

### **3. Produção e Ensaio de Materiais**

Neste capítulo tratar-se-á da descrição da metodologia de produção e de obtenção das relações constitutivas dos materiais a serem utilizados na elaboração dos componentes do sistema estrutural proposto. Para tanto serão realizados ensaios de tração e/ou compressão, de acordo com o modo de solicitação dos componentes a que estes serão destinados. Serão ainda descritos os seus modos de falha e feitas observações sobre o comportamento apresentado.

A exceção dos ensaios de tração do bambu *Dendrocalamus giganteus*, processados no Laboratório do Instituto Tecnológico da PUC-Rio (ITUC), todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio (LEM-DEC).

#### **3.1. Metodologia**

##### **3.1.1. Bambu**

Foram utilizados bambus das espécies *Phyllostachys aurea* e *Dendrocalamus giganteus*. Os colmos da espécie *Phyllostachys áurea* foram adquiridos no Estado de São Paulo em varas de três metros entre 2 e 3 anos de idade, com aproximadamente 5 cm de diâmetro, sem distinção entre base, meio e topo, tratados mediante cozimento (imersão em água quente). Os bambus da espécie *Dendrocalamus giganteus* foram colhidos no campus da PUC-Rio em novembro de 2008, com cerca de seis anos de idade. Os colmos secaram naturalmente por três meses apoiados ao bambuzal, sendo retirados para processamento em fevereiro de 2009. Os colmos não passaram por qualquer tratamento subsequente, tendo sido ensaiados em junho de 2009. Não foram diferenciados base, meio e topo uma vez que o bambu ensaiado foi destinado à produção de contraplacados que recebem aleatoriamente as lâminas em seu processo de confecção.

A nomenclatura dos corpos-de-prova foi realizada de acordo com o ensaio a que foram submetidos: T para tração e C para compressão, seguidos das iniciais relativas à espécie PA ou DG.

### 3.1.1.1. Tração simples

Foram preparados corpos-de-prova conforme a norma INBAR (2000) com 200mm de comprimento, 50mm de zona de estrição, 50mm nas extremidades em contato com as garras e 25mm nas zonas de transição (Figura 9). A área da secção da zona de estrição é variável, sendo formada pela largura de cerca de 3mm pela espessura da parede do bambu ensaiado. Na área a ser pinçada pela garra são coladas placas de alumínio com o propósito de aumentar a rigidez superficial do material, com o intuito de evitar falhas locais fora da zona de estrição.

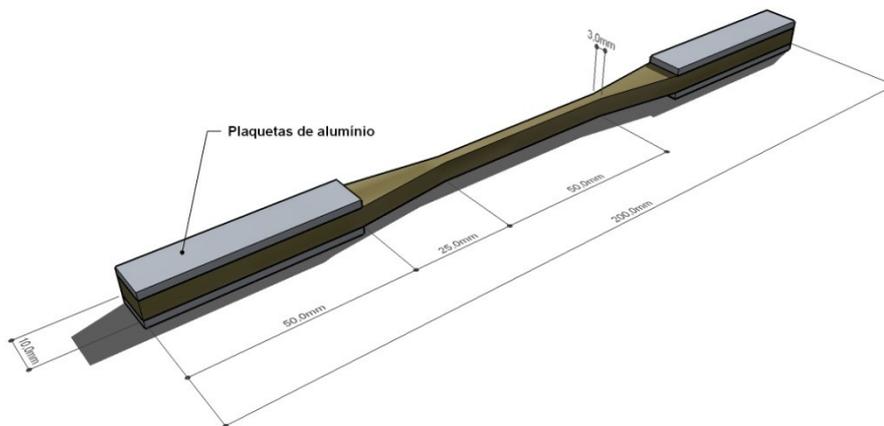


Figura 9: Corpo-de-prova de tração de bambu.

Na dificuldade de encontrar um adesivo eficiente, tentou-se enrijecer esta área previamente com resina de poliéster, sem sucesso, uma vez que o poliéster rompe antes do bambu seja por conta da compressão da garra (rompendo por flexão, dada a deformação local do bambu provocada pela pressão do pinçamento) ou por cisalhamento na interface com o bambu. Utilizou-se então o aditivo sikadur gel 330 para efetuar a colagem do alumínio, obtendo-se resultado satisfatório. Tomou-se o cuidado de estriar o alumínio para tornar mais efetiva a ação da garra, evitando o escorregamento entre ela e o corpo-de-prova.

Os corpos-de-prova da espécie *Phyllostachys aurea* foram ensaiados numa máquina universal de ensaios EMIC modelo DL30 com capacidade de 30kN, com garras de alavanca com capacidade de 5kN. Foram utilizados dois RDLs (resistores de deslocamento linear) GEFTRAN com curso de 50mm para a medição da deformação local na zona de estrição, um LVDT (linear variable differential transformer) GEFTRAN com curso de 100mm para a medição do deslocamento global e uma célula de carga EMIC de 30kN conectados ao programa de aquisição de dados LABview 8,5, mediante hardware National Instruments. O ensaio foi realizado com deslocamento constante de 1,0mm/min. A resistência à tração máxima foi determinada pela seguinte expressão:

$$\sigma_{ult} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A} \quad \text{eq. (3.1)}$$

Onde  $P_{m\acute{a}x}$  é a carga de ruptura e  $A$  a área inicial da secção do corpo-de-prova. As dimensões das secções foram medidas com um paquímetro para o cálculo das áreas.

Os corpos-de-prova da espécie *Dendrocalamus giganteus* foram ensaiados em uma Máquina Universal de Ensaios INSTRON 5500R com capacidade de 100kN, com uma pinça de aperto manual. As cargas e deslocamentos foram obtidas respectivamente por uma célula de carga com capacidade de 100kN e clip gage de 50mm, ambos da marca INSTRON (Figura 10). O módulo de elasticidade foi calculado a partir do resultado das leituras locais das deformações, considerando linear a relação tensão/deformação entre 20 % e 80 % da tensão máxima ( $\sigma_{ult}$ ).



Figura 10: Aparelhagem e esquema de ensaio.

### 3.1.1.2. Compressão simples

Os ensaios foram realizados numa prensa hidráulica CONTENCO 240 t para ensaios de compressão axial, de acordo com a norma INBAR (1999) – ISO/DIS - 22157, onde a altura do corpo-de-prova de bambu é igual ao seu diâmetro externo (Figura 11). Após o corte no comprimento ideal ( $L = D_e$ ) as superfícies dos bambus foram niveladas com massa plástica (Iberê). Os diâmetros externos ( $D_e$ ) e internos ( $D_i$ ) considerados para o cálculo das áreas foram obtidos através da média de medidas (internas e externas separadamente) tomadas com paquímetro em dois eixos ortogonais (visualmente o mais próximo possível dos de maior e menor diâmetro) a três alturas.

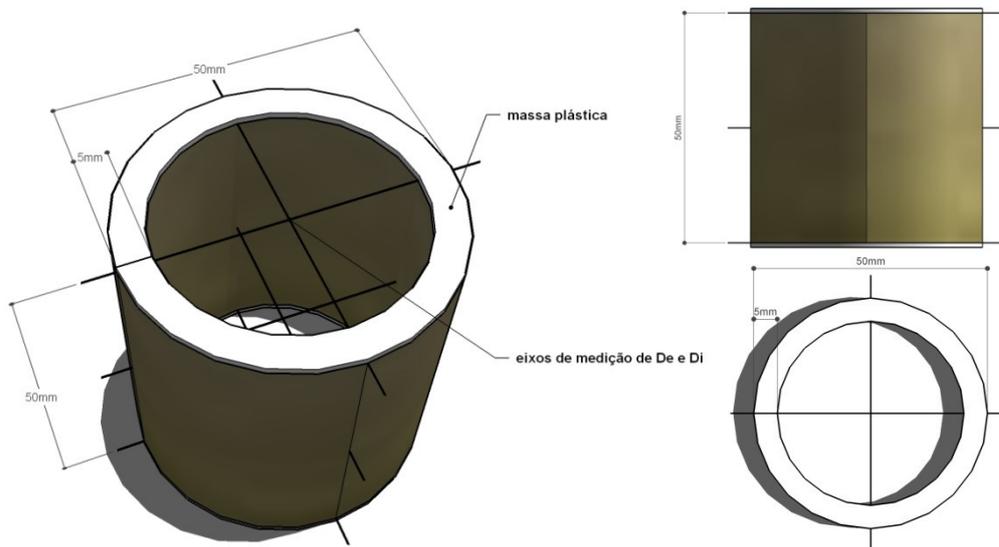


Figura 11: Modelo de corpo-de-prova para ensaio de compressão de bambu.

Para a obtenção dos deslocamentos transversais foram utilizados quatro RDLs (resistores de deslocamento linear) afixados a um gabarito (Figura 12a) que os mantém posicionados de acordo com dois eixos ortogonais transversais ao corpo-de-prova ensaiado na porção central da sua altura. O deslocamento longitudinal foi obtido através de um LVDT (linear variable differential transformer) posicionado contra o êmbolo da prensa e a carga aplicada através de uma célula MTS de 100kN (Figura 12b) nos ensaios da espécie *Phyllostachys aurea* e de uma célula Kyowa de 500kN nos ensaios da espécie *Dendrocalamus giganteus*. Todos os aparelhos foram conectados a um hardware de aquisição de dados National Instruments e obtidos via programa LabView 8.5.

Neste ensaio o controle da aplicação de carga foi feito de forma manual, mantendo-se um deslocamento constante de 1mm/min com o auxílio de um gráfico de referência. As leituras de força e deslocamento (longitudinal e transversal) foram automaticamente obtidas.

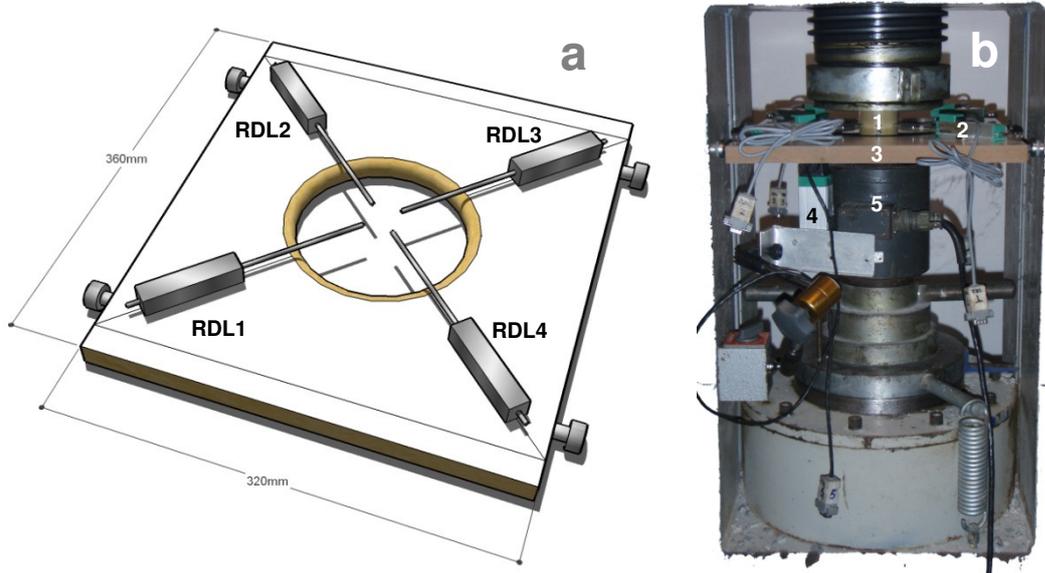


Figura 12: a) Gabarito para o posicionamento dos RDLs. b) Esquema de ensaio onde 1: corpo-de-prova, 2: RDL, 3: gabarito, 4: LVDT, 5: célula de carga.

Devido às dimensões da prensa e do corpo-de-prova, nos ensaios da espécie *Dendrocalamus giganteus* os RDLs precisaram ser desalinhados em  $12^\circ$  ( $\theta$ ) para permitir o seu curso total (Figura 13) de modo que os deslocamentos reais ( $\delta_r$ ) foram obtidos segundo a equação:

$$\delta_r = \delta_{RDL} * \cos \theta \quad \text{eq. (3.3)}$$

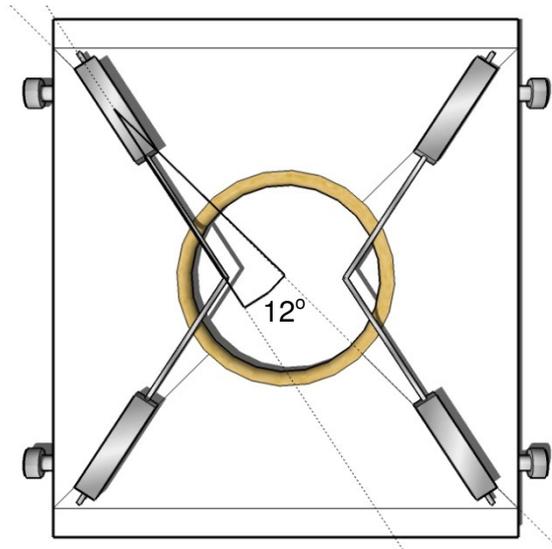


Figura 13: Inclinação de 12° dos RDLs no gabarito.

### 3.1.2.

#### **Contraplacado de bambu**

Foram utilizados os mesmos colmos da espécie *Dendrocalamus giganteus*, de onde anteriormente foram provenientes os corpos-de-prova ensaiados à tração e compressão.

Processo de laminação:

O bambu foi cortado transversalmente numa serra circular de esquadria, descartando-se os diafragmas (Figura 14a). Os internós, sem distinção entre base, meio e topo, foram então divididos em réguas mediante cortes longitudinais executados com uma ferramenta de corte manual (Figura 14b). Com o auxílio da mesma ferramenta as réguas foram divididas longitudinalmente na direção da espessura (Figura 14c), dispensando-se a parte interna do colmo. As réguas obtidas foram passadas numa plaina de desengrosso para o aparelhamento (garante o paralelismo) e a regularização das faces, primeiramente pela face externa, retirando o mínimo possível de material para garantir a regularidade, preservando-se o trecho com maior concentração de fibras e em seguida pela parte interna até a obtenção da medida de 5mm (Figura 14d). As réguas regularizadas com 5mm de espessura foram então lateralmente regularizadas utilizando uma plaina desempenadeira (garante regularização perpendicular à face aparelhada) e em seguida serradas com cerca de 20mm de largura procurando privilegiar o melhor aproveitamento possível (Figura 14e). Finalmente são transversalmente cortadas de acordo com a medida padrão de

390mm preestabelecida para o melhor aproveitamento para a produção dos nós, ou em duas partes que complementarmente atingissem tal medida.

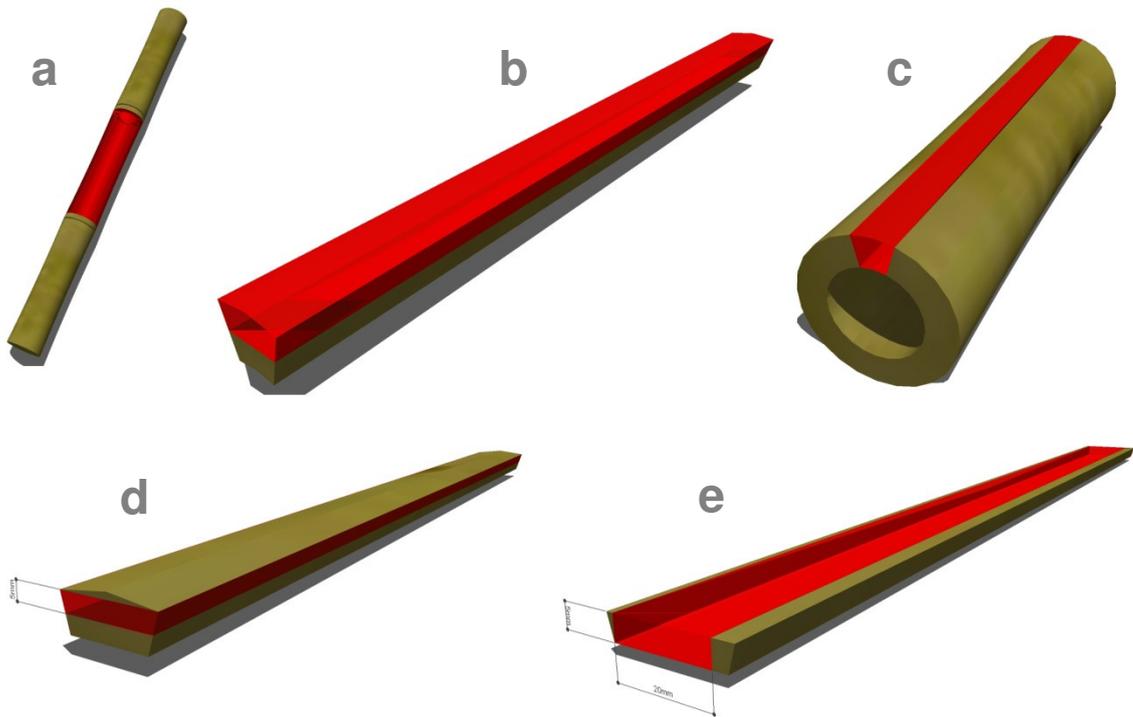


Figura 14: a) Cortes transversais, descartando os nós b) cortes longitudinais (radiais) c) corte longitudinal perimetral d) aparelhamento principal e) Aparelhamento lateral.

As régua, já regularizadas, são então mergulhadas em uma solução de querosene e K-Otek (5% de veneno) na qual permanecem por 12 horas. Depois de retiradas da solução espera-se a total secagem das peças (cerca de 5 dias ou 30 minutos em estufa).

Para a colagem foi utilizado o adesivo resorcinol formaldeído, por ser o mais resistente de acordo com a literatura (Beraldo, et al., 2003), aplicado na proporção de 200 g/m<sup>2</sup> em ambas as faces das lâminas a serem coladas. O adesivo poliuretano de mamona, embora apresente também resultados satisfatórios, conforme bibliografia (Dias, et al., 2006), além de uma indiscutível superioridade no que diz respeito à sustentabilidade, não foi utilizado por conta da indisponibilidade de fornecimento.

Foi executado um gabarito em aço para adaptação em prensa hidráulica (Figura 15), a fim de efetuar o procedimento de colagem:

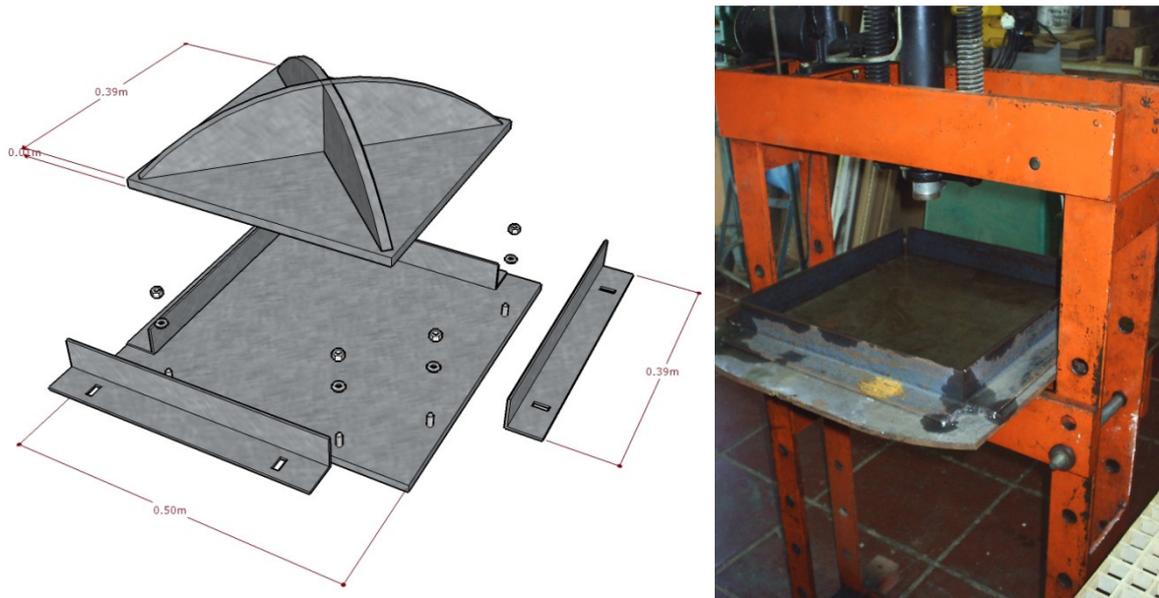


Figura 15: Gabarito para prensagem de contraplacado de bambu e posicionamento do gabarito na prensa hidráulica.

1. Aplicação de desmoldante silicone spray no gabarito;
2. Disposição da primeira camada de régua regularizadas e imunizadas no gabarito, tomando por referência o ângulo reto fixo formado pelas cantoneiras soldadas;
3. Aplicação de cola sobre a camada disposta e em cada uma das régua componentes da camada subsequente, ortogonal à primeira, a partir do mesmo ponto de referência. Este procedimento é repetido por três vezes (ou  $n-1$  vezes, considerando-se  $n$  o número de camadas do laminado);
4. Posicionamento da parte superior do gabarito e aproximação do êmbolo da prensa, no intuito de evitar o deslocamento normal ao plano das faces do contraplacado;
5. Posicionamento das cantoneiras com furo oblongo e aplicação de pressão axial (um eixo por vez) com o auxílio de dois sargentos, seguido da fixação das mesmas mediante porcas e arruelas de pressão;
6. Acionamento da prensa hidráulica, mantendo a pressão aproximada de 1MPa ( $150000\text{N}/152100\text{mm}^2$ ) durante um intervalo de 6 a 12 horas de acordo com a temperatura ambiente.

Após a colagem o contraplacado é passado na plaina desengrossadeira alternadamente nas faces externas para a regularização da medida final em 20mm, aferida com o auxílio de um paquímetro em oito pontos da placa (os cantos e os centros das arestas). No caso o bambu laminado contraplacado foi

executado com camadas mais espessas que o usual, pois deverá ser solicitado fundamentalmente à tração e compressão (e não à flexão) de modo que, para ser antissimétrico, aproveitar a parte mais resistente do bambu e trabalhar como material compósito, buscou-se o menor número possível de camadas. Quando solicitado à compressão, quanto mais finas as camadas maior a possibilidade de flambagem local das fibras, diminuindo a resistência final do material.

Por falta de uma metodologia preestabelecida para o ensaio axial de contraplacados, seja em normas para madeira ou bambu, foi desenvolvida uma maneira simplificada de obter as relações constitutivas básicas à tração e compressão, objetivando fundamentalmente encontrar a resistência máxima do material, considerando a orientação de suas fibras. Os corpos-de-prova foram ensaiados numa máquina universal de ensaios EMIC modelo DL30 com capacidade de 30kN.

A nomenclatura dos corpos-de-prova foi realizada de acordo com o ensaio a que foram submetidos: T para tração e C para compressão, seguidos da letra C de contraplacado e das iniciais relativas à espécie DG (*Dendrocalamus giganteus*) e por fim a numeração.

