

4.

Flambagem de Colunas de Bambu

4.1. Introdução

Neste capítulo é analisado o comportamento de elementos da espécie *Phyllostachys aurea* submetidos a força axial de compressão, com objetivo de determinar o valor da carga crítica de flambagem e a influência das imperfeições iniciais no valor destas cargas.

Considerando o pouco tempo disponível para estes estudos, foram ensaiados o número mínimo de corpos de prova que permitisse generalizar os resultados para a espécie em estudo.

Levando em conta que a espessura da parede do bambu (t) é grande em relação ao raio externo (R), sendo para o caso do *Phyllostachys aurea* da ordem de $R/t = (4,24 \pm 0,22)$ não seria adequado aplicar a teoria de flambagem de cascas cilíndricas, que usualmente consideram $R/t \approx 150$. Por este motivo, os resultados dos ensaios foram estudados usando a teoria de flambagem de colunas, considerando o material homogêneo e isotrópico.

4.2. Conceitos básicos para o acompanhamento dos testes

Definição de carga de flambagem: Carga máxima sob a qual uma compressão axial em uma configuração reta é possível. É a carga que delimita a perda de estabilidade da coluna.

Definição de carga de Euler para colunas bi-rotuladas:

$$P_E = \pi^2 EI / L^2 \quad (4.1)$$

Ao estudar colunas bi-rotuladas de bambu é praticamente impossível a obtenção de valores constantes de E e de I em corpos de prova procedentes de um mesmo colmo. Deve-se isto ao fato do bambu ser um material compósito onde

seus principais tecidos (esclerênquima e parênquima) variam sua concentração no sentido radial da sua seção transversal e de seção a seção ao longo do eixo longitudinal do colmo. Outro fator que impede a obtenção de um módulo de elasticidade e inércia constantes é a forma cônica dos colmos, verificando-se através do mapeamento, a diminuição do diâmetro da base para o topo. Por último, fica comprovado que o bambu não tem eixo retilíneo como poderiam ter outras colunas. Isto leva a concluir que o valor da carga obtida a partir da equação de Euler para colunas retas, seria o limite superior da carga crítica para o caso do bambu a qual estaria afetada em maior ou menor grau, dependendo do valor das imperfeições geométricas.

Devido às próprias imperfeições geométricas dos elementos de bambu é muito difícil determinar com boa precisão experimental seu eixo de simetria para a aplicação concêntrica da força de compressão. Este fato leva a que exista uma certa excentricidade (e) quando são ensaiadas colunas de bambu sob compressão axial. Como visto na revisão bibliográfica, quando uma carga P é aplicada ao extremo de uma coluna com excentricidade e , a deflexão δ na metade da coluna é:

$$\delta = e \{ \sec \pi/2 [P/P_E]^{0.5} - 1 \} \quad (4.2)$$

Do o ponto de vista experimental, segundo MOREIRA (1998), seria aceitável acompanhar o comportamento das deflexões laterais como um problema elástico com módulo de elasticidade e inércia constante:

$$\delta = \delta_0 / P_E / (P-1) \quad (4.3)$$

onde, δ_0 é a máxima imperfeição geométrica inicial (mm).

Supondo que a flexão da barra seja devido à excentricidade na aplicação da força de compressão, a deflexão lateral medida em $L/2$ pode ser determinada a partir da expressão:

$$\delta = (4e/\pi) ((P-1)/P_E) \quad (4.4)$$

Quando analisadas colunas de bambu nas quais se aplica uma força de compressão com certa excentricidade inicial em colunas geometricamente imperfeitas, a deflexão no meio do elemento é dada a partir da equação:

$$\delta = (\delta_0 + 4e/\pi)((P-1)/P_E) \quad (4.5)$$

A deflexão total pode se determinar pela expressão:

$$\delta_T = \delta_0 + \delta = (\delta_0 + 4e/\pi)/(1-P/P_E) \quad (4.6)$$

A carga crítica pode ser determinada a partir do trecho retilíneo do diagrama de Southwell como o inverso da inclinação da reta, a qual corta o eixo x no ponto $\delta_0 + 4e/\pi$.

