais, como será explicado mais adiante. Para que isso seja possível, a estrutura das transversinas e dos painéis deve ser montada ainda neste primeiro estágio, de forma a possibilitar o acesso de um operador a estes cabos verticais.

5.2.2. Estágio 2

Com os cabos verticais já esticados, os comprimentos dos cabos nos banzos são ajustados e é aplicada uma protensão nos cabos de contorno até se atingir um valor previamente calculado (Fig. 5.2d). Essa protensão é aplicada considerando a força necessária para que os cabos não entrem em compressão devido às solicitações e para que a viga tenha estabilidade lateral. Nesse momento, os únicos pontos em que os cabos são fixados ao bambu são nos nós extremos da viga, em ancoragens ativas e passivas.

A protensão deve ser aplicada através de um mecanismo hidráulico de maneira simultânea nos cabos inferior e superior. Nesse momento, os cabos de banzo vão deixando de estar frouxos enquanto continuam a correr livremente ao longo das juntas internas. Ao aplicar a força de tração, há uma tendência de fechamento no sistema, quando os *pivots* superiores e inferiores se afastariam entre si. No entanto, esta tendência é impedida pelos cabos verticais, que agora ficarão pré-tracionados conjuntamente com os de banzo, tornando a estrutura auto-equilibrada.

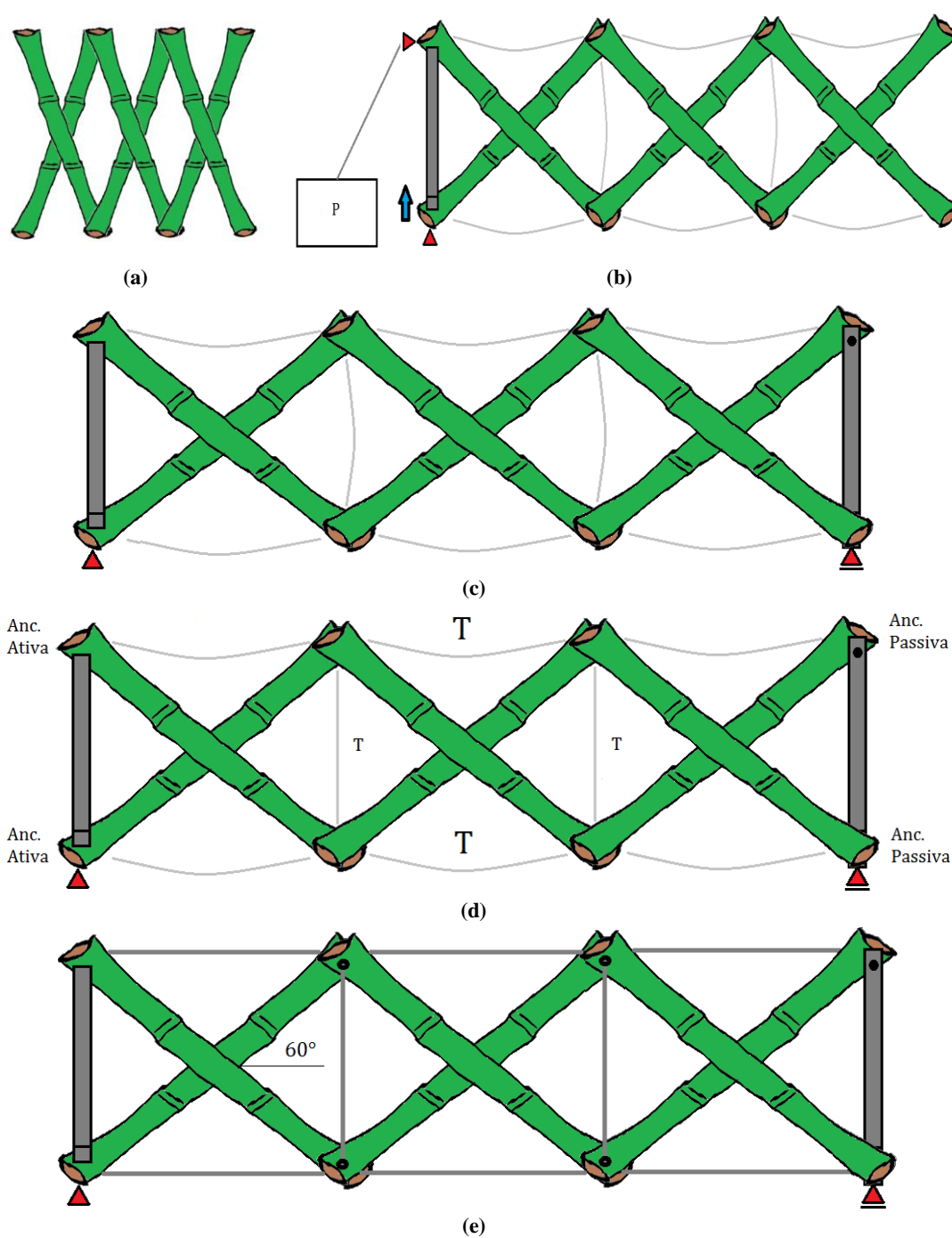


Figura 5.2. Desenvolvimento da ponte de bambo em seus diferentes estágios: a) dobrada para transporte; b) durante o seu lançamento; c) biapoiada; d) durante a protensão dos cabos de aço; e) estrutura final.

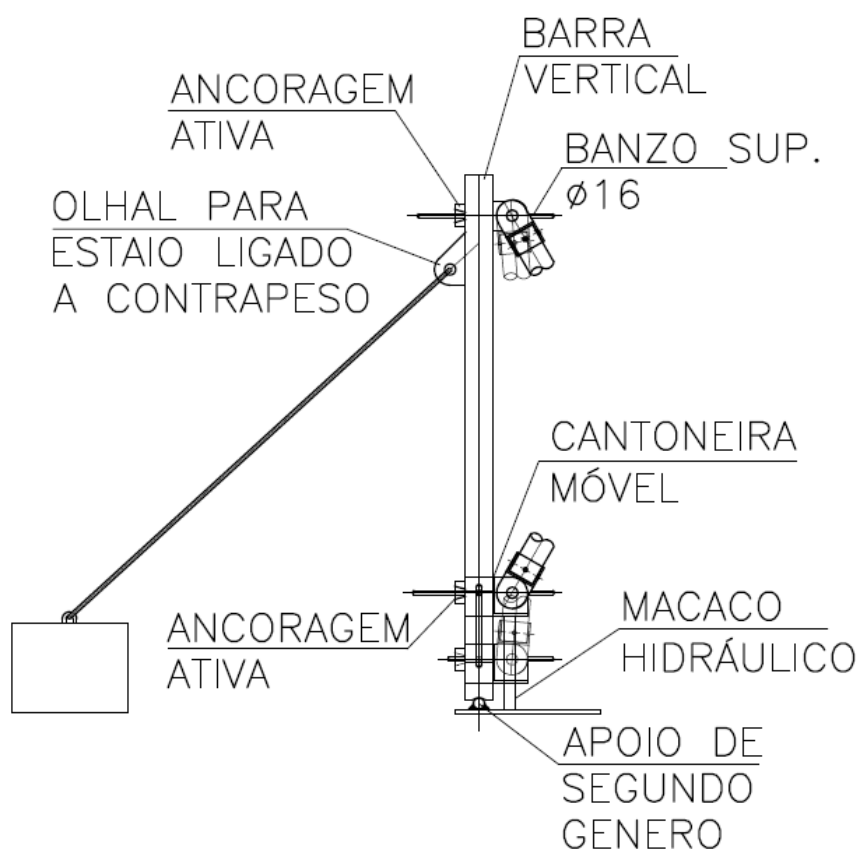
5.2.3. Estágio 3

Após a aplicação da tração nos cabos, eles são travados nas juntas por meio de braçadeiras, não mais permitindo movimento relativo. O sistema estrutural é auto-equilibrado e as duas vigas agora se assemelham a uma treliça pronta para as futuras solicitações (Fig. 5.2e).

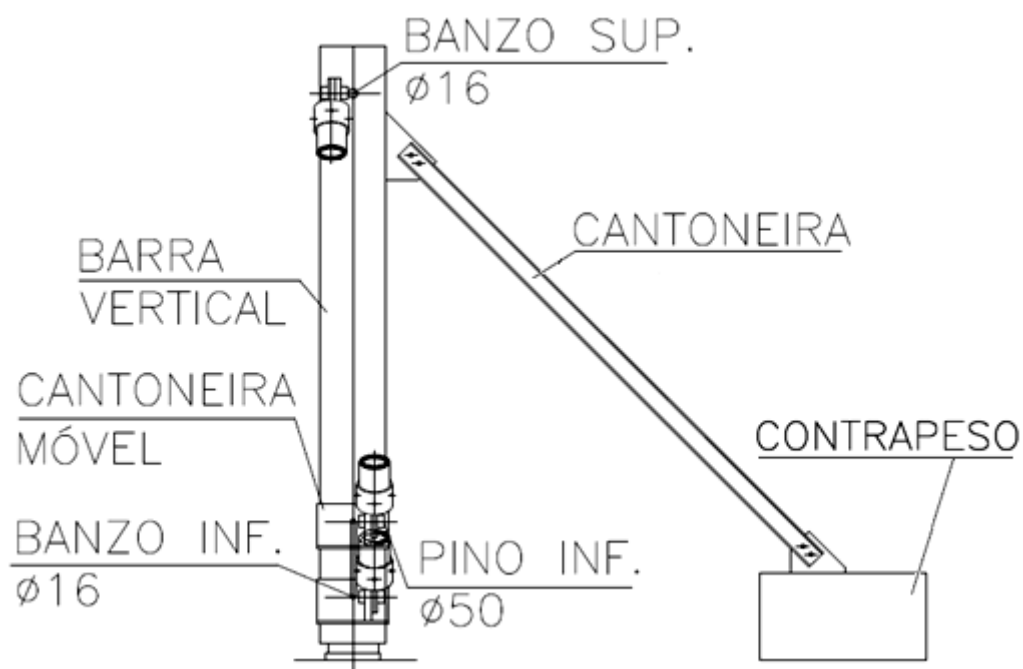
5.3. Ligações Utilizadas

Nesta seção serão apresentados os projetos de cada ligação, onde seus mecanismos serão explicados, assim como os métodos executivos associados. A ponte possui um total de sete tipos de ligação distintos, sendo seis tipos de ligação com pino e a proposta de um novo modelo de ligação amarrada para estruturas pantográficas de bambu. Em toda ligação pinada deve haver um copo metálico que é parafusado nas extremidades do colmo do bambu. Este copo irá compor o sistema e funcionar como reforço local das ligações pinadas. É aconselhável preencher os espaços entre o copo de aço e o colmo com algum material flexível que possa absorver a diferença na variação volumétrica do bambu e do aço devido à variação térmica e da umidade relativa do ar.

A corda considerada para a ligação amarrada é de polipropileno (nylon) com diâmetro de 12,5 mm. Embora outros materiais pudessem ter sido levados em conta, para simplificar as ligações e diminuir as variáveis, os pinos, cabos, e demais elementos de ligação foram todos considerados metálicos. As Figuras 5.3 e 5.4 fornecem a vista ampla da viga longarina e das barras verticais, com os indicativos para os detalhes das ligações, expostos nas Figuras 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14, onde os mecanismos e seus respectivos métodos executivos são explicados individualmente. Todas as cotas das imagens estão em milímetros.



(a)



(b)

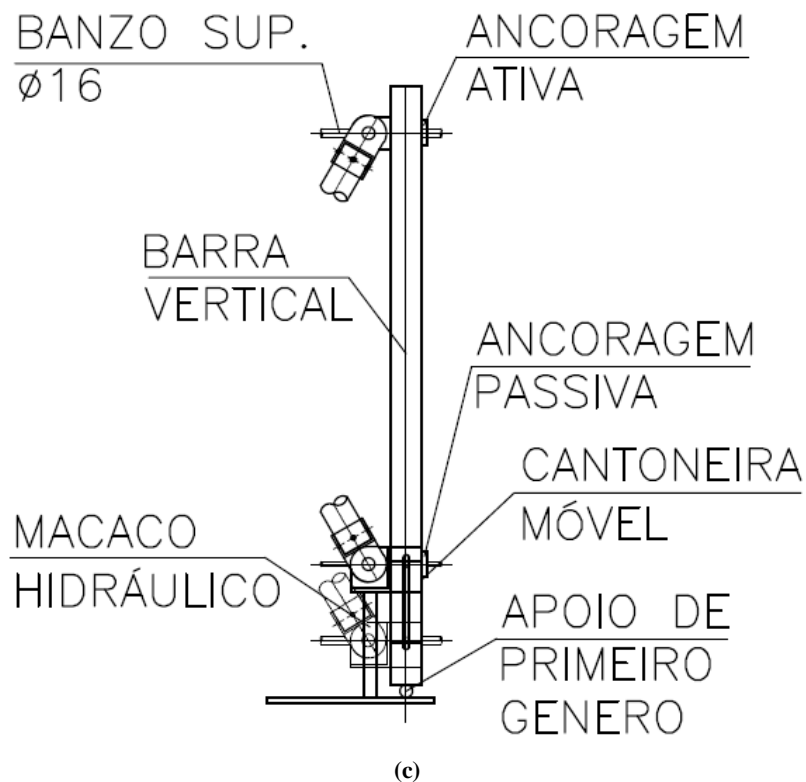


Figura 5.4. Barras verticais: a) barra ligada ao apoio de segundo gênero e ao contrapeso. b) vista frontal, com cantoneira ligada ao apoio para estabilidade lateral; c) barra ligada ao apoio de primeiro gênero.

5.3.1. Detalhe 1: Ancoragem Ativa

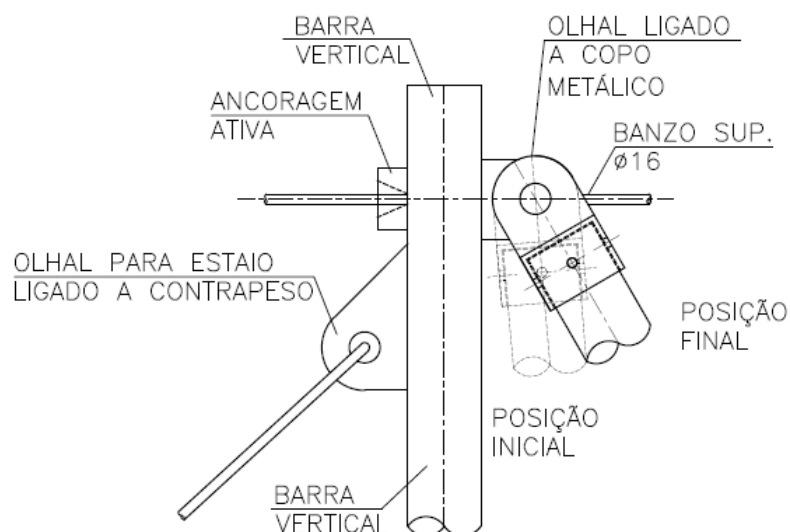


Figura 5.5. Detalhe 1, ancoragem ativa.

Nessa ligação, o cabo de banzo superior chega ao topo da barra vertical, que contém um furo para a sua passagem. O cabo passa pela barra até chegar à estrutura de ancoragem ativa, por onde poderá ser aplicada a protensão através de um macaco hidráulico. Neste caso, o copo metálico no topo do elemento de

bambu possui um olhal. Este olhal é ligado a outro olhal de mesmas dimensões na barra vertical, através de um pino. Dessa forma, o bambu é fixo à barra, mas ainda possui livre rotação. No lado oposto da barra, outro olhal foi projetado para que seja possível conectar os estais que irão ligar a barra ao contrapeso. Estes estais devem ser retirados antes da fase de protensão da viga.

5.3.2. Detalhe 2: Apoio Fixo e Ancoragem Ativa

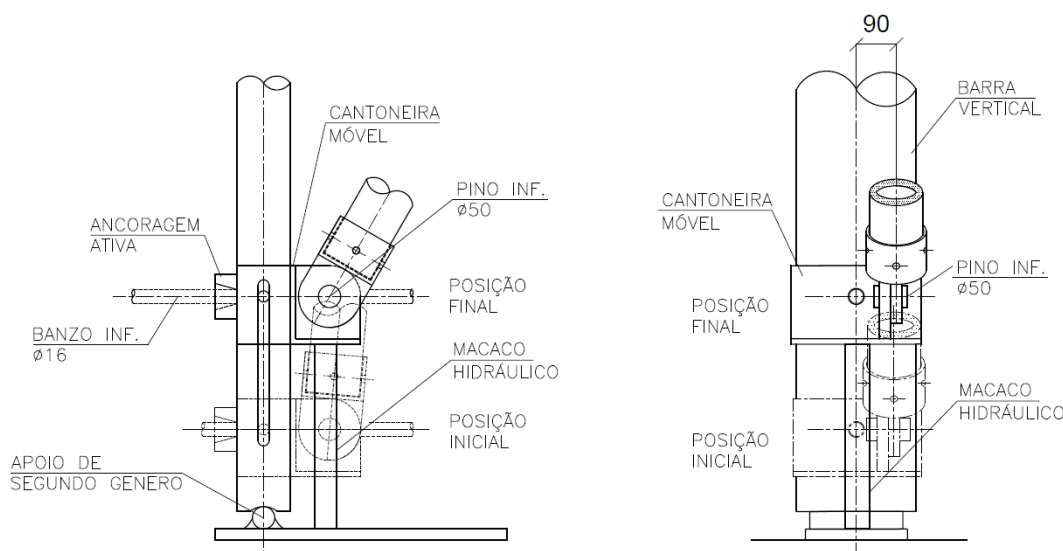


Figura 5.6. Detalhe 2, apoio fixo e ancoragem ativa.

Nesta ligação, novamente o copo metálico de ponta do elemento de bambu possui um olhal conectado. Neste caso, porém, o olhal é conectado através de um pino a um olhal em uma cantoneira móvel. A cantoneira não está fixa na barra e pode se movimentar ao longo de um furo oblongo. Essa movimentação é necessária para o mecanismo de desdobramento da ponte. Através de um simples macaco hidráulico, a cantoneira sobe até a posição necessária. Para um vão de 10 metros, é preciso subir pouco menos de 30 centímetros. Nesta posição, a cantoneira deve ser travada na barra através de solda e uma rampa de acesso deve ser instalada.

O cabo do banzo inferior passa livremente pela barra e uma ancoragem ativa é posicionada nela para que a protensão seja aplicada. A barra vertical deve ser fixada na fundação (bloco de concreto), de forma que não permita deslocamentos translacionais, mas seja desimpedida para rotação no eixo y.

5.3.3. Detalhe 3: pivot superior.

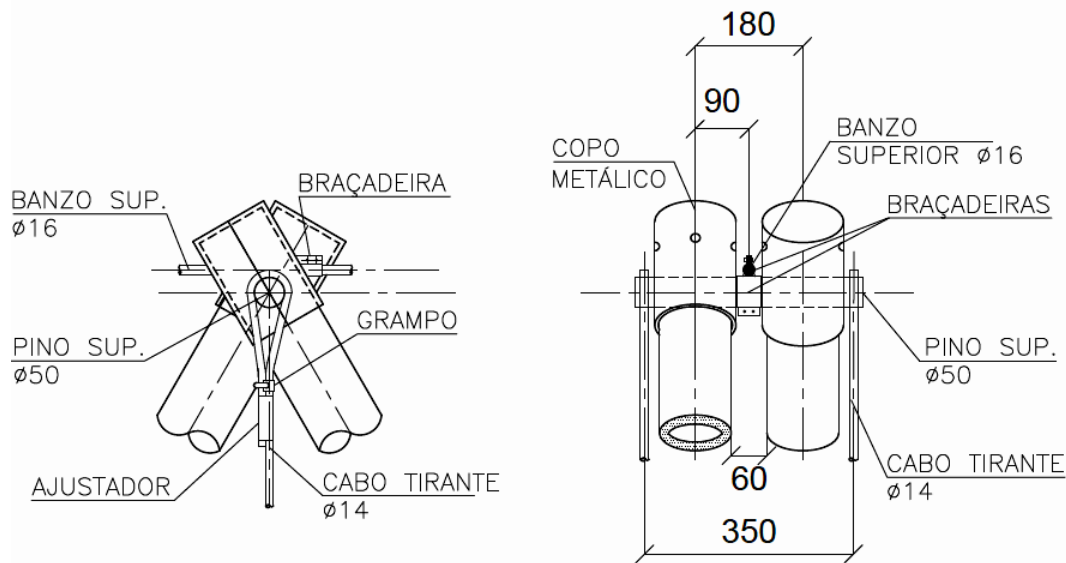


Figura 5.7. Detalhe 3, pivot superior.

O pivot superior é um pino que conecta os dois elementos de bambu no seu eixo de rotação. Como o diâmetro é grande (50 mm), o copo metálico é essencial para distribuir as tensões cisalhantes e evitar problemas de fissuras. Para diminuir o atrito entre a peça de bambu e o pino, é recomendável a presença de uma bucha metálica. No vão entre os bambus, é conectada uma braçadeira ao pino. Esta braçadeira, por sua vez, é soldada a outra braçadeira contínua, por onde passa o cabo de banzo superior. Durante as fases de desdobramento da ponte, o cabo passará livremente pelo buraco da braçadeira. Após a aplicação da protensão, a braçadeira deve ser apertada e garantir que não haja mais movimentação relativa entre o pino e o cabo.

Para equilibrar o nó, os dois tirantes foram posicionados na face externa do bambu. Estes cabos se conectam ao pino através de um laço ajustável. Quando a viga está biapoiada, antes da fase de protensão, é necessário que um operador tenha acesso a esses cabos para esticá-los com um tensionador.

5.3.4. Detalhe 3: pivot inferior.

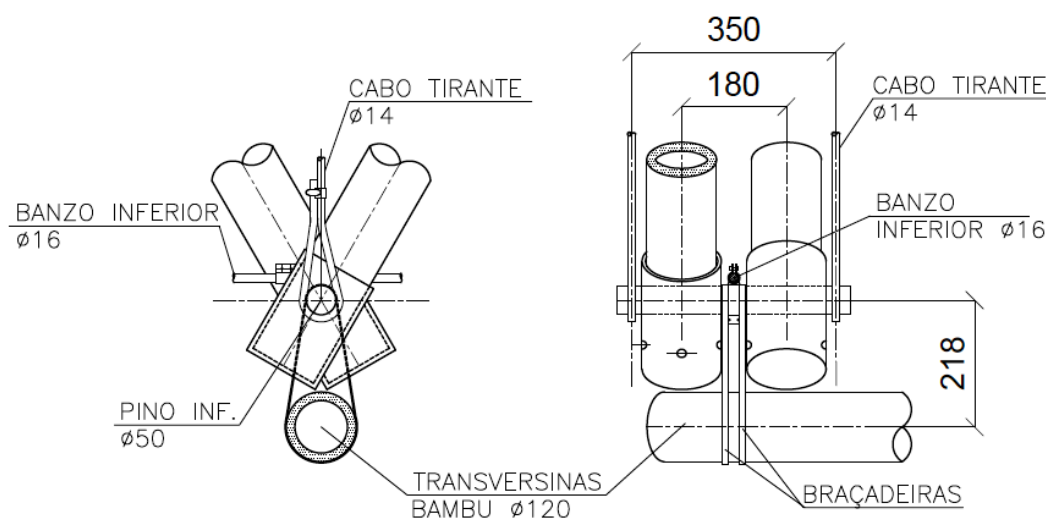


Figura 5.8. Detalhe 3, pivot inferior.

O pivot inferior segue as mesmas características do superior. A diferença é que duas braçadeiras são agora acopladas ao pino de rotação. Quando a viga torna-se biapoada, as vigas transversinas encaixam-se nestas braçadeiras, ficando suspensas e alinhadas com o eixo do nó. Um contraventamento apropriado das transversinas é necessário para que elas não fiquem instáveis. No posicionamento das vigas transversinas, sugere-se a recomendação de posicionamento dos apoios em um nó ou o mais próximo possível de um (ISO 22156:2004).

5.3.5. Detalhe 4: pivot central.

As ligações amarradas no centro dos bambus os conectam ao mesmo tempo em que permitem a rotação, funcionando como *pivot*. Para isso, é prevista a utilização do nó do fiel (Fig. 5.9). Com uma corda, um elemento de bambu é amarrado com o nó e em seguida o seguinte, no local desejado (Fig. 5.10). O nó do fiel é de fácil execução e bastante utilizado em construções com bambu.

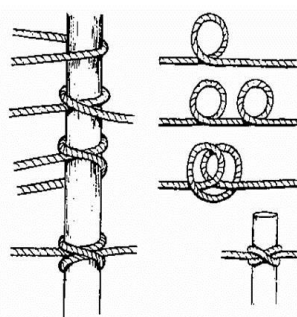


Figura 5.9. Volta do Fiel (Imagem: <http://www.pioneeringmadeeasy.co.uk>, 28.06.2017).

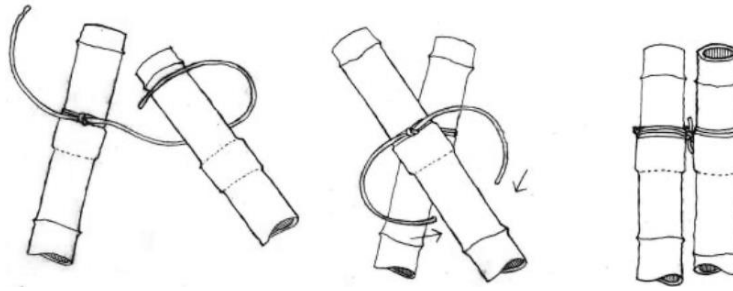


Figura 5.10. Ligação entre bambus que permite rotação através do nó do fiel (SEIXAS et al., 2014).

A ligação amarrada é uma solução excelente para o bambu, mas geralmente são feitas apenas em estruturas fixas como andaimes ou em baixas solicitações. No caso da ponte, devido às excentricidades do sistema, a princípio não é possível garantir que somente a corda seja capaz de equilibrar o nó (Eq. 5.1, 5.2 e 5.3). Para isto deve surgir uma componente que passe pelo meio da excentricidade, onde o momento é nulo, como pode ser visto abaixo.

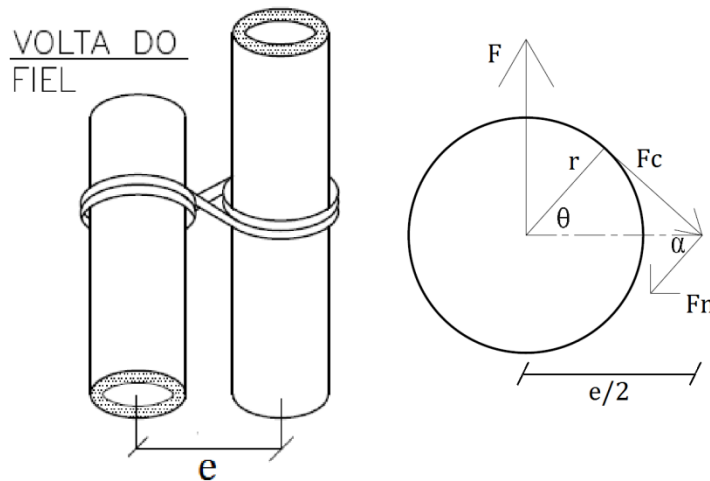


Figura 5.11. Equilíbrio do nó da ligação amarrada.

$$\sum F_v = 0; F = F_c \cos(\theta) + F_n \sin(\alpha), \quad (\text{Eq. 5.1})$$

$$\sum F_H = 0; F_c \sin(\theta) = F_n \cos(\alpha), \quad (\text{Eq. 5.2})$$

$$\sum M_0 = 0; F \times \left(\frac{e}{2}\right) - F_c(R) - F_n \sin \alpha \times \left(\frac{e}{2}\right) = 0, \quad \text{Eq. (5.3)}$$

onde e é a excentricidade correspondente a distância entre os eixos do bambu, θ é o ângulo entre a tangente da corda e o centro do colmo, α o ângulo da força F_n e R é o raio do colmo. Para resolver a excentricidade e introduzir a componente F_n , que equilibra o sistema, é necessário um dispositivo feito de material flexível

colado aos bambus, que gere o contato entre as peças e que possua uma junta para que a rotação não seja impedida (Fig. 5.12a). Duas soluções são aqui propostas, utilizando o neoprene como material flexível. A primeira prevê uma junta entre os dispositivos revestida com teflon e um pino de aço embutido no neoprene (Fig. 5.12b). Este pino funciona como uma barra de transferência, não aderida e engraxada em um dos lados. A outra seria também com uma junta entre os dispositivos de neoprene revestida com teflon, mas com um anel externo metálico aderido apenas a um dos lados (Fig. 5.12c).

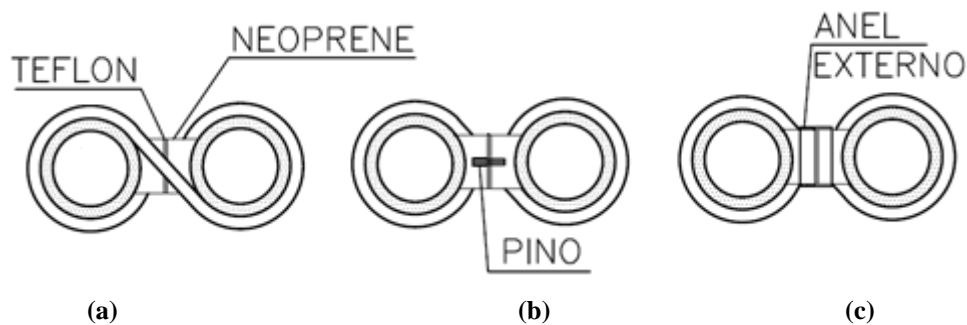


Figura 5.12. Ligações amarradas propostas para estruturas pantográficas: a) configuração geral; b) solução com pino permitindo rotação; c) solução com anel externo.

5.3.6. Detalhe 5: Ancoragem Passiva

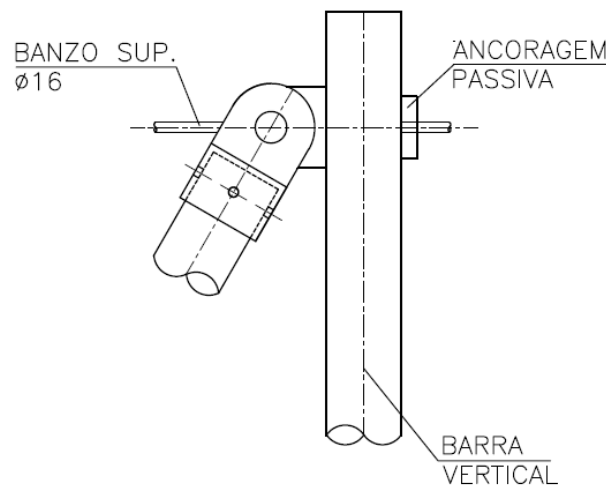


Figura 5.13. Detalhe 5, ancoragem passiva.

O funcionamento dessa ligação é análogo ao detalhe da Figura 5.5, com a diferença que a ancoragem do cabo superior do banzo é passiva. Para diminuir o peso durante a fase de lançamento, a viga só será acoplada à barra vertical após o término do desdobramento.

5.3.7. Apoio Móvel/Ancoragem Passiva

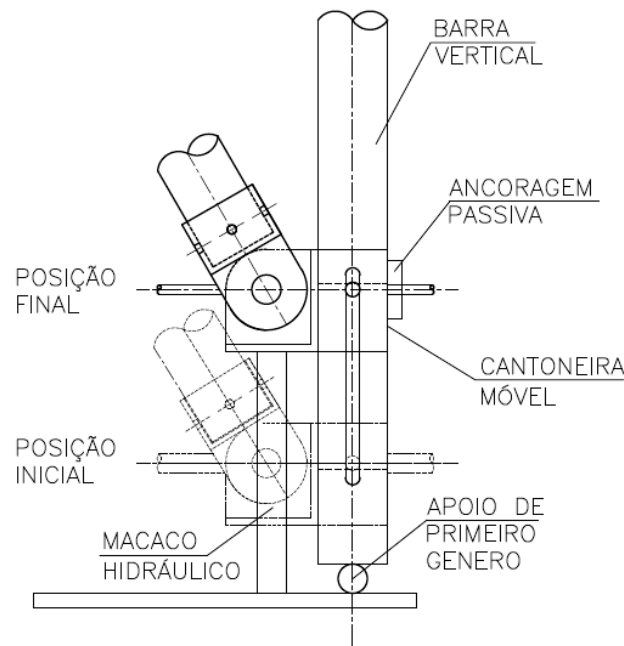


Figura 5.14. Apoio móvel/ ancoragem passiva.

