



CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA, ESTABILIDADE TÉRMICA E REAÇÃO AO
FOGO DO BAMBU MOSSÔ (L. *PHYLLOSTACHYS PUBESCENS*)

Bruno Menezes da Cunha Gomes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Rio de Janeiro

Julho de 2019

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA, ESTABILIDADE TÉRMICA E REAÇÃO AO
FOGO DO BAMBU MOSSÔ (*L. PHYLLOSTACHYS PUBESCENS*)

Bruno Menezes da Cunha Gomes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D.Sc.

Prof. Otávio da Fonseca Martins Gomes, D.Sc.

Prof^a. Monique Amaro de Freitas Rocha Nascimento, D.Sc.

Prof. Fabrício de Campos Vitorino, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2019

Gomes, Bruno Menezes da Cunha

Caracterização mecânica, estabilidade térmica e reação ao fogo do bambu mossô (L. *Phyllostachys pubescens*)/Bruno Menezes da Cunha Gomes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XVII, 111 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE /Programa de Engenharia Civil, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 84-90.

1. Bambu. 2. Reação ao Fogo. 3. Temperatura
4.Sustentabilidade. I.Toledo Filho, Romildo Dias. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa
de Engenharia Civil. III. Título.

“Nunca ande pelo caminho traçado, pois ele
conduz somente até onde os outros já foram.”

Alexander Graham Bell

AGRADECIMENTOS

Quando chegamos ao final de mais uma etapa o que levamos não é a alegria por ter finalizado uma etapa, mas sim o aprendizado e amadurecimento conquistado durante todo o trajeto. Hoje, encerro mais um ciclo e sou grato a diversas pessoas que estiveram presentes não apenas no meio acadêmico, mas também em minha vida. As dificuldades foram várias e graças a elas me fizeram repensar, outrora, até pensar em desistir, mas o amor de Deus e as pessoas que me rodeiam sempre me levantaram nos momentos de fraqueza e dificuldade.

Agradeço primeiramente a Deus por ser meu porto seguro em minha trajetória distante de meus familiares. A minha mãe, por toda sua dor em ter que se distanciar fisicamente do seu único filho e ter que renunciar todos seus desejos por meu sonho. A meu pai por toda a sua compressão, a minha vó por sempre acreditar em mim e me apoiar em todos os momentos de minha vida, desde a infância. Aos meus amigos, Jacilândio e Yuri, por mesmo distantes torcerem por mim desde a graduação. A Lena por todas as mensagens, carinho e orações. A Ana Paula, pela torcida e carinho, a meus tios Kátia, Livramento, Felix, Jorge, Cristina, Edmilson e Maria Neta, pela ajuda em momentos distintos.

Ao meu orientador, Romildo, por ter me permitido fazer parte da família NUMATS e ter me confiado a realização desse plano experimental. Obrigado por sua paciência, dedicação e apoio necessário, não tenho palavras para agradecer.

Ao programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil da COPPE e a todos os professores pelos ensinamentos recebidos no período de disciplinas.

Aos meus amigos do NUMATS, que dividiram sala comigo: Victória, Carla, Rayane, Yasmim, Puente e Polisseni. Ao Pedro por todo suporte nas dúvidas. A Amanda Dantas por sempre me ajudar com sugestões e revisões. A Amanda Vieira, pelas dicas e conselhos. A Iolanda pela ajuda e opiniões. Ao Giuseppe pelas críticas e memes enviados, a Mônica por compartilhar noites em claro escrevendo. A Nathália Andrade por ser minha mãe no rio e me ajudar em tudo, apoio, dúvidas, me acalmar e sempre me trazer comida,

muito, muito obrigado, jamais te esquecerei. A Vanessa e o Yassin, por toda ajuda máster. A toda Atlética Numats. A Tamara e demais membros da comunicação NUMATS. A todos citados, essa trajetória não teria sido a mesma sem o brilho de vocês.

Aos funcionários do NUMATS/labEST em especial: Luzi, Claudinha, Flavinho, Márcio, Bruna, Anderson, Marcelo, Mauro, Ioná e Jorge.

Aos amigos que o PEC e o Rio de Janeiro me apresentaram: Robson, Luan, Dorival, Getúlio, Rafael, Diogo, Amanda Campos, Jeniffer. Aos alunos de Iniciação Científica que orientei durante o mestrado, agradeço pela compreensão das cobranças: Gabriel, Victor, Arã, Leonardo.

À CAPES pelo apoio financeiro.

O caminho até aqui foi difícil, cheio de altos e bem baixos. Algumas pessoas foram escadas e outras pedras. Na capa, este trabalho leva meu nome, mas a construção das linhas foi graças a vocês. A todos, MUITO OBRIGADO.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA, ESTABILIDADE TÉRMICA E REAÇÃO AO FOGO DO BAMBU MOSSÔ (*L. PHYLLOSTACHYS PUBESCENS*)

Bruno Menezes da Cunha Gomes

Julho/2019

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Programa: Engenharia Civil

Esta pesquisa apresenta uma análise comportamental do bambu da espécie *Phyllostachys pubescens* sob cargas de compressão uniaxial e flexão em três pontos, além da sua reação ao fogo e seu comportamento sob altas temperaturas. Ensaios de resistência a compressão foram realizados em amostras com relação de aspecto (H/D) de 1, 2 e 3, em amostras sem nó e com 1 e 2 nós e em amostras saturadas e na condição de umidade de equilíbrio. Ensaios de flexão em três pontos foram realizados tanto em amostras saturadas quanto na umidade natural. O efeito da temperatura foi estudado realizando-se ensaios físicos e de tração direta em ripas de bambu antes e após exposição das mesmas às temperaturas de 100, 150, 200 e 250 °C. Foi avaliada a influência da taxa de aquecimento (0,5 e 20 °C/min) e do tempo de exposições (15, 30, 60, 120 e 240 minutos) nas propriedades físicas e mecânicas residuais do bambu. A reação ao fogo foi avaliada realizando ensaios no cone calorímetro de perda de massa com um fluxo radiante de 50 kW/m². Os resultados obtidos indicaram que a até 100C há ganhos de resistência a tração, a geometria mais adequada para o ensaio de compressão uniaxial é 2DHSN e que a reação ao fogo do bambu é comparável às de madeiras.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MECHANICAL CHARACTERIZATION, THERMAL STABILITY AND
REACTION TO FIRE AND BAMBOO MOSO (*L. PHYLLOSTACHYS PUBESCENS*)

Bruno Menezes da Cunha Gomes

July/2019

Advisor: Romildo Dias Toledo Filho

Department: Civil Engineering

This research presents a behavioral analysis of *Phyllostachys pubescens* bamboo under uniaxial compression loads and three-point flexion, as well as its reaction to fire and its behavior under high temperatures. Compressive strength tests were performed on samples with an aspect ratio (H/D) of 1, 2 and 3, on knotless and 1 and 2 knot samples and on saturated samples at equilibrium humidity. Three point bending tests were performed on both saturated and natural moisture samples. The effect of temperature was studied by performing physical and direct tensile tests on bamboo slats before and after exposure to temperatures of 100, 150, 200 and 250 °C. The influence of the heating rate (0.5 and 20 °C/min) and exposure time (15, 30, 60, 120 and 240 minutes) on the residual physical and mechanical properties of bamboo was evaluated. The reaction to fire was evaluated by conducting calorimeter cone tests with a radiant flux of 50 kW/m². The results indicated that at up to 100C there are tensile strength gains, the most suitable geometry for the uniaxial compression test is 2DHSN and that the reaction to fire of bamboo is comparable to that of wood.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
CAPÍTULO 2	4
O BAMBU	4
2.1 APRESENTAÇÃO	4
2.2 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DO BAMBU	6
2.2.1 MORFOLOGIA EXTERNA	6
2.2.2 ANATOMIA DO BAMBU	7
2.3 UTILIZAÇÕES DO BAMBU PARA FINS ESTRUTURAIS	10
2.3.1 USO DO BAMBU NA SUA FORMA NATURAL	10
2.3.2 USO DO BAMBU NA SUA FORMA INDUSTRIALIZADA	10
2.3.3 USO DE PARTÍCULAS DE BAMBU COMO AGREGADO NA PRODUÇÃO DE BIOCONCRETOS	11
2.4 CICLO E MANEJO DO BAMBU	12
2.4.1 CULTIVO	12
2.4.2 COLHEITA	12
2.4.3 SECAGEM	13
2.5 TIPOS DE TRATAMENTOS	14
2.5.1 TRATAMENTOS FÍSICOS	14
2.5.2 TRATAMENTOS QUÍMICOS	14
2.6 POTENCIAL ECONÔMICO	16
CAPÍTULO 3	18
CARACTERIZAÇÃO DE COLMOS DE BAMBU MOSSÔ	18
3.1 APRESENTAÇÃO	18
3.2 OBJETIVO	19
3.3 ENSAIOS MECÂNICOS EM COLMOS DE BAMBU	19
3.3.1 COMPRESSÃO UNIAXIAL EM COLMOS DE BAMBU	19
3.3.2 FLEXÃO ESTÁTICA EM COLMOS	19
3.3.3 INFLUÊNCIA DA SATURAÇÃO NOS ENSAIOS MECÂNICOS	20
3.4 METODOLOGIA	20
3.4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	21
3.4.1.1 Teor de umidade	21
3.4.1.2 Massa específica	22
3.4.1.3 Absorção no tempo	22
3.4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	23
3.4.2.1 Preparo do bambu livre de extrativos	23
3.4.2.2 Lignina de Klason (insolúvel)	24
	ix

3.4.2.3	Determinação da holocelulose por cloração	24
3.4.2.4	Determinação do teor de celulose	25
3.4.3	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	25
3.4.3.1	Preparação das amostras	26
3.4.4	COMPRESSÃO UNIAXIAL	26
3.4.5	FLEXÃO UNIAXIAL EM TRÊS PONTOS DE COLMOS DE BAMBU	30
3.5	RESULTADOS	33
3.5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	33
3.5.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	34
3.5.3	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	34
3.5.4	COMPRESSÃO UNIAXIAL	35
3.5.4.1	Interferência da geometria das amostras sem nó (2DHSN e DHSN)	36
3.5.4.2	Interferência da presença de nós	39
3.5.4.3	Interferência da saturação	42
3.5.5	FLEXÃO	42
3.6	CONCLUSÕES	45

CAPÍTULO 4 **47**

ESTABILIDADE TÉRMICA	47
4.1 APRESENTAÇÃO	47
4.2 OBJETIVOS	47
4.2.1 OBJETIVO GERAL	47
4.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	47
4.3 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	48
4.3.1 EFEITO DA TEMPERATURA E TEMPO DE EXPOSIÇÃO NO BAMBU	49
4.3.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)	50
4.4 METODOLOGIA	51
4.4.1 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	51
4.4.2 REGIMES DE AQUECIMENTO	51
4.4.3 REGIME DE AQUECIMENTO LENTO	52
4.4.4 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	53
4.4.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	53
4.5 RESULTADOS	54
4.5.1 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	54
4.5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ESTADO NATURAL	55
4.5.3 REGIME DE AQUECIMENTO LENTO (0,5°C/MIN)	57
4.5.4 REGIME DE AQUECIMENTO RÁPIDO (20 °C/MIN)	61

CAPÍTULO 5 **64**

5.1 APRESENTAÇÃO	64
5.2 OBJETIVOS	64
5.2.1 OBJETIVO GERAL	64
5.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	64
5.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	65
5.3.1 CONE CALORIMETRO DE PERDA DE MASSA (CCPM)	65
5.3.2 PROCESSO DE IGNIÇÃO E COMBUSTÃO DAS MADEIRAS	67
5.4 METODOLOGIA	67

5.4.1	DEFINIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	67
5.4.2	PROPRIEDADES DA COMBUSTÃO	69
5.4.2.1	Taxa de perda de massa	69
5.4.2.2	Calor total liberado na combustão	70
5.4.2.3	Taxa de liberação de calor	71
5.4.3	CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO	72
5.4.3.1	Célula de carga	72
5.4.3.2	Fluxo de calor	73
5.4.3.3	Taxa de liberação de calor	73
5.5.4	INÍCIO DO ENSAIO	73
5.5.5	CONDUTIVIDADE TÉRMICA	74
5.5	RESULTADOS	76
5.5.1	CONE CALORÍMETRO	76
5.6	CONCLUSÕES	81
<u>CONCLUSÕES FINAIS</u>		<u>82</u>
<u>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</u>		<u>83</u>
<u>APÊNDICE A</u>		<u>91</u>
<u>APÊNDICE B</u>		<u>96</u>

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Mapa de distribuição de bambu no mundo. Fonte: Londoño (2002)	3
Figura 2.2	Climas predominantes nas regiões de cultivo de bambu. Adaptado de Zujian <i>et al.</i> (2018)	4
Figura 2.3	Distribuição do bambu no Brasil. Adaptado de Cardoso (2016)	5
Figura 2.4	Morfologia do crescimento do bambu. Adaptado de Bambu Brasileiro (2017)	6
Figura 2.5	Distribuição dos feixes vasculares da região nodal	7
Figura 2.6	Distribuição dos feixes vasculares na parede do colmo	7
Figura 2.7	Diagrama esquemático da estrutura da fibra do bambu. Adaptado de Fuentes <i>et al.</i> (2011)	8
Figura 2.8	Conjuntos vasculares do bambu: a) Feixes fibrovasculares.1) Floema. 2) Metaxilema. 3) Protoxilema. 4) Esclerênquima. 5) Fibras. 6) Tecido parenquimatoso. Fonte: Liese (1985)	8
Figura 2.9	Figura 2.9 - Exemplo de aplicações de bambu como elemento estrutural: (a) e (b) habitação (DRUMOND, 2017; MANHÃES,2008); (c) Andaimos (SISH, 2007) e (d) Ponte (COBAM, 2009)	9
Figura 2.10	Corpos de prova de bioconcreto de bambu utilizados para realização de ensaios mecânicos: (a) compressão uniaxial e (b) flexão em três pontos. Andreola (2017)	11
Figura 2.11	Representação gráfica do desenvolvimento da exportação do bambu direcionada aos principais seguimentos tecnológicos. Adaptado de UN COMTRADE DATABASE (2014)	17
Figura 3.1	(a) Ensaio de flexão estática em três pontos (b) plano de ruptura. Fonte: Chung <i>et al.</i> (2002)	19
Figura 3.2	Corpos de prova utilizados no ensaio de teor de umidade	21
Figura 3.3	Equipamentos utilizados para remoção de extrativos: (a) extratores e (b) rotavapor	23
Figura 3.4	Corte das amostras para análise de Microscopia Eletrônica de Varredura	26
Figura 3.5	Esquema dos ensaios de resistência à compressão de colmos de bambu: a) DHCN e DHSN b) 2DHCN, 2DHSN e 2DHSNsat c)3DHC2N e 3DHC2Nsat	27
Figura 3.6	Geometrias estudadas: a) H/D = 1, 2 – amostras sem nó e com um nó e b) H/D = 1, 2, 3 – amostras com um e dois nós	28
Figura 3.7	Esquema do ensaio de flexão em três pontos utilizado no presente estudo	30
Figura 3.8	Configuração do ensaio de flexão em três pontos nos colmos de bambu	31
Figura 3.9	Detalhes da instrumentação utilizada no ensaio de flexão em três pontos	32
Figura 3.10	Percentual de ganho de massa no tempo	34

Figura 3.11	Processo de tratamento da imagem de microscopia óptica	35
Figura 3.12	Pontos de mudança comportamental do bambu quando submetido à esforços de compressão	36
Figura 3.13	Curvas tensão <i>versus</i> de deformação: (a) DHSN e (b) 2DHSN	37
Figura 3.14	Interferência da geometria no plano de ruptura: (a) DHSN e (b) 2DHSN	38
Figura 3.15	Detalhes da região de topo da amostra 2DHSN	38
Figura 3.16	Curvas tensão <i>versus</i> de deformação: (a) DHCN e (b) 2DHCN	40
Figura 3.17	(a) Curvas tensão <i>versus</i> deformação 3DHC2N e (b) curva típica tensão <i>versus</i> deformação transversal e longitudinal com presença de nó.	40
Figura 3.18	Interferência da presença de nó no plano de ruptura – DHCN	41
Figura 3.19	Interferência do nó no plano de ruptura: (a) 2DHCN (b) 3DHC2N	41
Figura 3.20	Curvas tensão <i>versus</i> de deformação: (a) 2DHSNsat e (b) 3DHC2Nsat	42
Figura 3.21	Curvas carga <i>versus</i> deslocamento na flexão em três pontos: (a) natural e (b) saturado	43
Figura 3.22	Plano de fissuração por cisalhamento na flexão em três pontos	44
Figura 3.23	Etapas do plano de fissuração por cisalhamento na flexão em três pontos: (a) início, (b) acomodação e (c) colapso	45
Figura 3.24	Esquema do ensaio de flexão em três pontos no estado totalmente saturado	46
Figura 4.1	Diferentes fases da utilização do calor em madeiras	48
Figura 4.2	Ilustração dos modos de ruptura presente em lâminas de bambu. Fonte: Ghavami (2015)	49
Figura 4.3	Dimensões do corpo de prova utilizado no ensaio de tração direta	51
Figura 4.4	Regime de aquecimento lento	52
Figura 4.5	Regime de aquecimento rápido	53
Figura 4.6	Máquina Universal de Ensaio (MUE) utilizada para os ensaios de tração direta	54
Figura 4.7	Curvas de TG e DTG bambu da espécie <i>Phyllostachys pubescens</i>	55
Figura 4.8	Curvas de tensão <i>versus</i> deformação em estado natural	56
Figura 4.9	Rupturas dos corpos de prova em estado natural: (a) Amostras ensaiadas e (b) detalhe da ruptura em bloco	56
Figura 4.10	Curvas tensão <i>versus</i> deformação 100 °C	57
Figura 4.11	Tensão <i>versus</i> tempo de residência 100 °C	58
Figura 4.12	Curvas tensão <i>versus</i> tempo de residência 150 °C	60
Figura 4.13	Curvas tensão <i>versus</i> tempo de residência: (a) 200 °C e (b) 250 °C	60
Figura 4.14	Modos de ruptura: (a) Cisalhamento, (b) rompimento de fibras (c) ruptura em blocos	61
Figura 4.15	Curvas médias de tensão <i>versus</i> tempo de residência R -100C	62

Figura 4.16	Curvas médias de tensão versus tempo de residência R -150C	62
Figura 4.17	Curvas médias de tensão versus tempo de residência R -200C	62
Figura 5.1	Imagem do cone calorímetro e da unidade de controle	66
Figura 5.2	Dimensões dos corpos de prova	67
Figura 5.3	Corpos de prova utilizados no cone calorímetro: (a) parte interna e (b) parte externa	68
Figura 5.4	Dimensões do aparato instrumental. Adaptado (ASTM-E1354-11b, 2011)	68
Figura 5.5	Analisador de condutividade térmica	75
Figura 5.6	Processo de combustão da parte inferior do bambu	76
Figura 5.7	Corpos de prova da parte interna no final do ensaio: (a) sob temperatura após o ensaio (b) Temperatura ambiente	77
Figura 5.8	Disposição das fibras antes do ensaio do cone calorímetro: (a) parte interna submetida a temperatura e (b) parte externa submetida a temperatura	75
Figura 5.9	Processo de combustão da parte exterior do bambu	78
Figura 5.10	Corpos de prova da parte externa no final do ensaio: (a) Temperatura após o ensaio (b) Temperatura ambiente	79
Figura 5.11	Veios vasculares após combustão	80
Figura 5.12	Paredes dos colmos de bambu após combustão	80
Figura 5.13	Pontoações presentes devido ao desgaste promovido pelo fogo	78

ABREVIACOES E SÍMBOLOS

A	rea de seção transversal
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
As	rea exposta da superfície da espécie
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BCC	Bambu compensado colado
BLC	Bambu laminado colado
C	Constante de calibração para consumo de oxigênio
CCPM	Cone calorímetro de perda de massa
CE	Comportamento elástico
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CP	Corpo de prova
CV	Coefficiente de variação
D	Diâmetro
E	Módulo de elasticidade
EHC	Calor efetivo de combustão
H	Altura do corpo de prova
HRR	Taxa de liberação de calor
HRR180	Taxa de liberação de calor em 180s após a ignição
HRR300	Taxa de liberação de calor em 300s após a ignição
INBAR	International Network for Bamboo and Rattan
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MLR	Taxa de perda de massa
NF	Número de fissuras
PHRR	Pico da taxa de liberação de calor
THR	Calor total liberado
TIG	Tempo de ignição
TML	Massa total perdida
TOC	Tempo de combustão
TOP	Tempo de pirólise
TTI	Tempo de ignição

F	Carga
F_E	Carga até o limite de elasticidade
F_{\max}	Carga máxima
m	Massa da amostra
\dot{m}	Taxa média de perda de massa
m_i	Massa da amostra inicial
m_f	Massa da amostra final
m_{t1}	Massa expressa em gramas, no tempo 1
m_{t2}	Massa expressa em gramas no tempo 2
q''	Calor total liberado
\dot{q}_i	Taxa de liberação de calor inicial
\dot{q}_{\max}	Taxa de liberação de calor máxima por unidade de área
m_f	Relação estequiométrica entre massa de oxigênio/combustível
ρ	Densidade
U	Teor de umidade
U	Volume do corpo de prova no estado natural
δ	Deflexão central
δ_E	Deflexão central até o limite de elasticidade
r_o	Relação estequiométrico entre massa de oxigênio/combustível
I	Momento de inércia
MOR	Resistência à flexão
MOE	Módulo de elasticidade à flexão
t	Tempo
e_m	Espessura média de parede
σ	Tensão
ε	Deformação
t_d	Tempo de atraso do oxigênio
t_{ig}	Tempo da chama sustentada
T_e	Temperatura absoluta do gás no medidor

$X_{O_{21}}$	Valor inicial de leitura do analisador de oxigênio
$X_{O_{20}}$	Leitura do analisador de oxigênio
Δ_{hc}	Calor líquido de combustão
$\Delta_{c,eff}$	Calor eficaz da combustão
Δ_m	Variação da massa
Δ_p	Pressão diferencial
Δ_t	Variação do tempo
X_{O_2}	Leitura do analisador de oxigênio, antes da correção do tempo de atraso

INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é considerada uma das maiores consumidoras de recursos naturais e energia do mundo, sendo também responsável pela geração de grande quantidade de resíduos (DULTI *et al.*, 2011). A problemática relacionada à geração de resíduos é ainda maior quando levamos em consideração o processo de urbanização, que nas últimas décadas foi responsável pela migração de mais de 50% da população rural para a zona urbana (UNHABITAT, 2011). Diante disso, a busca por materiais de construção que apresentem elevado desempenho e respeitem o meio ambiente está muito evidente na atualidade. Trata-se, portanto, de um problema global já que a produção dos materiais de construção convencionais emite altos níveis de dióxido de carbono (CO₂) e isso deve ser minimizado (TSAI *et al.*, 2011).

No que tange aos materiais de construção de origem vegetal, eles têm a capacidade de capturar CO₂ durante o seu crescimento e armazená-lo durante o período no qual são utilizados, além de serem renováveis (RIAÑO *et al.*, 2002; VOGTLÄNDER *et al.*, 2014). Dentro dessa perspectiva, a indústria da construção civil exerce um papel relevante, sendo a responsável por 40% do consumo global de energia e por até 30% das emissões globais de gases de efeito estufa (XING *et al.*, 2011). Com isso, a atribuição de elementos construtivos não convencionais ao mercado é uma realidade que engloba os materiais naturais. O bambu pode ser considerado um dos mais importantes materiais celulósicos e seu uso como material alternativo na construção civil se justifica por suas excelentes propriedades mecânicas.

Independentemente do modo como o bambu é utilizado, seja em seu estado/forma natural (bambu tubular) ou industrializado na forma de bambu laminado colado ou madeira de bambu, o conhecimento do comportamento desse material e dos seus produtos sob condições extremas é de grande importância para o seu uso em estruturas. A ação de elevadas temperaturas e do fogo pode causar danos permanentes a estruturas e assim, o conhecimento sobre sua estabilidade térmica.

1.1 OBJETIVOS

- (i) Realizar uma análise comportamental do bambu da espécie *Phyllostachys pubescens* sob o teste de compressão uniaxial e flexão em três pontos, examinando a influência da geometria, presença de nós e saturação.
- (ii) Estudar a influência da estabilidade térmica do bambu sob diferentes taxas de aquecimento e tempos de residência.
- (iii) Investigar a reação ao fogo do bambu sob condições de incêndio por meio do ensaio do cone calorímetro de perda de massa.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação é composta por seis capítulos e dois anexos.

Capítulo 1- No capítulo 1 é introduzido o tema estudado com considerações sobre a relevância do assunto a ser pesquisado e a estrutura do trabalho.

Capítulo 2- O capítulo 2 é destinado à revisão da literatura geral sobre o material estudado nesse plano de trabalho, com ênfase na distribuição de bambu no mundo, sua morfologia, suas características em relação a ciclo e manejo e, por fim, seu potencial econômico. As revisões bibliográficas específicas sobre os temas do presente estudo são realizadas no início de cada capítulo.

Capítulo 3- No capítulo 3 é apresentado a caracterização física, mecânica e microestrutural do bambu da espécie *Phyllostachys pubescens* (Mossô) usado no presente estudo. Os ensaios físicos realizados foram: teor de umidade, saturação no tempo e densidade. Já em relação aos ensaios mecânicos, foram realizados ensaios de compressão uniaxial e flexão em três pontos. Os ensaios foram realizados utilizando tanto amostras na condição de umidade natural quanto saturada. Adicionalmente, foram realizados ensaios de resistência à compressão uniaxial em corpos de prova de bambu com diferentes números de nós (0, 1 e 2) e relações de aspecto ($H/D = 1,2$ e 3).

Capítulo 4- O capítulo 4 é dedicado ao estudo da influência da taxa de aquecimento, da temperatura e do tempo de exposições nas propriedades físicas e mecânicas do bambu Mossô. Foram utilizados tempos de residência de 15, 30, 60, 120 e 240 minutos, taxas de aquecimento de 0,5 e 20 °C/min. Análises termogravimétricas foram realizadas em

amostras de bambu e a partir dos resultados obtidos foram estabelecidas as temperaturas de 100, 150, 200 e 250 °C para o presente estudo. Ensaio de resistência à tração direta em amostras de bambu retiradas da região de topo foram realizados antes e após a ação da temperatura.

Capítulo 5- No capítulo 5 é investigada a reação ao fogo do bambu Mossô sob condições de incêndio realizando-se ensaios no cone calorímetro. A influência do fluxo de calor sobre a parede interna e externa do bambu foi avaliada no presente estudo. Ensaio de condutividade térmica foram também realizadas em amostras de bambu visando auxiliar a interpretação dos resultados obtidos. Estudos microestruturais após a realização do ensaio de calorimetria foram realizados para identificação das mudanças na microestrutura ocorrida após o ensaio.

Capítulo 6 – É apresentada uma síntese das principais conclusões obtidas nos capítulos 3,4 e 5, além das sugestões de trabalhos futuros.

Anexo A - No anexo A são apresentados os gráficos do Capítulo 4 submetidos a uma taxa de aquecimento de 20 °C/min que contemplam a dissertação.

Anexo B - O anexo B apresenta imagens de todos dos corpos de provas ensaiados no Capítulo 4.

O BAMBU

2.1 APRESENTAÇÃO

O bambu é uma gramínea *Poaceae* (ou *Gramineae*), pertencente à subfamília *Bambusoideae* (LIESE & KOHL, 2015), que possui cerca de 1200 espécies no mundo (XIAO *et al.*, 2013). Trata-se de um dos materiais mais versáteis presentes na natureza, devido, entre outros motivos, a sua excelente resistência a esforços de tração, adaptando-se às solicitações resultantes da incidência do vento sobre a estrutura. O bambu está presente em diversos países do mundo, como mostra a Figura 2.1 (LONDOÑO, 2002).

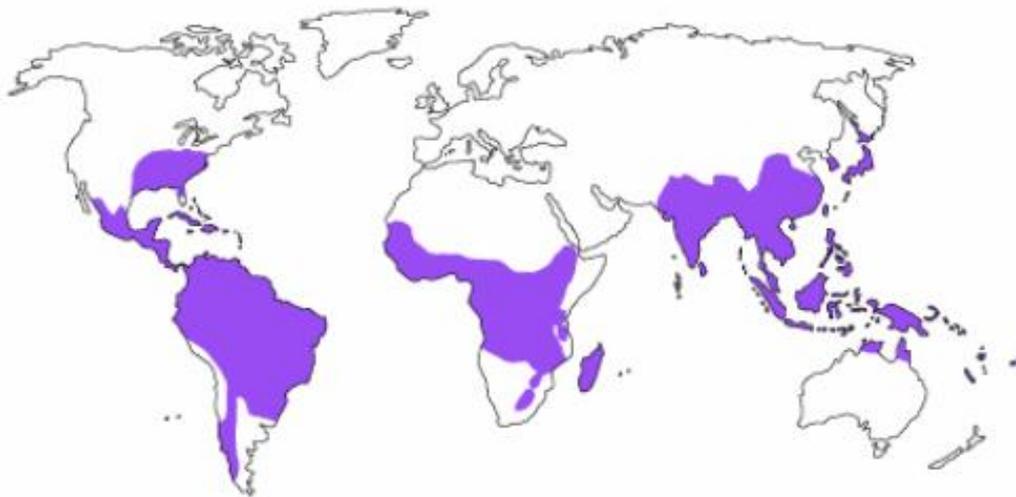


Figura 2.1- Mapa de distribuição de bambu no mundo.
Fonte: Londoño (2002)

No que tange aos benefícios que o material apresenta, há os de ordem econômica (baixo custo, disponibilidade, facilidade de plantio) e os de produção (leveza, fácil corte, beneficiamento simples, alta resistência). A indústria da construção civil tem grande potencialidade para o uso do bambu como material de construção, e ele já vem sendo empregado na produção de painéis laminados para piso, teto, parede, além de uma série de outros produtos que fazem com que ele seja competitivo com a madeira em várias partes do mundo (WU, 2009).

Estudo realizado por Van *et al.* (2006) mostrou que, numa avaliação de ciclo de vida (ACV), produtos para revestimentos em bambu apresentam taxas negativas de emissão de CO₂. Huang *et al.* (2018), justificam o uso de produtos fabricados com bambu graças às suas propriedades hidrotérmicas, pois, segundo os autores, este material possui maior capacidade de armazenamento de calor e resistência ao vapor quando comparado com as madeiras. Nas regiões quentes e temperadas a utilização do produto se torna viável já que não é necessário o transporte do material por grandes distâncias, já que os países que detêm o material, têm condições climáticas favoráveis, como mostra a Figura 2.2.

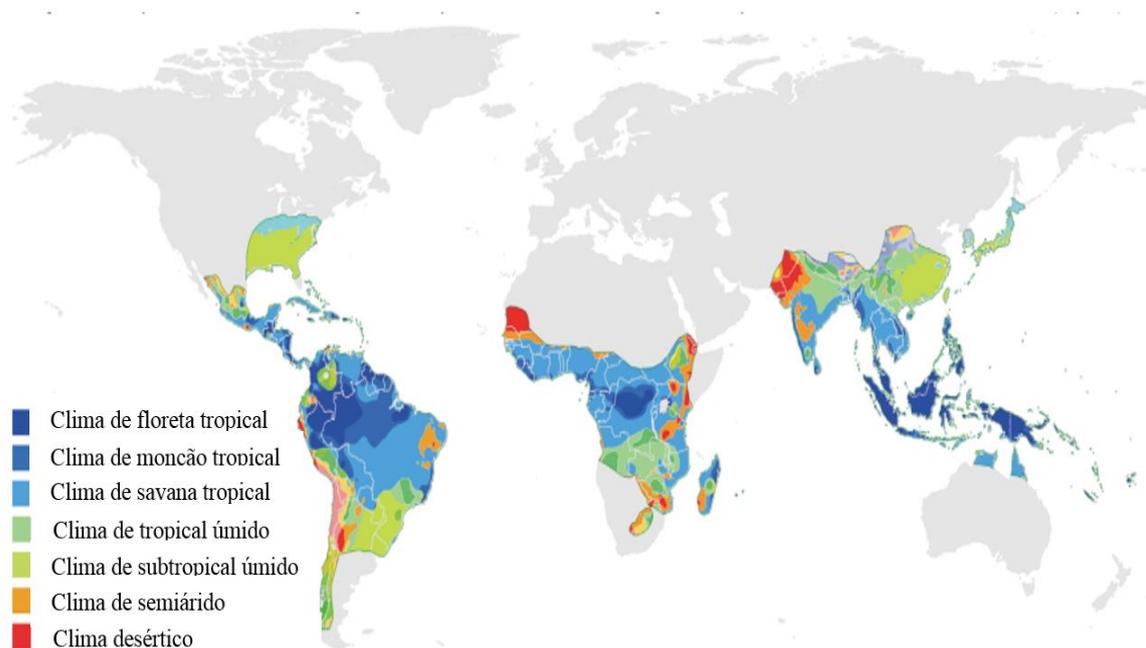


Figura 2.2 - Climas predominantes nas regiões de cultivo de bambu. Adaptado de Huang *et al.* (2018)

Em relação à distribuição das florestas de bambu no mundo, elas estão presentes principalmente em florestas tropicais e zonas climáticas subtropicais na Ásia (67%), Américas (30%) e África (3%) (LOPEZ, 2003). Em diversos países asiáticos o beneficiamento industrial do bambu ocorreu por meio da adaptação das tecnologias de processamento de madeiras, como é o caso da China, Índia, Tailândia, Malásia e Vietnã (LIN e ZHANG, 2002)

Segundo Greco e Cromberg (2011), entre todos os continentes, as Américas possuem papel de destaque, pois abrigam aproximadamente 41 gêneros e 440 espécies nativas de bambu. Dentre os países que constituem o continente americano, o Brasil aparece em situação privilegiada, uma vez que conta com uma grande diversidade natural de bambu

(cerca de 137 espécies), seguido pela Colômbia (70), Venezuela (60), Equador (42), Costa Rica (39) e México (37), como ilustrado na Figura 2.3. Estima-se que no mundo existam cerca de 22 milhões de hectares de bambu, dos quais aproximadamente 4,5 milhões de hectares situam-se no Acre (Brasil) — cerca de 20% da floresta mundial (CARDOSO, 2016).

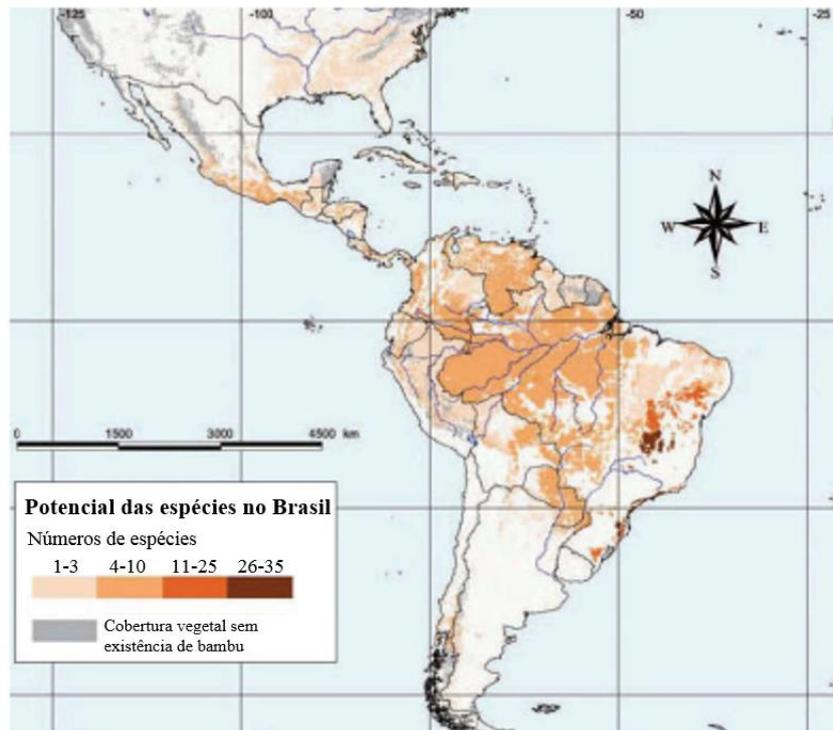


Figura 2.3 - Distribuição do bambu no Brasil. Adaptado de Cardoso (2016)

2.2 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DO BAMBU

2.2.1 MORFOLOGIA EXTERNA

A maioria das espécies de bambu apresenta um crescimento apical e, após formado, o vegetal é subdividido em uma parte aérea e uma parte subterrânea. A primeira é formada pelo colmo, ramos, flores e folhas (fase de maturidade). Já a segunda, pelo rizoma e pelas raízes, conforme ilustrado na Figura 2.4. Por se tratar de uma espécie entouceirante, o crescimento de um novo rizoma, proveniente das gemas presentes no rizoma inicial, promove o desenvolvimento de um novo colmo. É possível a geração de até 10 colmos a partir de uma mesma touceira, como mostra Figura 2.4 (PEREIRA & BERALDO, 2008).

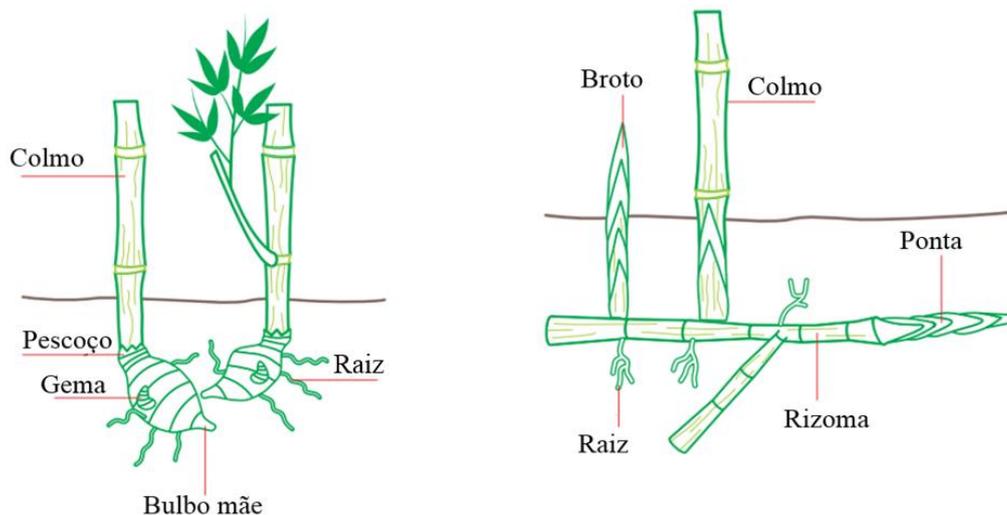


Figura 2.4- Morfologia do crescimento do bambu. Adaptado de Bambu Brasileiro (2017)

A geometria dos colmos possui um formato próximo a um cone com os diâmetros diminuindo da base em direção ao topo. Os colmos são subdivididos em nós e entrenós, por diafragmas, que podem ter até 65 cm de espaçamento (NASCIMENTO & LÚCIA, 1995).

2.2.2 ANATOMIA DO BAMBU

Diversos pesquisadores relatam que as propriedades mecânicas do colmo são determinadas por meio de sua estrutura anatômica (GHAVAMI & MARINHO, 2004; CHUNG, 2002; YU *et al.*, 2005; WAKCHAURE & KUTE, 2012). Nos entrenós, as fibras são orientadas de forma axial (paralelas ao seu eixo de crescimento), enquanto na região do nó as fibras são dispostas de modo desorganizado por meio de interconexões transversais. A Figura 2.5 esquematiza o modo de disposição dos feixes vasculares.