4.3. Principais características dos elementos ensaiados

Para os ensaios de flambagem foram escolhidos colmos de bambu procedentes da cidade de Bananal, estado de São Paulo, com idade estimada entre dois e três anos. Os colmos foram curados no local e posteriormente secos ao ar no LEM da PUC-Rio por um período aproximado de seis meses. Foram ensaiados oito elementos extraídos da parte basal dos colmos. O comprimento dos elementos ensaiados variou de 800 a 1800 mm. Isto possibilitou a obtenção experimental da curva tensão – esbeltez para ser comparada posteriormente com a curva teórica obtida.

4.4. Determinação experimental das imperfeições geométricas

Para definir a geometria dos elementos a serem ensaiados, foi necessário desenvolver uma metodologia que permitisse obter com precisão aceitável o mapeamento dos corpos de prova e, a partir destes resultados, avaliar a influência das imperfeições iniciais na carga limite. Para isto, fixou-se sobre uma mesa uma tábua de madeira retangular de dimensões 2000 x 500 mm sobre a qual foram fixadas duas guias transversais colocadas nos extremos da mesma. Ao longo do

comprimento da tábua foi esticado um fio de aço de 1 mm de diâmetro o qual foi perfeitamente nivelado, formando um ângulo de 90° com as guias dos extremos. Cada colmo foi colocado acima da tábua de forma que o mesmo tocasse tangencialmente o fio de aço pela sua parte côncava ou pelos extremos em caso de se encontrar deformado pelo lado convexo do colmo (ver Figura 4.1). Desta forma foram realizadas em cada nó e na região internodal as medições desde o fio até a superfície do colmo utilizando um paquímetro digital para a realização das leituras (ver Figura 4.2). As medições foram efetuadas em quatro eixos espaçados a 90° um do outro.



Figura 4.1. Mapeamento das imperfeições iniciais.



Figura 4.2. Leitura com paquímetro digital.

Uma vez determinado o eixo que ficaria submetido às maiores tensões (eixo mais deformado) e conhecendo o δ_0 máximo do mesmo, foram colocados pelo menos dois strain gages elétricos tridimensionais em faces opostas, a uma altura de $L/2$, para a determinação das maiores deformações compressivas e trativas que poderiam ocorrer durante o ensaio de flambagem. Em alguns corpos de prova foram colocados um número maior de strain gages.

Para determinar a deflexão lateral que ocorreria durante o teste de flambagem, foi confeccionado um anel de aço de 350 mm de diâmetro. Isto possibilitou regular a posição dos quatro LVDTs colocados nos quatro eixos onde foram previamente determinadas as imperfeições geométricas (ver Fig. 4.3 e 4.4).

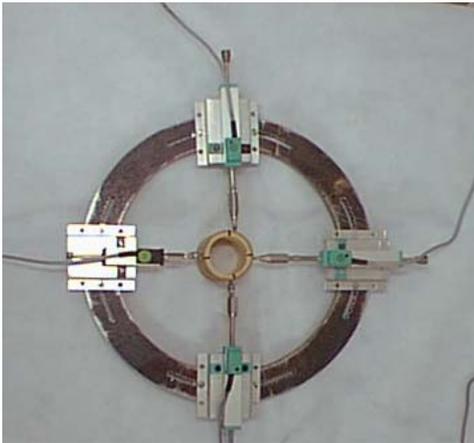


Figura 4.3. Anel de aço para posicionamento dos LVDTs.