### **3.1.2.1. Tração simples**

Foram preparados corpos-de-prova geometricamente conforme os anteriormente citados para as espécies *Phyllostachys aurea* e *Dendrocalamus giganteus*, porém sem a necessidade das placas de alumínio (Figura 16), uma vez que no laminado utilizado as partes internas do colmo (suscetíveis a esmagamento) foram descartadas e a ruptura se dá a uma tensão muito inferior. As fibras foram orientadas a 45° e 135° conforme a solicitação prevista para o componente à qual se destina. Foram utilizadas garras de alavanca com capacidade de 5kN e dois RDLs (Resistores de Deslocamento Linear) GEFRAN no intuito de proceder leituras de deformação local (Figura 17).

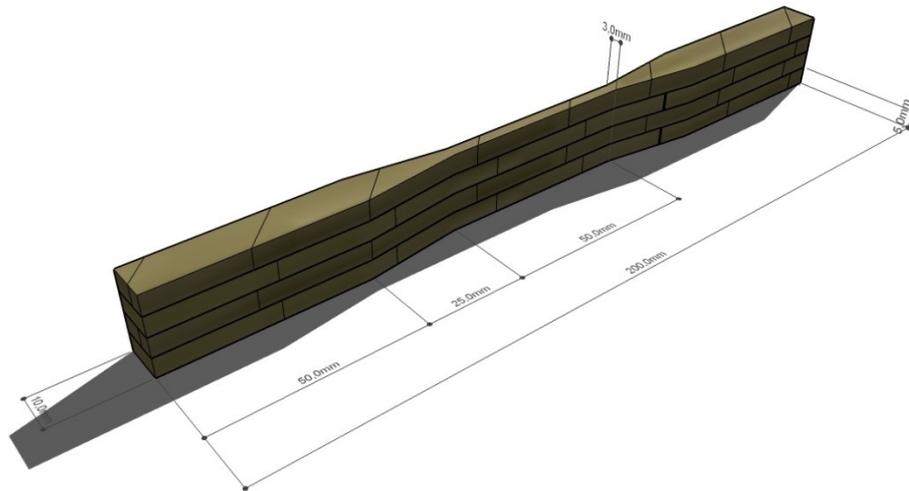


Figura 16: Modelo de corpo-de-prova de tração do contraplacado de bambu *Dendrocalamus giganteus*.

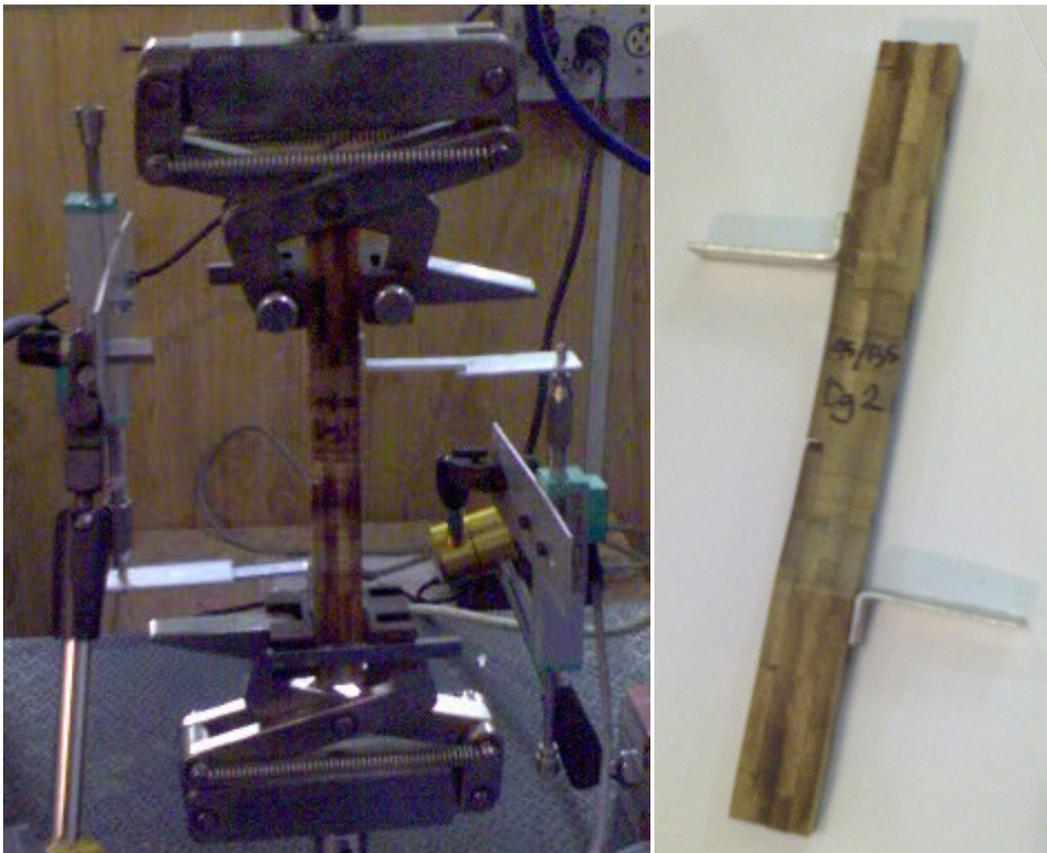


Figura 17: Esquema de ensaio e corpo-de-prova com pequeno defeito de fabricação.

Devido à orientação das lâminas os corpos-de-prova foram gerados com bastante dificuldade, perdendo-se vários no processo de confecção, de modo que se sugere no futuro buscar uma nova alternativa para ensaios do gênero ou ao menos aumentar a espessura da zona de estrição. Dois dos corpos-de-prova ensaiados apresentaram como defeito de fabricação (Figura 17) um espaçamento entre lâminas de uma das camadas externas de modo que foram consideradas apenas três camadas. No entanto, por conta da angulação das lâminas os resultados de tensão foram compatíveis com o do corpo-de-prova íntegro

### 3.1.2.2. Compressão simples

Foram preparados corpos-de-prova quadrados de 50 x 50mm com quatro camadas de 5mm (perfazendo um total de 20mm) orientadas a 45° e 135°, conforme solicitação dos componentes a que se destina o material (Figura 18). A forma quadrada foi escolhida por apresentar o mesmo comportamento relativo à deformação axial, independentemente da posição em que é ensaiada, desde que o laminado seja antissimétrico e as camadas sejam ortogonalmente dispostas.

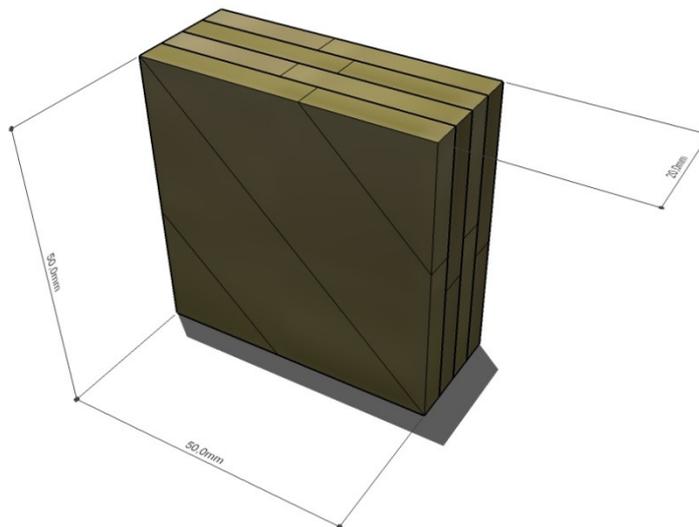


Figura 18: Modelo do corpo-de-prova de compressão axial do contraplacado de bambu *Dendrocalamus giganteus*.

### 3.1.2.3. Tração pinada do Contraplacado (TPC)

No intuito de avaliar a melhor forma de se executar os furos para as conexões das barras nos nós de contraplacado de bambu foram realizadas três baterias de ensaios com diferentes furações em corpos-de-prova retangulares de dimensão correspondente ao núcleo central dos nós, conforme demonstrado na Figura 19.

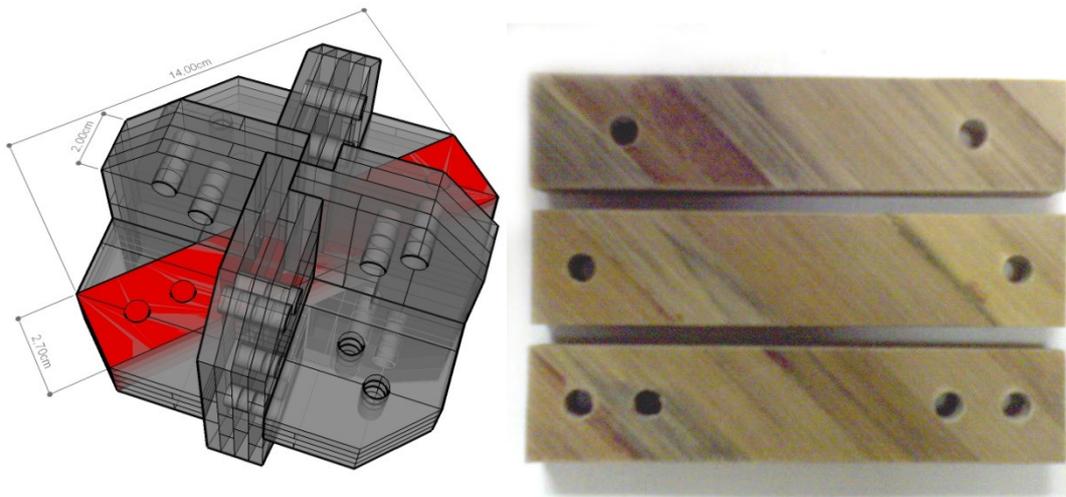


Figura 19: Modelo do nó a ser estudado, representando o motivo das dimensões do corpo-de-prova de tração pinada do contraplacado e corpos-de-prova com as três diferentes furações.

Os corpos-de-prova são prismas retangulares com secção de 20 por 27mm e comprimento de 140mm (comprimento equivalente à diagonal e largura correspondente ao entalhe de ensambladura do nó), formados por quatro camadas de lâminas de bambu *Dendrocalamus giganteus* ortogonalmente dispostas duas a duas a 45° e 135°.

Os furos foram realizados com broca para madeira de 8mm em uma furadeira de bancada, utilizando um gabarito para aumentar a regularidade dos corpos-de-prova. Três variedades de perfurações foram adotadas:

- TPC 15: um único furo de cada lado do corpo-de-prova a 15mm da borda;
- TPC 25: um único furo de cada lado do corpo-de-prova a 25mm da borda;
- TPC 1531: dois furos de cada lado do corpo-de-prova a 15 e 31mm da borda.

Os ensaios foram realizados numa máquina universal de ensaios de marca EMIC modelo DL30 com capacidade para 30kN utilizando garras de castanhas

para 20kN. Foi executado um suporte para a passagem dos pinos conforme a conexão a ser utilizada nos nós, porém com haletas laterais soldadas para possibilitar o uso de RDLs para a leitura das deformações locais, conforme demonstrado na Figura 20.

O suporte para os pinos não exerce pressão sobre as laterais do laminado, uma vez que os parafusos utilizados como pinos (8mm com cabeça sextavada 13mm e porca) não são apertados, somente posicionados. Foram utilizados quatro RDLs (resistores de deslocamento linear) para a medição da deformação local, um LVDT (linear variable differential transformer) para a medição do deslocamento global e uma célula de carga EMIC de 30kN conectados ao programa de aquisição de dados LABview 8,5, mediante hardware National Instruments.

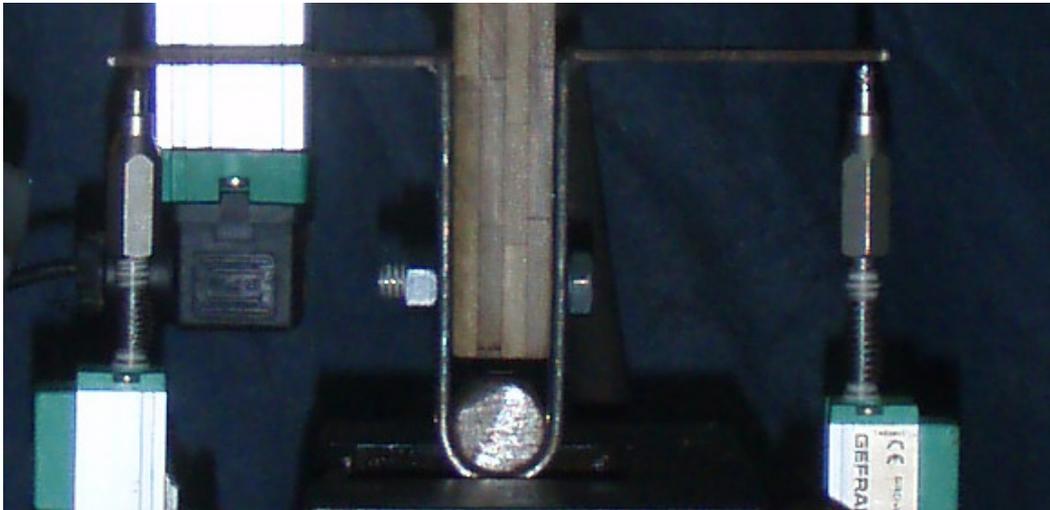


Figura 20: Suporte para conexão pinada com haletas soldadas para apoio dos RDLs.

Os dados referentes às deformações locais e globais não apresentaram diferenças significativas, de maneira que, pela regularidade das curvas, optou-se por plotar os gráficos utilizando os dados obtidos globalmente. Esperava-se que os corpos-de-prova apresentassem dois diferentes modos de falha globais: cisalhamento interlaminar tipo3 (rascamento) associado a cisalhamento tipo 1 alinhado com as fibras (de cada camada) e esmagamento na região dos furos devido à pressão local exercida pelos parafusos. Entretanto não foi observado dano significativo relativo a esmagamento na região dos furos de nenhum corpo-de-prova, somente estrias leves provocadas pela rosca do parafuso, como pode

ser comprovado na Figura 21a. Deste modo foram, por ora, dispensados estudos adicionais sobre esmagamento e redimensionamento de pinos.

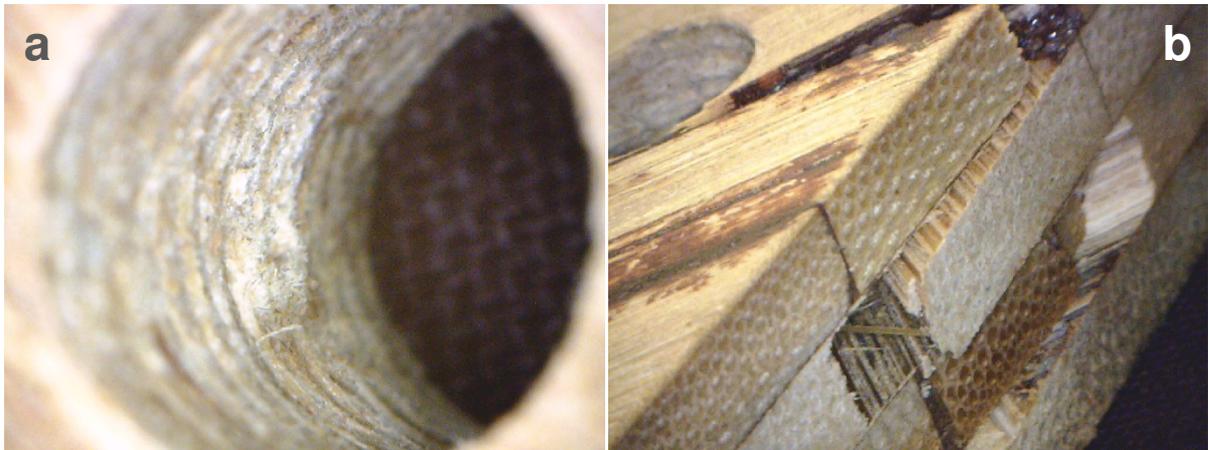


Figura 21: a) Marcas de estrias provocadas pela rosca de um parafuso em um dos furos de um dos corpos-de-prova. b) Modo de ruptura global por cisalhamento na linha de um dos furos.

A falha neste tipo de corpo-de-prova ocorre alinhada às fibras ( $45^\circ$  e  $135^\circ$ ) e normalmente na altura da porção central de um dos furos (Figura 21b), de modo que a área considerada para cálculo de tensão deve ser:

$$\sum_1^c \left( \frac{l}{\cos \theta_c} - \phi_f \right) * n_c * e_c \quad \text{eq. (3.3)}$$

Onde  $c$  representa a tipologia da lâmina,  $l$  a largura do corpo-de-prova,  $n$  o número de lâminas,  $e$  a espessura das camadas (considerada constante),  $\theta$  o ângulo entre a base do corpo-de-prova e a orientação das fibras de cada camada e  $\phi_f$  o diâmetro do furo. O cálculo da área da secção não muda para corpos-de-prova com mais furos, uma vez que a ruptura não ocorre a alturas diferentes do contraplacado.

Caso os parafusos fossem apertados, de modo que a pinça exercesse pressão sobre as faces do contraplacado aumentando a resistência na região dos furos e com isto deslocando a área de ruptura para a zona central do corpo-de-prova, a área a ser considerada para o cálculo de tensão passaria a desprezar a parcela relativa ao diâmetro do furo.

### 3.1.3.

#### **Compósito Particulado Bambu-poliéster (BP)**

Durante o processo de laminação do bambu (*Dendrocalamus giganteus*) uma expressiva quantidade de resíduo particulado, proveniente da plaina desengrossadeira, é gerado. Por ser biodegradável pode ser usado como substrato agrícola, forração para galinheiros, matriz de compostagem para sanitários secos, entre outros. Como insumo para a construção civil e outras indústrias, este resíduo pode ser usado como adição em compósitos de matriz cerâmica ou polimérica. Sendo o bambu um compósito polimérico natural foi proposta a sua adição em matriz polimérica.

O compósito foi elaborado utilizando aproximadamente 50% em volume de resina poliéster insaturada (Resapol 10-116), do tipo ortoftálica e pré-acelerada, dissolvida em monômero de estireno, curada com peróxido de metil etil cetona (MEK-P) em concentração de 1% em peso e 50% de resíduo bruto proveniente da laminação do bambu. O poliéster foi escolhido como matriz por conta de sua disponibilidade e facilidade de uso e moldagem, não requerendo recursos custosos ou muito complicados para a sua aplicação. As peças e corpos-de-prova elaboradas com o compósito foram moldadas em formas de silicone à temperatura ambiente e sem pressão com umidade relativa do ar de aproximadamente 65%. As formas de silicone foram moldadas a partir de matrizes executadas em madeira torneada, impermeabilizada com base para pintura (primer) em spray.

#### **3.1.3.1.**

##### **Compressão simples**

Foram elaborados corpos-de-prova cilíndricos com altura igual à medida do diâmetro e volume aproximado ao do componente a ser executado com o material (34mm<sup>3</sup>), resultando na medida padrão de 35mm (Figura 22).

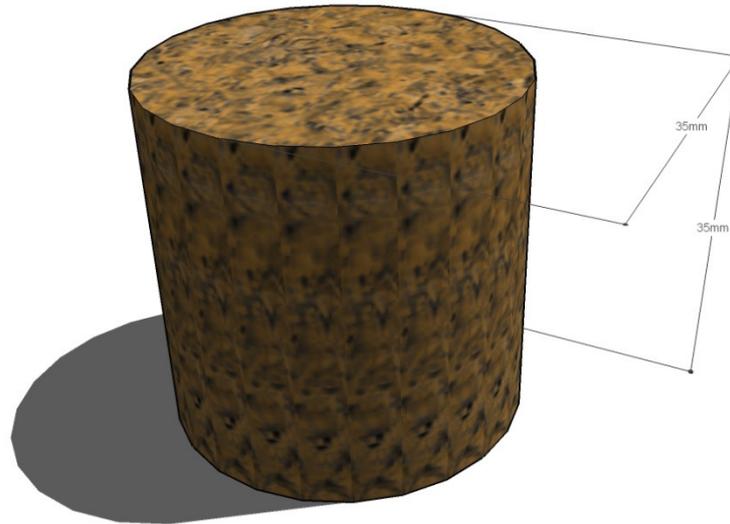


Figura 22: Corpo-de-prova de compressão compósito bambu-poliéster.

Os corpos-de-prova foram ensaiados numa máquina universal de ensaios EMIC modelo DL30, dotada de célula de carga com capacidade de 30kN com deslocamento constante de 1mm/min. Os dados referentes à força aplicada e ao deslocamento foram adquiridos mediante programa TESC e servidor VIRMAQ, próprios da máquina.

#### 3.1.4.

#### **Compósito Sisal trefilado-poliéster**

De acordo com a revisão bibliográfica realizada no presente trabalho, a fibra de sisal foi escolhida como reforço por agregar uma série de qualidades vitais para o desenvolvimento de um processo industrial, entre as quais, disponibilidade e variabilidade comercial, baixo custo e as melhores propriedades mecânicas, quando comparada a outras fibras vegetais recentemente estudadas. Foi utilizada cordoalha de sisal trefilado com 3mm de diâmetro em rolos de 420m, por representar a melhor relação custo-benefício à realização do reforço.

A resina insaturada de poliéster para laminação foi utilizada por conta da facilidade de aplicação, resistência à água e aos raios ultravioleta, além da versatilidade de possibilidades de acabamento. Esta resina, segundo o fabricante, é do tipo insaturada, ortoftálica, rígida, pré-acelerada, totalmente polimerizável, apresentando baixa reatividade e baixa viscosidade. É uma resina de uso geral, indicada para aplicações em piscinas, banheiras, peças

automotivas, náuticas e acessórios reforçados com fibras de vidro, moldados por laminação manual ou a pistola. Contudo, por não ser um material sustentável, propõe-se no futuro um estudo de matrizes poliméricas naturais para o compósito.

Em se tratando de propor um reforço transversal a barras de bambu, no intuito de diminuir ou eliminar o seu problema de fissuração e aumentar a resistência à compressão do material por confinamento, o material requer somente ensaios à tração.

Em trabalhos posteriores recomenda-se a obtenção experimental das relações constitutivas transversais do bambu a ser utilizado, para melhor estabelecer os parâmetros de reforço.

#### **3.1.4.1. Tração simples**

Os corpos-de-prova de tração (Figura 23) foram elaborados com base na norma ASTM D 3039 (Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials) com 120 mm de comprimento, secção retangular constante de 25mm pela espessura do compósito (aproximadamente 4mm). As cordoalhas foram dispostas em um gabarito para que se mantivessem alinhadas, onde foram previamente molhadas em resina. Posteriormente foram cortadas no tamanho requerido, agrupadas e colocadas em uma forma de silicone, onde receberam recobrimento de poliéster.

Foi realizada uma série de três ensaios numa máquina universal de ensaios de marca EMIC modelo DL30 com capacidade para 30kN utilizando garras de castanhas para 20kN, com deslocamento constante de 2mm/min. Os dados referentes à força aplicada e ao deslocamento foram adquiridos mediante programa TESC e servidor VIRMAQ, próprios da máquina.