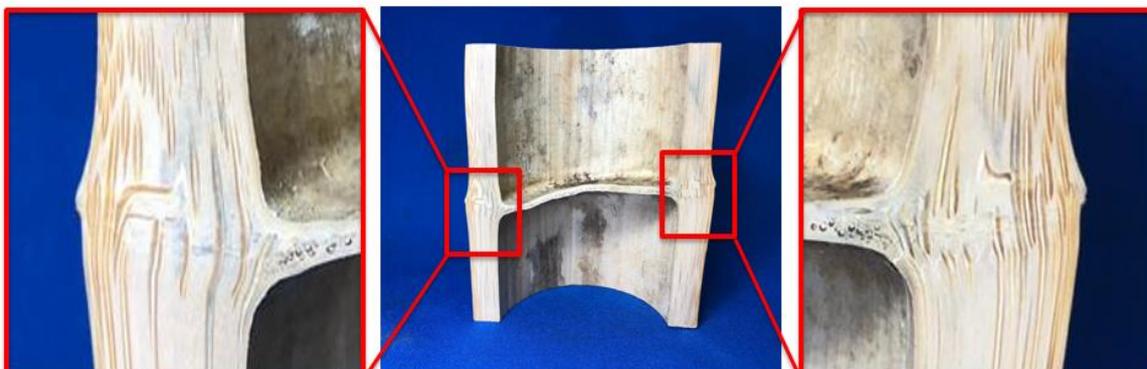


Figura 2.5 - Distribuição dos feixes vasculares da região nodal

No sentido radial, existe uma concentração maior de fibras na parte externa da parede do colmo. Assim, existe uma variação de densidade das fibras na parede do colmo como mostrado na Figura 2.6.

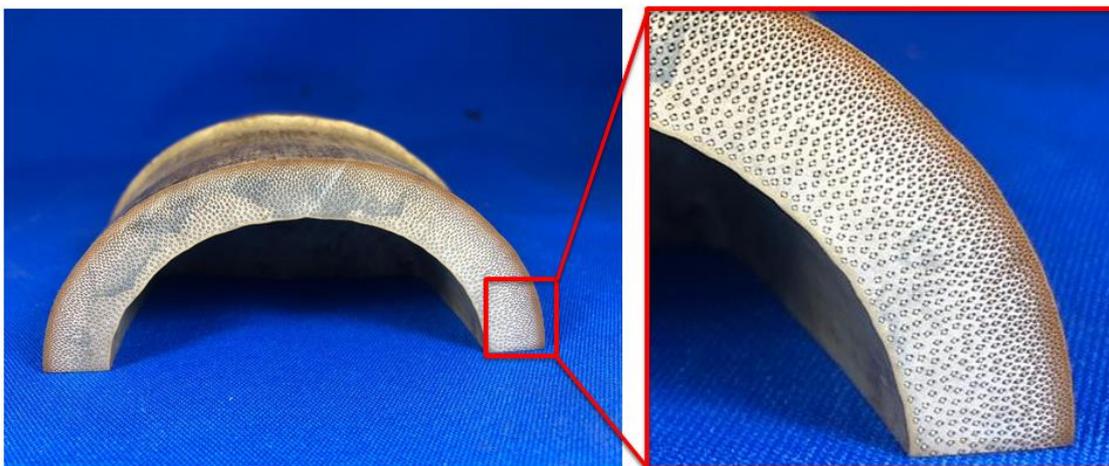


Figura 2.6 – Distribuição dos feixes vasculares na parede do colmo

O conjunto de vasos vasculares formam os tecidos de condução da seiva e as fibras são as responsáveis pela resistência mecânica, que estão imersas em uma matriz de lignina (parênquima). O transporte de nutrientes é realizado nos vasos, que levam os nutrientes da raiz para as demais partes da planta. Os vasos são reforçados por meio de um tecido (esclerênquima) (NOGUEIRA, 2008).

As células meristemáticas estão situadas nos nós e têm a responsabilidade de formar os tecidos (LIESE, 1998). Após brotar, o rizoma do colmo nasce com o diâmetro definitivo e permanece com suas dimensões radiais durante toda a vida. Os colmos protegem os vasos condutores e têm como função sustentar a parte aérea da planta, além de ser a estrutura mais importante quando a questão é a sua utilização (GREGO E CROMBERG, 2011).

Na Figura 2.7, Fuentes *et al.* (2011) analisam a fibra do bambu por meio de diversas técnicas de caracterização multidimensional, por meio da microscopia que segundo os autores, proporcionam a compreensão da organização dos componentes químicos em sua formação.

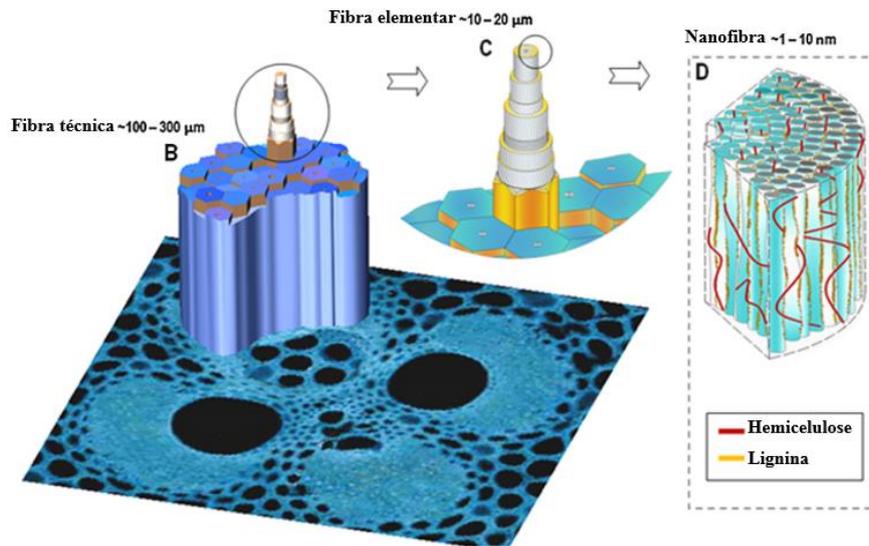


Figura 2.7- Diagrama esquemático da estrutura da fibra do bambu. Adaptado de Fuentes *et al.* (2011)

A Figura 2.8 ilustra os conjuntos vasculares do bambu, mostrando: a) os feixes fibrovasculares que transportam água do rizoma para as folhas. Os floemas (1) que são responsáveis por conduzir os nutrientes das folhas para as células do parênquima tanto no rizoma quanto no colmo. O metaxilema (2) conduz a água na estrutura do bambu. Já o protoxilema (3) está situado entre dois vasos do metaxilema, que transportam a água até o broto. A esclerênquima (4) é associada a resistência mecânica. Já as fibras (5), são recobertas por um tecido parenquimatoso (6) que protege os feixes vasculares. (NOGUEIRA, 2008).

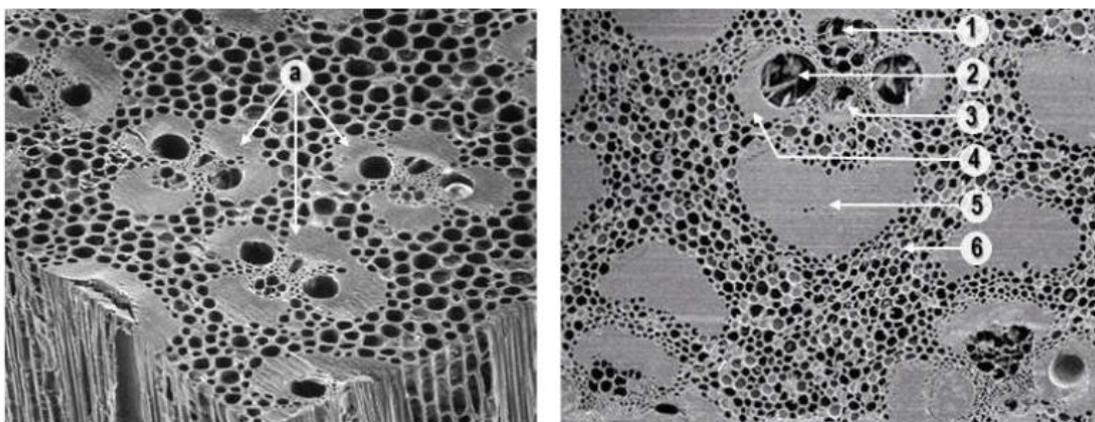


Figura 2.8 - Conjuntos vasculares do bambu: a) Feixes fibrovasculares. 1) Floema. 2) Metaxilema. 3) Protoxilema. 4) Esclerênquima. 5) Fibras. 6) Tecido parenquimatoso.

Fonte: Liese (1985)

2.3 UTILIZAÇÕES DO BAMBU PARA FINS ESTRUTURAIS

2.3.1 USO DO BAMBU NA SUA FORMA NATURAL

De modo global, são diversas as aplicações dos colmos de bambu como elemento estrutural em construções permanentes tais como habitações e pontes, e também em estruturas temporárias como andaimes (VÉLEZ *et al.*, 2000; JANSSEN, 2000; DELGADO, 2008). Villegas *et al.* (2019) atribuem os desafios envolvidos em desenvolver conexões padrões como uma das dificuldades de utilização mais ampla do material. Na Figura 2.9 é mostrado exemplos de aplicações dos colmos de bambu nas construções.

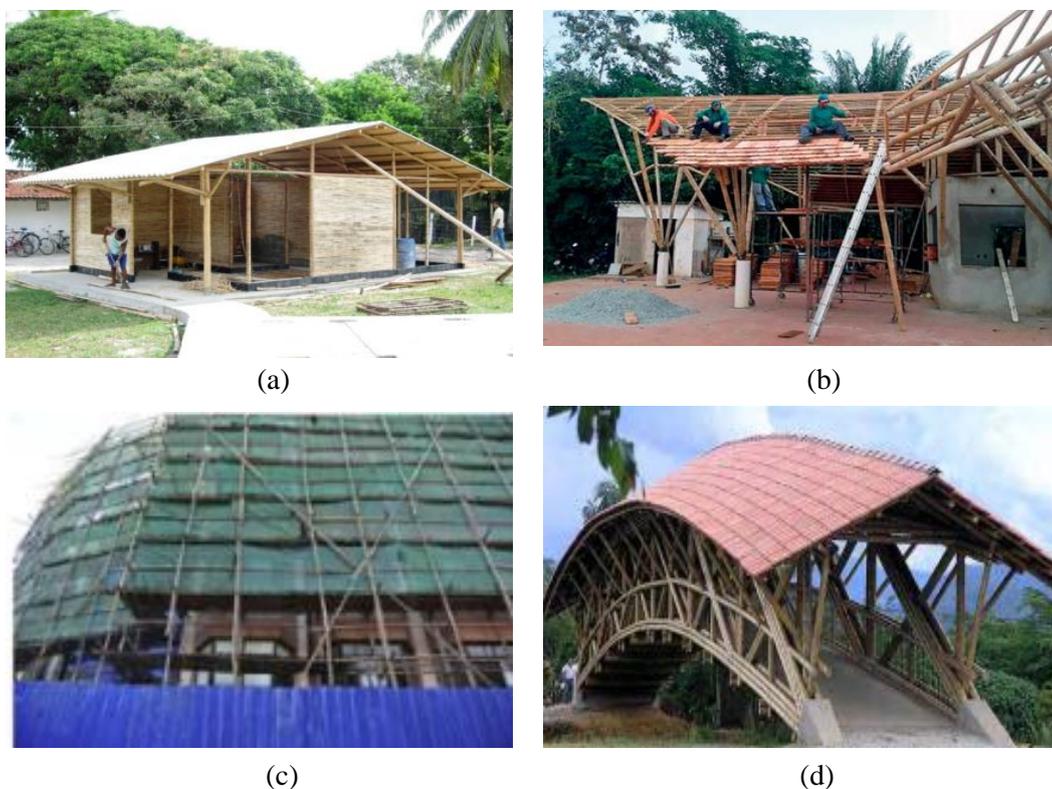


Figura 2.9 - Exemplo de aplicações de bambu como elemento estrutural: (a) e (b) habitação (A DRUMOND, 2017; B MANHÃES,2008); (c) Andaimos (XU, 2007) e (d) Ponte (D COBAM, 2009)

2.3.2 USO DO BAMBU NA SUA FORMA INDUSTRIALIZADA

Laminados de bambu possuem excelente aceitação na indústria da construção civil. Entre os produtos laminados, podemos citar o bambu laminado colado (BLC) e o bambu compensado colado (BCC). Para o processo de fabricação do BLC, as ripas de bambu são coladas por meio de uma resina e, posteriormente, prensados. O processamento do BCC

é similar ao anterior, com a diferença que são usados filamentos de bambu ao invés de ripas (SHARMA *et al.*, 2015). Segundo Chen (2019), as propriedades mecânicas dos bambus laminados são compatíveis ou até superiores às de produtos derivados de madeiras, demonstrando o potencial de aplicação desses materiais em estruturas.

2.3.3 USO DE PARTÍCULAS DE BAMBU COMO AGREGADO NA PRODUÇÃO DE BIOCONCRETOS

Andreola (2017), utilizou resíduos de bambu para a produção de bioconcretos com baixa emissão de carbono ($133,20 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$) e com elevada trabalhabilidade. A pesquisadora utilizou um volume de partículas de 45 a 50% e os bioconcretos de bambu apresentaram, valores de resistência à compressão na faixa de 2,25 e 4,20 MPa, com módulos de elasticidade variando de 1,51 a 2,35 GPa e módulo de ruptura (MOR) entre 1,26 a 1,85 MPa.

Para melhorar a performance mecânica deste material, uma alternativa em estudo por Andreola *et al.* (2019) é a substituição parcial de cimento por metacaulinita e cinza volante. Resultados iniciais obtidos mostraram que os bioconcretos podem apresentar resistência à compressão de cerca de 10-15 MPa. Tais resultados abrem um leque de possibilidades para que o material possa ter diversas aplicações na engenharia civil. A Figura 2.10 mostra a aparência dos bioconcretos de bambu desenvolvidos por Andreola (2017).

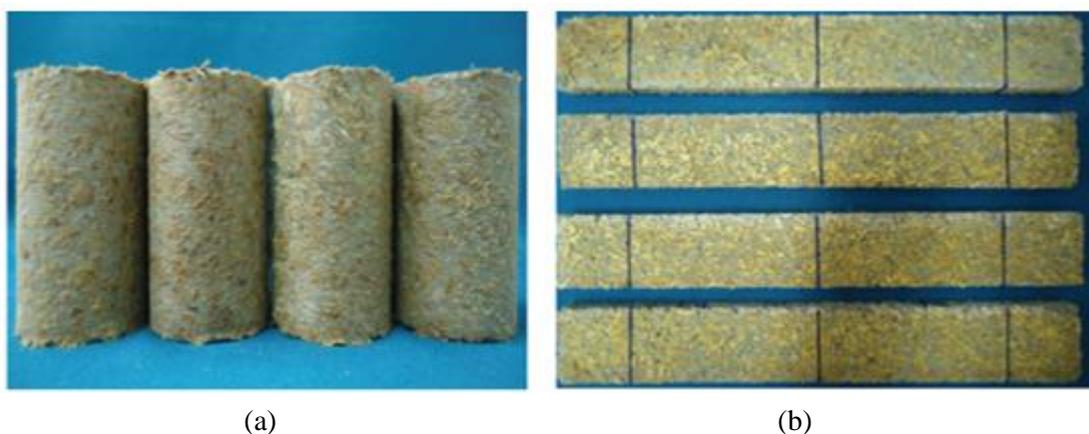


Figura 2.10 – Corpos de prova de bioconcreto de bambu utilizados para realização de ensaios mecânicos: (a) compressão uniaxial e (b) flexão em três pontos. Andreola (2017)

2.4 CICLO E MANEJO DO BAMBU

2.4.1 CULTIVO

O bambu é uma planta que pode ser encontrada em vários países, nas mais diversas localizações, solos, topografias e climas. Em termos geográficos, o cultivo do bambu é apropriado nas zonas tropicais, subtropicais e temperadas de todos os continentes, com exceção do sul da Argentina, norte da Ásia e Europa.

Em relação à altitude, existem indícios da plantação de bambu tanto ao nível do mar quanto em torno de 5 000 m de altura (Cordilheiras dos Andes). Já em se tratando de precipitação e do tipo de solo, esses fatores não limitam, de maneira isolada, o desenvolvimento do bambu, pois, as espécies são capazes de se adaptarem às condições locais ao longo do tempo (LÓPEZ, 2003). O bambu é uma planta perene, portanto, seu cultivo dispensa replantios. O nascimento de novos colmos acontece na natureza uma vez por ano, por reprodução assexuada de seus rizomas.

Segundo Perreira e Beraldo (2008), para o cultivo correto do bambu, é necessário cavar covas com dimensões de aproximadamente 50 x 50 x 50 cm (espessura x largura x comprimento), adubar e regar de forma constante até o início da pega. É preciso, ainda, combater o ataque das formigas e capinar a vegetação nativa no entorno, pois, no início do desenvolvimento da planta, a competição por luz solar e nutrientes pode prejudicar o seu crescimento. Outro aspecto importante é o espaçamento entre as mudas de bambu, dado o tipo de desenvolvimento morfológico, entouceirante ou alastrante. Quanto ao porte, as espécies pequenas necessitam de um espaçamento em torno de cinco metros, já as maiores devem ser plantadas com distâncias de aproximadamente oito metros, para que, posteriormente, a colheita de seus colmos seja facilitada. Para outras finalidades que não as de colheita como, por exemplo, barreiras acústicas e contenção de encostas, espaçamentos menores podem ser adotados.

2.4.2 COLHEITA

A colheita deve ser feita no período da seca, quando uma menor quantidade de seiva circula pelos feixes vasculares do bambu, conferindo mais resistência a ataques de insetos e fungos. Além disso, no Brasil esse período coincide com a estação de baixas

temperaturas, quando os insetos xilófagos (insetos que se alimentam de madeira) estão inativos ou hibernando. Ainda nessa época do ano, o bambu apresenta um menor teor de umidade, o que confere leveza estrutural, facilitando, por consequência, seu transporte.

A colheita deve ser realizada, também, com base no teor de amido presente no colmo, que está diretamente associado com a sua durabilidade. Por essa razão, é preferível a realização de colheitas em épocas posteriores à brotação, uma vez que o amido é liberado de maneira intensa durante a geração dos brotos (PEREIRA & BERALDO, 2008).

O corte do bambu é feito mediante a espécie. Para as espécies alastrantes, o corte deve ser realizado rente ao solo, tendo em vista que o rizoma está protegido abaixo dele. Para as espécies entouceirantes, por sua vez, o corte deve ser feito a uma distância de aproximadamente vinte centímetros acima do solo e acima de algum nó, pois, isso dificulta a entrada de água no interior do material. Caso ocorra precipitação, a água ficará retida no diafragma, enquanto o restante do colmo permanecerá livre da sua presença.

A colheita do bambu deve ser realizada a cada três anos para as espécies entouceirantes e, no mínimo, cinco anos para as alastrantes. É recomendado que a colheita não ultrapasse estas idades, uma vez que a resistência e a durabilidade do bambu tende a decair com o tempo (KLEINE, 2010).

2.4.3 SECAGEM

Quando comparado às madeiras de mesma densidade (cerca de 750 kg/m³), o bambu demora mais tempo para alcançar a umidade de equilíbrio com o meio ambiente. Isso se deve pelo fato de o bambu apresentar uma constituição anatômica diferente das demais plantas, na qual a água está sujeita a duas fortes barreiras no seu processo de eliminação. A primeira corresponde à ausência de estruturas radiais que dificultam o transporte na direção transversal, fazendo com que haja somente o transporte longitudinal, e a segunda à impermeabilidade quase total da casca do bambu.

Após a colheita, os colmos começam a perder umidade naturalmente, com relativa rapidez. Quando a secagem é forçada (por exemplo, feita ao sol), a exposição excessiva faz com que deformações e rachaduras apareçam nos colmos, o que acaba inviabilizando seu uso, sobretudo para fins estruturais. Por estar diretamente relacionada à estabilidade dimensional, deformações e a rachaduras, a secagem é considerada o fator que mais

influencia a durabilidade do bambu (KLEINE, 2010). A secagem pode ser, portanto, natural ou artificial. Abaixo, seguem definições de cada tipo de secagem.

- (i) Secagem natural: é um tipo de secagem mais lenta, relacionada diretamente às condições atmosféricas. Nesse tipo de secagem, a incidência direta do sol deve ser evitada, devido à formação de deformações e rachaduras estruturais. Os colmos devem ser dispostos em uma configuração orientada norte-sul e travados entre si na forma de “x”, a fim de se evitar deslizamentos.
- (ii) Secagem artificial: é um tipo de secagem realizada por meio de diferentes técnicas, como secagem por estufa e por micro-ondas. No Brasil, ela é ainda pouco utilizada.

2.5 TIPOS DE TRATAMENTOS

2.5.1 TRATAMENTOS FÍSICOS

A grande maioria das espécies de bambu é vulnerável ao ataque de organismos xilófagos, devido à presença de grande quantidade de amido no interior das células parenquimáticas e de umidade nos colmos. A fim de se combater esse ataque e aumentar a resistência do bambu, este deve ser submetido a um tratamento. As principais técnicas de tratamento do bambu são:

- (i) Cura na mata (trata-se do tratamento natural mais tradicional);
- (ii) Tratamento por imersão;
- (iii) Tratamento pelo fogo;
- (iv) Tratamento pela fumaça;
- (v) Tratamento por fervura em água;
- (vi) Tratamento por cozimento por vapor;
- (vii) Tratamento por cozimento com preservante.

2.5.2 TRATAMENTOS QUÍMICOS

Em comparação aos métodos de tratamento convencionais (físicos), os tratamentos químicos são mais eficientes. Quando realizados de forma correta, esses tratamentos

umentam a durabilidade e se tornam efetivos contra o ataque de insetos (KLEINE, 2010).

Os principais tipos de tratamento químico são:

- (i) Oleosos: para esse tipo de tratamento químico, o cretoso é o produto mais utilizado, podendo ser de origem vegetal ou mineral. O cretoso de origem vegetal é um produto derivado da carbonização da madeira e sua obtenção é dada por destilação do alcatrão. Já o cretoso de procedência mineral é obtido da destilação da hulha. O método de tratamento mais utilizado usando produtos oleosos é o banho quente-frio, indicado para peças que tenham fins estruturais.
- (ii) Oleossolúveis: tipo de tratamento muito utilizado na China. Os materiais celulósicos submetidos a esse tipo de tratamento apresentam um composto químico denominado pentaclorofenol, responsável por afastar organismos xilófagos.
- (iii) Hidrossolúveis: tratamento cujos produtos salinos atuam como preservativos. Esses produtos apresentam boa solubilidade em água, o que favorece sua penetração no bambu.
- (iv) *Boucherie* (modificado): consiste na aplicação de pressão no bambu, para que uma solução hidrossolúvel penetre nos vasos localizados na parte interna do colmo, de forma que a seiva seja empurrada em sentido oposto à conexão. É recomendado que o processo tenha uma aplicação de três horas e, logo após os colmos sejam colocados em posição horizontal, ao menos por 15 dias.
- (v) Tratamento por injeção nos entrenós: para a execução desse tratamento, cada entrenó é considerado uma unidade, onde são abertos furos no sentido radial e, então, tratado com uma solução preservante. Quando aplicada essa injeção, a perfuração não deve ser, necessariamente, realizada no sentido radial, tampouco o diafragma deve ser removido.

2.6 POTENCIAL ECONÔMICO

Desde a antiguidade, o bambu tem sido aplicado em diferentes setores como alimentício, decoração e construção civil, além de ser aproveitado em utilidades domésticas. Portanto, o bambu está de forma direta ou indiretamente ligado à renda de muitas famílias e empresas. Em relação ao Brasil, o país apresenta uma demanda de madeira muito maior que a sua produção. Esse fator, aliado à necessidade constante de matérias-primas renováveis, tem criado um cenário propício para a expansão do bambu, tanto para diferentes setores da economia, como em volume. (ABDUL KHALIL *et al.*, 2012).

Diferentemente de árvores, que levam cerca de 20 anos para se desenvolverem por completo, o bambu alcança o seu estado maduro entre 3 e 5 anos de idade, o que permite sua utilização mais imediata. Isso favorece o mercado de bambu contra o da madeira, principalmente nos países da Ásia, com destaque à China e América do Sul.

Como produto para um desenvolvimento sustentável, o bambu possui eixos de pesquisas consolidadas no mundo. Sua utilização tecnológica é dotada de uma ampla abrangência. Por exemplo, o bambu é usado no combate à erosão, por meio da restauração de solos devastados (NETO e GIANNETTI, 2009).

Segundo Santi (2015), são produzidas, por ano no Brasil, cerca de 150 mil toneladas de celulose de bambu, sendo que a maior parte é destinada à produção de sacos para o armazenamento de cimentos. Algumas empresas deram início ao cultivo com a mesma finalidade, contudo, o uso da matéria-prima para a produção de biomassa se mostrou economicamente mais atrativa.

A China é o país que mais produz e exporta bambu no mundo, sendo responsável por 65% da exportação mundial, correspondente a cerca de US\$1,207 milhões. Apesar da significativa presença do bambu nos setores tecnológicos, em razão da quantidade de exportações verificada, um comparativo entre os anos de 2007 e 2013 releva poucos avanços no uso do bambu (ver Figura 2.11). Esses dados podem ser atribuídos à crise econômica mundial de 2013 (UN COMTRADE DATABASE, 2014).

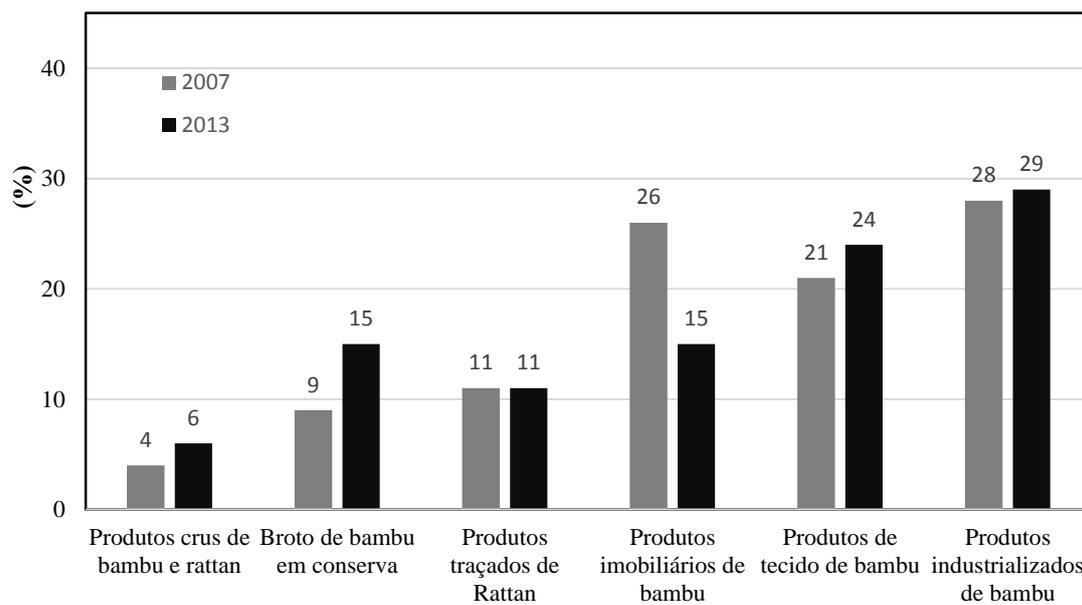


Figura 2.11- Representação gráfica do desenvolvimento da exportação do bambu direcionado aos principais seguimentos tecnológicos. Adaptado de UN COMTRADE DATABASE (2014)

CARACTERIZAÇÃO DE COLMOS DE BAMBU MOSSÔ

3.1 APRESENTAÇÃO

Um dos principais atrativos para o uso do bambu como material alternativo da construção civil é o seu rápido crescimento quando comparado as das madeiras convencionais. Em média, o bambu alcança sua maturação (estado propício para o corte) entre 3 e 6 anos, enquanto as madeiras macias e duras atingem esse estágio com, respectivamente, cerca de 10 e 30 anos (YAN, 2018).

As propriedades do bambu variam ao longo do colmo, sendo reportadas, na literatura, diferenças tanto no sentido longitudinal (GHAVAMI *et al.*, 2003) quanto radial (SANTOS *et al.*, 2018 e COSTA, 2014).

Na construção civil o bambu geralmente é utilizado em colmos ou em ripas. Os colmos, de formato tubular, são a forma geométrica natural em que o bambu se encontra na natureza. No formato laminado de ripas, ele é mais usado como revestimento, pisos ou elemento de reforço. Em todos os casos, mas em especial no caso dos laminados, existe grande geração de resíduos que podem ser utilizados na substituição parcial dos agregados para a produção de bioconcretos (ANDREOLA, 2017).

No presente capítulo serão apresentados resultados da composição química, microestrutural, dos ensaios físicos e do comportamento mecânico de colmos de bambu da espécie *Phyllostachys pubescens* ensaiados na flexão em três pontos e sob esforços de compressão uniaxial. No caso dos ensaios de compressão foi avaliada a influência do número de nós (0, 1 e 2 nós), da geometria ($H/D = 1$ e 2) e do teor de umidade (umidade natural e condição saturada) no comportamento tensão x deformação do material.

No caso do comportamento à flexão, foi desenvolvido um *setup* experimental para o ensaio de resistência à flexão em três pontos e avaliou-se a influência da saturação do colmo na curva carga *versus* deflexão do material. O modo de fratura foi avaliado por meio de fotografias obtidas durante o ensaio.

3.2 OBJETIVO

Realizar uma análise comportamental do bambu da espécie *Phyllostachys pubescens* sob o teste de compressão uniaxial e flexão em três pontos, examinando a influência da geometria, presença de nós e saturação.

3.3 ENSAIOS MECÂNICOS EM COLMOS DE BAMBU

Graças as suas excelentes propriedades mecânicas e facilidade para o uso, os colmos de bambu vêm sendo empregados na construção civil em diversos países. No entanto não existe um consenso sobre a normatização de métodos de ensaios. Neste capítulo será dado ênfase ao ensaio de compressão uniaxial e flexão estática em três pontos.

3.3.1 COMPRESSÃO UNIAXIAL EM COLMOS DE BAMBU

Yu (2000) realizou testes pilotos em três colmos de bambu dos quais posteriormente uma pesquisa realizada por Chung *et al.* (2002) dois anos após conseguiram relatar uma relação entre a região que os corpos de prova são retirados, com variações nos resultados mecânicos. Ghavami e Albanise (2005), realizaram testes em colmos de bambu da espécie *Guadua agustifolia*, dentre eles tração em ripas, compressão e cisalhamento interlaminar em colmos. Assim, o pesquisador afirma que o bambu tendo o seu uso popularizado dentro da construção civil é preciso que suas propriedades físicas, mecânicas sejam bem identificadas para poder ter seu uso estrutural bem dimensionado no projeto.

3.3.2 FLEXÃO ESTÁTICA EM COLMOS

Poucos são os estudos reportados pela literatura com ensaio de flexão estática em colmos de bambu. Chung *et al.* (2002) realizaram ensaios em segmentos cujo a transferência de tensões era dada por roletes (ver Figura 3.1). Já Ribeiro *et al.* (2017) realizaram um o ensaio em sete corpos de prova de 2,71 metros em quatro pontos apoiados com uma placa de madeira.

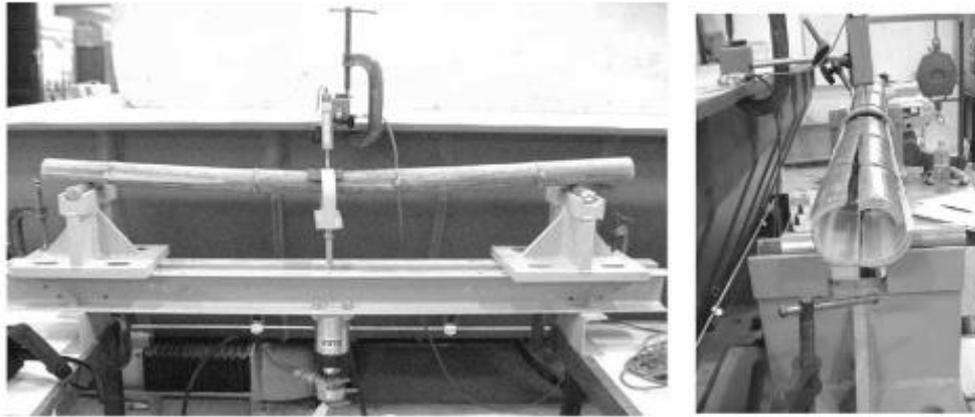


Figura 3.1 – (a) Ensaio de flexão estática em três pontos (b) plano de ruptura.
Fonte: Chung *et al.*(2002)

3.3.3 INFLUÊNCIA DA SATURAÇÃO NOS ENSAIOS MECÂNICOS

Um importante dado a ser analisado é a absorção de água do bambu e como os ensaios mecânicos são afetados por esse parâmetro. Navajo (2011), mediu a resistência e a absorção de água dos bambus da espécie *Dendrocalamus giganteus*. Seu estudo mostra que a absorção de água do bambu está diretamente relacionada com a disposição das fibras, ou seja, a parte mais interna do bambu absorve mais água que a parte mais externa. Já nos ensaios mecânicos a umidade tornou o material com um comportamento elastoplástico mais evidenciado.

Xu *et al.* (2014) estudaram o comportamento mecânico de colmos de bambu imersos em água durante um dia, sete dias e no estado natural. Para isso, os autores realizaram ensaios de compressão, cisalhamento e fendilhamento. Por meio do plano experimental, constataram que as propriedades mecânicas diminuem de forma acentuada com o aumento da umidade, transitando de um comportamento frágil para um comportamento dúctil.

3.4 METODOLOGIA

O programa experimental proposto inclui a caracterização física, química, microestrutural e mecânica do bambu da espécie *Phyllostachys pubescens*, todos de um único lote, oriundo da cidade de Guarulhos-SP, com idade média de cinco anos.

Os colmos estudados foram tratados com água quente e secos a temperatura ambiente (25 °C). Todos os corpos de prova (CP's), para compressão uniaxial foram retirados da região

média do bambu e para a flexão em três pontos da região apical. A caracterização física consistiu de ensaios de teor de umidade, densidade e absorção no tempo. Na caracterização química obteve-se a porcentagem dos constituintes químicos da espécie estudada. Na compressão uniaxial foram estudadas sete variáveis (DHSN, DHCN, 2DHSN, 2DHCN, 3DHC2N, 2DHSNsat e 3DHC2Nsat) que correlacionam a presença do número de nós, geometria e saturação dos corpos de prova. Na flexão em três pontos foi realizado em colmos e analisado a influência da saturação, para isso foi desenvolvido um *setup* próprio para o ensaio. A seguir, estão descritos os procedimentos metodológicos realizados neste estudo.

3.4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

3.4.1.1 Teor de umidade

Para a determinação do teor de umidade (U) foram utilizadas 30 amostras, cortadas em forma prismática, com dimensões de 25 mm de largura x 25 mm de comprimento e espessura igual à da parede do colmo, conforme ilustrado na Figura 3.2.

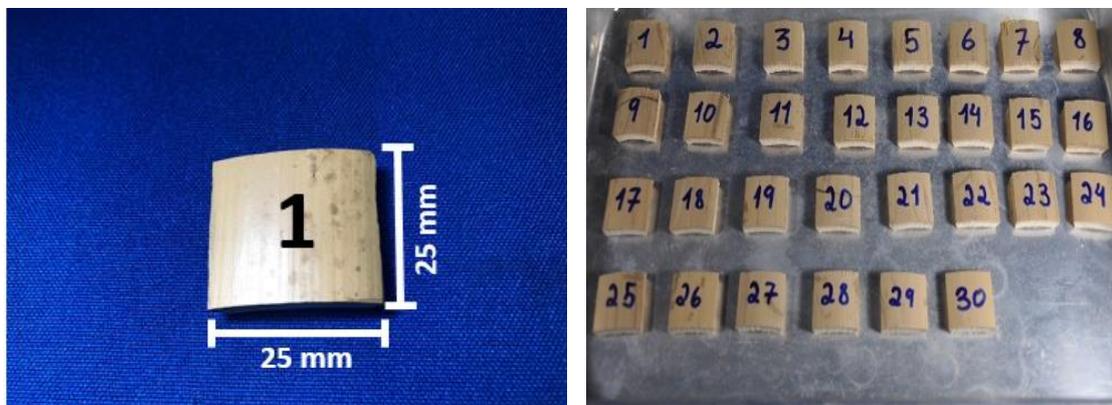


Figura 3.2- Corpos de prova utilizados no ensaio de teor de umidade

Para a obtenção do teor de umidade utilizou-se a Equação 3.1:

$$U = \left[\frac{m - m_0}{m_0} \right] \times 100 \% \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Em que:

- m - Massa inicial da amostra na condição de umidade de equilíbrio natural;
- m_0 - Massa da amostra após a secagem.

As amostras foram pesadas em uma balança com precisão de 0,01g e colocadas em uma estufa a uma temperatura de 103 ± 2 °C para secagem. As massas das amostras foram determinadas a cada 6 horas e, após 24 horas, a cada 1 hora, até que constância de massa

O valor obtido foi tomado como representativo para o teor de umidade da amostra como um todo. Uma média aritmética dos resultados foi realizada, a partir dos testes individuais de cada corpo de prova, bem como logo após os ensaios mecânicos foi verificado o U de cada CP.

3.4.1.2 Massa específica

Após secar cada corpo de prova, a razão entre a massa seca e o seu respectivo volume foi determinada usando a expressão da Equação 3.2:

$$\rho = \left[\frac{m}{V} \right] \times 10^6 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Em que:

ρ - Massa específica da amostra (kg.m^{-3});

m - Massa da amostra após a secagem (g);

V - Volume do corpo de prova no estado natural (mm^3).

Após determinada a massa específica de cada amostra no estado em que se encontrava durante o ensaio, foi realizada a mesma determinação no estado seco. A média aritmética desses dois resultados foi, então, calculada, com uma precisão de 10 kg.m^{-3} .

3.4.1.3 Absorção no tempo

O ensaio de absorção no tempo foi realizado utilizando os 12 corpos de prova usados nos ensaios mecânicos de compressão ($H/D = 2$, sem nó) e os 12 usados nos ensaios de flexão

em três pontos ($H/D = 9,3$, com 2 nós). Os colmos foram submersos em água e pesados diariamente até completa saturação (constância de massa). As pesagens eram realizadas na condição de amostra saturada com superfície seca, ou seja, sem nenhuma película superficial de água remanescente na parede dos CP's.

3.4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química do bambu de estudo foi obtida por meio dos métodos de análise definidos por Abreu *et al.* (2006). Foi feita a quantificação dos teores de extrativos, lignina, hemicelulose e celulose.

3.4.2.1 Preparo do bambu livre de extrativos

Para a determinação da composição química do bambu o mesmo foi triturado em um moinho de facas e utilizou-se as partículas passantes na peneira nº 16 (malha 40 ASTM) e retidas na peneira nº 24 (malha 60 ASTM). O ensaio foi realizado em triplicata e preparados cartuchos com papel filtro com 20g do material peneirado para o processo de remoção dos extrativos. Foram utilizados balões volumétricos com 400 ml de compostos químicos. Os cartuchos foram colocados dentro de extrator (Figura 3.3-a) e conectados aos condensadores por um ciclo com duração de 12 horas.

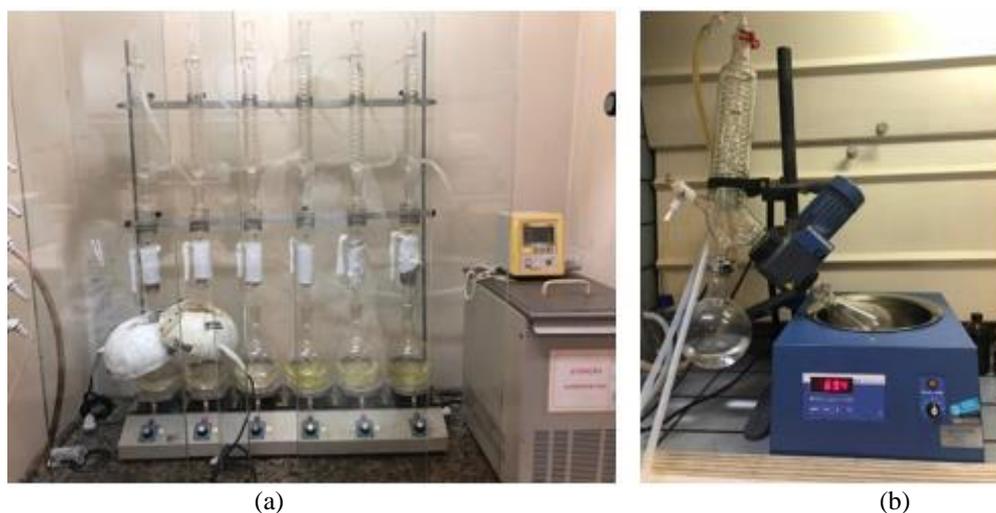


Figura 3.3- Equipamentos utilizados para remoção de extrativos: (a) extratores e (b) rotavapor
Posteriormente foi realizado o processo de filtragem do material, para que fossem retiradas as possíveis partículas da amostra. Esta etapa consistiu em aquecer em banho maria à 70°C e colocar o material filtrado em um balão. Em seguida, foi utilizada uma bomba de vácuo para ligar o rotavapor (Figura 3.3-b) com a válvula de sucção aberta e

foi iniciada a rotação. Assim, o solvente aquecido passou para a extremidade oposta. Após o término do processo o material foi colocado em capela até secar.