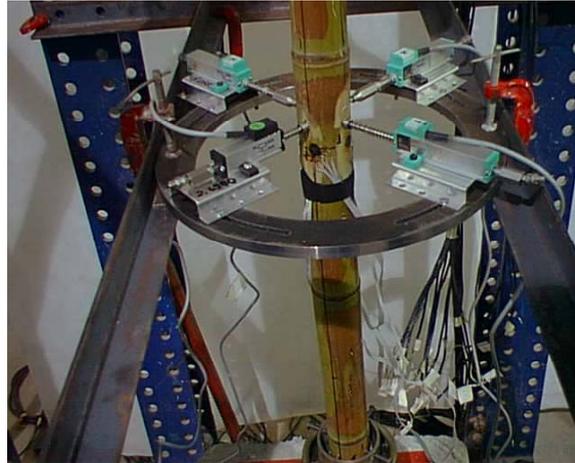


Figura 4.4. Posição dos LVDTs no ensaio.

O teste foi realizado utilizando as rótulas da AMSLER, desprezando-se o atrito que poderia ocorrer ao se aplicar carga. Para fixar o bambu às rótulas foram elaboradas duas peças de aço, com parafusos reguláveis os quais além de fixar, permitiriam centrar o elemento com respeito ao eixo de simetria da máquina evitando que o elemento a ensaiar escorregasse uma vez começado o teste. Nas Figuras 4.5 e 4.6 apresenta-se o sistema de rótula empregado e a montagem do elemento na máquina AMSLER.

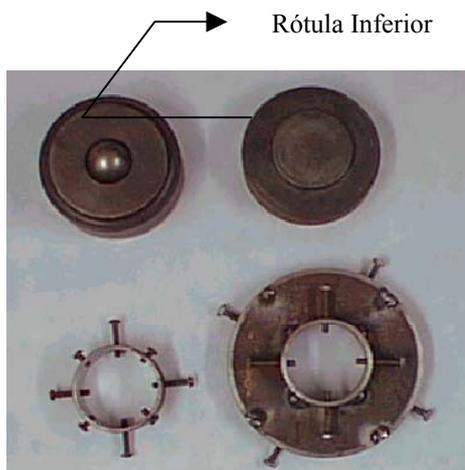


Figura 4.5. Rótulas utilizadas no ensaio.



Figura 4.6. Posição do corpo de prova.

4.5. Resultados do mapeamento das características geométricas

Nesta seção são apresentadas as características geométricas determinadas a partir do mapeamento dos elementos a serem ensaiados.

As fórmulas consideradas no cálculo das propriedades geométricas dos corpos de prova são:

$$A = \pi / 4 [D^2 - (D - 2t)^2] \quad (4.7)$$

$$I_g = \pi / 4 (R^4 - r^4) \quad (4.8)$$

$$I_f = k\pi/64 [D^4 - (D - t/2)^4] + \pi/64 [(D - t/2)^4 - (D - 2t)^4] \quad (4.9)$$

sendo k o fator de gradiente de densidade, que segundo MOREIRA (1998), tem valor compreendido entre $(1,35 \pm 0,09)$ e $(1,95 \pm 0,18)$ para a espécie *Dendrocalamus giganteus*. Neste trabalho foi assumido $k = 1,50$.

Os valores médios do diâmetro exterior (D), espessura de parede (t), diâmetro interno (d), raio externo (R), área (A), inércia geométrica (I_g) e inércia física (I_f) apresentados são os que correspondem a elementos de comprimento igual a 1800 mm, sendo calculados na metade das regiões internodais e na proximidade dos nós.

4.5.1. Determinação das características geométricas de um corpo de prova de 1800 mm de comprimento

A seguir analisar-se-á o elemento CP-2. Trata-se de uma amostra extraída da parte basal de um colmo de diâmetro médio de 55,44 mm nesta região. Utilizando a metodologia anteriormente descrita determinaram-se as características geométricas do elemento (ver Tabelas 4.5.1.1 e 4.5.1.2).

Tabela 4.5.1.1. Características geométricas determinadas experimentalmente em corpo de prova de $L = 1800$ mm.