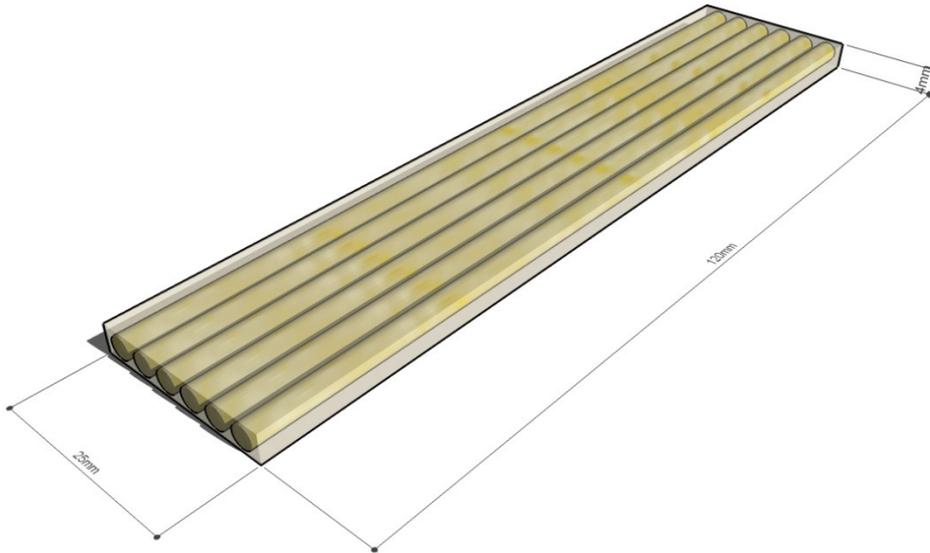


Figura 23: Corpo-de-prova para ensaio de tração do compósito cordoalha de sisal-poliéster.

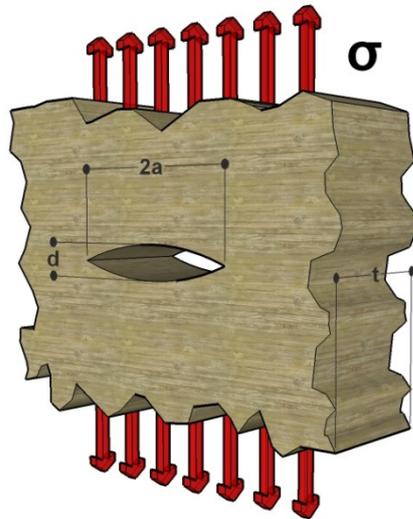
### 3.1.5. Bambu transversalmente reforçado

Como qualquer material, o bambu apresenta patologias, como suscetibilidade ao ataque de fungos e insetos, degradação da lignina quando exposto aos raios UV e à variação de umidade e temperatura, baixa resistência ao cisalhamento e imperfeições geométricas. Estes fatores, isolados ou combinados, com o tempo geram trincas ao longo das fibras longitudinais do material, induzindo falhas prematuras à flexo-compressão, quando submetidos a carregamento.

O reforço de peças estruturais vem sendo utilizado há muitos anos, mas em décadas recentes, com o desenvolvimento de fibras poliméricas estas vêm sendo estudadas e empregadas em reforços de elementos de concreto e madeira. Ao mesmo tempo, as fibras vegetais têm atraído atenção especial por apresentarem boa resistência, além dos aspectos econômicos e ecológicos favoráveis. Nas peças laminadas de madeira o reforço normalmente é feito com a colagem de tecidos de fibra podendo envolver toda a peça ou parte dela, procurando situar as fibras de reforço em regiões mais solicitadas à tração.

Reforços externos, transversais às barras de bambu, mostram-se muito importantes nas áreas mais solicitadas, principalmente as ligações por evitarem a propagação de fissuras.

De acordo com a teoria de mecânica da fratura (Griffith, 1920), considerando um sólido com uma trinca que se estende por toda a espessura, submetido a carregamento (Figura 24), tem-se para a determinação do tipo de crescimento da trinca:



$U_r$  = energia de deformação liberada

$U_s$  = energia necessária à criação de novas superfícies de ruptura.

$\gamma_s$  = energia de superfície por unidade de área

$\sigma$  = tensão aplicada

$a$  = metade do comprimento da trinca

$t$  = espessura da placa

$E$  = módulo de elasticidade da placa

Figura 24: Modelo da trinca de Griffith: Uma trinca por toda a espessura em uma placa infinita uniaxialmente tracionada.

De acordo com as fórmulas expressas em eq. 3.4 e eq. 3.5:

$$U_r = \frac{\sigma^2 * V}{2 * E} = \frac{\pi * \sigma^2 * a^2 * t}{E} \quad \text{eq. (3.4)}$$

$$U_s = 4 * a * t * \gamma_s \quad \text{eq. (3.5)}$$

Determina-se a estabilidade da propagação das fissuras através da comparação entre a energia de deformação liberada e a energia necessária à criação de novas superfícies de ruptura. Se a energia para a criação de novas trincas for maior que a energia de deformação liberada, suas derivadas manterão a relação, assim sendo, a trinca é estável e não se propaga (eq. 3.6). O reforço transversal anula ou negativa a tensão aplicada de maneira que  $U_r$  torna-se nulo ou negativo, recaindo sempre na situação estável.

$$\frac{\partial U_s}{\partial a} > \frac{\partial U_r}{\partial a} \quad \text{estável} \quad \text{eq. (3.6)}$$

Se a relação for inversa a trinca se propaga espontaneamente (eq. 3.7).

$$\frac{\partial U_s}{\partial a} < \frac{\partial U_r}{\partial a} \quad \text{instável} \quad \text{eq. (3.7)}$$

A igualdade entre as relações estabelece o ponto de equilíbrio indiferente, limite entre a propagação ou não de uma fissura (eq. 3.8).

$$\frac{\partial U_s}{\partial a} = \frac{\partial U_r}{\partial a} \quad \text{limite} \quad \text{eq. (3.8)}$$

Deste modo, a elaboração de um reforço transversal com uma matriz polimérica impermeável e resistente aos raios UV e fibras resistentes o suficiente para evitarem a propagação das trincas pode aumentar a durabilidade, permitindo a manufatura e estocagem deste novo produto. Considerando que um dos modos de falha do bambu submetido à compressão é a fissuração longitudinal, o reforço pode acrescer tenacidade ao material por impedir (ou adiar, dependendo do comprimento da barra) o modo de falha à flexo-compressão, além de aumentar a resistência à compressão por confinamento.

A idéia de reforço pode ainda ser aplicada a estruturas existentes e que já apresentem fissuras, entretanto para tal seria necessária uma tecnologia diferenciada, talvez mediante o uso de tecidos resistentes ao invés de cordoalhas, para facilitar a aplicação manual.

Para a confecção das barras reforçadas foram utilizados colmos da espécie *Phyllostachys aurea*, provenientes do mesmo lote do qual foram elaborados os corpos-de-prova ensaiados à tração e compressão anteriormente descritos. O reforço transversal foi efetuado com um compósito de fibras longas de sisal trefilado com matriz de poliéster aplicado ao longo de todo o colmo.

As barras foram cortadas transversalmente no comprimento requerido e adaptadas a um torno mecânico Nardini TB 130, onde receberam lixamento superficial para melhorar a adesão da resina. Com o torno engrenado utilizando baixa rotação e maior torque foi aplicada a primeira camada de resina de poliéster seguida de uma cordoalha de sisal com cerca de 3mm de diâmetro (respectivamente Figura 25a e Figura 25b). Em seguida, ainda com o torno em marcha, as fibras em cordoalha são embebidas de resina (Figura 25c). Como

acabamento os corpos-de-prova foram lixados novamente e receberam nova camada de resina.

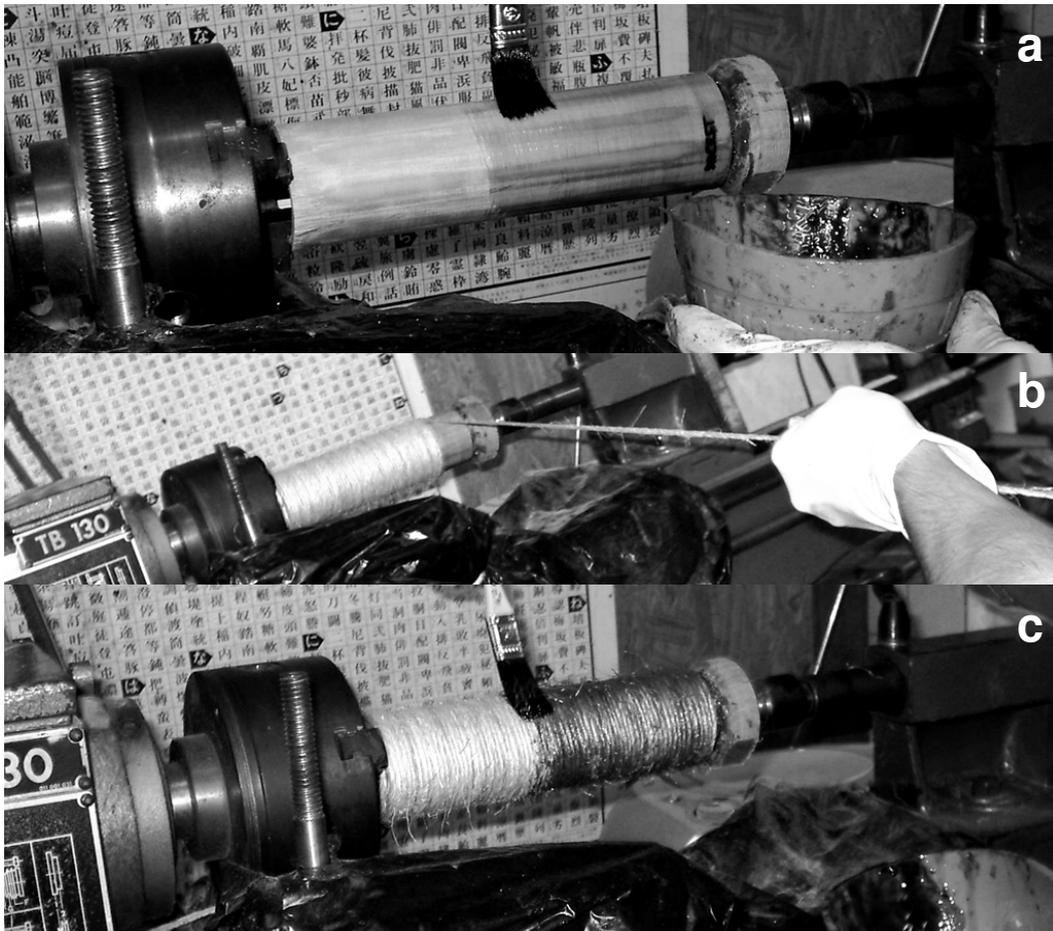


Figura 25: Processo de confecção do reforço transversal: a) Aplicação da primeira camada de resina de poliéster. b) Aplicação da cordoalha de sisal. c) Embebiamento das fibras com resina.

### 3.1.5.1. Compressão simples

Foram preparados corpos-de-prova com alturas iguais a um, dois e quatro diâmetros, variando a presença de diafragmas, fissuras e reforço, perfazendo um total de 24 corpos-de-prova. Após o corte as superfícies das barras foram niveladas com massa plástica (Iberê). Nos corpos-de-prova fissurados as trincas foram artificialmente induzidas anteriormente à confecção do reforço. Os diâmetros externo ( $D_e$ ) e interno ( $D_i$ ) considerados para o cálculo das áreas foram obtidos através da média de medidas (internas e externas separadamente) tomadas com paquímetro em dois eixos (visualmente os de maior e menor diâmetro) a três alturas antes da aplicação do reforço.

Para a obtenção dos deslocamentos transversais foram utilizados quatro RDLs (resistores de deslocamento linear) afixados ao gabarito utilizado nos ensaios de compressão anteriormente citados que os mantém posicionados de acordo com dois eixos ortogonais transversais ao corpo-de-prova. O deslocamento longitudinal foi obtido através de um LVDT (linear variable differential transformer) posicionado contra o êmbolo da prensa e a carga aplicada através de uma célula Kyowa de 500kN. Todos os aparelhos foram conectados a um hardware de aquisição de dados National Instruments e obtidos via programa LabView 8.5.

Os ensaios foram realizados numa prensa hidráulica CONTENCO 240 t para ensaios de compressão axial, onde o controle da aplicação de carga foi feito de forma manual, mantendo-se um deslocamento constante de 1mm/min com o auxílio de um gráfico de referência.

## **3.2. Resultados**

### **3.2.1. Tração simples de Bambu**

Todos os corpos-de-prova da espécie *Phyllostachys aurea* apresentaram valores de tensão de ruptura conforme dados precedentes obtidos em bibliografia (259,7MPa em média). Entretanto percebe-se que os corpos-de-prova rompem a cisalhamento tipo 1 (abertura) entre a zona de transição e a de estricção antes de romperem à tração (Figura 26a), de maneira que o resultado real referente à deformação não parece ser corretamente representado, uma vez que a partir deste momento o comprimento  $l_0$  da zona de estricção aumenta (100%), o que reduziria o resultado efetivo, uma vez que a deformação adotada é:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \qquad \text{eq. (3.2)}$$

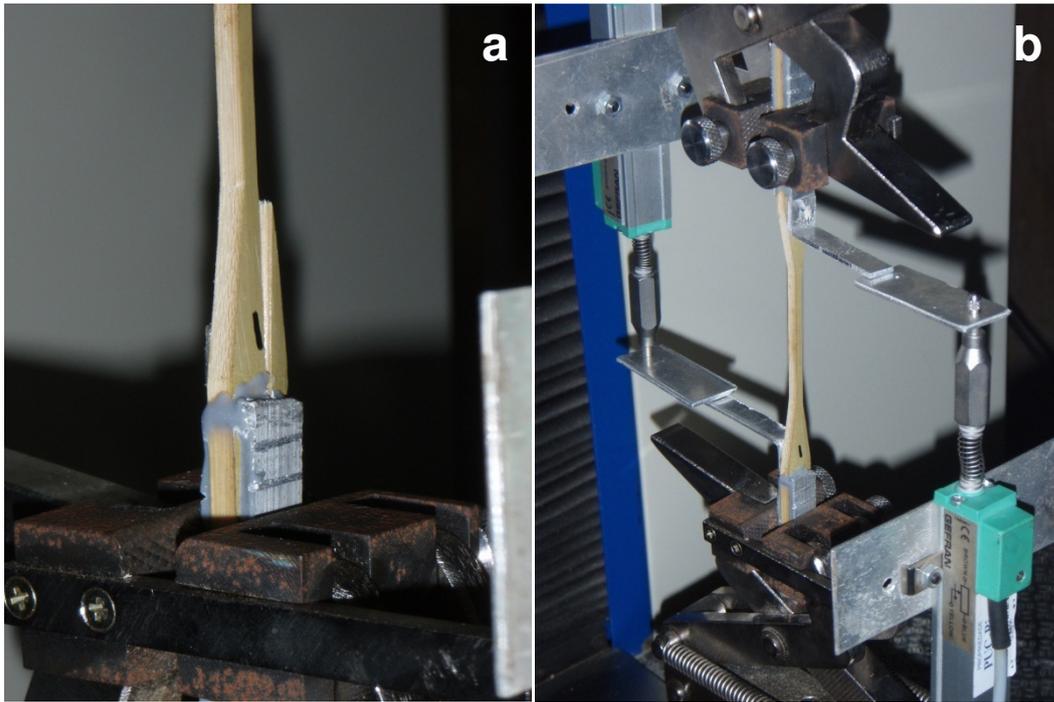


Figura 26: a) Fratura por cisalhamento tipo 1 do corpo-de-prova de tração do bambu *Phyllostachys áurea*. b) Posicionamento das haletas de alumínio e RDLs para a medição dos deslocamentos locais.

A medição local de deslocamento com o auxílio de RDLs também não se mostrou eficaz, talvez por conta dos suportes (haletas de alumínio Figura 26b), que, sendo colados ao corpo-de-prova um de cada lado, para permitir o posicionamento dos resistores, podem ter cedido, proporcionando um aumento nas leituras de deformação tornando-as não compatíveis com as registradas em bibliografia, tendo sido portanto desconsideradas. Por conta disso também não foram registrados os módulos de elasticidade do material. As deformações globais foram calculadas considerando  $l_0$  como o comprimento total dos corpos-de-prova.

Os dados referentes às áreas das secções, tensões e deformações máximas (globais e locais) e os gráficos de tensão x deformação estão apresentados respectivamente na Tabela 2 e na Figura 27.

Os corpos-de-prova TPA1 e 2 apresentaram relação tensão/deformação próxima da linearidade com homogeneidade quanto aos resultados máximos. TPA1 apresentou pequenas irregularidades na curva provenientes, possivelmente, de pequenos deslizamentos entre as garras de alavanca e as plaquetas de alumínio. O terceiro corpo-de-prova não exibiu um comportamento

tão linear quanto os demais, mantendo porém a coerência quanto aos valores máximos de tensão e deformação.

Tabela 2: Dados obtidos nos ensaios de tração da espécie *Phyllostachys aurea*.

CP	Área da secção	Força máx. (kN)	Tensão máx. (MPa)	Deformação global máx. (mm/mm)	Deformação local máx. (mm/mm)
TPA1	10,66	2,821	264,65	0,031	0,087
TPA2	13,06	3,391	259,63	0,035	0,039
TPA3	11,26	2,909	258,29	0,0335	0,044

### TPA $\epsilon \times \sigma$

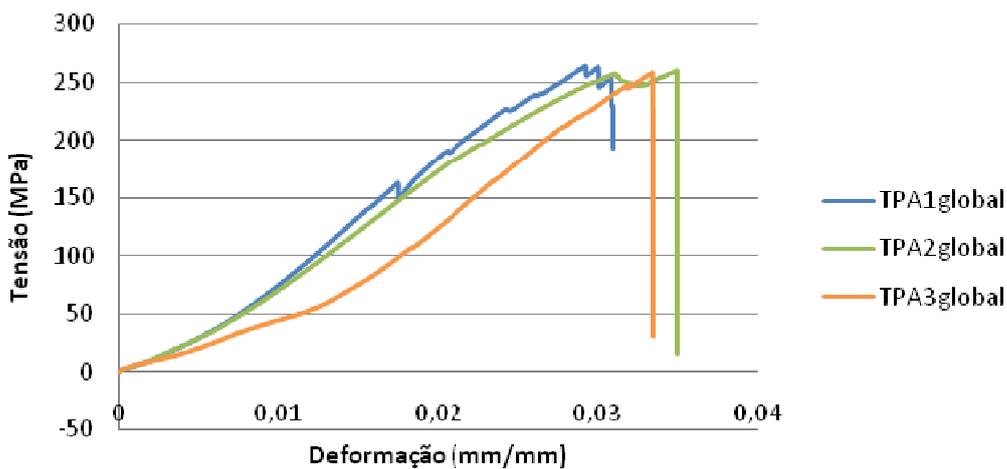


Figura 27: Gráfico de Relações Constitutivas dos corpos-de-prova ensaiados, considerando as deformações obtidas globalmente.

O comportamento apresentado por todos os corpos-de-prova caracteriza-se por um alongamento considerável (deslocamento global em torno de 5% do comprimento total ou 20% da zona de estrição) e os modos de falha: primário pela ruptura brusca por cisalhamento na linha da zona de estrição e secundário pela ruptura gradual das fibras da parte externa do colmo seguida de uma ruptura brusca e em bloco das fibras internas e do parênquima (Figura 28).

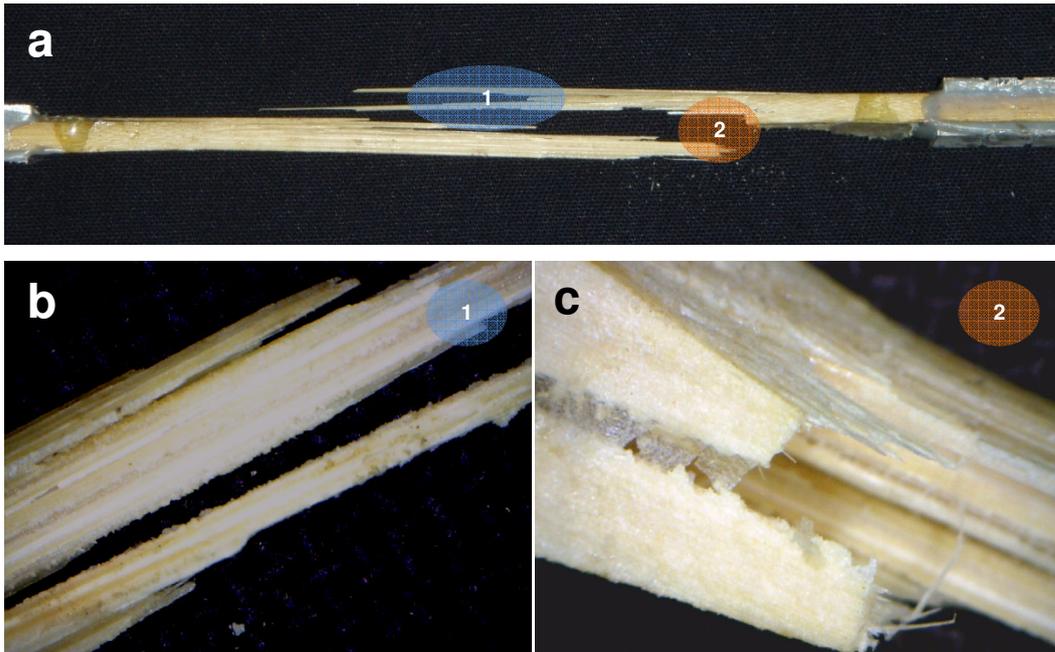


Figura 28: a) Modo de ruptura secundário: [1] Ruptura gradual das fibras externas ao colmo; [2] Ruptura em bloco das fibras internas ao colmo. b e c) imagens obtidas através de microscópio óptico, ilustrando o modo de falha secundário respectivamente das fibras externas e internas ao colmo do bambu.

Os resultados dos ensaios à tração dos corpos-de-prova da espécie *Dendrocalamus giganteus* estão apresentados na Tabela 3 e no gráfico de relações constitutivas da (Figura 29).

Tabela 3: Dados obtidos no ensaio à tração da espécie de bambu *Dendrocalamus giganteus*.

CP	Área da secção (mm <sup>2</sup> )	Força máx. (kN)	Tensão máx. (MPa)	Deformação global máx. (mm/mm)	Deformação local máx. (mm/mm)	Módulo de elasticidade (GPa)
TDG1	30,495	6,57	215,57	0,057	0,015	17,25
TDG2	30	6,34	188,50	0,021	0,010	19,187
TDG3	33,547	7,10	211,60	0,041	0,010	19,74

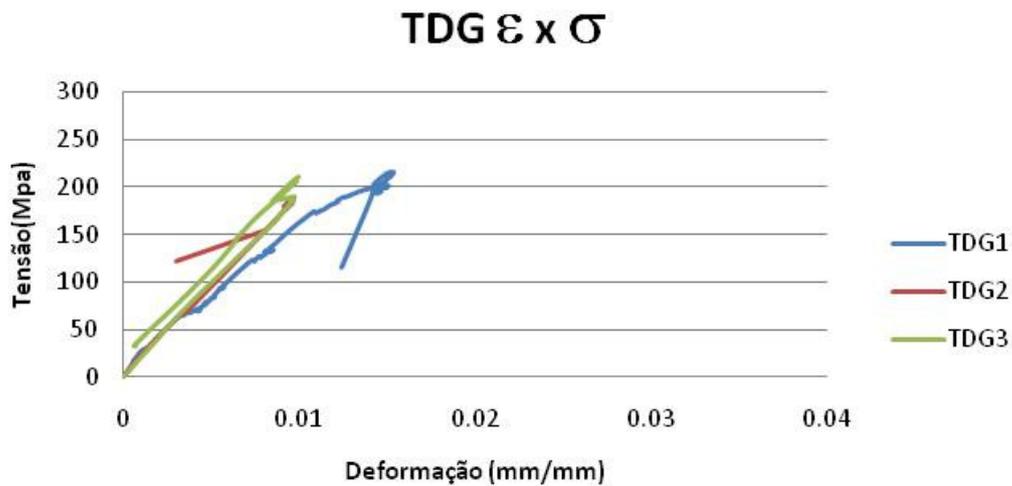


Figura 29: Gráfico de tensão x deformação à tração de corpos-de-prova de *Dendrocalamus giganteus*.