As etapas anteriores (extração e filtração) foram repetidas com acetato de etila e metanol para assegurar que a amostra ficasse completamente livre de extrativos. Ao término das três extrações, os cartuchos com as amostras de bambu foram colocados em um vidro de relógio e secas e estufa até a constante de massa.

3.4.2.2 Lignina de Klason (insolúvel)

Para determinação do teor de lignina adicionou-se 300 mg de amostra seca, livre de extrativos, em um tubo de ensaio e acrescentou-se, lentamente, 3 ml de ácido sulfúrico (72%). Em seguida a amostra foi agitada de modo contínuo por um minuto e depois conservada por uma hora entre 25 °C e 30 °C. Posteriormente o material foi transferido para um balão de 250 ml e diluído em uma solução de ácido sulfúrico, adicionando-se 84 ml de água destilada. O material ficou em refluxo durante quatro horas e depois em repouso para a sedimentação do resíduo. O resíduo foi, então, lavado com 500 ml de água destilada quente em um funil de placa sintetizada. Por fim, o material ficou em uma estufa a 105 °C até a sua constante de massa seca. As pesagens foram realizadas em um intervalo de tempo a cada 30 min até apresentar uma variação de 0,2 mg.

Para o cálculo da porcentagem de lignina foi calculada seguindo a equação 3.3:

$$\% \text{ de Lignina} = \frac{P_{\text{sec}} \text{ resíduo}}{P_{\text{sec}} \text{ bambu}} \times 100 \quad (\text{Eq. 3.3})$$

3.4.2.3 Determinação da holocelulose por cloração

Para esta etapa foi adicionado 5,5 ml de ácido acético e 1 g de clorito de sódio em 2,5 g da amostra de bambu livre de extrativos. Essa mistura foi aquecida em um banho maria por 60 min a uma temperatura de 70 °C. Após completar 1 h do início do ensaio foi adicionado mais 0,5 ml de ácido acético e 1 g de clorito de sódio por agitação. Essa etapa foi repetida até as fibras mostrarem-se totalmente separadas da lignina o que precisou de seis horas de coloração. No fim, a amostra foi mantida em repouso sem a adição de nenhum reagente por 24 h.

3.4.2.4 Determinação do teor de celulose

Nesta etapa foi utilizado soluções de hidróxido de sódio em concentrações de 17,5% e 8,3% e ácido acético 10% (misturou-se uma parte por peso de ácido glacial com 9 partes de água destilada). A amostra de holocelulose, em estado seco, foi colocada dentro de um becher de 250 ml de uma solução de NaOH 17,5% em uma proveta e manida a 20 °C em um banho-maria. A holocelulose foi manipulada com um bastão de vidro após dois minutos onde foi feito a maceração até perceber que as partículas estavam totalmente separadas.

Após 5 min foi adicionado mais 5ml de NaOH 17,5% e agitado a solução com um bastão de vidro até a mistura homogênea completa do material. A mistura foi mantida durante 30 minutos perfazendo um total de tempo de 45 min e, após isso, foi adicionado 33 ml de água destilada a 20 °C e mantido assim durante uma hora. O material foi então submetido a vácuo e filtrado. No mesmo filtro, foi adicionado 15 ml de ácido acético 10% a temperatura ambiente e utilizado o vácuo para retirar o ácido acético. Em seguida, o material foi lavado por diversas vezes até o resíduo de bambu ficar totalmente livre de ácido acético. Novamente o material foi lavado com 250 ml de água destilada e em seguida o material foi colocado em uma estufa a 105 °C por um período de 24 horas. Por fim, o material foi resfriado em um dessecador por 1 h e em seguida, pesado. Para calcular o teor de celulose foi utilizado a Equação 3.4.

$$\% \text{ de celulose} = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Onde:

- P2= peso do resíduo celulósico;
- P1= Peso da amostra holocelulósica original.

3.4.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

A caracterização microestrutural foi realizada utilizando a microscopia ótica. Para a obtenção de imagens utilizou-se o microscópio estereoscópico *Zeis Stereo Discovery V.8*, com câmera digital *Zeis AxioCam MRc5*. As amostras foram cortadas de ripas de bambu, em forma retangular, com dimensões de 6 x 12 x 10 mm (espessura x largura x comprimento). A análise das imagens foi realizada com auxílio do *software ImageJ*.

3.4.3.1 Preparação das amostras

Para a análise das imagens o bambu foi fragmentado em ripas conforme ilustra a Figura 3.4.

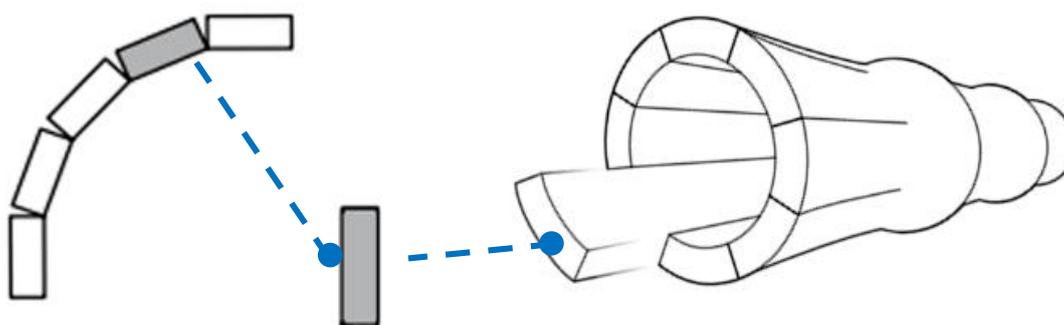


Figura 3.4- Corte das amostras para análise de Microscopia Eletrônica de Varredura

As amostras de bambu foram, ainda, polidas transversalmente na direção das fibras com o auxílio de uma politriz por sucessivas lixas de número 320, 600, 1200 e 4000. O polimento com as três primeiras lixas teve duração de 7 min, enquanto o último foi realizado durante 15 min, como mostrado na Tabela 3.1.

Tipo de abrasivo	Tamanho da partícula	Tempo (min)
Lixa de SiC	320	7
	600	7
	1200	7
	4000	15

3.4.4 COMPRESSÃO UNIAXIAL

O ensaio de compressão axial foi realizado utilizando-se uma Máquina Universal de Ensaio (MUE) da marca *Shimadzu* AG-X, com capacidade de carga de 1000 kN. As normas ISO/DIS-22157/2001 e NSR-10 sugerem que sejam utilizados corpos de prova que não contenham nós. Sabe-se, porém, que o bambu apresenta fibras descontínuas na região do nó e fibras contínuas unidirecionais na região do entrenó e, diante disso, amostras com e sem nó foram submetidas a esse tipo de ensaio. Além disso, avaliou-se a influência do número de nós presentes na amostra no comportamento tensão *versus* deformação do tubo de bambu.

Segundo as normas supracitadas, a altura da amostra a ser usada nos ensaios de compressão deve ser igual ao diâmetro ($H/D = 1$) dos corpos de prova. Contudo foi também avaliado, neste trabalho, a influência da altura no comportamento mecânicas do bambu e, para tanto, utilizou também amostras que tinham altura igual ao dobro do diâmetro ($H/D = 2$) do colmo.

O ensaio de compressão foi realizado em doze amostras para cada uma das variáveis em estudo. O número de copos de prova (CP) foi definido tendo em vista a alta dispersão de resultados que se pode obter nesse tipo de ensaio. Os CP's foram nivelados utilizando-se lixas a fim de se evitar concentração de tensões quando submetidos à compressão. Os ensaios foram realizados a uma velocidade de $0,3 \text{ mm.s}^{-1}$, com uma pré-carga de $0,35 \text{ kN}$.

O esquema de ensaio utilizado é apresentado na Figura 3.5. Os deslocamentos longitudinais foram obtidos por meio de dois LVDT's (*linear variable differential transformer*) posicionados de modo transversal ao deslocamento. Os deslocamentos circunferenciais foram obtidos por meio de um LVDT fixado em um suporte que o mantinha na posição central de sua altura (Figura 3.5-b) para as amostras com $H/D = 2$ com e sem nó. Com isso foi possível determinar o coeficiente de Poisson da amostra sem nó, assim como o efeito do diafragma na deformação circunferencial do tubo de bambu.

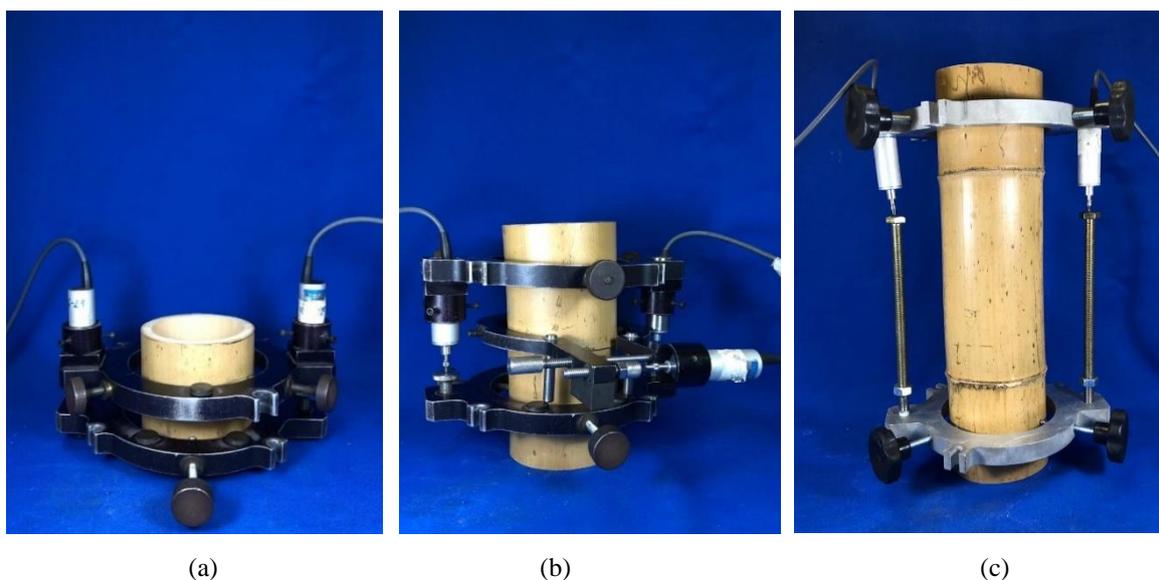


Figura 3.5 – Esquema dos ensaios de resistência à compressão de colmos de bambu: a) DHCN e DHSN b) 2DHCN, 2DHSN e 2DHSNsat c) 3DHC2N e 3DHC2Nsat

Foram utilizadas amostras de bambu com as seguintes geometrias (ver Figura 3.6):

- i) Diâmetro igual à altura com nó (DHCN);
- ii) Diâmetro igual à altura sem nó (DHSN);
- iii) Duas vezes o diâmetro igual a altura com nó (2DHCN);
- iv) Duas vezes o diâmetro igual a altura sem nó (2DHSN);
- v) Três vezes o diâmetro igual à altura com a presença de dois nós (3DHC2N);
- vi) Duas vezes o diâmetro igual à altura sem nó após a saturação (2DHSNsat); e
- vii) Três vezes o diâmetro igual à altura com a presença de dois nós após a saturação (3DHC2Nsat).

A influência da saturação no comportamento tensão (σ) *versus* deformação (ϵ) dos colmos de bambu sob compressão uniaxial foi estudada nas amostras 2DHSNsat e 3DHC2Nsat.

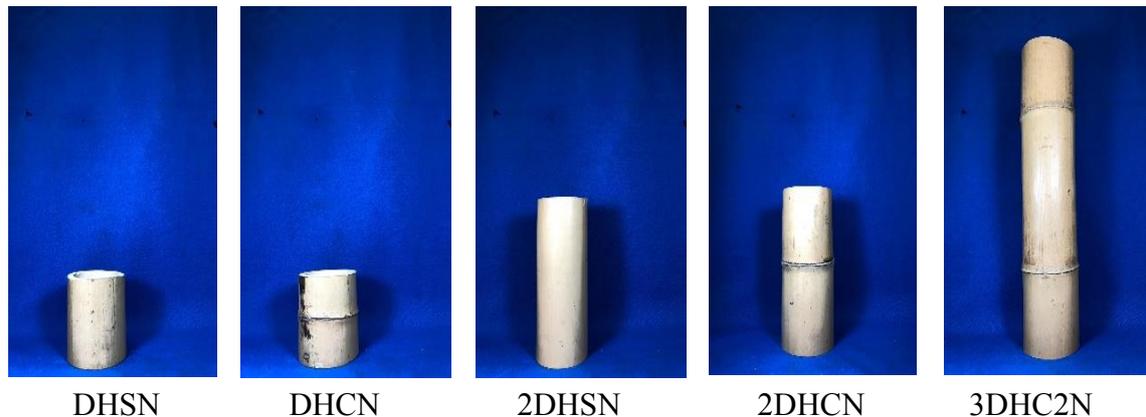


Figura 3.6 – Geometrias estudadas: a) H/D = 1, 2 – amostras sem nó e com um nó e b) H/D = 1, 2, 3 – amostras com um e dois nós

As cargas aplicadas e os deslocamentos axiais obtidos neste programa experimental foram registrados usando o sistema de aquisição de dados da ADS 2000, de 16 bits, da Lynx. Para a determinação da tensão de compressão máxima, a Equação 3.5 foi utilizada:

$$f_{c0} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Em que:

f_{c0} – Resistência à compressão paralela às fibras (MPa);

F_{max} – Carga máxima (N);

A – Área de seção transversal (mm).

Para o cálculo da área da seção transversal resistente, foi medido o diâmetro do colmo e a espessura da parede em quatro pontos distintos e realizada a média. A área resistente foi calculada utilizando a Equação 3.6.

$$A = \pi \cdot (R^2 - (R - t)^2) \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Em que:

R – Raio do corpo de prova (mm);

t – Espessura média da parede de cada corpo de prova (mm).

Após a realização do ensaio, a partir das curvas de Tensão (σ) versus deformação (ϵ), foi determinado o módulo de elasticidade secante, com base na Equação 3.7.

$$E = \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_{a2} - \epsilon_{a1}} \right) \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Em que:

E – Módulo de elasticidade na compressão (GPa);

σ_2 – Tensão correspondente a 80% da tensão máxima (MPa);

σ_1 – Tensão correspondente a 20% da tensão máxima (MPa);

ϵ_{a2} – Deformação axial correspondente à tensão σ_2 (mm/mm);

ϵ_{a1} – Deformação axial correspondente à tensão σ_1 (mm/mm).

O coeficiente de Poisson foi determinado a partir da Equação 3.8 (ASTM C 469, 1994) para o caso da amostra 2DHSN.

$$v = \left(\frac{\varepsilon_{L2} - \varepsilon_{L1}}{\varepsilon_{a2} - \varepsilon_{a1}} \right) \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Em que:

ε_{L2} – Deformação lateral no centro do corpo de prova gerado pela tensão σ_2 (mm/mm);

ε_{L1} – Deformação lateral no centro do corpo de prova gerado pela tensão σ_1 (mm/mm).

3.4.5 FLEXÃO UNIAXIAL EM TRÊS PONTOS DE COLMOS DE BAMBU

Os ensaios de flexão em três pontos foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaio (MUE) da marca *Shimadzu* AG-X, com capacidade de carga de 1000 kN a uma velocidade de carregamento de 0,3 mm/s. A Figura 3.7 ilustra o esquema dos apoios em formato de semicírculo usados para aplicação das cargas nos colmos a fim de evitar concentração de tensões.

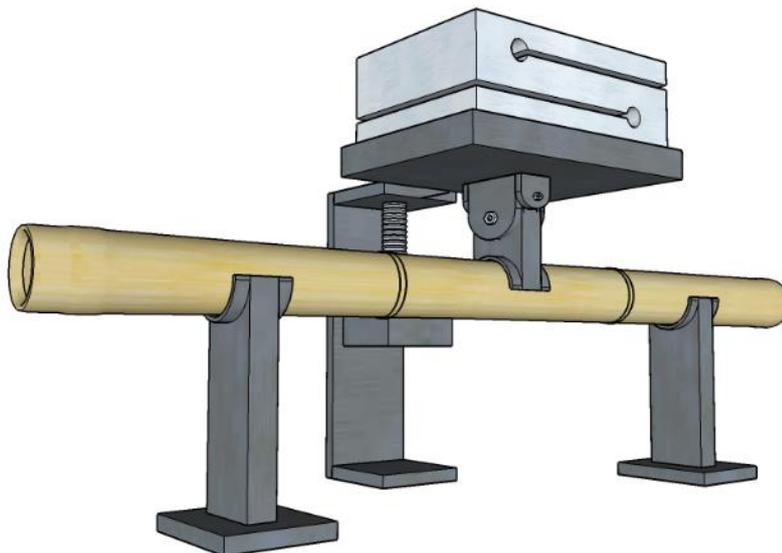


Figura 3.7- Esquema do ensaio de flexão em três pontos utilizado no presente estudo

Nos ensaios de três pontos, os corpos de prova possuíam diâmetro médio de 8 cm e comprimento de 75 cm. Para este ensaio, os colmos estavam visualmente sem defeitos. A distância entre os pontos de aplicação foi de 22,5 cm e o balanço foi de 10 cm. Os CP's ensaiados eram da região apical dos colmos e a distância entrenós foi de 30 cm.

Como variáveis, foram ensaiados corpos de prova em estado de equilíbrio natural com o meio e no estado saturado. A Figura 3.8 ilustra as dimensões utilizadas no ensaio, bem como a distância entre pontos de aplicação de cargas.

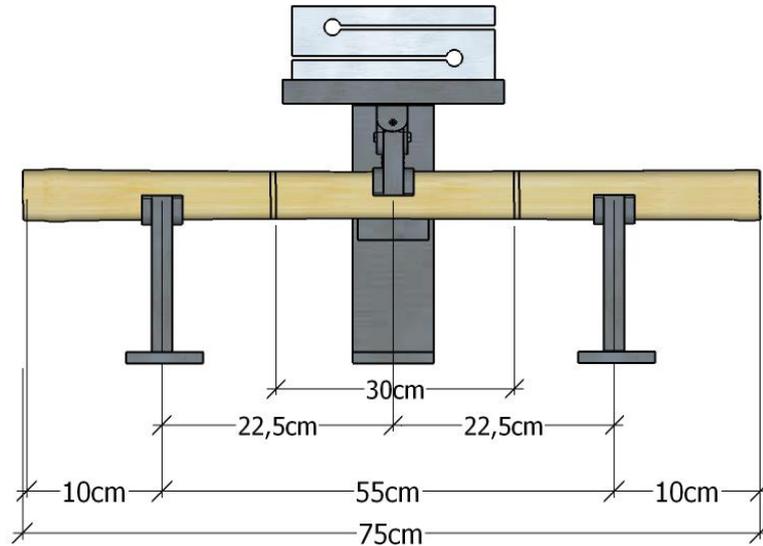


Figura 3.8 – Configuração do ensaio de flexão em três pontos realizados nos colmos de bambu

Para determinação do deslocamento vertical no meio do vão e a mudança de diâmetro do colmo com a aplicação das cargas, foram utilizados LVDT's, conforme Figura 3.9. Um LVDT foi posicionado na parte inferior do colmo para aferir o deslocamento vertical (Figura 3.9-c) e dois LVDT's foram usados para medir os deslocamentos lateral na parte central do colmo (Figura 3.9-b). LVDT's foram também posicionados sobre os apoios para medir um possível deslocamento dos mesmos durante o ensaio (Figura 3.9).

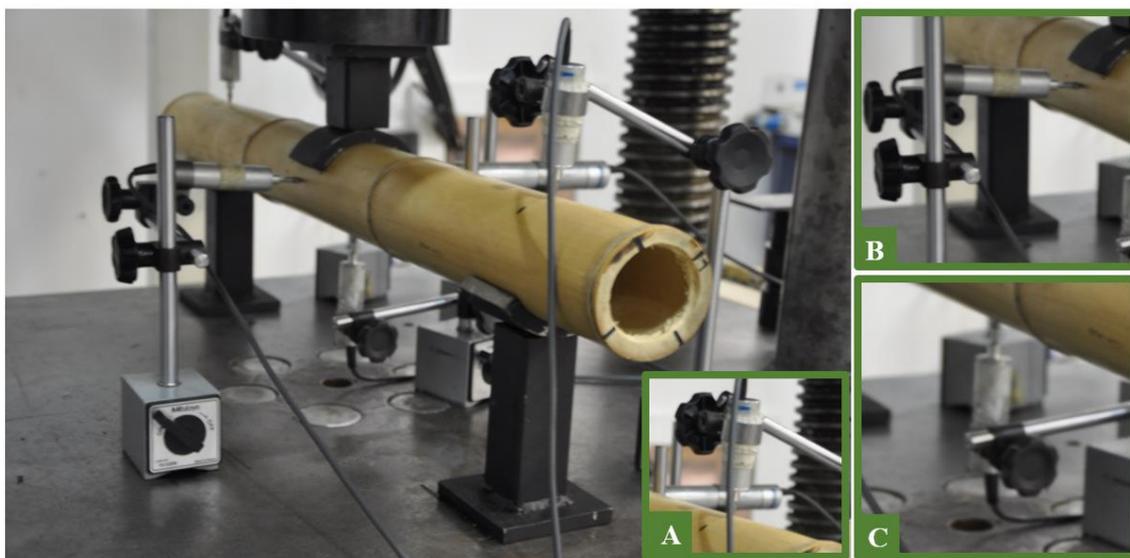


Figura 3.9- Detalhes da instrumentação utilizada no ensaio de flexão em três pontos

Para a determinação do Momento de Inércia (I) da sessão tubular do bambu, a Equação 3.8 foi utilizada:

$$I = \pi \cdot \frac{(D^4 - (D - 2 \cdot t)^4)}{64} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Em que:

D – Diâmetro médio dos corpos de prova (mm);

t – Espessura média da parede do CP ensaiado (mm).

Para a determinação da resistência à flexão (MOR) em três pontos, a Equação 3.9 foi utilizada:

$$MOR = \frac{F_{\max} \cdot L \cdot (D/2)}{4 \cdot I} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Em que:

F_{\max} – Carga máxima (N);

L – Distância entre os pontos de aplicação (mm).

Para a determinação do módulo de elasticidade à flexão (MOE), a Equação 3.10 foi utilizada:

$$MOE = \frac{23 \cdot F_E \cdot L^3}{1246 \cdot \delta_E \cdot I} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Em que:

F_E – Carga até o limite de elasticidade (kN);

δ_E – Deflexão central até o limite de elasticidade (mm).

3.5 RESULTADOS

3.5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

O teor de umidade natural e a densidade do bambu determinados usando as amostras de 25 mm por 25 mm foram de $12,7\% \pm 8,9\%$ e de $0,76 \text{ kg/m}^3 \pm 7,4\%$. Os resultados estão em consonância com resultados obtidos na literatura para espécies do mesmo tipo e com mesma idade (Ribeiro *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2014; Xiaobo, 2004). Comparando os resultados mencionados com a umidade natural e a densidade do bambu obtidas utilizando-se os colmos usados nos ensaios de compressão uniaxial e flexão (ver resultados na Tabela 3.2) nota-se que não há grande diferença de resultados (diferenças entre 3-8%), com os colmos sempre apresentando valores menores do que os corpos de prova extraídos das paredes do colmo.

Tabela 3.2- Propriedades físicas obtidas para o bambu da espécie *Phyllostachys pubescens* com coeficiente de variação (%) entre parênteses. D – diâmetro, Parede – espessura da parede e TU – teor de umidade, ρ – densidade.

ID	D (mm)	Parede (mm)	TU (%)	ρ (kg/m ³)
DHSN	86,66 (4,13)	9,16 (5,79)	11,74 (1,93)	0,76 (0,76)
DHCN	94,80 (5,23)	10,82 (9,65)	11,89 (3,65)	0,76 (1,65)
2DHSN	80,64 (3,66)	8,34 (5,46)	11,86 (3,48)	0,76 (1,07)
2DHCN	86,56 (3,42)	9,25 (10,51)	12,27 (5,48)	0,77 (1,48)
2DHSNsat	86,52 (3,63)	9,42 (9,21)	51,64 (1,46)	0,76 (1,24)
3DHC2N	80,60 (3,82)	8,33 (0,47)	12,13 (6,89)	0,76 (1,18)
3DHC2N sat	95,31 (4,66)	10,20 (0,96)	51,80 (1,12)	0,77 (1,85)

As curvas de absorção de água no tempo dos colmos usados nos ensaios de compressão uniaxial sem nó ($H/D = 2$) e na flexão ($H/D = 9,3$ e dois nós) é apresentada na Figura 3.10. Observando-se a curva nota-se que nos primeiros dias é maior a taxa de ganho de massa das amostras, principalmente no primeiro dia. Note que até o 5º dia o ganho de massa é de cerca de 62% do ganho de massa final, e que a saturação se deu no 16º dia para as amostras com $H/D = 2$ e no 18.º dia para a amostra mais longa e com 2 nós. Embora as curvas sejam praticamente coincidentes, a saturação da amostra sem nós foi um pouco mais rápida do que das amostras sem nó.

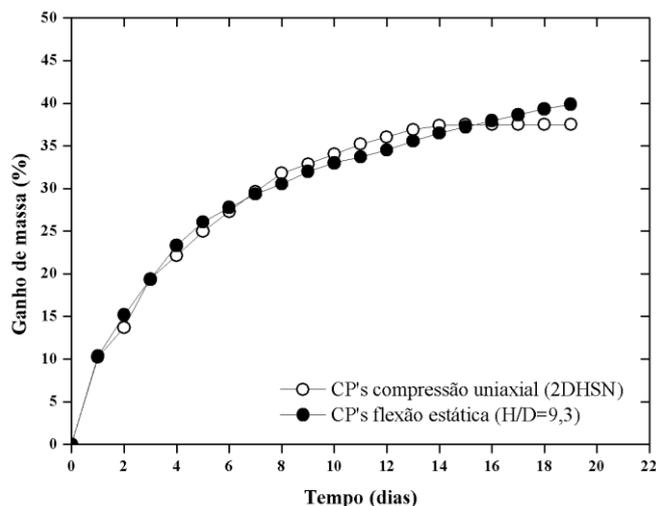


Figura 3.10- Percentual de ganho de massa no tempo de colmos de bambu com 2DHSN e H/D = 9,3 com dois nós

3.5.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Os resultados da composição química da espécie de bambu utilizado neste trabalho estão apresentados na Tabela 3.3. Observando-se os resultados nota-se que o bambu em estudo possui cerca de 37,5% de celulose, 24,5% de hemicelulose, 31% de lignina e 7% de extrativos. Estudos realizados por Klock *et al.* (2005) e Li (2005) utilizando bambus da mesma espécie que o utilizado neste estudo com três anos de idade reportam valores lignina entre 22 e 26% e teores de extrativos variando entre 3,8 e 6,3%. Os autores destacam que a composição química depende da idade do colmo e isso pode explicar as diferenças entre os resultados obtidos no presente estudo e os reportados na literatura.

Tabela 3.3- Composição química do bambu *Phyllostachys pubescens* com idade média de 5 anos e coeficiente de variação (% entre parênteses)

	Extrativos	Lignina	Celulose	Hemicelulose
Média	7,21 (6,23)	30,67 (4,12)	37,59 (3,11)	24,53 (3,98)

3.5.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

As imagens obtidas por meio do microscópio óptico foram convertidas em um sistema de cores de oito bits, a fim de quantificar a porcentagem de fibras contidas em cada uma das frações analisadas. Na fração mais externa, mais próxima a parede do bambu o número de fibras corresponde a 52,72% (Figura 3.11-a), na seção intermediária o quantitativo é de 32,42% (Figura 3.11-b), enquanto a seção mais interna, a porcentagem de fibras

correspondente é de 14,19% (Figura 3.11-c). É possível perceber que na parte mais externa as fibras possuem um menor diâmetro e são mais densas, enquanto na parte mais interna os diâmetros das fibras aumentam, contudo são mais espaçadas.

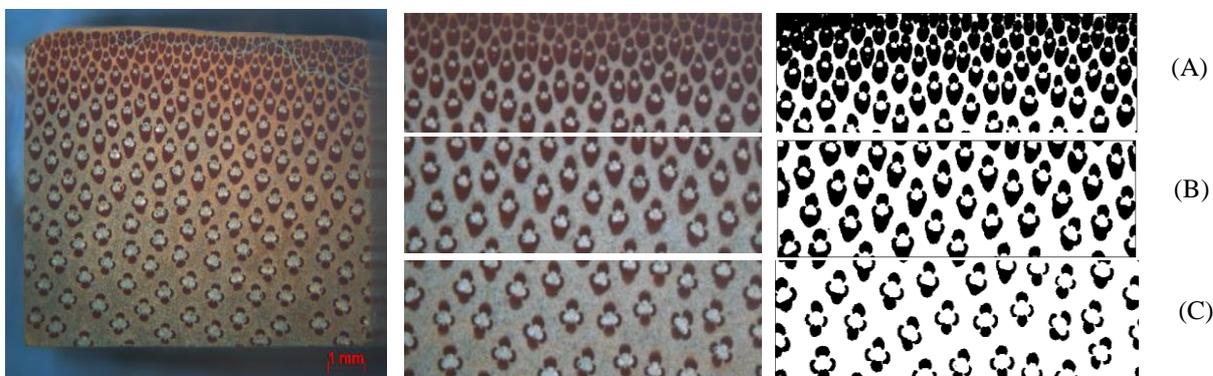


Figura 3.11- Processo utilizado para tratamento das imagens de microscopia ótica

Xiaobo (2004), estudou o número de feixes vasculares e comprimento das fibras do bambu da espécie *Phyllostachys pubescens*. O autor analisou três regiões (base, meio e topo) e três camadas (externa, intermediária e interna). Segundo o autor, para os colmos com idade de três anos, a região mais externa da base possui 51,83% das fibras presentes em toda parede, enquanto o meio e o topo, possuem respectivamente 51,9% e 52,70%. Com isso, contrapondo os dados obtidos nesta pesquisa com os do trabalho supracitado, pode-se inferir que independentemente da posição das amostras analisadas, a região mais externa sempre possui um quantitativo maior que as demais camadas.

3.5.4 COMPRESSÃO UNIAXIAL

A Figura 3.12 mostra uma curva esquemática do comportamento tensão (σ) versus deformação (ϵ) apresentado pelas amostras ensaiadas no presente estudo. Em todos os ensaios foi observado um comportamento tipicamente linear-elástico no estágio inicial do ensaio e essa região linear elástica está indicada em preto na curva esquemática.

O ponto A mostrado na figura indica o início do desvio da linearidade na curva em função do surgimento da primeira fissura na parede interna do colmo de bambu. Com a continuidade do ensaio ocorre o surgimento de novas fissuras aumento gradual da carga e o ponto que caracteriza o final da formação de novas fissuras é indicado na figura esquemática como ponto B. A trecho entre os pontos A-B será denominado de região de

múltipla-fissuração. A região entre os pontos B e C corresponde a zona de propagação de fissuras. O ponto C corresponde a ruptura dos colmos de bambu.

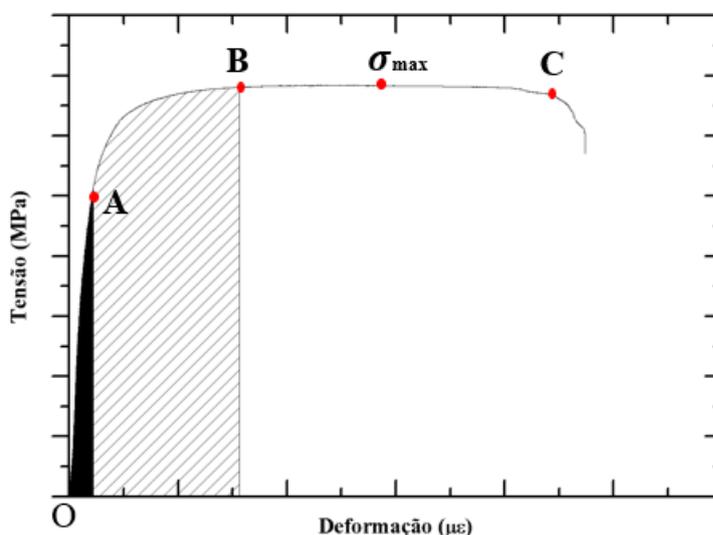


Figura 3.12 – Pontos de mudança comportamental do bambu quando submetido à esforços de compressão

Para cada corpo de prova ensaiado foram obtidas, além da tensão de ruptura (σ_{\max}) as tensões e deformações correspondente aos pontos A (σ_A, ε_A), B (σ_B, ε_B), C (σ_C, ε_C), a tensão máxima e a energia no trecho linear elástico, na região de múltipla fissuração e na região de propagação das fissuras. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.4. As curvas tensão *versus* deformação são apresentadas a seguir agrupadas pelas variáveis estudadas.

3.5.4.1 Interferência da geometria das amostras sem nó (2DHSN e DHSN)

As curvas de Tensão (σ) *versus* Deformação (ε) para as amostras sem nó são apresentadas na Figura 3.12-a) e b). A resistência a compressão média obtida para as amostras com $H/D = 1$ foi de 82,78 MPa, um valor 13,92% mais alto do que o observado para as amostras com $H/D = 2$. As restrições promovidas pelos efeitos de extremidade afetaram ainda mais o módulo de elasticidade das amostras com $H/D = 1$ que quando comparado ao das amostras com $H/D = 2$ apresentaram valores cerca de 66% mais altos do que os observados para amostras com $H/D = 1$.

Segundo Martins (2008), para uma razão altura/diâmetro menor que 1,5 a resistência aumenta devido à contenção da célula de carga da prensa, uma vez que existe restrições nas extremidades da amostra e que a literatura reporta que quanto menor a relação H/D, maior será a resistência à compressão da amostra. Segundo a autora, os CP's cilíndricos devem apresentar uma relação de H/D acima de 1,7, para que o atrito possa afetar menos os resultados obtidos. Esses efeitos são evidenciados no modo de ruptura típico das amostras com H/D = 1 e 2 mostrados na Figura 3.13.

As curvas de Tensão (σ) *versus* deformação (ϵ) das amostras com 2DHSN também se mostraram menos dispersas e os menores coeficientes de variação foram obtidos para essa geometria.

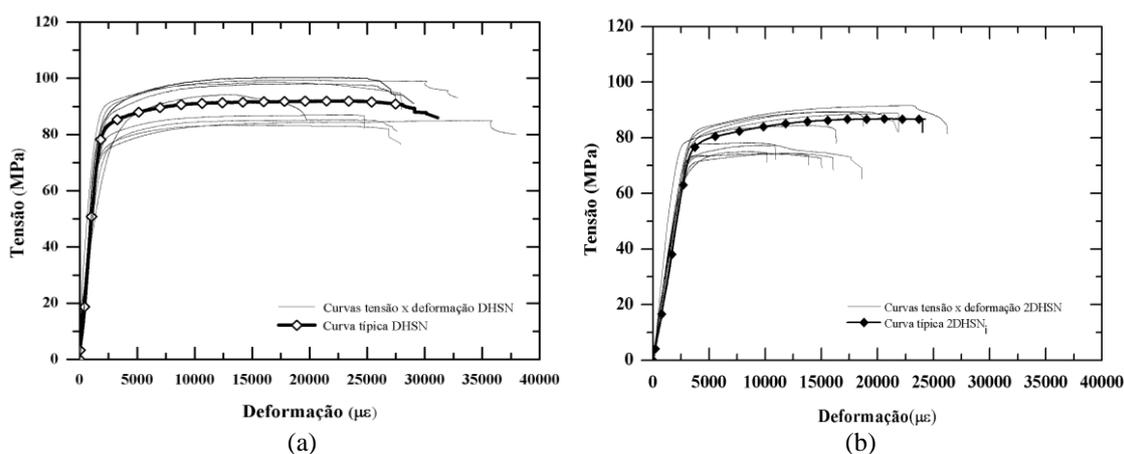


Figura 3.13 - Curvas tensão *versus* de deformação: (a) DHSN e (b) 2DHSN

As tensões e deformações correspondentes ao ponto A (final da zona elástica) foram de respectivamente, 72,87 MPa e 70,31 MPa e 1652,15 με e 2855,39 με, para as amostras com H/D = 1 e 2. A primeira fissura surge na região interna do colmo, aonde o volume de reforço é menor como mostrado na Figura 3.14. Observe que tensão de primeira fissura foi bastante similar para as amostras de diferentes geometrias (diferença inferior a 4%), mas que devido aos efeitos de extremidade houve uma restrição no campo de deformações o que resultou em menores deformações e maior módulo elástico na amostra com H/D = 1.

Após essa região ocorre a formação das múltiplas fissuras e, observando-se as fotos da Figura 3.14, nota-se que ocorre a formação de um maior número de fissuras nas paredes das amostras com menor relação de aspecto com maiores valores de tensões e deformações sendo observados para essas amostras

O maior volume de fibras na região mais externa dos colmos faz com que essa região promova o cintamento da região interna da parede do colmo. Note que o crescimento das fissuras ocorre sob cargas quase constantes até o momento em que ocorre a ruptura das amostras (ponto C).

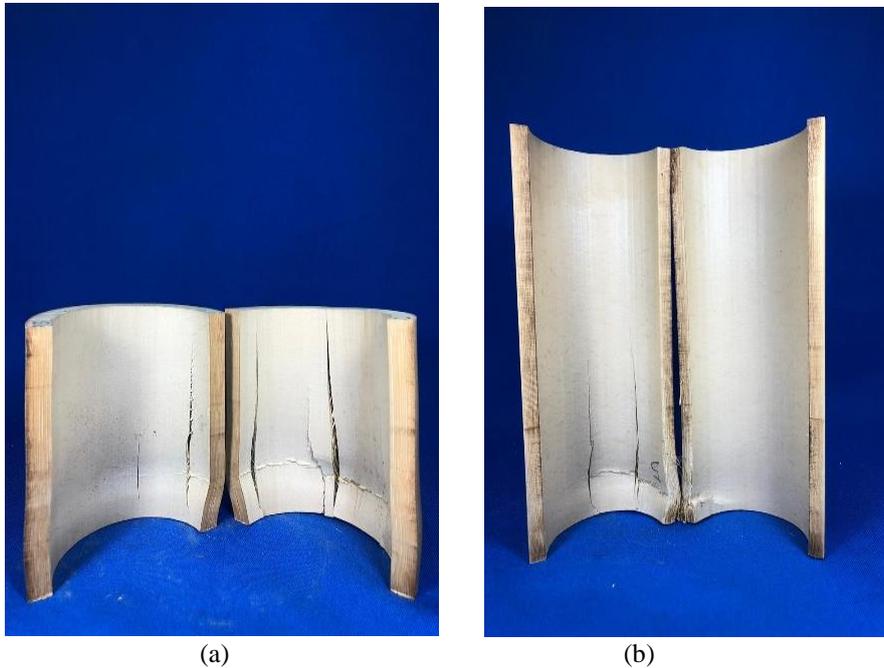


Figura 3.14 – Interferência da geometria no plano de ruptura: (a) DHSN e (b) 2DHSN

A Figura 3.15 mostra o topo dos colmos ao término do ensaio e é possível perceber o cintamento devido ao gradiente fibras na parede do colmo, como comprovado por meio da microscopia. Os resultados obtidos no presente estudo indicaram que a geometria da amostra com $H/D = 2$ foi mais adequada para caracterização mecânica dos colmos visando obter sua tensão de ruptura e módulo de elasticidade.