Ponto	Posição no elemento (mm)	Diâmetro externo (D) (mm)	Espessura (t) (mm)	Diâmetro interno (d) (mm)	Raio externo (R) (mm)	R / t
1	155	56,25	7,10	42,05	28,12	3,96
2	375	56,15	6,80	42,55	28,07	4,13
3	595	56,25	6,90	42,45	28,12	4,08
4	835	55,10	7,00	41,10	27,55	3,94
5	1090	55,20	6,30	42,60	27,60	4,38
6	1350	55,30	6,20	42,80	27,65	4,46
7	1610	55,25	6,50	42,25	27,62	4,25
8	1800	54,00	6,00	42,00	27,00	4,50

Tabela 4.5.1.2. Características físicas determinadas a partir dos resultados obtidos no mapeamento.

Ponto	Posição no elemento (mm)	Área (A) (mm ²)	Inércia geométrica (I _g) (mm ⁴)	Inércia física (I _f) (mm ⁴)
1	155	1096,30	337955	392503
2	375	1054,25	327039	379199
3	595	1069,76	332031	385181
4	835	1057,77	312389	362907
5	1090	967,83	294088	340236
6	1350	963,09	294342	340410
7	1610	995,49	300989	348609
8	1800	904,78	264648	305885

Plotando-se os resultados das Tabelas 4.5.1.1 e 4.5.1.2, obteve-se os perfis das variações de geometria ao longo do comprimento do corpo de prova a ser ensaiado. Todos os gráficos foram ajustados linearmente e as equações são apresentadas na figura correspondente. As Figuras 4.7 a 4.11 mostram a variação das características geométricas para o colmo de 1800 mm de comprimento.

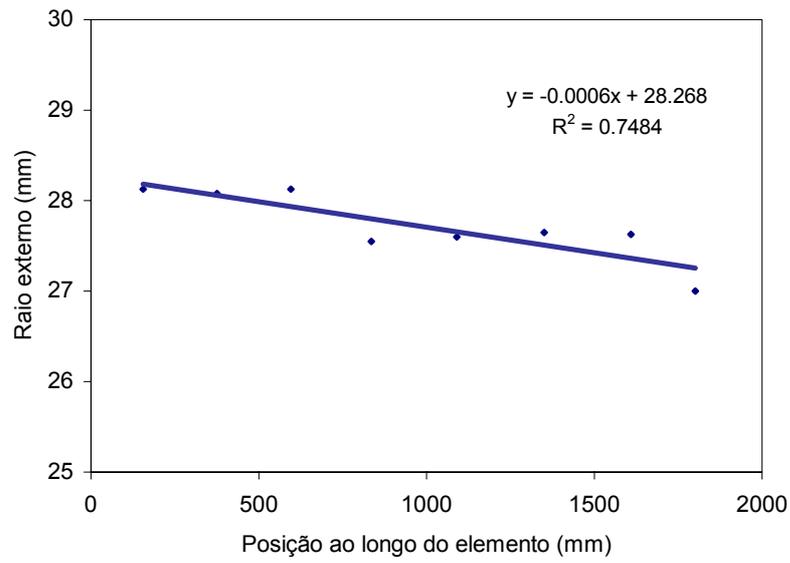


Figura 4.7. Perfil do raio externo no corpo de prova.