O comportamento descrito pela curva do primeiro corpo-de-prova (TDG1) difere dos demais, apresentando maior deformação e dois pontos bem definidos de retomada de ganho de carga. Estes pontos se devem a apertos aplicados à garra durante o ensaio. O mesmo não ocorreu nos demais corpos-de-prova, uma vez que estes receberam maior aperto a priori.

Todos os corpos-de-prova apresentam comportamento linear na relação tensão/deformação (exceto TDG1, conforme anteriormente explicitado) com valores de tensão de ruptura (204,6MPa em média) conforme dados precedentes obtidos em bibliografia, no entanto percebe-se que os corpos-de-prova rompem a cisalhamento tipo 2 (deslizamento ou cisalhamento no plano) na zona de transição em linha com a zona de estrição. Após a ruptura a cisalhamento prosseguiu-se o ensaio na tentativa de observar se ocorreria uma acomodação dos corpos-de-prova e um novo ganho de carga para atingir a ruptura à tração, conforme ocorrido nos ensaios da espécie *Phyllostachys aurea*, contudo a fratura propagou-se até a área de pinçamento, impossibilitando a ruptura à tração (Figura 30).



Figura 30: Ruptura na zona de transição alinhada com a zona de estrição e vista do topo do corpo-de-prova com a trinca propagada até a área de pinçamento e o descolamento das placas de alumínio.

O motivo de este efeito ocorrer com os corpos-de-prova desta espécie e não acometer os da espécie *Phyllostachys aurea* está relacionado à espessura de parede dos corpos-de-prova. Nos corpos-de-prova menos espessos a ruptura à tração é viável por conta da proporção resultante da secção transversal rompida a cisalhamento que seria de aproximadamente 3 por 4mm, bastante robusta se comparada a cerca de 3 por 11mm dos mais espessos. Ocorre que, nos corpos-de-prova mais espessos, após a ruptura a área da superfície de escorregamento é muito superior à da superfície de colagem. Além disso, como a ruptura a cisalhamento é frágil, a redistribuição brusca de esforços induz o descolamento das placas de alumínio nas menores superfícies de adesão. Outro fator que pode ter contribuído para este comportamento foi o uso de garras de aperto manual, que não aumentam a pressão sobre o corpo-de-prova com o aumento da carga (efeito cunha). Tais garras foram utilizadas por serem as únicas disponíveis a conjugarem abertura suficiente para o pinçamento de corpos-de-prova com espessura superior a 10mm e capacidade superior a 5kN. Anteriormente procurou-se executar os ensaios com uma garra de alavanca com capacidade de 5kN, mas os corpos-de-prova não apresentaram alterações na zona de estrição, ficando patente a necessidade de uma garra de maior capacidade.

## 3.2.2.

**Compressão simples de Bambu**

A partir dos valores obtidos nos ensaios à compressão dos corpos-de-prova da espécie *Phyllostachys aurea*, gerou-se a curva tensão (MPa) x deformação (mm/mm). Esperava-se que o módulo de elasticidade pudesse ser calculado a partir do resultado das leituras das deformações, como uma relação linear tensão/deformação, considerando entre 20 % e 80 % da tensão máxima ( $\sigma_{ult}$ ) e o coeficiente de Poisson pela relação entre a média das deformações transversais ( $\varepsilon_t$ ) pela deformação longitudinal ( $\varepsilon_l$ ), considerando-se para isso o material ortotrópico, transversalmente isotrópico. Entretanto, por serem globais as deformações captadas pelo LVDT e pelos RDLs, os resultados não representam a realidade. No caso das deformações transversais há ainda a influência da geometria, uma vez que, não sendo um cilindro cheio, mas uma estrutura tubular, as paredes em contato com os RDLs não têm necessariamente a tendência de se deformarem em um sentido preestabelecido. A Tabela 4 apresenta as áreas de secção, carregamento aplicado, tensões e deformações longitudinais máximas dos corpos-de-prova ensaiados.

Tabela 4: Dados obtidos nos ensaios à compressão da espécie *Phyllostachys aurea*.

CP	Área da secção (mm <sup>2</sup> )	Tenacidade (kJ/m <sup>2</sup> )	Tensão máx. (MPa)	Deformação longitudinal em $\sigma_{máx.}$ (mm/mm)	Deformação longitudinal máx. (mm/mm)
CPA1	645,401	3,4445	52,61	0,019	0,096
CPA2	1101,53	2,673	54,2	0,026	0,080
CPA3	596,753	4,6922	58,4	0,062	0,100

Os corpos-de-prova apresentam regularidade comportamental no trecho linear da curva, atestando relativa homogeneidade macroestrutural do material ensaiado. Os resultados relativos à tensão máxima (55,07MPa em média) estão de acordo com os obtidos na literatura. Os corpos-de-prova apresentaram ainda comportamento tenaz, tendo em particular o CPA3 sofrido um peculiar endurecimento (work hardening).

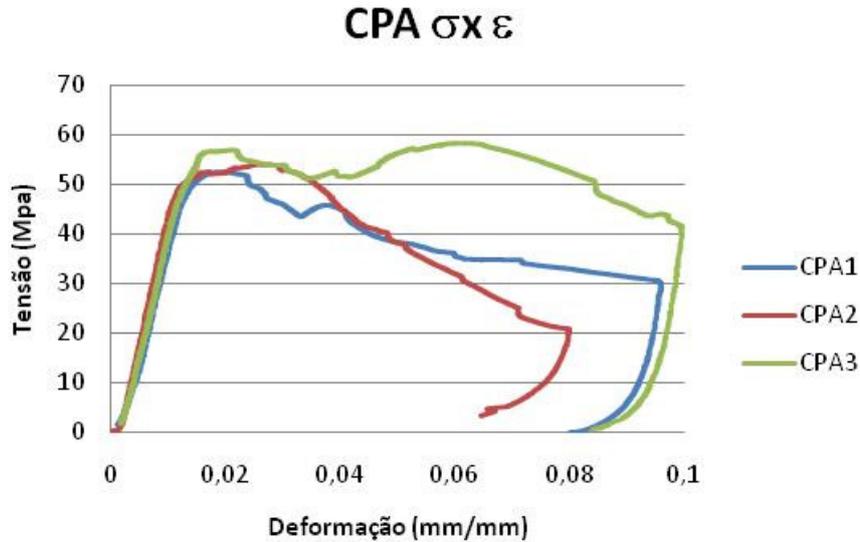


Figura 31: Gráfico tensão x deformação longitudinal *Phyllostachys aurea*.

Devido à operação manual, a prensa tinha de ser desligada ao aproximar-se de seu deslocamento máximo, o que gerou uma forma similar ao final de todas as curvas. Esta forma não representa comportamento relativo às relações constitutivas do material.

Apesar de não viabilizar a obtenção do coeficiente de Poisson o dispositivo elaborado como suporte para os RDLs permitiu analisar os deslocamentos transversais à aplicação do carregamento em dois eixos ortogonais, permitindo com isso a observação mais atenta do comportamento global dos corpos-de-prova, conforme observado na Tabela 5: Deslocamentos registrados pelos RDLs à tensão de escoamento dos corpos-de-prova de *Phyllostachys aurea* ensaiados à compressão.

Tabela 5: Deslocamentos registrados pelos RDLs à tensão de escoamento dos corpos-de-prova de *Phyllostachys aurea* ensaiados à compressão.

CP	Força máx. (kN)	RDL1 em $\sigma_y$ (mm)	RDL2 em $\sigma_y$ (mm)	RDL3 em $\sigma_y$ (mm)	RDL4 em $\sigma_y$ (mm)
CPA1	33,95	0,17	0,01	-0,09	0,05
CPA2	59,70	0,55	0,37	0,24	-0,33
CPA3	34,85	0,27	0,25	-0,25	-0,12

Os RDLs registram leitura positiva quando têm suas hastes retraídas e estão alinhados em ímpares e pares no gabarito (Figura 12a). Observa-se que os corpos-de-prova sofrem uma acomodação antes de começarem a resistir ao carregamento imposto, em geral mediante uma suave inclinação, que pode ser observada nos gráficos subseqüentes pelo afastamento do trecho linear das curvas do deslocamento nulo ou pela descrição de linhas horizontais a partir do mesmo, de maneira simétrica entre os RDLs alinhados. Para tornar mais clara a informação, ícones circulares foram anexados aos gráficos representando os corpos-de-prova com a marcação dos eixos de tomada de medidas dos RDLs, circundados de setas que explicitam o sentido de deslocamento captado por cada dispositivo no trecho aproximadamente linear subseqüente à fase de acomodação dos corpos-de-prova.

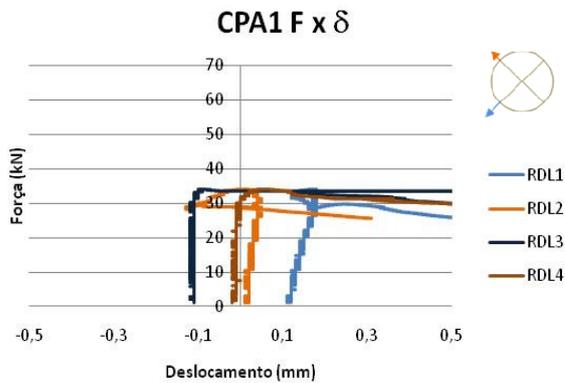


Figura 32: Gráfico força x deslocamento transversal e fotografia do corpo-de-prova 1 ao término do ensaio.

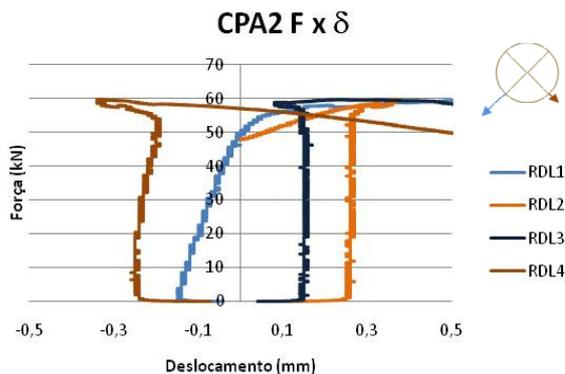


Figura 33: Gráfico força x deslocamento transversal e fotografia do corpo-de-prova 2 ao término do ensaio.

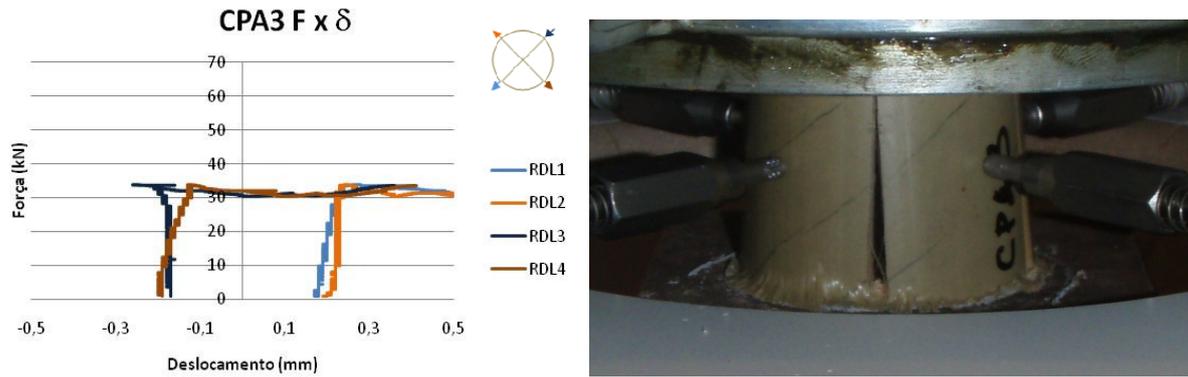


Figura 34: Gráfico força x deslocamento transversal e fotografia do corpo-de-prova 3 ao término do ensaio.

Percebe-se pelos gráficos apresentados, que até o momento da ruptura praticamente não há deslocamento transversal nos corpos-de-prova, tendo sido o maior da ordem de 0,15mm, registrado pelo RDL1 do segundo corpo-de-prova. Após a ruptura os corpos-de-prova tendem a apresentar um movimento de abertura, proporcionando leituras de grandes deslocamentos positivos por todos os RDLs acompanhados de lenta perda de resistência ao carregamento exceto pelo RDL2 do segundo corpo-de-prova que apresentou deslocamento negativo, no caso provocado por uma inclinação, o que pode ser observado com base no seu comportamento simétrico com o RDL4.

O modo de ruptura primário dos corpos-de-prova foi caracterizado pelo aparecimento de trincas diversas e sua propagação por todo o comprimento das amostras. O modo de ruptura secundário fica caracterizado por flexão local das fibras da parte interna do colmo. Com as trincas por todo o comprimento as secções dos corpos-de-prova se dividem em diversos setores de coroa circular iniciando um processo de deslizamento. Por conta da elevada rigidez a parte externa do colmo geralmente permanece íntegra e simplesmente se inclina. O mesmo não ocorre com a parte interna do colmo, onde há flexão local das fibras e deformação do tecido parenquimatoso, incrementada pelo deslizamento dos trechos de colmo (Figura 35). O corpo-de-prova 2 apresentou flambagem local das paredes externas após a ruptura, o que denota uma rigidez inferior à dos demais, possivelmente proveniente de uma idade menor do colmo, o que aparentemente se confirma pelas manchas longitudinais de tom escuro características em colmos jovens desta espécie (Figura 33).

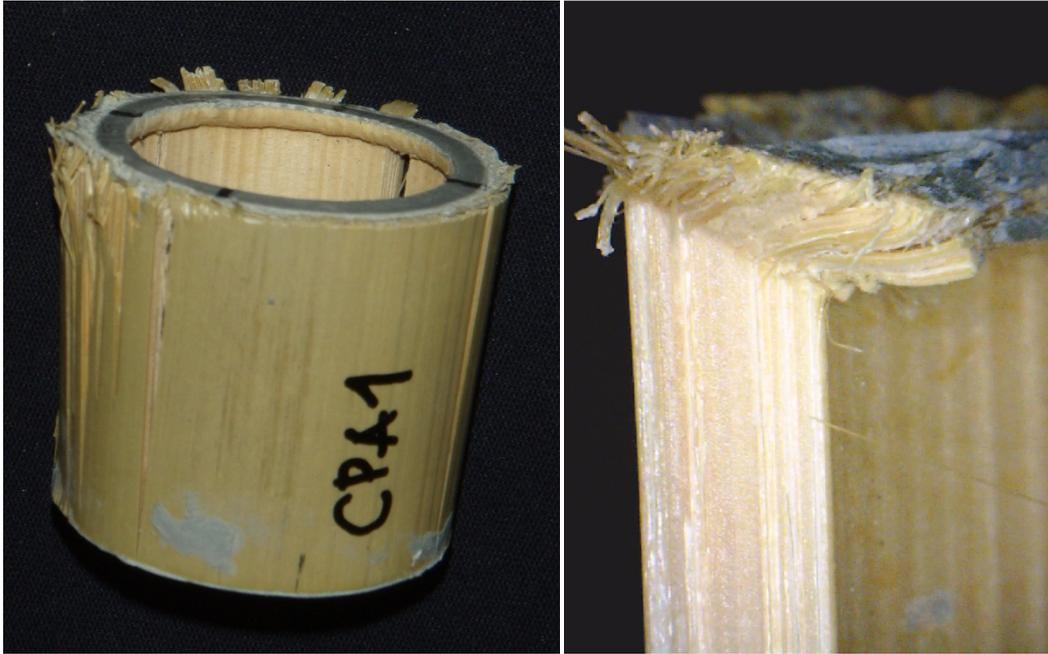


Figura 35: Modos de falha: 1: trincas por todo o comprimento e 2: flexão das fibras internas e ruptura local do tecido parenquimatoso.

Para os corpos-de-prova da espécie *Dendrocalamus giganteus*, duas séries de ensaios foram realizadas. A primeira série com dois ensaios apresentou resultados relativamente baixos de tensão máxima devido a uma falha de dimensionamento que provocou a deformação de uma chapa de aço de 3mm de espessura usada para distribuir os esforços entre o corpo-de-prova e a célula de carga (Figura 36a). Nesta série o modo de ruptura primário se caracterizou por flexão local das fibras associada a inúmeras trincas locais (Figura 36b) e o secundário por trincas por todo o comprimento dos corpos-de-prova.

Para a segunda série de ensaios foi utilizada uma placa mais espessa, 15mm, o que possibilitou a obtenção de resultados mais significativos. A forma semelhante ao final de todas as curvas do gráfico de tensão x deformação longitudinal deve-se ao desligamento manual da máquina, não representando comportamento característico do material (Figura 37).

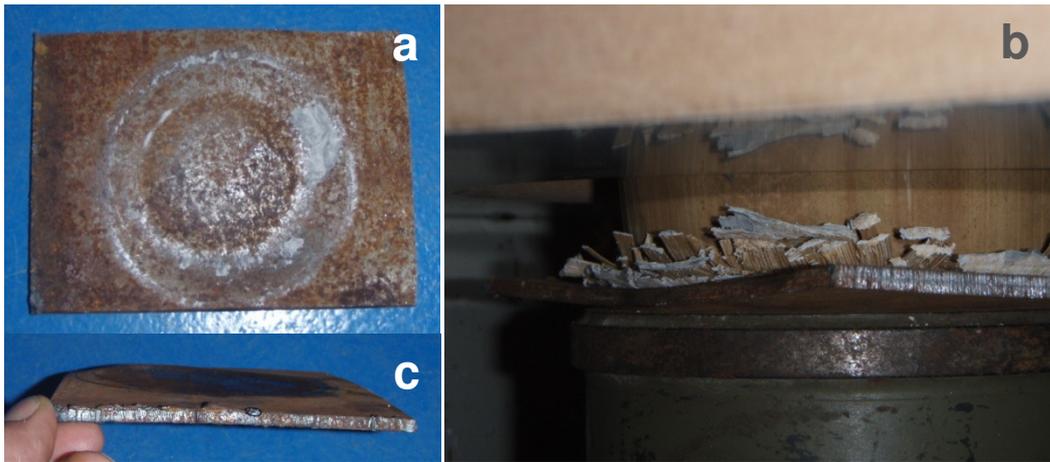


Figura 36: a) Placa de aço deformada na primeira série de ensaios. b) Modo de ruptura primário da primeira série de ensaios e demonstração do empenamento da chapa. c) Demonstração da flexibilidade da chapa.

Tabela 6: Dados obtidos no ensaio à compressão da espécie de bambu *Dendrocalamus giganteus*.

CP	Área da secção (mm <sup>2</sup> )	Tenacidade (kJ/m <sup>2</sup> )	Tensão máx. (MPa)	Deformação longitudinal em $\sigma_{m\acute{a}x}$ . (mm/mm)	Deformação longitudinal máx. (mm/mm)
CDG1	3544,26	5,1718	44,71	0,031	0,150
CDG2	3524,03	4,7704	41,97	0,059	0,131
CDG3	4760,3	3,4216	57,4	0,038	0,080
CDG4	4124,91	2,4611	67,95	0,020	0,057
CDG5	4084,07	3,4262	63,63	0,022	0,75

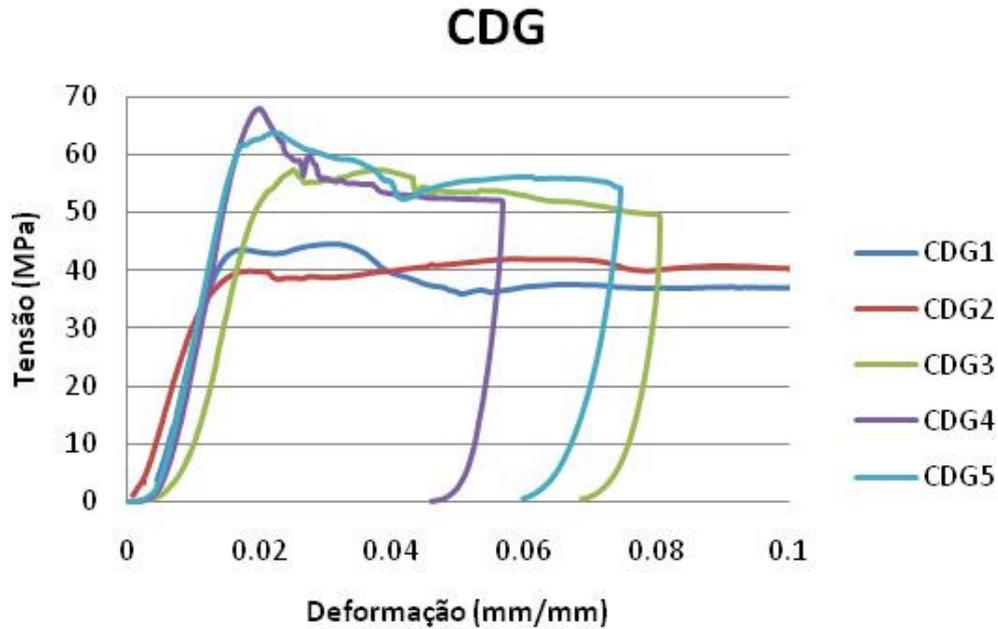


Figura 37: Gráfico tensão x deformação comparativo dos ensaios de compressão de *Dendrocalamus giganteus*.

Observa-se um comportamento tenaz, caracterizado pela lenta perda de carga associada a grandes deformações, bastante regular entre os corpos-de-prova ensaiados. Mesmo entre os corpos-de-prova das duas diferentes séries de ensaios percebe-se que a relação entre tensão e deformação no trecho linear é regular, não apresentando variação significativa do coeficiente angular.

Tabela 7: Leituras de deslocamento transversal obtidas à tensão de ruptura pelos RDLs posicionados no gabarito nos ensaios à compressão de *Dendrocalamus giganteus*.

CP	Força máx. (kN)	RDL1 em $\sigma_y$ (mm)	RDL2 em $\sigma_y$ (mm)	RDL3 em $\sigma_y$ (mm)	RDL4 em $\sigma_y$ (mm)
CDG1	158,4568	-0,22	-0,09	0,81	-0,07
CDG2	147,9116	0,3	-0,03	0,1	0,04
CDG3	273,2427	0,74	0,83	-0,39	0,22
CDG4	280,2947	0,65	0,01	-0,45	0,20
CDG5	259,8524	-0,14	-0,34	0,31	0,47

Conforme ocorrido nos ensaios à compressão da espécie *Phyllostachys aurea*, observa-se uma acomodação dos corpos-de-prova antes de começarem a resistir ao carregamento imposto, em geral mediante uma suave inclinação, que pode ser observada nos gráficos subseqüentes pelo afastamento do trecho linear das curvas do eixo de deslocamento nulo ou pela descrição de linhas horizontais ou curvas não lineares a partir do mesmo, de maneira simétrica entre os RDLs opostos.