Figura 3.15 – Detalhes da região de topo da amostra 2DHSN

Tabela 3.4 - Valores médios das diferentes zonas de comportamento na compressão uniaxial e coeficiente de variação (% entre parênteses) CE- comportamento elástico, NF- número de fissuras, P_{max} – carga máxima, σ - resistência máxima, E – módulo de elasticidade

ID	A		B		C		CE (%)	NF	P _{max} (kN)	σ (MPa)	E (GPa)
	σ_A	ϵ_A	σ_B	ϵ_B	σ_C	ϵ_C					
DHSN	72,87 (6,65)	1652,15 (18,72)	90,56 (7,73)	9092,39 (23,78)	90,75 (6,63)	24881,86 (27,06)	77,390 (8,95)	1,31 (12,14)	108,91 (3,75)	94,73 (9,39)	42,18 (6,33)
DHCN	56,75 (16,56)	1400,01 (42,51)	71,58 (12,23)	6295,49 (30,38)	71,24 (12,56)	16975,15 (39,50)	78,18 (8,58)	1,36 (19,12)	109,59 (6,51)	72,45 (8,75)	31,99 (11,01)
2DHSN	70,31 (7,70)	2855,39 (12,46)	78,82 (6,75)	6105,96 (21,93)	79,78 (9,75)	16363,28 (37,01)	86,55 (5,88)	1,61 (5,66)	82,78 (11,71)	81,41 (8,67)	25,32 (12,69)
2DHCN	64,86 (13,93)	2764,09 (8,23)	79,96 (10,77)	6711,79 (21,41)	81,68 (8,00)	25524,44 (26,50)	75,45 (10,68)	1,32 (17,59)	100,61(1 (0,08)	86,29 (12,94)	22,08 (17,43)
2DHSNsa t	64,31 (11,91)	3067,48 (37,15)	73,35 (12,76)	7358,48 (19,46)	75,17 (13,05)	25002,11 (37,81)	82,70 (8,41)	2,66 (24,21)	95,17 (12,82)	78,54 (17,51)	18,61 (16,55)
3DHC2N	76,89 (12,61)	3606,33 (14,26)	90,11 (11,28)	8163,18 (35,65)	92,93 (14,36)	28686,48 (31,80)	80,12 (7,55)	2,21 (11,64)	118,45 (11,45)	95,79 (12,95)	21,04 (11,06)
3DHC2N sat	77,91 (12,87)	6603,01 (23,73)	93,63 (23,73)	121010,3 (23,02)	85,82 (16,12)	32521,28 (19,91)	78,41 (7,13)	2,875 (19,14)	1290,04 (17,55)	93,18 (12,51)	11,26 (28,14)

3.5.4.2 Interferência da presença de nós

As curvas de tensão (σ) *versus* deformação (ϵ) para as amostras com nó são apresentadas nas Figuras 3.16 e 3.17. A resistência a compressão média obtida para as amostras com H/D = 1 com nó foi de 72,45 MPa, um valor 16,03% mais baixo do que o observado para as amostras com H/D = 2 e 24,36% que as amostras com H/D = 3. As restrições promovidas pelos efeitos de extremidade afetaram, como já indicado para as amostras mais curtas sem nó, o módulo de elasticidade das amostras com H/D = 1 que quando comparado ao das amostras com H/D = 2 apresentaram valores cerca de 44,82% mais baixos do que os observados para amostras com H/D = 1. Note que a amostras com H/D=2 e H/D = 3 têm tensão de ruptura com diferença inferior a 12,10% e módulo de elasticidade com diferença superior a 4,94%.

Observe que, de modo geral, o nó funciona como um enrijecedor que restringe completamente a deformação lateral até o surgimento da primeira fissura (ver curva de deformação lateral da Figura 3.20-b). A presença do nó muda o modo de ruptura das amostras com as amostras DHCN e 2DHCN apresentando modo de ruptura similares mas bastante diferentes das a DHCN, enquanto nas amostras com dois nós (3DHC2N) que

mostraram fissuração ocorre na região intermodal. As curvas Tensão (σ) versus deformação (ϵ) observa-se uma maior dispersão das curvas devido a presença dos nós.

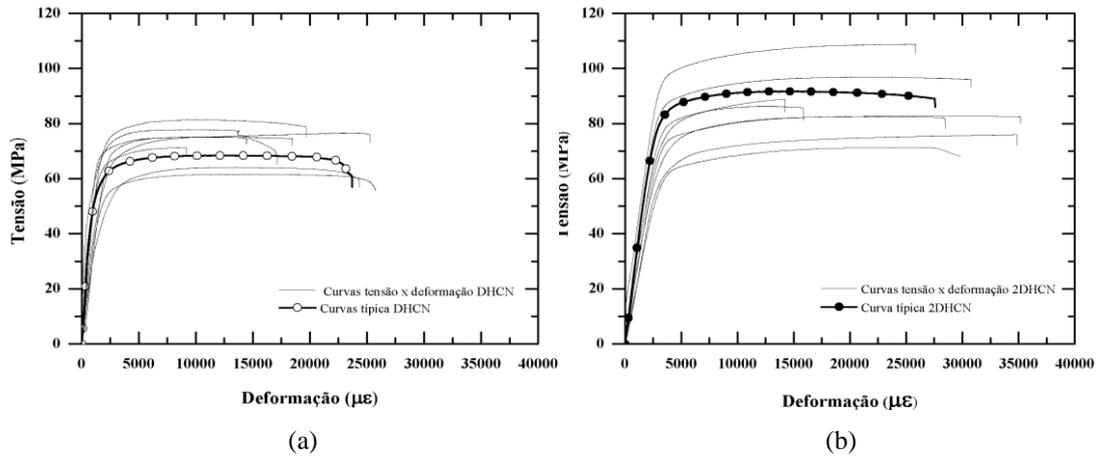


Figura 3.16- Curvas tensão *versus* de deformação: (a) DHCN e (b) 2DHCN

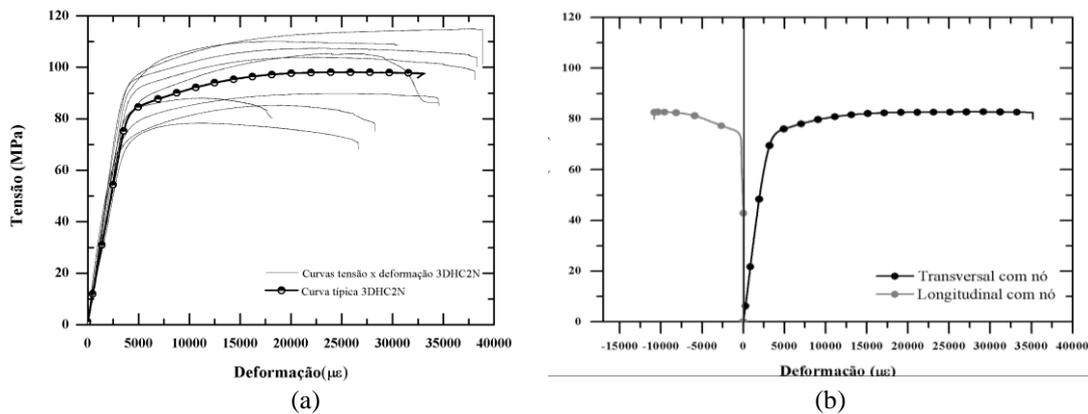


Figura 3.17 - (a) Curvas tensão *versus* deformação 3DHC2N, (b) Curva típica tensão *versus* deformação transversal e longitudinal com presença de nó.

Em relação as tensões (σ_A) e Deformações (ϵ_A) correspondentes ao ponto A (final da zona elástica) para as amostras com nó foram de respectivamente 56,75 MPa e 14000,01 $\mu\epsilon$ para amostras com a presença de um nó e H/D = 1, 64,86 MPa e 2764 $\mu\epsilon$ para amostras com um nó e H/D = 2 e 76,89 MPa e 3606,33 $\mu\epsilon$ para amostras com dois nós e H/D = 3. De modo análogo. Observe que tensão de primeira fissura foi distintas para as amostras de diferentes geometrias (apresentando diferenças de até 26,19%)

Após essa região ocorre a formação das múltiplas fissuras e, observando-se as fotos da Figura 3.18, nota-se que ocorre a formação de um maior número de fissuras nas paredes das amostras com maior relação de aspecto com maiores valores de tensões e deformações.

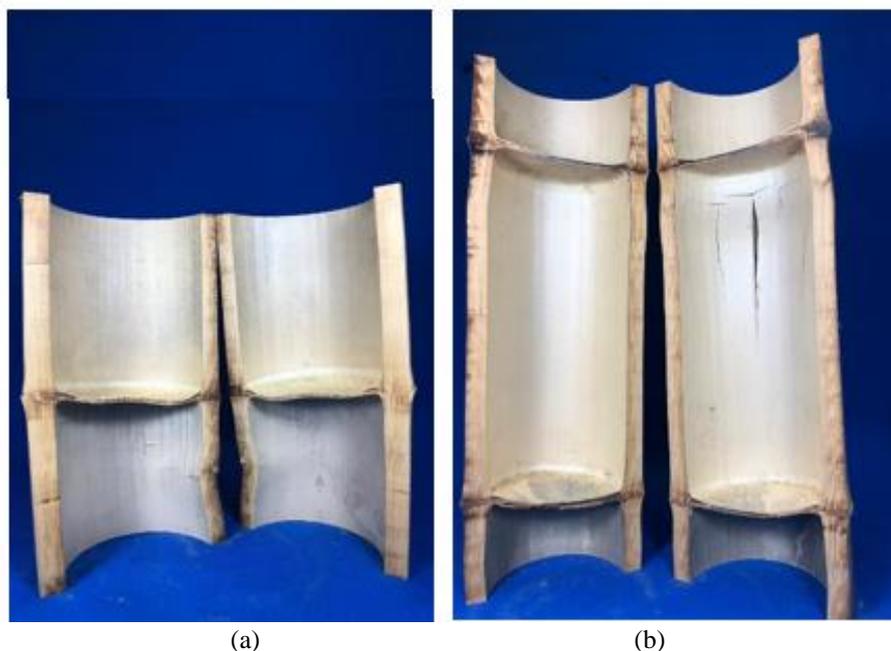


Figura 3.18 – Interferência do nó no plano de ruptura: (a) 2DHCN (b) 3DHC2N

Nas amostras com um nó (DHCN e 2DHCN), ocorre uma múltipla fissuração até o colapso, em uma das extremidades dos corpos de prova, como mostrado na Figura 3.19. Já na amostra com dois nós, as fissuras se concentram na região do entrenó e suportam as maiores tensões quando comparadas as demais variáveis desse trabalho.



Figura 3.19 – Interferência da presença de nó no plano de ruptura – DHCN

3.5.4.3 Interferência da saturação

A figura 3.20, apresenta as curvas tensão (σ) *versus* deformação (ϵ) obtidas por meio do ensaio de compressão uniaxial dos CP's com influência da saturação. Foram analisadas amostras sem nó com $H/D = 1$ (2DHSNsat) e com dois nós e $H/D = 3$ (3DHC2Nsat). Quando contraposto os resultados das variáveis em estado natural com sua correspondente no estado saturado as amostras sem nó e com $H/D = 1$, a resistência do material é reduzida em 3,7% para as duas variáveis e o módulo de elasticidade diminuiu 31,09% e 86,85% para as amostras 2DHSNsat e 3DHC2Nsat, respectivamente.

Em relação ao número de fissuras (NF), é possível identificar que as amostras submetidas a ação da água apresentaram uma propagação maior, quando comparadas com as amostras que possuem o as mesmas características em estado natural.

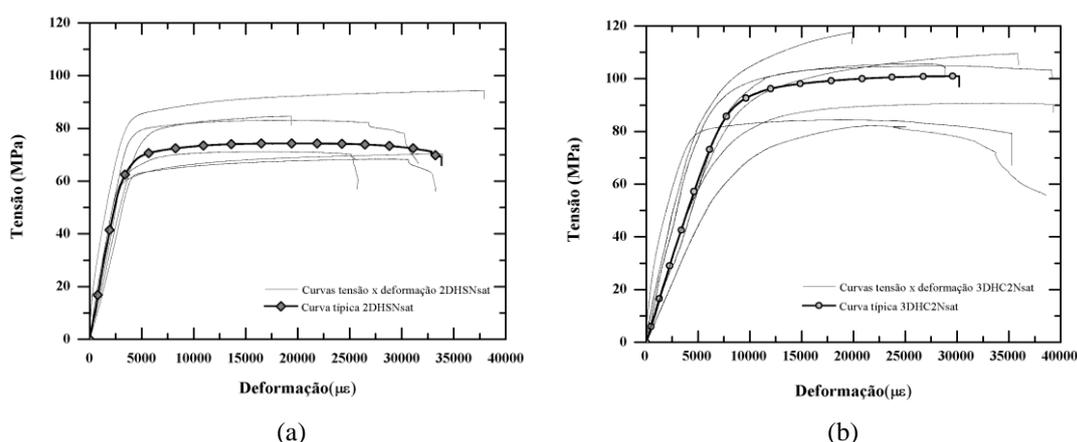


Figura 3.20 - Curvas tensão *versus* de deformação: (a) 2DHSNsat e (b) 3DHC2Nsat

3.5.5 FLEXÃO

De modo geral, as amostras saturadas, quando comparadas as do estado natural apresentam uma resistência menor e uma deformação mais acentuada. Na flexão a saturação promove uma maior deformabilidade do material (redução de 49,67%), agindo como um plastificante, muito similar ao comportamento que a saturação promove na compressão uniaxial. A resistência a flexão foi menos impactada, apresentando redução de (11,55%). As Figura 3.21-a e a Figura 3.21-b, apresentam as curvas de carga por deslocamento dos corpos de prova e estado natural e totalmente saturado, respectivamente.

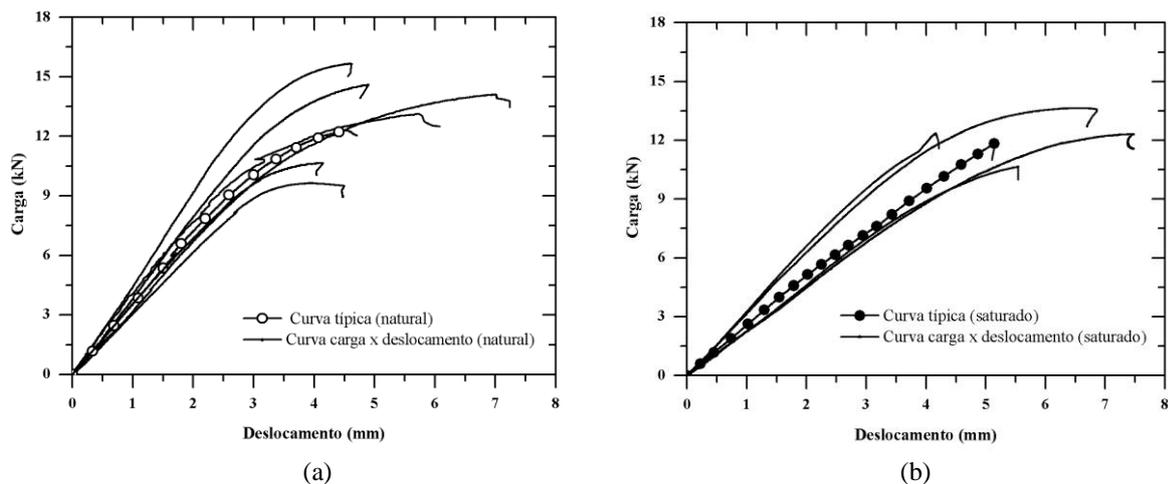


Figura 3.21 - Curvas carga *versus* deslocamento na flexão em três pontos: (a) natural e (b) saturado

A tabela 3.5 apresenta os resultados médios obtidos no ensaio de flexão uniaxial.

Tabela 3.5- Resultados médios da flexão em três pontos em colmos de bambu e coeficiente de variação (% entre parênteses)

CP	D (mm)	t (mm)	P _{máx} (kN)	U	I (mm ⁴)	MOR (MPa)	MOE (GPa)
Natural	77,83 (4,39)	8,53 (8,42)	12,88 (16,76)	13,71 (7,89)	1128656,35 (10,79)	61,30 (18,37)	9,28 (14,98)
Saturado	80,68 (5,34)	8,18 (3,65)	11,78 (9,58)	52,14 (6,21)	1250201,28 (18,25)	54,95 (16,78)	6,20 (28,73)

Note que as curvas de carga *versus* deslocamento, apresentaram duas fases bem definidas: (i) linear elástica até o ponto $P_E; \delta_E$ e (ii) um comportamento não linear desse ponto até o momento da ruptura $P_c; \delta_C$ (ver tabela 3.6).

Tabela 3.6- Valores médios das diferentes zonas de comportamento na flexão em três pontos em colmos de bambu e coeficiente de variação (% entre parênteses)

CP	Zona Elástica		Ruptura		CE (%)	NF
	P_E	δ_E	P_c	δ_C		
Natural	10,31 (13,19)	2,94 (7,00)	12,03 (17,05)	6,06 (15,25)	80,09 (8,63)	1
Saturado	9,98 (13,80)	4,01 (19,74)	11,78 (8,84)	5,77 (22,07)	84,74 (10,63)	1

Outro ponto analisado neste programa experimental são os deslocamentos verticais (flecha) e laterais (aumento do diâmetro). Nas amostras saturadas a expansão lateral diametral foi de 37,5% enquanto a variação no estado natural foi de 22,5%, o que demonstra que a água funciona como um plastificante aumentando a deformabilidade do

material. As bases em formato semicircular com diâmetro próximos a espécie em estudo, evitam o fenômeno do esmagamento do material nos pontos de aplicação de carga como comumente observado em outros ensaios na literatura (CHUNG *et al.*,2002). Isso permitiu a obtenção da curva carga *versus* deslocamento completa do colmo.

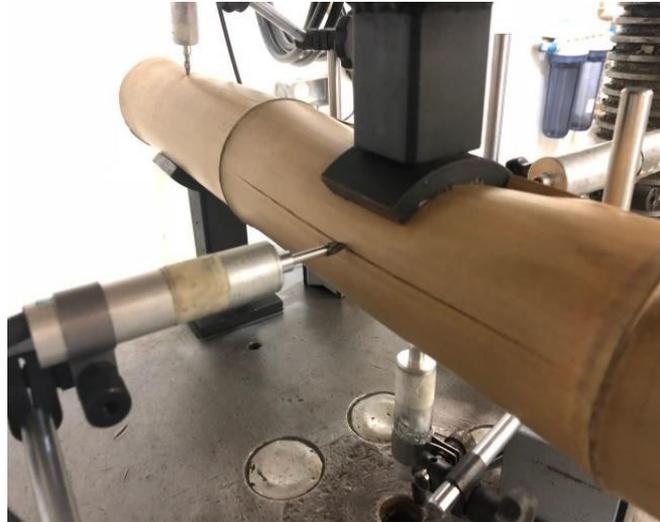


Figura 3.22 – Plano de fissuração por cisalhamento na flexão em três pontos

A Figura 3.23 mostra três etapas distintas até o colapso da estrutura. Inicialmente há uma acomodação do material (Figura 3.23-a) devido as cargas externas, em seguida há uma mudança na seção transversal (Figura 3.23-b) onde é mais acentuada após a fissuração e por fim, o colapso da estrutura (Figura 3.23-c).

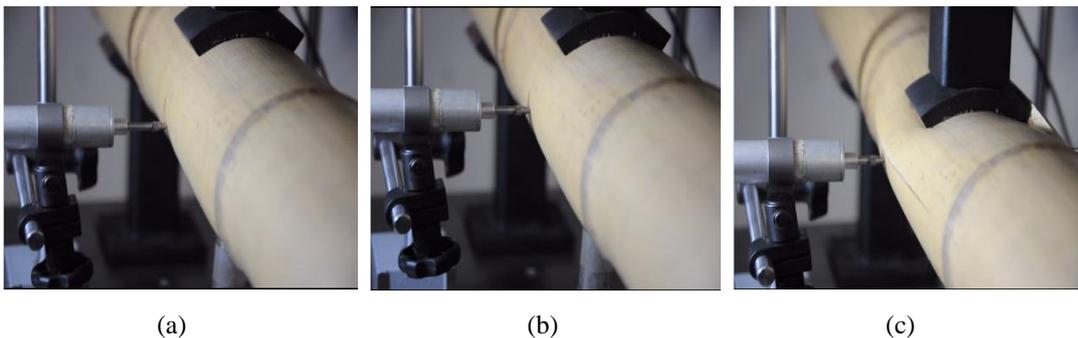


Figura 3.23 – Etapas do plano de fissuração por cisalhamento na flexão em três pontos: (a) início, (b) acomodação e (c) colapso

Tanto nas amostras em estado natural como nas totalmente saturadas (Figura 3.24) as fissuras se limitam até a região do entrenó, já que o diafragma do colmo funciona como uma zona de restrição para propagação de fissuras.



Figura 3.24- Esquema do ensaio de flexão em três pontos no estado totalmente saturado

3.6 CONCLUSÕES

1. Na compressão uniaxial, todos os corpos de prova tiveram seu modo de ruptura por tração paralela às fibras e na flexão em três pontos por cisalhamento;
2. Os corpos de prova com 3DHC2N são os que apresentaram a maior resistência à compressão uniaxial entre todas as variáveis estudadas graças à função enrijecedora que o nó faz sob a estrutura do bambu e faz com que as fissuras apareçam de forma tardia em comparação com as demais variáveis;
3. A presença dos nós causa maior dispersão dos resultados. As amostras que apresentam mais de um nó, são as com maiores variâncias em seus resultados devido à descontinuidade das fibras;
4. A utilização de CP's com ausência de nó é uma alternativa com menos variabilidade. Entretanto, como para a utilização de bambu com fins estruturais os colmos possuem vários nós, os ensaios de corpos de prova que possuam nós, devem ser considerados, já que representam com mais fidelidade o elemento estrutural utilizado;

5. A saturação funciona como um plastificante, fazendo com que o módulo elástico diminua de forma acentuada e a tensão de ruptura seja menor.

ESTABILIDADE TÉRMICA

4.1 APRESENTAÇÃO

Segundo dados da *Green Building Council*, em 2016, o Brasil é o quarto país do mundo que mais possui construções sustentáveis. Contudo é necessário investigar seu comportamento a altas temperaturas e reação ao fogo. Esta pesquisa parte do pressuposto que o bambu seja utilizado como material de construção em edificações e pretende-se avaliar o comportamento do material quando exposto a determinadas temperaturas por determinados períodos de exposição. O calor faz com que ocorra mudanças estruturais na composição química do bambu, assim sua resistência sofrerá mudanças fazendo com que sua capacidade de suportar tensões seja alterada.

4.2 OBJETIVOS

4.2.1 OBJETIVO GERAL

Este capítulo tem por objetivo analisar a estabilidade térmica do bambu da espécie *Phyllostachys pubescens* (Mossô), sob diferentes taxas de aquecimento, temperaturas e tempos de residência.

4.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos do presente capítulo:

- Analisar a influência do tempo de residência sob amostras submetidas à temperaturas e taxas de aquecimento iguais;
- Estudar o efeito do calor na resistência à tração;
- Comparar a absorção de água em amostras expostas ao calor;
- Verificar como o calor influencia a dilatação térmica do bambu.

4.3 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Uma das principais barreiras para a utilização do bambu como material de construção é a sua baixa resistência aos ataques de insetos (PEREIRA & BERALDO, 2008). Para isso, uma alternativa eficaz para a diminuição do amido presente em sua estrutura são os tratamentos térmicos (KLEINE, 2010). Tais tratamentos consistem em expor o bambu a determinadas temperaturas com intervalos de tempo pré-estabelecidos. No entanto, se percebeu que o bambu quando submetido ao calor, suas características mecânicas melhoravam e outrora, piorava. Hoje ainda existem lacunas que não foram respondidas sobre como o calor trabalha sobre estruturas lignocelulósicas, dentre elas, o bambu.

Para um estudo do efeito do calor nas propriedades físicas, mecânicas e químicas se faz necessário observar uma série de comportamentos que o bambu apresenta dependendo da fase de aquecimento que se encontra. De modo geral por se tratar de um material lignocelulósico, o bambu apresenta comportamento na presença e/ou ausência de calor de forma muito similar as madeiras. A primeira fase é a de secagem do material, que se inicia a temperaturas próximas de 0 °C até a ebulição da água. Já a segunda fase inicia-se no ponto de ebulição da água e geralmente é utilizada para tratamentos térmicos até o ponto de torrefação, onde as propriedades do bambu reduz de forma acentuada. A Figura 4.1 esquematiza o comportamento de madeiras e a temperatura necessária para cada fase de utilização.

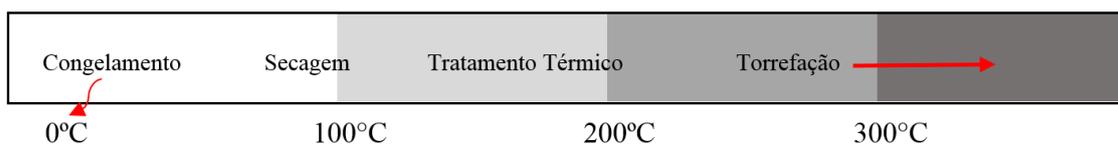


Figura 4.1 - Diferentes fases da utilização do calor em madeiras

Krause (2015) realizou ensaios de tração direta em laminados de bambu e observou que o modo de ruptura não é heterogêneo devido a fração volumétrica do material. Este fato pode ser explicado devido a extração dos corpos de prova que se dá na direção radial. Com isso, em um mesmo CP, existem zonas com resistências distintas. Nesta ótica, é possível classificar o modo de ruptura do bambu em três grupos:

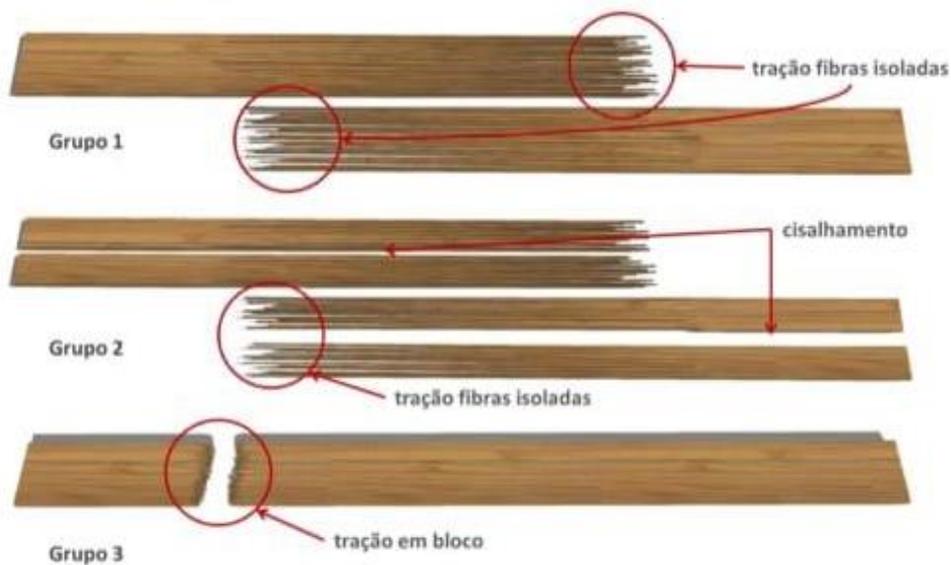


Figura 4.2 – Ilustração dos modos de ruptura presente em lâminas de bambu.
Fonte: Ghavami (2015)

Grupo 1: Predominância de uma ruptura gradual das fibras. Esse tipo de colapso é presente em vários compósitos reforçados com fibras longas quando submetido a esforços de tração;

Grupo 2: Ruptura associada predominantemente ao cisalhamento que ocorre de modo longitudinal aos CP's.

Grupo 3: Em bloco. Esse tipo de ruptura normalmente ocorre perto da garra, por causa da menor fração volumétrica das fibras.

4.3.1 EFEITO DA TEMPERATURA E TEMPO DE EXPOSIÇÃO NO BAMBU

Existem três fatores que são principais no processo de aquecimento do bambu: temperatura, tempo de exposição (residência) e a taxa de aquecimento. Para madeiras, a literatura é ampla e reporta vários artigos que investigam o efeito da exposição ao calor em comparação com o tempo. Rowell e Youngs (1981), são responsáveis pelos primeiros registros de estudos que mostram que a exposição da madeira em algumas temperaturas pode melhorar sua estabilidade dimensional.

Posteriormente, Esteves e Pereira (2008), correlacionaram o calor com a perda de constituintes que podem ocasionar danos a estrutura. Shangguan *et al.* (2016), estudaram

a influência do calor em laminados de bambu em oito temperaturas e correlacionou com a absorção de água. Contudo, existe uma lacuna sobre a influência das taxas de aquecimento e do tempo de exposição ao calor em relação a suas propriedades mecânicas, estabilidade dimensional e suas características hidrofóbicas.

Zhang *et al.* (2013) realizaram uma pesquisa com o bambu da espécie *Phyllostachys Pubescens* onde o material ficou exposto a temperaturas de 100 até 220 °C, com tempos de residência 1,2,3 e 4 horas. Como resultado, os pesquisadores observaram uma perda de massa significativa na temperatura de 180 °C para todos os tempos de exposição, além de alterações não significativas para o módulo de elasticidade (E). Quando as amostras são submetidas a temperaturas superiores a 200 °C o módulo de elasticidade sofria alterações de forma acentuada.

Azadeh e Ghavami (2017), avaliaram a influência do calor nas características de retração e, quando submetidos a presença de água, dilatação. Os autores escolheram como objeto de estudo do bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* e perceberam que não há diferença significativa entre o encolhimento nas partes externas e internas nas seções de bambu analisadas, contudo, as fibras têm uma expansão cerca de cinco vezes mais que a matriz devido à absorção de água até o ponto de saturação.

4.3.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA) é um método comum para estudar a degradação de materiais com a presença da temperatura. Assim, é determinado uma taxa de aquecimento e verificado a massa do material até o fim do ensaio. Com a utilização dessa técnica, com temperaturas e atmosferas controladas, é possível verificar qualquer alteração na massa em função da temperatura. Como resultado é possível obter uma função injetiva e por sua derivação é possível identificar pontos de degradação do material. Em função da espécie de bambu analisada e por se tratar de um material orgânico, as frações de celulose, hemicelulose, lignina e extrativos interferem diretamente nas TGA.

4.4 METODOLOGIA

O programa experimental proposto neste capítulo verificou como o calor influencia as propriedades mecânicas, químicas e físicas do bambu da espécie *Phyllostachys pubescens*. Para isso, foram realizados ensaios de resistência à tração e análise termogravimétrica.

4.4.1 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

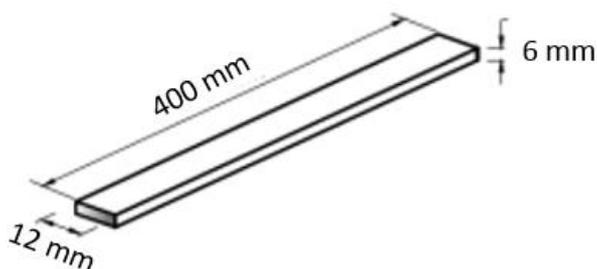


Figura 4.3 – Dimensões do corpo de prova utilizado no ensaio de tração direta

4.4.2 REGIMES DE AQUECIMENTO

O método de ensaio em estado estacionário foi empregado nesse capítulo. Inicialmente é verificada a massa dos corpos de prova e levados para a queima. O forno utilizado foi tipo mufla com capacidade que aquecimento de até 1000 °C. As amostras foram aquecidas até uma temperatura específica e conservado esta temperatura até um tempo pré-estabelecido (tempo de residência).

Neste trabalho foram analisadas quatro temperaturas, 100, 150, 200 e 250 °C. Já os tempos de residência a cada temperatura foram, 15, 30, 60, 120 e 240 min. Foram aplicadas duas taxas de aquecimento uma de 0.5 e a outra de 20 °C/min (com exceção do tempo de 15 min). Para cada caso foram ensaiados cinco corpos de prova e a referência em estado natural, ou seja, sem passar pela queima, foram analisados dez corpos de prova, o que totalizou 190 corpos de prova. Após esta etapa, foi esperado os corpos de provam entrassem em equilíbrio com a temperatura ambiente, pesados e imediatamente submetidos ao ensaio mecânico

4.4.3 REGIME DE AQUECIMENTO LENTO

As amostras submetidas ao regime de aquecimento lento foram aquecidas a uma taxa de 0,5 °C/min. Em termos práticos, com a escolha de taxas de aquecimento lentas, não se pode contrapor os resultados de temperaturas distintas, devido a influência do calor total que o CP fica exposto até o regime de aquecimento chegar ao seu término. Assim, uma amostra que chegaria a uma temperatura de 250 °C, fica sob influência do calor durante 500 minutos, mais o tempo de residência. Deste modo, em regime de aquecimento lento as variáveis que podem ser levadas em consideração são a influência do estado estacionário sob a amostra e cada temperatura ser analisada separadamente. A Figura 4.4 apresenta a curva correspondente ao regime de aquecimento lento e o tempo necessário para atingir cada temperatura em estudo neste capítulo.

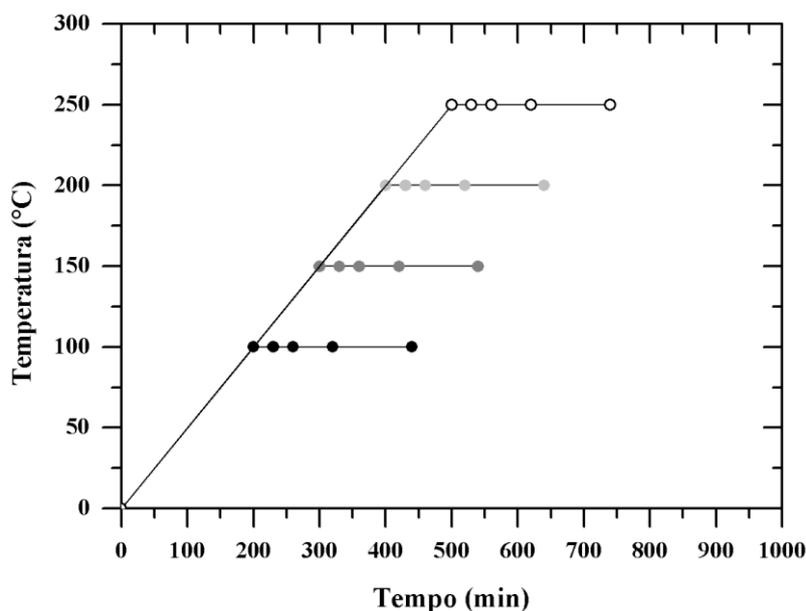


Figura 4.4 – Regime de aquecimento lento

4.4.4 REGIME DE AQUECIMENTO RÁPIDO

Com um aquecimento de 20 °C/min, as amostras, diferentemente do regime de aquecimento lento, alcançam a temperatura programada de modo acelerado e os danos com que as amostras são submetidas durante o processo de aquecimento são minimizadas, tendo em vista que o tempo de contato com a temperatura é reduzido. Assim uma amostra para alcançar a temperatura de 250 °C demoraria cerca de doze minutos. A

Figura 4.5 apresenta a curva correspondente ao regime de aquecimento rápido e o tempo necessário para atingir cada temperatura em estudo neste capítulo.

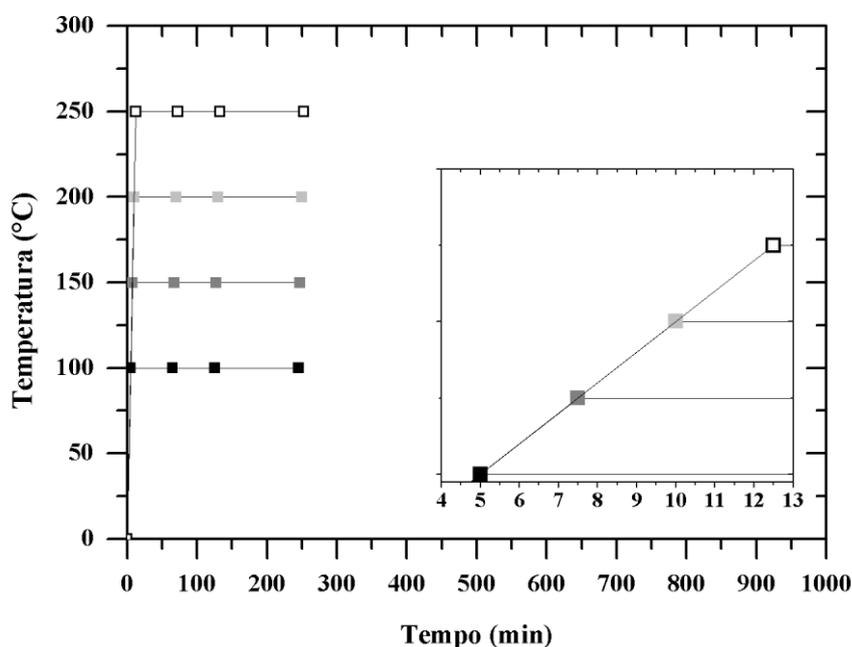


Figura 4.5- Regime de aquecimento rápido

4.4.4 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A análise termogravimétrica do bambu estudado neste programa experimental foi realizada no equipamento SDT Q600 TA *Instruments*. Inicialmente foi realizado um aquecimento com taxa constante até 10 °C/min até 1000 °C e o gás de arraste utilizado foi o nitrogênio com uma vazão de 100 mL/min.

4.4.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os ensaios de tração direta foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaio (MUE) eletromecânica *Shimadzu* AG-X com capacidade de carregamento de 100 kN (Figura 4.6). Este ensaio foi controlado pelo deslocamento a uma taxa de 0.3 mm/min, no qual foi utilizado o software Trapezium X, integrante da máquina. As deformações de cada corpo de prova foram utilizados clip-gages *Shimadzu* SG 50-50 posicionados em seu terço central e as tensões foram obtidas por meio do carregamento registrados pela célula de carga da máquina, fixas por garras com aperto em cunha, dividido pela área da seção.

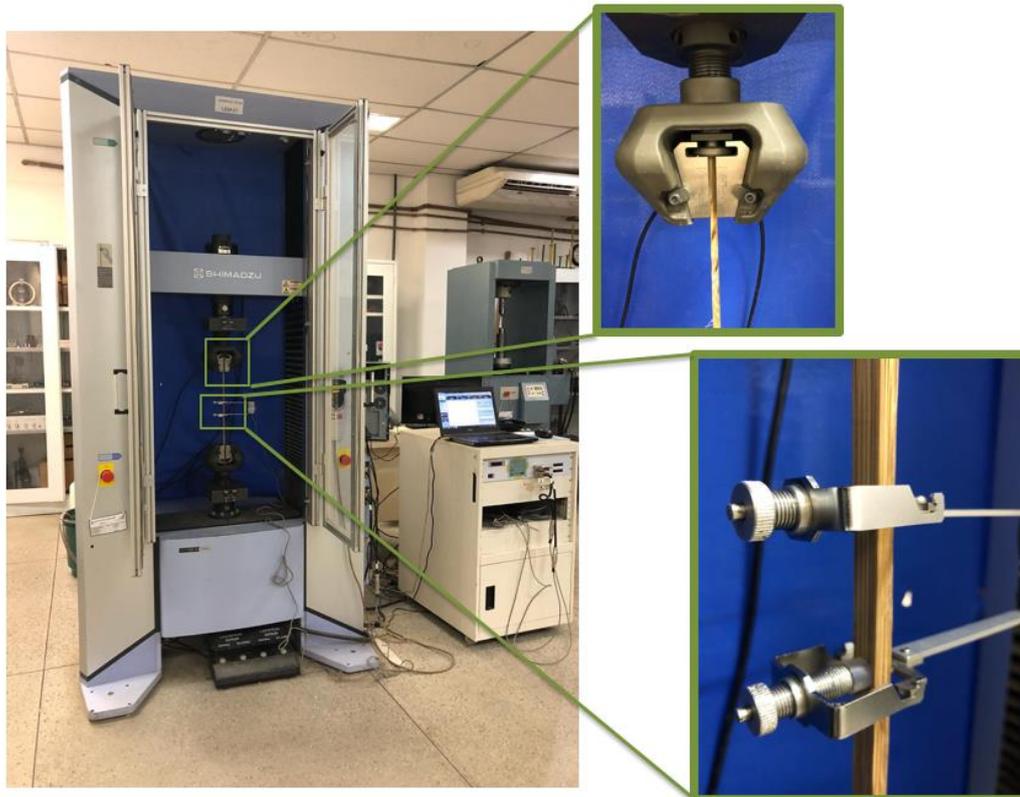


Figura 4.6 – Máquina Universal de Ensaio (MUE) utilizada para os ensaios de tração direta

É importante ressaltar que todos os corpos de prova submetidos ao ensaio de tração direta foram retirados da parte média dos colmos e que as amostras possuíam nós. Corpos de prova que não possuem nós, têm todas suas fibras de modo paralelo a linha de aplicação da força, enquanto no nó as fibras são organizadas anatomicamente de modo perpendicular, o que o caracteriza como um possível ponto frágil da estrutura.