A estrutura de fundação desse lado é bem mais simples, já que o projeto considera um apoio de primeiro gênero. A fundação e a barra são colocadas em um processo independente do restante. A viga se acopla à cantoneira através de um pino ao fim do processo de desdobramento e depois é erguida por um macaco hidráulico para ficar com o nivelamento desejado. Novamente, depois de estipulada a posição final, a cantoneira deve ser soldada a barra.

5.4. Cálculo da força de protensão necessária nos cabos de banzo

Devido aos carregamentos solicitantes, o cabo do banzo superior sofrerá um esforço de compressão. Para evitar que isso aconteça, é necessário aplicar uma tração equivalente à parcela de compressão devida aos carregamentos somada a uma parcela necessária para garantir a estabilidade lateral da treliça. O cálculo da parcela dos carregamentos será detalhado no Capítulo 6. Já para o cálculo da tração da parcela estabilizante, foi considerado o caso de um cabo horizontal uniformemente carregado (Fig. 5.15). Assumindo um carregamento distribuído p ao longo do vão, a força máxima T a ser aplicada pode ser calculada através das Equações 5.4 e 5.5 (SCALZI and TENG, 1969).

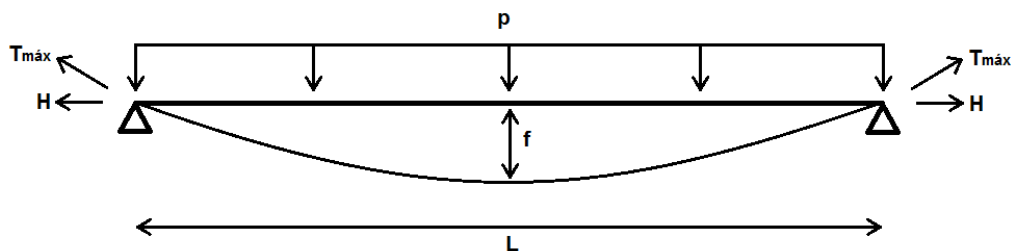


Figura 5.15. Catenária em cabo horizontal uniformemente carregado.

$$T_{\max} = H \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L} + \frac{4f}{L} \right)^2} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

$$H = \frac{pL^2}{8f} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

onde f é $L/200$, L é o comprimento do vão máximo considerado para esse estudo (10 metros) e p a carga uniformemente distribuída equivalente a 0,3% do total da força gravitacional atuando sobre a viga.

Considerando o peso próprio da estrutura e o carregamento equivalente a 30 pessoas simultaneamente na ponte, a carga p é equivalente a 0,077 kN/m. Com a equação, chega-se que a parcela da força T_{\max} que deve ser aplicada nos cabos em cada banzo da ponte é de 20 kN. Somando esse valor a parcela de 10 kN que anula a compressão após os carregamentos, encontra-se o diâmetro do cabo de aço necessário, para um fator de segurança de sete (SCALZI and TENG, 1969). A Tabela 5.1 mostra o dimensionamento considerando diversos tamanhos de vão.

Tabela 5.1. Dimensionamento cabos de aço dos banzos com carregamento uniforme p de 0,077 kN/m. Diâmetro seguiu recomendações de SCALZI and TENG (1969).

L	f (L/200)	H	Tmax	Σ Parcelas	Diâmetro Cabo
M	M	kN	kN	kN	mm
10,0	0,050	20,0	20,0	30,0	16
9,5	0,047	19,0	19,0	29,0	16
9,0	0,045	18,0	18,0	28,0	16
8,5	0,042	17,0	17,0	27,0	16
8,0	0,040	16,0	16,0	16,0	16
7,5	0,037	15,0	15,0	25,0	16
7,0	0,035	14,0	14,0	24,0	14
6,5	0,032	13,0	13,0	23,0	14
6,0	0,030	12,0	12,0	22,0	14
5,5	0,027	11,0	11,0	21,0	14
5,0	0,025	10,0	10,0	20,0	14

A aplicação de tensão nos cabos de entorno pode ser realizada através de um macaco hidráulico ligado a um tensionador em cada cabo. É importante que a mangueira do macaco seja a mesma tanto para o cabo superior quanto para o inferior, de modo que as tensões de tração aplicadas sejam as mesmas. O comprimento equivalente de “alongamento” do cabo é dado pela Eq. 5.6.

$$\delta = \frac{PL}{EA}, \quad (\text{Eq. 5.6})$$

onde δ é o alongamento provocado pela força P aplicada no cabo de aço de rigidez E , área A e vão L . Com $P = 30.000 \text{ N}$, $L = 10.000 \text{ mm}$, $E = 200.000 \text{ MPa}$ e área $A = 201 \text{ mm}^2$ ($d = 16 \text{ mm}$), temos que $\delta = 7,5 \text{ mm}$. Este é, portanto, o alongamento que deve ser aplicado em ambos os cabos das vigas, nestas condições.

5.5. Manutenção

Toda estrutura necessita de alguns cuidados de manutenção. No caso da ponte dobrável de bambu, é essencial que exista uma monitoração específica em relação às ligações, em especial as amarradas. As movimentações da estrutura dobrável somadas aos efeitos devido às variações volumétricas do material podem causar afrouxamento dos nós, gerando problemas na transferência de carga entre os elementos. Consequentemente, recomenda-se que os nós sejam apertados periodicamente.

Quanto às ligações rígidas nos copos, estas devem ser examinadas também com certa frequência para verificação de aparição de fissuras. Uma das vantagens desse sistema é que as partes da ponte são desmontáveis e eventualmente pode algum elemento danificado ser repostado sem que a estrutura precise ser retirada do local. O aparecimento de fungos e a ocorrência de penetração de água também devem ser observados com mais cautela nesses locais.

Caso a ponte passe por manutenções periódicas durante o uso, ela pode ser reutilizada desde que seja avaliado que seus componentes estão aptos para tal. Ao estocar a estrutura, o local escolhido deve possuir baixa umidade e temperatura amena, evitando a exposição direta ao sol. Nestas condições, recomenda-se algum tipo de tratamento antes e após o uso estrutural.

6. Modelos Numéricos Estruturais

6.1. Generalidades

Modelar um material biocompósito com complexa anatomia, e irregular macro e microestrutura, onde cada exemplar natural é, por definição, único, é tarefa bastante complexa. Existem diversos estudos que trabalham estas questões, como VILLALOBOS (1993), SILVA *et al.* (2006), ASKARINEJAD *et al.* (2015) e FU *et al.* (2016). Como o objetivo principal dos modelos computacionais neste trabalho não é modelar o material e sim avaliar a viabilidade do projeto em suas diferentes fases, decidiu-se apenas definir os parâmetros do material considerando-o como isotrópico. Isso se justifica também pelo projeto se tratar de uma estrutura reticulada, onde as diferenças nas propriedades mecânicas transversais não são tão relevantes. O objetivo com esses modelos é estudar o comportamento da estrutura como um todo e encontrar os parâmetros necessários para o dimensionamento da estrutura, e não seus detalhes específicos ou fenômenos locais.

As vigas e a ponte foram modeladas usando o software SAP2000 (v.14). Para isso, algumas considerações foram feitas. Os elementos de bambu foram incorporados como elementos com seção tubular de 12 e 10,5 centímetros para seus diâmetros externos e internos, respectivamente. Em todos os modelos, os elementos de bambu tiveram seu comprimento útil considerado equivalente a 2 metros e, para o vão de 10 metros, a angulação de abertura das *scissor-units* igual a 60 graus. A densidade seca de 0,7 g/cm³ foi considerada para o material de bambu, retirada da média encontrada no programa experimental.

A região do bambu recomendada para o uso na ponte é a do meio, já que esta registrou o maior módulo de elasticidade médio em diferentes ensaios. O módulo de elasticidade definido para o material foi de 11,1 GPa, retirado dos ensaios de colmo inteiro com nó desta região. Este valor é possivelmente menor

do que o real, mas foi resolvido adotá-lo por segurança. O coeficiente de Poisson do bambu foi definido como 0,3, retirado da literatura.

O material das ligações e do cabo foi o aço com módulo de elasticidade $E = 200$ GPa. Por não existirem resultados experimentais para definirem se as ligações amarradas projetadas seriam capazes de transferir os esforços de momento como necessário, considerou-se nos pivots centrais uma ligação pinada. Para criar uma estrutura com ligações que permitam rotação livre e façam transferências adequadas dos esforços, todas as ligações de pino foram modeladas com torção liberada em uma das extremidades. Além disso, os elementos de bambu tiveram os devidos momentos liberados em suas extremidades.

Quatro fases do desenvolvimento no local da ponte foram consideradas, sendo as três primeiras considerando apenas a estrutura das vigas. A primeira, quando a longarina está no final de seu processo de abertura, em balanço. A segunda, quando a viga é posicionada no solo e pode ser considerada biapoiada. A terceira, no momento em que os cabos passam a ser solicitados após a aplicação de protensão, calculada pela equação da catenária. E, por fim, o modelo final da ponte considerando diferentes tipos de carregamentos e análises dinâmicas. Em cada caso, analisou-se a deformada, os deslocamentos e os diagramas de esforços. Todos os modelos apresentados são pórticos espaciais tridimensionais, onde foi possível notar a importância e a influência das excentricidades no equilíbrio das ligações e da estrutura como um todo. Nos modelos, o comprimento da viga é dado ao longo do eixo x (1), sua largura ao longo de y (2) e sua altura ao longo de z (3). A convenção de cores nos diagramas é de amarelo para positivo e vermelho para negativo.

Para a verificação e o dimensionamento dos colmos de bambu o critério utilizado em projetos é o de tensão admissível. Como referência para este trabalho, foi considerado o menor valor médio de resistência obtido em laboratório para as amostras de durabilidade como 104 MPa. No bambu, a tensão admissível para o cortante pode adotada como 12,5% da de compressão (VILLALOBOS, 1993), equivalente a 13 MPa para o nosso caso. Os elementos de aço foram dimensionados segundo as orientações da NBR8800 (2008).

6.2. Viga em balanço

O primeiro modelo analisado representa a viga no final do seu processo de desdobramento, quando todos os cabos ainda estão frouxos e todas as ligações possuem rotação liberada. Deseja-se que a viga possa ser aberta em balanço apenas com a movimentação dos primeiros elementos de bambu, análogo ao abrir e fechar de uma tesoura. Para possibilitar a rotação desimpedida entre os elementos, pinos de conexão com torção liberada na extremidade foram inseridos nos *pivots* da estrutura (Fig. 6.1). A viga neste estágio estará apoiada somente em uma de suas extremidades. Nos elementos pantográficos, os momentos M3 foram liberados nas extremidades. A estabilidade lateral é garantida através de restrições nas extremidades, que podem ser feitas por meio de cordas e escoras durante a fase construtiva. Inicialmente, os pinos metálicos dos *pivots* superior e inferior foram modelados com 50 mm de diâmetro e os centrais com 30 mm de diâmetro.

Nesse momento, apenas o peso próprio da estrutura está agindo. Em um primeiro momento, foram analisados os deslocamentos apenas considerando os elementos de bambu, desconsiderando o peso das ligações e dos cabos. Neste caso, o deslocamento máximo encontrado no nó da extremidade livre para este caso foi de -5,4 cm. A baixa densidade do bambu faz com que a viga seja leve o suficiente para que os deslocamentos permaneçam baixos.

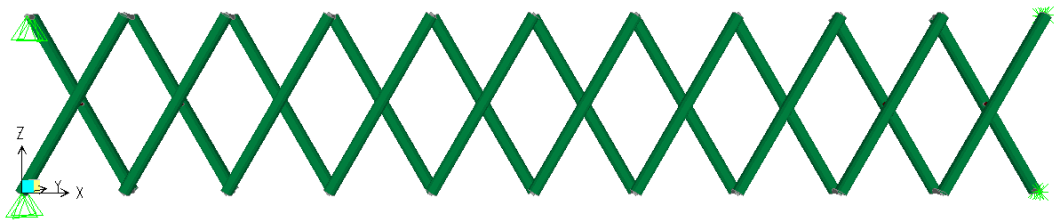
Em seguida, foram aplicadas cargas pontuais nos nós das extremidades para considerar o peso dos elementos que não estão representados no modelo. Considerando os tirantes, cabos e copos metálicos, cargas pontuais de 0,055 kN foram aplicadas em cada junta. Isto levou a um aumento do deslocamento em z para -90 cm, evidenciando o impacto do peso das ligações nesta fase do desenvolvimento da viga. Os valores máximos obtidos nos principais diagramas para cada peça são dados na Tabela 6.1.

Para a verificação do bambu, considerando a superposição de efeitos da tensão normal da força axial e do momento, temos que a tensão atuante no bambu é de 30,03 MPa (<104 MPa, F.S.: 3,5). O esforço cortante gerou uma tensão cisalhante de 0,70 MPa (<< 13 MPa). O dimensionamento final dos pinos dos *pivots* será feito adiante, considerando o pior caso de todos os estágios. As forças de reação no apoio superior e inferior foram de (-4,43; 0,00; 0,80) kN e (4,43;

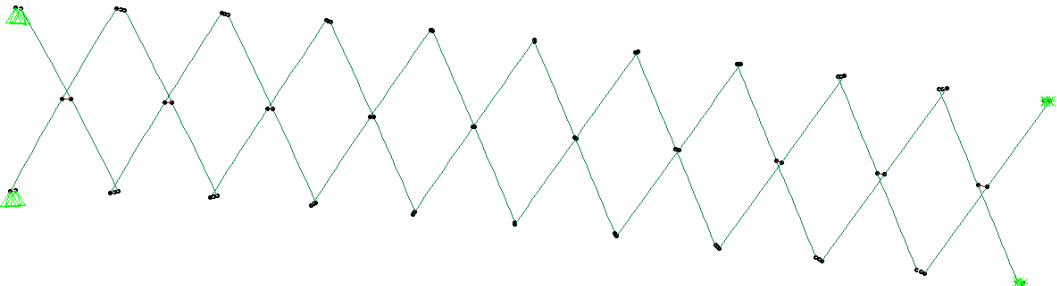
0,004; 0,80) kN, respectivamente. Estas forças devem ser usadas para o dimensionamento da fundação e dos contrapesos.

Tabela 6.1. Resultado esforços e deslocamento para a viga em balanço.

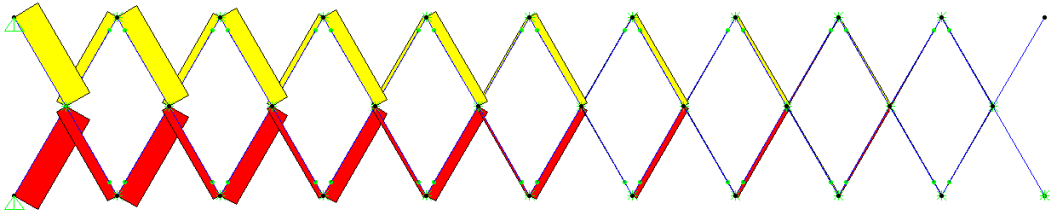
Elemento	F. Axial (kN)	M. M2 (kN.m)	M. M3 (kN.m)	Cortante (kN).	Deslocamento. (Máx., cm)
Bambu	2,8	0,19	3,48	3,48	u1: - 10
Pivot Ponta	< 0,00	0,36	0,06	3,57 (V3)	u2: 0
Pivot Central	< 0,00	0,72	0,02	7,99 (V3)	u3 : - 90



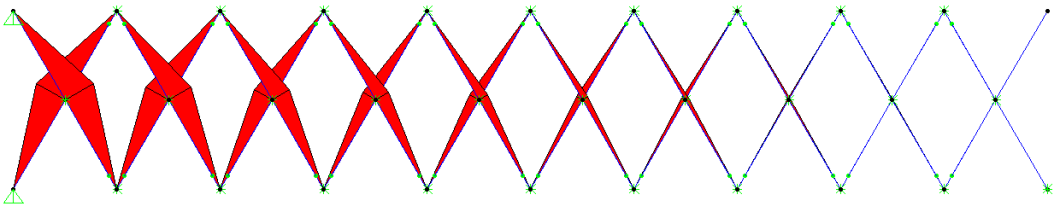
(a) Pórtico espacial da viga em balanço;



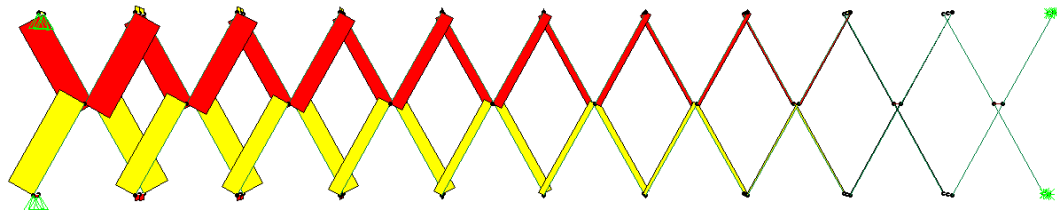
(b) vista frontal deformada ($u_{3\text{máx}} = -90$ cm);



(c) diagrama de força axial (bambu: $F_{\text{máx}} = 2,8$ kN);



(d) diagrama de momento M3 (bambu: $M_{\text{máx}} = 3,48$ kN.m);



(e) diagrama de cortante (*pivot* central: $V3_{\text{máx}} = 7,99$);

Figura 6.1. Viga em balanço e seus respectivos diagramas.

Como a viga nesse estágio é uma estrutura muito flexível, os deslocamentos verticais encontrados são muito altos. A fim de se considerar os possíveis efeitos de atrito nas ligações, foram feitos modelos com ligações rígidas em todas as juntas. No entanto, os deslocamentos permanecem praticamente inalterados, devido à relativa baixa rigidez do bambu. Existem diversas alternativas que tornam possível o controle desses deslocamentos, como um sistema de estais com contrapesos ou fixar cabos em estruturas nos dois extremos do vão para que a viga possa se lançar apoiada neles. No entanto, essas soluções aumentam o custo, diminuem o alcance da ponte e a suas maiores vantagens, como a leveza e acessibilidade. Mantendo os deslocamentos, o problema passa a ser executivo. Ao se colocar um apoio na ponta livre, a reação vertical resultante é de apenas 0,59 kN, mostrando que a viga pode ser elevada por uma equipe no local até a sua posição correta, usando cordas ou outra solução simples disponível. Além disso, existe uma pequena elevação inicial da ponte de 27 cm, devido ao processo executivo de desdobramento, diminuindo um pouco o prejuízo teórico.

6.3. Vigas biapoiadas

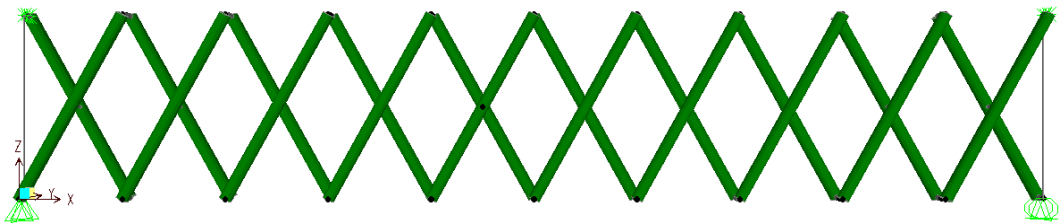
A estrutura deve ser posicionada na fundação oposta como uma viga simplesmente apoiada após o processo de desdobramento. Como explicado anteriormente, para combater a mobilidade positiva do sistema, assim que for apoiada a viga tem suas pontas unidas através de barras verticais (Fig. 6.2a). O sistema de cabos ainda não está ativo e, a princípio, apenas o peso próprio da estrutura está atuando. Novamente o peso das ligações foi determinante para os deslocamentos.

Aplicando novamente uma carga de 0,055 kN nas juntas inferiores e superiores, o deslocamento no meio do vão é de -15 cm. No entanto, é necessário montar a estrutura das transversinas e dos painéis neste momento para que um operador estique os cabos verticais antes da protensão no cabo. O peso de nove transversinas (colmos de bambu: espessura de 1,5 cm, diâmetro externo de 12 cm e comprimento de 190 cm), somado aos painéis de madeira de 5 centímetros de espessura e 150 cm de largura ao longo de 10 metros de vão, além do peso de uma pessoa de 70 kg, gera um carregamento de 0,25 kN/junta inferior. Somado à contribuição dos pesos das ligações e dos cabos, o resultado pode ser conferido na

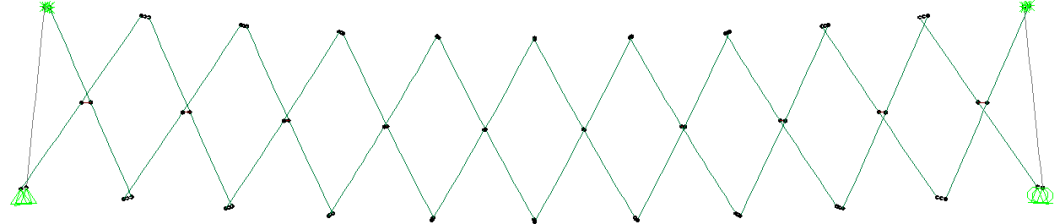
Tabela 6.2, considerando os esforços nos elementos mais solicitados. É possível notar que houve uma ligeira diminuição nos esforços tanto nos elementos de bambu quanto nas ligações em relação à viga em balanço. As reações de apoio foram de (0,0; 0,09; 2,40) kN e (0,0; -0,09; 2,40) kN, nos apoios de segundo e primeiro gênero, respectivamente.

Tabela 6.2. Resultado esforços e deslocamento para a viga biapoiada.

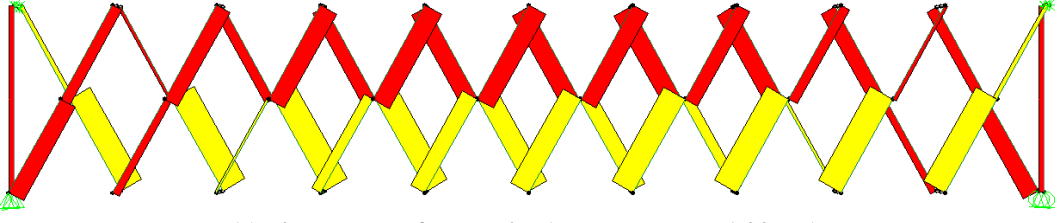
Elementos	F. Axial (kN)	M. M2 (kN.m)	M. M3 (kN.m)	Cortante (kN).	Deslocamento. (Máx., cm)
Bambu	1,99	0,17	3,2	3,14	u1: - 2,0
Pivot Ponta	< 0,00	0,32	0,02	3,56 (V3)	u2: 0,0
Pivot Central	< 0,00	0,65	0,02	7,21 (V3)	u3 : - 31



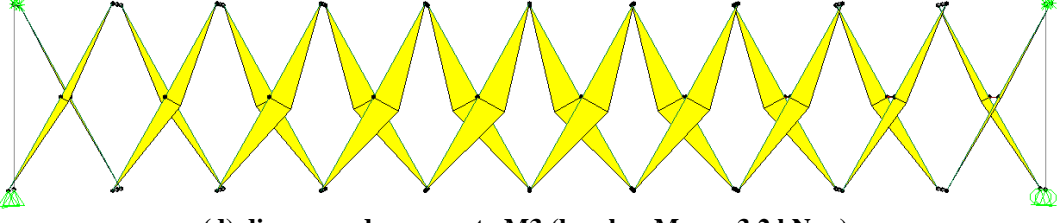
(a) estrutura biapoiada com barras verticais em ambas as pontas;



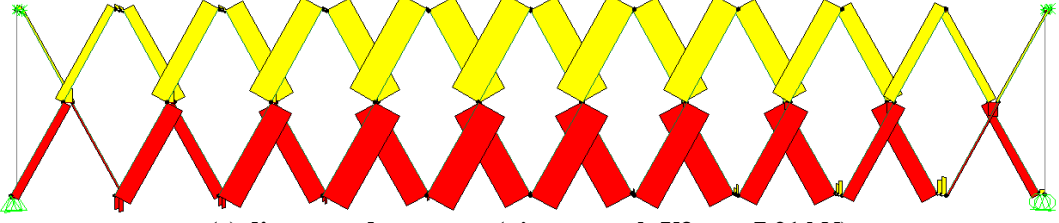
(b) deformada ($u_{3máx} = - 30 \text{ cm}$);



(c) diagrama de força axial (bambu: $F_{máx} = 1,99 \text{ kN}$);



(d) diagrama de momento M3 (bambu: $M_{máx} = 3,2 \text{ kN.m}$);



(e) diagrama de cortante (*pivot central*: $V_{3máx} = 7,21 \text{ kN}$);

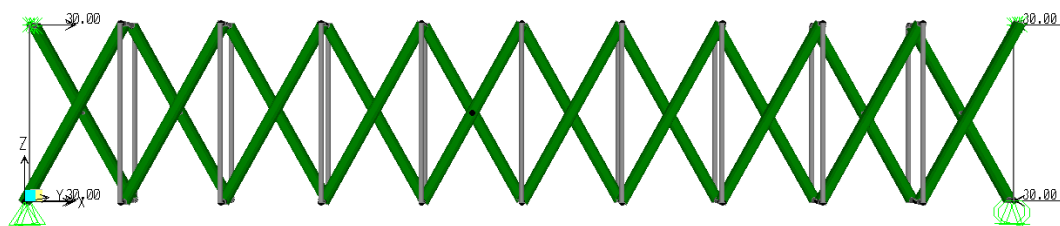
Figura 6.2. Estrutura biapoiada e seus respectivos diagramas.

6.4. Protensão nos cabos de banzo

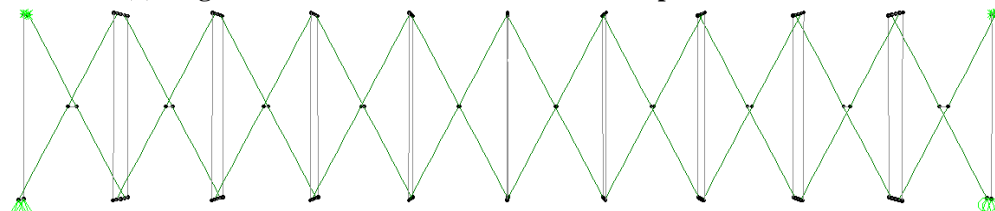
Nesse estágio, a protensão deve ser aplicada aos cabos dos banzos superior e inferior. Durante este momento e nos anteriores, os cabos ainda estão livres para correr pelas juntas, permanecendo presos apenas nas extremidades. Assim que a tração começar a ser imposta nos cabos de entorno, existirá na ponte uma tendência de recolhimento, os elementos de bambu são solicitados à compressão e os cabos verticais, ligados ao conjunto pelas ligações de copo no topo e na base dos elementos de bambu, são solicitados à tração.

O efeito da protensão dos cabos de entorno na estrutura pode ser reproduzido por forças localizadas nas juntas onde eles estarão conectados. Estas forças devem ser iguais em magnitude e complementarmente opostas, para que o produto dessa combinação seja uma estrutura auto-equilibrada (Fig. 6.3a). O valor de 30 kN destas forças foi determinado pela soma da parcela de compressão devido aos carregamentos considerados na fase final e da parcela necessária para estabilidade lateral da estrutura, calculada anteriormente, na seção 5.3.1. Todas as ligações nas juntas ainda estão completamente liberadas à rotação, assim como os elementos de bambu estão liberados ao momento fletor M3 nas suas pontas. O par de tirantes vertical foi modelado como barras de aço de diâmetro igual a 14 mm.

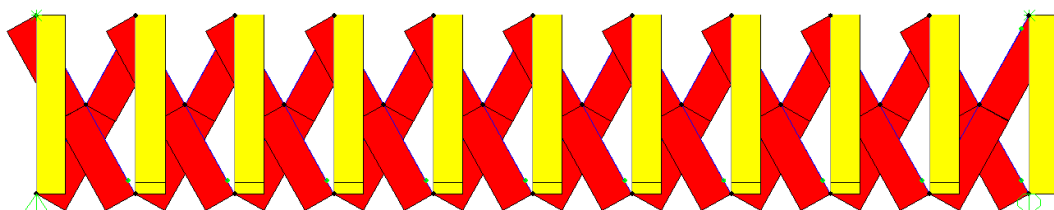
Os deslocamentos observados foram moderados. A viga sofreu um pequeno encurtamento na direção x, com seus maiores deslocamentos concentrados na extremidade do apoio de primeiro gênero. Nesta região, o deslocamento máximo em x foi igual a -11 cm e foi decrescendo ao longo da viga. Os deslocamentos verticais foram constantes em torno de 3,5 mm e os deslocamentos laterais foram nulos. A força de compressão resultante nas peças de bambu ficou praticamente constante em 61 kN. A força de tração em todos os cabos verticais foi praticamente idêntica, em torno de 56 kN (Fig. 6.3b). A protensão também resultou neles um diagrama de momento M3 simétrico, com valores não superiores a +/- 0,50 kN.m, com exceção dos elementos de tesoura das pontas (Fig. 6.3c). No diagrama de momento M2, surgiu um momento considerável nas primeiras barras de bambu (máx.: 5,43 kN.m). A força de reação nos apoios foi de (0,0; -5,81; 0,0) kN no apoio de segundo gênero e (0,0; 5,84; 0,0) kN no de primeiro.



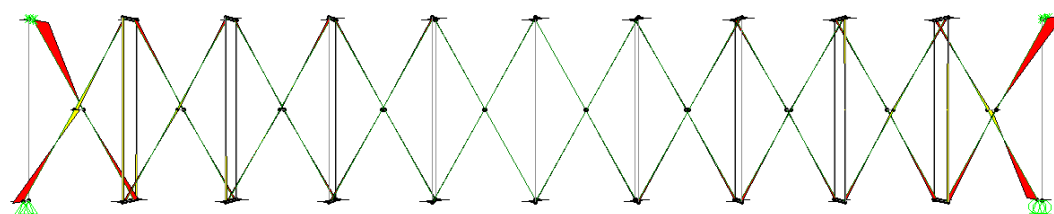
(a) cargas nodais de 30 kN simulando efeito de protensão dos cabos.



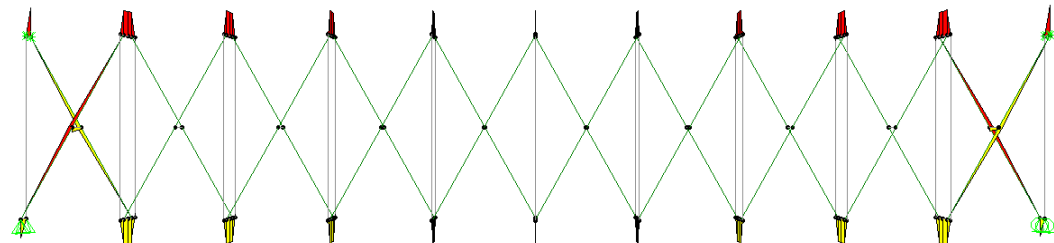
(b) deformada ($u_{1\text{máx}} = -11 \text{ cm}$);



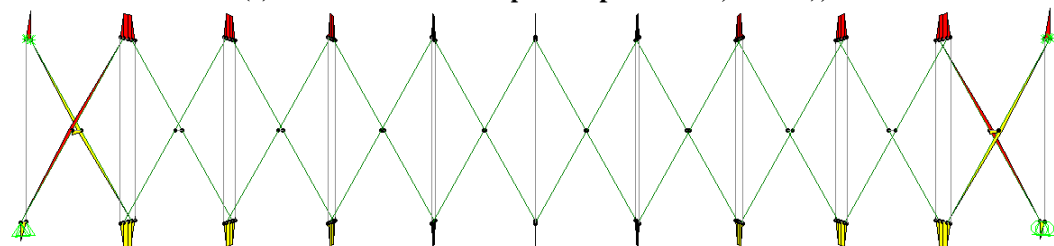
(c) diagrama de força axial (bambu: $F_{\text{máx}} = -60 \text{ kN}$);



(d) diagrama de momento fletor M_2 (bambu = $-5,43 \text{ kN.m}$, *pivot* superior = $-3,02 \text{ kN.m}$);



(e) momento fletor M_3 (*pivot* superior = $-3,2 \text{ kN.m}$);



(f) cortante V_3 (*pivot* superior = -55 kN);

Figura 6.3. Viga dobrável durante fase de protensão e seus respectivos diagramas.

Tabela 6.3. Resultado esforços e deslocamento para a viga protendida.