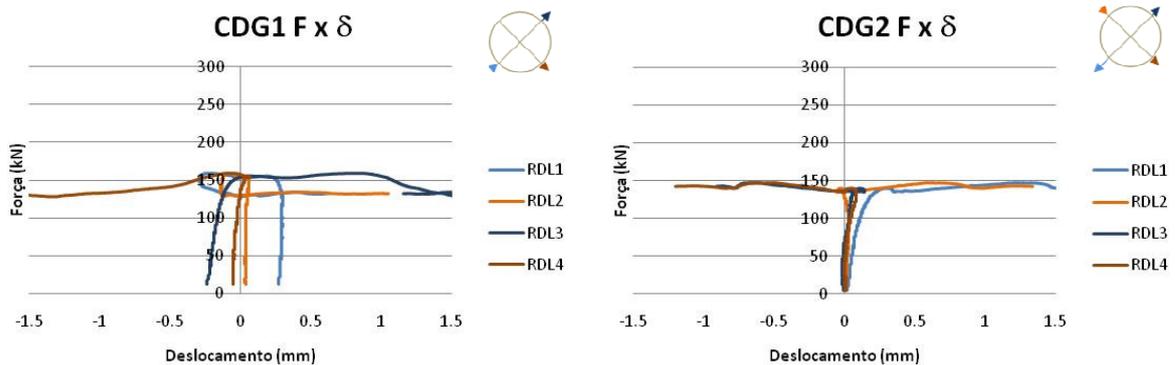


Figura 38: Gráficos força x deslocamento da primeira série de ensaios de compressão de corpos-de-prova de *Dendrocalamus giganteus*.

Os corpos-de-prova 3, 4 e 5 sofreram leve inclinação durante a absorção de carga. Entretanto, pelos gráficos apresentados, percebe-se que até o momento da ruptura não há deslocamento transversal significativo nos corpos-de-prova, tendo sido o maior da ordem de 0,3mm, registrado pelo RDL3 do quinto corpo-de-prova. Após a ruptura os corpos-de-prova tendem, em geral, a apresentar um movimento de abertura, proporcionando leituras de grandes deslocamentos positivos por todos os RDLs acompanhados de lenta perda de resistência ao carregamento. Os dois primeiros corpos-de-prova, diferentemente dos demais, apresentaram inclinação após a ruptura por conta do empenamento da chapa de apoio, o que pode ser observado, especialmente no gráfico do segundo corpo-de-prova, pela simetria das leituras dos RDLs.

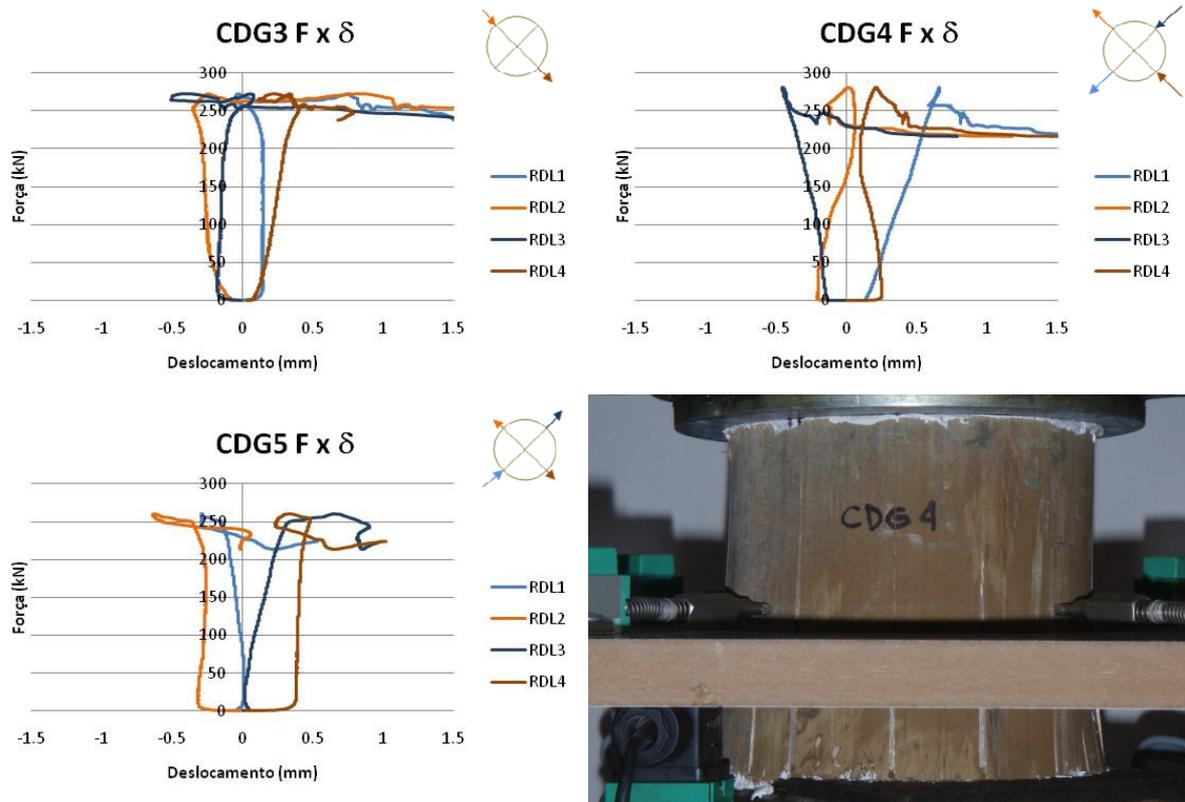


Figura 39: Gráficos força x deslocamento da segunda série de ensaios de compressão de corpos-de-prova de *Dendrocalamus giganteus*. Foto: Modo de falha representativo da segunda série de ensaios.

Na segunda série de ensaios os modos de ruptura ficaram caracterizados por trincas longitudinais diversas por todo o comprimento dos corpos-de-prova (Figura 39/Foto), acompanhado de um leve esmagamento local próximo de um dos pontos de contato com a prensa.

### 3.2.3. Contraplacado de Bambu

#### 3.2.3.1. Tração simples (TCDG)

Conforme ocorrido no ensaio de tração da espécie de bambu *Phyllostachys aurea* anteriormente mencionado, o uso dos RDLs para a leitura dos deslocamentos locais não foi bem sucedido. Os resultados dos ensaios à tração simples dos corpos-de-prova de contraplacado de bambu estão expressos na Tabela 8e na Figura 40.

Tabela 8: Dados obtidos nos ensaios de tração do contraplacado de bambu antissimétrico com quatro camadas orientadas a 45° e 135° duas a duas.

CP	Área da secção	Força máx. (kN)	Tensão máx. (MPa)	Deformação global máx. (mm/mm)	Deformação local máx. (mm/mm)
TCDG1	45,75	0,228	4,98	0,006	0,020
TCDG2	53,25	0,335	6,29	0,0065	-
TCDG3	74	0,409	5,53	0,007	-

### TCDG $\epsilon \times \sigma$

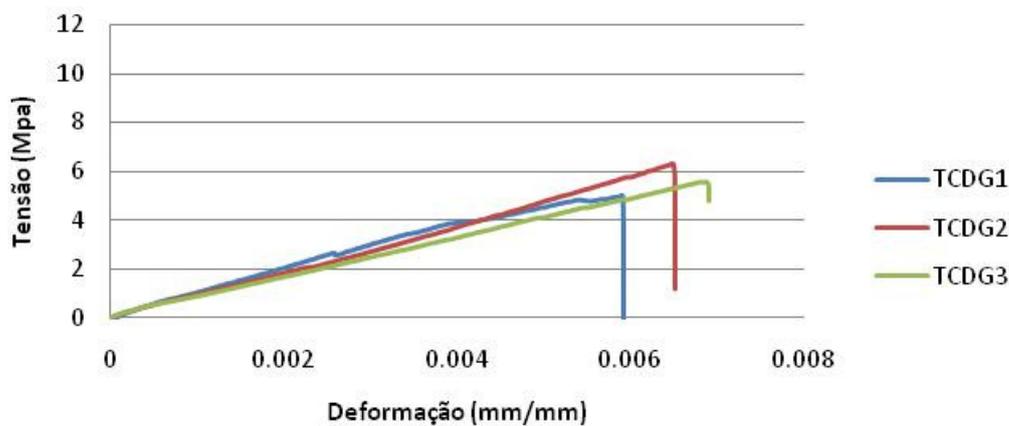


Figura 40: Gráfico tensão x deformação do ensaio de tração do contraplacado com orientação diagonal em quatro camadas ortogonalmente dispostas.

No gráfico pode-se observar que o material apresenta comportamento linear na relação tensão/deformação, percebe-se ainda, especialmente na curva relativa ao primeiro corpo-de-prova, um efeito serrate bastante espaçado, proveniente possivelmente de fissuração do laminado. O material apresentou ruptura brusca em três modos: cisalhamento tipo 1 (abertura) nas lâminas, cisalhamento tipo 3 (rasgamento) interlaminar (fora da linha de colagem) e ruptura por tração na linha da colagem (Figura 41).

Embora menos visível no presente ensaio, entende-se como modo de falha principal o cisalhamento interlaminar, considerando que elementos estruturais quaisquer executados com este material terão como menor medida a espessura do contraplacado e, portanto apresentarão área de contato interlaminar superior às relacionadas aos demais modos de ruptura.



Figura 41: Corpo-de-prova rompido e dois dos modos de ruptura apresentados pelo laminado submetido à tração, respectivamente cisalhamento tipo 1 e descolamento.

### 3.2.3.2. Compressão simples (CCDG)

Os resultados relativos aos ensaios à compressão axial do compósito laminado contraplacado de bambu estão explicitados na Tabela 9.

Tabela 9: Dados obtidos no ensaio de compressão do contraplacado de bambu.

CP	Área da secção (mm <sup>2</sup> )	Carregamento máx. (kN)	Tensão máx. (MPa)	Deformação longitudinal em $\sigma_{\text{máx.}}$ (mm/mm)	Deformação longitudinal máx. (mm/mm)
CCDG1	1000	23,94	23,94	0,042	0,21
CCDG2	1000	22,57	22,57	0,035	0,21
CCDG3	1000	28,94	28,94	0,043	0,17
CCDG4	1000	23,95	23,95	0,030	0,12
CCDG5	1000	22,95	22,95	0,032	0,18

O contraplacado apresentou comportamento tenaz e bastante regular entre os corpos-de-prova ensaiados, como pode ser observado na Figura 42 pela lenta perda de carga e pela proximidade do trecho linear das curvas relativas aos

diversos corpos-de-prova respectivamente. Percebe-se um efeito serrate, mais expressivo nos corpos-de-prova 1 e 4, relativo às diversas rupturas por cisalhamento sofridas seqüencialmente pelos corpos-de-prova. De acordo com os resultados obtidos a relação entre resistência à tração e resistência à compressão é de cerca de 25%, muito embora os resultados dos ensaios realizados à tração não devam ser considerados corretos, uma vez que privilegiam modos de falha secundários do material.

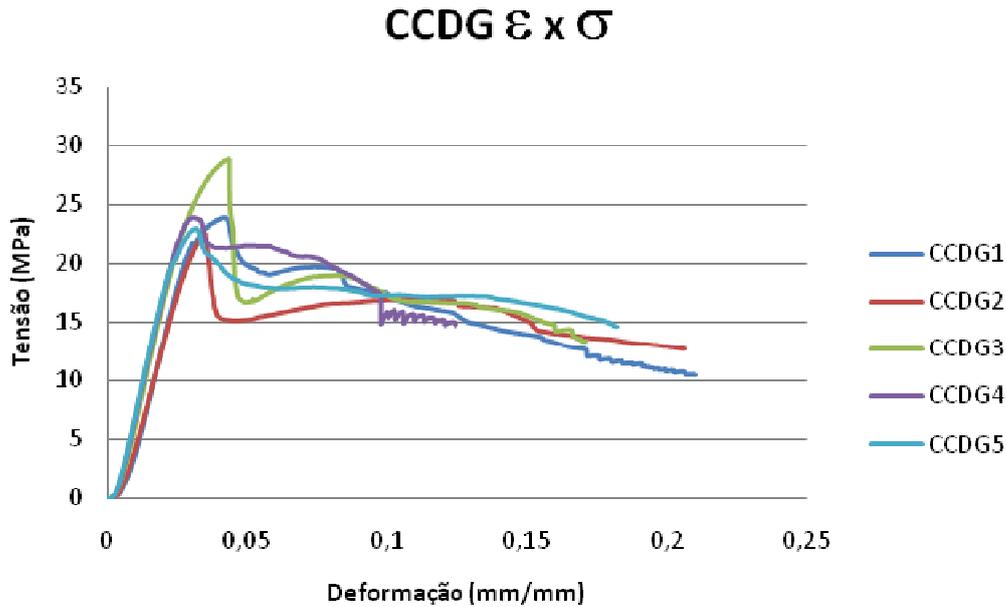


Figura 42: Gráfico tensão x deformação do ensaio de compressão do contraplacado com orientação diagonal em quatro camadas ortogonalmente dispostas.

O modo de ruptura do contraplacado é caracterizado pelo cisalhamento interlaminar do tipo 2, seguido da flambagem das camadas externas. Este processo provoca cisalhamento tipo 1 próximo à linha da colagem (Figura 43a) separando as camadas externas (Figura 43b). O mesmo processo se repete nas camadas internas, associado ao deslizamento entre as réguas (Figura 44).

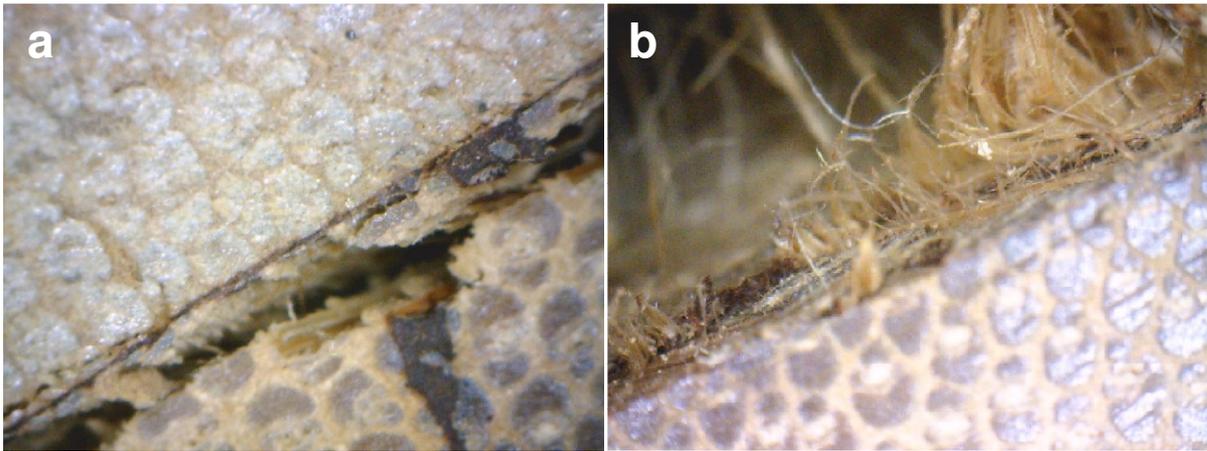


Figura 43: a) Fratura a cisalhamento tipo 1, próxima à linha da colagem. b) As fibras repuxadas caracterizam o cisalhamento por abertura.

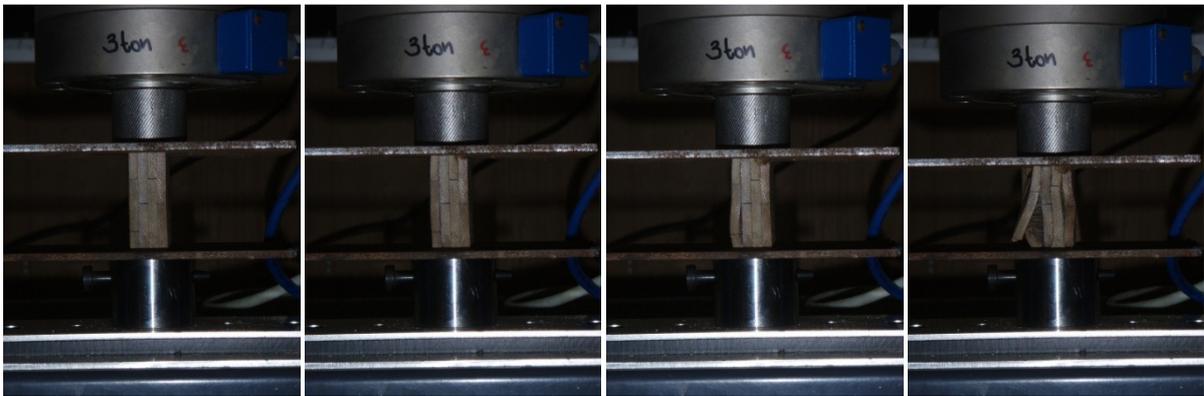


Figura 44: Seqüência ilustrativa do modo de ruptura do contraplacado à compressão axial.

### 3.2.3.3. TPC 15

A furação com eixo a 15 mm do bordo é justificada por ser a distância mínima (arredondada de 13,5mm) a permitir que o plano de falha seja completo no corpo-de-prova, considerando a orientação das lâminas, tendo sido tomada como parâmetro para as demais proposições. Os resultados dos ensaios à tração pinada do contraplacado com esta configuração de furação estão expressos na Tabela 10.

Tabela 10: Tabela com os dados obtidos no ensaio à tração pinada do contraplacado de bambu, com furos a 15mm das extremidades.

CP	Área da secção	Força máx. (kN)	Tensão máx. (MPa)	Deformação global máx. (mm/mm)	Deformação global em $\sigma$ máx. (mm/mm)
TPC15 1	603,675	4,87	8,07	0,064	0,053
TPC15 2	603,675	5,78	9,57	0,039	0,035
TPC15 3	603,675	4,79	7,94	0,030	0,029

### TPC15 $\epsilon$ x $\sigma$

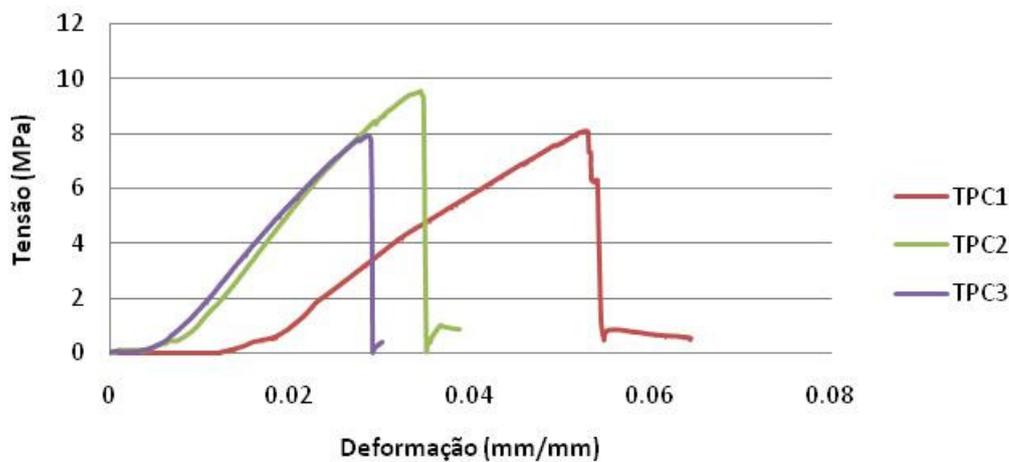


Figura 45: Gráfico de tensão x deformação relativo aos corpos-de-prova ensaiados à tração pinada de contraplacado de bambu, com furos a 15mm das extremidades.

Nota-se (Figura 45) na curva correspondente ao primeiro corpo-de-prova uma deformação global maior, ocorrida pela acomodação da garra no primeiro ensaio. Percebe-se tratar-se de uma acomodação por conta do trecho horizontal a partir do ponto zero, que indica deslocamento sem absorção de carga, fato comum em garras dotadas de castanhas móveis. Nos ensaios subseqüentes a garra não foi mexida, manuseando-se unicamente a pinça perfurada. Tal comportamento se repetirá nas próximas séries de ensaios pelo mesmo motivo, visto que entre as baterias de testes a garra é manuseada adaptando-se a uma nova medida de furação. Nota-se ainda uma inclinação diferenciada na curva, provocada pelo esmagamento da rosca do parafuso responsável pela ligação entre a conexão pinada e a garra pelas suas castanhas, durante a absorção de carga. O trecho linear da curva dos corpos-de-prova TPC 2 e 3 mostra-se

bastante regular o que denota uniformidade comportamental do material sob as condições impostas.

### 3.2.3.4. TPL 25

A distância de 25 mm do bordo deve-se ao fato de ser esta a medida otimizada para um único furo no nó, estando exatamente no centro de cada face perfurada da ligação. Os resultados dos ensaios à tração pinada do contraplacado com esta configuração de furação estão expressos na Tabela 11.

Tabela 11: Tabela com os dados obtidos no ensaio à tração pinada do contraplacado de bambu, com furos a 25mm das extremidades.

CP	Área da secção	Força máx. (kN)	Tensão máx. (MPa)	Deformação global máx. (mm/mm)	Deformação global em $\sigma$ máx. (mm/mm)
TPC15 1	603,675	5,60	9,28	0,048	0,044
TPC15 2	603,675	6,08	10,07	0,037	0,034
TPC15 3	603,675	5,63	9,32	0,037	0,032

### TPC25 $\epsilon \times \sigma$

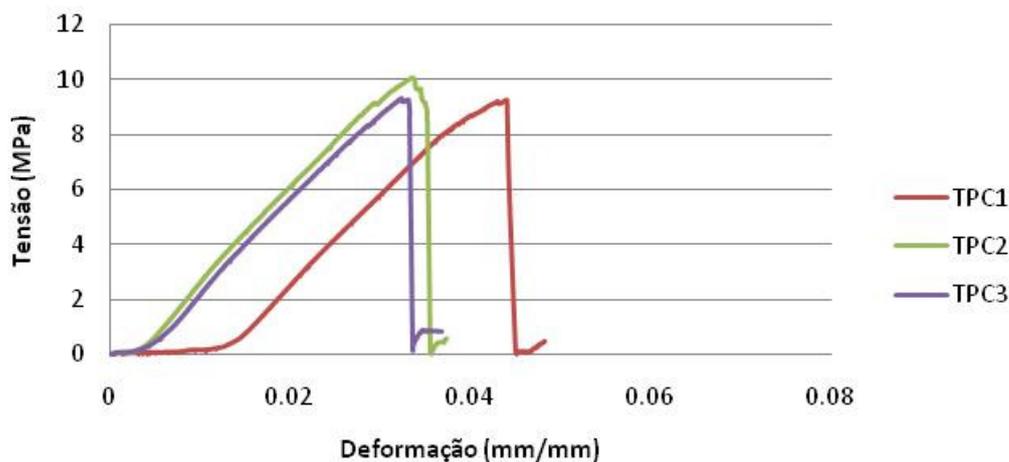


Figura 46: Gráfico de tensão x deformação relativo aos corpos-de-prova ensaiados à tração pinada de contraplacado de bambu, com furos a 25 mm das extremidades.

Observa-se que apesar da adaptação da garra, o coeficiente angular do trecho linear da curva do primeiro corpo-de-prova permanece de acordo com os demais, uma vez que a rosca do parafuso de ligação já havia se adaptado na série de ensaios anterior, reforçando a homogeneidade dos resultados.

Com a furação adotada nesta série de ensaios a resistência média foi aumentada em cerca de 12% em relação ao parâmetro.