4.5 RESULTADOS

4.5.1 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

Foi realizado a termogravimetria do bambu da espécie *Phyllostachys pubescens* a fim de determinar as faixas de temperaturas que seriam analisadas neste capítulo. Para isso, o material foi triturado em partículas passantes na peneira nº 16 (malha 40 ASTM) e retidas na peneira nº 24 (malha 60 ASTM). A Figura 4.7 apresenta as curvas de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) obtidas neste estudo.

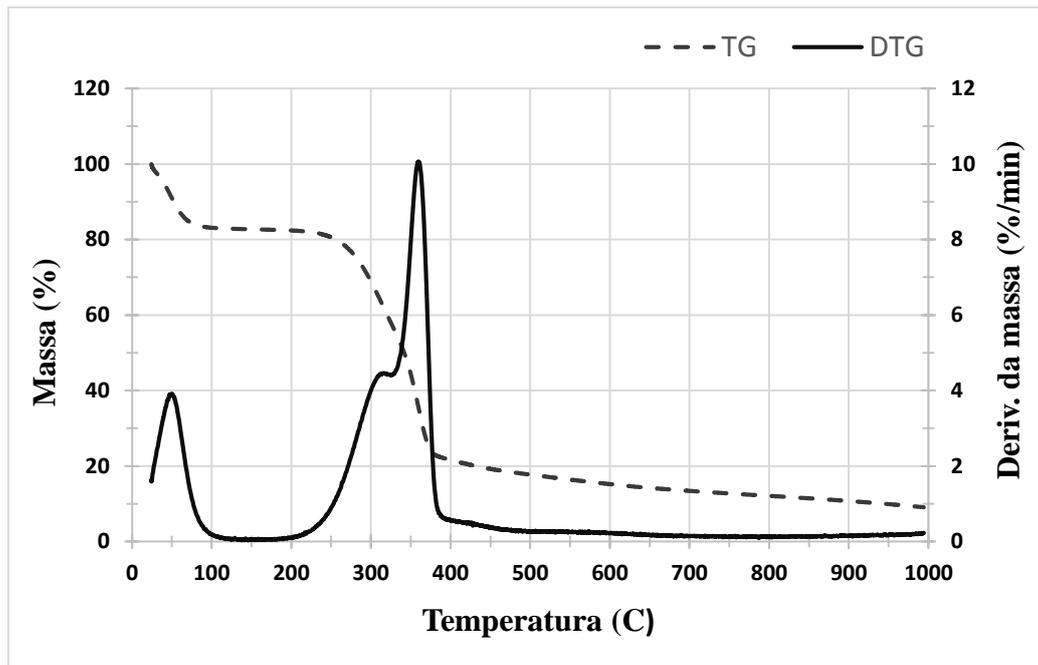


Figura 4.7- Curvas de TG e DTG bambu da espécie *Phyllostachys pubescens*

Por meio da análise dos dados referentes a Figura 4.7, é possível constatar a presença de três picos bem delimitados. Entre as temperaturas de 50 °C e 100 °C, houve uma perda de massa que é referente à eliminação de água do material. A partir dos 200 °C, é perceptível duas curvas sobrepostas que são referentes à despolimerização da hemicelulose. Entre 330 °C até 380 °C, ocorre o pico principal, referente a decomposição da celulose, sendo responsável por a maior perda de massa. Por fim, é possível observar a perda de massa final, que ocorre devido a degradação da lignina que ocorre entre 250 °C e 500°C. Tais constatações foram conseguidas por meio da utilização do *software* TA Universal Analysis que corroboram com os resultados apresentados pela literatura.

4.5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ESTADO NATURAL

A fim de estabelecer parâmetros para comparação com as demais variáveis em estudo, foram ensaiados sete corpos de prova em estado natural que serão reportados como referência neste capítulo. A tabela 4.1 apresenta seus resultados médios e respectivos coeficientes de variação.

Tabela 4.1 – Valores médios de tração paralela as fibras do bambu em estado natural e coeficiente de variação (% entre parênteses)

ID	σ_{\max} (MPa)	ϵ_{\max} (mm)	E (GPa)
Natural	154,6 (11,88)	0,02 (12,67)	7,93 (14,38)

A Figura 4.8 apresenta as curvas de tensão *versus* deformação das ripas de bambu em estado natural.

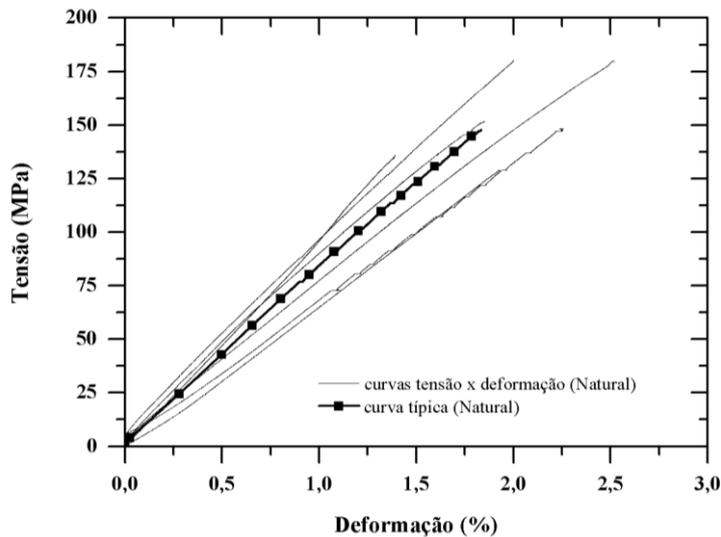


Figura 4.8- Curvas de tensão *versus* deformação em estado natural.

Em relação ao modo de ruptura em estado natural, das sete amostras submetidas ao ensaio, uma amostra (14,28%) rompeu em bloco e as demais por esforços de cisalhamento (85,72%). Por meio da Figura 4.9-b é possível observar que a ruptura em bloco aconteceu na região do nó presente no corpo de prova devido sua fragilidade.

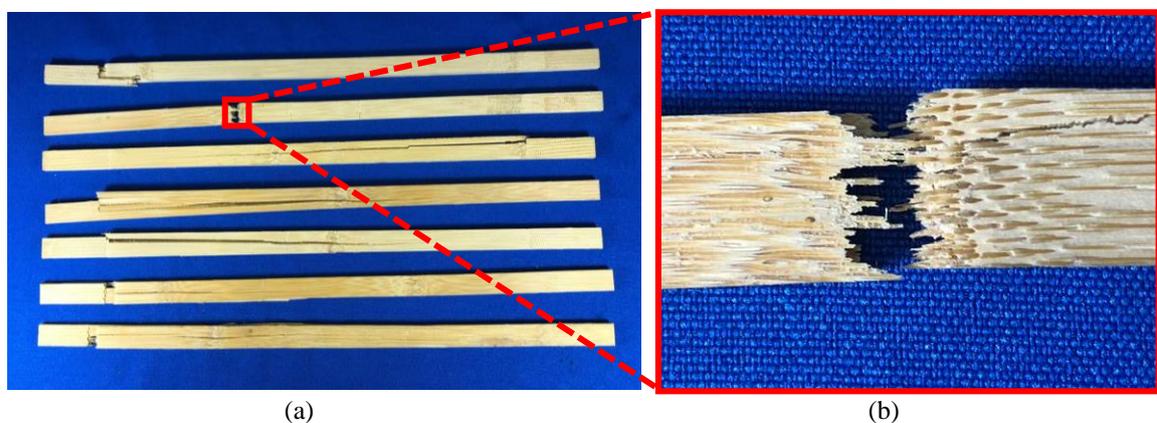


Figura 4.9 – Rupturas dos corpos de prova em estado natural: (a) Amostras ensaiadas e (b) detalhe da ruptura em bloco

4.5.3 REGIME DE AQUECIMENTO LENTO (0,5 °C/min)

No corpo deste capítulo, serão apresentadas apenas curvas médias do conjunto de temperatura e tempo de residência representadas por diferentes ícones. No Apêndice A encontram-se um registro fotográfico do modo de ruptura de cada corpo de prova ensaiado neste regime de aquecimento, enquanto no Apêndice B estão todas as curvas tensão *versus* deformação traçadas, bem como a curva média representativa em destaque.

Em relação as amostras que estiveram expostas a uma temperatura de 100 °C durante os tempos de residência de 15, 30, 60, 120 e 240 min, estão representadas na Figura 4.10.

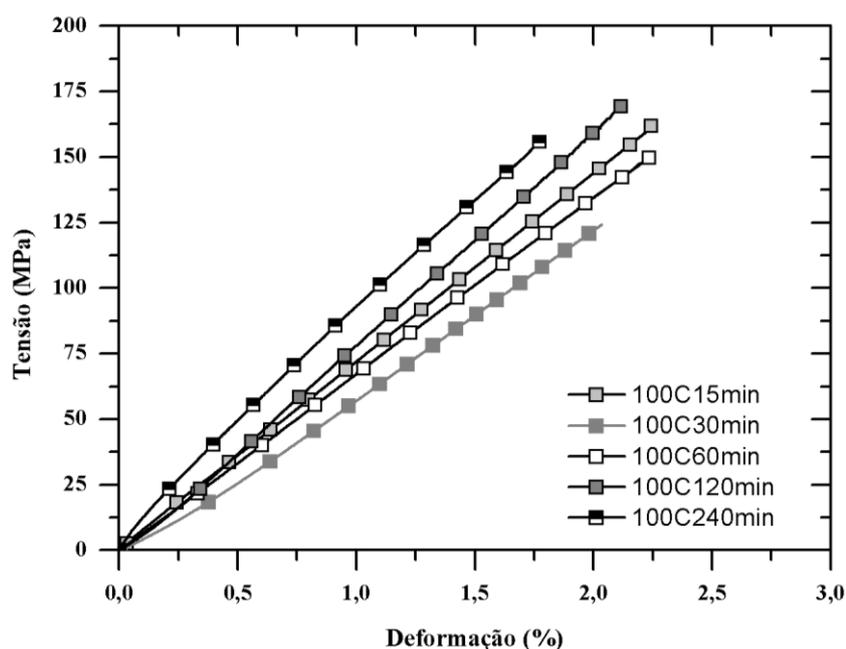


Figura 4.10- Curvas tensão *versus* deformação 100 °C

De forma análoga ao ensaio de teor de umidade, a exposição de corpos de prova de bambu a uma temperatura de 100 °C não irá trazer danos a estrutura, tendo em vista que nenhum dos constituintes do bambu se degradam a esta temperatura e apenas a água presente no material será reduzida. Quando observado que a ISSO/DIS-2257-1/2014 sugere que as amostras permaneçam a uma temperatura de 103 °C durante, no mínimo, 26 horas para a eliminação total da umidade do material. Conclui-se que os tempos de residência aqui analisados são curtos para esta temperatura.

Diversos pesquisadores relatam a utilização de baixas temperaturas para o tratamento térmico do bambu, atribuindo-lhe, assim, benefícios. Entre eles Colla (2010), afirma que

quando utilizado de forma correta, a temperatura gera benefícios ao bambu como a redução do amido presente em sua anatomia, evitando assim, ataques de insetos xilófagos, ganho de resistência mecânica e maior durabilidade.

Quando analisado os valores médios de tensão, é possível notar um ganho de resistência com o aumento de tempo de exposição devido a eliminação da água, o que pode ser constatado ao observar a Figura 4.11.

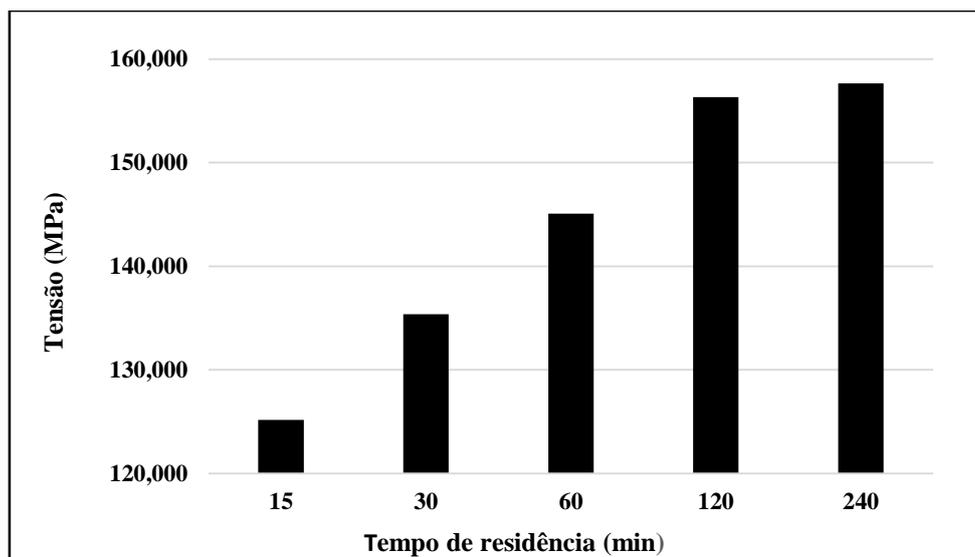


Figura 4.11 – Tensão *versus* tempo de residência 100 °C

Na tabela 4.2 estão expostos os resultados médios e coeficientes de variação obtidos na com a taxa de aquecimento 0,5

°C/min de Tensão máxima (σ_{max}), deformação máxima (ϵ_{max}) e módulo de elasticidade (E).

Diversos pesquisadores relatam a utilização de baixas temperaturas para o tratamento térmico do bambu, atribuindo-lhe, assim, benefícios. Entre eles Colla (2010), afirma que quando utilizado de forma correta, a temperatura gera benefícios ao bambu como a redução do amido presente em sua anatomia, evitando assim, ataques de insetos xilófagos, ganho de resistência mecânica e maior durabilidade.

Tabela 4.2 – Valores médios de tração paralela as fibras do bambu submetido a altas temperaturas a uma taxa de 0,5 °C/min e coeficiente de variação (% entre parênteses)

ID	σ_{\max} (MPa)	ϵ_{\max} (mm)	E (GPa)
100C15min	125,33 (12,81)	0,02 (12,29)	7,69 (13,06)
100C30min	135,89 (4,53)	0,024 (13,80)	5,80 (12,68)
100C60min	145,84 (6,00)	0,024 (4,94)	5,57 (5,57)
100C120min	156,71 (4,07)	0,018 (14,33)	8,59 (14,08)
100C240min	157,04 (7,55)	0,019 (11,07)	7,34 (12,71)
150C15min	163,92 (10,68)	0,022 (14,73)	7,44 (9,15)
150C30min	135,58 (2,62)	0,020 (9,62)	7,27 (12,92)
150C60min	131,03(12,21)	0,021 (12,01)	7,08 (3,48)
150C120min	123,00 (8,45)	0,018 (5,61)	7,59 (4,54)
150C240min	115,48 (11,53)	0,016 (12,54)	7,36 (13,12)
200C15min	95,03 (12,82)	0,012 (13,35)	6,51 (6,8)
200C30min	77,63 (21,50)	0,012 (12,40)	5,83 (22,06)
200C60min	75,51 (9,28)	0,010 (16,05)	7,2 (13,78)
200C120min	70,92 (26,37)	0,007 (22,64)	7,91 (28,70)
200C240min	76,58 (22,18)	0,005 (10,15)	9,51 (27,80)
250C15min	67,94 (1,98)	0,007 (3,72)	8,16 (23,50)
250C30min	35,86 (23,04)	0,009 (22,35)	5,31 (17,54)
250C60min	49,53 (25,34)	0,008 (32,20)	6,18 (10,06)
250C120min	33,75 (20,28)	0,007(12,99)	4,66 (9,81)
250C240min	31,51 (14,35)	0,006 (21,39)	4,93 (10,84)

Quando aumenta a temperatura para 150 °C, algumas mudanças nas amostras começam a ser mais evidentes. Os valores de resistência reduzem consideravelmente: para um tempo de exposição de 15 min a resistência média corresponde a 154,21 MPa enquanto que para o tempo de exposição de 240 minutos a resistência média reduz para 118,64 MPa. No que se refere a perda de massa, as amostras expostas a 100 °C por 240 min apresentaram perda de massa de 4%, já quando observado o mesmo tempo de residência

a uma temperatura de 150 °C a perda de massa foi de 10,1%. Na Figura 4.12 estão as curvas representativas de todos os tempos de residência que ficaram expostos a 150 °C

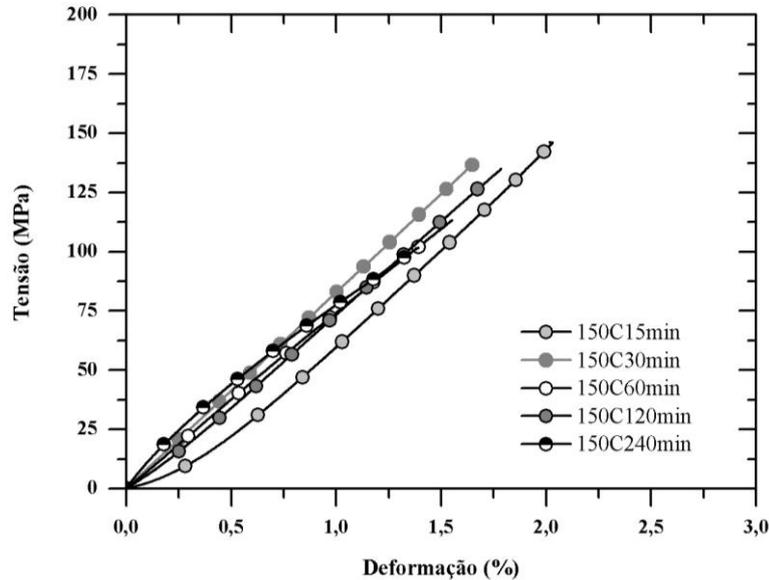


Figura 4.12 – Curvas tensão *versus* tempo de residência 150 °C

Na Figura 4.13, estão representadas as curvas médias das variáveis submetidas a 200 °C (Figura 4.13-a) e 250 °C (Figura 4.13-b). Para a temperatura de 200°C observou-se redução ainda mais expressiva na tensão de ruptura (redução de 101%) e no módulo de elasticidade (400%) com o aumento do tempo de residência.

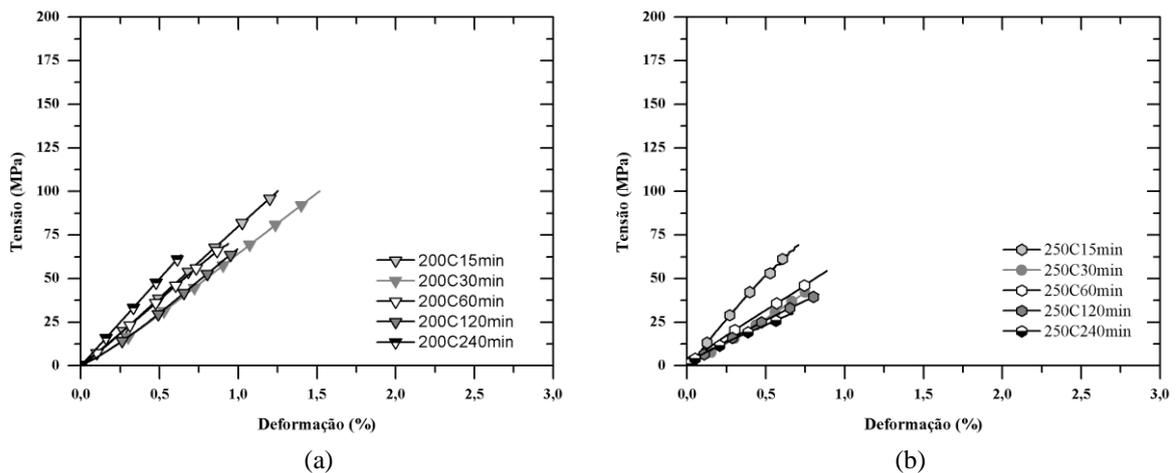


Figura 4.13 - Curvas tensão *versus* tempo de residência: (a) 200 °C e (b) 250 °C

Os corpos de prova que foram submetidos a temperatura de 250 °C tiveram a maior perda de massa (chegando a 32,72% para o tempo de residência de 240 min) e considerável reedição na resistência (490%) e rigidez (333%).

Isso ocorre devido à perda de constituintes discutidos por meio do ensaio de termogravimetria realizado neste trabalho. Na Tabela 4.3 são apresentados os valores percentuais médios de perda de massa da espécie de bambu em estudo nessa pesquisa. Tais dados podem ser correlacionados com o efeito que a exposição e o tempo de residência provoca ao material.

Tabela 4.3 – Valores médios percentagem de perda de massa do bambu submetido a temperaturas e coeficiente de variação (% entre parênteses)

Temperatura (°C)	Tempo de residência (min)									
	15		30		60		120		240	
	Média	cv	média	cv	média	cv	média	cv	média	cv
100	3,98	3,82	4,88	2,50	5,91	1,57	6,05	3,09	10,56	4,01
150	7,81	7,07	9,34	2,98	10,33	5,48	10,44	7,14	12,11	7,99
200	11,30	2,92	11,74	4,86	12,03	6,29	12,18	7,5	12,30	8,54
250	22,00	8,57	24,47	8,22	26,88	8,34	31,32	9,6	32,72	10,11

De modo geral as rupturas são de três tipos, por cisalhamento (Figura 4.14-a), por rompimento de fibras (Figura 4.14-b) e por ruptura de blocos (Figura 4.14-c). O primeiro caso é o mais comum e acontece em todas as variáveis, o segundo é presente nas variáveis de 200 °C e 250 °C, devido ao desgaste que a temperatura faz ao material. O terceiro caso acontece na presença do nó ou próximo as garras.

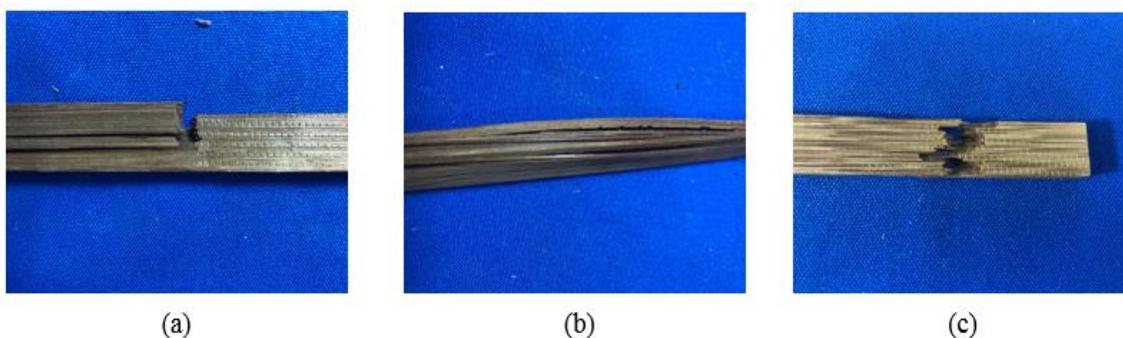


Figura 4.14- Modos de ruptura: (a) Cisalhamento, (b) rompimento de fibras (c) ruptura de blocos

4.5.4 REGIME DE AQUECIMENTO RÁPIDO (20 °C/min)

No regime de aquecimento rápido, foram escolhidas três temperaturas (100 °C, 150 °C e 200 °C) e quatro tempos de residência (30,0,120 e 240 min). As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 mostram as curvas tensão versus deformação das temperaturas em regime de aquecimento rápido utilizado neste trabalho.

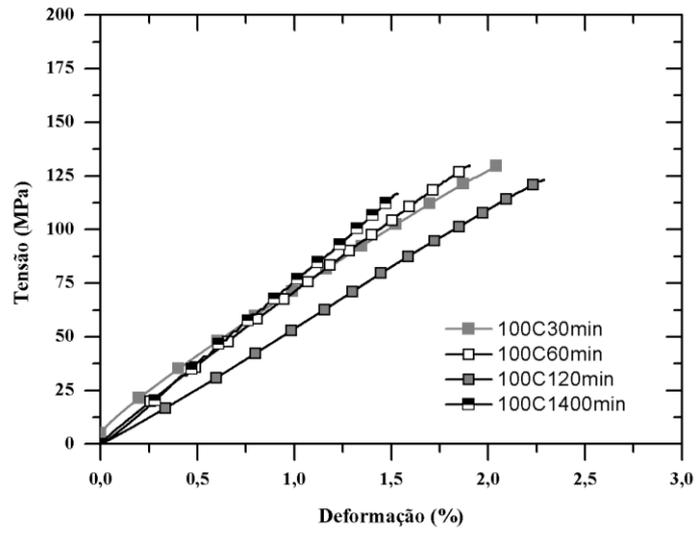


Figura 4.15 – Curvas médias de tensão *versus* tempo de residência R -100C

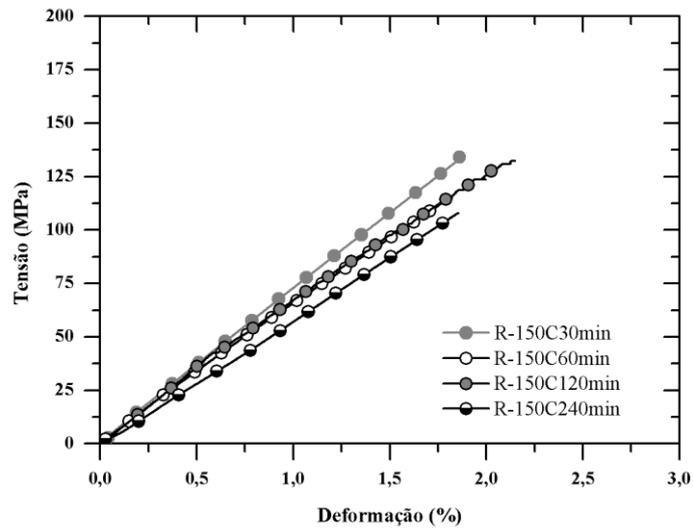


Figura 4.16 – Curvas médias de tensão *versus* tempo de residência R -150C

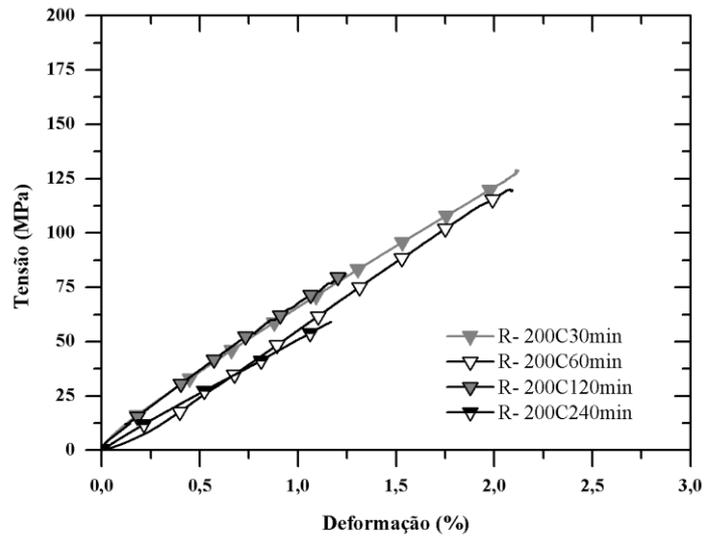


Figura 4.17 – Curvas médias de tensão *versus* tempo de residência R -200C

De forma análoga ao regime de aquecimento lento, os corpos de prova apresentaram o mesmo modo de ruptura. Quando comparado as taxas de aquecimento aqui estudado, a taxa mais lenta provoca mais dano ao material, já que o tempo de exposição ao calor é maior. Na tabela 4.4 é apresentado os resultados obtidos com uma taxa de aquecimento de 20 °C/min

Tabela 4.4 – Valores médios de tração paralela as fibras do bambu submetido a altas temperaturas a uma taxa de 20,0 °C/min e coeficiente de variação (% entre parênteses)

ID	σ_{\max} (MPa)	ϵ_{\max} (mm)	E (GPa)
R100C30min	119,23 (8,98)	0,017 (12,12)	6,29 (9,74)
R100C60min	132,752 (10,22)	0,019 (5,16)	7,68 (7,83)
R100C120min	135,04 (9,21)	0,023 (5,77)	5,53 (8,21)
R100C240min	135,11(12,22)	0,022 (11,87)	6,78 (8,95)
R150C30min	135,57 (7,01)	0,019 (3,44)	6,77 (7,65)
R150C60min	128,00 (12,99)	0,020 (13,72)	6,22 (4,22)
R150C120min	130,48 (4,24)	0,019 (9,81)	7,01 (8,68)
R150C240min	116,13 (16,33)	0,0019 (12,42)	6,04 (14,26)
R200C30min	115,46 (12,54)	0,020 (19,68)	5,82 (10,88)
R200C60min	101,92 (20,15)	0,022 (16,51)	5,50 (10,95)
R200C120min	87,68 (20,20)	0,018 (24,55)	7,32 (11,72)
R200C240min	74,21 (12,66)	0,013 (16,05)	5,93 (12,70)

4.6 CONCLUSÕES

A temperatura atua de modo distinto nos corpos de prova de bambu. Até 100 °C ela aumenta a resistência e rigidez já que retira a água presente no material. Em temperaturas maiores que 150 °C a resistência e rigidez são reduzidas. Os nós funcionam como pontos de concentração de tensões nas peças, fazendo com que ocorra a maior parte das rupturas (em bloco) neste local. O regime de aquecimento atua diferentemente e depende da magnitude da taxa, quanto mais lenta menor a rigidez e resistência obtidos, principalmente para temperaturas maiores que 150 °C.

REAÇÃO AO FOGO DO BAMBU

5.1 APRESENTAÇÃO

Existem pesquisas sobre a resistência mecânica e física do bambu, contudo o estudo de sua reação ao fogo ainda é carente de estudos científicos. Assim, a segurança contra incêndio pode ser desenvolvida por meio de dois macros objetivos: gerenciar o impacto dos incêndios e a prevenção da ignição.

Estudar como um material reage ao fogo é controlar a ignitabilidade e o processo de combustão por meio da limitação de determinadas propriedades dos materiais combustíveis. Deste modo, a reação ao fogo é avaliada por meio de métodos de ensaios que determinam parâmetros relacionados às propriedades como: taxa de liberação de calor, propagação de chama dos materiais, ignitabilidade e produção de fumaça. Assim, tais propriedades podem ser alteradas em dois casos, com a mudança do material ou com a aplicação de um retardante de chamas.

O bambu, como qualquer outro material lignocelulósico, quando submetido a situação de incêndio, sofre fenômenos físicos químicos nas suas propriedades mecânicas são alteradas de modo intenso, já que tais propriedades estão relacionadas com seu teor de umidade e densidade, o que gera perda de umidade, liberação de gases voláteis inflamáveis e redução de massa

5.2 OBJETIVOS

5.2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a reação ao fogo do bambu da espécie *Phyllostachys pubescens* (Mossô) sob condições de incêndio.

5.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a influência do fogo na microestrutura do bambu;

5.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.3.1 CONE CALORIMETRO DE PERDA DE MASSA (CCPM)

Os testes calorimétricos que utilizam o cone calorímetro são amplamente utilizados para medir as características de um material quando exposto a um determinado fluxo de calor constante.

Diversos pesquisadores como Spearpoint (2000), Lee (2011), Delichatsions (2002) e Grexa (2001) relacionam os resultados obtidos no cone calorímetro com resultados de incêndio em escala macro.

O desenvolvimento do cone calorímetro de perda de massa foi iniciado já no final da década de 1950, com queimadores de difícil utilização e medições complexas da taxa de liberação de calor. O equipamento começou a tomar forma no início dos anos de 1980, através de *Vytenis Babrauskas*, com uma nova técnica de medição do consumo de oxigênio e com aquecedores elétricos. O CCPM é atualmente o método mais avançado para avaliar as reações dos materiais ao fogo. O seu nome deriva da forma cônica do aquecedor radiante que produz um fluxo de calor praticamente uniforme ao longo da superfície da amostra.

O método utilizado pelo equipamento segue os procedimentos descritos nas normas internacionais ASTM E1354-11B (2013) que regulariza toda a parte de calibração do equipamento e ISO 5660-1 (2015) específica para ensaios sobre Heat Release Rate (HRR), que é o principal parâmetro que mede o tamanho de um incêndio. A superfície da amostra (área de no máximo 100 x 100 mm e espessura máxima de 50 mm) é exposta a um nível constante de radiação de calor, dentro da faixa de 0-100 kW/m², e colocada sobre uma célula de carga que registra a taxa de perda de massa durante a combustão. De acordo com a norma, três espécimes deverão ser testados em cada nível de fluxo de calor (os níveis típicos de irradiância são 25, 35, 50 e 75 kW/m²). Os gases de combustão são recolhidos por um exaustor para análise posterior. Esta análise de gás faz com que seja possível calcular a taxa de liberação de calor e para avaliar a produção de gases tóxicos (este último em apenas alguns equipamentos), de materiais e produtos. O princípio para a medição da taxa de liberação de calor está baseado no *princípio de*

Huggett (1980) de que o calor bruto de combustão de qualquer material orgânico está diretamente relacionado com a quantidade de oxigênio necessário para a combustão.

Por meio do CCPM é possível realizar a quantificação de parâmetros que estão relacionados diretamente com a liberação de calor (i e ii), com a perda de massa (iii e iv) e com a ignitabilidade (v e vi).

- (i) Calor total liberado (*Total Heat Release – THR*);
- (ii) Taxa de liberação de calor por unidade de área (*Heat Release Rate – HRR*);
- (iii) Taxa de perda de massa (*Mass Loss Rate – MLR*);
- (iv) Total de massa perdida (*Total Mass Loss – TML*);
- (v) Tempo de ignição (*Time to Ignition – TTI*); e
- (vi) Tempo de combustão (*Time of Combustion – TOC*).

O equipamento é constituído por uma unidade de controle e um conjunto experimental (Figura 5.1). O Conjunto experimental é composto por: (1) aquecedor cônico, (2) célula de carga, (3) faísca de ignição, (4) medidor de fluxo, (5) três termopares de controle de temperatura, (6) mecanismo de isolamento de calor, (7) suporte de montagem ajustável para amostras horizontais, (8) controlador de temperatura com leitura digital, (9) interruptores de liga/desliga de ignição, célula de carga e aquecedor e (10) controlador de célula de carga com leitura digital e tara eletrônico.

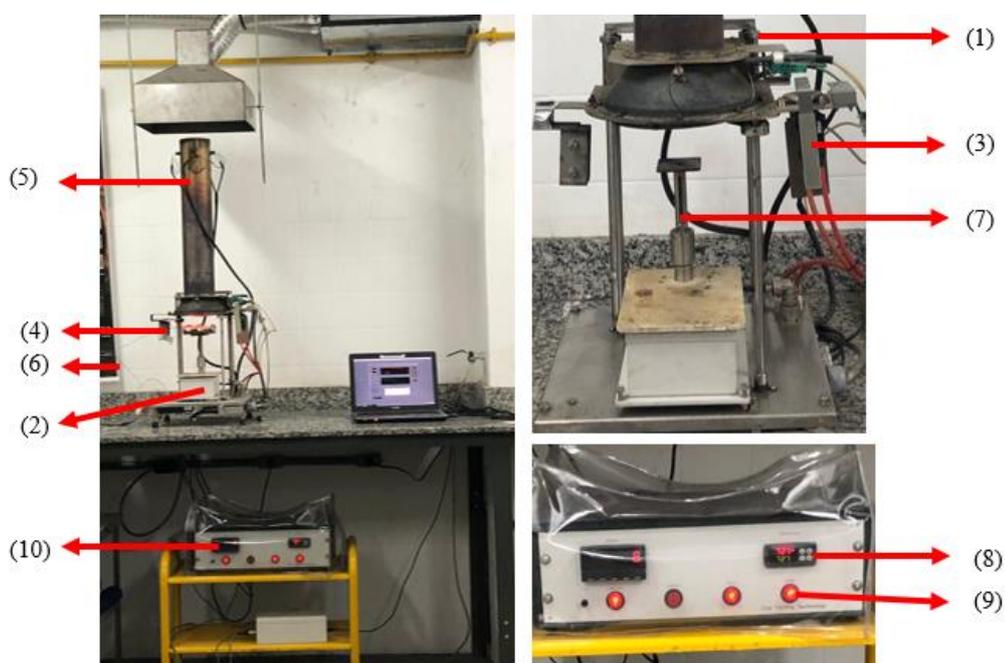


Figura 5.1- Imagem do cone calorímetro e da unidade de controle

5.3.2 PROCESSO DE IGNIÇÃO E COMBUSTÃO DAS MADEIRAS

Segundo Dias (2017), apesar das diferenças na composição das madeiras, existem três fases que podem ser observadas no seu processo de combustão e ignição, que são: preliminar, principal e final. A fase preliminar é caracterizada pela ausência de chamas, processo de secagem e pirólise do material. Existem faixas definidas de temperatura para a ocorrência de processos químicos e físicos nos materiais lignocelulósicos. Até a temperatura de 105 °C acontece a evaporação da água, posteriormente em torno de 160 °C inicia-se a decomposição da lignina, começando ao aparecimento da camada carbonácea (LEVAN e WINANDY, 1989).

Já a decomposição da hemicelulose ocorre na faixa dos 180 °C. No intervalo entre 200 °C e 260 °C, existe um aumento da liberação de hidrocarbonetos com baixo ponto de ebulição e de vapores. Por fim, entre 260 °C e 300 °C se dá a liberação de voláteis graças a decomposição da celulose (HORROCKS e PRICE, 2010). Com o início da ignição, temos a fase principal que ocorre por volta de temperaturas em torno de 260 °C e 450 °C. Esta fase é caracterizada pelo intenso aumento da taxa de liberação de calor e de perda de massa.

5.4 METODOLOGIA

5.4.1 DEFINIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

As amostras de bambu da espécie *Phyllostachys pubescens* (Mossô), utilizada neste trabalho foram cortadas da parte central dos colmos, com dimensões de 10x10x100 mm (Figura 5.2-a) e posteriormente faceadas lateralmente por um torno mecânico para serem ensaiadas no cone calorímetro. Já os corpos ilustrados na Figura 5.2-b foram usados no ensaio de condutividade térmica e possuem dimensões de 20x20x5 mm.

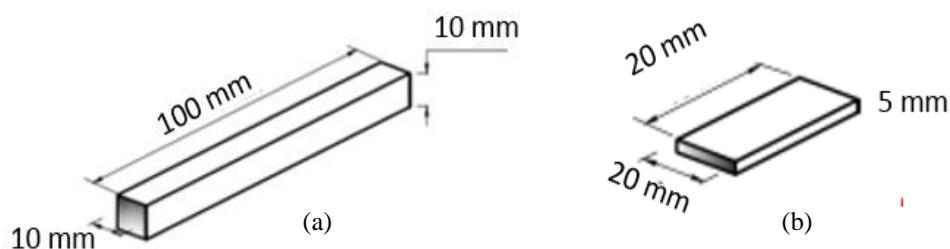


Figura 5.2- Dimensões dos corpos de prova

Foram utilizadas como variáveis desse trabalho a direção de fibras e a presença da parede do colmo. A parte externa a presença de fibras é maior do que na parte interna. Os colmos de bambu são recobertos com cera e uma camada cutinizada (BILESKY, 2019).