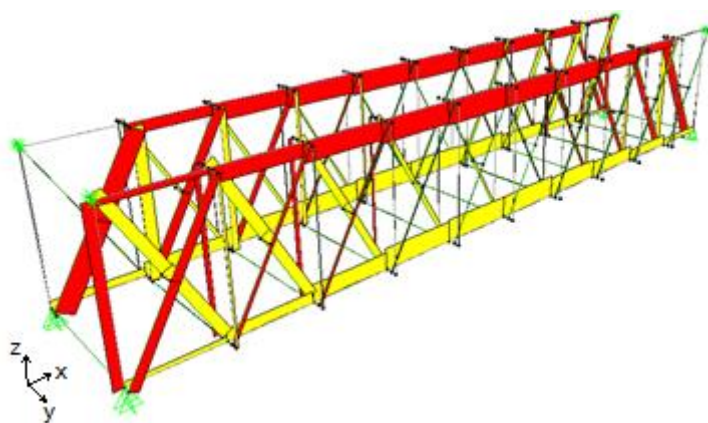
	F. Axial (kN)	M. M2 (kN.m)	M. M3 (kN.m)	Cortante (kN).	Deslocamento. (Máx., m)
Bambu	-60	-5,43	0,53	5,8 (V3)	u1: -0,11
Pivot Ponta	-2,11	-3,02	-3,2	-55 (V3)	u2: 0,00
Pivot Central	7,93	-0,70	0,29	-2,1 (V3)	u3 : -0,007
Tirantes	55	0,5	< 0,00	0,11 (V3)	

6.5. Ponte finalizada e dimensionamentos

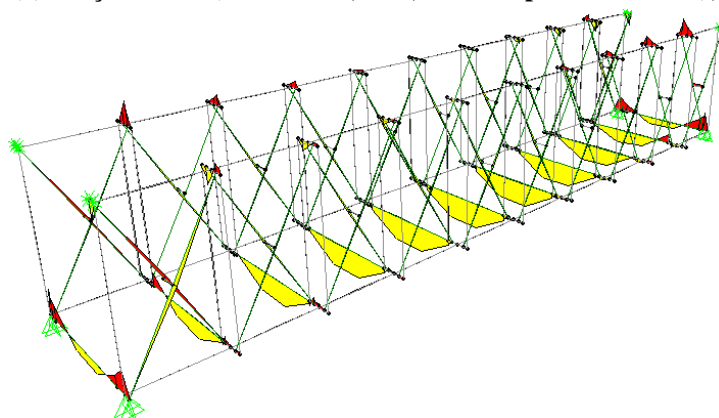
A ponte finalizada representa o modelo em que as vigas longarinas já estão com seus cabos de aço tensionados e funcionando como membros rígidos. Nesse estágio, estes cabos podem ser representados por barras retilíneas com mesmo material e área de seção. As transversinas são elementos de bambu de mesma seção que o restante e estão apoiadas nestas barras (Fig. 6.5). As rotações continuam liberadas em todas as juntas. Serão considerados diferentes tipos de carregamento para algumas situações possíveis, levando em consideração o caráter emergencial e as características do projeto. Neste estudo, foram feitas apenas análises lineares estáticas e por isso o histórico de esforços durante o desenvolvimento da ponte não foi levado em conta, podendo ser admitida a superposição dos esforços nas diferentes etapas.

6.5.1. Carga Acidental de 30 Pessoas

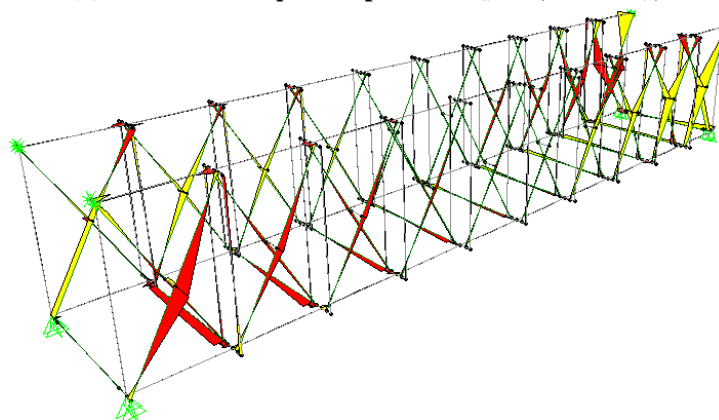
Este modelo considera como carga permanente o peso próprio da estrutura, incluindo os painéis do tabuleiro. Para cargas acidentais, considera o limite de 30 pessoas (70 kg cada) simultaneamente na ponte, aplicadas como carregamentos distribuídos de 1,2 kN/m ao longo das transversinas. Também foi aplicado um carregamento de 0,36 kN/m devido ao peso do tabuleiro. Os resultados para este caso foi dentro do esperado, demonstrando que as conexões e a solução da ponte como um todo é viável. O valor máximo encontrado da força de compressão nas barras dos banzos superiores foi pouco abaixo de 10 kN. Este valor foi utilizado para somar à parcela calculada na Eq. 5.5 e se obter o valor de protensão nos cabos. Com este valor, a protensão impede que o cabo entre em compressão e permite que a estrutura como um todo permaneça em equilíbrio. A geometria da estrutura resultou também em valores baixos no diagrama de momentos fletores e os deslocamentos em todos os pontos foram inferiores a 6 mm. Neste caso, a maior força de compressão encontrada nos elementos de bambu foi de 7,1 kN.



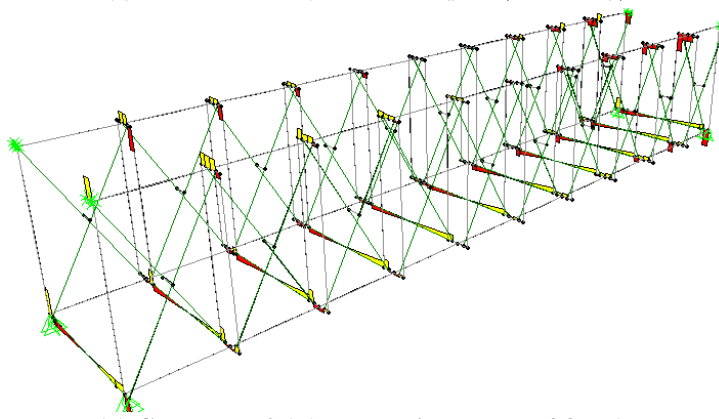
(a) Forças Axiais (bambu = -7,1 kN, banzo superior = -10 kN);



(b) Momento M3 (*pivot* superior $M_{\text{máx}} = 0,28 \text{ kN.m}$);



(c) Momento M2 (bambu: $M_{\text{máx}} = 0,11 \text{ kN.m}$);



(d) Cortante V2 (*pivot* superior $V_{\text{máx}} = -4,8 \text{ kN}$);

Figura 6.4. Diagrama da estrutura finalizada.

Para dimensionamento das peças de bambu, como os valores de momento fletor são baixos comparados às forças axiais, com exceção dos elementos dos cantos, é preciso achar a força total crítica de compressão P_T atuando nas peças de bambu, dada pela Eq. 6.1:

$$P_{CB1} + P_{CB2} = P_T, \quad (\text{Eq. 6.1})$$

em que P_{CB1} representa o maior valor de esforço de compressão para os carregamentos considerados (7,1 kN) e P_{CB2} a compressão resultante do processo de protensão (60 kN). A força total crítica P_T atuando nas peças de bambu é de 67,1 kN (7,1 kN + 60 kN). A tensão máxima admissível de projeto recomendada pela ISO 22517-2004b é dada pela Eq. 6.2:

$$\sigma_t = \frac{f_k GF}{S} \quad (\text{Eq. 6.2})$$

onde σ_t é a tensão admissível em N/mm²; f_k a resistência característica de laboratório; G o fator de correção entre a prática e o laboratório, geralmente adotado 0,5; F o fator relativo a duração da carga e S o fator de segurança, adotado geralmente como 2,25. Considerando estes dados e o menor valor médio de resistência obtido em laboratório para as amostras de durabilidade como 104 MPa, chega-se que a tensão admissível de 29,2 MPa. Para a carga de 68 kN, a área de seção necessária para o colmo seria de 2421 mm². Assumindo uma espessura igual a 15 mm, o diâmetro externo mínimo de utilização é, portanto, equivalente 66,4 mm. Considerando que em média o diâmetro externo do *Guadua* maduro varia entre 90 e 120 mm, a tensão atuante está dentro dos limites seguros nesses elementos.

Já a análise nos elementos de canto deve levar em consideração o momento M2 que surge devido à carga de protensão de 5,43 kN.m. Somado ao tensão de compressão axial da carga de 68 kN, temos uma tensão atuante de 60,6 MPa, acima da tensão admissível da norma. Porém, ao se comparar com o valor de resistência obtido no programa experimental de 104 MPa, pode se considerar que um fator de segurança de 1,73, suficiente para o projeto de uma estrutura provisória e de caráter emergencial. CHUNG *et al.* (2001) sugere para projetos de bambu o fator de 1,5 para estado último de tensão.

6.5.2. Carga Acidental Assimétrica

Em uma ponte de pedestres, é necessário também considerar o caso em que os carregamentos sejam assimétricos. Algum motivo pode levar aos transeuntes a se juntar apenas de um dos lados da ponte. Nesse caso, considerou-se o peso próprio da estrutura como um todo como carga permanente e como acidental as um carregamento equivalente ao peso 30 pessoas aplicada em somente metade do comprimento das transversinas.

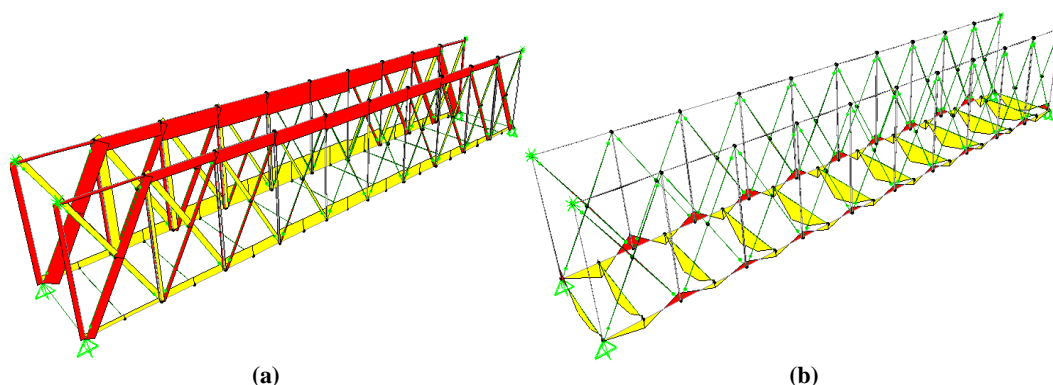


Figura 6.5. Diagramas para carregamento acidental assimétrico: a) força axial (bambu = 10,9 kN, cabo banzo superior = 13 kN); b) momento fletor M3 (*pivot*: $M_{\text{máx}} = 0,34 \text{ kN.m}$).

Os deslocamentos em z para este caso aumentaram, mas permaneceram pequenos, no valor máximo de 7 mm no meio do vão e, na maior parte da estrutura, na ordem de 1 mm. No entanto, a concentração de cargas em um lado alterou a magnitude dos esforços de compressão e tração nos elementos de bambu. A força máxima de compressão no bambu foi de 10,9 kN. A força de compressão máxima nos banzos aumentou para 13 kN em comparação com os 10 kN da condição simétrica, levando à necessidade do aumento da força de protensão para 33 kN. Somadas as parcelas de cada etapa, a carga máxima atingida de compressão no elemento de bambu é de 79 kN e um momento M2 de 5,9 kN.m. Nesse caso, o fator de segurança para o bambu cai para 1,56.

6.5.3. Dimensionamento dos Pinos

Para o dimensionamento dos pinos, foi levada em consideração a fase em que eles são mais solicitados, durante a protensão dos cabos. Os diagramas de momento e cortante no pino são dados na Fig. 6.6. No entanto, como os elementos de bambu foram modelados como barras, os diagramas não levam em consideração a geometria tubular do bambu. Por conta disso, os esforços para o

cálculo do dimensionamento foram considerados imediatamente após o fim da seção considerada para o colmo do bambu (Fig. 6.7).

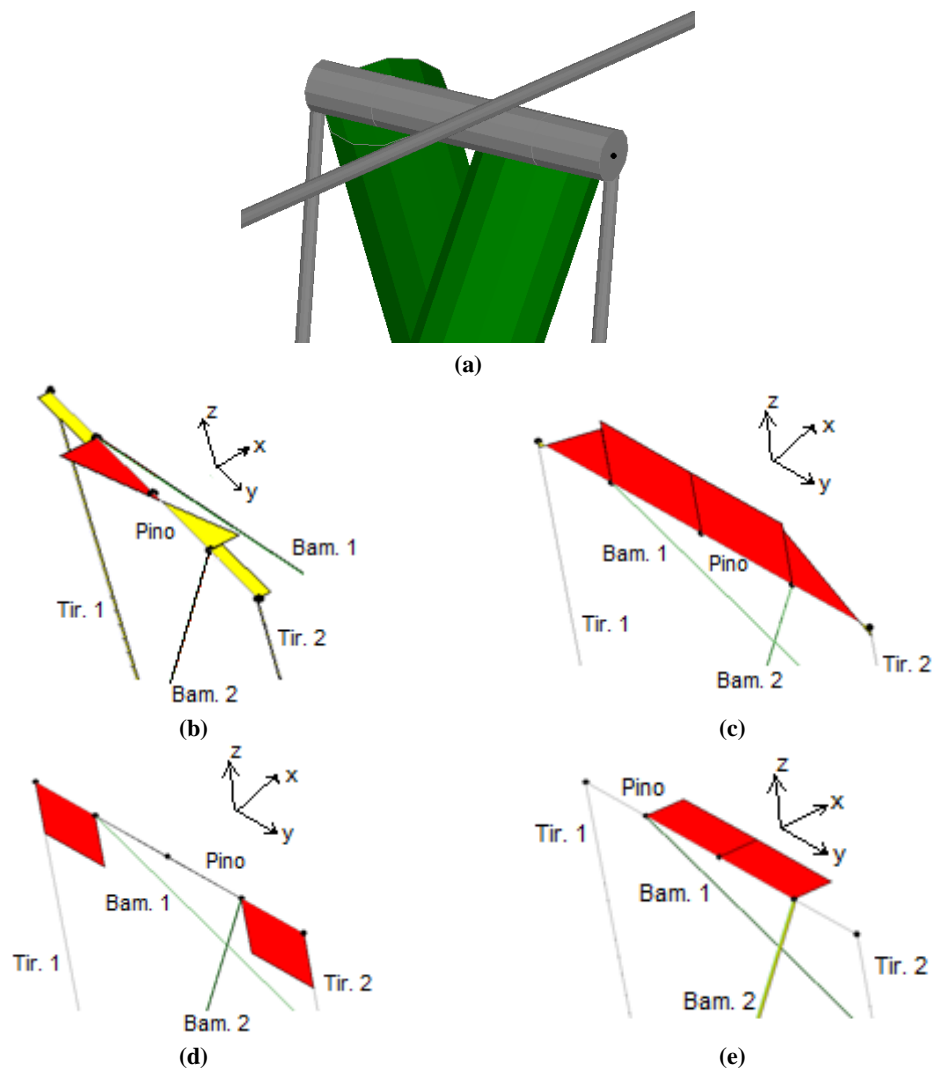


Figura 6.6. *Pivot superior e diagramas: a) pino conectando bambus, tirantes e cabo; b) Momento $M_{2\text{máx}} = -1,3 \text{ kN.m}$; b) $M_{3\text{máx}} = -3,2 \text{ kN.m}$; c) Cortante V_2 (55 kN); d) V_3 (-33 kN).*

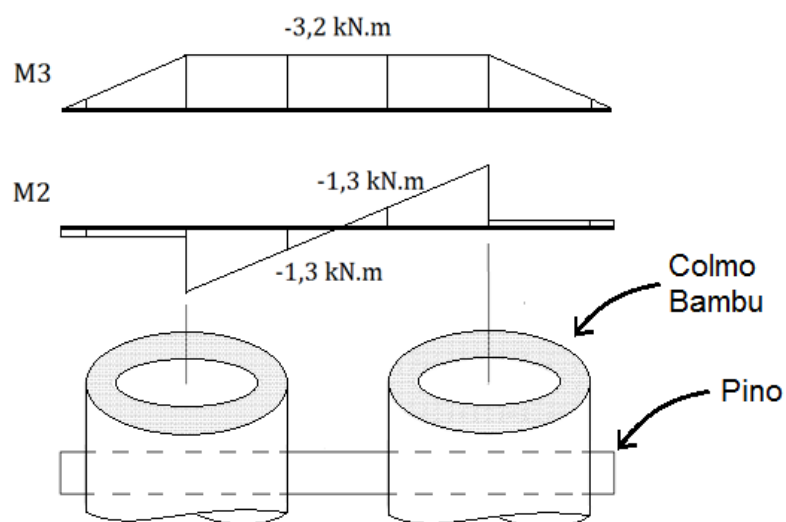


Figura 6.7. Momentos usados no cálculo da resultante para dimensionamento do pino.

Com a resultante desses momentos de -3,2 e -1,3 kN.m, usou-se as recomendações da norma NBR 8800:2008 (itens 6.4.2.1 e 6.4.2.2) para o dimensionamento dos pinos para momento e cortante (Eq. 6.3 e 6.4).

$$M_{Rd} = \frac{1,2Wf_y}{\lambda_{al}}, \quad (\text{Eq. 6.3})$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,60A_w f_y}{\lambda_{al}}. \quad (\text{Eq. 6.4})$$

Para o cálculo, as solicitações foram multiplicadas por um fator de 1,3. O f_y considerado foi de 350 MPa, o fator de ponderação λ_{al} como 1,3 e A_w sendo 0,75 a área do pino. Com isso, o maior diâmetro mínimo necessário comparando os dois valores é de 50 mm. Para o dimensionamento do pino central, as mesmas considerações foram feitas, só que, nesse caso, o principal esforço é o de cortante na fase de viga em balanço (7,99 kN). Usando a Eq. 6.4, o menor diâmetro necessário é de 14 mm.

6.5.4. Análise Modal

A análise modal para o caso de passarelas é muito importante para assegurar que a estrutura projetada tenha uma frequência natural maior do que a recomendada. A Tabela 6.4 apresenta frequências usuais para passarelas em diferentes atividades e velocidades (Vs). Nesse caso, a frequência natural da ponte deve ser maior que 3,2 Hz para reduzir o risco de ressonância da estrutura. A NBR 7188:1984, que trata de cargas móveis em passarelas de pedestres, não considera uma análise dinâmica das estruturas. A NBR 8800:2008 considera a frequência mínima de 4 Hz para pisos, valor suficiente para ficar distante do usual do caminhar. A massa dos tabuleiros foi incluída através da disposição de elementos de casca finos com o material madeira, com a espessura de 5 cm, ao longo da estrutura. A densidade do material foi alterada para incluir a massa de 30 pessoas de 70 kg cada (3,2 g/cm³).

Tabela 6.4. Dados para dimensionamento de passarelas de pedestres (MEYER, 2002).

Atividade		Freq. (Hz)	Vs (m/s)
Andar	lento	~1,7	1,1
	normal	~2,0	2,0
	rápido	~2,3	2,2
Correr	normal	~2,5	3,3
	rápido	~3,2	5,5

A análise modal se fez aplicando um fator de ajuste que considera o ganho de rigidez dado pela protensão. O ganho de rigidez fornecido pela protensão ao cabo foi calculado multiplicando o momento de inércia dos cabos por um fator, calculado a partir da igualdade entre flecha máxima de uma viga biapoiada (Eq. 6.5) e a flecha considerada para o cálculo da catenária. A partir desse cálculo, temos que a rigidez EI desejada é dada pela Eq. 6.6.

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{5PL^4}{384EI} = \delta_{m\acute{a}x} = \frac{PL^4}{8H}. \quad (\text{Eq. 6.5})$$

$$EI = \frac{5HL^2}{48}, \quad (\text{Eq. 6.6})$$

sendo $H = 33000$ N, $L = 10000$ mm, $I_{cabo} = 3217$ mm⁴ (diâmetro = 16 mm), $E_{aço} = 200000$ MPa. Para garantir o acréscimo de rigidez do cabo devido à protensão, multiplicou-se o momento de inércia por um coeficiente de 535, apenas nos elementos de barra de aço dos banzos. Também foi feita uma análise verificando a influência do ganho de peso da estrutura após um evento de chuva. No programa experimental, foi possível observar um aumento do peso de 20% para amostras imersas em água durante 24 horas. É possível considerar este um caso extremo, porém possível, de um evento de chuva forte sob o material exposto. Para este caso, portanto, a densidade do material bambu foi considerada 0,85 g/cm³. Com isso, a análise modal foi realizada para identificação dos 12 primeiros modos. A tabela 6.5 mostra os resultados das maiores frequências encontradas nestas análises, para diferentes situações.

Tabela 6.5. Resultados das maiores frequências para diferentes situações.

	Frequência (Hz)
Bambu Seco Com Painéis	10,75
Bambu Seco Sem Painéis	3,79
Bambu Mol. Com Painéis	7,94
Bambu Mol. Sem Painéis	3,79

No caso da ponte seca com painéis, o primeiro modo em uma frequência natural de 10,75 Hz, bem acima da mínima recomendada pela NBR 8800:2008. Todos os modos subsequentes tiveram frequências maiores do que esta. O pior caso foi observado com a ponte molhada. Foi notada uma maior importância da influência dos painéis nesta estabilização do que o ganho de rigidez devido à protensão. Não considerando o efeito dos painéis, a maior frequência na análise modal encontrada foi de 3,79 Hz, inferior ao valor de 4 Hz recomendada pela NBR 8800:2008, mas suficientemente distante da frequência usual do caminhar (1,7 a 2,3 Hz).

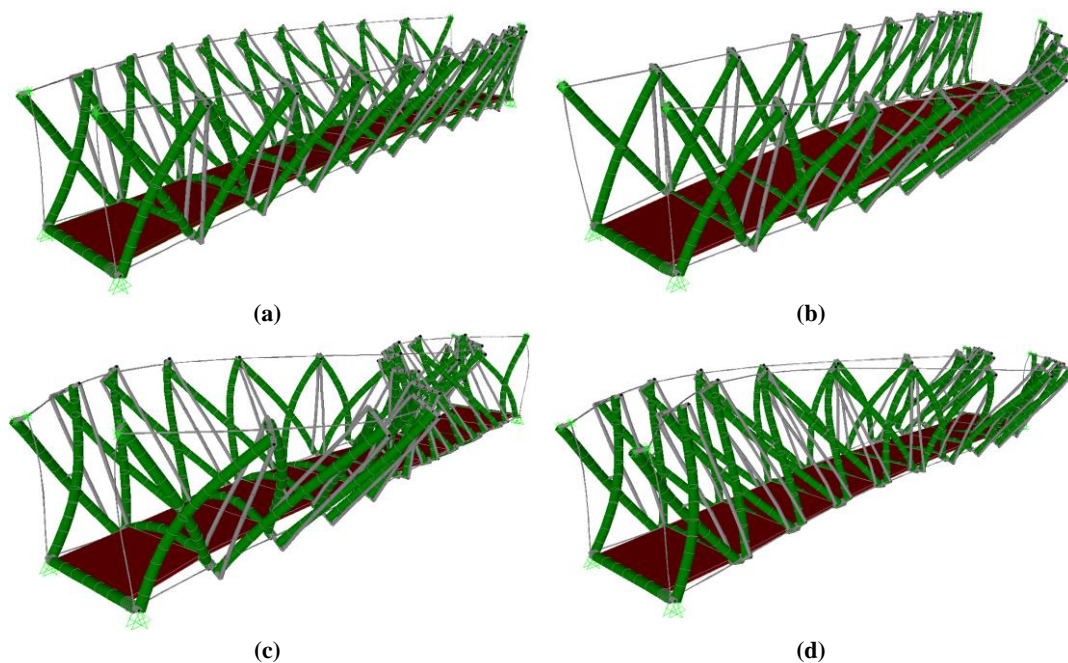


Figura 6.8. Análise modal com painéis e bambu pesado: a) Freq.: 7,94 Hz; b) Freq.: 8,3 Hz; c) Freq.: 12,8 Hz; d) Freq.: 14,5 Hz.

6.5.5. Efeitos de carga de longa duração

Do programa experimental, foi possível retirar o fator de fluência das amostras controle equivalente a 1,20 para carregamentos de longa duração no material bambu. Para simular este efeito, o encurtamento de longa duração do bambu foi simulado através de um carregamento térmico. Este encurtamento foi calculado para 20% da força de compressão atuante sobre os elementos de bambu devido ao processo de protensão e carregamento (60kN). Considerando os elementos de bambu fixos nas extremidades, temos que a deformação no material devido a diferença de temperatura é igual a deformação causada pela força gerada:

$$\varepsilon_T = L_0 \alpha \Delta T = \frac{PL}{EA} = \varepsilon_P, \quad (\text{Eq. 6.7})$$

onde L é o comprimento do elemento de bambu (2,0 m), α é o coeficiente de expansão térmica do bambu ($2,7 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$), P é a parcela da força no bambu devido à fluência (20% de 60 kN), E e A são os módulos de elasticidade do bambu (11100 MPa) e a área da seção (4948 mm²), respectivamente. Substituindo os respectivos valores, temos que a carga de temperatura a ser aplicada é de $-8,09^\circ\text{C}$, que será somada às solicitações permanentes e acidentais no modelo da ponte final (Fig. 6.9).

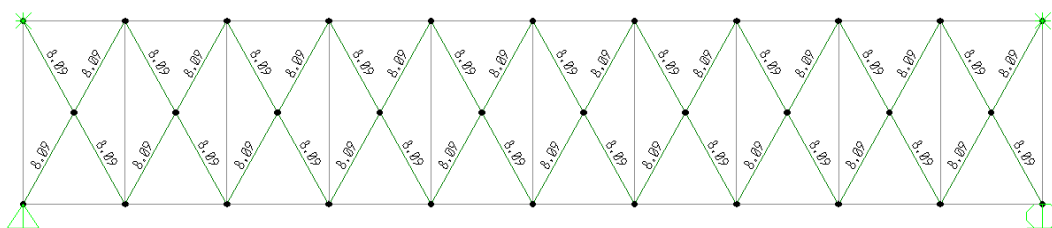


Figura 6.9. Carregamento de temperatura ($-8,09^\circ\text{C}$) aplicado às barras de bambu.

O efeito da carga de temperatura não foi muito expressivo em termos dos deslocamentos quando comparados ao modelo que desconsidera esse efeito. A força de compressão axial no bambu subiu para 9,3 kN, pouco maior do que os 7 kN encontrados anteriormente. A força de compressão nos cabos do banzo superior aumentou de 10 kN para 11,0 kN na fase final. Esse aumento, embora pequeno, deve ser levado em consideração para a aplicação de carga de protensão, uma vez que após alguns meses, mesmo com a protensão, esse efeito poderia

fazer com que os cabos deixassem de trabalhar sob tração. Como o efeito de fluência depende da carga aplicada, vale mencionar que a perda de protensão também reduz o efeito de fluência. A maneira exata de considerar esse efeito é incremental no tempo, levando-se em conta o tempo de utilização da ponte. Além disso, o projeto deve ser conduzido por processo e tentativa e erro, até que a força de protensão obtida seja a mínima necessária para que não ocorra perda de estabilidade da estrutura durante a utilização. Esse processo não foi considerado no presente trabalho.

6.5.6. Carga de vento

Foi considerada ainda a influência do vento nos deslocamentos horizontais da ponte. A estabilidade lateral deve ser garantida somente a partir dos apoios nas extremidades e o ganho de rigidez devido à protensão nos cabos. A velocidade do vento adotada foi de 35 m/s (NBR 6123/1998). Para calcular as solicitações, foram utilizadas as Eq. 6.8, 6.9 e 6.10, retiradas da NBR 6123/1988, assim como os coeficientes necessários:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3, \quad (\text{Eq. 6.8})$$

$$q = 0,613 V_k^2, \quad (\text{Eq. 6.9})$$

$$F_a = C_a q A_e, \quad (\text{Eq. 6.10})$$

onde V_k é a velocidade característica, $V_0 = 35$ m/s, $S_1 = 1,0$, $S_2 = 0,75$, $S_3 = 1,1$, A_e a área frontal efetiva e C_a o coeficiente de força. Para este caso, temos que $q = 567,07$ N/m².

Foi considerada a influência de duas forças de vento simultâneas: uma incidindo sobre os elementos de bambu e outra sobre os pedestres. Para os elementos de bambu, calculou-se uma força resultante $F_{a \text{ bambu}} = 0,05$ kN, com $A_e = 0,24$ m² ($D_e = 0,12$ m; $t = 0,015$ m; $L = 2,0$ m), $C_a = 1,2$ e um fator de recorrência igual a 0,3. Nos modelos essa força foi dividida em três componentes horizontais, aplicadas nos *pivots* superior, inferior e central. Já para a componente agindo sobre os pedestres, considerou-se pessoas distribuídas uniformemente ao longo de toda a extensão da ponte. Essa força é transferida apenas para a parte inferior da estrutura, já que as pessoas estão apoiadas sobre o tabuleiro. Dessa forma,

considerou-se $q' = q/2$, $A_e = 17,3 \text{ m}^2$ ($h = 1,73 \text{ m}$; $l = 10 \text{ m}$), $C_a = 0,5$ e um fator de recorrência novamente de 0,3, temos que $F_{a \text{ pes.}} = 0,74 \text{ kN}$. Esta força total, dividida no modelo nos nove *pivots* inferiores, resulta em uma força horizontal de 0,082 kN nas juntas (Fig. 6.10). A deformada resultante pode ser conferida na Fig. 6.11. Os deslocamentos provocados pela ação do vento foram mínimos. Mesmo sem considerar o ganho de rigidez devido a protensão do cabo, os deslocamentos horizontais em y foram todos $\leq 0,1 \text{ cm}$. Aplicando o fator de rigidez nos cabos, os deslocamentos caem para valores $\leq 0,01 \text{ cm}$.

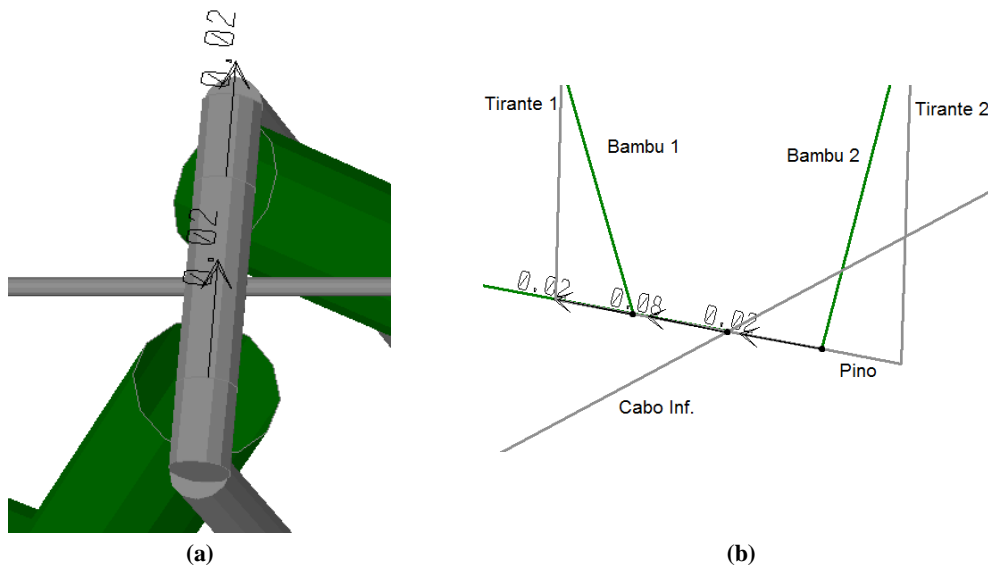


Figura 6.10. Carregamento de vento: a) *pivot superior*; b) *pivot inferior*.