### 3.2.3.5. TPL 1531

Os dois furos foram adotados no intuito de distribuir a carga de solicitação reduzindo pela metade a força dos parafusos sobre o contraplacado. As medidas tomaram por base a mínima distância do bordo que permitisse superfície de ruptura completa (15mm) e a maior distância geometricamente possível para permitir o uso de uma chave de estrias em um segundo parafuso (31mm), considerando a presença dos demais nas outras faces do nó.

Tabela 12: Tabela com os dados obtidos no ensaio à tração pinada do contraplacado de bambu, com furos a 15 e 31mm das extremidades.

CP	Área da secção	Força máx. (kN)	Tensão máx. (MPa)	Deformação global máx. (mm/mm)	Deformação global em $\sigma$ máx. (mm/mm)
TPC1531 1	603,675	4,63	7,66	0,025	0,015
TPC1531 2	603,675	6,83	11,31	0,033	0,030
TPC1531 3	603,675	6,50	10,77	0,032	0,030

Os resultados dos ensaios à tração pinada do contraplacado com esta configuração de furação estão expressos na Tabela 12.

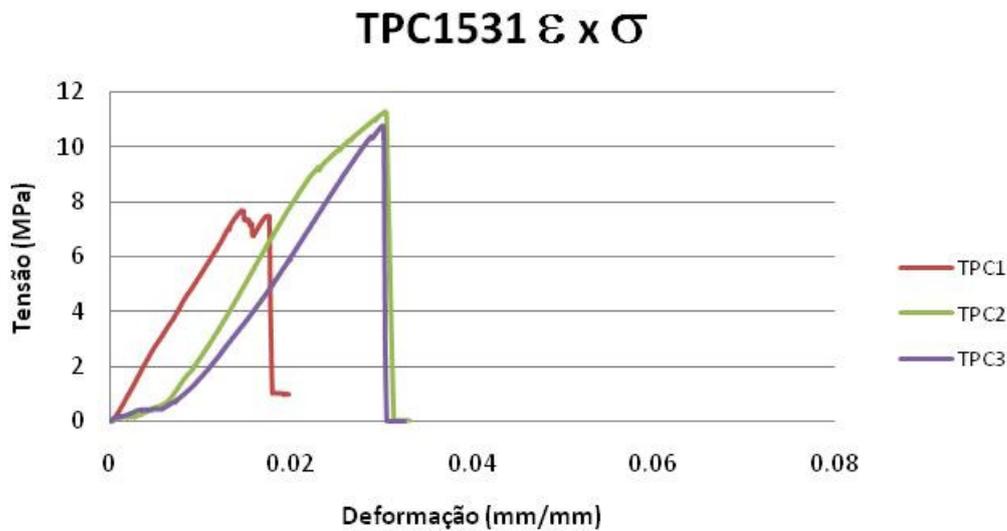


Figura 47: Gráfico de tensão x deformação relativo aos corpos-de-prova ensaiados à tração pinada de contraplacado de bambu, com furos a 15 e 31mm das extremidades.

Para a colocação de corpos-de-prova com dois furos na máquina de ensaios sem mexer na garra o procedimento torna-se um pouco desconfortável de maneira que nesta série de ensaios os conectores pinados foram retirados das garras para a colocação de cada corpo-de-prova, o que justifica o trecho de adaptação ao início das curvas TPC 2 e 3. O primeiro corpo-de-prova ensaiado foi proveniente da primeira placa produzida, que possuía uma série de defeitos, principalmente em relação à colagem, traduzindo a sua baixa resistência. Apesar disso, o seu coeficiente angular mostra-se compatível aos das demais curvas, denotando homogeneidade comportamental.

Apesar da falha precoce do primeiro corpo-de-prova a resistência média foi aumentada em cerca de 15% em relação ao parâmetro. Se o primeiro corpo-de-prova for desconsiderado (no caso é claramente um material falho), a média passa a ser cerca de 30% maior que o parâmetro.

Como pode ser notado pelo trecho linear praticamente vertical ao fim das curvas em todos os casos de furação, o material apresenta ruptura frágil, alinhada com as fibras de cada camada, na região de um dos furos, mediante uma conjugação de cisalhamentos, conforme descrito na introdução do capítulo.

Os valores de tensão máxima apresentam variabilidade decorrente da heterogeneidade do material, que pode no futuro ser reduzida mediante maior controle sobre a quantidade de emendas longitudinais entre as régua, maior

regularização da colagem e um serviço de controle de qualidade, no caso de um processo de produção industrial.

Considerando-se os resultados apresentados, a relação entre resistência à tração pinada e resistência à compressão é de cerca de 50%. Este resultado parece mais realista, uma vez que o modo de ruptura avaliado é o primário.

#### 3.2.4.

#### **Compressão Compósito Bambu-poliéster**

Quatro corpos-de-prova foram ensaiados apresentando comportamento tenaz. Apesar da fissuração o material não desagrega facilmente e continua a absorver carga, mesmo com grandes deformações. A Tabela 13e o gráfico de relações constitutivas da Figura 48explicitam os resultados dos ensaios à compressão dos corpos-de-prova.

Tabela 13: Dados obtidos no ensaio à compressão do compósito particulado bambu-poliéster.

CP	Área da secção (mm <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Força Max. (kN)	Tensão máx. (MPa)	Deformação longitudinal em $\sigma_{m\acute{a}x.}$ (mm/mm)	Deformação longitudinal máx. (mm/mm)
CBP1	1037,76	36,85	20,09	19,355	0,187	0,187
CBP2	1029,22	34,95	28,82	29,666	0,114	0,114
CBP3	1017,88	37,55	14,19	14,444	0,109	0,4
CBP4	1060,73	35,25	13,04	13,829	0,126	0,4

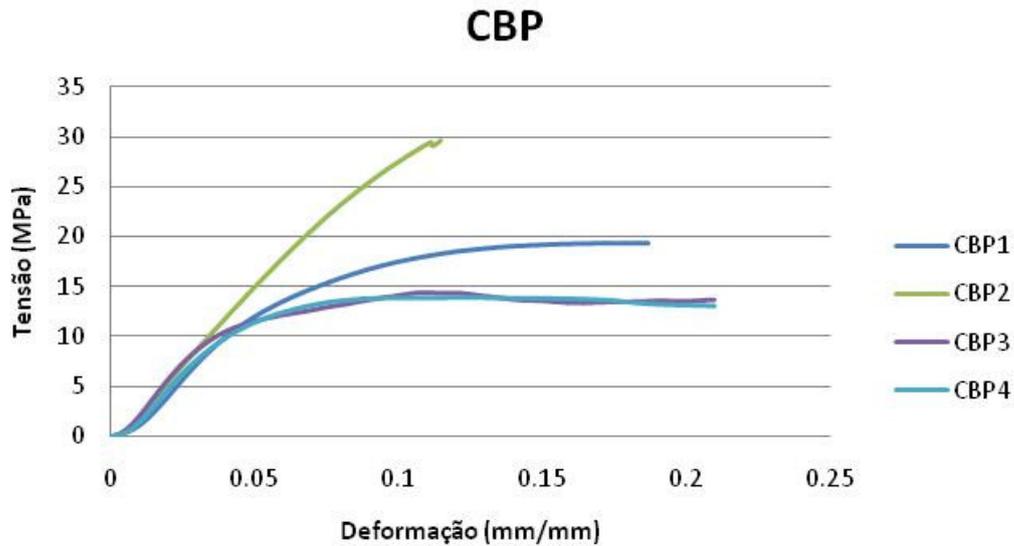


Figura 48: Gráfico tensão x deformação compósito bambu-poliéster.

Por conta de, na manufatura dos corpos-de-prova, a proporção entre os componentes ter sido estabelecida por volume, deve ter havido variabilidade no percentual em massa dos mesmos, o que pode ter ocasionado a diferença na tensão máxima dos corpos-de-prova. Estima-se que corpos-de-prova com maior proporção de resina tenham uma tensão de ruptura mais elevada apresentando, contudo comportamento mais frágil.

### 3.2.5.

#### Tração Compósito Sisal-poliéster

Os resultados obtidos nos ensaios à tração do compósito sisal-poliéster estão explicitados na Tabela 14.

Tabela 14: Dados obtidos no ensaio à tração do compósito cordoalha de sisal-poliéster.

CP	Área da secção	Força máx. (kN)	Tensão máx. (MPa)	Deformação global máx. (mm/mm)	Deformação global em $\sigma_{máx.}$ (mm/mm)
TSP 1	129,03	4,2	32,51	0,0605	0,0243
TSP 2	130	3,74	28,77	0,1077	0,0215

TSP 3	122,64	4,78	38,97	0,0807	0,0339
-------	--------	------	-------	--------	--------

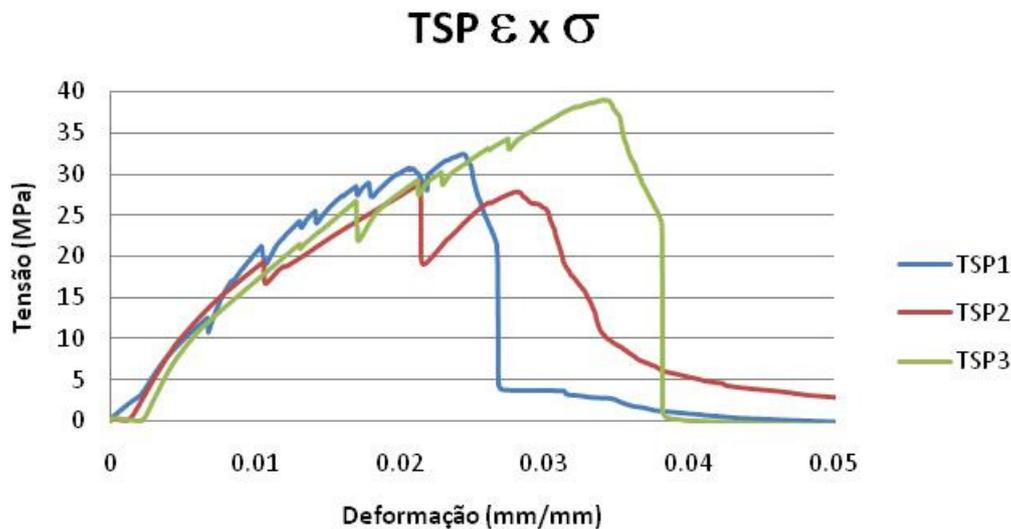


Figura 49: Gráfico tensão x deformação do ensaio à tração do compósito cordoalha de sisal-poliéster.

Percebe-se no gráfico um efeito serrate comum a todas as curvas apresentadas, o que associado à observação do modo de ruptura apresentado na Figura 50 denota fissuração da matriz.

Analisando os dois extremos entre os comportamentos mostrados na Figura 49 nota-se que:

1. A curva correspondente ao corpo-de-prova TSP2 apresenta a menor resistência, além de dentes maiores e mais espaçados, o que representa maior volume e maior espessura livre de matriz. Deste modo apesar de a matriz demorar um pouco mais a fissurar, as trincas são maiores e geram cargas súbitas, que provocam uma ruptura precoce das fibras;
2. A curva correspondente ao corpo-de-prova TSP3 apresenta a maior resistência, dentes menores e mais freqüentes e nota-se pela Tabela 14 que a área da secção é menor, o que indica uma distribuição melhor proporcionada entre matriz e reforço.

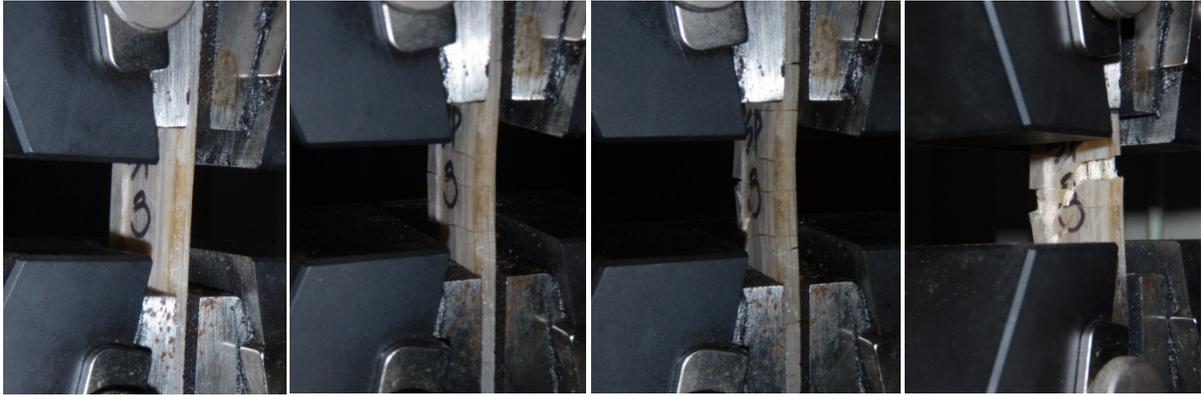


Figura 50: Seqüência ilustrativa do modo de ruptura do compósito à tração.

Analisando microscopicamente os corpos-de-prova após a ruptura pode-se confirmar a fratura prévia da matriz, dada a integridade da cordoalha observada na Figura 51a. A partir da observação da Figura 51b, percebe-se que a molhabilidade das fibras mostra-se prejudicada pelo seu arranjo em cordoalha. Nota-se os cristais de polímero fragmentado somente nas fibras externas, enquanto o centro da cordoalha não aparenta embebedimento prévio.

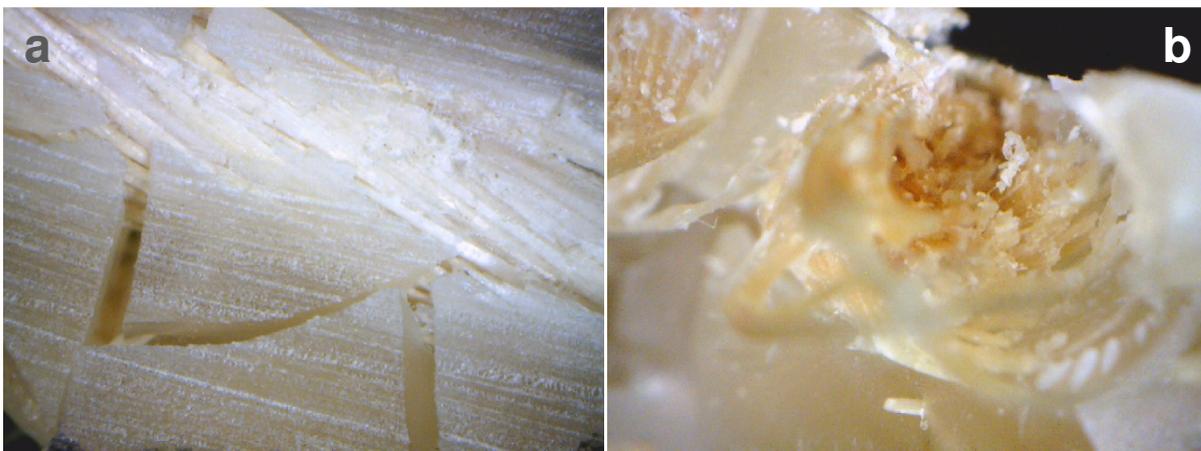


Figura 51: a) Matriz fraturada com cordoalha de reforço íntegra. b) Visão de topo de um trecho da secção transversal.

### 3.2.6.

#### **Compressão Bambu transversalmente reforçado**

A partir dos valores obtidos, plotou-se a curva tensão (MPa) x deformação (mm/mm). Devido à operação manual a prensa tinha de ser desligada ao aproximar-se de seu deslocamento máximo, o que gerou uma curva peculiar em todos os gráficos, a qual não representa comportamento relativo às relações

constitutivas do material. Para efeito de comparação e melhor compreensão limitou-se o eixo das abcissas dos gráficos a 0,05mm/mm, excluindo-se estas curvas (exceto nos corpos-de-prova de altura igual a 4 diâmetros). A tenacidade foi portanto calculada, como a área sob o gráfico de relações constitutivas até o limite estipulado para as abcissas. Nos corpos-de-prova de 4 diâmetros de altura a tenacidade foi calculada até 0,027mm/mm no eixo das abcissas, valor este estipulado de acordo com o menor valor de deformação máxima entre os corpos-de-prova ensaiados.

A nomenclatura dos corpos-de-prova levou em consideração as variáveis: nó (N), reforço (R) e trinca (T), definindo sua presença pelas iniciais das preposições “com” (C) e “sem” (S). Quando não definido ou no intuito de facilitar a compreensão anexa-se à nomenclatura a altura do corpo-de-prova em função do seu diâmetro (d). Ex: SNCRST 2d = Sem nó, com reforço, sem trinca, altura igual a 2 diâmetros.

### 3.2.6.1. 1D

Os corpos-de-prova com um diâmetro de altura foram ensaiados de acordo com a norma proposta pelo INBAR (1999) – ISO/DIS – 22157, de forma a permitir a comparação dos resultados com outros ensaios mencionados na literatura para esta e outras espécies.

Nesta série de ensaios percebe-se, mediante análise conjunta da Tabela 15 e dos gráficos exibidos na Figura 52, que o reforço se mostra mais efetivo no corpo-de-prova sem nó e com trinca, fornecendo neste caso um acréscimo de resistência próximo de 100%, enquanto nos demais casos este acréscimo é de 17,4% em média. Uma tabela comparativa sobre ganhos percentuais de resistência nos corpos-de-prova com alturas diversas será apresentada e discutida após a exposição global dos resultados.

Tabela 15: Dados obtidos no ensaio à compressão dos corpos-de-prova com um diâmetro de altura.

CP 1d	Área da secção (mm <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Tenacidade (kN/m <sup>2</sup> )	Tensão máx. (MPa)	Deformação longitudinal em $\sigma_{máx.}$ (mm/mm)
SNSRST	596,75	47,30	2,2832	58,4	0,062

SNCRST	691,150	52,5	2,617	70,11	0,025
SNSRCT	786,97	48,30	1,3503	39,60	0,026
SNCRCT	628,32	48	2,6293	77,2	0,041
CNSRST	874,62	56,65	1,8886	57,42	0,019
CNCRST	888,28	54,35	2,1542	67,08	0,029
CNSRCT	706,012	48	1,7447	44,84	0,0167
CNCRCT	888,48	52,20	1,8918	51,43	0,036

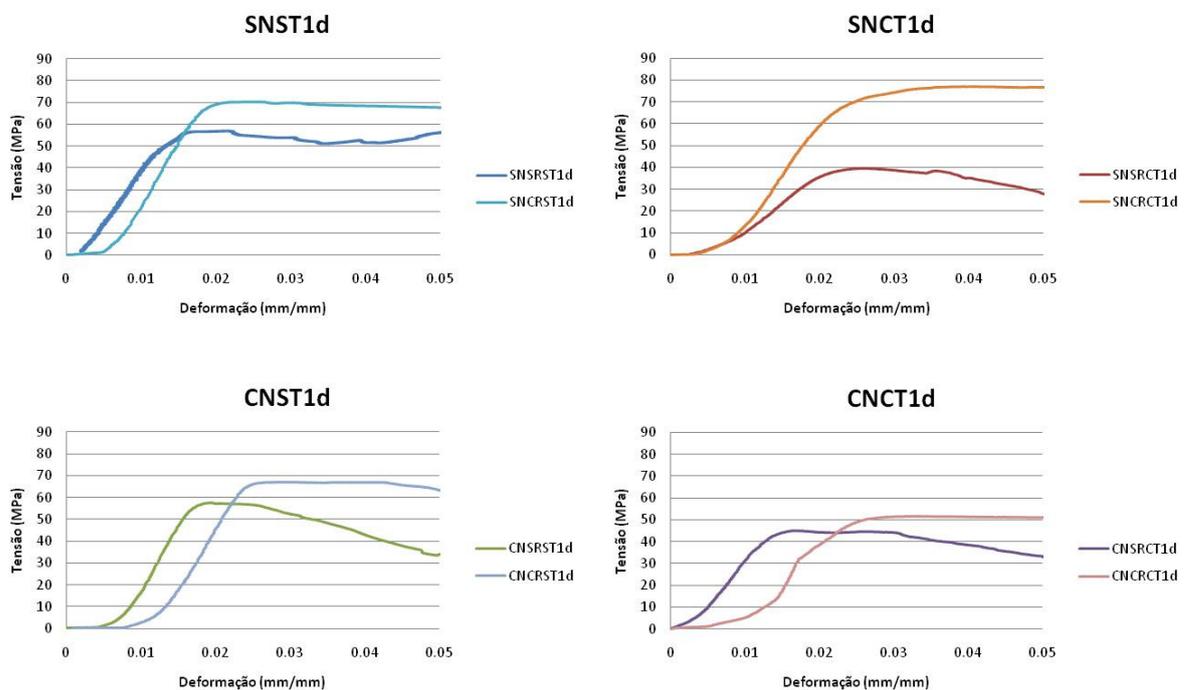


Figura 52: Gráficos tensão x deformação relativos ao ensaio de corpos-de-prova com altura igual a um diâmetro.

Diferentemente dos dados obtidos em bibliografia (Cruz, 2002), os corpos-de-prova com diafragma apresentaram resistência à compressão superior aos sem. Os nós exercem por si a função de travamento transversal, de modo que na sua presença o reforço não se mostra tão efetivo no ganho de resistência. Entretanto, por impedir a formação de trincas e a abertura das existentes ocorre ganho de tenacidade, observado pela perda mais lenta de resistência com o aumento da deformação em relação aos corpos-de-prova sem reforço.

Outro aspecto a ser analisado é a relação entre força aplicada e deslocamento transversal conforme anteriormente realizado nos ensaios à compressão das espécies de bambu *Phyllostachys aurea* e *Dendrocalamus giganteus*. Como nos demais gráficos do gênero anteriormente exibidos, um ícone circular simbolizando o corpo-de-prova com a marcação dos eixos de tomada de medida dos RDLs foi posto em anexo, com setas indicando o sentido de deslocamento. Nos corpos-de-prova trincados, o símbolo  $\times$  representa a posição da fissura no colmo. Este esquema será adotado também para os corpos-de-prova de dois e quatro diâmetros de altura.

Tabela 16: Deslocamentos transversais obtidos no ensaio à compressão dos corpos-de-prova com um diâmetro de altura.

CP 1d	Força máx. (kN)	RDL1 em $\sigma_y$ (mm)	RDL2 em $\sigma_y$ (mm)	RDL3 em $\sigma_y$ (mm)	RDL4 em $\sigma_y$ (mm)
SNSRST	34,85	0,27	0,25	-0,25	-0,12
SNCRST	48,46	0,64	0,47	-0,32	-0,59
SNSRCT	31,16	-0,01	0,02	0,18	0,31
SNCRCT	48,51	0,05	-0,36	0,32	0,33
CNSRST	50,22	-0,08	-0,02	0,43	0,19
CNCRST	59,58	-0,14	-0,24	-0,06	0,23
CNSRCT	31,66	0,01	-0,1	0,02	0,19
CNCRCT	45,69	-0,11	-0,11	-0,01	0,36

Pela observação dos gráficos nota-se que em muitos dos ensaios ocorre uma adaptação dos corpos-de-prova antes de começarem a resistir ao carregamento. Este fato se processa normalmente por meio de uma pequena inclinação, que pode ser constatada nos gráficos por um afastamento do ponto zero do eixo horizontal, em geral simétrico entre os RDLs alinhados (isto é, 1 e 3; 2 e 4).