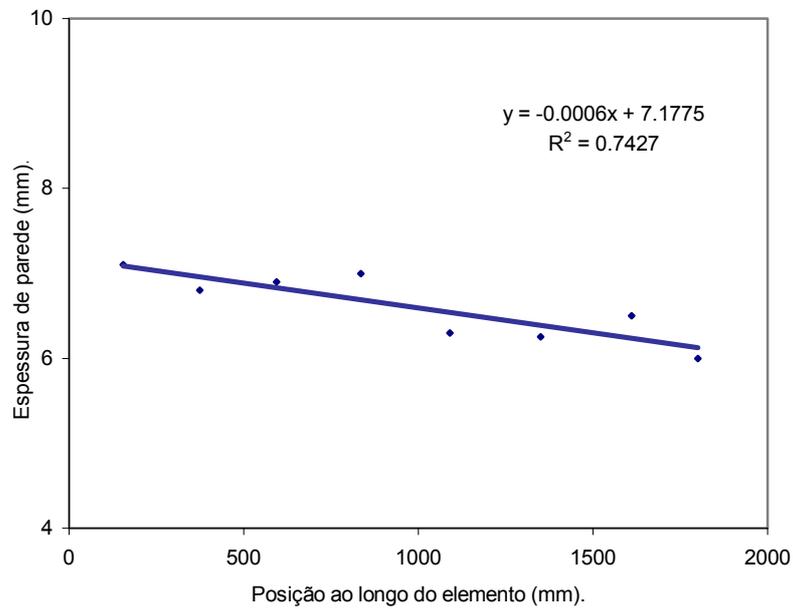


Figura 4.8. Perfil da espessura no corpo de prova.

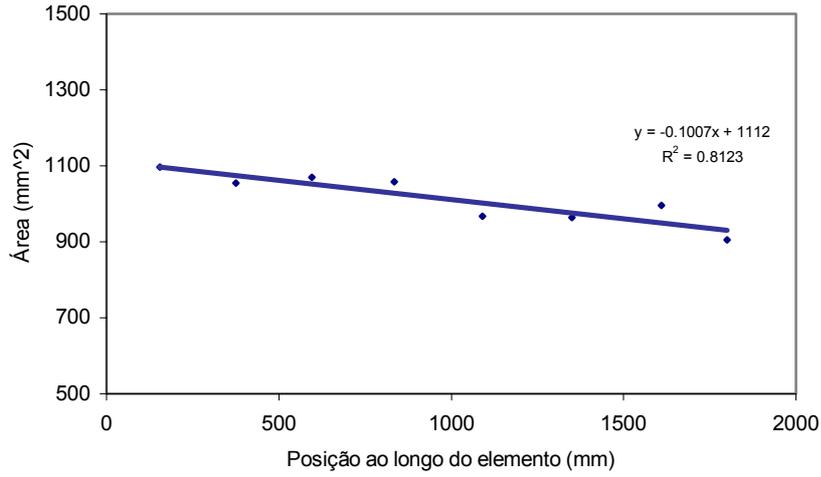


Figura 4.9. Perfil de área em corpo de Prova de L = 1800 mm.

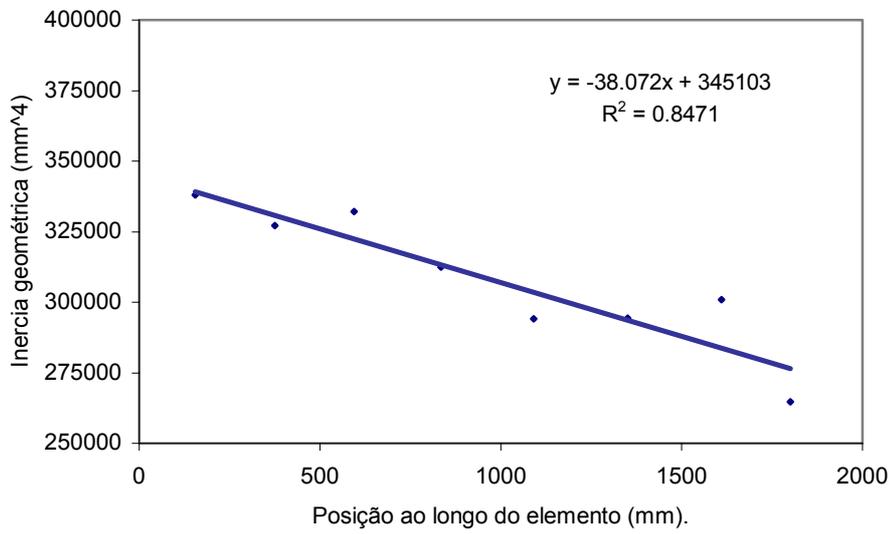


Figura 4.10. Perfil de inércia geométrica em corpo de prova de L = 1800 mm.