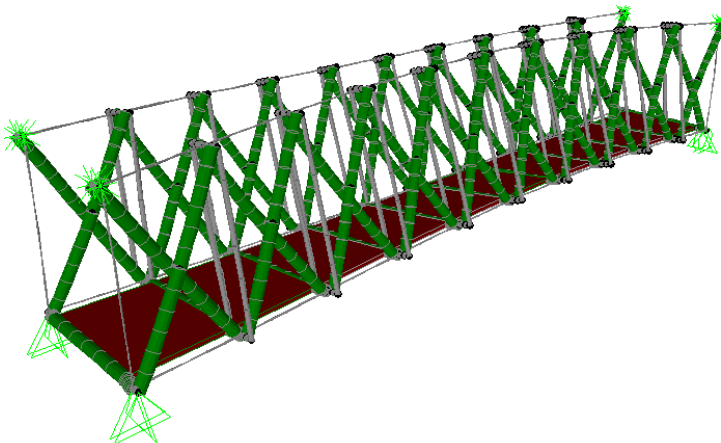


Figura 6.11. Deformada devido à ação do vento ($u_{2\text{máx}} = 0,01 \text{ cm}$).

7. Conclusões

7.1. Considerações Finais

Nesse estudo, foi desenvolvido e estudado o projeto de uma ponte dobrável para situações de emergência, considerando a utilização do bambu como principal material construtivo. Uma revisão bibliográfica sobre a anatomia do bambu, suas propriedades mecânicas e gerais foi realizada, considerando os aspectos mais relevantes para o projeto. Também foi feita uma revisão breve sobre o histórico e o estado atual dos projetos de pontes de rápida montagem, assim como os principais conceitos para se projetar estruturas pantográficas.

Um programa experimental foi desenvolvido considerando na medida do possível as condições reais de aplicação da ponte proposta. Para isso, ensaios não convencionais foram realizados comparando grupos de controle e durabilidade, em que as amostras foram submetidas a ciclos de imersão em água e seca em estufa. Foram feitos ensaios de compressão paralela às fibras com amostras de colmo inteiro com nó, ensaios de compressão com carregamento combinado (CLC), ensaios de flexão com hastes retiradas do entrenó e ensaios de fluência, novamente com hastes. As seguintes conclusões dos resultados do programa experimental foram tiradas:

- a. O aparato de fibras de carbono e resina plástica para evitar a falha por esmagamento das fibras na extremidade das amostras de colmo inteiro, apesar de encarecer e dificultar o ensaio, foi satisfatório. Apenas 1 entre 18 amostras demonstraram esse tipo de falha, número bem menor do que é reportado na literatura. Os valores de rigidez foram obtidos através do transdutor da máquina, e os seus resultados e os de resistência foram dentro do esperado para amostras com nó da espécie *Guadua*.
- b. Os ensaios de CLC foram consistentes com o esperado e o cuidado no preparo das amostras foi essencial. Os resultados de rigidez foram

maiores do que os de compressão com o colmo e similares aos de flexão, no caso das amostras controle.

- c. Os ensaios de flexão com hastes tiveram resultados dentro do esperado.
- d. Os ensaios de fluência com amostras controle obtiveram valor médio para o fator de fluência de 1,20 após 80 dias e deformações residuais em torno de 20%, compatíveis com os resultados obtidos para fluência em flexão com hastes retiradas dos entrenós.
- e. Em um estudo paralelo, foi possível notar que os ciclos de 24 horas de imersão em água seguidos por 24 horas em estufa (temperaturas de 35°C e 45°C) diminui a capacidade de absorção de água nas amostras. Esse efeito pode estar associado ao fenômeno de hornificação, o que explica o considerável ganho de rigidez reportados nos ensaios de compressão CLC, flexão e fluência. A influência desse fenômeno parece estar associada com o teor de umidade prévio ao início dos ciclos.
- f. O atrito entre a corda de nylon e o bambu se mostrou suficiente para garantir a segurança do nó do fiel.

Levando esses resultados em consideração, foi feito o projeto da ponte e os modelos numéricos respectivos às diferentes fases de seu desenvolvimento. Foram propostos sete tipos de ligações diferentes, que possibilitam a rotação desimpedida dos elementos enquanto realizam transferência de cargas necessárias. A ponte proposta tem vigas que são lançadas sobre o vão em balanço, com sistema de contrapesos a cabos auxiliares para manter a estabilidade no processo. Ao final, as vigas são biapoiadas e a estrutura das transversinas e painéis é montada. Para aumentar a rigidez, cabos de aço nos banzos são pré-tracionados considerando os esforços futuros e a estabilização horizontal da ponte. Dessa forma os cabos verticais que funcionam como tirantes são também tracionados e a estrutura das longarinas funciona em treliça.

Os modelos numéricos foram feitos para cada fase, considerando pórticos espaciais, comportamento linear do material e a superposição de efeitos nas fases. A estrutura como um todo se demonstrou muito flexível na fase de lançamento em balanço e biapoiada, devido às suas ligações pinadas de rotação livre. Foi possível notar a importância do peso das ligações de aço nos resultados obtidos. Os deslocamentos observados nessa fase podem representar problemas de execução

no local, porém não inviabilizam o projeto. Essa escolha parte do princípio que soluções para estes problemas tornariam a ponte mais cara e menos acessível, o que vai de encontro à proposta inicial. Na fase de protensão foram observados os principais esforços nos elementos de bambu e de ligação, e baixos deslocamentos. Ao fim, a estrutura completa da ponte foi modelada e avaliada para os casos de carregamento simétrico e assimétrico de 30 pessoas simultaneamente na ponte. Com os resultados obtidos, foi feito o dimensionamento dos elementos de ligação e a verificação da tensão atuante nos elementos de bambu. Foram feitas análises modais considerando a massa total dos painéis e das pessoas e do ganho de peso do bambu devido a um grande evento de chuva, com resultados gerais satisfatórios de frequência, acima de 4 Hz. O efeito da fluência também foi estudado através da aplicação de um carregamento de temperatura, com pouca influência na resposta estrutural.

7.2. Sugestão para trabalhos futuros

Para preencher algumas lacunas observadas ao longo do programa experimental e do desenvolvimento do projeto, algumas sugestões para futuros trabalhos podem ser feitas:

- Ensaios mecânicos de outros tipos de solicitação e com ciclos de molhagem e secagem com duração variada, a fim de se estudar melhor os possíveis efeitos de hornificação no bambu.
- Ensaio de CLC com amostras de diferentes dimensões para se melhor avaliar o potencial de caracterização deste tipo de ensaio.
- Estudos que correlacionem a resistência do material e a geometria do colmo do bambu para que a variabilidade do material seja melhor entendida.
- Ensaios mecânicos das ligações amarradas no bambu para que o funcionamento da distribuição de esforços destas seja mais bem entendido.
- Consideração de outros tipos de materiais para as ligações e os cabos, a fim de se diminuir o peso total da estrutura.
- Avaliar através de modelos numéricos o comportamento da ponte para diferentes vãos, alterando o ângulo relativo entre os elementos pantográficos.

- Desenvolver protótipos das ligações sugeridas e do protótipo da ponte em escala reduzida.

8. Referências Bibliográficas

- ABNT, NBR. 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, 2008.
- ABNT, NBR7188. 7188–Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre. *Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro*, 1984.
- Akgün, Yenal; Korkmaz, Koray. Simulation of a Novel Primary Element to Increase the Form Flexibility of Deployable Scissor Structures. *Proceeding Number*, v. 600, p. 02.
- Albermani, F.; Goh, G. Y.; Chan, S. L. Lightweight bamboo double layer grid system. *Engineering structures*, v. 29, n. 7, p. 1499-1506, 2007.
- Alexander, David E. Principles of emergency planning and management. *Oxford University Press on Demand*, 2002.
- Amada, S., Munekata, T., Nagase, Y., Ichikawa, Y., Kirigai, A., & Zhifei, Y. (1996). The mechanical structures of bamboos in viewpoint of functionally gradient and composite materials. *Journal of Composite Materials*, 30(7), 800-819.
- Amada, Shigeyasu; Untao, Sun. Fracture properties of bamboo. *Composites Part B: Engineering*, v. 32, n. 5, p. 451-459, 2001.
- American Bamboo Society, Official Website, ABS, BAMBOO, Bamboo.org. <http://www.bamboo.org/index.php> , acessado em 08/2018.
- Aoyagi, Shoko; Nakano, Takato. Effect of longitudinal and radial position on creep for bamboo. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, v. 58, n. 1, p. 57-61, 2009.
- Arce-villalobos, Oscar Antonio. Fundamentals of the design of bamboo structures. 1993. Tese de Doutorado. *Technische Universiteit Eindhoven*.
- Askarinejad, S., Kotowski, P., Shalchy, F., & Rahbar, N.. Effects of humidity on shear behavior of bamboo. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, v. 5, n. 6, p. 236-243, 2015.

- Askarinejad, S., Kotowski, P., Shalchy, F., & Rahbar, N.. Effects of humidity on shear behavior of bamboo. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, v. 5, n. 6, p. 236-243, 2015.
- Atanda, J. Environmental impacts of bamboo as a substitute constructional material in Nigeria. *Case Studies in Construction Materials*, v. 3, p. 33-39, 2015.
- Awaludin, Ali; Andriani, Viki. Bolted bamboo joints reinforced with fibers. *Procedia Engineering*, v. 95, p. 15-21, 2014.
- Azzini, A. Ciaramello; D nagai, V. Densidade básica e dimensoes das fibras em bambus do gênero Guadua. *Bragantia (Brasil)* v. 36 (nota1) p. 1-5., 1977.
- Bayman, Benjamin F. Theory of hitches. *American Journal of Physics*, v. 45, n. 2, p. 185-190, 1977.
- Bedoya, A.; Delgado, F. Gordillo; Marin, E. Measurement of the thermal expansion coefficient of Guadua angustifolia-Kunth using the photoacoustic technique. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2016. p. 012103.
- British Standards Institution, 2005. *Eurocode 3: design of steel structures*. London: BSI.
- Carlsson, Leif A.; Adams, Donald F.; Pipes, R. Byron. *Experimental characterization of advanced composite materials*. CRC press, 2014.
- Chen, T. Y.; Chih, C. H.; Chen, H. C. Determination of the moisture content at fiber saturation point of bamboo by nondestructive testing method with stress wave timer. In: *Proceedings of the fifth world conference on timber engineering, Montreaux, Switzerland*. 1998. p. 820-1.
- Chen, Yan. *Design of structural mechanisms*. 2003. Tese de Doutorado. University of Oxford.
- Chikahiro, Y., Ario, I., Nakazawa, M., Ono, S., Holnicki-Szulc, J., Pawlowski, P. & Watson, A. (2016). Experimental and numerical study of full-scale scissor type bridge. *Automation in Construction*, 71, 171-180.
- Chinese Standard JG/T 199-2007 *Testing Methods for Physical and Mechanical Properties of Bamboo Used in Building*
- Chung, K. F.; Yu, W. K. Mechanical properties of structural bamboo for bamboo scaffoldings. *Engineering structures*, v. 24, n. 4, p. 429-442, 2002.

- Culzoni, R.A.M. Características dos bambus e sua utilização como material alternativo no concreto. 134p. Tese de Doutorado. Dissertação de mestrado. *Rio de Janeiro: PUC-RJ*, 1986.
- Davies, Chris. Bamboo Connections. *Department of Architecture and Civil Engineering, The University of Bath*, 2008.
- De Temmerman, N.; Mira, L. Alegria. Development of a sustainable construction system for temporary structures. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, v. 150, p. 285-296, 2011.
- Delgado, Eduardo Salas. *Actualidad y futuro de la arquitectura de bambú en Colombia*. 2008. Tese de Doutorado. Universitat Politècnica de Catalunya.
- European Committee for Standardization, 1994. *Eurocode 5: design of timber structure*. Brussels: BSI.
- Ferreira, S. R., de Andrade Silva, F., Lima, P. R. L., & Toledo Filho, R. D. (2017). Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. *Construction and Building Materials*, 139, 551-561.
- Folle, Luis Fernando. Estudo do coeficiente de atrito para processos de estampagem. 2012.
- Freudenstein, F.; Alizade, R. On the degree of freedom of mechanisms with variable general constraint. In: *Proceedings Fourth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*. 1975. p. 51-56.
- Fu, Yang; Fang, Hai; Dai, Fengyu. Study on the properties of the recombinant bamboo by finite element method. *Composites Part B: Engineering*.
- Fu, Yang; Fang, Hai; Dai, Fengyu. Study on the properties of the recombinant bamboo by finite element method. *Composites Part B: Engineering*, v. 115, p. 151-159, 2017.
- Galeno, Eduardo. As veias abertas da América Latina. *Rio de Janeiro: Editora Paz e Terra*, p. 38, 1980.
- Gantes, Charis; Connor, Jerome J.; Logcher, Robert D. Equivalent continuum model for deployable flat lattice structures. *Journal of Aerospace Engineering*, v. 7, n. 1, p. 72-91, 1994.
- Ghavami, K. Bamboo: Low cost and energy saving construction materials. *Modern bamboo structures*, p. 5-21, 2008.

- Ghavami, K.; Rodrigues, C. de S.; Paciornik, S. Bamboo: functionally graded composite material. *Asian Journal of civil engineering (Building and housing)*, v. 4, n. 1, p. 1-10, 2003.
- Ghavami, Khosrow; Marinho, Albanise B. Propriedades geométricas e mecânicas de colmos dos bambus para aplicação em construções. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 9, n. 1, p. 107-114, 2005.
- Gottron, Jennifer; Harries, Kent A.; XU, Qingfeng. Creep behaviour of bamboo. *Construction and Building Materials*, v. 66, p. 79-88, 2014.
- Hamdan, H., Hill, C. A. S., Zaidon, A., Anwar, U. M. K., & Latif, M. A. (2007). Equilibrium moisture content and volumetric changes of *Gigantochloa scortechinii*. *Journal of Tropical Forest Science*, 18-24.
- Hidalgo López, Oscar. Manual de construcción con bambú. *Estudios Tecnicos Colombiano LTDA, Bogota*, 1981.
- ICBO, A. C. 162: Acceptance criteria for structural bamboo. *ICBO Evaluation Service Ltd., California, USA*, 2000.
- International Standards. ISO 22156-1. Bamboo Structural Design. *1st ed. Switzerland*, 2004.
- International Standards. ISO 22157-1: "Bamboo. Determination of physical and mechanical properties" *1st ed. Switzerland*, 2004.
- Jain, Seema; Kumar, Rakesh; Jindal, U. C. Mechanical behaviour of bamboo and bamboo composite. *Journal of Materials Science*, v. 27, n. 17, p. 4598-4604, 1992.
- Janssen, J. (2004). Bamboo-Determination of physical and mechanical properties-Part 1: Requirements. 2004.
- Janssen, J. J. A. An international model building code for bamboo. *The International Network for Bamboo and Rattan, draft document*, 1999.
- Janssen, J. J. A. Jules. Bamboo in building structures. 1981. Tese de Doutorado. *Technische Hogeschool Eindhoven*.
- Janssen, J.J.A. Designing and building with bamboo. *Beijing, China: International Network for Bamboo and Rattan*, 2000.
- Jiang, Z., Wang, H., Tian, G., & Yu, Y. (2012). Sensitivity of several selected mechanical properties of moso bamboo to moisture content change under the fibre saturation point. *BioResources*, 7(4), 5048-5058.

Kanzawa, Eisuke; Aoyagi, Shoko; Nakano, Takato. Vascular bundle shape in cross-section and relaxation properties of Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*). *Materials Science and Engineering: C*, v. 31, n. 5, p. 1050-1054, 2011

Kassabian, P. E.; You, Z.; Pellegrino, S. Retractable roof structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, v. 134, n. 1, p. 45-56, 1999.

Kaveh, A.; Davaran, A. Analysis of pantograph foldable structures. *Computers & structures*, v. 59, n. 1, p. 131-140, 1996.

Kim, J. J., Lee, S. S., Ra, J. B., Lee, H., Huh, N., & Kim, G. H. (2011). Fungi associated with bamboo and their decay capabilities. *Holzforschung*, 65(2), 271-275.

Köhnke, T., Lund, K., Brelid, H., & Westman, G. (2010). Kraft pulp hornification: A closer look at the preventive effect gained by glucuronoxylan adsorption. *Carbohydrate Polymers*, 81(2), 226-233.

Kosmatka, John B. Structural testing of DARPA/BIR composite army bridge treadway. *Composite structures*, v. 44, n. 2-3, p. 99-115, 1999.

Kumar, S., Shukla, K. S., Dev, I., & Dobriyal, P. B. (1994). *Bamboo preservation techniques: a review*. 1994.

Lakkad, S.C.; patel, J. M. Material properties of bamboo, a natural composite, *Fiber Science and Technology*, 14(1981) 319-22.

LI, Hongbo; SHEN, Shengping. The mechanical properties of bamboo and vascular bundles. *Journal of Materials Research*, v. 26, n. 21, p. 2749-2756, 2011.

Liese, W. Anatomy and properties of bamboo. In: *Proceedings of the International Bamboo Workshop*. 1985. p. 196-208.

Liese, Walter, and Satish Kumar. "Bamboo preservation compendium." (2003).

Liese, Walter. Preservation of a bamboo culm in relation to its structure. *World Bamboo and Rattan*, v. 3, n. 2, p. 17-21, 2005.

Liese, Walter; Köhl, Michael (Ed.). Bamboo: the plant and its uses. *Springer*, 2015.

Lo, Tommy Y.; Cui, H. Z.; Leung, H. C. The effect of fiber density on strength capacity of bamboo. *Materials Letters*, v. 58, n. 21, p. 2595-2598, 2004.

- Low, I. M.; Che, Z. Y.; Latella, B. A. Mapping the structure, composition and mechanical properties of bamboo. *Journal of materials research*, v. 21, n. 8, p. 1969-1976, 2006.
- Lubarda, Vlado A. The mechanics of belt friction revisited. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, v. 42, n. 2, p. 97-112, 2014.
- Maden, Feray; Korkmaz, Koray; Akgün, Yenal. A review of planar scissor structural mechanisms: geometric principles and design methods. *Architectural Science Review*, v. 54, n. 3, p. 246-257, 2011.
- Mahzuz, H. M. A., Ahmed, M., Dutta, J., & Rose, R. H. (2013). Determination of several properties of a bamboo of Bangladesh. *Journal of Civil Engineering Research*, 3(1), 16-21.
- Meyer, Karl Fritz. Estruturas Metálicas. *Belo Horizonte*, 224pp, 2002.
- Mira, L. A., Coelho, R. F., De Temmerman, N., & Thrall, A. P. Evaluation of design parameters for deployable planar scissor arches. *Mobile and Rapidly Assembled Structures IV*, 136, 183, 2012.
- MVCS (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento). Excerpts from NTP E100. Norma Técnica Peruana E100 BAMBÚ, 2012.
- Norma Técnica Colombiana NTC 6100, Criterios ambientales para productos de primeiro y Segundo grado de transformación de Guadua Angustifolia Kunth, 2014.
- Obataya, Eiichi; Kitin, Peter; Yamauchi, Hidefumi. Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber-foam composite structure. *Wood Science and Technology*, v. 41, n. 5, p. 385-400, 2007.
- Obermann, Tim; Laude, R. Bambú: recurso sostenible para estructuras espaciales. *Universidad nacional de Colombia, sede Medellín*, 2003.
- Paraskeva, T. S.; Grigoropoulos, G.; Dimitrakopoulos, E. G. Design and experimental verification of easily constructible bamboo footbridges for rural areas. *Engineering Structures*, v. 143, p. 540-548, 2017.
- Razak Wahab, 2005: Penetration Class and Net Dry Salt Retention of Ammoniacal Copper Quaternary, Borax Boric Acid and Copper Chrome Arsenic in 2 and 4 year-old Bamboo *Gigantochloa scortechinii*.
- Richard, M. J. Assessing the performance of bamboo structural components. Tese de Doutorado. *University of Pittsburgh*, 2013.

- Robinson, M. J.; Kosmatka, J. B. Development of a short-span fiber-reinforced composite bridge for emergency response and military applications. *Journal of Bridge Engineering*, v. 13, n. 4, p. 388-397, 2008.
- Russell, Brittani R.; Thrall, Ashley P. Portable and rapidly deployable bridges: Historical perspective and recent technology developments. *Journal of Bridge Engineering*, v. 18, n. 10, p. 1074-1085, 2012.
- Scalzi, John B.; Podolny, Walter; Teng, Wayne Chi-Yu. Design fundamentals of cable roof structures. *United States Steel Corp.*, 1969.
- Seixas, Mario Augusto; Ripper, Lucas Alves; Ghavami, Khosrow. Deployable bamboo structure for sustainable architecture. In: *Proceedings of the International Conference on Non-conventional Materials and Technologies*. 2014.
- Silva, Emílio Carlos Nelli; Walters, Matthew C.; Paulino, Glaucio H. Modeling bamboo as a functionally graded material: lessons for the analysis of affordable materials. *Journal of Materials Science*, v. 41, n. 21, p. 6991-7004, 2006.
- Silva, Emílio Carlos Nelli; Walters, Matthew C.; Paulino, Glaucio H. Modeling bamboo as a functionally graded material: lessons for the analysis of affordable materials. *Journal of Materials Science*, v. 41, n. 21, p. 6991-7004, 2006.
- Sobrino, Juan A.; Pulido, M^a. Towards advanced composite material footbridges. *Structural engineering international*, v. 12, n. 2, p. 84-86, 2002.
- Stewart, D. M. Behavior of stationiry wire ropes in tension and bending, *Trans. ASCE*, Vol. 102 (1937), pp. 606-650, Reprint No. 9 (37-1). 1937.
- Stuart, I. M. Capstan equation for strings with rigidity. *British Journal of Applied Physics*, v. 12, n. 10, p. 559, 1961.
- Sulthoni.A., 1981. Preliminary study on traditional bamboo preservation in Yogyakarta E 1983. Traditional preservation of bamboo by soaking.
- Suprapti, S. Decay resistance of five Indonesian bamboo species against fungi. *Journal of Tropical Forest Science*, p. 287-294, 2010.
- Tang, T. K. H. et al. Environment-friendly short-term protection of bamboo against molding. *The Timber Development Association of India*, v. 55, p. 8-1, 2009.
- Tang, T. K. H.; Schmidt, O.; Liese, W. Protection of bamboo against mould using environment-friendly chemicals. *Journal of Tropical Forest Science*, p. 285-290, 2012.

- Taylor, D., Kinane, B., Sweeney, C., Sweetnam, D., O'reilly, P., & Duan, K. (2015). The biomechanics of bamboo: investigating the role of the nodes. *Wood science and technology*, 49(2), 345-357.
- Teixeira, A. M. A. J.; Pfeil, M. S.; Battista, R. C. Structural evaluation of a GFRP truss girder for a deployable bridge. *Composite Structures*, v. 110, p. 29-38, 2014.
- Thomas, Gareth R.; SIA, Bernard J. A rapidly deployable bridge system. In: *Structures Congress 2013: Bridging Your Passion with Your Profession*. 2013. p. 656-667.
- Trujillo, D. Bamboo material characterisation 13. *Nonconventional and Vernacular Construction Materials: Characterisation, Properties and Applications*, p. 365, 2016.
- Unit, Business. Department of Science and technology. *Ministry OF Science & Technology, Government of India*, "R&D and technological development in Fly Ash area, Official Website, <http://www.dst.gov.in/>, acessado em 07/2017.
- Van der Lugt, P., Vogtländer, J. G., Van Der Vegte, J. H., & Brezet, J. C. (2012, April). Life cycle assessment and carbon sequestration; the environmental impact of industrial bamboo products. In *Proceedings of the 9th World Bamboo Congress* (pp. 73-85).
- Villegas, Laura; Morán, Richard; García, José Jaime. A new joint to assemble light structures of bamboo slats. *Construction and Building Materials*, v. 98, p. 61-68, 2015.
- Wakchaure, M. R.; Kute, S. Y. Effect of moisture content on physical and mechanical properties of bamboo. *Asian Journal of Civil Engineering (building and housing)*, v. 13, n. 6, p. 753-763, 2012.
- Wang, F., Shao, Z., Wu, Y., & Wu, D. The toughness contribution of bamboo node to the mode I interlaminar fracture toughness of bamboo. *Wood science and technology*, 48(6), 1257-1268., 2014
- Wegst, Ulrike GK; Ashby, Michael F. The structural efficiency of orthotropic stalks, stems and tubes. *Journal of Materials Science*, v. 42, n. 21, p. 9005-9014, 2007.
- Willeitner, Hubert; Liese, Walter. Wood protection in tropical countries. *A manual of the knowhow. Technical Cooperation of Germany (GTZ), Federal Republic of Germany*, 1992.

Xu, Q., Harries, K., Li, X., Liu, Q., & Gottron, J. Mechanical properties of structural bamboo following immersion in water. *Engineering Structures*, 81, 230-239, 2014.

9. Apêndice A – Armazenamento e Tratamento Bambu



Figura 9.1. Bambus secando ao ar livre após o corte.



Figura 9.2. Bambus cortados antes da imersão na solução de ácido bórax.

10. Apêndice B – Dados dos ciclos de molhagem e seca

10.1. Estudo paralelo

45 graus														
	Seco	Mol.	Seco	Mol.	Seco	Mol.	Seco	Mol.	Seco	Mol.	Seco	Mol.	Seco	Mol.
Amostra	31/jul	01/ago	02/ago	03/ago	04/ago	05/ago	06/ago	07/ago	08/ago	09/ago	10/ago	11/ago	12/ago	13/ago
B1	34.239	42.314	33.715	41.811	33.422	41.849	33.124	41.303	32.78	40.272	32.67	40.882	32.432	40.594
B2	35.065	42.439	34.361	42.136	34.373	42.502	34.227	42.152	33.957	41.38	33.953	41.888	33.8	41.554
B3	29.165	35.642	28.551	35.278	28.503	35.961	28.325	35.547	28.089	34.615	28.019	35.295	27.846	34.911
V. Diária	18.21	-24.62	18.96	-23.82	20.00	-25.83	19.64	-25.56	18.47	-22.89	19.88	-25.58	19.67	-25.01
V. Peso Pré	22.27	-1.88	21.08	-2.21	22.25	-2.84	20.91	-3.70	18.11	-3.89	19.96	-4.47	18.92	-4.86
V. Peso Seco	1.00	-	0.98	-	0.98	-	0.97	-	0.96	-	0.96	-	0.96	-
M1	20.993	25.864	20.241	25.685	20.203	25.853	20.074	25.577	19.994	25.223	20.043	25.655	19.922	25.614
M2	18.57	23.032	17.87	22.837	17.849	23.094	17.737	22.591	17.663	22.282	17.713	22.598	17.612	22.433
M3	21.606	26.616	20.917	26.546	20.907	26.617	20.776	26.264	20.67	26.057	20.723	26.369	20.594	26.216
V. Diária	19.01	-27.97	21.38	-27.35	22.01	-29.04	21.30	-27.63	20.71	-25.79	21.63	-28.38	21.72	-27.83
V. Peso Pré	23.47	-3.51	22.73	-3.63	23.57	-4.23	21.68	-4.66	20.25	-4.41	21.98	-4.98	21.38	-5.04
V. Peso Seco	1.00		0.96		0.96		0.96		0.95		0.96		0.95	
T1	18.579	23.051	17.843	22.728	17.814	22.961	17.703	22.496	17.625	22.363	17.67	22.639	17.569	22.304
T2	17.958	22.291	17.177	22.147	17.156	22.4	17.05	22.022	16.985	21.922	17.035	22.091	16.923	21.725
T3	16.393	20.782	15.643	20.531	15.612	20.792	15.514	20.355	15.463	20.202	15.499	20.329	15.399	19.958
V. Diária	19.99	-30.60	22.58	-29.39	23.58	-31.70	22.56	-29.64	22.39	-28.53	22.87	-30.47	22.06	-28.42
V. Peso Pré	24.99	-4.30	23.63	-4.45	25.05	-5.04	22.63	-5.41	21.89	-5.16	22.96	-5.75	20.92	-5.83
V. Peso Seco	1.00		0.96		0.96		0.95		0.95		0.95		0.94	

35 graus									
Seco	Mol.	Seco	Mol.	Seco	Mol.	Seco	Mol.	Seco	Mol.
16/ago	17/ago	18/ago	19/ago	20/ago	21/ago	22/ago	23/ago	24/ago	25/ago
34.879	40.952	34.775	40.947	35.85	41.475	35.386	40.949	34.42	40.374
36.496	42.057	36.509	42.279	37.769	42.007	37.45	42.804	36.525	42.35
29.963	35.088	29.732	35.442	30.797	35.86	30.315	35.096	29.492	34.759
14.22	-16.99	14.94	-13.75	12.59	-15.89	13.24	-18.39	14.55	
19.95	2.54	20.56	6.00	21.30	4.70	20.67	1.94	19.29	
1.03	-	1.03	-	1.06	-	1.05	-	1.02	
21.612	25.527	21.319	25.79	22.036	25.934	21.686	25.334	21.037	25.326
19.001	22.563	18.804	22.608	19.374	22.658	19.059	22.397	18.582	22.394
22.155	26.273	21.925	26.379	22.56	26.531	22.35	26.087	21.727	25.881
15.60	-19.85	17.02	-16.89	14.83	-19.06	14.54	-20.34	16.67	
21.57	1.43	22.23	4.57	22.78	3.13	20.68	0.28	20.34	
1.03		1.01		1.05		1.03		1.00	
18.96	22.487	18.682	22.487	19.311	22.499	19.012	22.263	18.486	22.132
18.264	21.862	18.019	20.002	18.62	21.933	18.358	21.599	17.809	21.503
16.615	20.074	16.349	21.951	17.044	20.082	16.576	19.75	16.147	19.602
16.46	-21.49	17.45	-17.55	14.80	-19.66	15.23	-21.34	17.09	
21.74	0.21	22.11	3.87	21.91	1.89	20.19	-0.94	19.48	
1.02		1.00		1.04		1.02		0.99	

10.2. Amostras Durabilidade Compressão Colmo

Ciclos	Seco 18/05	Mol. 19/05	Seco 23/05	Mol. 24/05	Seco 25/05	Mol. 26/05	Seco 29/05	Mol. 31/05	Seco 01/06
DB1									
Peso (g)	762	792	765	799	791	807	774	794	780
Var. (%)	3.9	-3.4	4.4	-1.0	2.0	-4.1	2.6	-1.8	
DB2									
Peso (g)	681	713	685	718	710	725	690	706	693
Var. (%)	4.7	-3.9	4.8	-1.1	2.1	-4.8	2.3	-1.8	
DB3									
Peso (g)	713	746	720	755	747	763	726	740	728
Var. (%)	4.6	-3.5	4.9	-1.1	2.1	-4.8	1.9	-1.6	
DM1									
Peso (g)	450.2	474.9	451.3	482.3	476.9	488.2	468.2	474.7	467.5
Var. (%)	5.5	-5.0	6.9	-1.1	2.4	-4.1	1.4	-1.5	
DM2									
Peso (g)	486	512	494	517	512	523	504	505	498
Var. (%)	5.3	-3.5	4.6	-1.0	2.1	-3.6	0.2	-1.4	
DM3									
Peso (g)	451.4	478.7	461.1	490.4	485.9	498.1	477.3	483.4	475.7
Var. (%)	6.0	-3.7	6.3	-0.9	2.5	-4.2	1.3	-1.6	
DT1									
Peso (g)	336.82	357.23	341.83	362.54	359.22	369.03	353.79	358.92	352.97
Var. (%)	6.1	-4.3	6.1	-0.9	2.7	-4.1	1.5	-1.7	
DT2									
Peso (g)	337.60	362.86	348.12	372.30	365.86	376.23	359.00	364.38	358.84
Var. (%)	7.5	-4.1	6.9	-1.7	2.8	-4.6	1.5	-1.5	
DT3									
Peso (g)	374.62	397.56	382.82	403.69	400.28	410.55	395.37	402.80	397.52
Var. (%)	6.1	-3.7	5.5	-0.8	2.6	-3.7	1.9	-1.3	

Comp.	MC0	MC1	MC2	MC3	MC4	MC5	MC6	MC7	MC8	MCF
DB1	39.1	41.4	39.4	41.9	41.4	42.5	40.1	41.6	40.5	18.6
DB2	39.9	42.6	40.2	43.0	42.3	43.5	40.6	42.0	40.9	17.9
DB3	41.3	43.9	41.9	44.6	44.0	45.2	42.4	43.4	42.5	14.6
DM1	38.8	42.0	39.0	42.9	42.3	43.6	41.2	42.0	41.1	12.6
DM2	42.7	45.6	43.6	46.1	45.6	46.7	44.7	44.8	44.1	13.6
DM3	39.0	42.5	40.3	43.9	43.3	44.7	42.3	43.0	42.1	13.1
DT1	39.1	42.6	40.0	43.4	42.9	44.4	42.0	42.9	41.9	13.5
DT2	38.4	42.7	40.2	44.1	43.1	44.7	42.0	42.9	42.0	12.8
DT3	41.3	44.7	42.6	45.5	45.1	46.5	44.4	45.4	44.7	13.5