A figura 5.3 mostra os corpos de provas utilizados neste plano experimental. Na Figura 5.3-a o fluxo de calor é irradiado diretamente sobre a parte interna no colmo, enquanto na Figura 5.3-b o fluxo entra em contato com a parede do colmo. As amostras são posicionadas lado a lado com dimensões externas de até 106 mm x 106 mm e altura igual a parede do colmo. As amostras antes de serem submetidas ao ensaio, ficam dispostas em um sala com temperatura controlada em 23 °C durante sete dias.

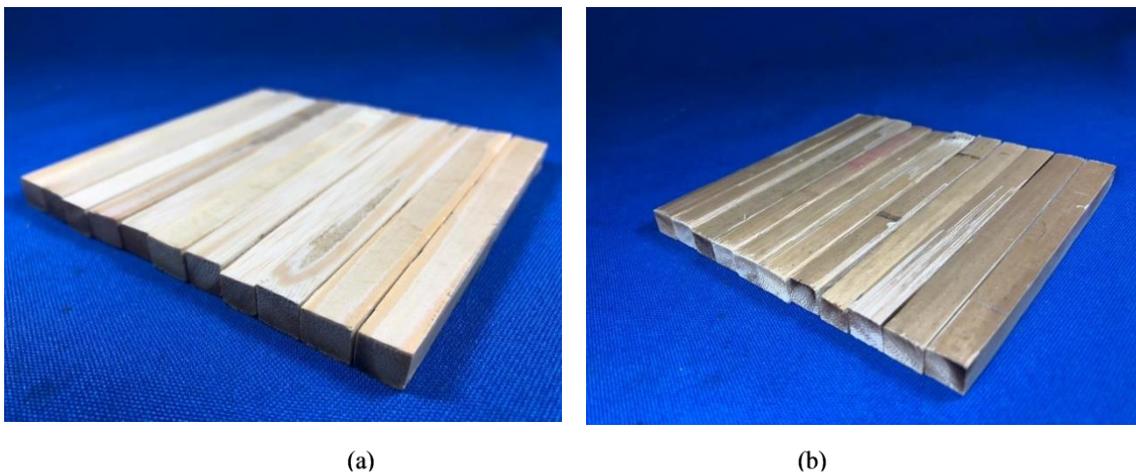


Figura 5.3 – Corpos de prova utilizados no cone calorímetro: (a) parte interna e (b) parte externa

A Figura 5.4 mostra as dimensões do porta amostra utilizado no cone calorímetro, assim, as ripas são dispostas de modo que a seção fique mais homogênea possível e livre da presença de ar.

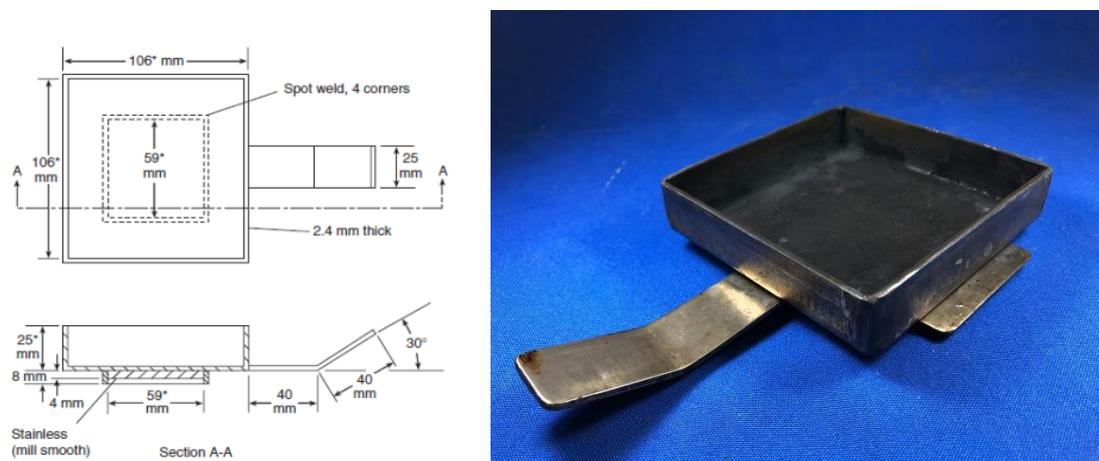


Figura 5.4- Dimensões do aparato instrumental. Adaptado (ASTM-E1354-11b, 2011)

5.4.2 PROPRIEDADES DA COMBUSTÃO

5.4.2.1 Taxa de perda de massa

A taxa média de perda de massa pode ser obtida durante qualquer intervalo em que os dados de massa sejam monitorados. Dependendo da necessidade de cada usuário, os dados podem ser adaptados, mas a norma ISSO 5660-1 (2002) e ASTM E1354-11B (2013) sugerem que os valores médios sejam nos intervalos de 180 e 300 s após a ignição, bem como os valores de pico, já que são um dos dados mais relevantes do ensaio. Assim, a taxa média de perda de massa (\dot{m}) pode ser expressa por meio do intervalo de dois tempos (t), como mostra a Equação 1.

$$\dot{m}_{t_1-t_2} = \frac{m_{t_1} - m_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Onde:

- m_{t_1} é a massa expressa em gramas equivalente ao tempo 1 (t_1), expresso em segundos;
- m_{t_2} é a massa expressa em gramas equivalente ao tempo 2 (t_2), expresso em segundos.

A taxa de perda de massa, \dot{m} , pode ser expressa em cada intervalo de tempo e pode ser calculada por meio da diferenciação de cinco expressões numéricas.

Quando $i = 0$:

$$[\dot{m}]_{i=0} = \frac{25_{m0} - 48_{m1} + 36_{m2} - 16_{m3} + 3_{m4}}{12\Delta t}$$

Quando $i = 1$:

$$[\dot{m}]_{i=1} = \frac{3_{m0} + 10_{m1} + 18_{m2} - 6_{m3} + m_4}{12\Delta t}$$

Quando $1 < i > n-1$:

$$[\dot{m}]_{i=n-1} = \frac{-m_{i-2} + 8m_{i-1} - 8m_{i+2} + m_{i+2}}{12\Delta t}$$

Quando $i = n-1$:

$$[\dot{m}]_{i=n-1} = \frac{-3m_n - 10m_{n-1} + 18m_{n-2} - 6m_{n-3} + m_{n-4}}{12\Delta t}$$

Quando $i = n$:

$$[\dot{m}]_{i=n} = \frac{-25m_n + 48m_{n-1} + 36m_{n-3} + 16m_{n-3} - 3m_{n-4}}{12\Delta t}$$

Assim, a perda de massa por unidade de área é representada pela seguinte Equação 5.2:

$$\dot{m}_{A,10-9} = \frac{m_{10} - m_{90}}{t_{90} - t_{10}} \cdot \frac{1}{A_S} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Onde:

- $m_{10} = m_i - 0,10_{\Delta m}$;
- $m_{90} = m_i - 0,90_{\Delta m}$; e
- $\Delta_m = m_i - m_f$.

5.4.2.2 Calor total liberado na combustão

A determinação do calor total liberado durante a combustão é realizada por meio de um somatório da seguinte maneira:

$$q'' = \sum_i q''_i(t) \Delta t \quad (\text{Eq. 5.3})$$

De modo que o somatório da leitura após a última taxa de liberação negativa observada no início do teste e com término até a leitura final registrada. O cálculo do calor efetivo de combustão médio, é realizado por meio da soma no decorrer de todo o teste, calculado da seguinte forma:

$$\Delta h_{c,eff} = \frac{\sum_i \dot{q}_i(t) \Delta t}{m_i - m_f} \quad e_i = \frac{M_i}{A \cdot \rho} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Já os valores que são variáveis no tempo são determinados por:

$$\Delta h_{c,eff}(t) = \frac{\dot{q}_i(t)}{-(dm/dt)} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

5.4.2.3 Taxa de liberação de calor

A taxa de liberação de calor ou *Heat Release Rate* (HRR), trata-se do parâmetro mais importante quando é avaliado o comportamento ao fogo dos materiais. Em termos práticos a taxa é usada para definir o tamanho do incêndio, correlacionando a quantidade de calor liberada em função do tempo (*National Fire Protection Association-NFPA*).

Para a quantificação do método é utilizada uma relação de $13,1 \times 10^3$ KJ de calor liberado por quilograma de oxigênio consumido. Os materiais ensaiados são queimados sob condições de ar ambiente e ao serem submetidos a um fluxo de radiação externa pré-determinado, que pode estar dentro da faixa de 0 a 100 kW/m^2 , são realizadas medidas com a concentração de oxigênio e as taxas de escape de fluxo do gás.

Este método é utilizado para avaliar as contribuições que o material a ser ensaiado pode fazer a taxa de liberação de calor durante o seu contato com o fogo por meio de pequenas amostras representativas.

De acordo com a norma ISO5660-1, as coletas dos gases de escape são realizadas por meio de uma bomba localizada na seção de dutos do equipamento. Esta bomba aspira os gases através de uma armadilha fria e de um agente de secagem que remove a umidade do gás liberado pela amostra. O analisador, por meio do gás alimentado, verifica a concentração de oxigênio por outros parâmetros, como a pressão diferencial é utilizada para o cálculo desta taxa.

Se faz necessário antes do cálculo dos outros parâmetros disponíveis por meio do ensaio, deve-se observar os dados do analisador de hidrogênio por meio dos dados de leitura e do tempo de atraso, a partir da seguinte equação:

$$X_{O_2}''(t) = X_{O_2}^1(t + t_d) \quad (\text{Eq. 5.6})$$

A taxa de Liberação de Calor pode ser calculada por meio da equação 5.7:

$$\dot{q}''(t) = \frac{\dot{q}(t)}{A_s} \quad (\text{Eq. 5.7})$$

$$\dot{Q}(t) = \frac{\Delta h_c}{r_0} (1.10) C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \frac{(X_{O_2}^0 - X_{O_2}(t))}{1.105 - 1.5 X_{O_2}(t)} \quad (\text{Eq. 5.8})$$

Onde:

- \dot{q}'' é a taxa de liberação de calor por unidade de área (kW/m²);
- \dot{Q} é a taxa de liberação de calor (kW);
- A_s é a área inicialmente exposta (m²), ou seja, 0,0088m² na orientação vertical e de 0,01m² na orientação horizontal;
- Δh_c é o calor líquido da combustão (kJ/kg).

5.4.3 CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Para a realização dos ensaios no Cone Calorímetro, é necessário realizar uma calibração em todas as partes do equipamento e de alguns módulos antes de cada ensaio, como descritos a seguir. O *software* instalado para a execução desse programa experimental foi o MLCCalc.

5.4.3.1 Célula de carga

A aquisição dos dados relativos à massa foi realizada por meio de uma célula de carga presente no equipamento que possui precisão de $\pm 0,1g$ e tempo de resposta de 1s. Antes de realizar a configuração da célula de carga, é necessário verificar a massa de todas as

amostras e determinar aquela que possui maior valor para inserir no sistema. Assim, foi escolhido um valor um pouco maior que a massa da maior amostra.

Posteriormente é colocado o suporte da amostra vazio na célula de carga e pressionado o botão *tare*, localizado na parte frontal do cone calorímetro. Em seguida é colocada uma amostra com massa conhecida e pressionado o botão *OK*.

5.4.3.2 Fluxo de calor

Para realizar o teste com uma amostra a temperatura do cone foi ajustada para o fluxo de calor escolhido. Para uma distância de 25 mm entre a superfície da amostra e do cone é possível escolher fluxos de 25, 30, 35, 50, 75 e 100 kW/m², caso a distância fosse diferente estas opções podem ser editadas. Sendo assim, neste trabalho optou-se por fluxos de 50kW/m² (já que simula as condições de um incêndio desenvolvido) e a distância padrão do ensaio.

5.4.3.3 Taxa de liberação de calor

Para medir a taxa de liberação de calor, é necessário fornecer o fluxo de calor escolhido para o ensaio e a distância da amostra para o cone calorímetro. Assim o painel apresenta as seguintes informações:

- i. Tempo que a rotina é iniciada;
- ii. Sinal atual da termopilha;
- iii. Gráfico da termopilha atual *versus* o tempo;
- iv. Gráfico da liberação de calor do metano *versus* a saída da termopilha;
- v. A área de orientação ao usuário de toda a rotina realizada.

5.5.4 INÍCIO DO ENSAIO

O Procedimento a seguir foi utilizado antes de submeter cada amostra à realização do ensaio.

Etapa 1 - Calibração da célula de carga: a primeira etapa do ensaio consiste em realizar a calibração da célula de carga. Para isso, é colocado o suporte vazio sobre a balança e

tarado por meio do botão “zerar” presente na parte frontal do painel do equipamento. Posteriormente a amostra junto com o suporte é inserido novamente para a aquisição do peso correspondente apenas a amostra.

Etapa 2- Aquecimento do Cone Calorímetro: Durante todo o processo o aquecedor do cone calorímetro funciona a 10 °C/min que são medidos por meio dos três termopares contidos no equipamento.

Etapa 3- Controle do fluxo de calor: Esta etapa consiste em controlar a temperatura para a realização do ensaio, para isso é aguardado o com atingir uma temperatura de 783 °C e aguardado 10 minutos para a estabilização da temperatura.

Etapa 4- Início dos Testes: Quando a temperatura do é estabilizada, é iniciado o programa para obtenção dos resultados. O cone é fechado e é fornecido os valores de entrada (nome da amostra, teor de umidade, espessura da parede, massa inicial e observações). Em seguida o suporte do cone é aberto e aguardados 60 segundos para que o aquecedor entre em equilíbrio térmico. Posteriormente o suporte é fechado e o corpo de prova é inserido sobre a célula de carga para iniciar o ensaio.

Etapa 5- Obtenção dos dados: Para identificarmos o tempo de ignição de cada amostra é obtido por meio da marcação manual e para a identificação da temperatura correspondente ao momento da ignição foi obtido com o auxílio de um sistema de aquisição junto a um termopar que é colocado em cima da amostra. Os demais dados são obtidos por meio dos gráficos gerados no fim de cada ensaio em função do tempo.

Etapa 6- Término: Os ensaios são finalizados dois minutos após os sinais de fim de combustão ou a amostra ter perdido 70% da massa inicial.

5.5.5 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Para a realização dos ensaios de condutividade térmica, foram confeccionadas amostras com dimensões de 20 mm X 20 mm e colocadas no analisador de condutividade térmica TCi (Figura 5.5) da C-Therm Technologies com capacidade de testes de 0 a 500 W/mK e uma faixa de temperatura de -50C a 200C. O princípio de aplicação do equipamento é baseado na modificação da fonte em plano transiente, na qual o sensor de refletância acoplado no equipamento de forma unilateral aplica calor de forma constante na amostra, assim, é criado uma interface entre o sensor e a amostra que resulta em um aumento de

temperatura. Tal aumento faz com que haja uma variação na voltagem do elemento do sensor, com isso, essa taxa de aumento de voltagem é utilizada para determinar as propriedades termo físicas do bambu.

Para a aquisição dos resultados um computador é conectado ao equipamento por meio do seu *software*, com isso é possível exportar as leituras de condutividade térmica e efusividade da amostra.

Para o processamento das amostras a serem utilizadas neste ensaio foram processadas cinco amostras com dimensões 20x20x5 mm. Para assegurar a qualidade dos resultados os CP's tem que ter uma superfície mais plana possível. Como o bambu possui em sua matriz poros, se faz necessário passar uma fina camada de graxa térmica, para servir de agente de contato.

Antes do ensaio é realizado um teste com material de condutividade conhecida, fornecido pelo fabricante para constatar o bom funcionamento do sistema, em seguida é seguido os seguintes passos:

- i) Colocar sobre o sensor uma camada de graxa térmica;
- ii) Posicionar a amostra sobre o leitor;
- iii) Selecionar o módulo utilizado para a leitura;
- iv) Fazer as medições;
- v) Realizar cinco leituras de cada lado, excluir a primeira e fazer média das demais.
- vi) Após a leitura, retirar a amostra e limpar o sensor; e
- vii) Refazer todos os procedimentos anteriores para cada amostra.

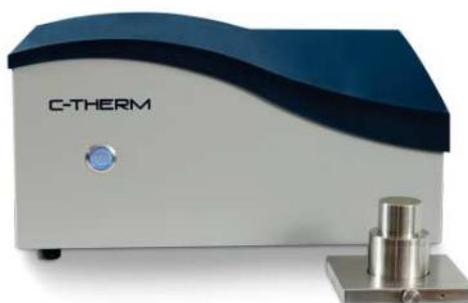


Figura 5.5- Analisador de condutividade térmica

5.5 RESULTADOS

5.5.1 CONE CALORÍMETRO

Foram identificadas fases similares quando analisado as duas variáveis estudadas nesse capítulo.

- (i) Preliminar – Esta etapa inicia-se após a eliminação de água presente no material e logo após acontece a pirólise.
- (ii) Principal – É compreendida durante a combustão de chamas.
- (iii) Final – Tem início quando as chamas acabam.

O processo de ignição e combustão do bambu foi observado por meio de registo fotográfico. Nos corpos de prova onde a parte interna do bambu estava em contato com o fluxo de calor, por uma análise visual foi identificado a variável que continha a parte externa sofreu um processo de fragmentação antes da ignição.

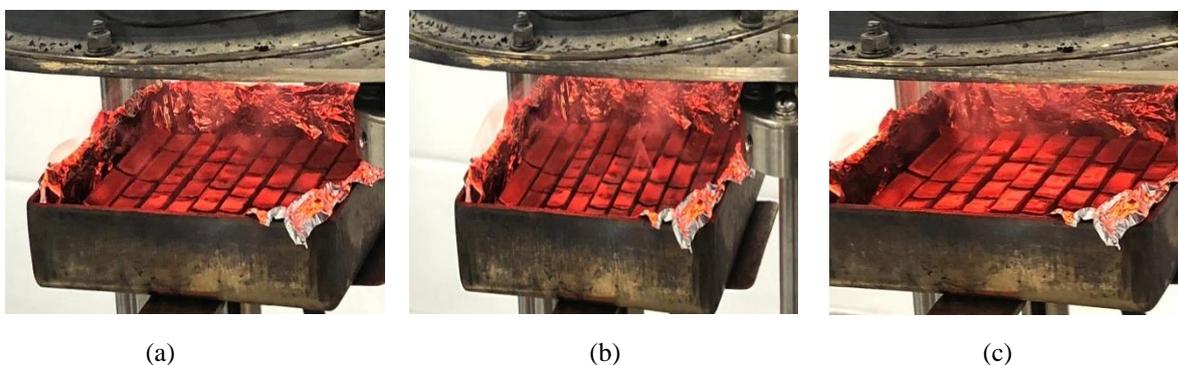


Figura 5.6 – Processo de combustão da parte inferior do bambu

Na tabela 5.1 são apresentados os dados obtidos no cone calorímetro dos oito corpos de prova ensaiados.

Tabela 5.1 – Síntese dos resultados – parte inferior

ID's	CP's	t [mm]	PHRR [Kw/m ²]	HRR ₁₈₀ [Kw/m ²]	THR [MJ/m ²]	TML [%]	MLR [g/s]	TTI [s]	EHC [MJ/kg]	TIG [°C]
INFERIOR	1	10,26	187,81	58,72	12,3	82,9	0,048	406	8,88	-
	2	9,26	238,48	52,06	12,7	92,8	0,025	377	7,87	-
	3	9,81	278,13	117,28	21,5	95,8	0,027	331	12,47	-
	4	9,13	223,68	84,17	17,2	80,2	0,081	377	9,55	531
	5	10,56	186,16	80,02	14,7	82,8	0,089	378	8,50	550
	6	8,10	265,9	128,1	53,8	81	0,1	310	9,31	515
	7	7,96	159,2	-	12,1	83,1	0,1	290		527
	8	8,11	266,0	156,6	65,5	81,9	0,1	330	10,3	540
	Média	9,15	252,940	96,71	14,63	85,06	0,1	349,88	9,55	532,60
	CV	11,14	25,698	39,75	16,71	6,87	0	11,50	15,71	2,49

A Figura 5.7-a apresenta o momento final do ensaio, quando chama aparente acaba e a Figura 5.7-b mostra como ficam os corpos de prova após a diminuição da temperatura. Quando observada a porcentagem de massa perdida durante o ensaio (TML), nesta variável, as amostras tiveram uma perda média de 85,06%.



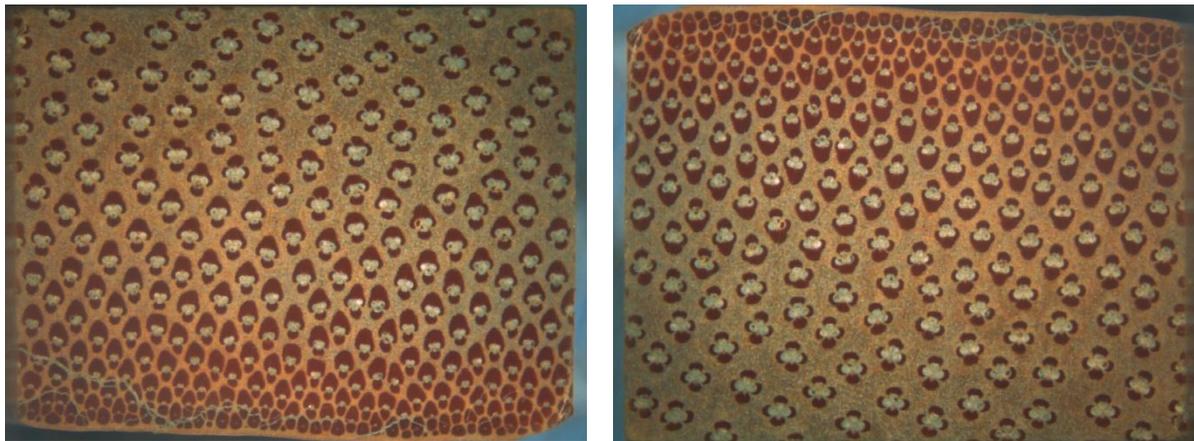
(a)



(b)

Figura 5.7 - Corpos de prova da parte interna no final do ensaio: (a) sob temperatura após o ensaio (b) Temperatura ambiente

As imagens obtidas por meio da microscopia óptica (ver figura 5.8), mostram os componentes anatômicos do bambu indicando as diferentes concentrações de fibras expostas ao fluxo de calor durante os ensaios realizados no cone calorímetro.



(a)

(b)

Figura 5.8- Disposição das fibras antes do ensaio do cone calorímetro: (a) parte interna submetida a temperatura e (b) parte externa submetida a temperatura

Já na parte externa sofre um desmembramento, ou seja, a estrutura mais próxima a parede que possui o maior número de fibras se desprende do restante da estrutura. A fragmentação ocorre de maneira menos acentuada que nos corpos de prova que a parte inferior é submetida ao calor.



(a)

(b)

(c)

Figura 5.9 – Processo de combustão da parte exterior do bambu

Na tabela 5.2 são apresentados os dados obtidos no cone calorímetro dos oitos corpos de prova ensaiados.

Tabela 5.2 - Síntese dos resultados – parte exterior

ID's	CP's	t [mm]	PHRR [Kw/m ²]	HRR ₁₈₀ [Kw/m ²]	THR [MJ/m ²]	TML [%]	MLR [g/s]	TTI [s]	EHC [MJ/kg]	TIG [°C]
EXTERIOR	1	9,44	277,43	66,78	14,4	50,0	0,055	311	9,85	-
	2	10,05	160,31	13,48	8,1	45,5	0,043	341	13,48	-
	3	10,04	203,56	-	7,0	45	0,056	328	-	-
	4	9,91	144,09	-	5,3	73,0	0,145	176	15,25	590
	5	9,54	426,02	304,77	57,1	63,9	0,165	385	-	421
	6	8,1	241,8	293,0	59,7	83,9	0,1	145,0	19,4	497,0
	7	8,0	135,1	235,5	59,8	88,5	0,1	123,0	14,3	476,0
	8	8,0	210,0	244,8	51,4	80,3	0,1	191,0	15,5	442,0
	Média	9,13	224,78	193,05	32,85	66,26	0,095	250	14,63	485,2
	CV	10,27	42,18	70,87	79,77	26,76	45,63	40,68	49,64	52,75

A Figura 5.10-a apresenta o momento final do ensaio, quando chama aparente acaba e a Figura 5.10-b mostra como ficam os corpos de prova após a diminuição da temperatura.

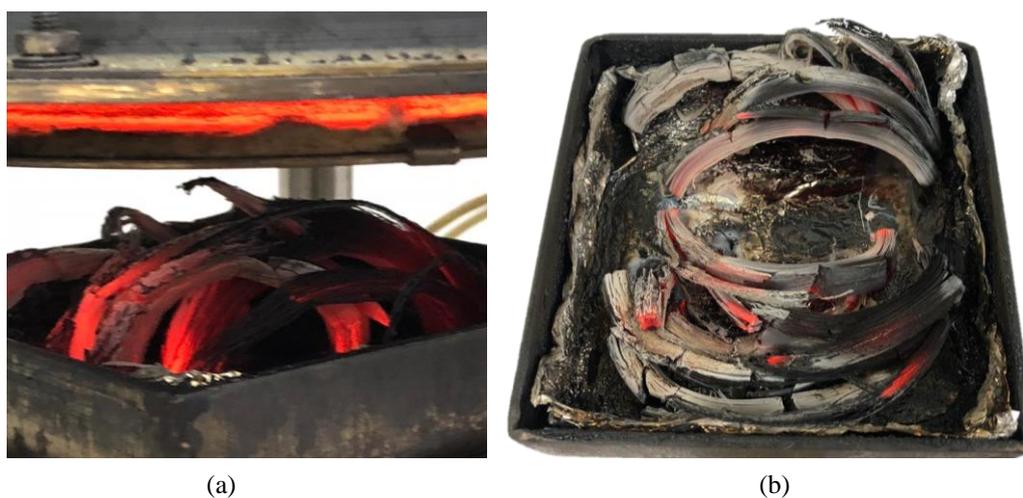


Figura 5.10 - Corpos de prova da parte externa no final do ensaio: (a) Temperatura após o ensaio (b) Temperatura ambiente

Após o fim do ensaio, a microestrutura das amostras foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Na Figura 5.11 é possível observar que os veios vasculares do bambu conservam sua morfologia mesmo após a queima, mas o esclerênquima é afetado de modo intenso.

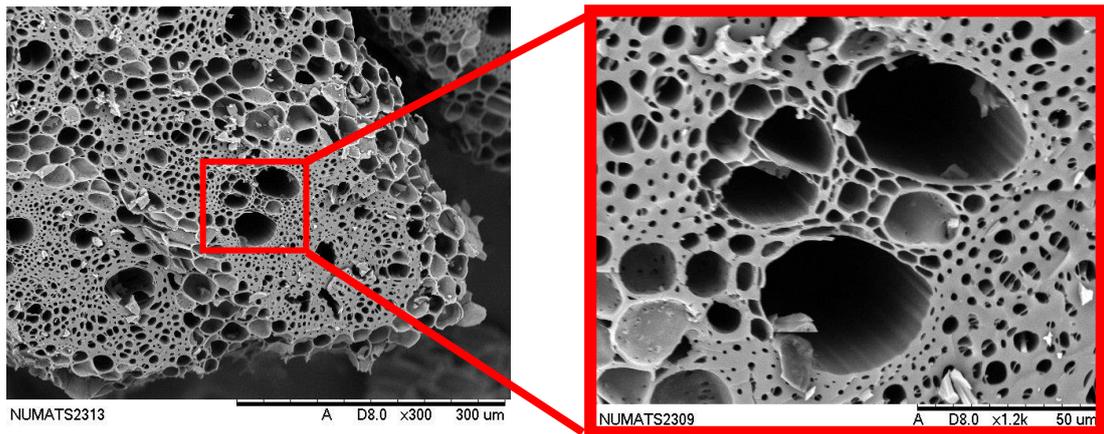


Figura 5.11 – Veios vasculares após combustão

Na Figura 5.12 é possível ver como a parede externa do bambu age amenizando a ação do fogo, fazendo com que sua estrutura externa fique conservada, enquanto a interna é fortemente degradada. Assim, explica-se a diferença de resultados como: tempo de início de ignição e calor total liberado.

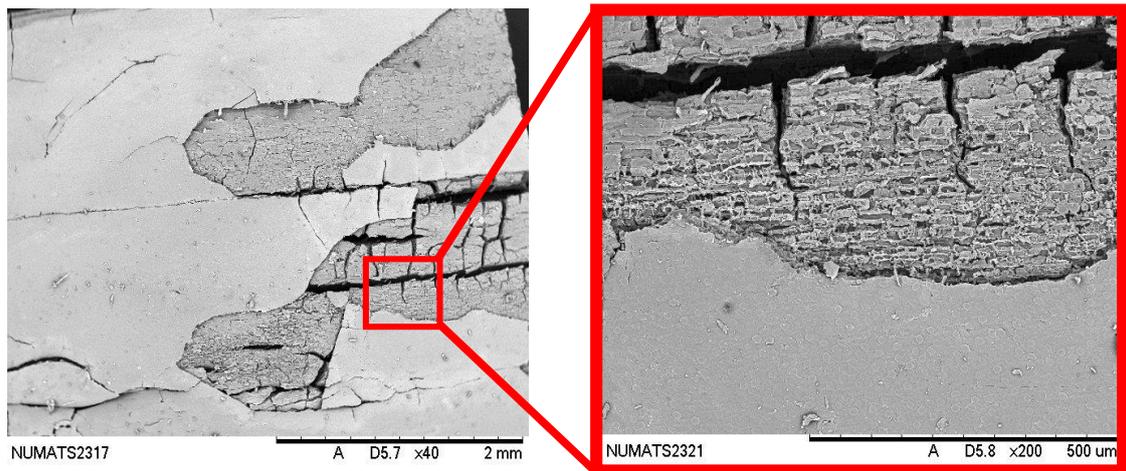


Figura 5.12 – Paredes dos colmos de bambu após combustão

A Figura 5.13 mostra a seção radial da parede, no qual é possível perceber a presença de pontoações (Figura 5.13) de diferentes diâmetros. Com isso, o número de vazios é aumentado e a resistência do material é prejudicada.

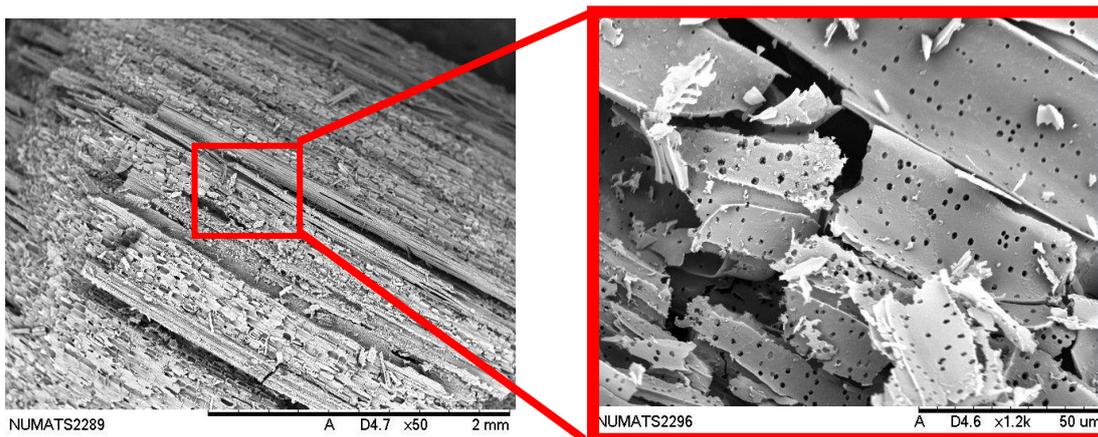


Figura 5.13 – Pontoações presentes devido ao desgaste promovido pelo fogo

Os resultados de condutividade térmica obtidos neste trabalho estão expostos na tabela 5.3. Estruturas que possuem alta condutividade térmica, podem conduzir de forma mais eficaz a temperatura, em contrapartida aqueles que possuem baixa condutividade podem ser usados como isolantes térmicos. Assim, a parte externa do bambu conduz melhor a temperatura.

Tabela 5.3 – Síntese dos resultados de condutividade térmica do bambu

	Densidade (g/cm ³)	Condutividade térmica (W/mK)	Difusividade (m ² /s)	Capacidade calorífica (J/kg*K)
Parte externa	0,76	0,28	1,91*10 ⁷	1519,63
Parte interna	0,76	0,22	1,79*10 ⁷	1747,32

5.6 CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos neste capítulo são de fundamental importância para um conhecimento mais aprofundado sobre a influência dos principais parâmetros de combustão em relação ao modo de orientação de fibras do bambu e de como a parede do colmo protege o material sobre a propagação de calor. Além das observações apontadas no decorrer do capítulo, vale ressaltar que o modo de combustão da parte interna e externa do bambu se comportam de formas diferentes. No primeiro há uma segregação dos corpos de prova, enquanto no segundo há uma divisão na parte mais externa (mais densa em volume de fibras), da mais interna (menos povoada). Tendo em vista que todos os CP's apresentaram ignição, para seu uso na construção civil se faz necessário o uso de um retardantes de chamas para não apresentar ignição em temperaturas acima de 500 °C.

CONCLUSÕES FINAIS

Os resultados do presente estudo permitiram concluir que:

1) Na compressão uniaxial, todos os corpos de prova tiveram seu modo de ruptura por tração paralela às fibras e na flexão em três pontos por cisalhamento. As presenças dos nós causam maior dispersão dos resultados. As amostras que apresentam mais de um nó, são as com maiores variâncias em seus resultados devido à descontinuidade das fibras;

2) A utilização de CP's com ausência de nós, é uma alternativa com menos variabilidade. Entretanto, como para a utilização de bambu com fins estruturais os colmos possuem vários nós, os ensaios de corpos de prova que possuam nós, devem ser considerados, já que representam com mais fidelidade o elemento estrutural utilizado e a saturação funciona como um plastificante, fazendo com que o módulo elástico diminua de forma acentuada e a tensão de ruptura seja menor;

3) O comportamento mecânico do bambu varia com o aumento da temperatura. Até 100 °C, a resistência e a rigidez aumentam devido à perda de água. Em temperaturas maiores que 150 °C, a resistência e a rigidez são reduzidas. Os nós funcionam como pontos de concentração de tensões nas peças, fazendo com que ocorra a maior parte das rupturas (em bloco) neste local. O regime de aquecimento atua diferentemente e depende da magnitude da taxa, quanto mais lenta menor a rigidez e resistência obtidas. Principalmente para temperaturas maiores que 150 °C;

4) Sobre os ensaios realizados no cone calorímetro, os modos de combustão da parte interna e externa do bambu se comportam de formas diferentes. No primeiro há uma segregação dos corpos de prova, enquanto no segundo há uma divisão na parte mais externa (mais densa em volume de fibras), da mais interna (menos povoada).

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, algumas proposições para pesquisas futuras podem ser seguidas.

- 1) Estudar a influência da umidade no ensaio de compressão uniaxial, realizando testes com diferentes teores de umidade para correlacionar a presença de água com a resistência;
- 2) Modificar as distâncias de aplicação de carga no ensaio de flexão estática em três e quatro pontos;
- 3) Verificar a influência da temperatura de em colmos de bambu a taxa de aquecimento de 0,5 °C/min.
- 4) Analisar a influência de retardantes de chamas em bambu utilizando o ensaio do cone calorímetro.

REFERÊNCIAS

A DRUMOND, Patrícia Maria (Org.). *Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia*. Rio de Janeiro: Ich, 2017. 653 p.

ABREU, H. dos S. *et al.*, Métodos de análise em química da madeira. *Floresta e Ambiente* (2006): 01-20.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-3039. *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. [S.l.]. 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1994, *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*: ASTM C 469-94.

ANDREOLA, V. M.; DA GLORIA, M. Y. R. ; SANTOS, D. O. J. ; TOLEDO FILHO, R. D. . Partial replacement of cement by combination of fly ash and metakaolin in bamboo bio-concretes. In: 3rd International Conference on Bio-Based Building Materials, 2019, Belfast. *International Conference on Bio-Based Building Materials*, 2019. v. 3.

ANDREOLA, V.M; Caracterização física, mecânica e ambiental de bio-concretos de bambu. *Dissertação de Mestrado*. UFRJ-COPPE, Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14432: *Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2001.

ASTM International. ASTM D6815-09: standard specification for evaluation of duration of load and creep effect of wood and wood-based products. *West Conshohocken, PA*; 2009.

AZADEH, A.; GHAVAMI, K. The influence of heat on shrinkage and water absorption of *Dendrocalamus giganteus* bamboo as a functionally graded material. *Construction and Building Materials*, v. 186, p. 145-154, 2018.

B MANHÃES, Adriana Pellegrini. Caracterização da cadeia produtiva do bambu no Brasil: abordagem preliminar. 2008.

BERALDO, Antonio L.; PEREIRA, Marco Antonio. Bambu de corpo e alma. *Bauru: Canal*, v. 6, 2008.

BILESKY, Paulo Rossi. Caracterização química, física e anatômica do bambu *Guadua tagoara* para polpação Kraft. 2014.

CARDOSO, C. Acre possui maior floresta nativa com bambu do mundo. Disponível em: <<http://www.agencia.ac.gov.br/acre-possuimaior-floresta-nativa-com-bambu-do-mundo/>>. Acesso em: 2 fev 2019.

CHEN, Lingzhu *et al.* Experimental study of performance of engineered bamboo beams exposed to three-sided standard fire. *Fire Safety Journal*, 2019.

CHUNG, K. F.; YU, W. K. Mechanical properties of structural bamboo for bamboo scaffoldings. *Engineering structures*, v. 24, n. 4, p. 429-442, 2002.

COSTA, V. *et al.* Potential of bamboo organosolv pulp as a reinforcing element in fiber-cement materials. *Construction and Building Materials*, Edinburgh, v. 72, p. 65-71, sep. 2014.

D CONBAM. Advanced Bamboo Application. 6 fotografias, color. Disponível em: . Acesso em 19 out. 2018

DELGADO, Eduardo Salas. Actualidad y futuro de la arquitectura de bambú en Colombia. 2008. Tese de Doutorado. *Universitat Politècnica de Catalunya*.

DELICHATSIOS, Michael; PAROZ, Bradley; BHARGAVA, Atul. Flammability properties for charring materials. *Fire Safety Journal*, v. 38, n. 3, p. 219-228, 2003.

ESTEVEES, Bruno; PEREIRA, Helena. Wood modification by heat treatment: A review. *BioResources*, v. 4, n. 1, p. 370-404, 2008.

GHAVAMI, K.; RODRIGUES, C. de S.; PACIORNIK, S. *Bamboo: functionally graded composite material*. 2003.

GHAVAMI, Khosrow; MARINHO, Albanise B. Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 9, n. 1, p. 107-114, 2004.

GRECO, T. M.; CROMBERG, M. *Bambu: cultivo e manejo*. Florianópolis: *Editores Insular*, 2011.

GREXA, Ondrej; LÜBKE, Henrich. Flammability parameters of wood tested on a cone calorimeter. *Polymer Degradation and Stability*, v. 74, n. 3, p. 427-432, 2001.

HABITAT, U. N. *Cities and climate change: Global report on human settlements 2011*. London: Earthscan, 2011.

HORROCKS, A. R.; PRICE, D. (Ed.). *Fire retardant materials*. Cambridge: England Woodhead Publishing Limited, 2010.

HUANG, Zujian; SUN, Yimin; MUSSO, Florian. Hygrothermal performance of natural bamboo fiber and bamboo charcoal as local construction infills in building envelope. *Construction and Building Materials*, v. 177, p. 342-357, 2018.

International Organization for Standardization (ISO). ISO 22157-1:2004(E). *Bamboo – determination of physical and mechanical properties – Part I: requirements*. Geneva; 2004.

JANSSEN, Jules JA. Designing and building with bamboo. Netherlands: International Network for Bamboo and Rattan, 2000.

KLEINE, H. J. Uma fibra excepcional. BambuSC – Associação Catarinense do Bambu. Publicado na revista *O Papel*. 2010.

KRAUSE, João Queiroz. Micro e macromecânica de lâminas de bambu *Dendrocalamus giganteus* para aplicações estruturais. 2015. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

LEVAN, S.; WINANDY, J. Thermal degradation. In: SCHIEWIND, A. P. (Ed.). Concise encyclopedia of wood and wood-based materials. Nova Iorque: Pergamon, 1989. p. 271

LIESE, W. The anatomy Bamboo culms. ESTADOS UNIDOS DA AMERICA: BROCHURA, 1998.