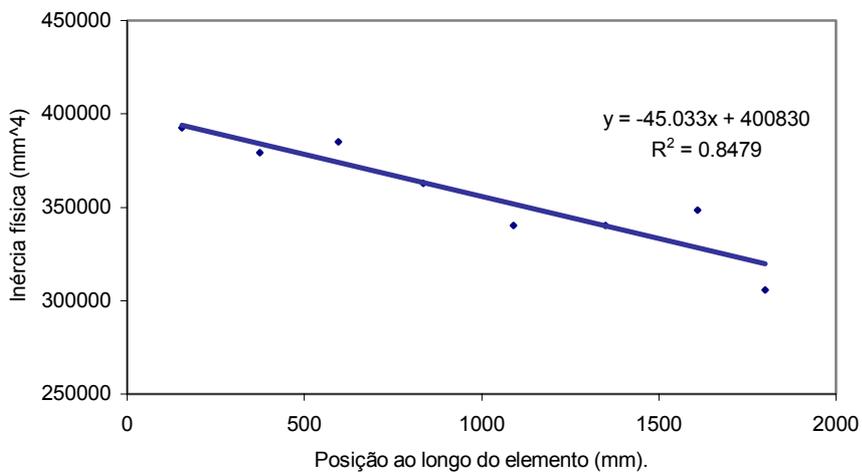


Figura 4.11. Perfil de inércia física em corpo de prova de L = 1800 mm.

Para determinar o local que ficaria submetido às maiores deformações, determinaram-se as imperfeições iniciais em quatro eixos tracejados no corpo de prova formando ângulos de 90°. A imperfeição inicial (δ_0) do eixo mais deformado, segundo a metodologia descrita anteriormente, foi igual a 3,5 mm, em $L/2$.

4.6. Ensaio de flambagem para o elemento CP-2

O corpo de prova foi ensaiado estaticamente à compressão, com aplicação da carga de forma contínua. A intervalos de 2,5 kN, foram registradas no computador a leitura das deformações medidas com strain gages e as leituras dos quatro LVDTs posicionados na metade do elemento, ou seja em $L/2$. A altura da prensa foi medida no início e final do ensaio para registrar o encurtamento do elemento. A Tabela 4.6.1 apresenta os deslocamentos laterais (δ_L) e totais (δ_T) medidos durante o teste. O deslocamento vertical da prensa (δ_v) foi de 28 mm, sendo este o encurtamento que ocorreu no bambu ensaiado. Os resultados obtidos são apresentados de forma gráfica na Figura 4.12.

Tabela 4.6.1. Resumo do deslocamento durante o teste de flambagem.

Carga (kN)	δ_L (mm)	δ_T (mm)	Carga (kN)	δ_L (mm)	δ_T (mm)
0,637	0	3,500	18,175	3,144	6,644
0,774	0	3,500	19,193	3,946	7,446
3,853	0,004	3,504	20,097	4,947	8,447
5,344	0,005	3,505	19,279	19,430	22,93
7,563	0,006	3,506	19,226	20,563	24,063
9,878	0,008	3,508	19,063	21,649	25,149
13,201	0,661	4,161	18,819	22,708	26,208
14,172	1,186	4,686	18,234	23,747	27,247
15,786	1,704	5,204	17,371	23,953	27,453
17,094	2,435	5,935			