10.3. Amostras Durabilidade Compressão CLC

Ciclos	Seco 02/10	Mol. 03/10	Seco 04/10	Mol. 05/10	Seco 06/10	Mol. 07/10	Seco 09/10	Mol. 10/10	Seco 11/10
DB1	35.799	41.893	32.937	40.472	31.882	40.126	29.48	38.851	30.277
DB2	33.588	38.799	30.958	37.834	30.082	37.186	27.832	35.903	28.45
DB3	31.051	37.149	29.05	36.43	28.255	35.663	26.099	34.242	26.645
V. Diaria %	17.39	-7.42	14.34	-10.13	12.55	-16.91	8.56	-14.97	-
V. Peso Seco	1.0	-	0.93	-	0.90	-	0.83	-	0.85
DB1	17.192	22.871	16.838	22.669	16.494	22.215	15.925	21.537	16.203
DB2	16.093	21.114	15.803	20.746	15.502	20.489	15.001	18.933	15.258
DB3	16.546	21.801	16.178	21.222	15.864	20.945	15.314	20.17	15.61
V. Diaria %	32.00	-2.03	29.68	-3.95	27.71	-7.20	21.61	-5.53	-
V. Peso Seco	1.00	-	0.98	-	0.96	-	0.93	-	0.94
DB1	10.42	13.895	10.126	13.596	9.97	13.32	9.766	13.232	9.899
DB2	12.704	17.26	12.351	16.869	12.169	16.58	11.889	16.303	12.048
DB3	15.557	16.024	12.189	15.925	12.042	15.585	11.791	15.518	11.933
V. Diaria %	24.07	-9.08	21.88	-10.37	19.51	-12.30	18.36	-11.15	-100.00
V. Peso Seco	1.00	-	0.90	-	0.88	-	0.86	-	0.88

CLC	MC0	MC1	MC2	MC3	MC4	MC5	MC6	MC7	MC8	MCF
DB1	30.6	40.7	24.5	38.6	22.0	38.0	15.7	36.0	17.9	10.2
DB2	30.1	39.5	24.2	37.9	22.0	36.9	15.6	34.6	17.5	9.4
DB3	27.7	39.5	22.7	38.3	20.5	37.0	13.9	34.4	15.7	9.7
DM1	33.0	49.6	31.6	49.2	30.1	48.1	27.6	46.5	28.9	9.8
DM2	39.7	54.1	38.6	53.3	37.4	52.7	35.4	48.8	36.4	9.3
DM3	32.7	48.9	31.2	47.5	29.8	46.9	27.3	44.8	28.7	9.8
DT1	20.9	40.7	18.6	39.4	17.3	38.1	15.6	37.7	16.7	9.5
DT2	23.7	43.8	21.5	42.5	20.3	41.5	18.5	40.5	19.5	10.7
DT3	38.3	40.1	21.2	39.7	20.2	38.4	18.5	38.1	19.5	10.2

10.4. Amostras Durabilidade Flexão

Ciclos	Seco 17/05	Mol. 18/05	Seco 19/05	Mol. 23/05	Seco 24/05	Mol. 25/05	Seco 26/05	Mol. 30/05	Seco 31/05
DB1									
Peso (g)	41.96	46.670	43.443	44.797	41.950	45.667	43.425	43.081	39.248
Var. (%)	11.2	-6.9	3.1	-6.4	8.9	-4.9	-0.8	-8.9	
DB2									
Peso (g)	47.853	52.191	49.392	50.606	47.984	51.508	49.363	49.881	46.801
Var. (%)	9.1	-5.4	2.5	-5.2	7.3	-4.2	1.0	-6.2	
DB3									
Peso (g)	38.027	42.579	39.849	41.161	38.553	41.917	39.706	39.835	36.740
Var. (%)	12.0	-6.4	3.3	-6.3	8.7	-5.3	0.3	-7.8	
DM1									
Peso (g)	24.06	27.145	25.207	25.492	23.126	25.864	23.939	24.101	21.321
Var. (%)	12.8	-7.1	1.1	-9.3	11.8	-7.4	0.7	-11.5	
DM2									
Peso (g)	23.963	26.848	25.203	25.045	22.566	25.253	23.322	23.355	20.760
Var. (%)	12.0	-6.1	-0.6	-9.9	11.9	-7.6	0.1	-11.1	
DM3									
Peso (g)	25.129	28.090	25.940	25.463	24.467	27.329	25.040	25.482	22.972
Var. (%)	11.8	-7.7	-1.8	-3.9	11.7	-8.4	1.8	-9.9	
DT1									
Peso (g)	24.06	27.145	25.207	25.492	23.126	25.864	23.939	24.101	21.321
Var. (%)	12.8	-7.1	1.1	-9.3	11.8	-7.4	0.7	-11.5	
DT2									
Peso (g)	23.963	26.848	25.203	25.045	22.566	25.253	23.322	23.355	20.760
Var. (%)	12.0	-6.1	-0.6	-9.9	11.9	-7.6	0.1	-11.1	
DT3									
Peso (g)	25.129	28.090	25.940	25.463	24.467	27.329	25.040	25.482	22.972
Var. (%)	11.8	-7.7	-1.8	-3.9	11.7	-8.4	1.8	-9.9	

Flexão	MC0	MC1	MC2	MC3	MC4	MC5	MC6	MC7	MC8	MCF
DB1	35.0	41.6	37.2	39.1	35.0	40.3	37.2	36.7	30.5	11.7
DB2	37.5	42.7	39.5	40.9	37.7	42.0	39.4	40.1	36.1	11.7
DB3	32.7	39.9	35.8	37.8	33.6	38.9	35.5	35.7	30.3	11.6
DM1	31.5	39.3	34.7	35.4	28.8	36.3	31.2	31.7	22.8	11.3
DM2	32.0	39.0	35.5	34.5	27.3	34.8	29.5	29.4	21.1	11.6
DM3	26.9	34.7	28.9	26.7	25.1	33.5	26.6	28.3	20.2	11.7
DT1	27.8	36.9	28.9	31.9	25.0	33.4	28.1	28.4	18.3	11.1
DT2	34.6	42.7	36.1	37.9	33.0	39.3	35.3	35.7	27.8	11.5
DT3	29.3	38.6	30.9	33.4	26.7	34.3	28.6	30.8	21.6	11.3

10.5. Amostras Durabilidade Fluência

Ciclos	Seco 17/05	Mol. 18/05	Seco 19/05	Mol. 23/05	Seco 24/05	Mol. 25/05	Seco 26/05	Mol. 30/05	Seco 31/05
DM1									
Peso (g)	28.996	32.538	30.526	30.763	28.514	31.443	29.492	30.391	27.289
Var. (%)	12.2	-6.2	0.8	-7.3	10.3	-6.2	3.0	-10.2	
DM2									
Peso (g)	28.375	31.899	29.369	30.082	27.685	30.509	29.739	30.625	27.567
Var. (%)	12.4	-7.9	2.4	-8.0	10.2	-2.5	3.0	-10.0	
DM3									
Peso (g)	28.185	31.775	29.937	30.361	27.654	29.830	28.366	29.907	27.805
Var. (%)	12.7	-5.8	1.4	-8.9	7.9	-4.9	5.4	-7.0	

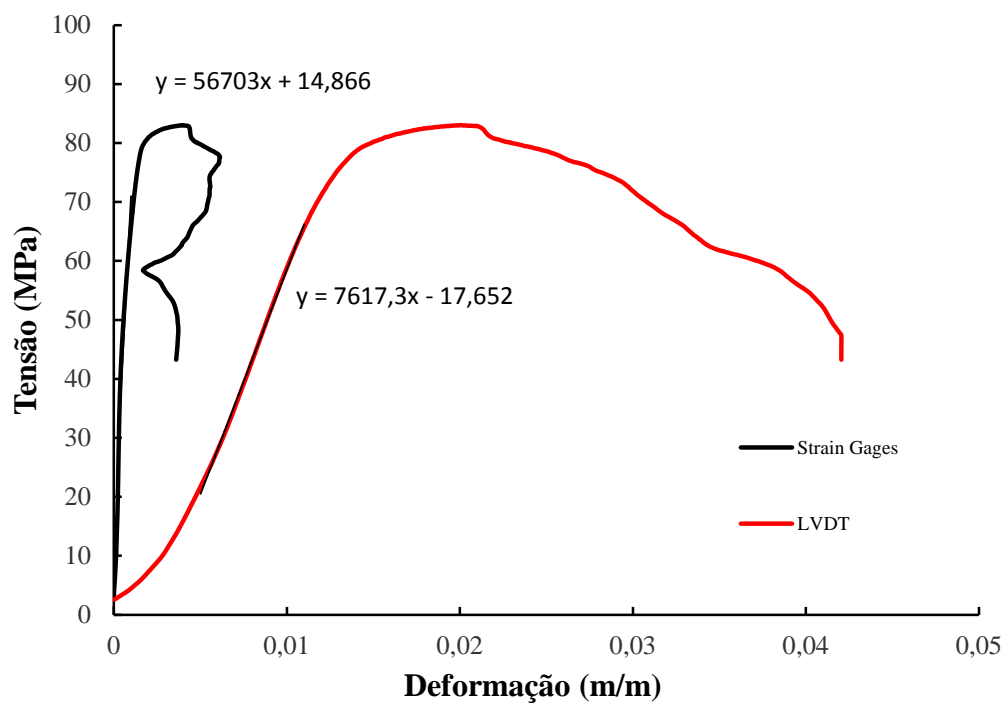
Fluência	MC0	MC1	MC2	MC3	MC4	MC5	MC6	MC7	MC8
DM1	30.2	37.8	33.7	34.2	29.0	35.6	31.4	33.4	25.8
DM2	30.5	38.2	32.9	34.4	28.8	35.4	33.7	35.6	28.5
DM3	28.0	36.2	32.2	33.2	26.6	32.0	28.5	32.2	27.0

	Peso Pré 1	Peso Pré 2	Peso Pós	M.C. 1	M.C. 2
DM1	23.053	22.309	20.241	12.2	9.3
DM2	22.452	21.771	19.719	12.2	9.4
DM3	23.099	22.394	20.287	12.2	9.4
	Peso Pré 1	Peso Pré 2	Peso Pós	M.C. 1	M.C. 2
CM1	24.946	24.317	22.100	11.4	9.1
CM2	24.974	24.355	21.131	15.4	13.2
CM3	21.182	20.7	18.810	11.2	9.1

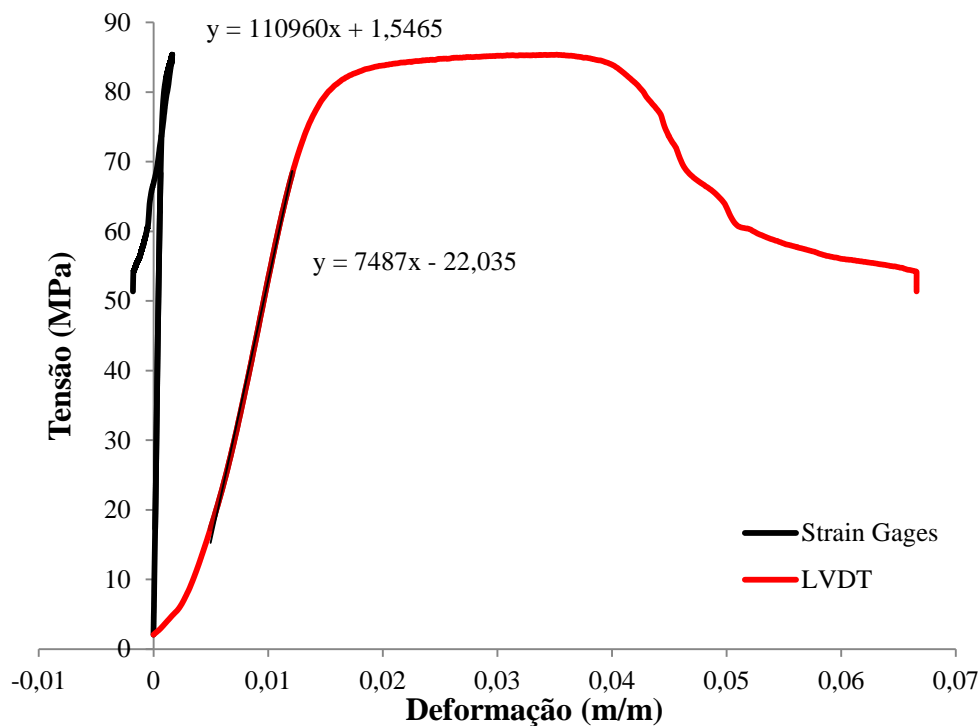
11. Apêndice C – Resultado dos gráficos de cada ensaio

11.1. Compressão Colmo (sem fator de correção k)

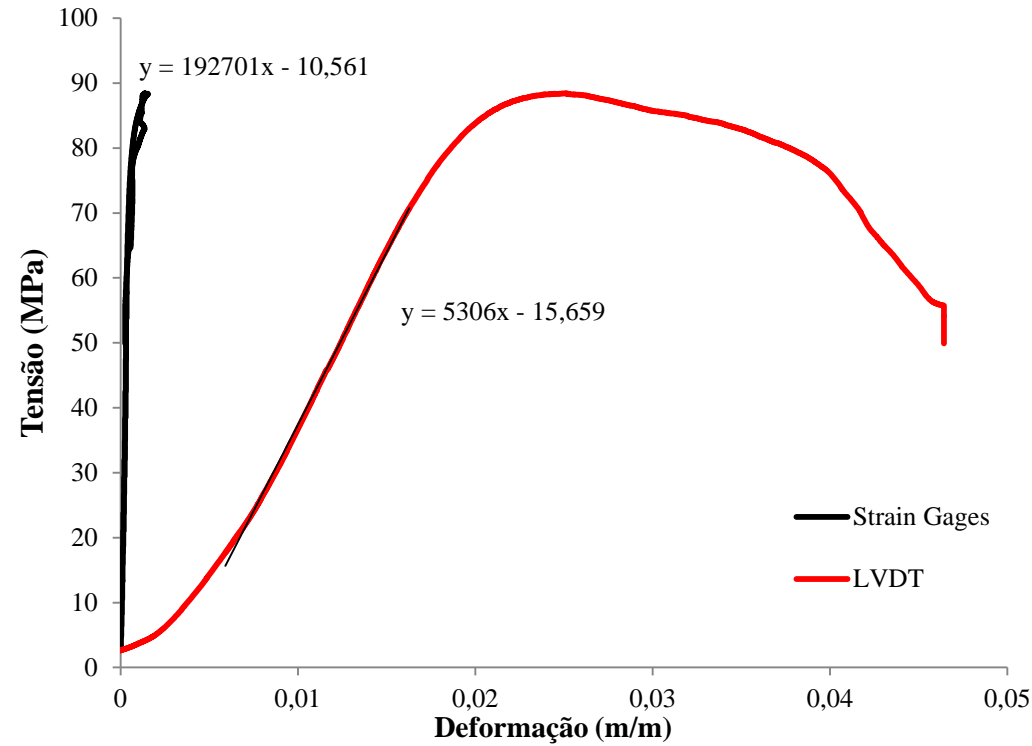
CB1:



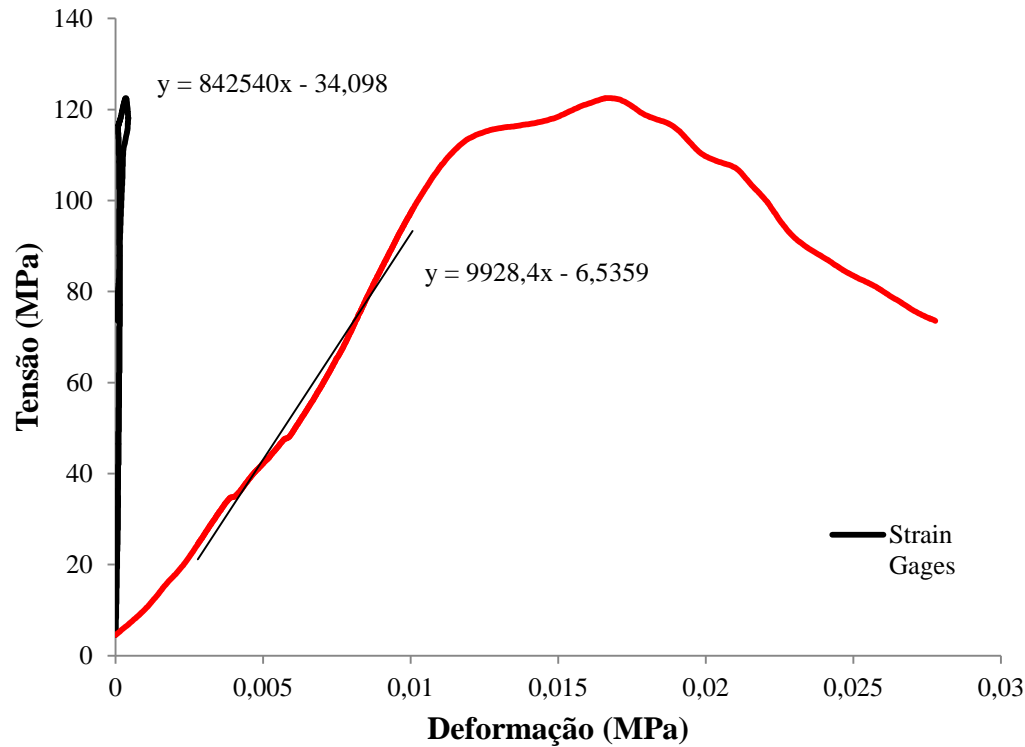
CB2:

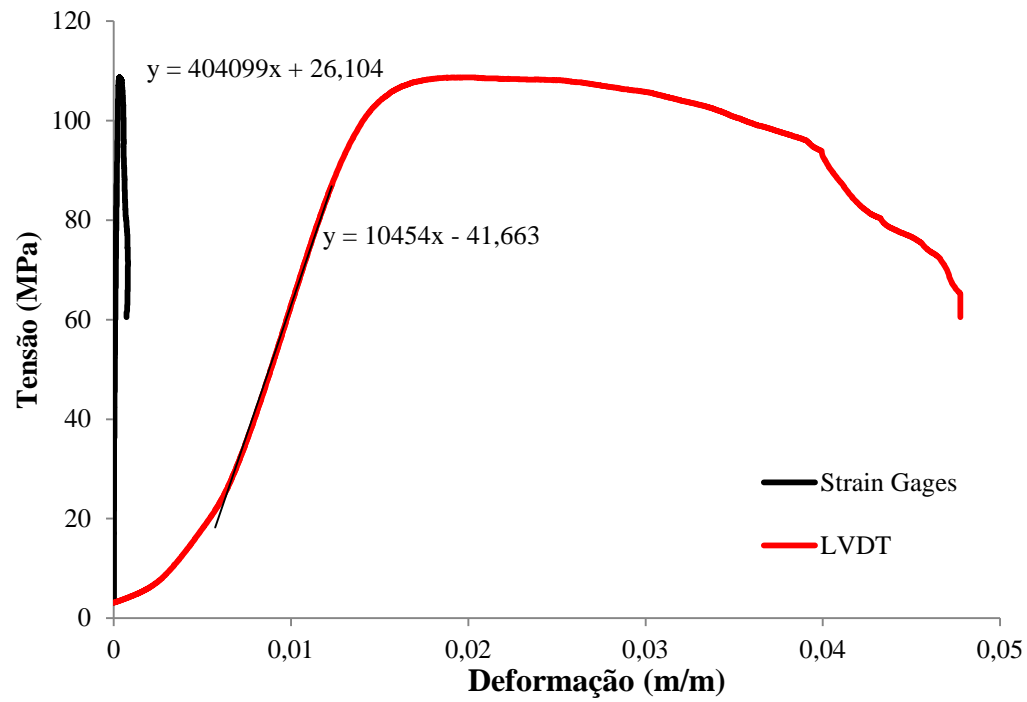
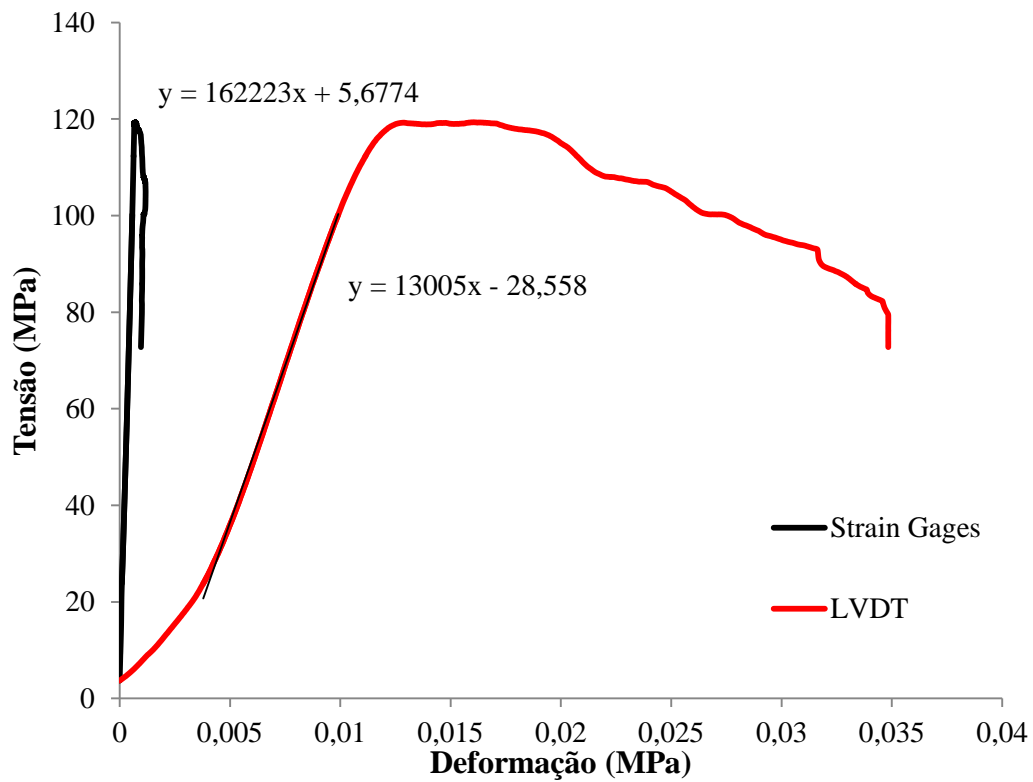


CB3:

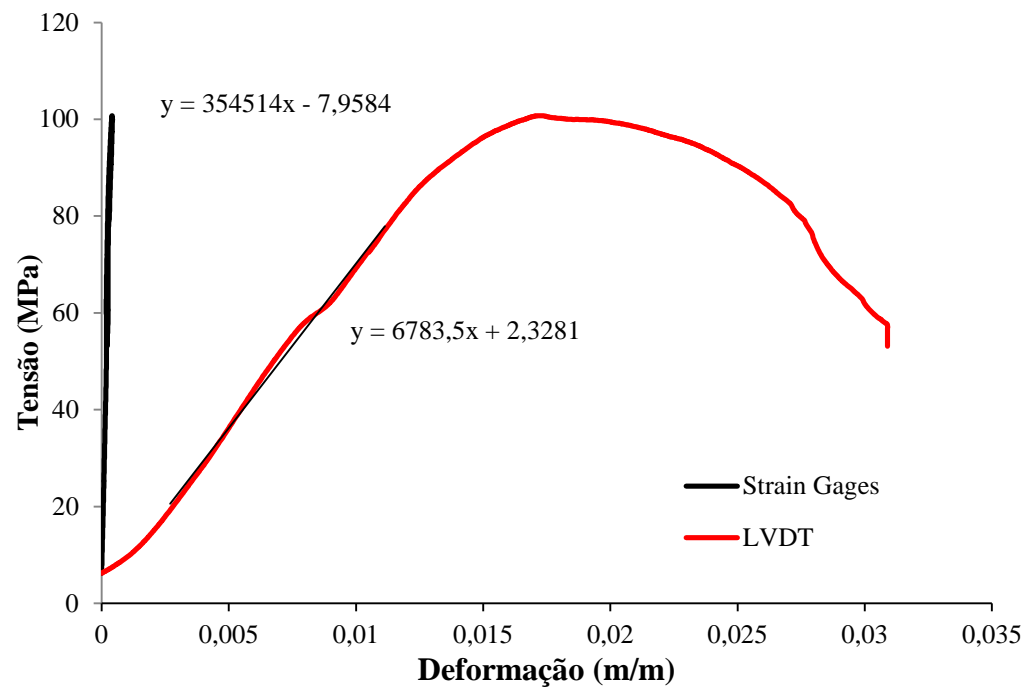


CM1:

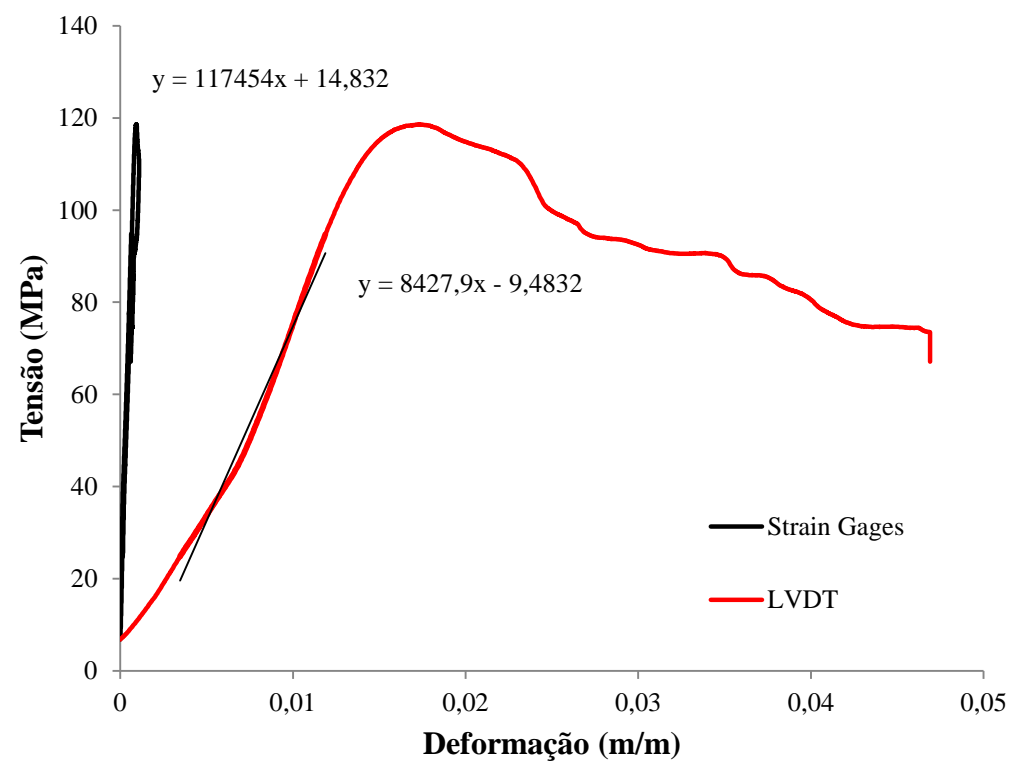


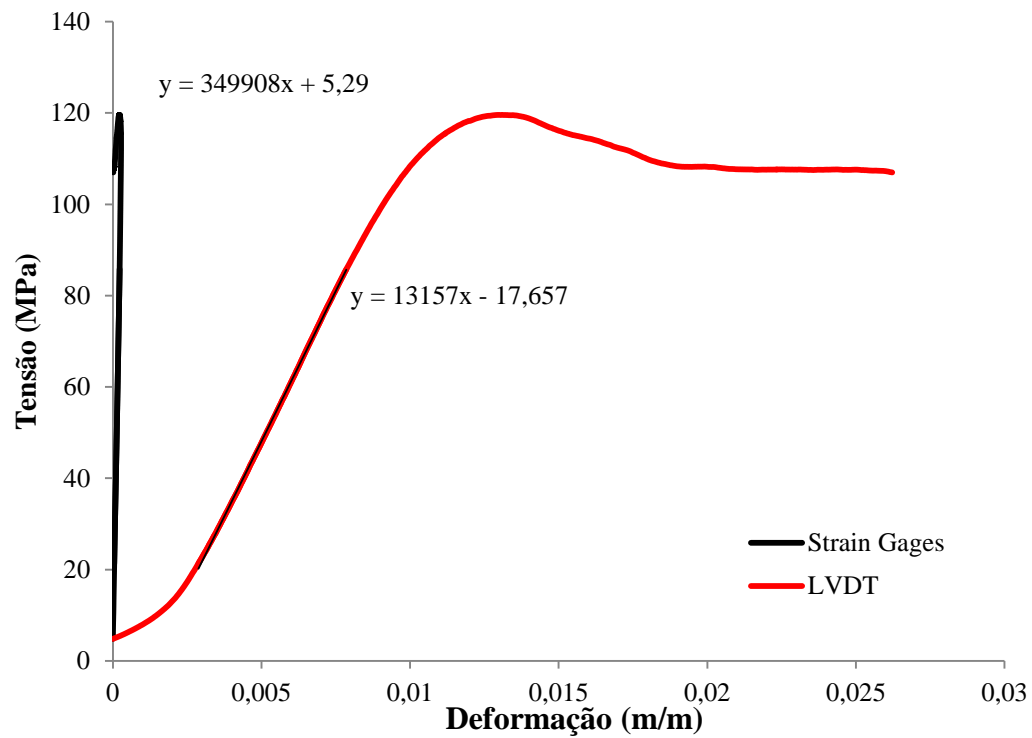
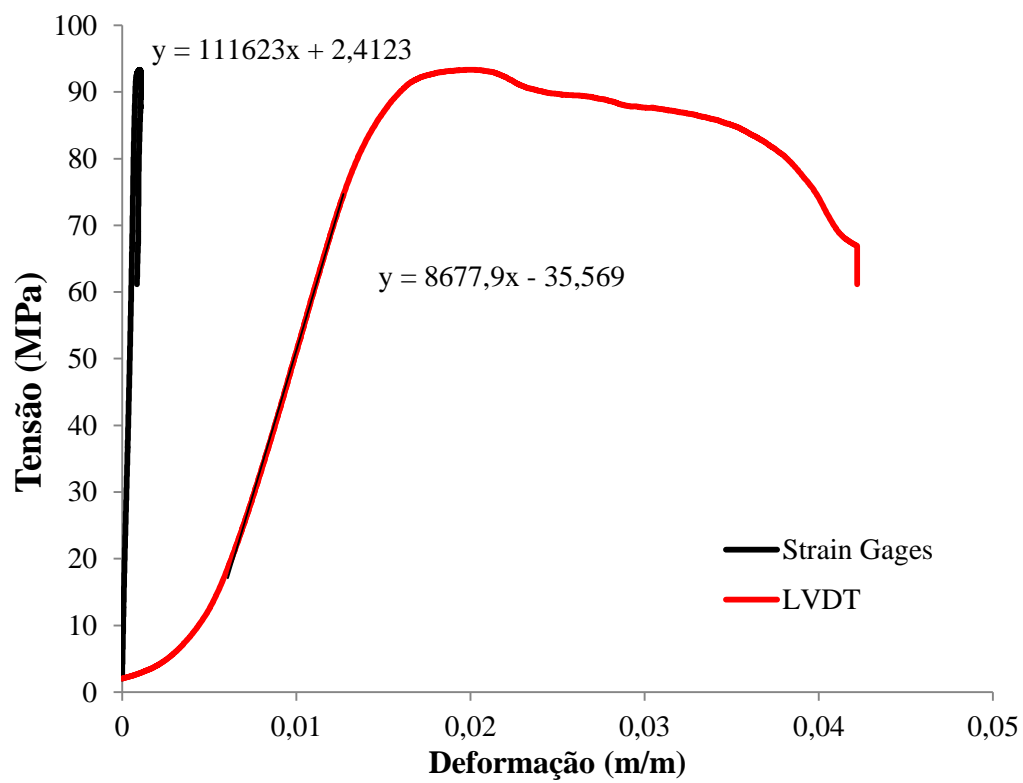
CM2:**CM3:**

CT1:

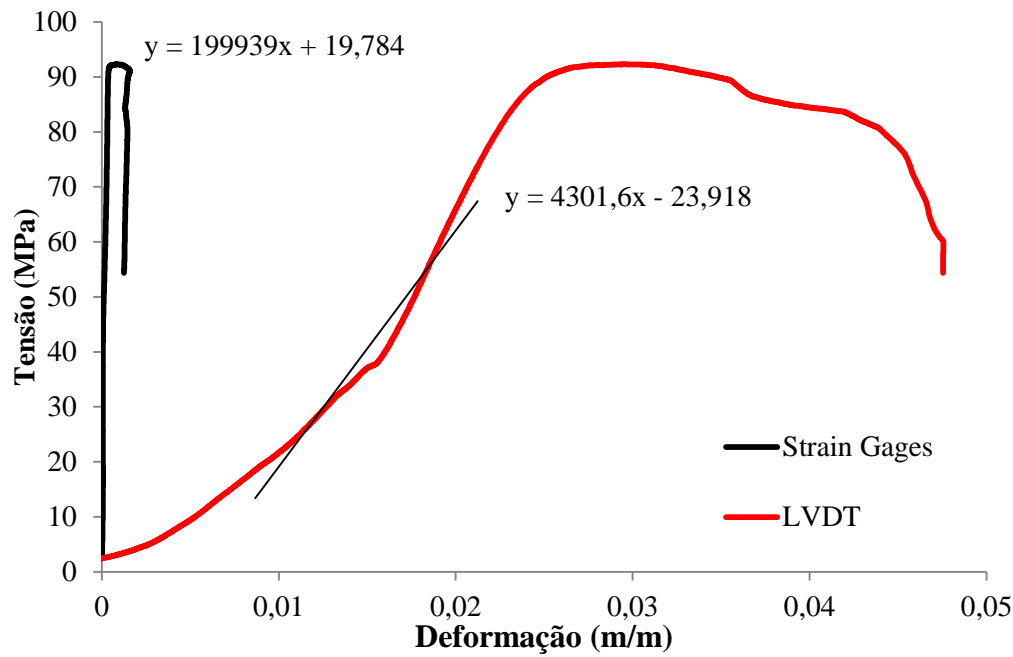


CT2:

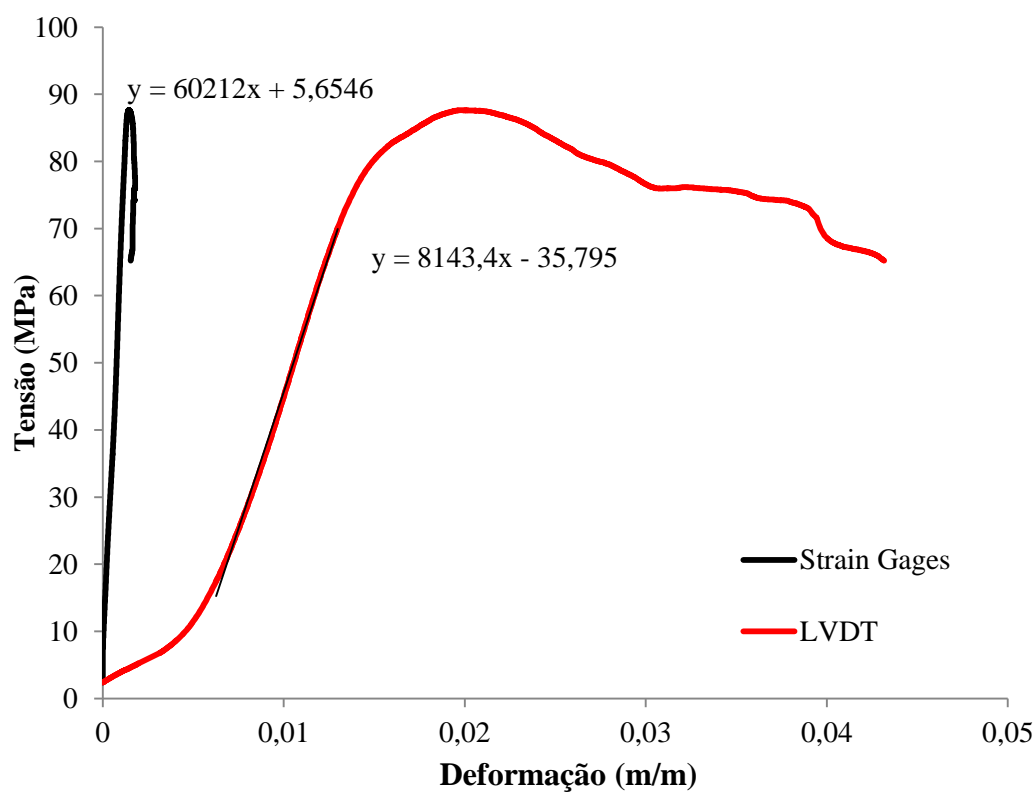


CT3:**DB1:**

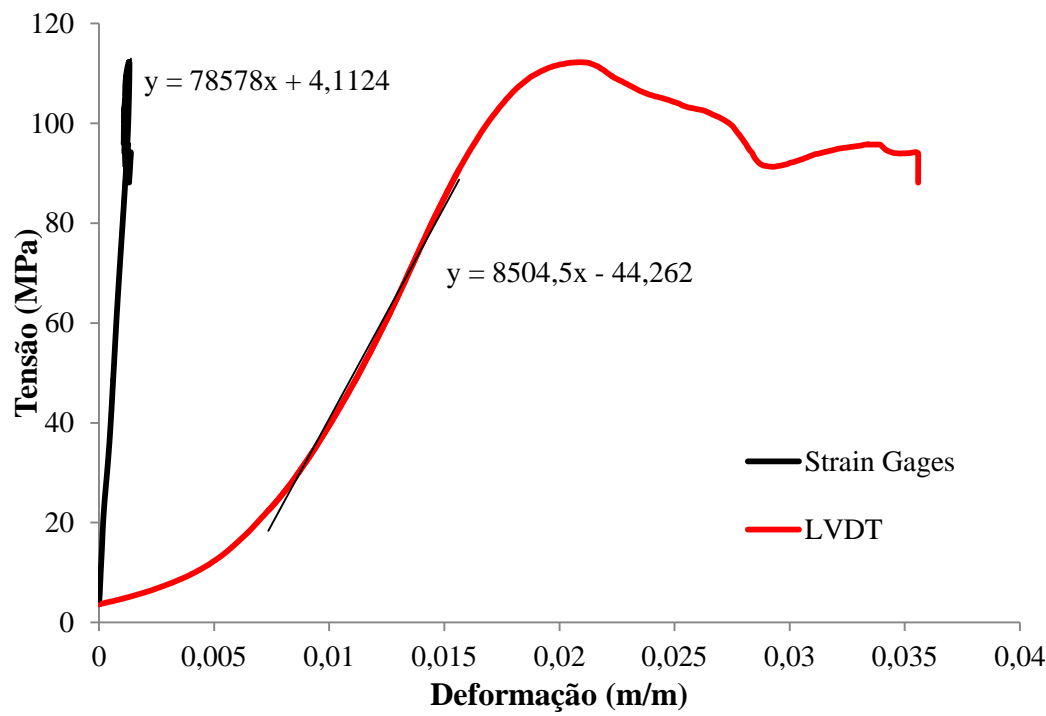
DB2



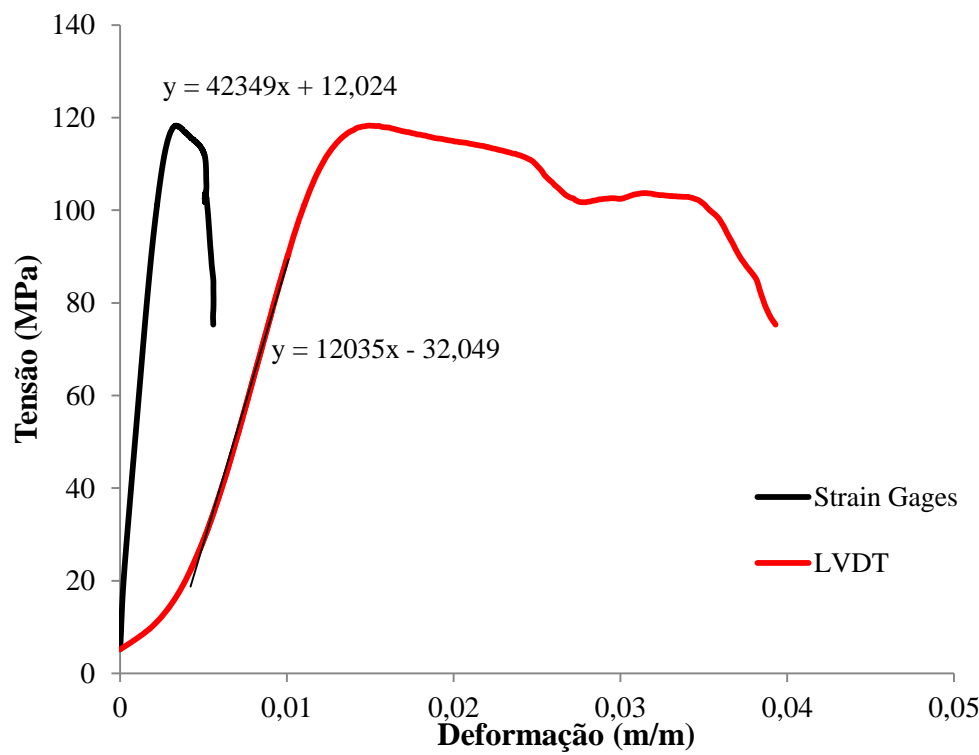
DB3:

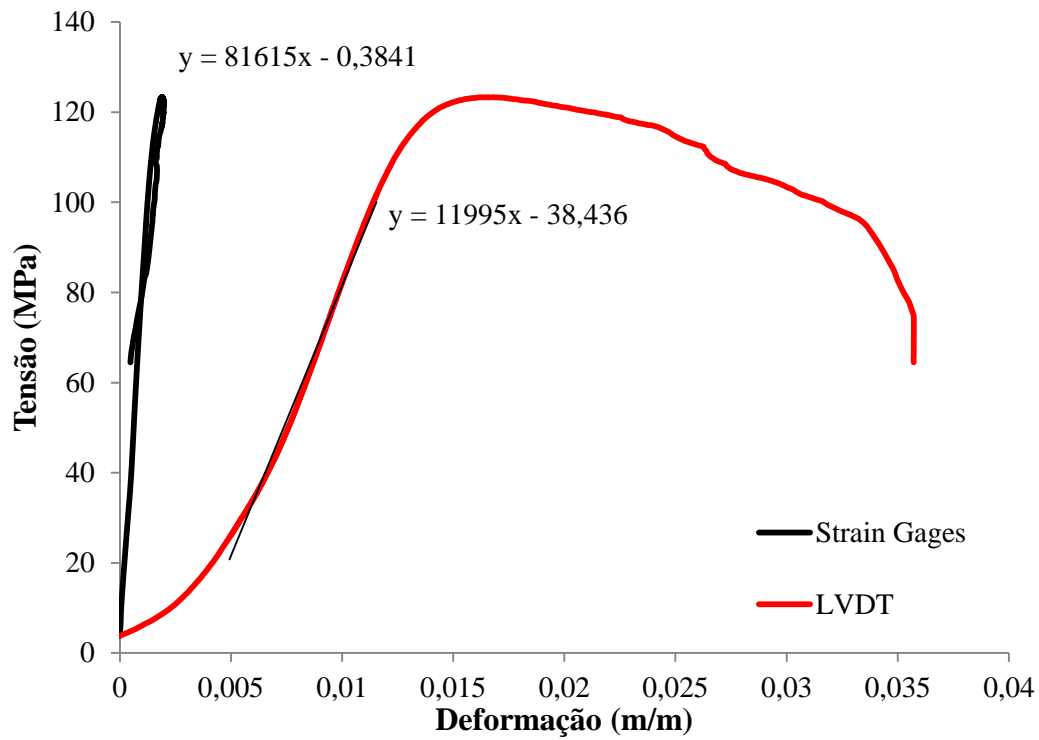
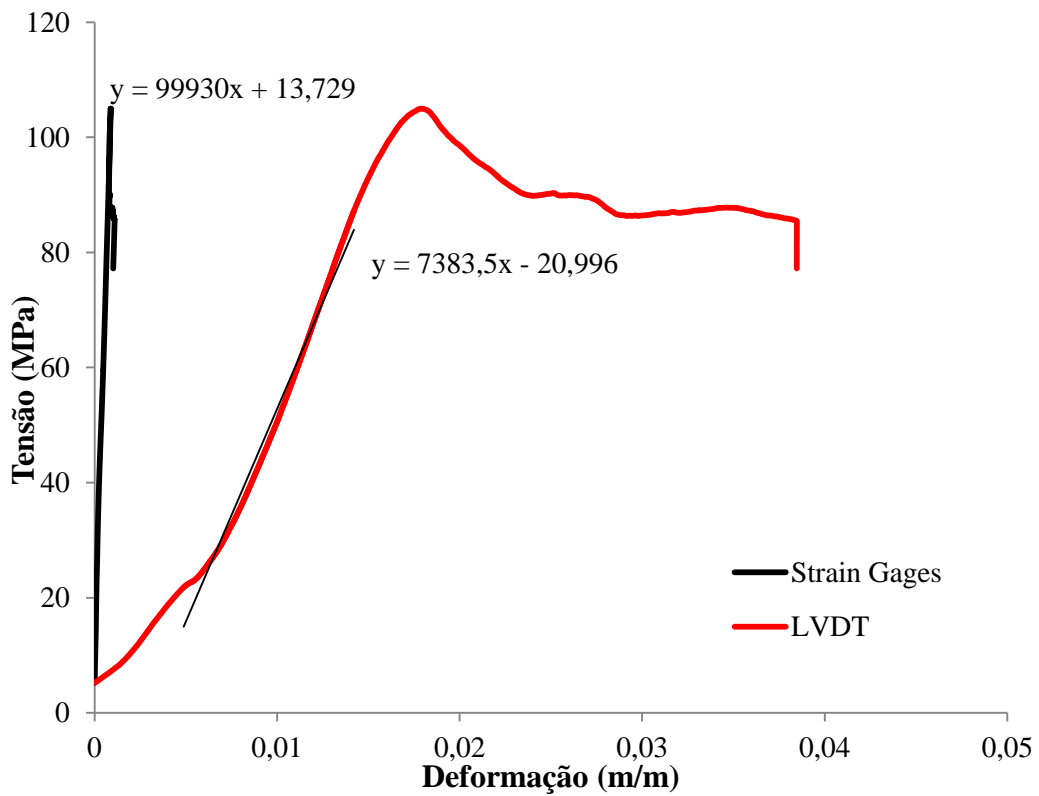


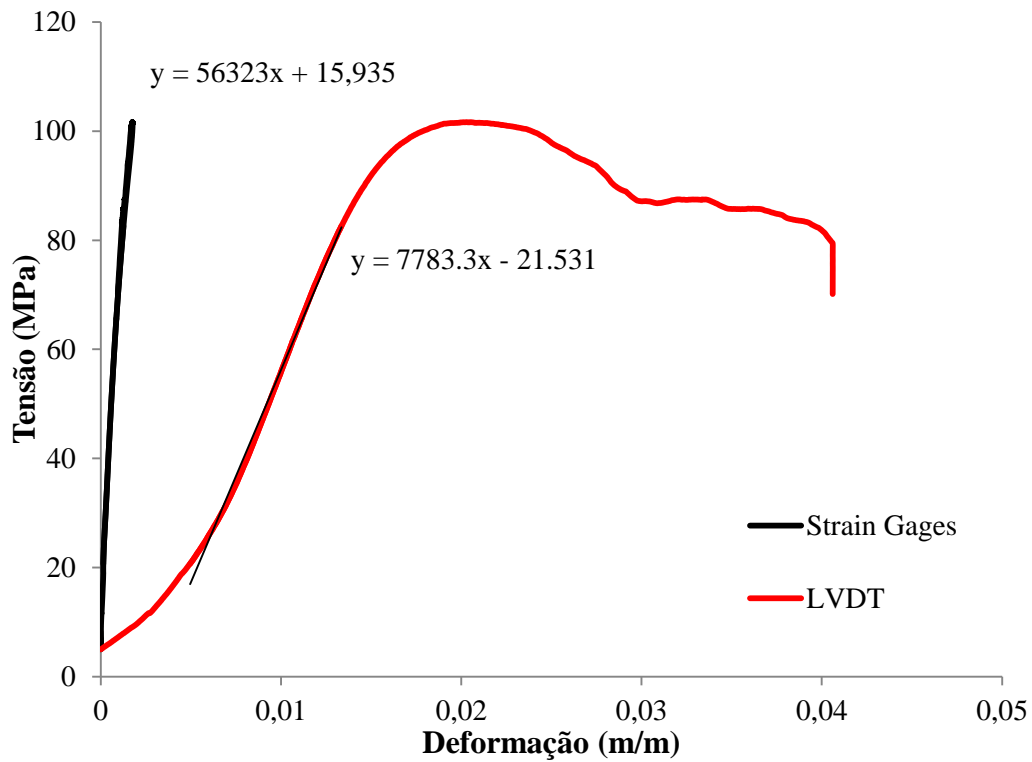
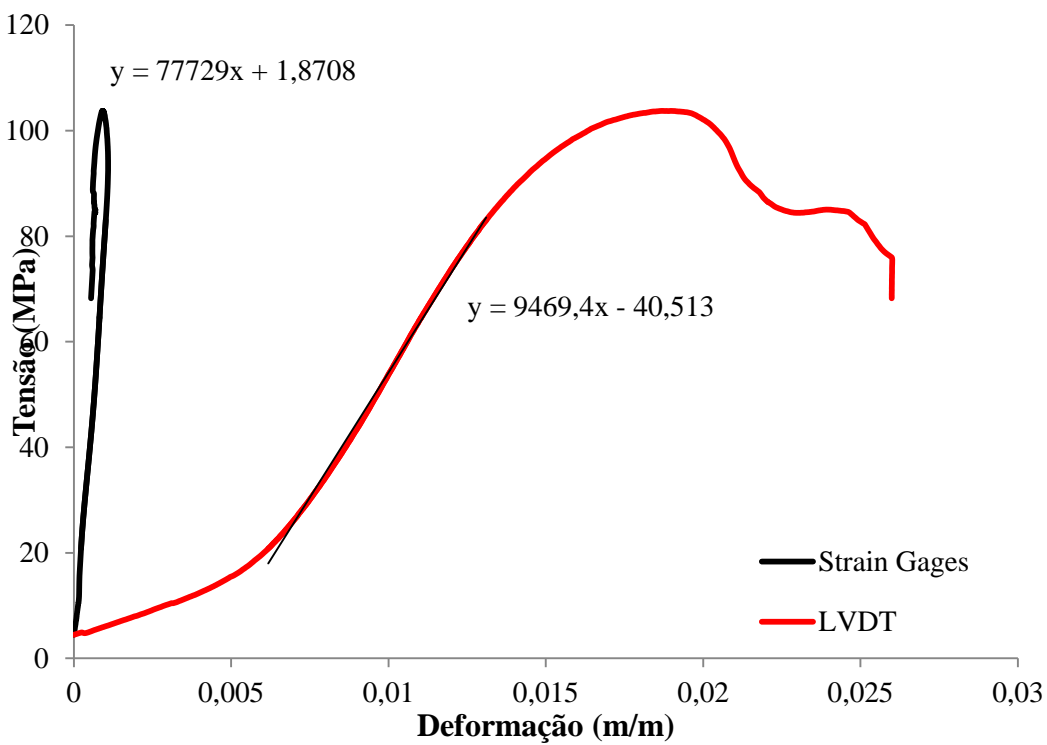
DM1:



DM2:

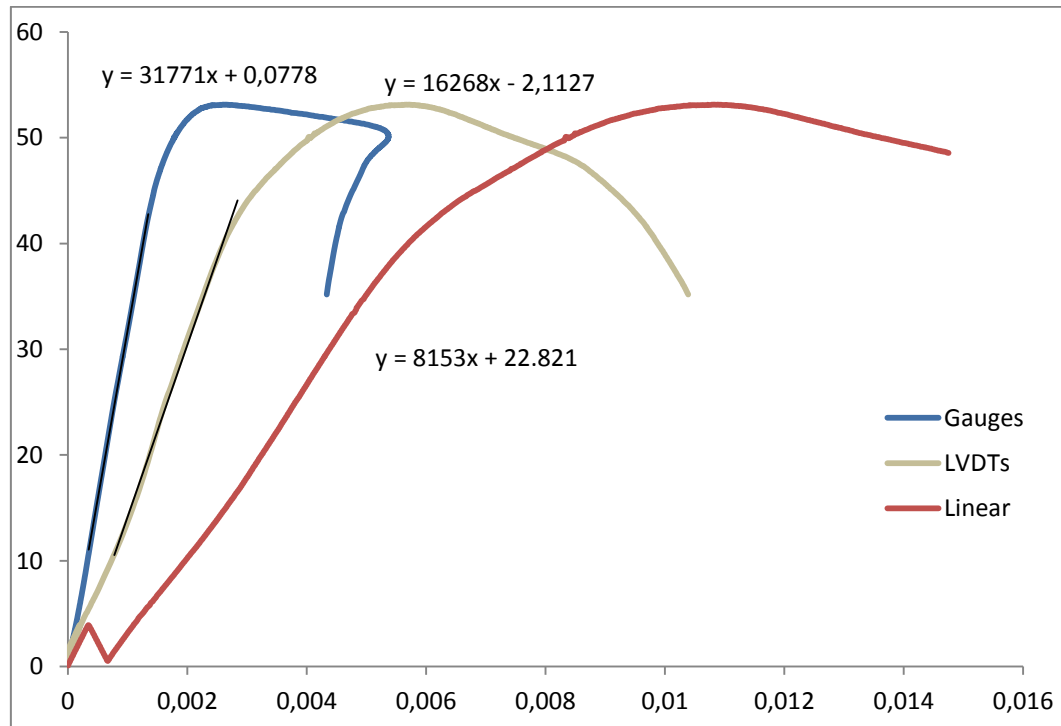


DM3:**DT1:**

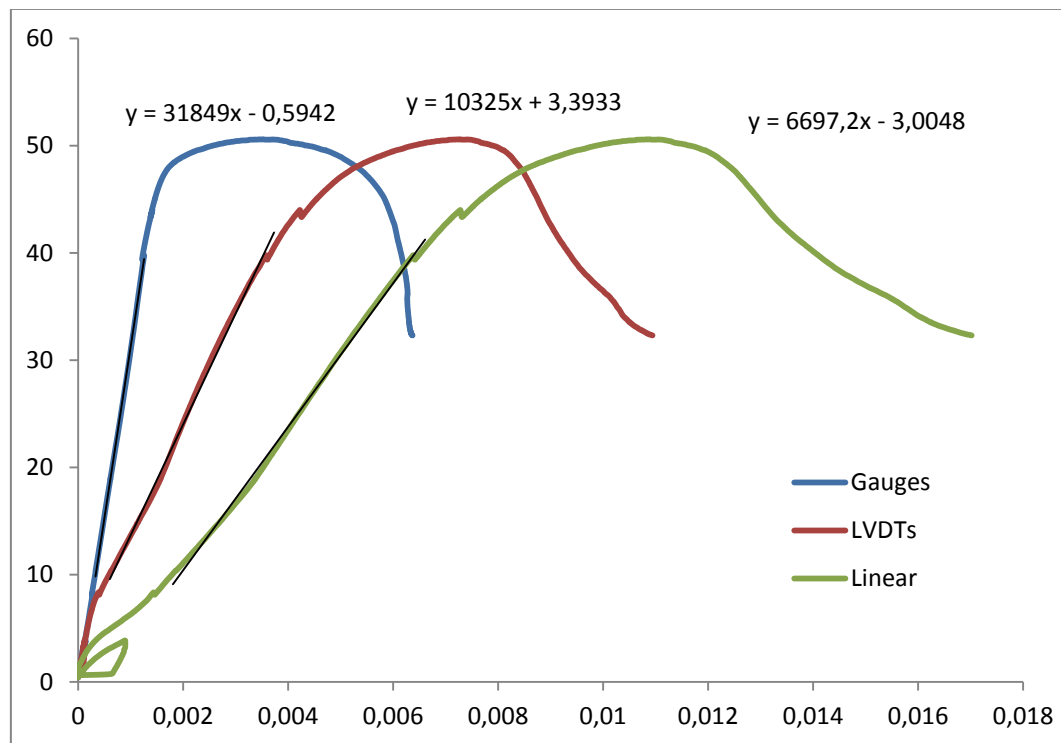
DT2:**DT3:**

11.2. Compressão CLC

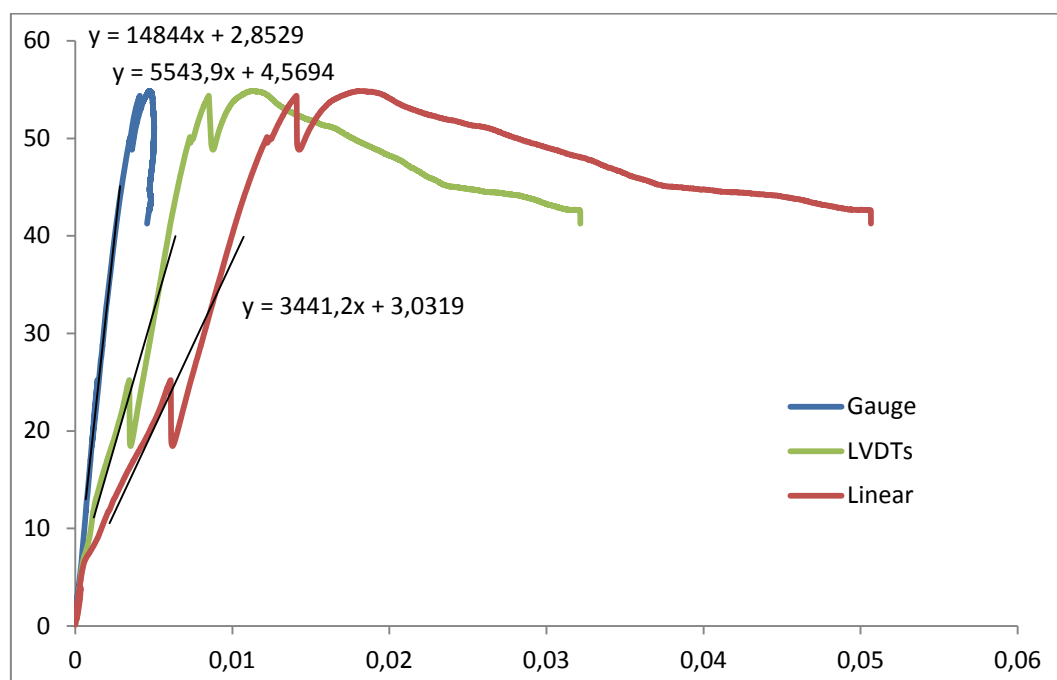
CB1:



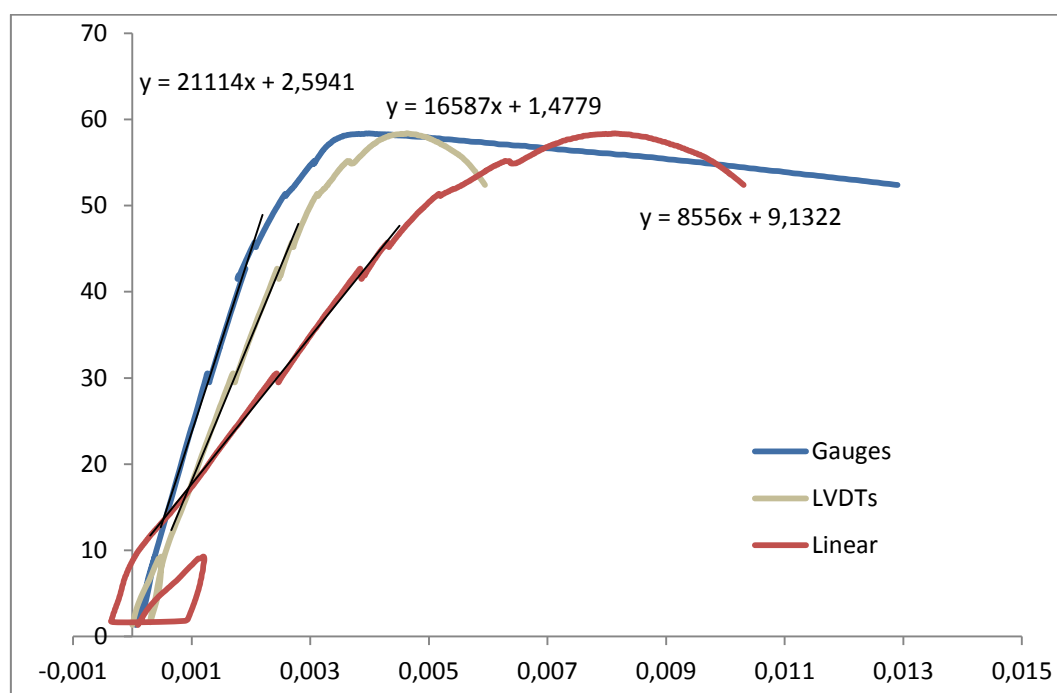
CB2:



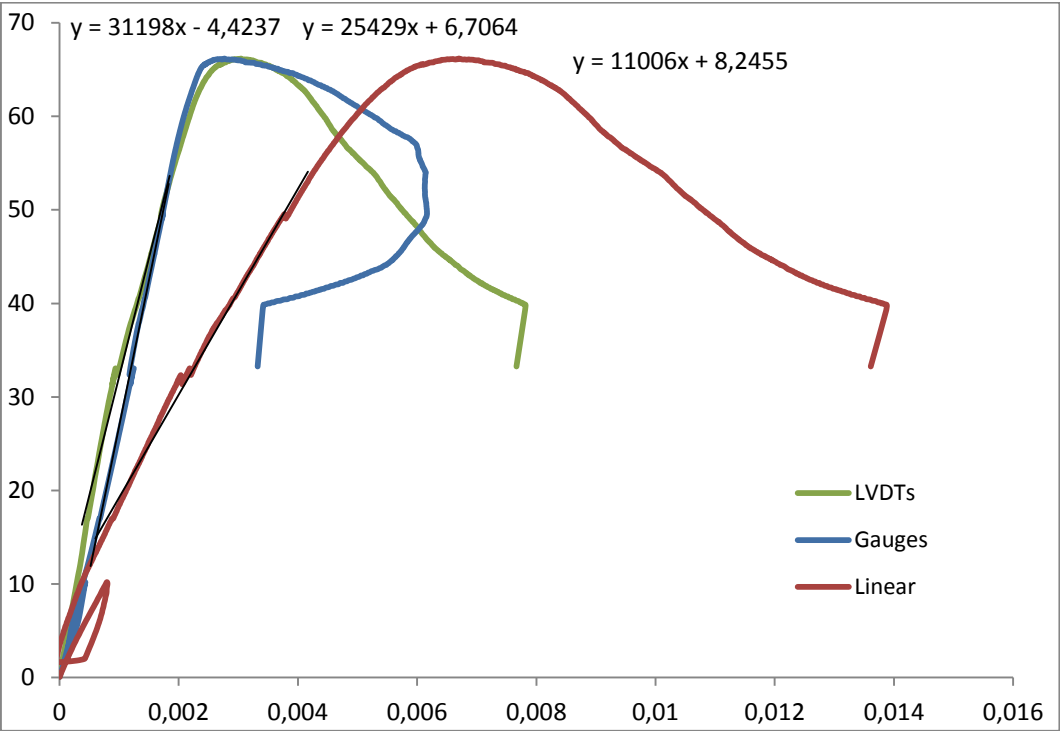
CB3 :