LIESE, Walter. The anatomy of bamboo culms. Beijing: INBAR, 1985.

LIESE,W; KOHL,M. Bamboo: The Plant and its Uses. *Springer International Publishing*,356p.,2015.

LIN, J.Z. & ZHANG, Z.Q. Tarsonemidae of the World (Acari:Prostigmata): Key to Genera, Geographical Distribution, Systematic Catalogue and Annotated Bibliography. *Systematic and Applied Acarology Society*, London. 2002.

LONDOÑO, X. P. Distribucion, morfologia, taxonomia, anatomia, silvicultura y usos de los bambues del nuevo mundo. *Universidad Nacional de Colombia*, Bogotá, 2002.

LOPEZ, Oscar Hidalgo. Bamboo: The gift of the gods. O. Hidalgo-Lopez, 2003.

MARTINS, Danilo Gomes *et al.* Influência Do Tamanho Do Corpo De Prova Nos Resultados De Ensaio De Módulo De Deformação E Resistência À Compressão E Suas Correlações Para Concretos Produzidos Em Goiânia-Go. 2008.

NETO, L. Ghelmandi; GIANNETTI, B. F. Contabilidade dos Fluxos de CO₂ em uma Plantação Comercial de Bambu Visando a Produção Papeleira. Key Elements for a Sustainable World: *Energy, Water and Climate Change*, São Paulo, 2009.

NOGUEIRA, Cláudia de Lima. Painel de bambu laminado colado estrutural. 2008. *Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo*.

NOGUEIRA, Cláudia de Lima. Painel de bambu laminado colado estrutural. 2008. *Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo*.

PEREIRA, M. A. R.; BERALDO, A. L. *Bambu de corpo e alma*. 1ªed. Bauru-SP: canal editora, p. 38-51. 2008.

RIAÑO, N. M. *et al.* Plant growth and biomass distribution on *Guadua angustifolia* Kunth in relation to ageing in the Valle del Cauca–Colombia. *Bamboo science and culture*, v. 16, n. 1, p. 43-51, 2002.

RIBEIRO, Luiz Henrique Marra da Silva *et al.* Influence of section and moisture content on the tensile strength parallel to fibers of bamboo culms woody material. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 49, 2019.

RIBEIRO, Ruy A. Sá; RIBEIRO, Marilene G. Sá; MIRANDA, Ires PA. Bending strength and nondestructive evaluation of structural bamboo. *Construction and building materials*, v. 146, p. 38-42, 2017.

ROWELL, Roger M.; YOUNGS, Robert L. Dimensional Stabilization of Wood in Use. *FOREST PRODUCTS LAB MADISON WI*, 1981.

SANTI, T. Bambu para toda obra. *O Papel*, v. 76, p. 23-34, 2015.

SANTOS, Thiago Oliveira dos *et al.* RECYCLABLE STEEL FOR USE IN RADIAL KNIVES IN THE MANUFACTURE FOR LONGITUDINAL CUT BAMBOO/UTILIZAÇÃO DE AÇOS RECICLÁVEIS NA FABRICAÇÃO DE FACAS

RADIAIS PARA CORTE LONGITUDINAL DE BAMBU. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 15, n. 1, p. 15, 2018.

SHANGGUAN, Weiwei *et al.* Effects of heat treatment on the properties of bamboo scrimber. *Journal of Wood Science*, v. 62, n. 5, p. 383, 2016.

SHIH, Yeng-Fong. Mechanical and thermal properties of waste water bamboo husk fiber reinforced epoxy composites. *Materials Science and Engineering: A*, v. 445, p. 289-295, 2007.

SPEARPOINT, Michael J.; QUINTIERE, James G. Predicting the piloted ignition of wood in the cone calorimeter using an integral model—effect of species, grain orientation and heat flux. *Fire safety journal*, v. 36, n. 4, p. 391-415, 2001.

TSAI, Wen-Hsien *et al.* Incorporating life cycle assessments into building project decision-making: An energy consumption and CO2 emission perspective. *Energy*, v. 36, n. 5, p. 3022-3029, 2011.

UN COMTRADE, U. N. United Nations Commodity Trade Statistics Database. 2013. Available online on: <http://comtrade.un.org/db> (accessed 2 April 2019), 2014.

VAN DER LUGT, P.; VAN DEN DOBBELSTEEN, A. A. J. F.; JANSSEN, J. J. A. An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. *Construction and Building Materials*, v. 20, n. 9, p. 648-656, 2006.

VÉLEZ, Simón; VON VEGESACK, Alexander; KRIES, Mateo. Grow your own house: Simón Vélez und die Bambusarchitektur. *Vitra Design Stiftung*, 2000.

VILLEGAS, L.; MORÁN, R.; GARCÍA, J. J. Combined culm-slat Guadua bamboo trusses. *Engineering Structures*, v. 184, p. 495-504, 2019.

VOGTLÄNDER, Joost G.; VAN DER VELDEN, Natascha M.; VAN DER LUGT, Pablo. Carbon sequestration in LCA, a proposal for a new approach based on the global

carbon cycle; cases on wood and on bamboo. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 19, n. 1, p. 13-23, 2014.

WAKCHAURE, M. R.; KUTE, S. Y. Effect of moisture content on physical and mechanical properties of bamboo. 2012.

WU, JunQi *et al.* Status and trend of international trade of bamboo and rattan commodities. *World Forestry Research*, v. 22, n. 3, p. 69-71, 2009.

XIAO, Yan; YANG, R. Z.; SHAN, Bo. Production, environmental impact and mechanical properties of glubam. *Construction and Building Materials*, v. 44, p. 765-773, 2013

Xiaobo Li B.S. Beijing Forestry University, 1999 M.S. *Chinese Academy of Forestry*, 2004.

XING, Yangang; HEWITT, Neil; GRIFFITHS, Philip. Zero carbon buildings refurbishment—A Hierarchical pathway. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 15, n. 6, p. 3229-3236, 2011.

XU, Qingfeng *et al.* Mechanical properties of structural bamboo following immersion in water. *Engineering Structures*, v. 81, p. 230-239, 2014.

YAN, Yingjie *et al.* Detecting the competition between Moso bamboos and broad-leaved trees in mixed forests using a terrestrial laser scanner. *Forests*, v. 9, n. 9, p. 520, 2018.

YU, W. K.; CHUNG, K. F.; CHAN, S. L. Axial buckling of bamboo columns in bamboo scaffolds. *Engineering Structures*, v. 27, n. 1, p. 61-73, 2005

ZHANG, Ya Mei; YU, Yang Lun; YU, Wen Ji. Effect of thermal treatment on the physical and mechanical properties of *Phyllostachys pubescens* bamboo. *European*

APÊNDICE A



Figura 2 - Plano de ruptura de ripas submetidas à temperatura de 100 °C durante 15 minutos



Figura 3 - Plano de ruptura de ripas submetidas à temperatura de 100 °C durante 30 minutos

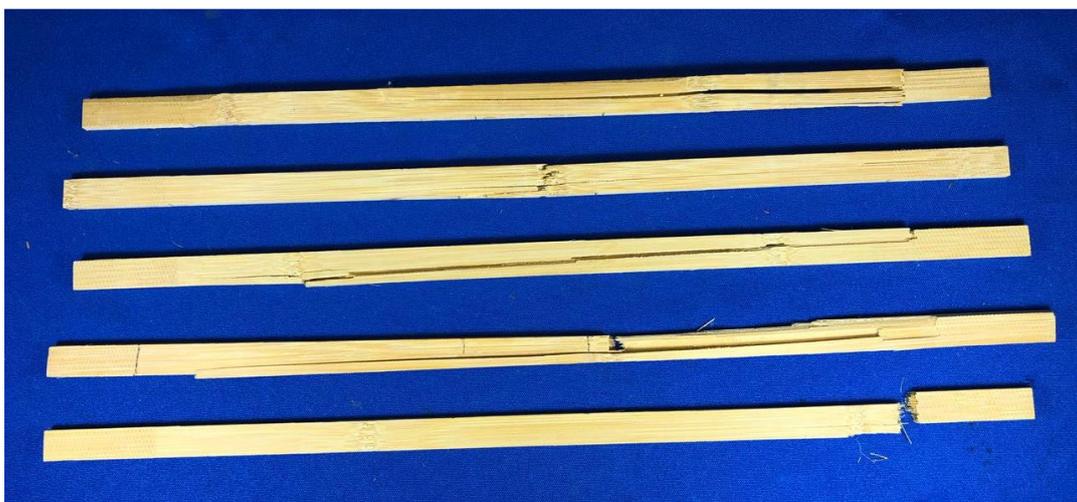


Figura 4- Plano de ruptura de ripas submetidas à temperatura de 100 °C durante 60 minutos



Figura 5- Plano de ruptura de ripas submetidas à temperatura de 100 °C durante 120 minutos



Figura 6- Plano de ruptura de ripas submetidas à temperatura de 100 °C durante 240 minutos



Figura 7 - Plano de ruptura de ripas submetidas à temperatura de 150 °C durante 15 minutos



Figura 8 - Plano de ruptura de ripas submetidas à temperatura de 150 °C durante 30 minutos



Figura 9- Plano de ruptura de ripas submetidas à temperatura de 150 °C durante 60 minutos



Figura 10- Plano de ruptura de ripas submetidas à temperatura de 150 °C durante 120 minutos



Figura 11 - Plano de ruptura de ripas submetidas à temperatura de 150 °C durante 240 minutos



Figura 12- Plano de ruptura de ripas submetidas à temperatura de 200 °C durante 30 minutos



Figura 13- Plano de ruptura de ripas submetidas à temperatura de 200 °C durante 30 minutos



Figura 14 - Plano de ruptura de ripas submetidas à temperatura de 200 °C durante 60 minutos



Figura 15 - Plano de ruptura de ripas submetidas à temperatura de 200 °C durante 120 minutos



Figura 16 - Plano de ruptura de ripas submetidas à temperatura de 200 °C durante 240 minutos