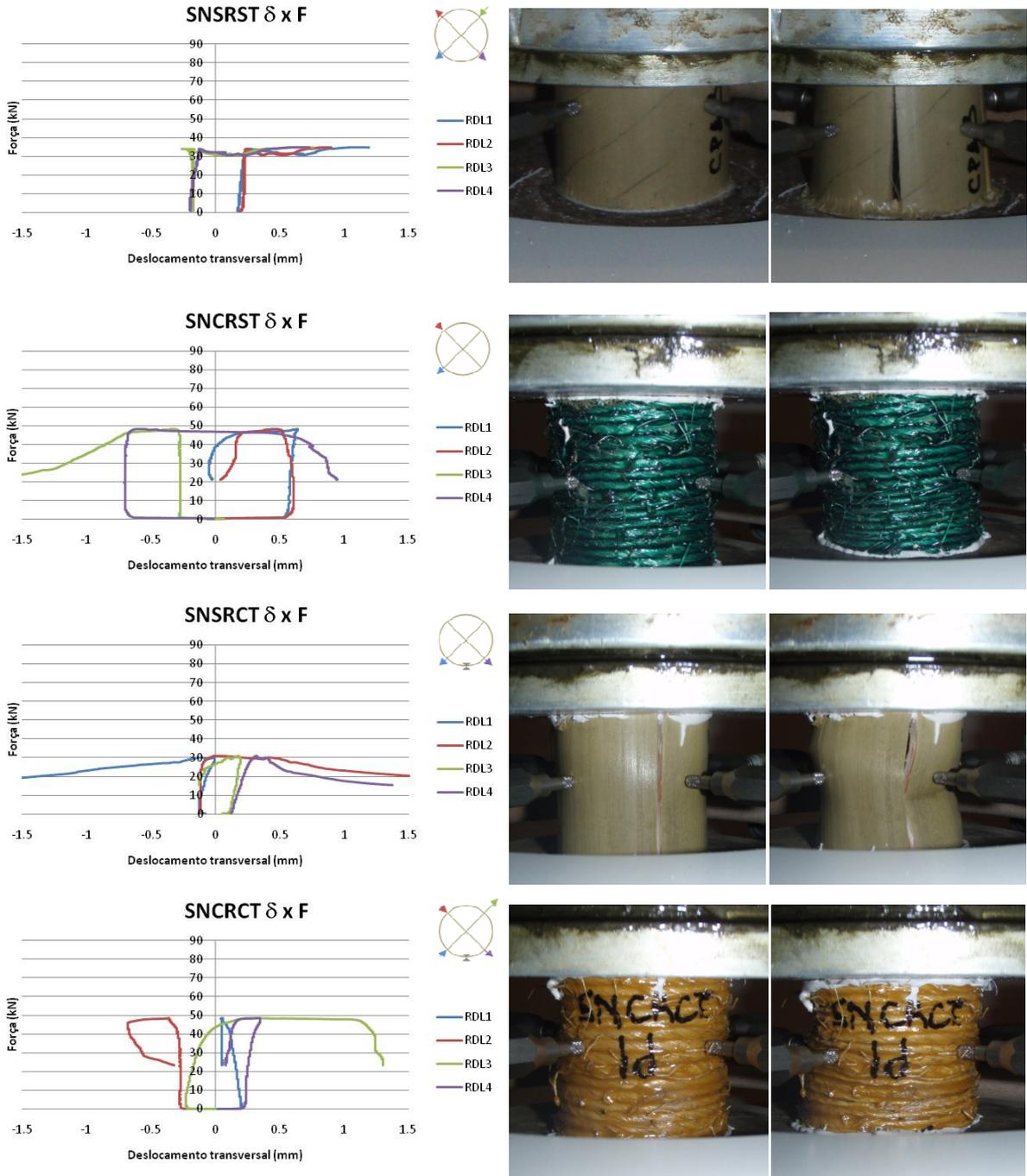


Figura 53: Curvas força x deslocamento transversal e fotos antes e depois do ensaio dos corpos-de-prova sem diafragma com altura igual a um diâmetro.

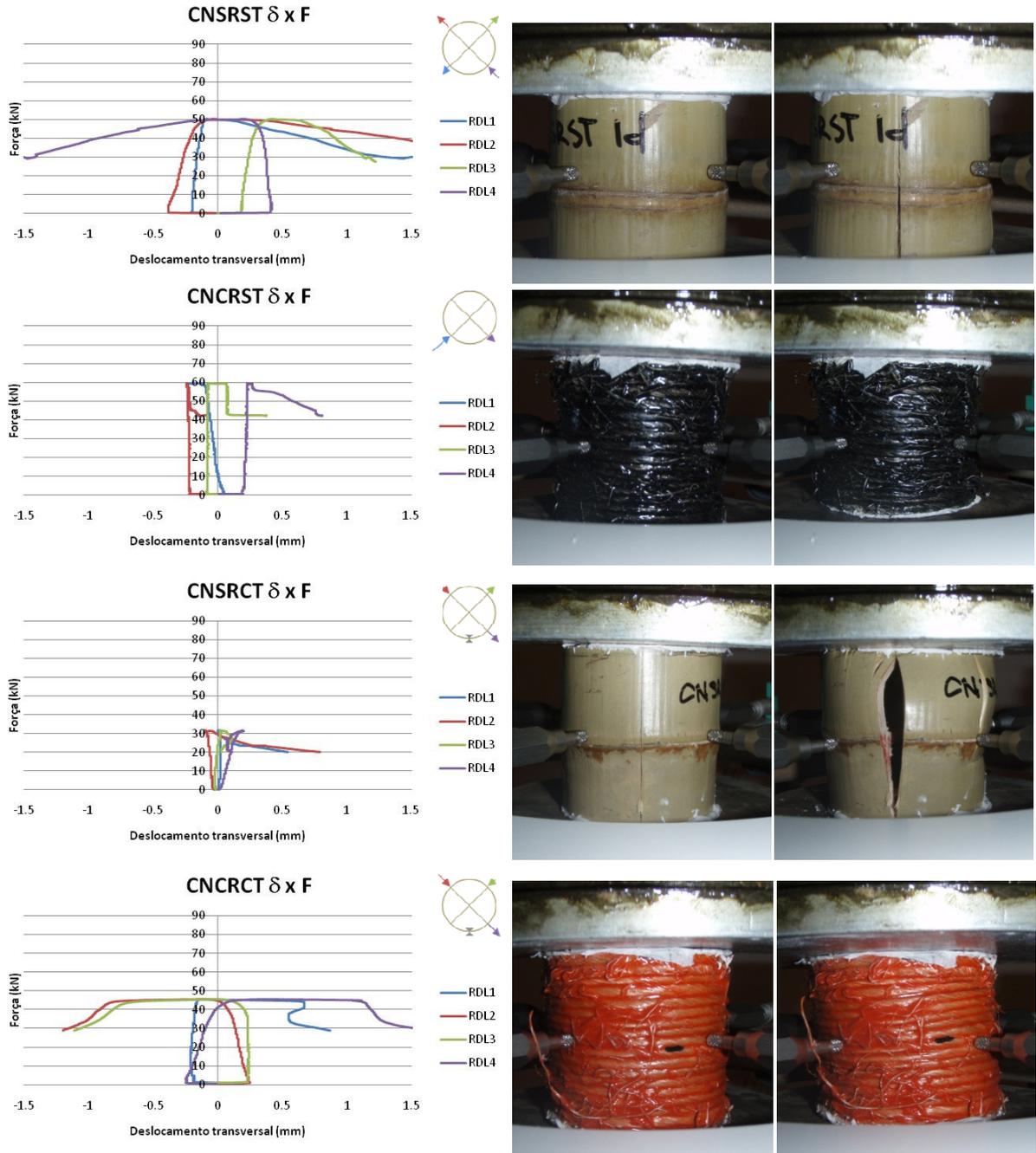


Figura 54: Curvas força x deslocamento transversal e fotos antes e depois do ensaio dos corpos-de-prova com diafragma com altura igual a um diâmetro.

Fora do trecho de adaptação, dada a baixa altura dos corpos-de-prova, dificilmente são percebidos deslocamentos expressivos até a tensão de escoamento. Todavia, no intuito de avaliar o comportamento do material, os ensaios prosseguiram após a tensão máxima.

Corpos-de-prova sem diafragma:

Os modos de ruptura de corpos-de-prova íntegros, sem reforço e com um diâmetro de altura já foram explicitados anteriormente. O modo de ruptura do corpo-de-prova com fratura induzida é caracterizado por flexo-compressão das paredes como um efeito global e por esmagamento com formação de novas trincas nos pontos de contato. Os corpos-de-prova reforçados com e sem trinca apresentaram comportamento semelhante, caracterizado por esmagamento do tecido parenquimatoso seguido de flambagem local das paredes, apresentando internamente deformações em forma de ondas horizontais.

Corpos-de-prova com diafragma:

Os corpos-de-prova íntegros e sem reforço apresentaram trincas locais próximas dos pontos de contato, que se propagaram por todo o comprimento. Nos corpos-de-prova com fratura induzida, a ruptura ocorreu por abertura e flambagem global das paredes junto à trinca, associada à criação de novas fissuras. Durante o processo de abertura da trinca principal o diafragma foi solicitado à tração (radial ao corpo-de-prova), partindo-se em diversos pedaços (Figura 55a). Os corpos-de-prova reforçados apresentaram modo de falha idêntico, sem influência da trinca, por esmagamento do parênquima. Após a ruptura, no intuito de analisar o comportamento do material percebe-se que, como dificilmente os diafragmas estão exatamente perpendiculares ao eixo longitudinal do colmo, cria-se uma tendência de movimentação do nó sob compressão que culmina num efeito de flambagem global (Figura 55b). Este efeito se intensifica com o aumento da inclinação do diafragma.

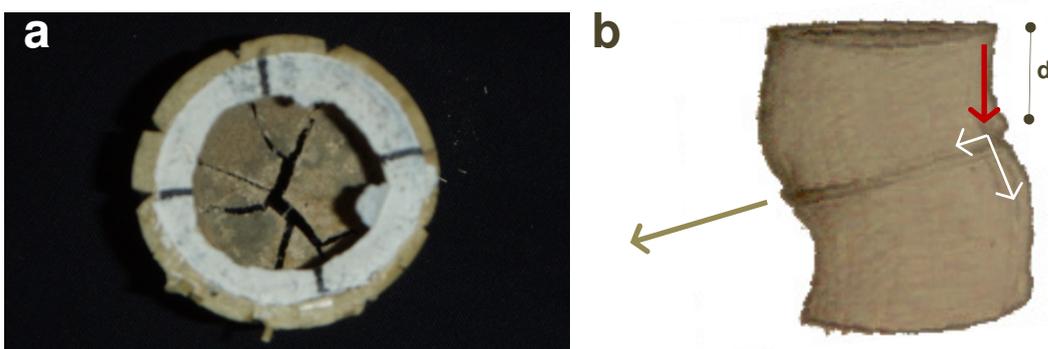


Figura 55: a) diafragma trincado sob compressão do corpo-de-prova. b) Flambagem provocada pelo deslocamento do diafragma

Este efeito é regido pelo trecho de maior rigidez no corpo-de-prova definido principalmente pela menor distância “d” entre o bordo e o nó, aliada a maior

espessura local de parede. O trecho mais rígido empurra o diafragma que tende a movimentar-se axialmente. Externamente isto se caracteriza pela inclinação dos corpos-de-prova de acordo com a falha predominante.

### 3.2.6.2. 2D

Os corpos-de-prova com dois diâmetros de altura visaram o estabelecimento de um ponto intermediário entre os ensaios à compressão normalizados (1D) e os ensaios com corpos-de-prova alongados (4D), além da comparação com trabalhos anteriores à normalização (para bambu) e com materiais compósitos, inclusive concreto, que em geral adotam esta metodologia.

Tabela 17: Dados obtidos no ensaio à compressão dos corpos-de-prova com dois diâmetros de altura.

CP 2d	Área da secção (mm <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Tenacidade (kN/m <sup>2</sup> )	Tensão máx. (MPa)	Deformação longitudinal em $\sigma_{máx.}$ (mm/mm)
SNSRST	699	102,25	1,8081	53,09	0,012
SNCRST	682,51	93,70	2,6213	68,06	0,036
SNSRCT	593,76	94,4	1,3558	42,17	0,026
SNCRCT	653,45	104,35	2,0591	53,97	0,021
CNSRST	586,63	90,75	2,4553	85,2	0,022
CNCRST	849,251	109,1	3,402	80,57	0,020
CNSRCT	819,996	104,15	1,6928	66,54	0,017
CNCRCT	738,08	101	3,7566	88,25	0,027

Foram percebidas algumas variações relativas à efetividade do reforço nos corpos-de-prova em relação aos corpos-de-prova com um diâmetro de altura. Pôde-se observar mais claramente o ganho de tenacidade em todos os corpos-de-prova reforçados, entretanto o ganho de resistência não foi uma constante.

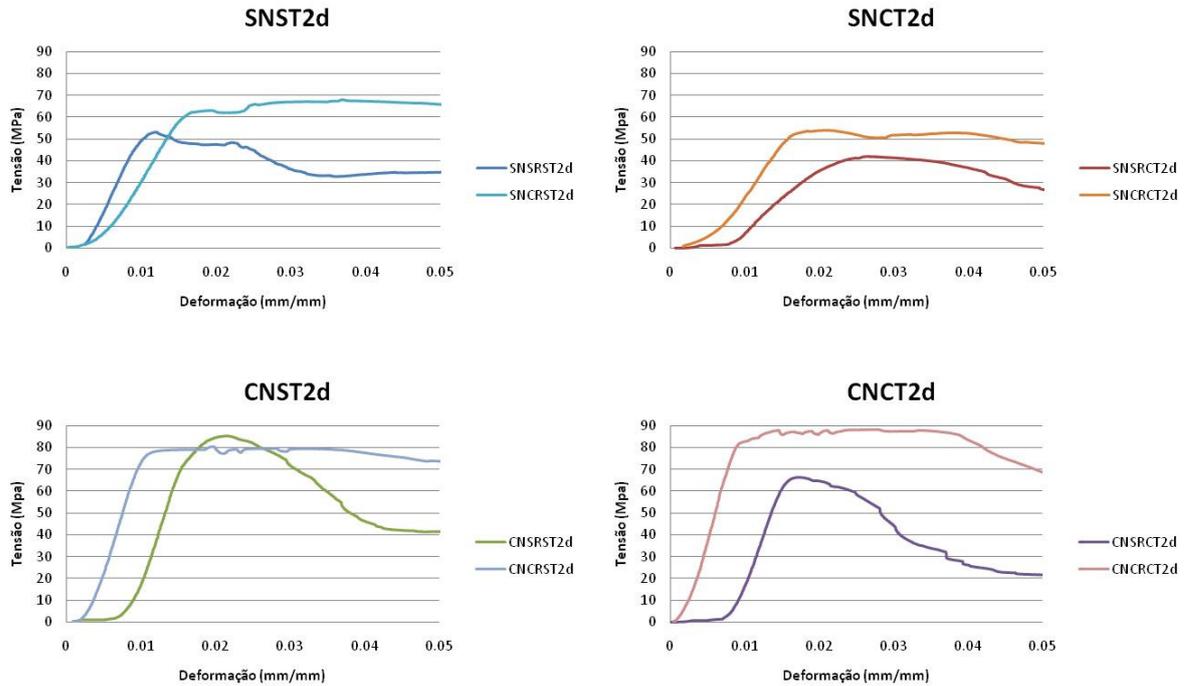


Figura 56: Gráficos tensão x deformação relativos ao ensaio de corpos-de-prova com altura igual a dois diâmetros.

O corpo-de-prova com nó, sem trinca reforçado apresentou resistência última inferior à do não reforçado, o que não era esperado, apesar de o reforço anteriormente ter se mostrado menos efetivo nos corpos-de-prova com diafragma. Pelo contrário, esperava-se que, com a diminuição proporcional da influência do nó em corpos-de-prova mais altos o reforço obtivesse proporcionalmente melhores resultados, conforme pôde ser observado nos corpos-de-prova trincados e com diafragma. Ao mesmo tempo, esperava-se que o reforço tivesse menor atuação nos corpos-de-prova sem nó e sem trinca por conta da diminuição da influência do efeito de Poisson em corpos-de-prova mais altos e fosse mais efetivo nos corpos-de-prova sem nó e com trinca, nos quais a tendência de ruptura à flexo-compressão seria maior dado o aumento da razão de esbeltez (embora ainda bastante robusta), tendo entretanto se observado exatamente o oposto.

De um modo geral os corpos-de-prova se comportaram da mesma maneira que os com um diâmetro de altura, não apresentando deslocamentos transversais consideráveis antes da ruptura.

Tabela 18: Deslocamentos transversais obtidos no ensaio à compressão dos corpos-de-prova com dois diâmetros de altura.

CP 2d	Força máx. (kN)	RDL1 em $\sigma_y$ (mm)	RDL2 em $\sigma_y$ (mm)	RDL3 em $\sigma_y$ (mm)	RDL4 em $\sigma_y$ (mm)
SNSRST	37,11	0,15	-0,43	-0,09	0,33
SNCRST	44,47	0,5	-0,27	-0,44	0,13
SNSRCT	25,036	-0,16	0,2	0,2	0,13
SNCRCT	33,91	-0,53	0,13	0,55	-0,4
CNSRST	49,98	-0,46	-0,27	0,36	0,39
CNCRST	68,43	-0,38	0,27	0,26	-0,42
CNSRCT	54,56	0,25	0,06	-0,1	0,22
CNCRCT	65,14	-0,12	-0,06	0,2	-0,05

Quanto aos modos de falha algumas alterações puderam ser observadas.

Corpos-de-prova sem diafragma:

Nos corpos-de-prova sem reforço as falhas locais por esmagamento e criação de múltiplas fissuras foram mais pronunciadas, em especial no corpo-de-prova íntegro, que sofreu alargamento de fuste considerável em um dos pontos de contato com a prensa, relegando trincas longitudinais por todo o comprimento a um modo de ruptura secundário. Este efeito de alargamento também é satisfatoriamente contido pelo reforço transversal, justificando de certo modo a maior influência do reforço neste caso. O corpo-de-prova fraturado apresentou flexão das paredes próximas de um dos bordos em contato com a prensa, junto à trinca, provocando a sua abertura e o colapso global. As curvas de deslocamento transversal obtidas pelos RDLs 2 e 4 neste corpo-de-prova foram extremamente não lineares, demonstrando inclinações (dada a simetria) com sentido variável. Este fato ocorreu por conta de a falha por flexão das paredes dos dois lados da trinca não ter sido simultânea. Desta maneira a falha de um dos lados o corpo-de-prova provocou um sentido preferencial de inclinação que mudou após a segunda ruptura.

Os corpos-de-prova reforçados apresentaram comportamento idêntico, sem influência da trinca, semelhante ao dos corpos-de-prova com um diâmetro de altura.

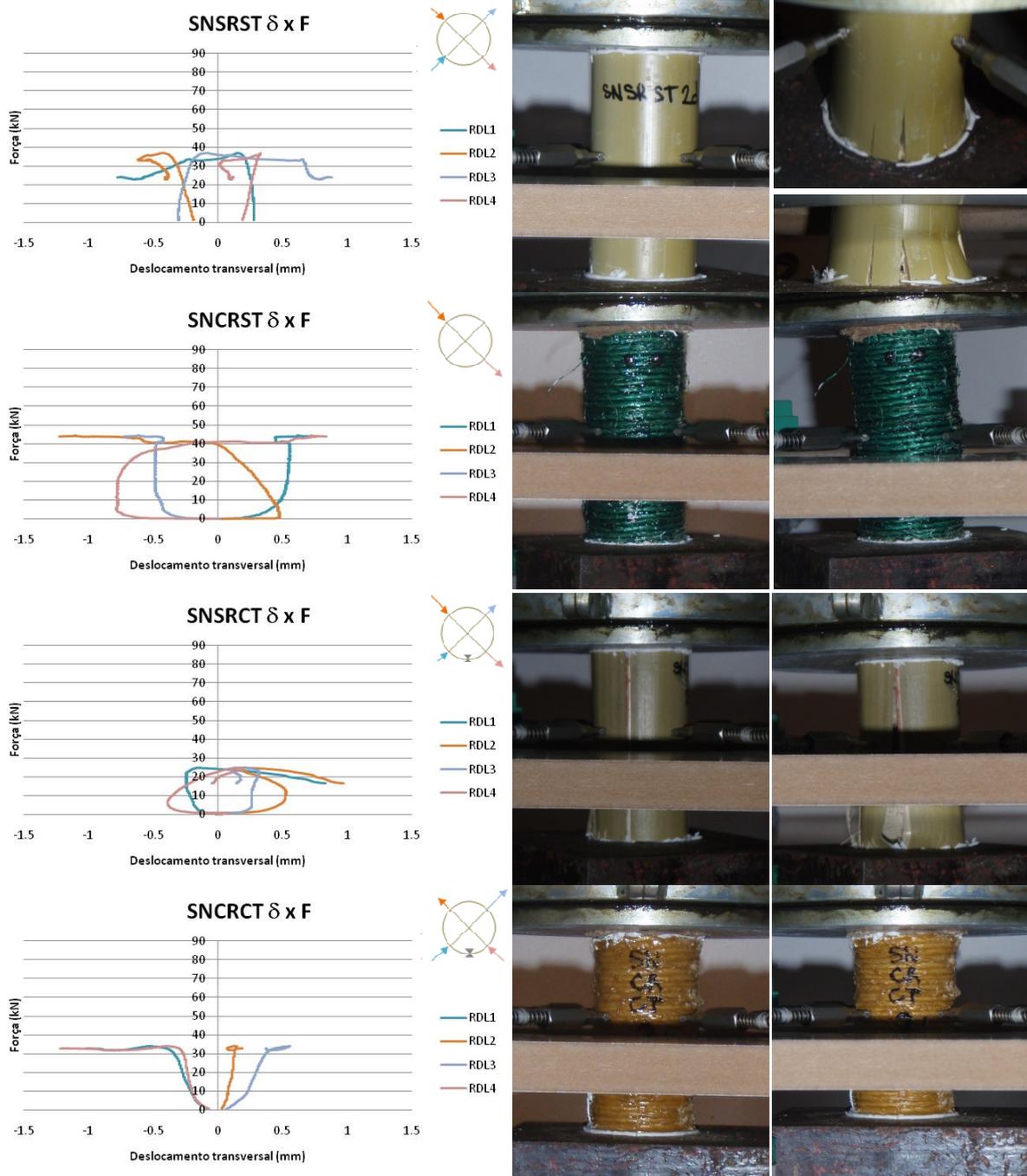


Figura 57: Curvas força x deslocamento transversal e fotos antes e depois do ensaio dos corpos-de-prova sem diafragma com altura igual a dois diâmetros.