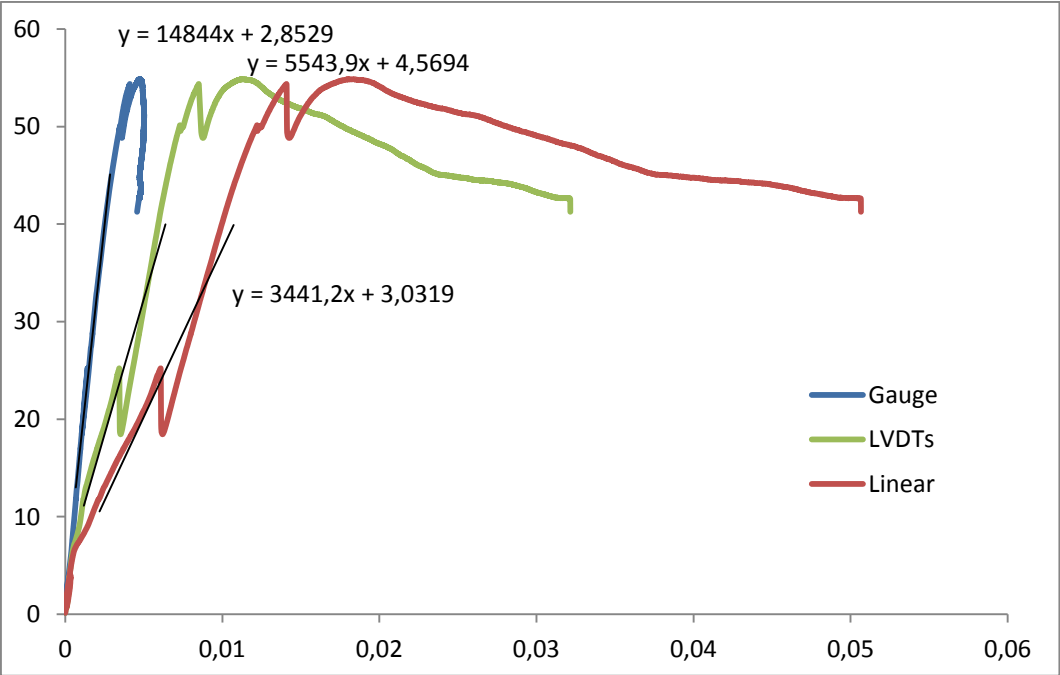
CM1:



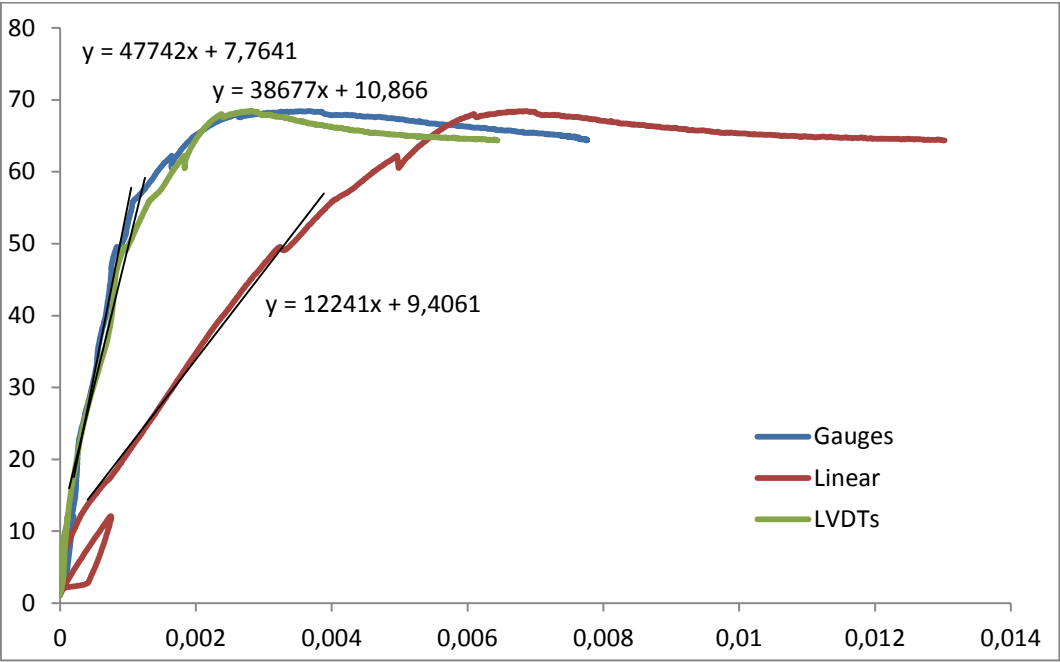
CM2:



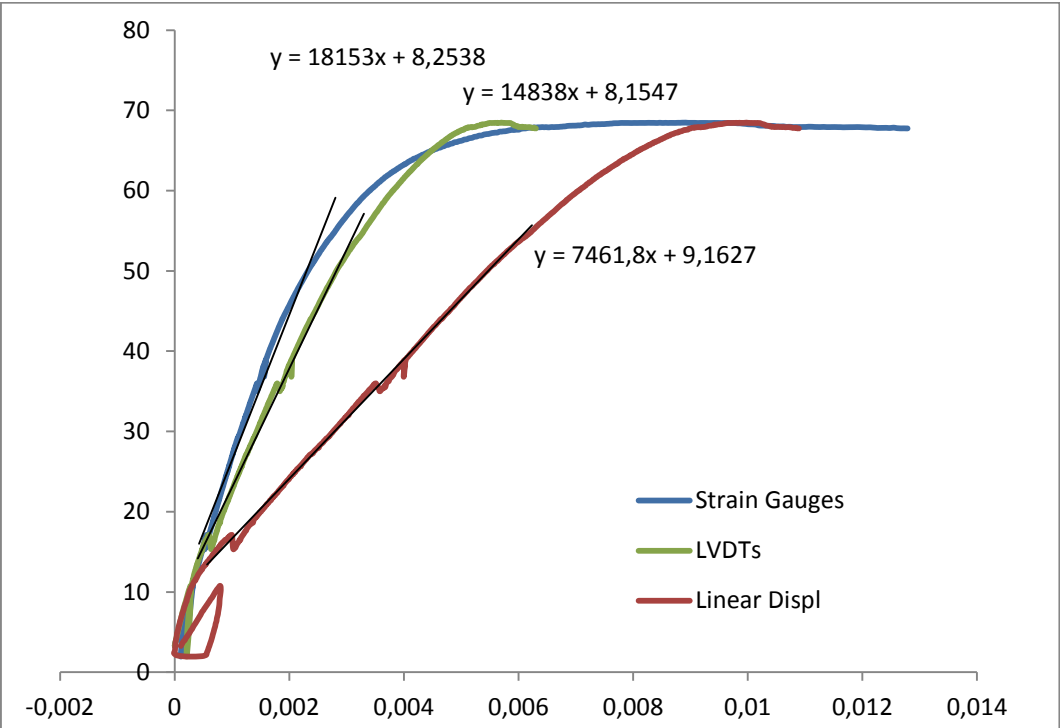
CM3:



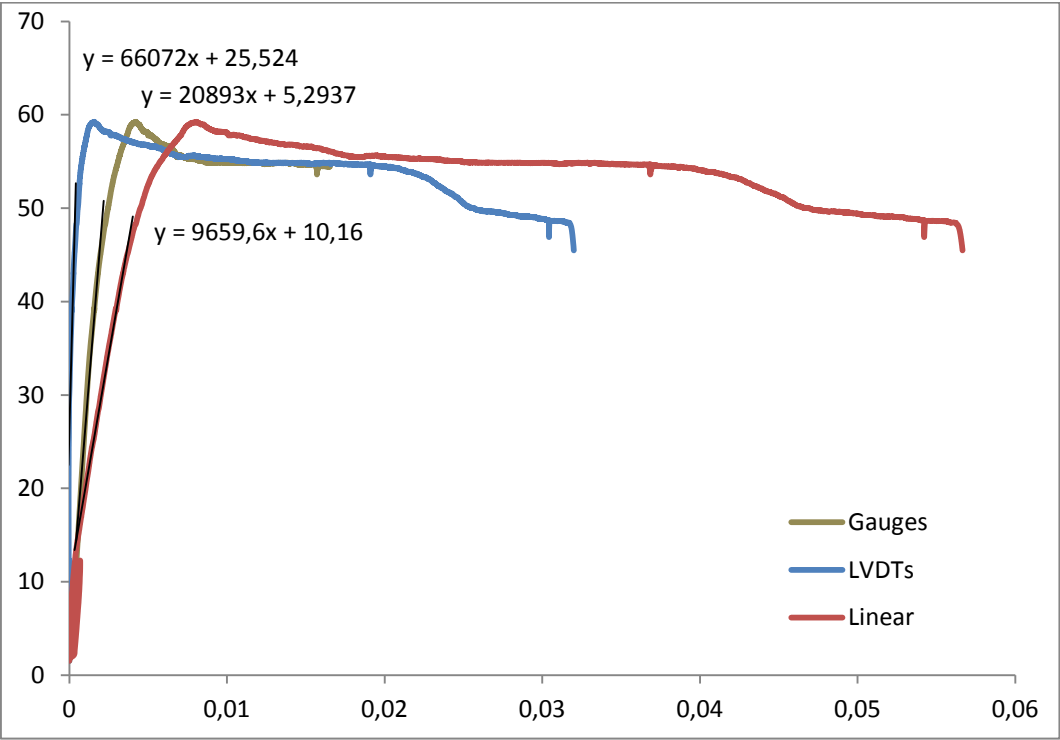
CT1:



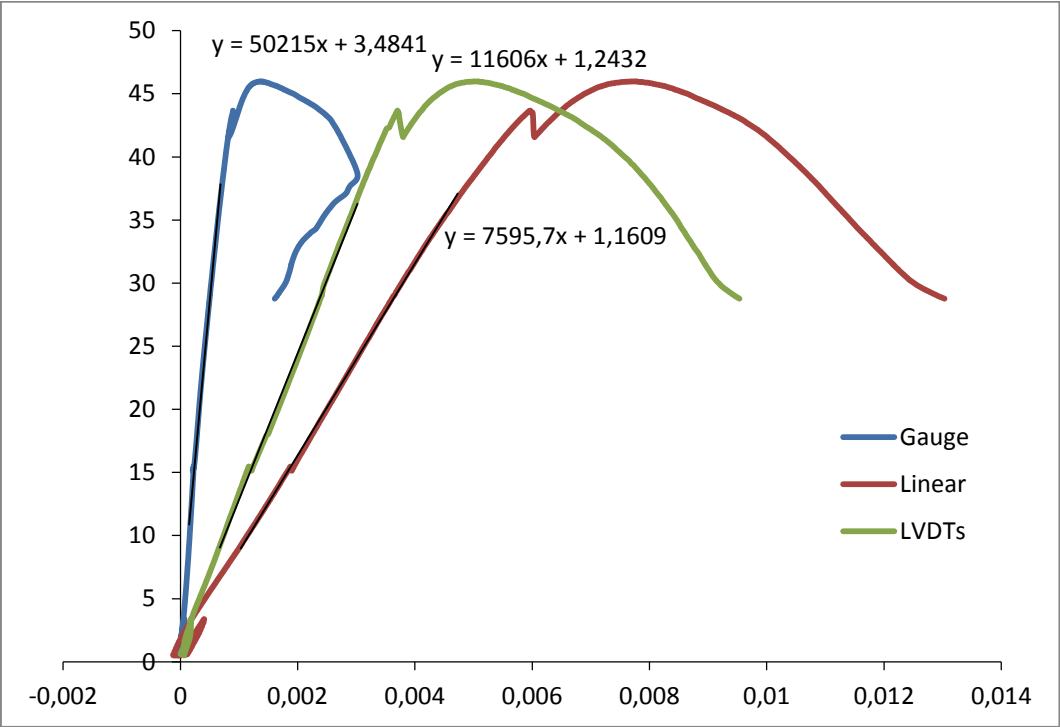
CT2:



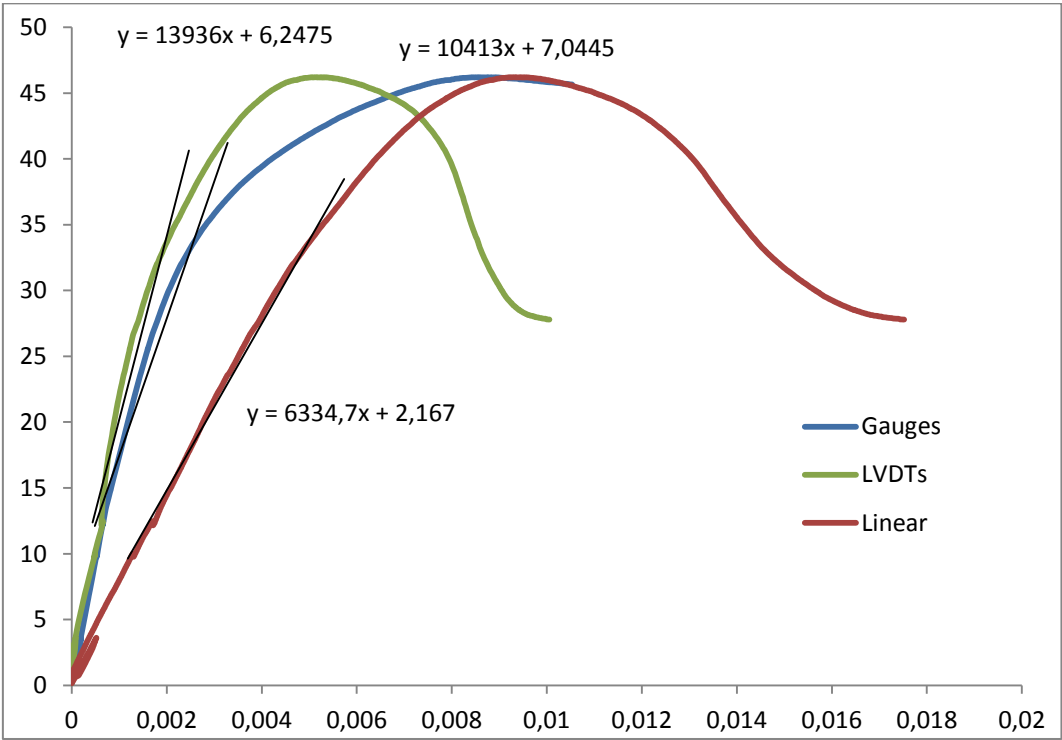
CT3:



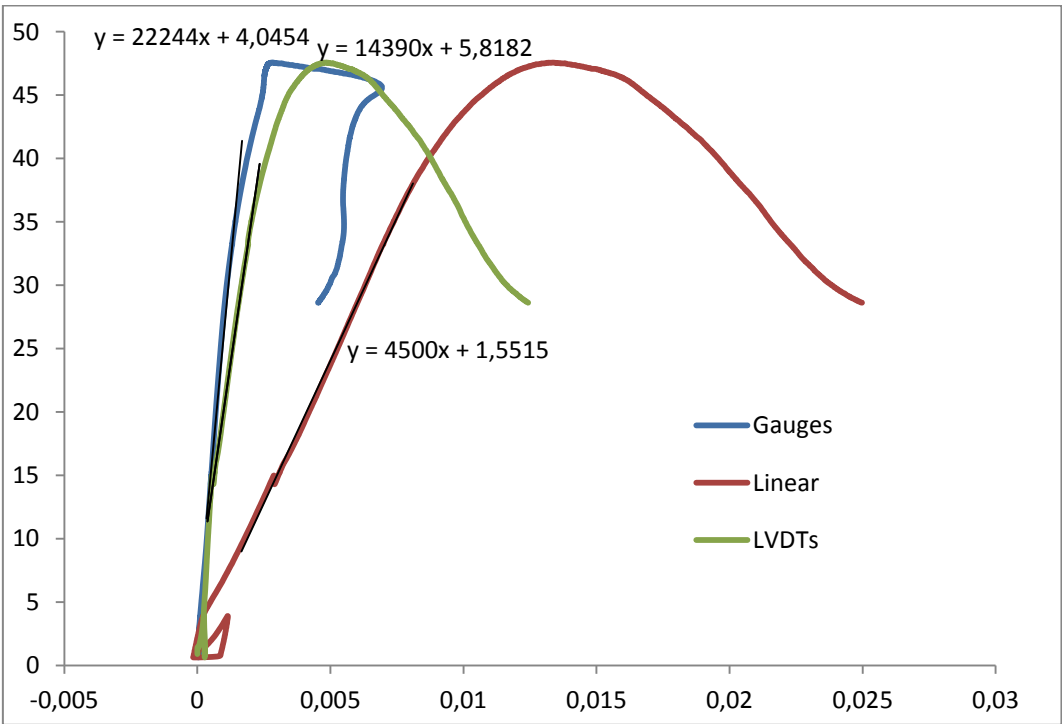
DB1:



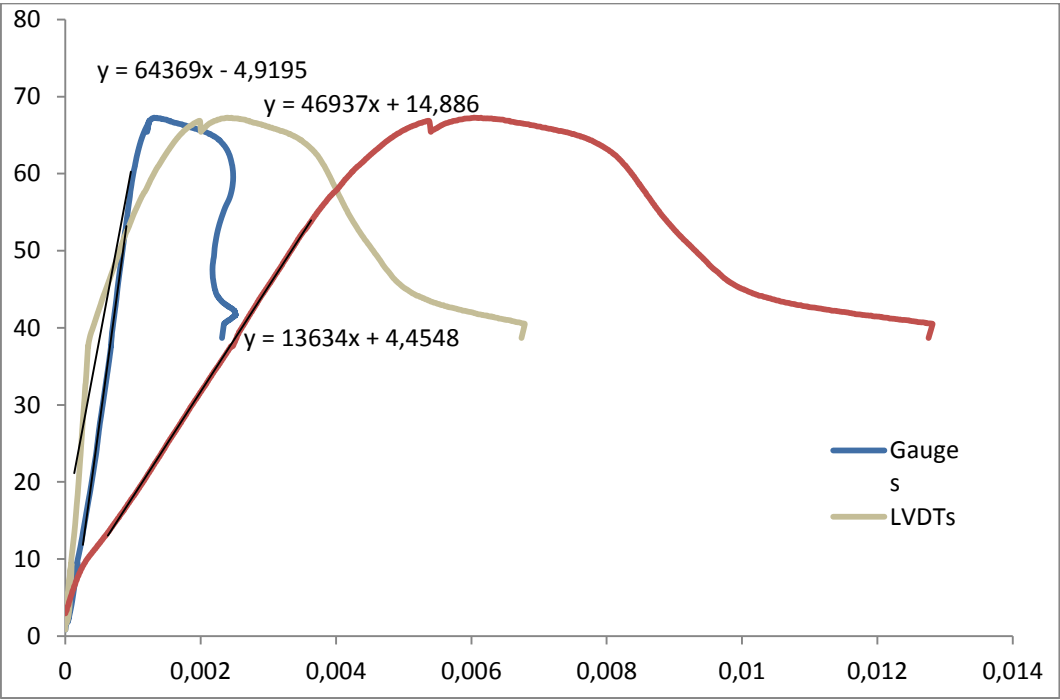
DB2:



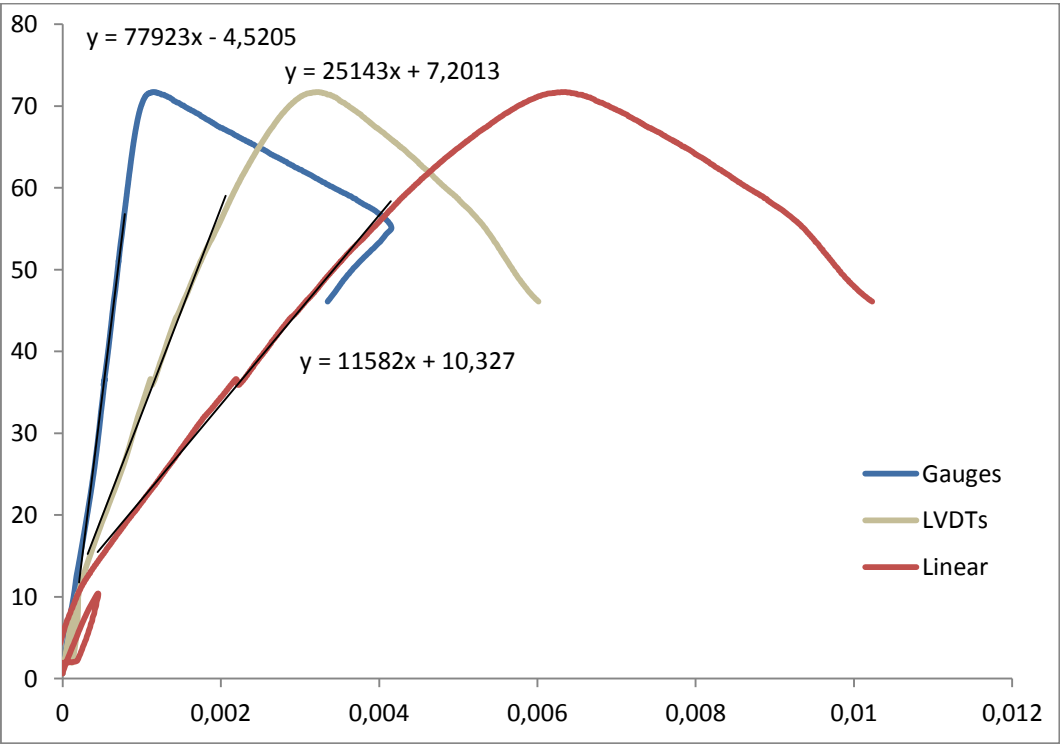
DB3:

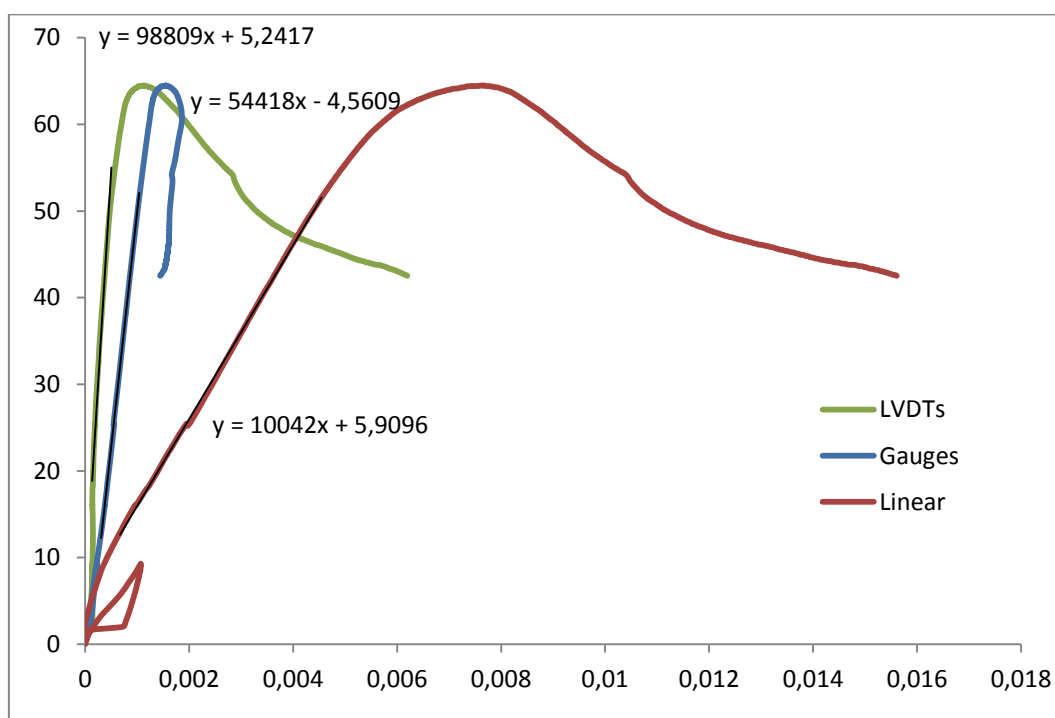
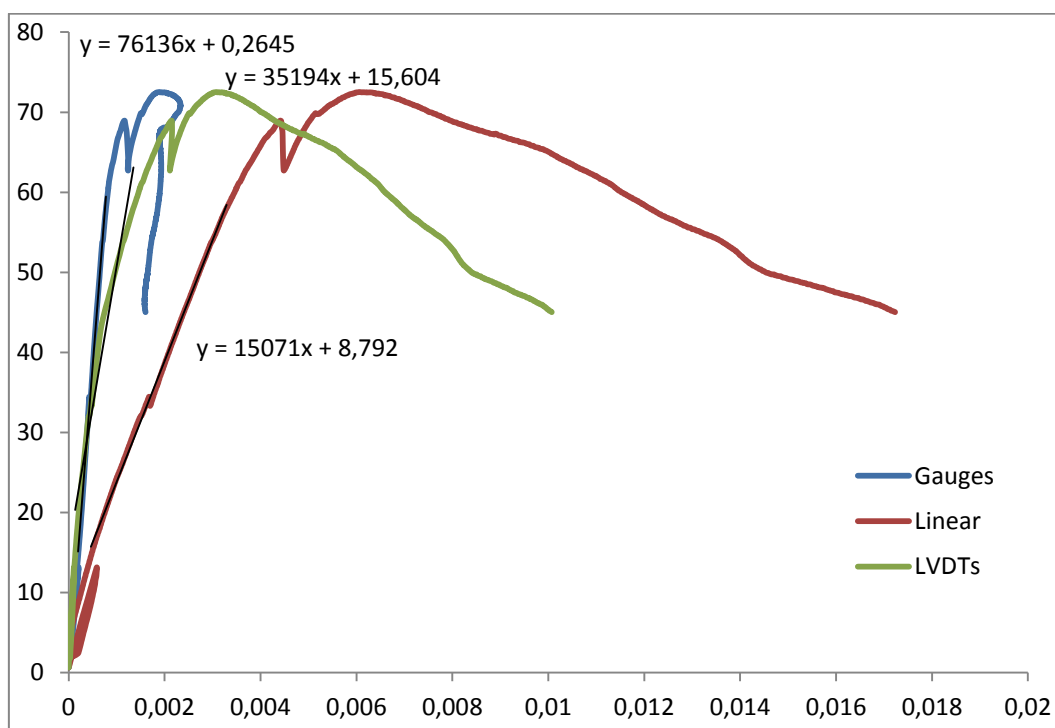


DM1:

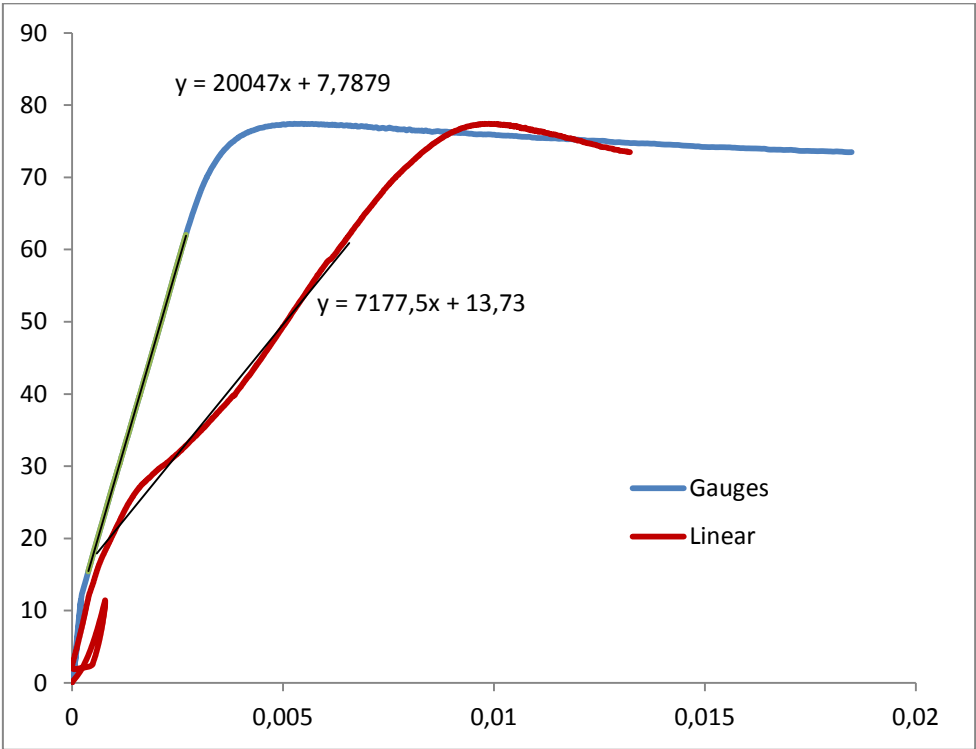


DM2:

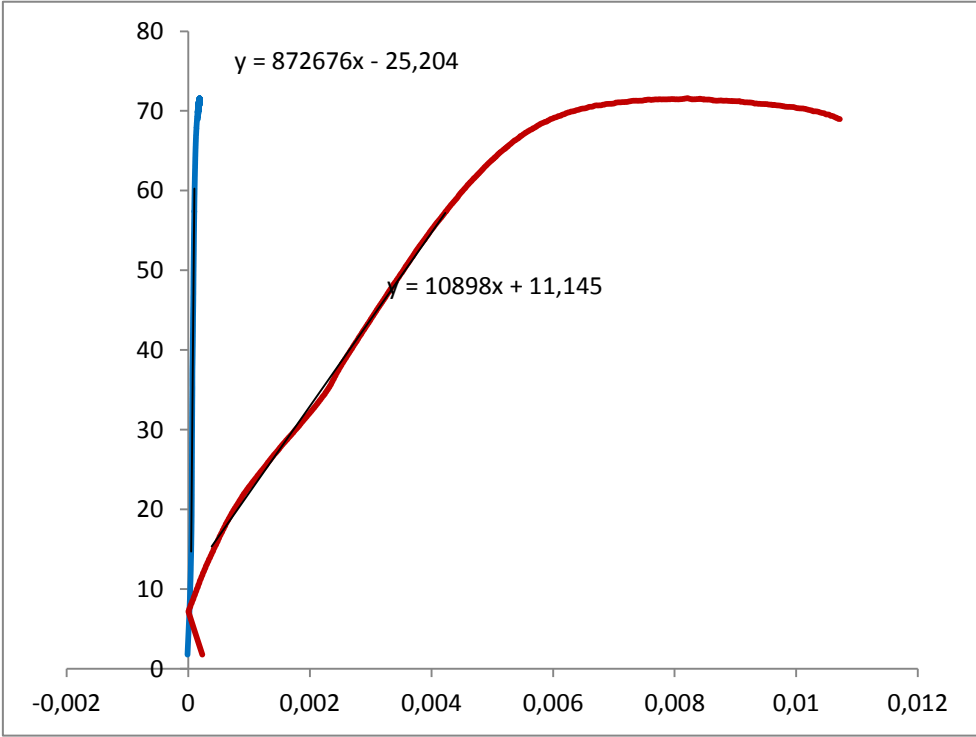


DM3:**DT1:**

DT2:

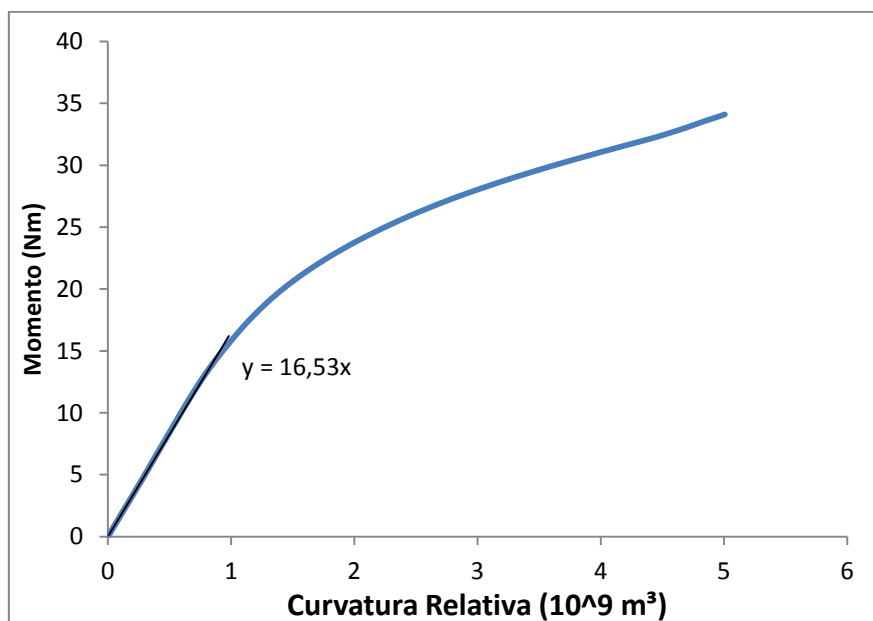


DT3:

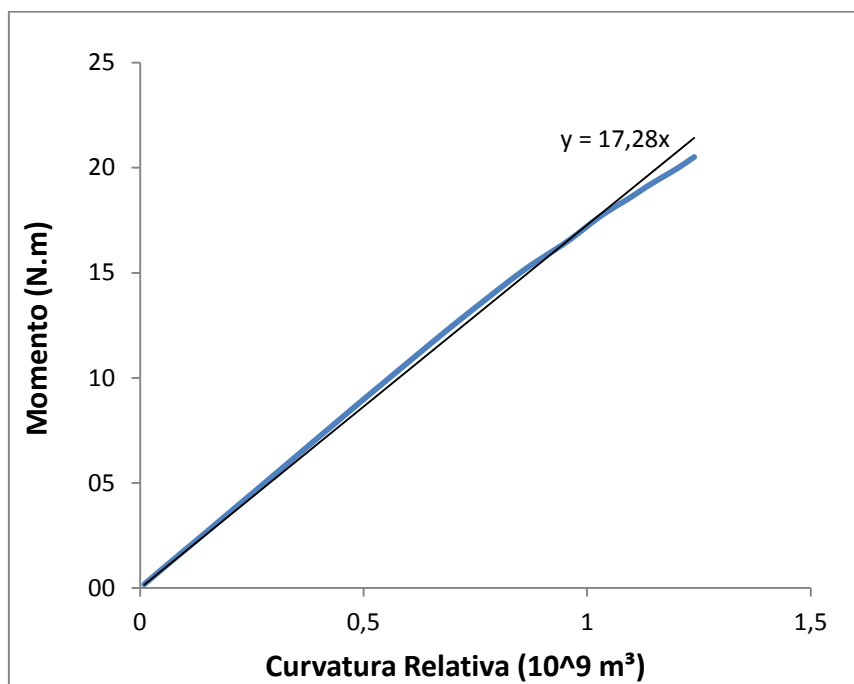


11.3. Flexão

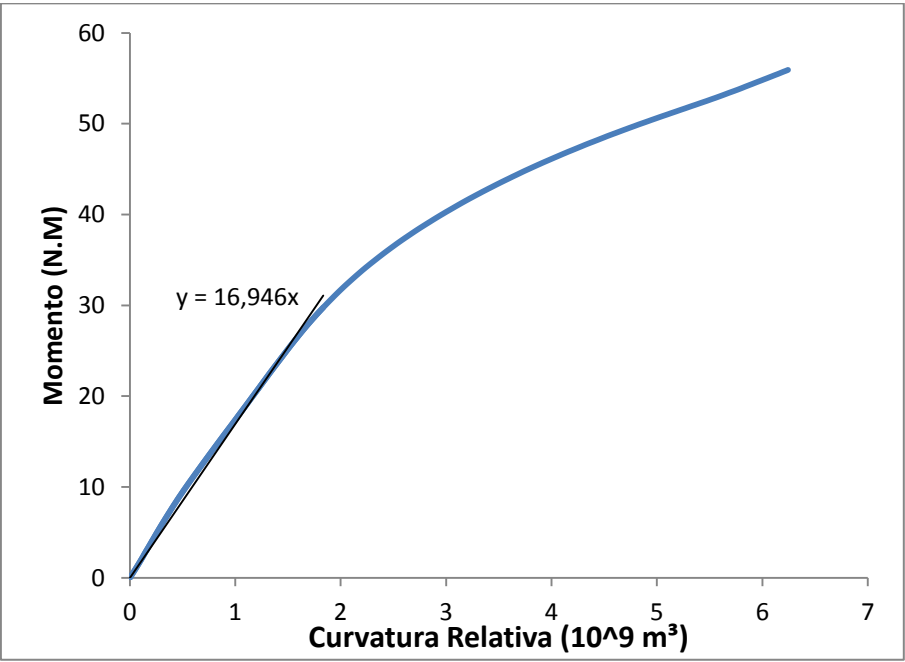
CB1:



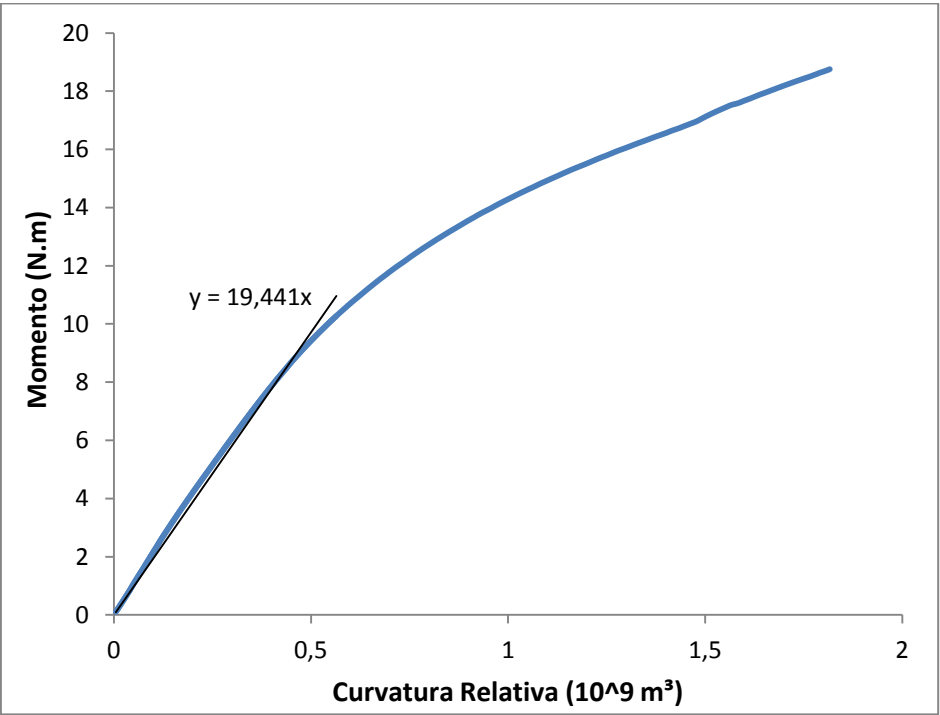
CB2:



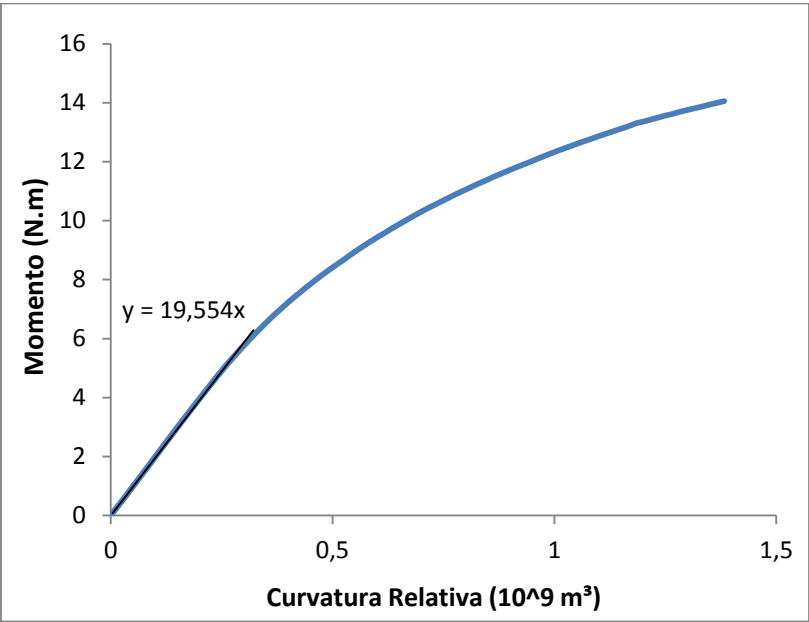
CB3:



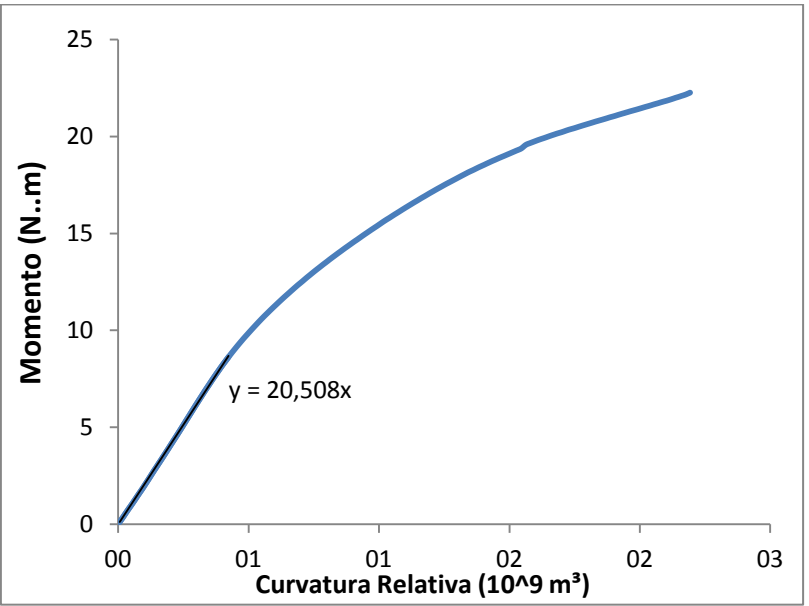
CM1:

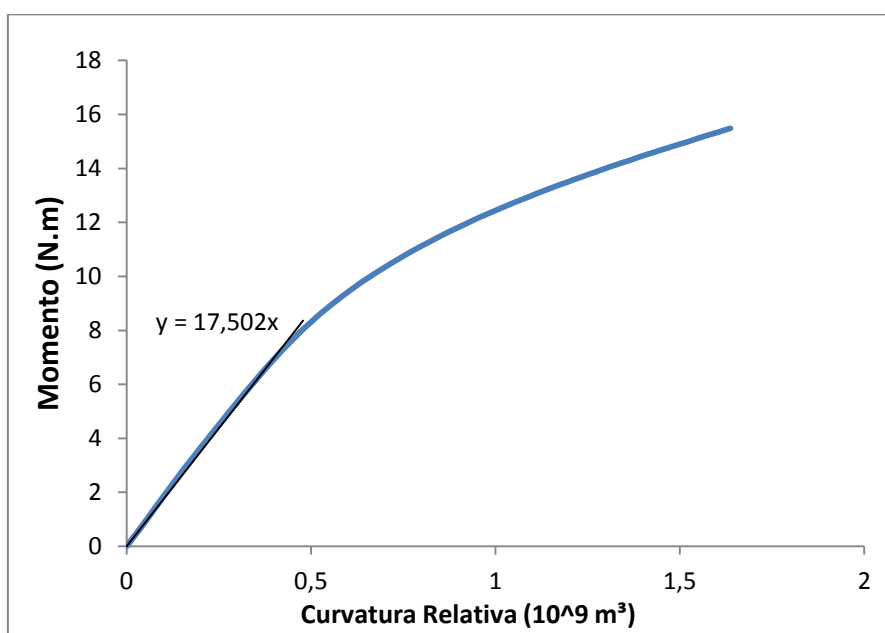
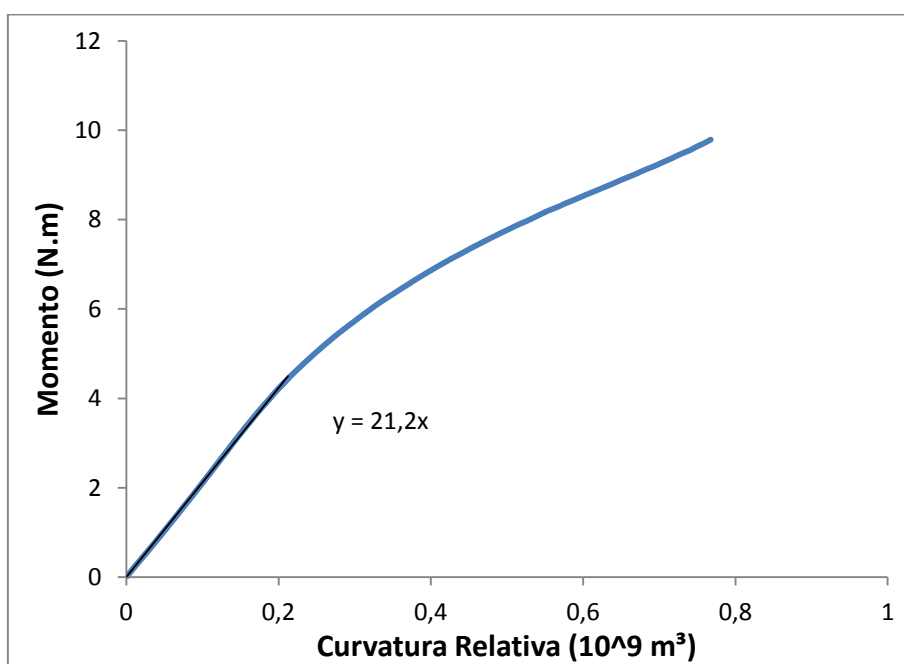


CM2:

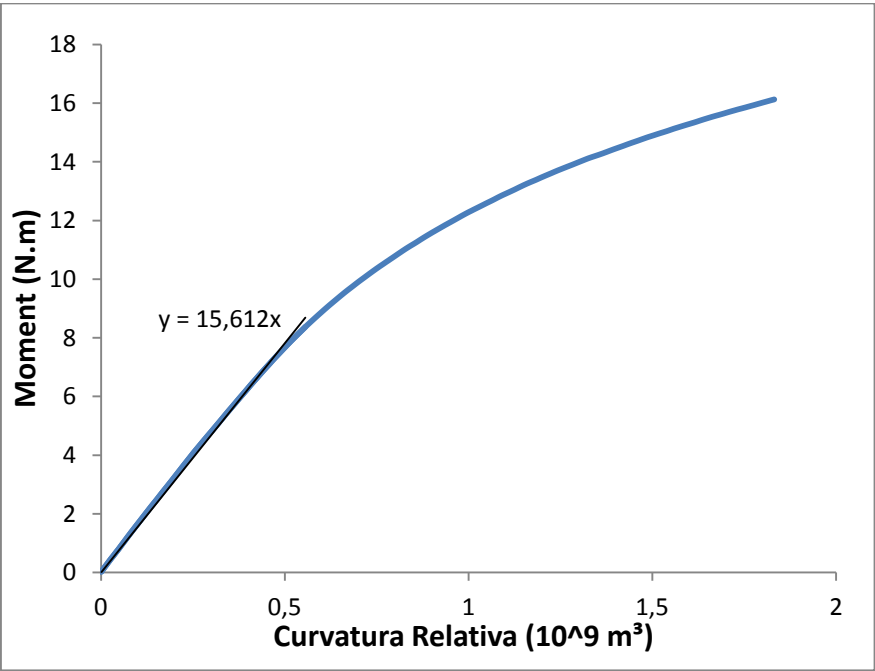


CM3:

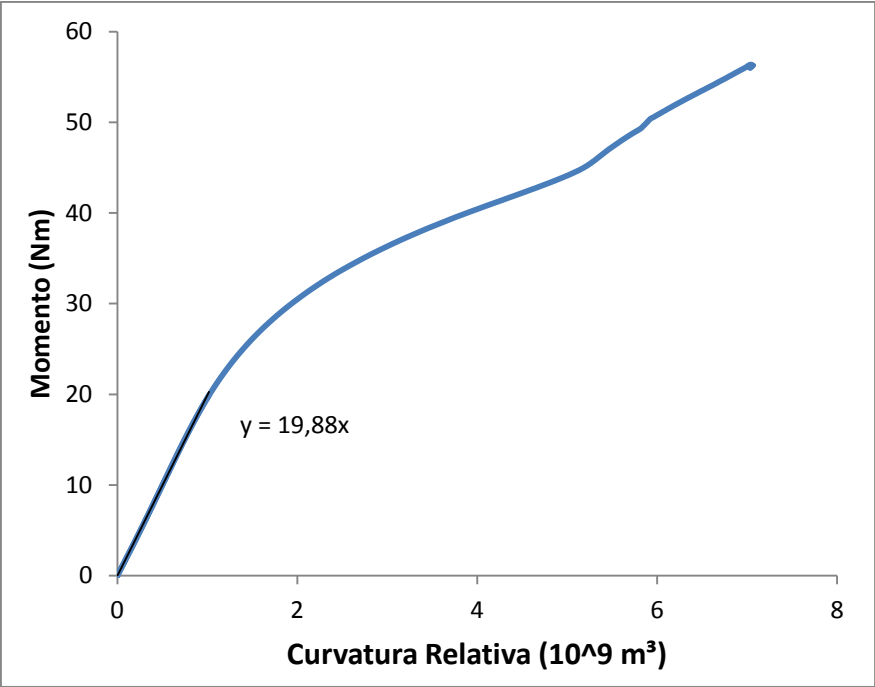


CT1:**CT2:**

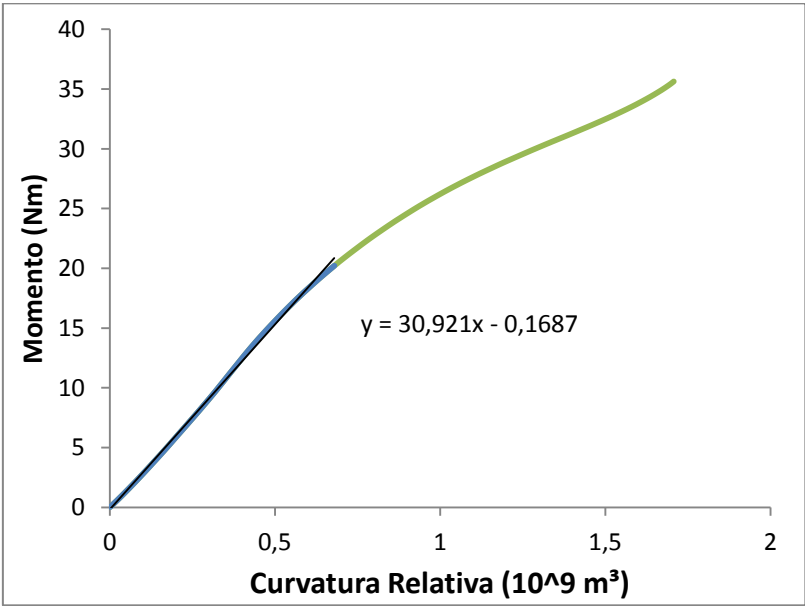
CT3



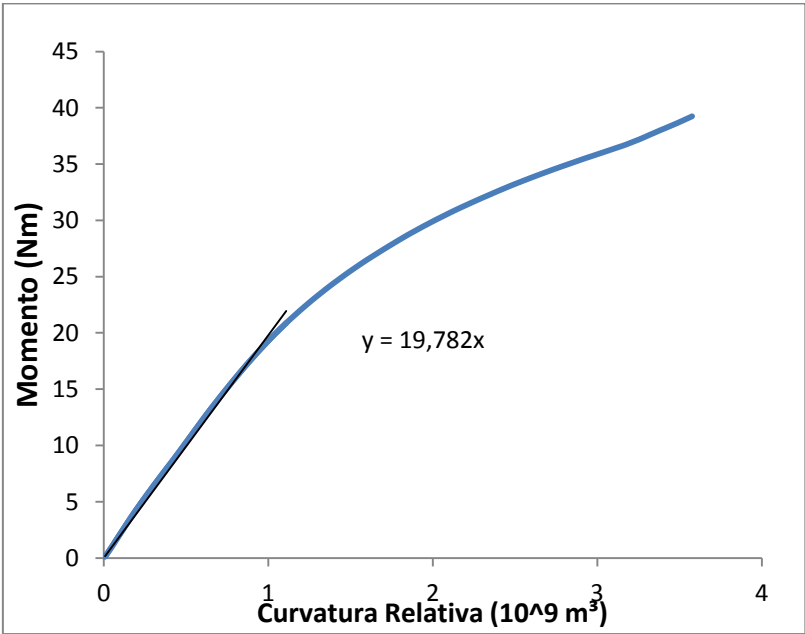
DB1

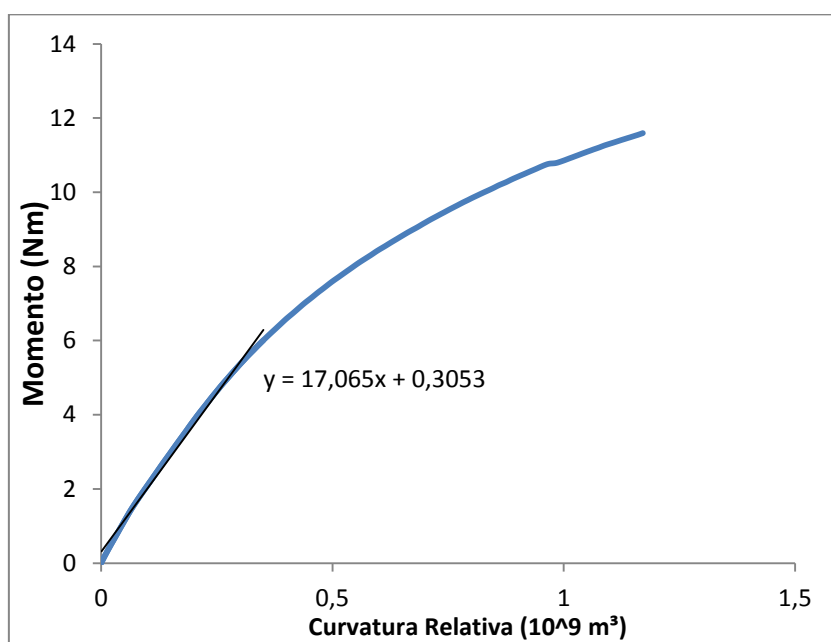
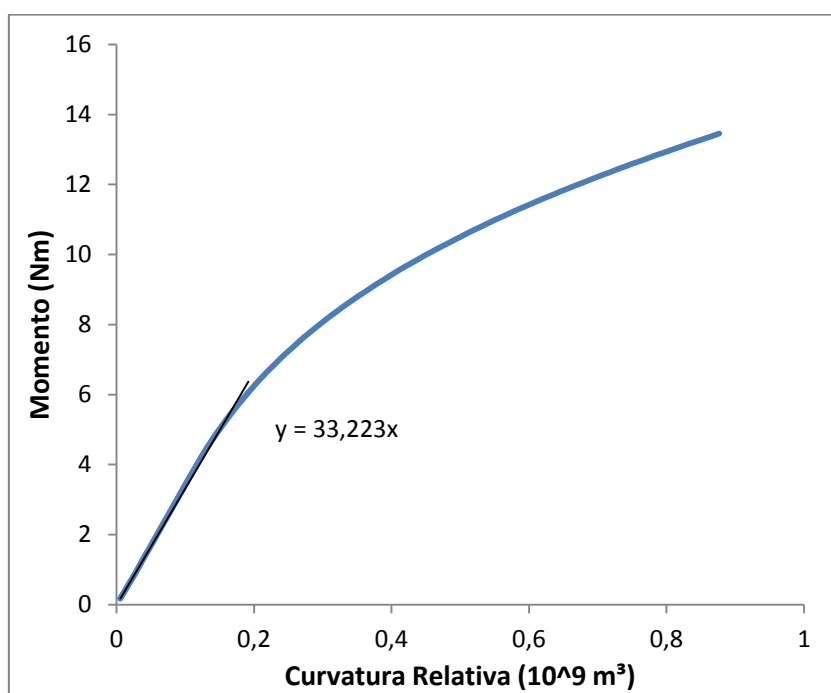


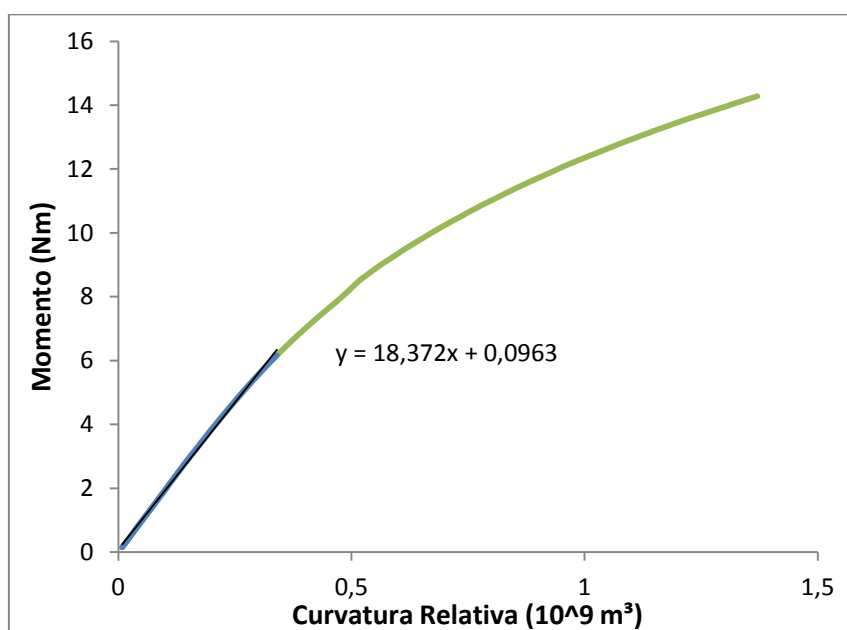
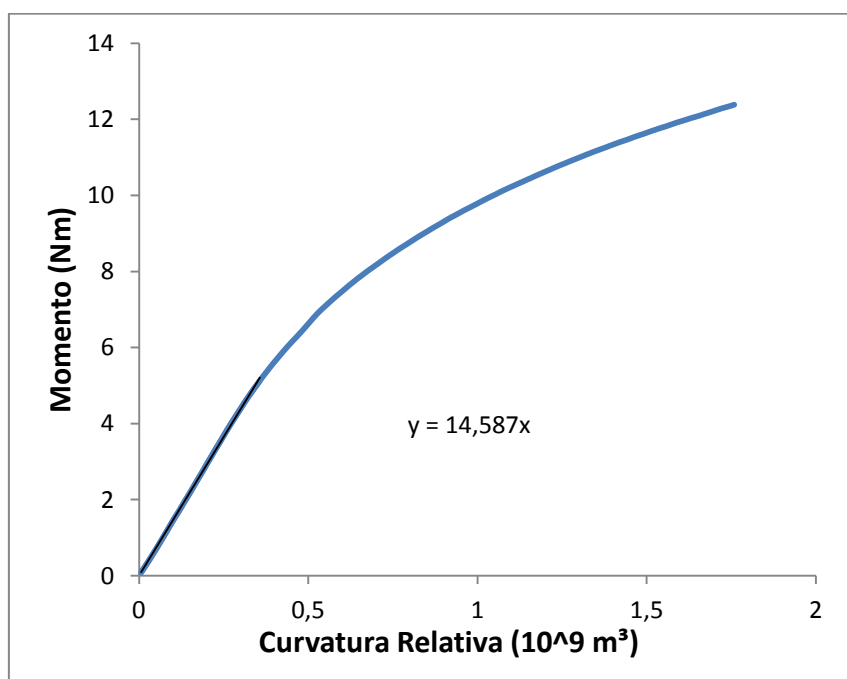
DB2



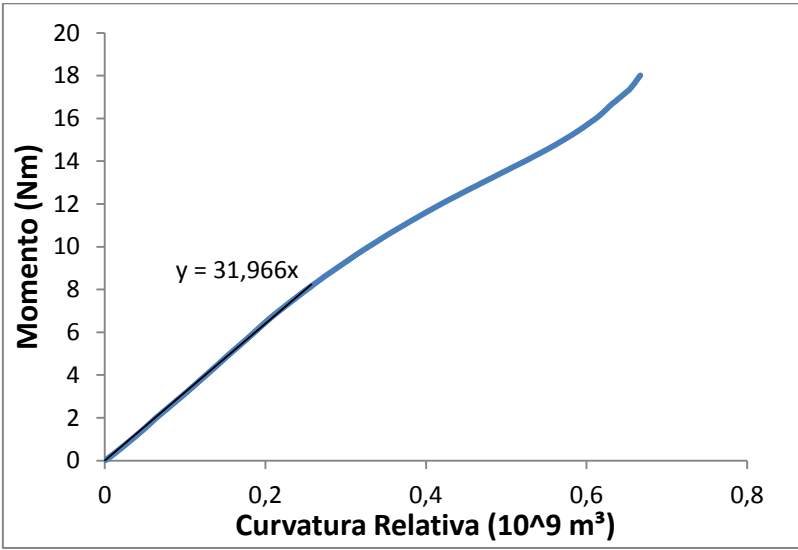
DB3



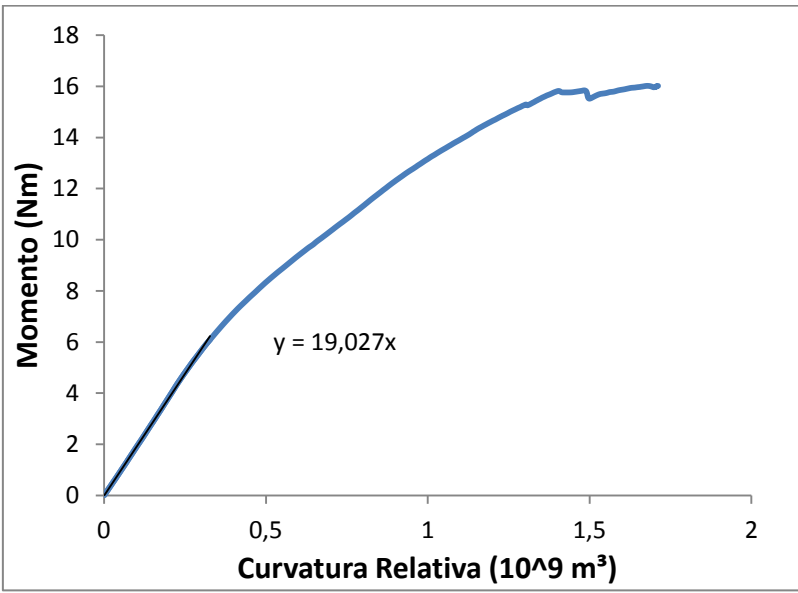
DM1**DM2**

DM3**DT1**

DT2



DT3



11.4. Tabela de cargas ensaio fricção

Ensaio Coeficiente de Fricção Corda Convencional x Bambu BASE - Ponto 1

Carga (N)	Força Célula de Carga (N)					Menor	Maior	Média
	1	2	3	4	5			
5	1.4	1.3	1.5	1.5	0.3	0.3	1.5	1.4
7	2.2	2.1	2.1	2.1	1.3	1.3	2.2	2.1
9	2.9	2.7	3.1	3.1	2.5	2.5	3.1	2.9
10	3.3	3	3.4	3.2	2.6	2.6	3.4	3.2
12	4	4	4	3.3	3.8	3.3	4	3.9
14	5	5	5.1	4.7	4.6	4.6	5.1	4.9
16	6.2	5.7	5.9	5.5	5.6	5.5	6.2	5.7
18	6.6	6.3	6.7	6.3	6.2	6.2	6.7	6.4
20	7	7.4	7.7	7.2	7.2	7	7.7	7.3
25	9.3	9.2	9.8	9.6	9.1	9.1	9.8	9.4
30	11.2	11.1	11.8	11.9	11	11	11.9	11.4
35	12.9	13	13.8	13.7	13	12.9	13.8	13.2
50	18.9	19.3	19.8	19.8	19.5	18.9	19.8	19.5
55	20.8	21.1	21.4	21.6	21.6	20.8	21.6	21.4
60	22.9	23.4	23.9	24	23.3	22.9	24	23.5
75	29.8	29.1	29.3	29.2	29.2	29.1	29.8	29.2

Ensaio Coeficiente de Fricção Corda Convencional x Bambu BASE - Ponto 2

Carga (N)	Força Célula de Carga (N)					Menor	Maior	Média
	1	2	3	4	5			
5	1.8	1.4	1.2	1	0.6	0.6	1.8	1.2
7	2.2	1.9	1.8	1.7	1.3	1.3	2.2	1.8
9	3.2	2.9	2.7	2.4	2.3	2.3	3.2	2.7
10	3.5	3.2	3	2.8	2.8	2.8	3.5	3.0
12	4.5	4	3.9	3.9	3.5	3.5	4.5	3.9
14	5.4	4.5	4.7	4.7	4.6	4.5	5.4	4.7
16	6.3	5.8	5.7	5.7	5.6	5.6	6.3	5.7
18	7.2	6.8	6.6	6.8	6.4	6.4	7.2	6.7
20	8	7.7	7.5	7.5	7.2	7.2	8	7.6
25	11	9.9	10.3	9.9	9.9	9.9	11	10.0
30	12.9	12.3	12.3	12.1	12.1	12.1	12.9	12.2
35	14.8	14.3	14.6	14.1	14.4	14.1	14.8	14.4
50	21.4	21.1	21.1	21.1	21.2	21.1	21.4	21.1
55	23.5	23.1	22.9	22.6	22.9	22.6	23.5	23.0
60	25.7	25	25.5	24.6	25	24.6	25.7	25.2
75	32.3	31.7	31.8	31.2	31	31	32.3	31.6