APÊNDICE B

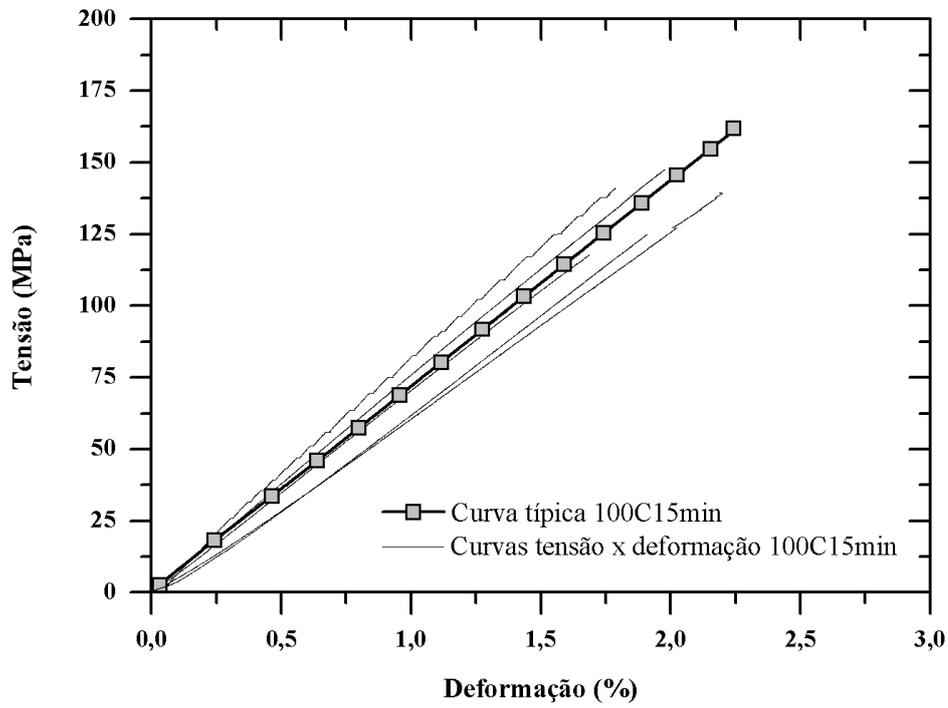


Figura 17- Curvas tensão *versus* deformação 100C15min

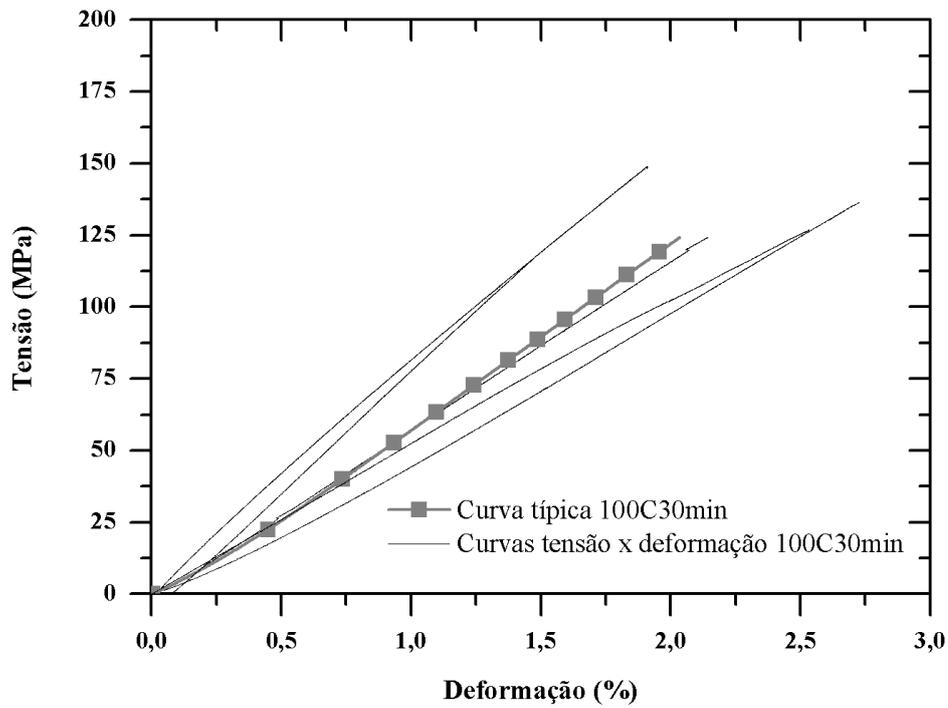


Figura 18- Curvas tensão *versus* deformação 100C30min

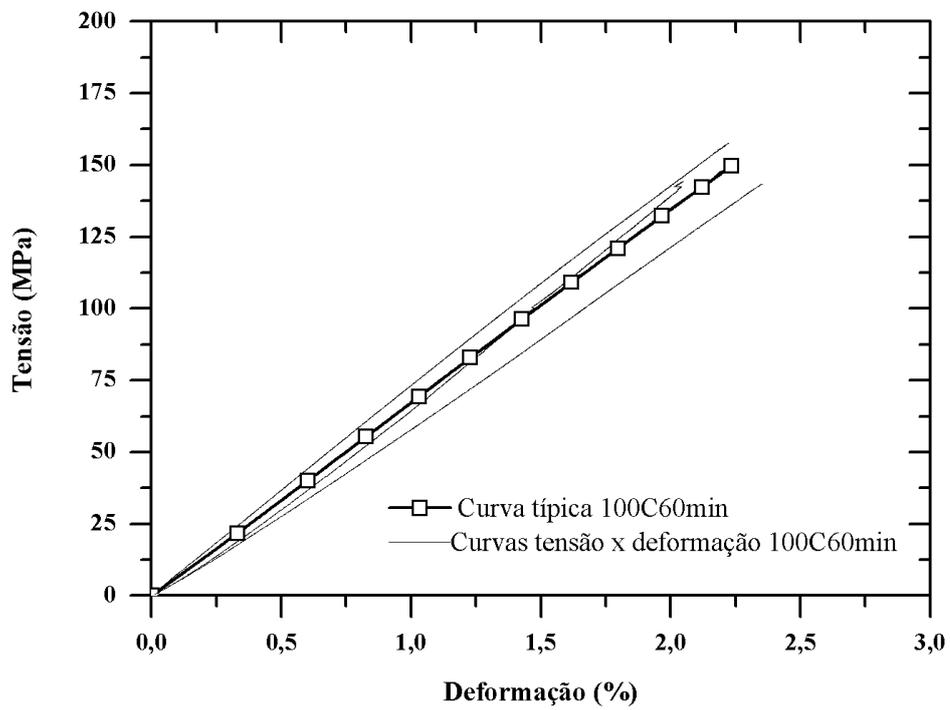


Figura 19- Curvas tensão *versus* deformação 100C60min

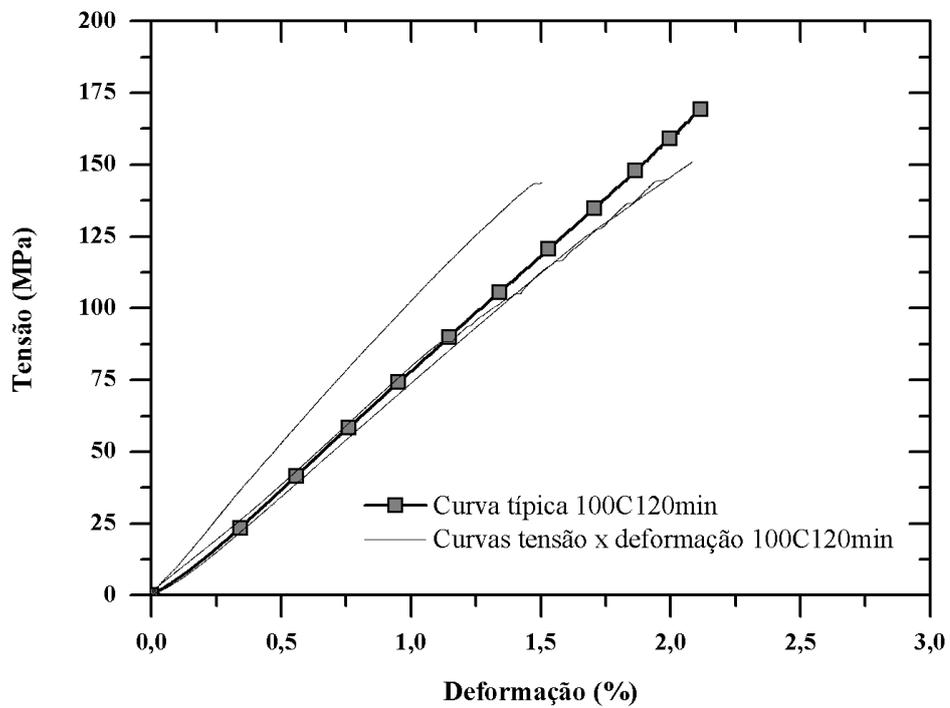


Figura 20-Curvas tensão *versus* deformação 100C120min

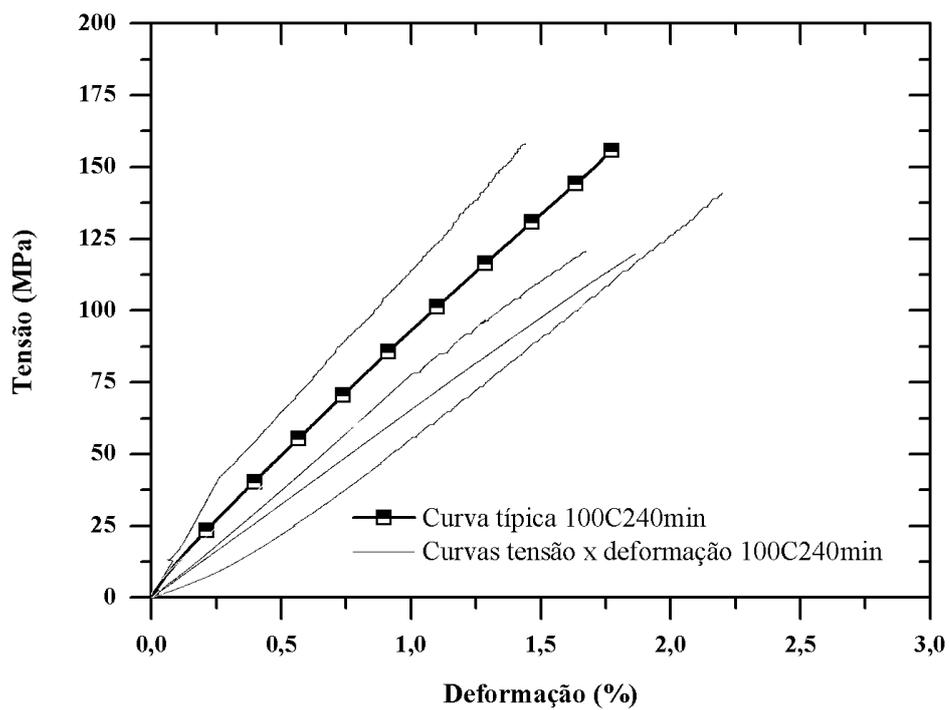


Figura 21-Curvas tensão *versus* deformação 100C240min

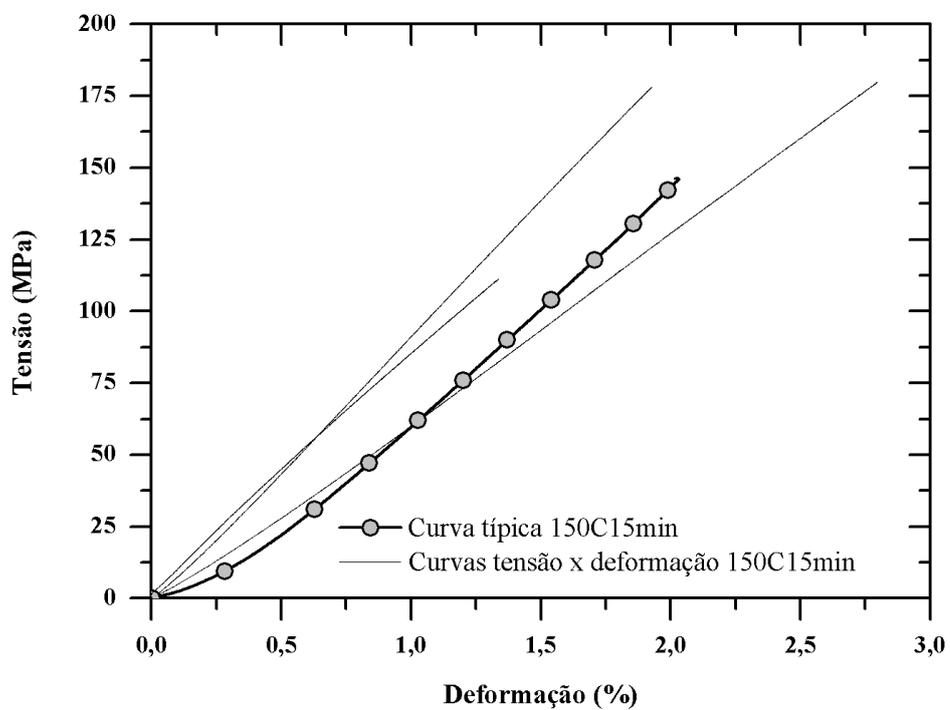


Figura 22- Curvas tensão *versus* deformação 150C15min

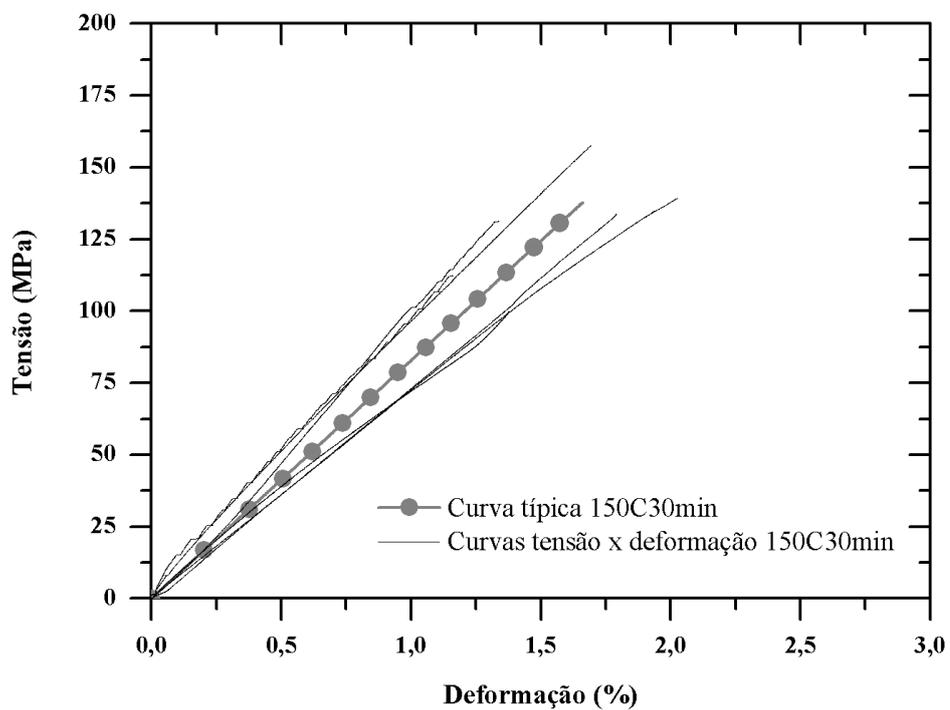


Figura 23-Curvas tensão *versus* deformação 150C30min

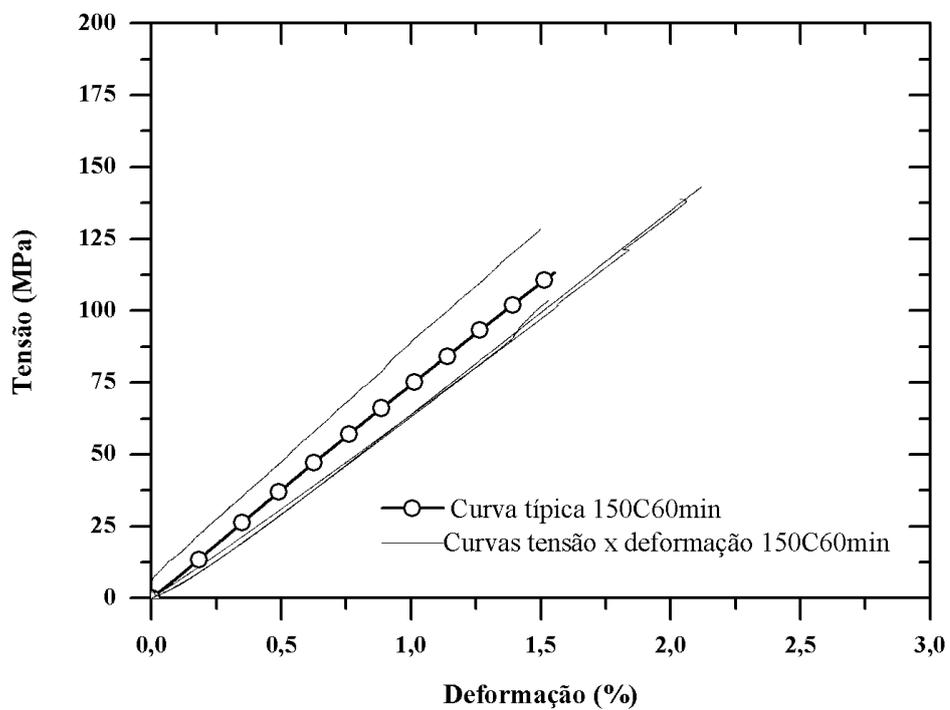


Figura 24-Curvas tensão *versus* deformação 150C60min

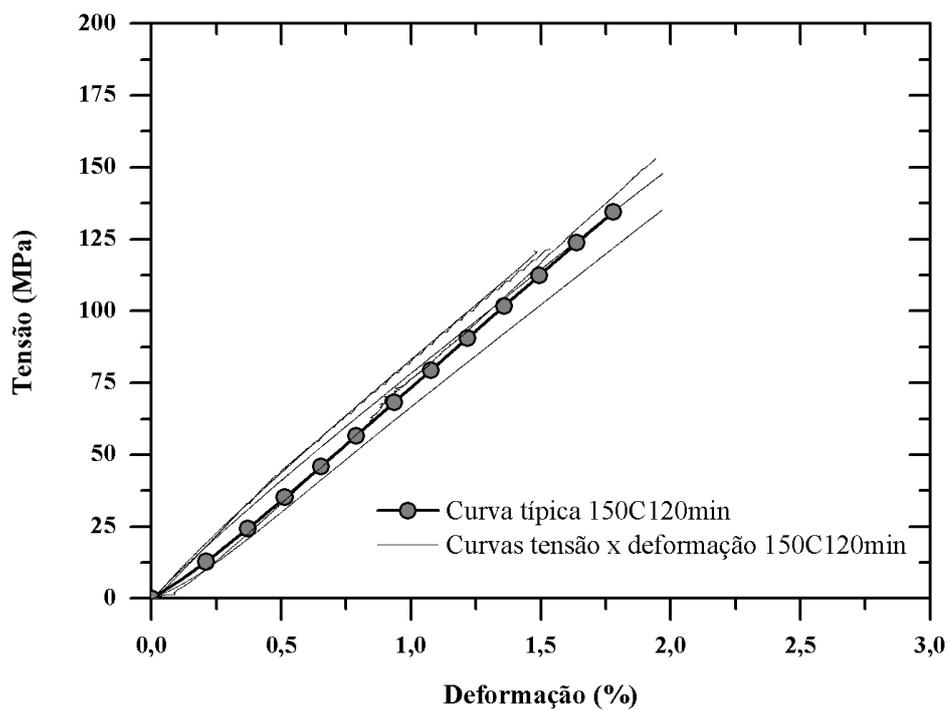


Figura 25-Curvas tensão *versus* deformação 150C120min

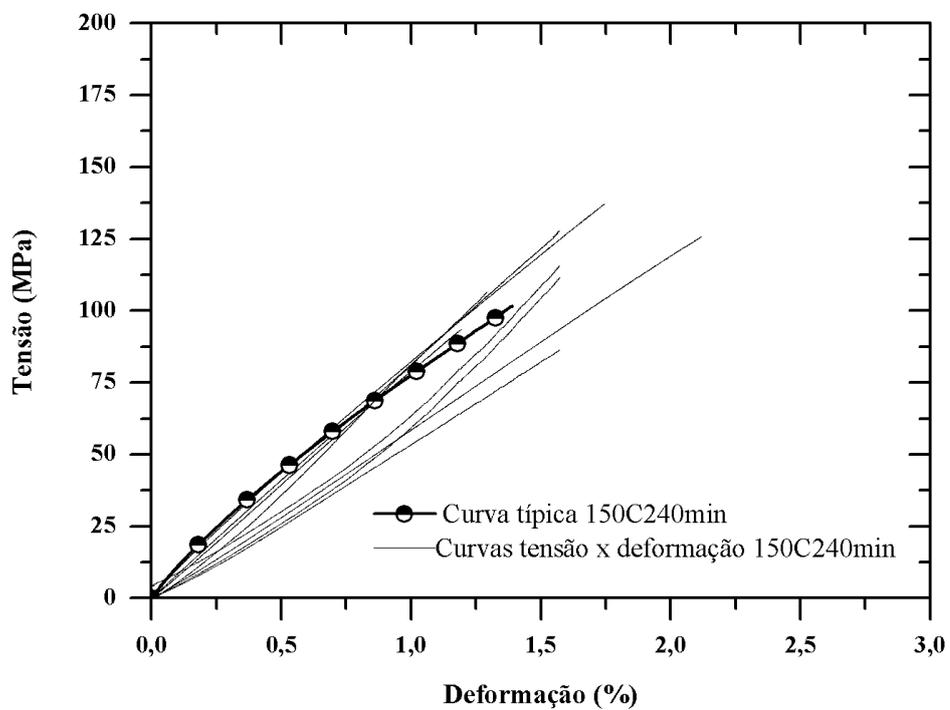


Figura 26- Curvas tensão *versus* deformação 150C240min

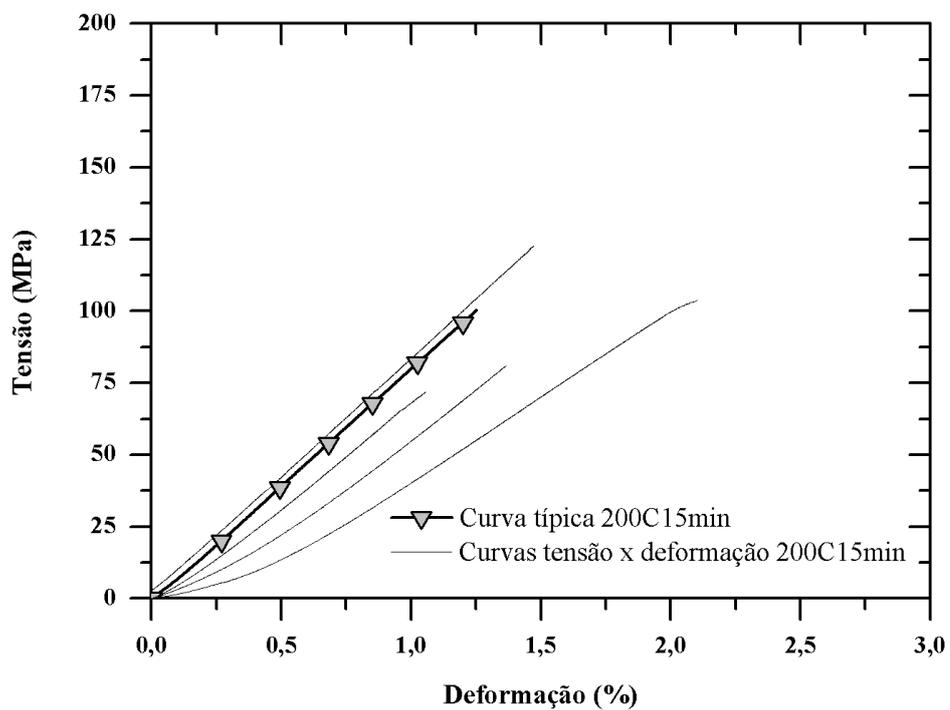


Figura 27-Curvas tensão *versus* deformação 200C15min

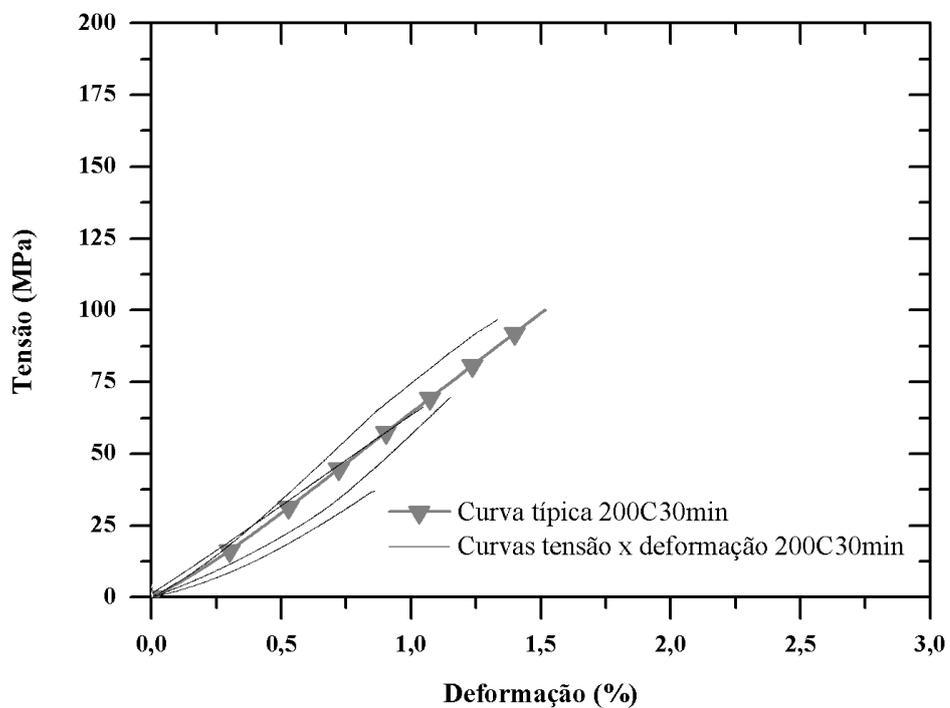


Figura 28-Curvas tensão *versus* deformação 200C30min

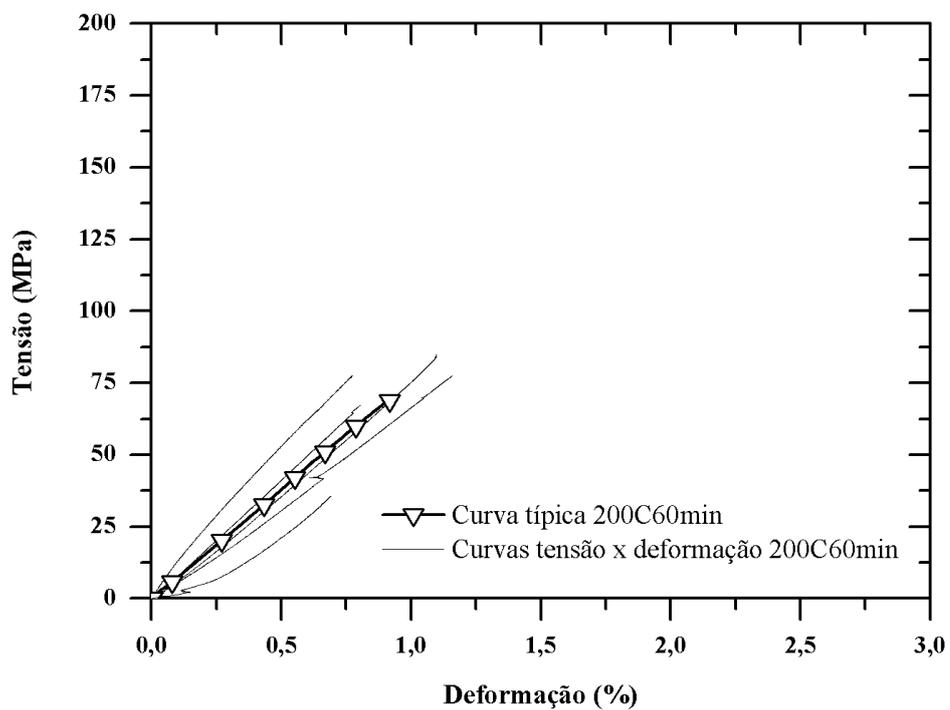


Figura 29-Curvas tensão *versus* deformação 200C60min

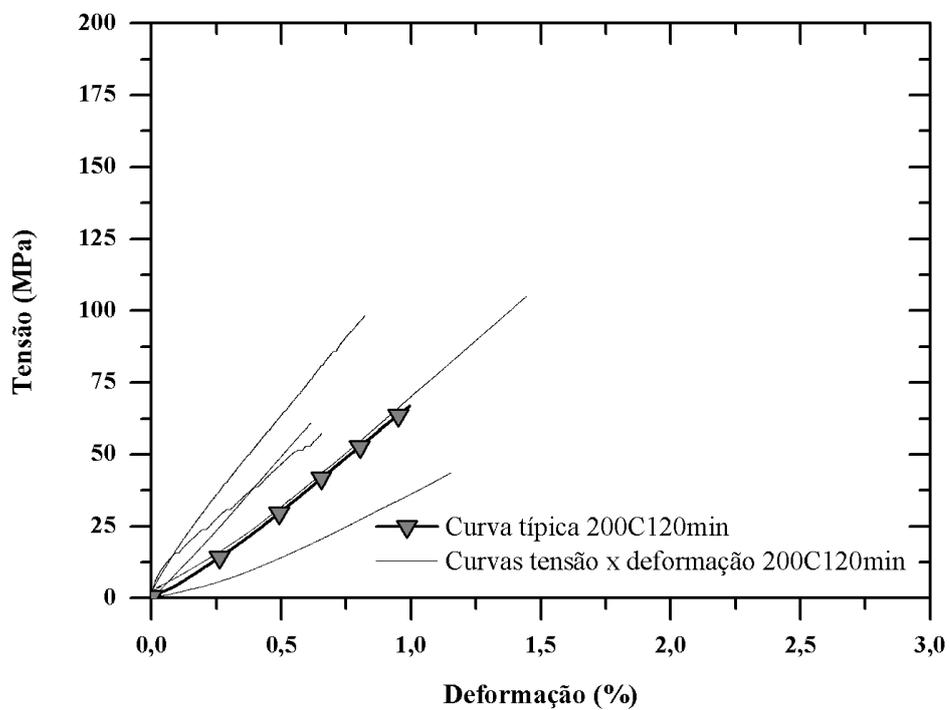


Figura 30-Curvas tensão *versus* deformação 200C120min

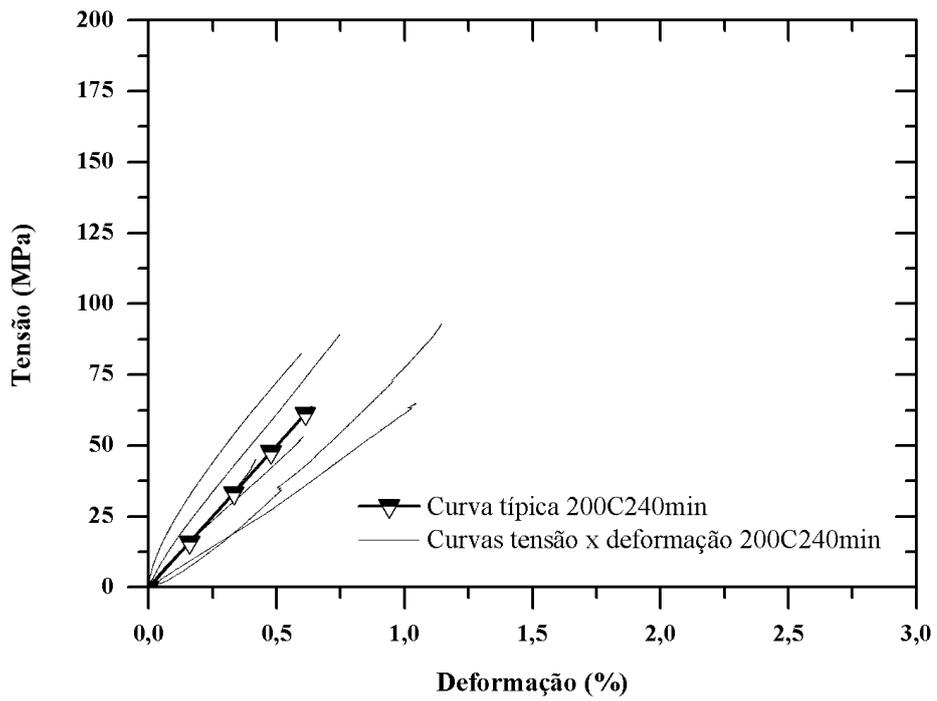


Figura 31- Curvas tensão *versus* deformação 200C240min

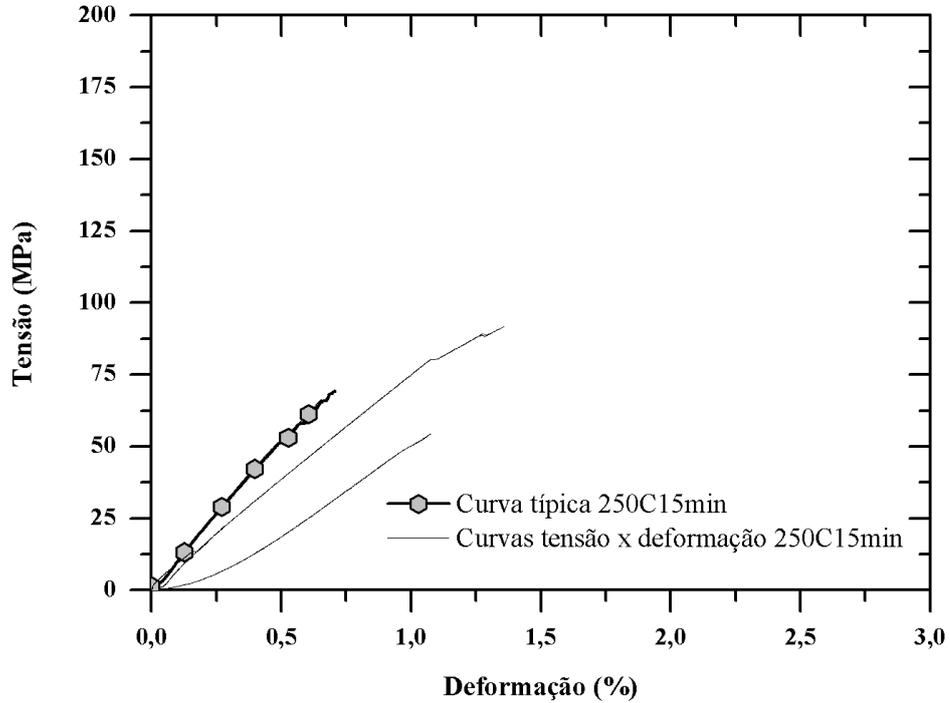


Figura 32- Curvas tensão *versus* deformação 250C15min

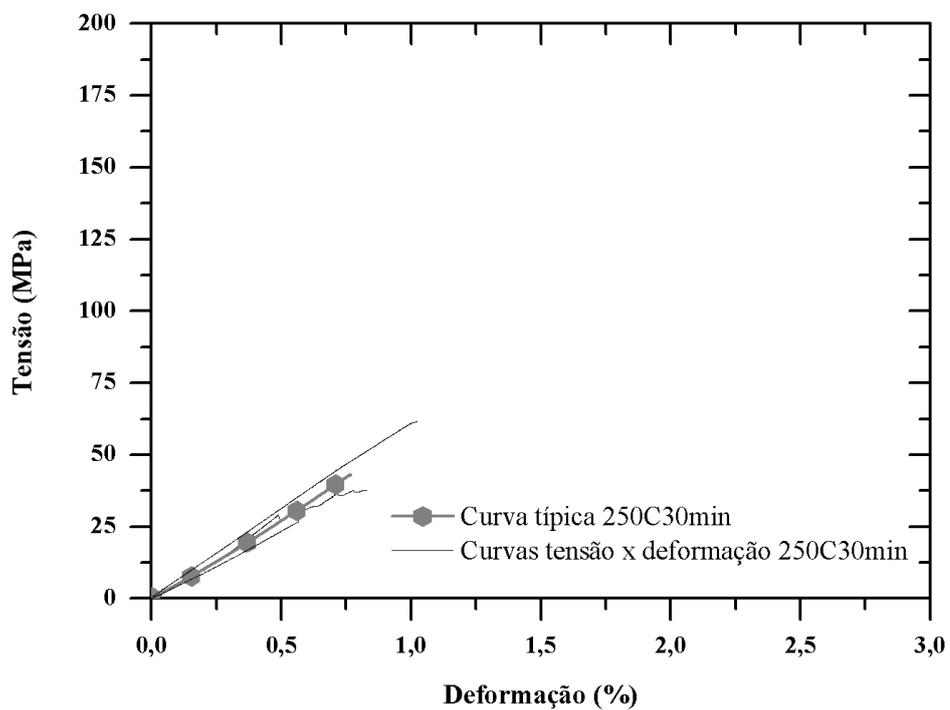


Figura 33- Curvas tensão *versus* deformação 250C30min

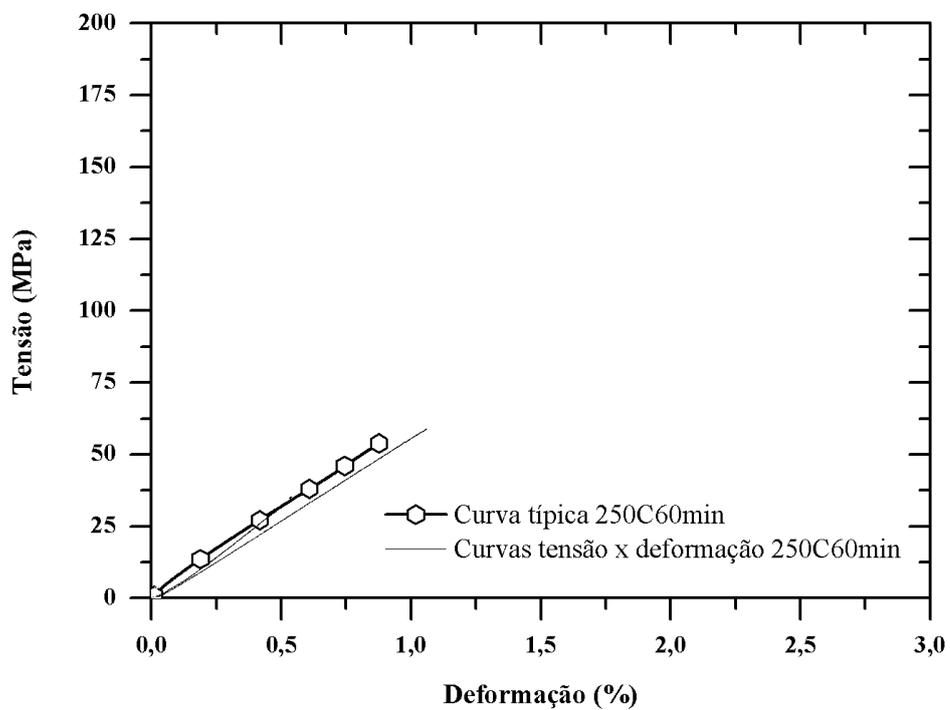


Figura 34- Curvas tensão *versus* deformação 250C60min

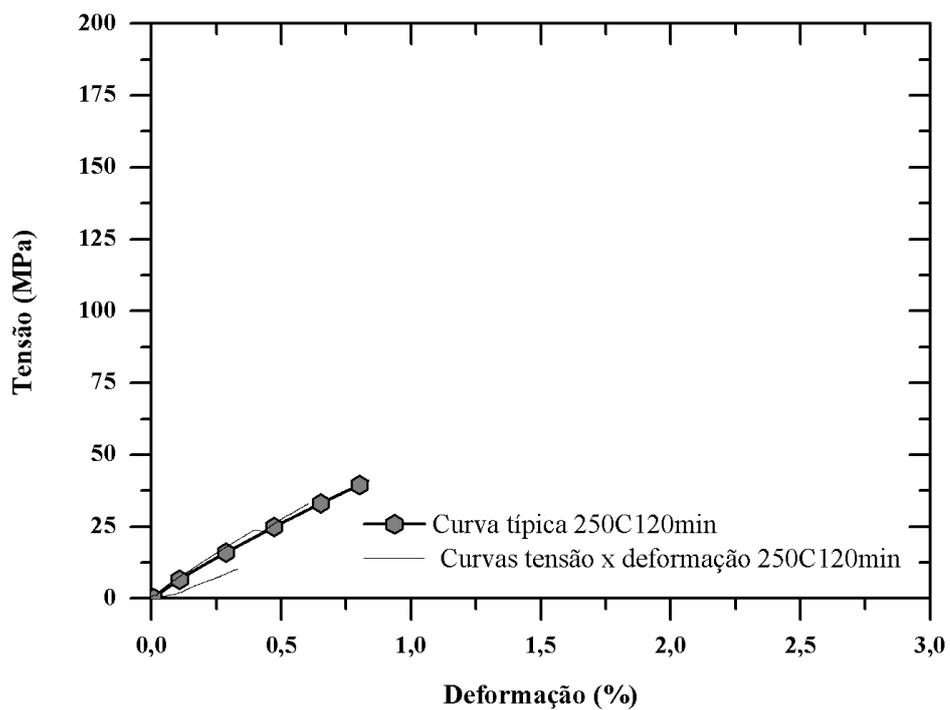


Figura 35-Curvas tensão *versus* deformação 250C120min

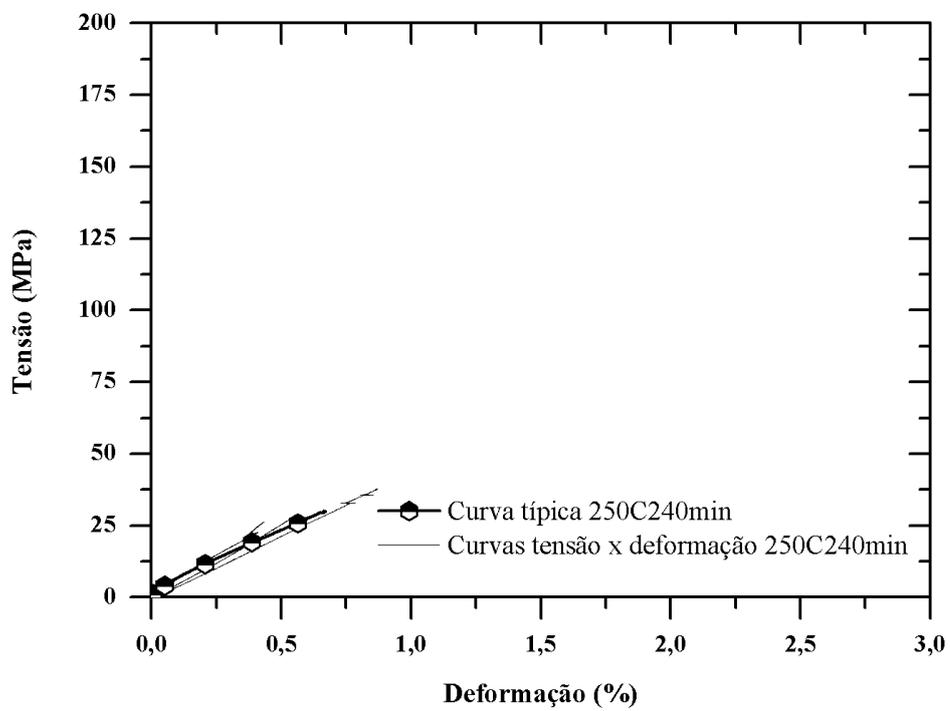


Figura 36- Curvas tensão *versus* deformação 250C240min

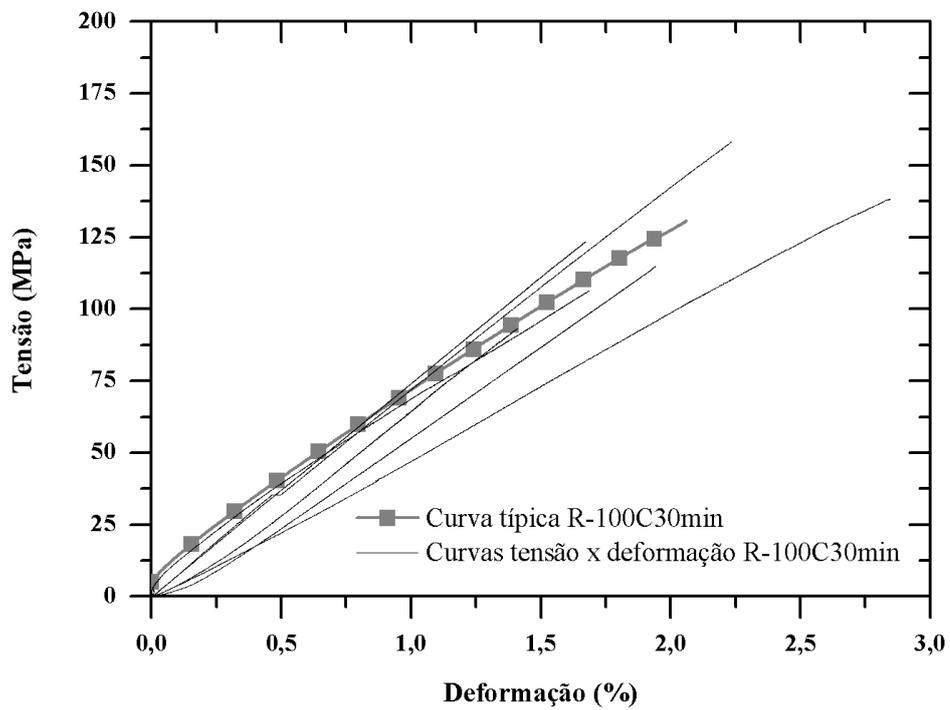


Figura 37- Curvas tensão *versus* deformação R-100C30min

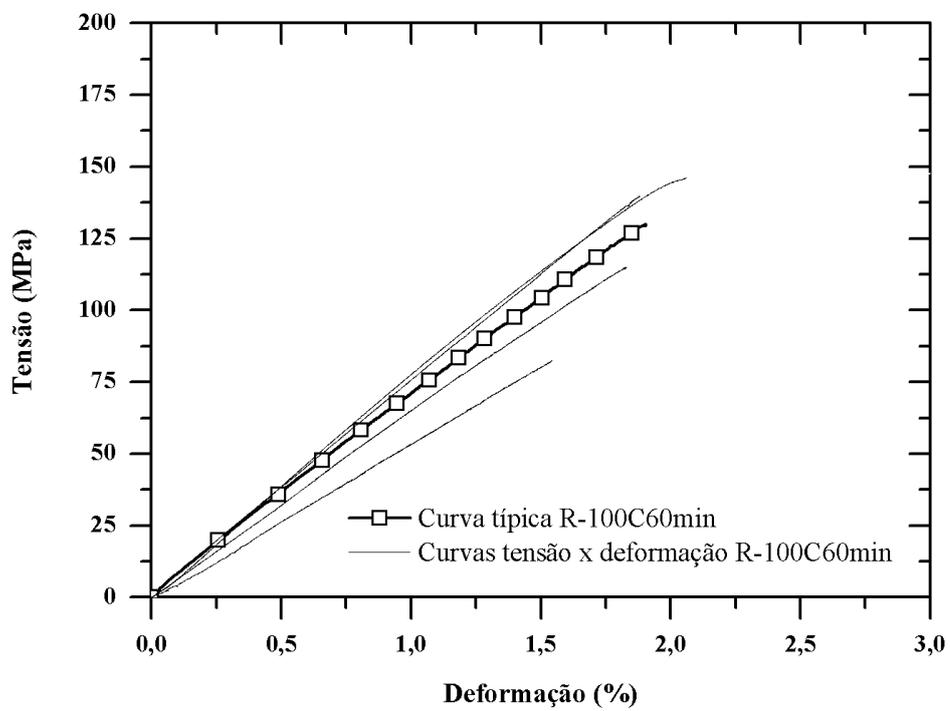


Figura 38- Curvas tensão *versus* deformação R-100C60min

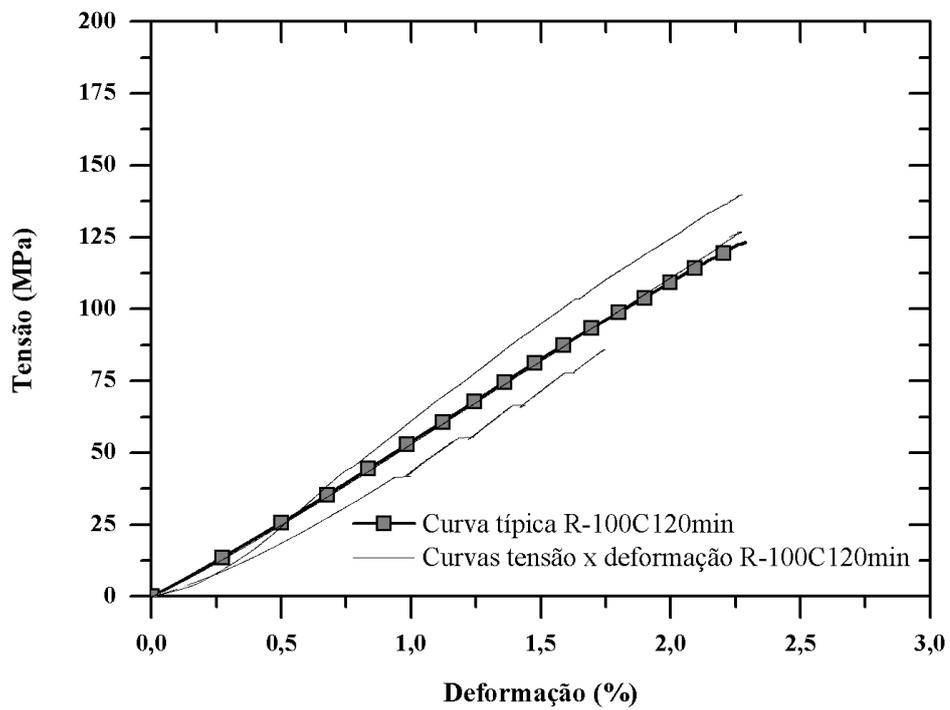


Figura 39-Curvas tensão *versus* deformação R-100C120min

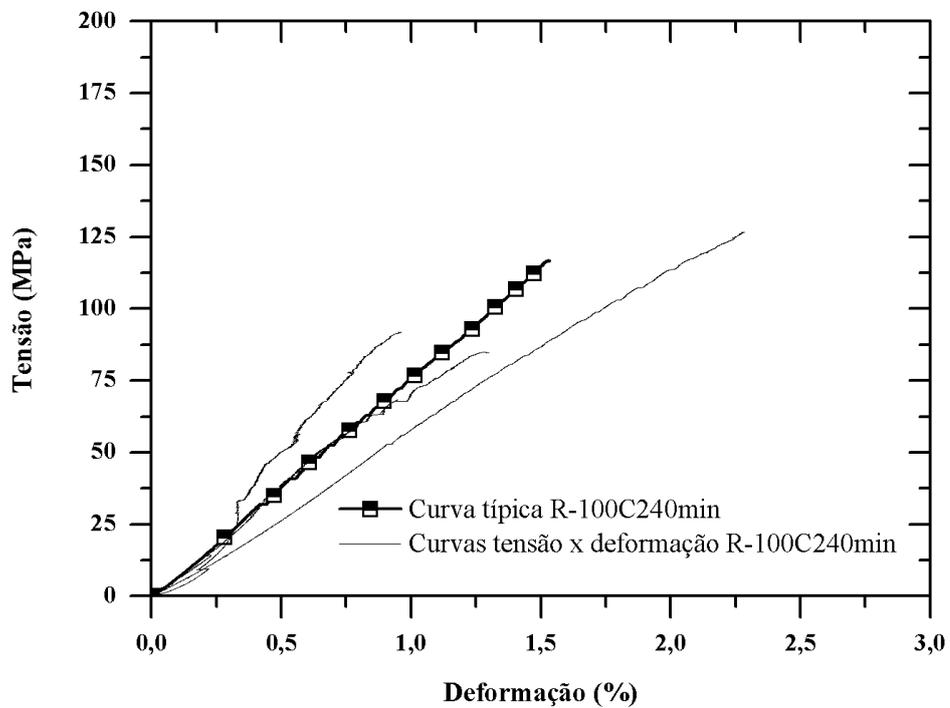


Figura 40-Curvas tensão *versus* deformação R-100C240min

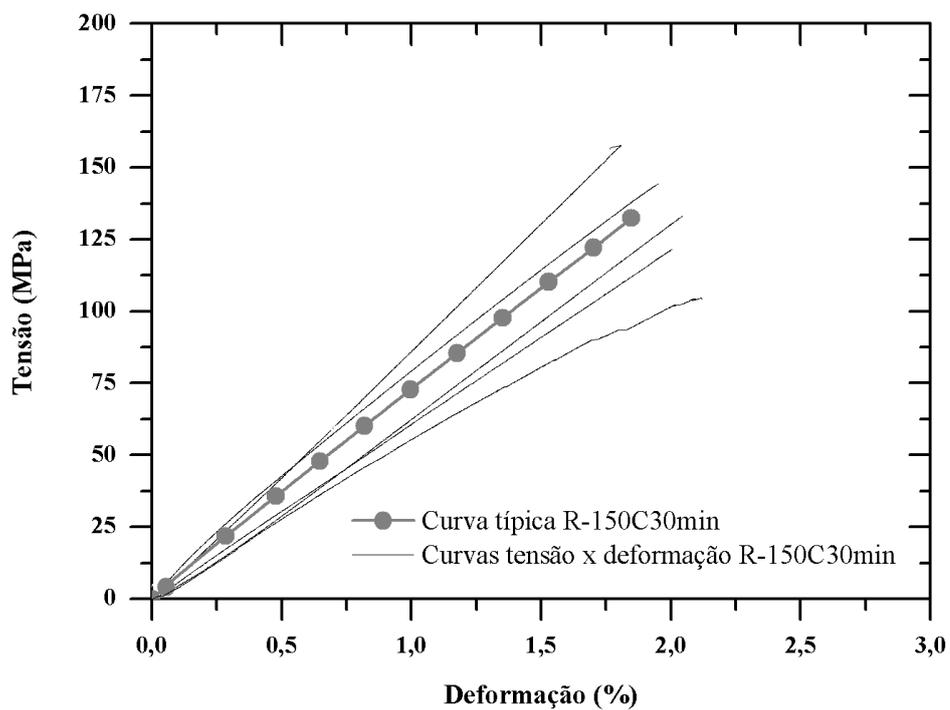


Figura 41-Curvas tensão *versus* deformação R-150C30min

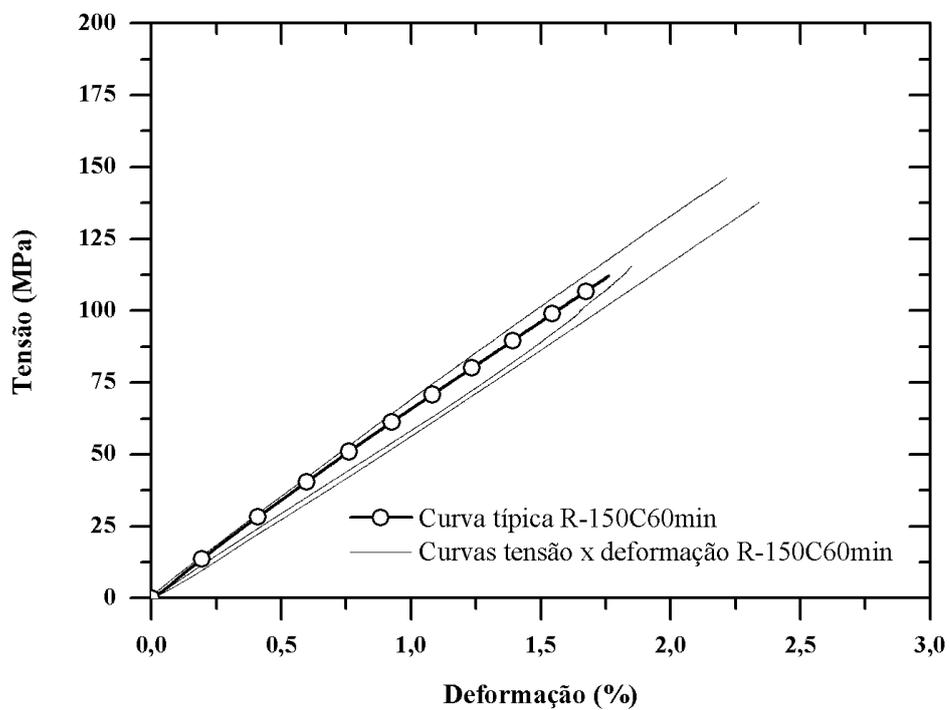


Figura 42-Curvas tensão *versus* deformação R-150C60min

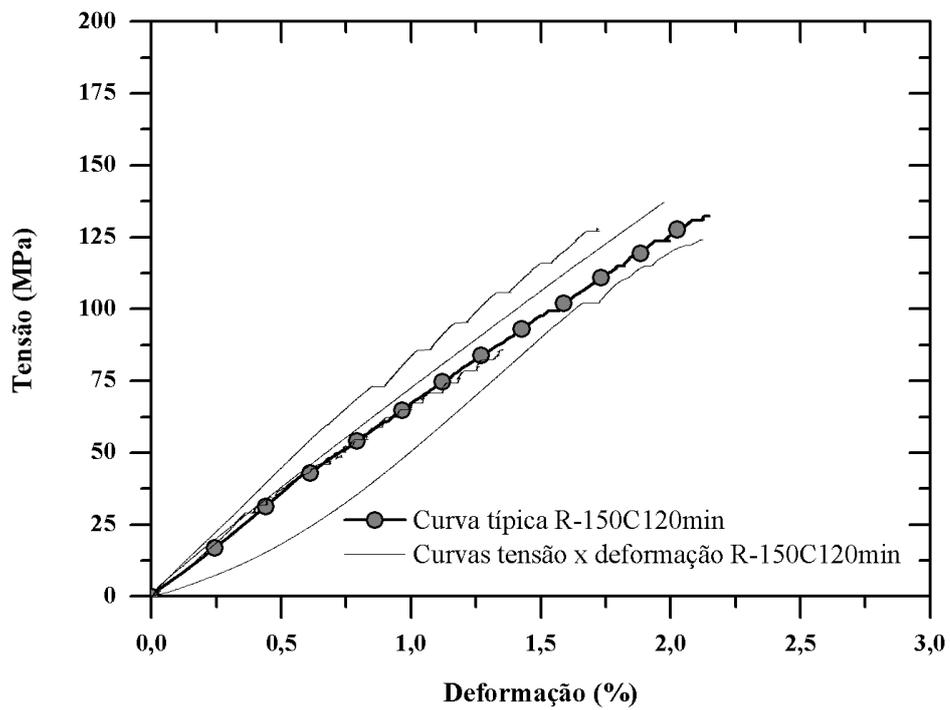


Figura 43-Curvas tensão *versus* deformação R-150C120min

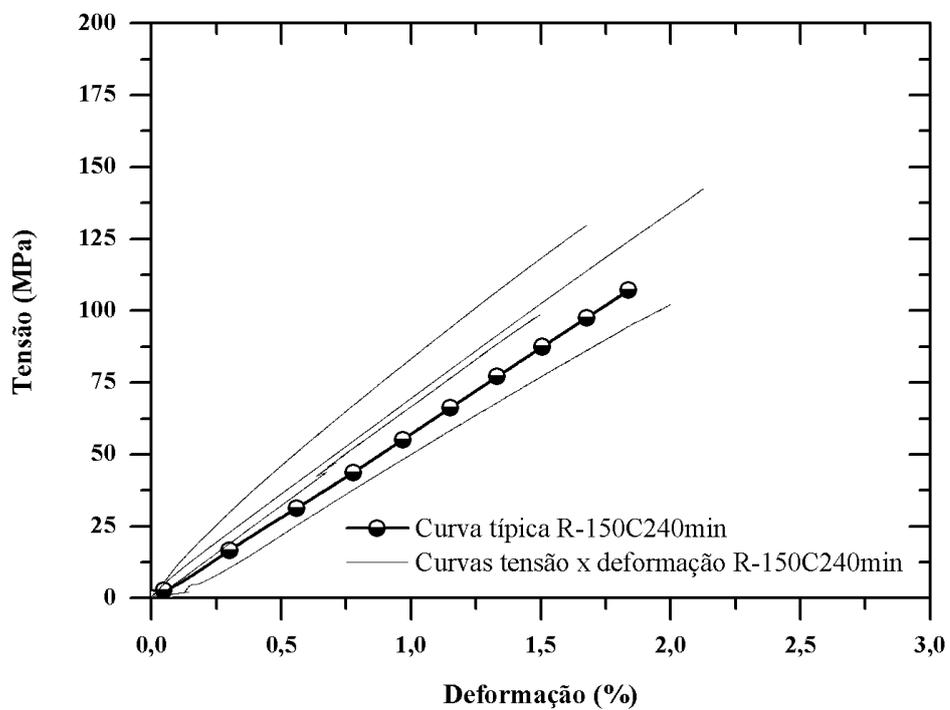


Figura 44-Curvas tensão *versus* deformação R-100C240min

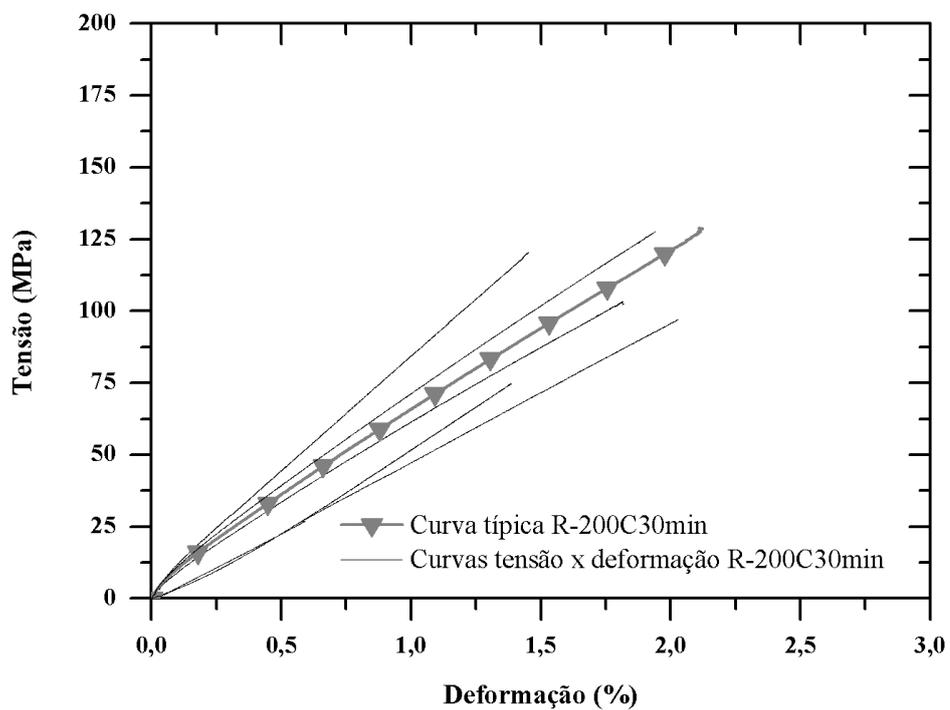


Figura 45-Curvas tensão *versus* deformação R-200C30min

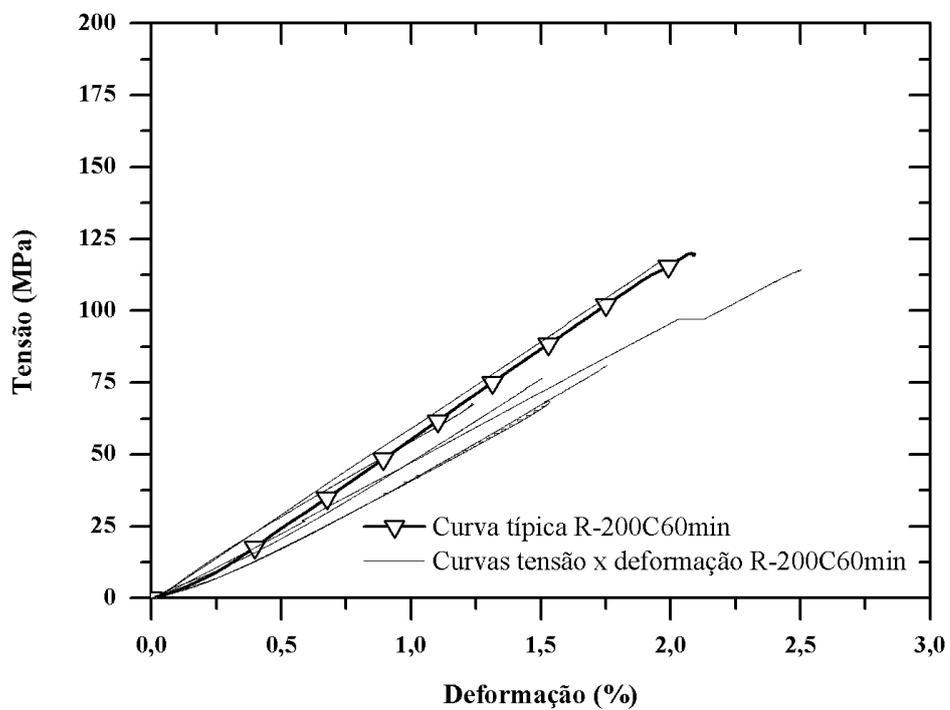


Figura 46-Curvas tensão *versus* deformação R-200C60min

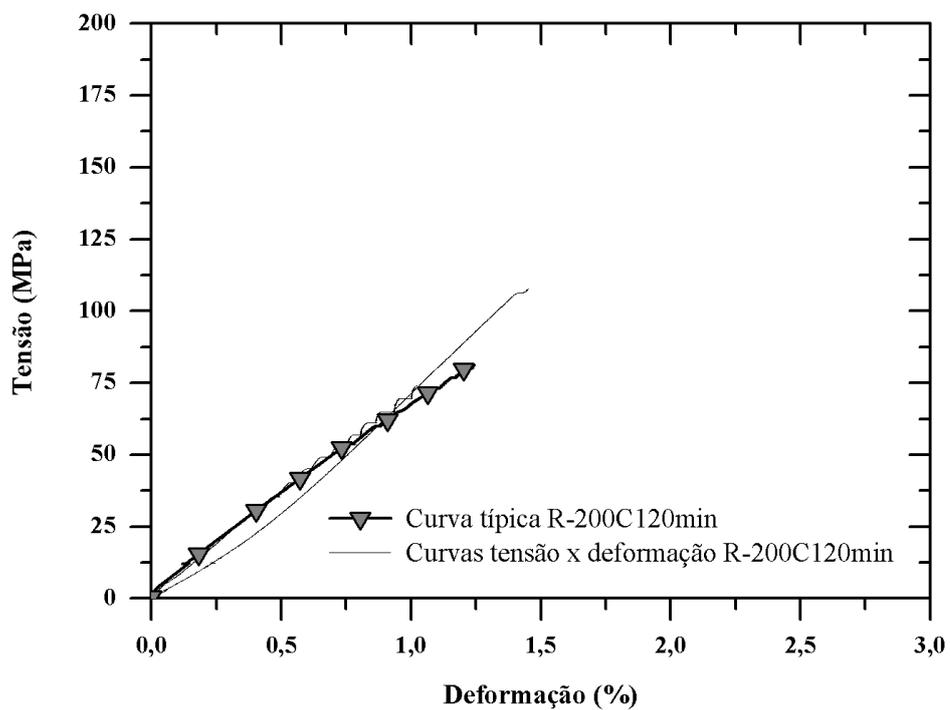


Figura 47-Curvas tensão *versus* deformação R-200C120min

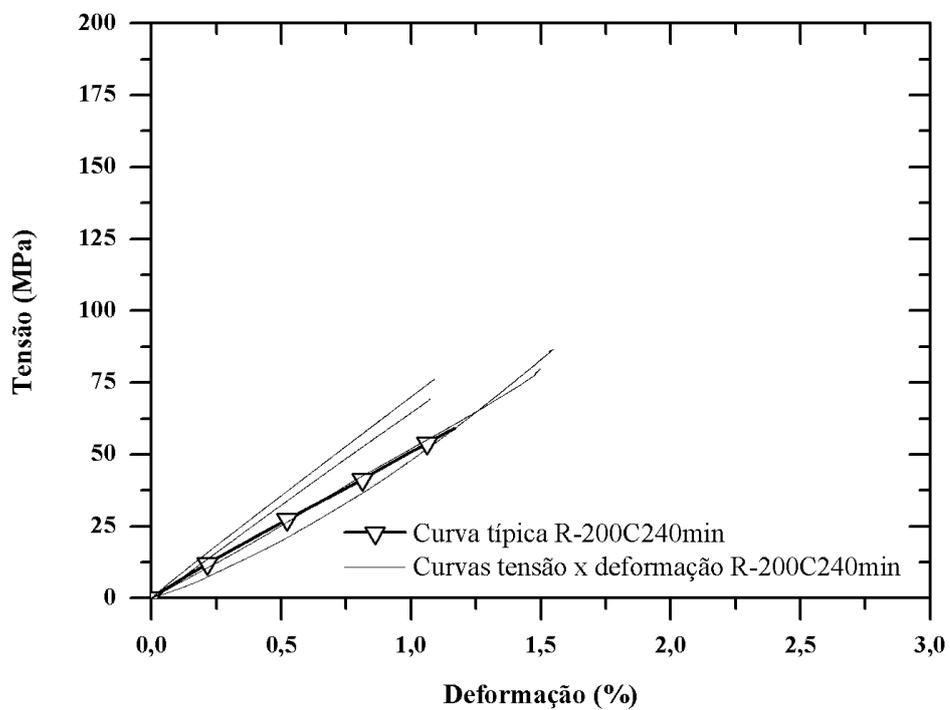


Figura 48-Curvas tensão *versus* deformação R-200C240min