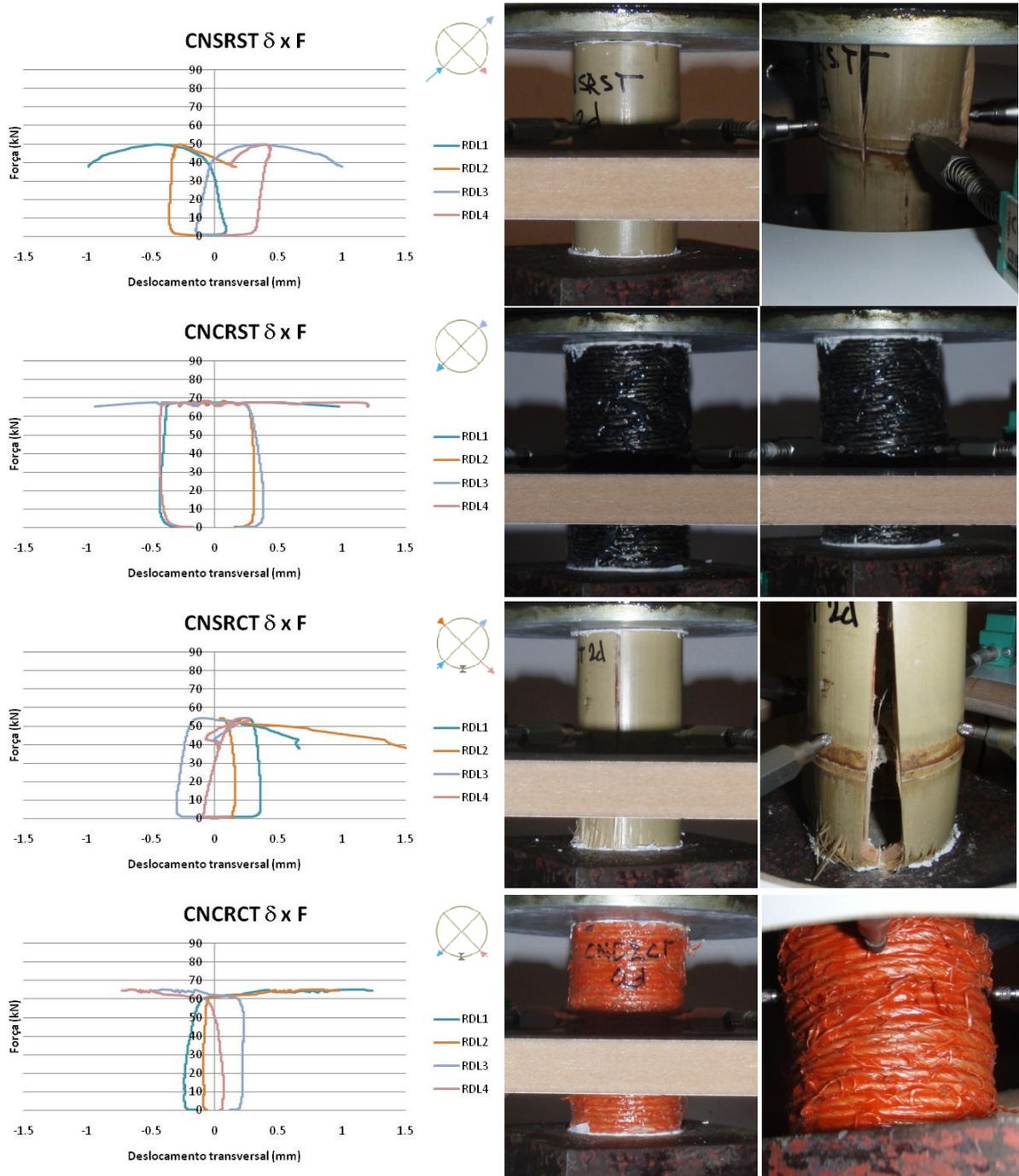


Figura 58: Curvas força x deslocamento transversal e fotos antes e depois do ensaio dos corpos-de-prova com diafragma com altura igual a dois diâmetros.

Corpos-de-prova com diafragma:

Os modos de ruptura do corpo-de-prova com diafragma e sem trinca não se alteraram em relação à série anterior de ensaios. No corpo-de-prova trincado o modo de ruptura foi uma intersecção entre o apresentado nos corpos-de-prova trincados sem reforço de um diâmetro com nó e de dois diâmetros sem nó, apresentando falha local por flexão das paredes junto à trinca, na região de

contato com a prensa, fissuração múltipla com propagação de trincas por todo o comprimento e fratura múltipla do diafragma por solicitação radial.

Nos corpos-de-prova reforçados o efeito de deslocamento do diafragma ocorre também da maneira anteriormente explicitada, embora seja mais visível por conta do maior comprimento dos corpos-de-prova.

### 3.2.6.3. 4D

A altura de quatro diâmetros, cerca de 20cm, representa o máximo comprimento internodal para esta espécie de bambu, tendo sido levada em conta por proporcionar uma observação mais clara entre os mecanismos de falha local e global, permitindo com isto uma melhor percepção do que seria o comportamento de um elemento estrutural reforçado.

Tabela 19: Dados obtidos no ensaio à compressão dos corpos-de-prova com quatro diâmetros de altura.

CP 4d	Área da secção (mm <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Tenacidade (kN/m <sup>2</sup> )	Tensão máx. (MPa)	Deformação longitudinal em $\sigma_{\text{máx.}}$ (mm/mm)
SNSRST	791,534	201	0,7089	35,75	0,01
SNCRST	1077,57	204	1,1978	52,6	0,02
SNSRCT	644,03	201	0,6656	36,73	0,008
SNCRCT	667,59	204	1,2584	60,87	0,012
CNSRST	1121,55	201	1,1247	56,95	0,007
CNCRST	644,03	204	1,4801	66,98	0,021
CNSRCT	722,57	201	0,4878	34,1	0,010
CNCRCT	826,43	203	0,9685	48,79	0,023

Todos os corpos-de-prova reforçados apresentaram ganho de resistência e tenacidade em relação aos seus respectivos pares.

Conforme esperado o reforço mostrou-se mais efetivo nos corpos-de-prova trincados, em especial no desprovido de diafragma.

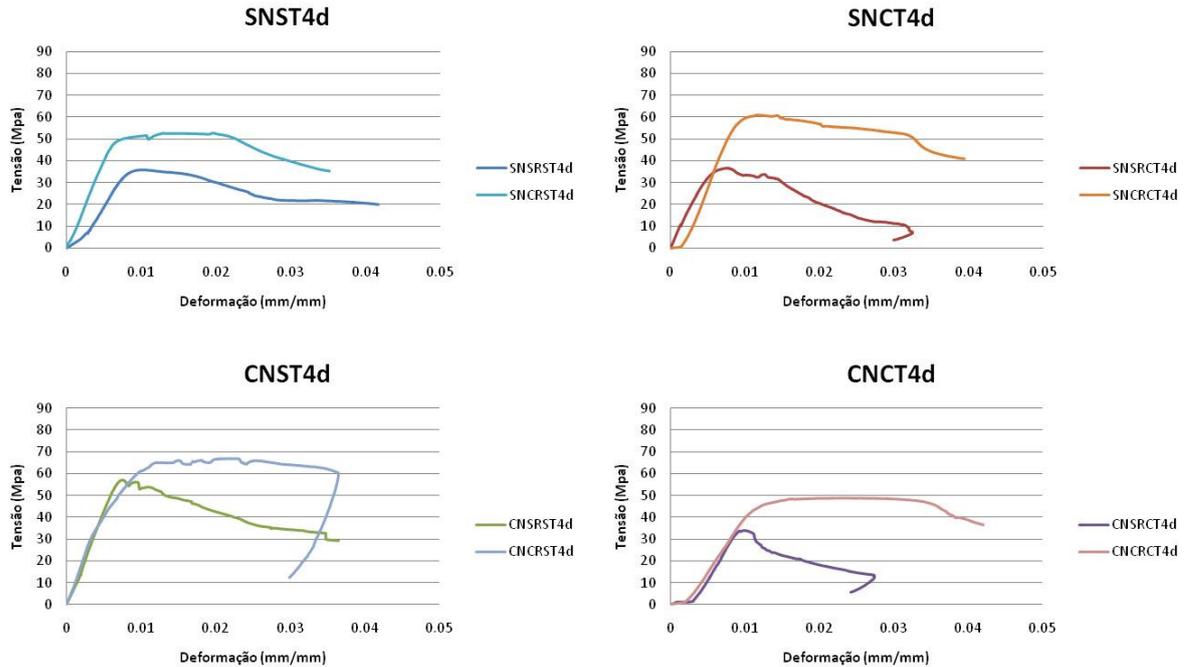


Figura 59: Gráficos tensão x deformação relativos ao ensaio de corpos-de-prova com altura igual a quatro diâmetros.

Tabela 20: Deslocamentos transversais obtidos no ensaio à compressão dos corpos-de-prova com quatro diâmetros de altura.

CP 4d	Força máx. (kN)	RDL1 em $\sigma_y$ (mm)	RDL2 em $\sigma_y$ (mm)	RDL3 em $\sigma_y$ (mm)	RDL4 em $\sigma_y$ (mm)
SNSRST	28,30	0,32	-0,01	-0,07	-0,11
SNCRST	56,68	-0,37	-0,58	0,2	0,91
SNSRCT	23,66	0,13	-1,2	0,24	0,46
SNCRCT	40,64	-0,17	-0,33	0,42	0,27
CNSRST	63,87	-0,02	-0,21	0,03	0,29
CNCRST	43,14	0,34	0,17	-0,35	-0,14
CNSRCT	24,64	0,38	-0,17	-0,53	0,36
CNCRCT	40,32	-0,82	-0,31	0,66	0,13

Em geral os corpos-de-prova não apresentaram deslocamentos transversais consideráveis até a ruptura, à exceção do corpo-de-prova trincado

sem diafragma e sem reforço, que se deslocou cerca de 1,2mm em  $\sigma_{\text{máx}}$ , segundo leitura registrada pelo RDL 2, no respectivo ensaio.

Os modos de ruptura dos corpos-de-prova apresentaram diversas mudanças em relação às séries anteriores.

Corpos-de-prova sem diafragma:

O corpo-de-prova íntegro sem reforço apresentou esmagamento do tecido parenquimatoso, fissuração múltipla, que provocou flambagem local e alargamento do fuste numa das zonas de contato com a prensa. As trincas formadas não chegaram a se propagar durante o ensaio (até o limite de deslocamento da prensa). O corpo-de-prova trincado sem reforço apresentou modo de falha primário semelhante ao corpo-de-prova com dois diâmetros de altura, por flexão das paredes próximas de um dos bordos em contato com a prensa, junto à trinca, provocando a sua abertura e o colapso global a flexo-compressão, mediante ruptura por inflexão de um trecho da parede próximo à trinca, na região central do fuste.

Os corpos-de-prova reforçados apresentaram comportamento semelhante entre si, rompendo por inflexão local das paredes na porção central do fuste, sem influência da trinca.

Corpos-de-prova com diafragma:

O corpo-de-prova íntegro apresentou modo de ruptura semelhante ao sem diafragma, mas com propagação das fissuras, apresentando uma inclinação global em decorrência da falha localizada na zona de contato com a prensa. O corpo-de-prova trincado comportou-se como o corpo-de-prova com dois diâmetros de altura. No entanto não foi verificada uma não linearidade tão evidente, de maneira que a falha em ambos os lados da trinca deve ter ocorrido simultaneamente.

Os corpos-de-prova reforçados não mais apresentaram o efeito de deslocamento do nó, ocorrido nas séries anteriores. O modo de ruptura de ambos os corpos-de-prova ficou caracterizado por flambagem local das paredes, da mesma maneira que os desprovidos de diafragma.

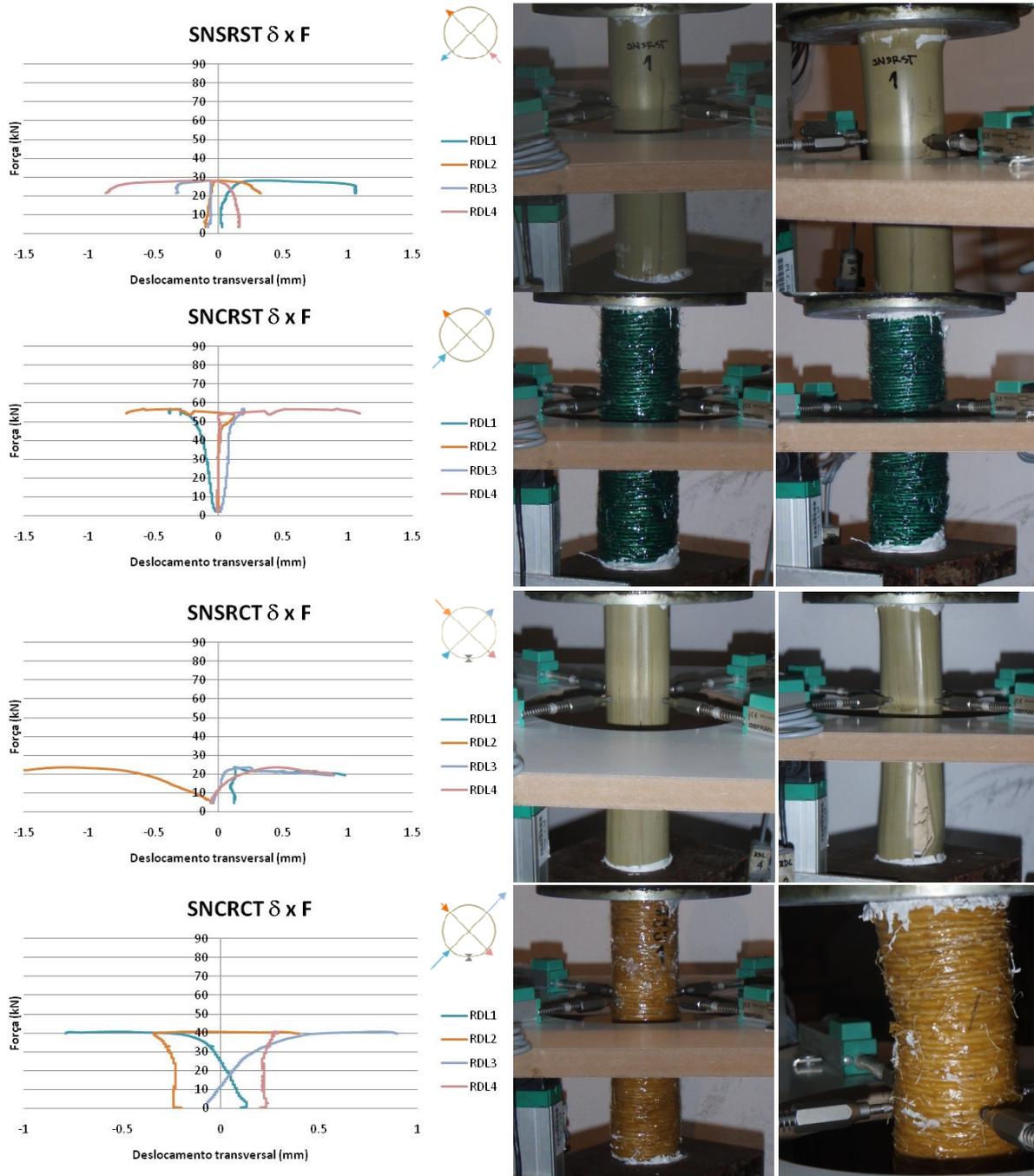


Figura 60: Curvas força x deslocamento transversal e fotos antes e depois do ensaio dos corpos-de-prova sem diafragma com altura igual a quatro diâmetros.

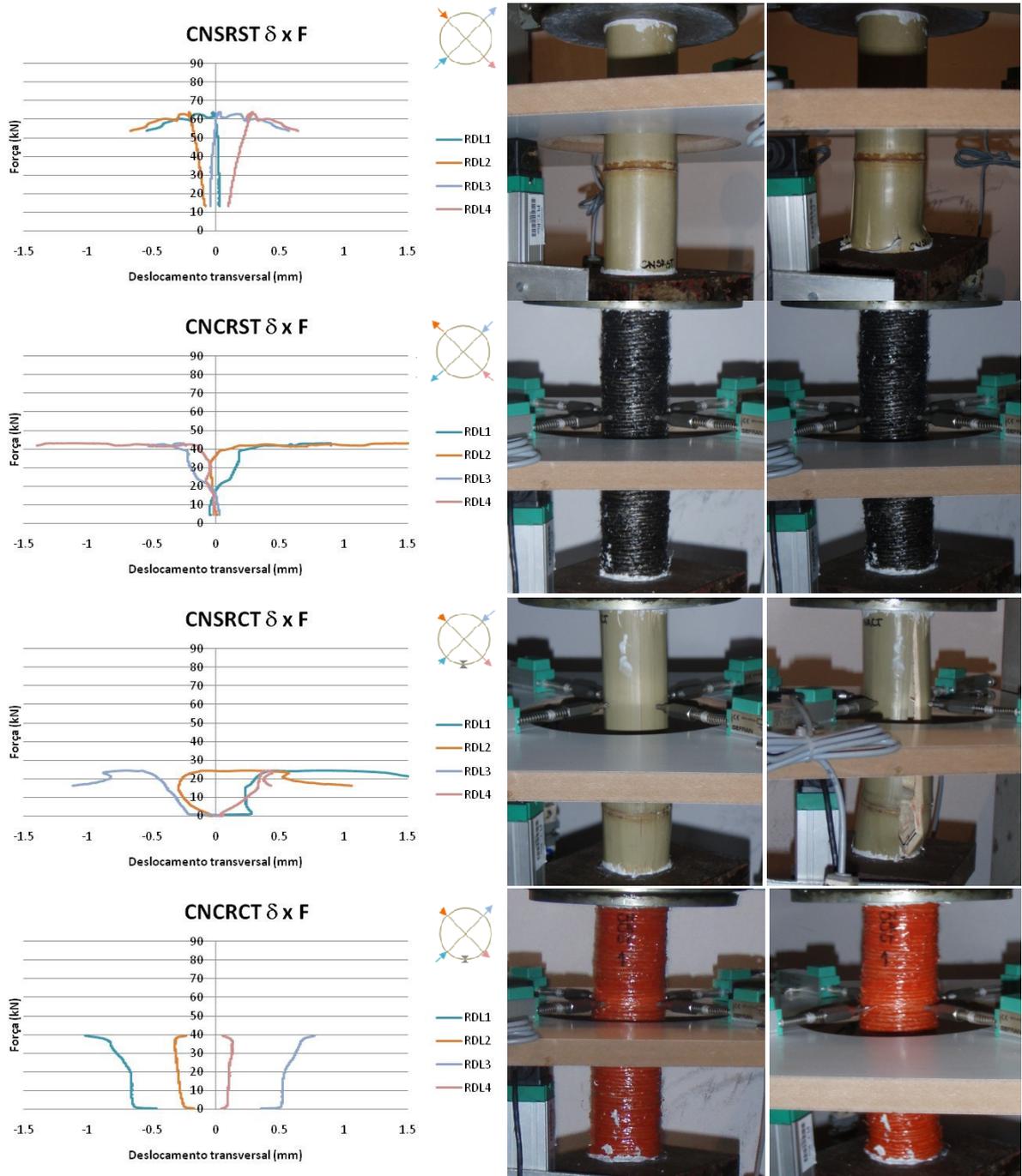


Figura 61: Curvas força x deslocamento transversal e fotos antes e depois do ensaio dos corpos-de-prova com diafragma com altura igual a quatro diâmetros.

### 3.2.6.4. Comparação 1,2 e 4D

Após a análise pontual dos resultados obtidos nos ensaios à compressão do bambu, pode-se fazer uma breve análise, baseada no acréscimo percentual

de resistência obtido nos corpos-de-prova reforçados em relação aos demais, nas diferentes condições.

Tabela 21: Comparação do percentual de acréscimo de resistência nos diversos casos ensaiados.

CP1d	Acréscimo de resistência com reforço (%)	CP2d	Acréscimo de resistência com reforço (%)	CP4d	Acréscimo de resistência com reforço (%)
SNST	+20,7	SNST	+28,2	SNST	+47,1
SNCT	+95	SNCT	+28	SNCT	+65,7
CNST	+16,8	CNST	-5,4	CNST	+17,6
CNCT	+14,7	CNCT	+32,63	CNCT	+43,1

Em geral a maior influência do reforço se dá nos corpos-de-prova trincados e sem diafragma, embora haja uma variação não proporcional à alteração do comprimento dos corpos-de-prova. Isto se deve ao fato de que, em alturas diferentes esta configuração de corpo-de-prova apresenta modos de falha diversos. Apesar de o reforço ser sempre efetivo, alterando estes modos de ruptura para um padrão, independente da altura, os modos originais são mais ou menos precoces, o que implica na variação do ganho de resistência. O mesmo efeito, embora mais regular, se observa nos corpos-de-prova não trincados sem diafragma, nos quais o reforço é gradualmente mais efetivo conforme aumenta a altura.

Não se chegou a uma conclusão acerca dos corpos-de-prova íntegros com diafragma, uma vez que nas duas primeiras séries de ensaio não houve alteração no modo de ruptura dos corpos-de-prova sem reforço, nem nos reforçados, embora a variação da influência do reforço na resistência final tenha variado 22,2% de um para o outro. A última série de ensaios apresentou variação nos modos de ruptura com e sem reforço e influência na resistência final muito próxima da obtida na primeira série.

Nos corpos-de-prova trincados com diafragma nota-se o aumento da efetividade do reforço conforme aumenta o comprimento do fuste, o que ocorre por conta da diminuição do trecho influenciado pelo diafragma e pela mudança no modo de ruptura ocorrida a partir dos corpos-de-prova com dois diâmetros, mais precoce que no ensaio típico à compressão.

Na última série de ensaios o modo de ruptura dos corpos-de-prova reforçados foi homogêneo por flambagem local das paredes, independentemente das demais variáveis (Figura 62).

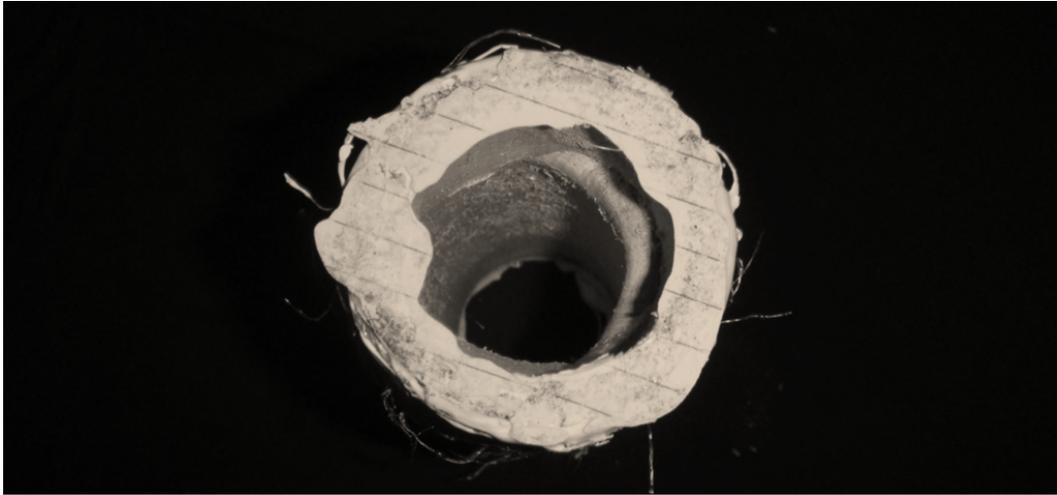


Figura 62: Modo de ruptura característico dos corpos-de-prova reforçados com quatro diâmetros de altura.

Sugere-se futuramente ensaiar corpos-de-prova mais regulares quanto ao posicionamento do diafragma no fuste, dimensões e áreas de secção e em maior quantidade, no intuito de obter maior precisão e confiabilidade na comparação entre corpos-de-prova com e sem reforço.