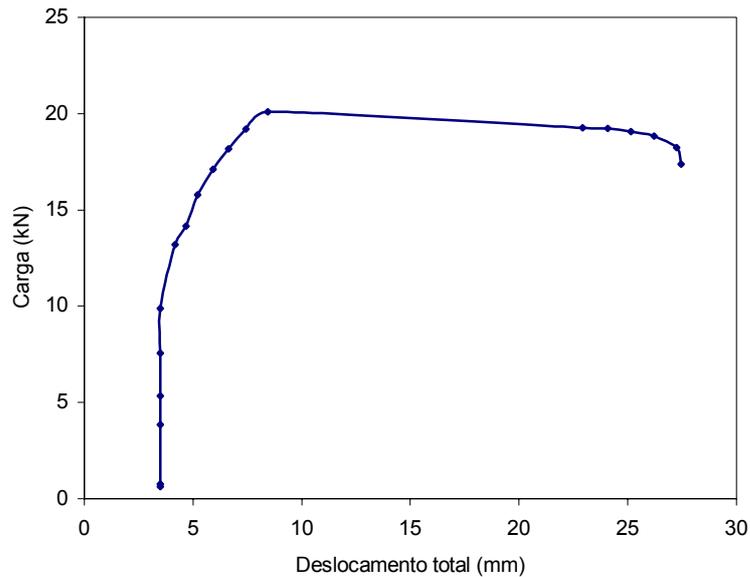


Figura 4.12. Curva carga – deslocamento para o elemento CP-2.

A partir da Tabela 4.6.1. é possível plotar a razão δ / P contra a deflexão lateral δ_L determinada de forma experimental mediante as leituras dos LVDT. Esta linearização intercepta ao eixo x no ponto $\delta / P = 0$ quando $\delta = \delta_0$. O gráfico conhecido como *Diagrama de Southwell* nos permite calcular a carga crítica partindo do trecho linear do mesmo (ver Figura 4.13).

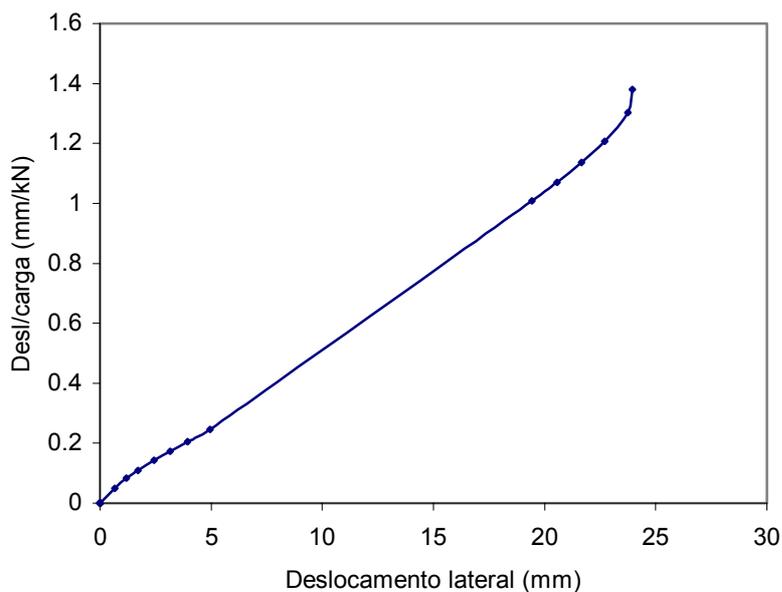


Figura 4.13. Diagrama de Southwell para elemento de $L = 1800$ mm.

4.6.1. Determinação da carga crítica a partir do trecho linear do diagrama de Southwell

Através do trecho linear do diagrama de Southwell (Figura 4.14), obtém-se a relação $\delta/P_{SOUTH}-\delta$ dada pela Equação (4.10), a partir da qual foi possível determinar a carga crítica P_{SOUTH} .

$$\delta / P_{SOUTH} = 0,0534\delta - 0,1009 \quad (4.10)$$

$$P_{SOUTH} = 18,73 \text{ kN}$$

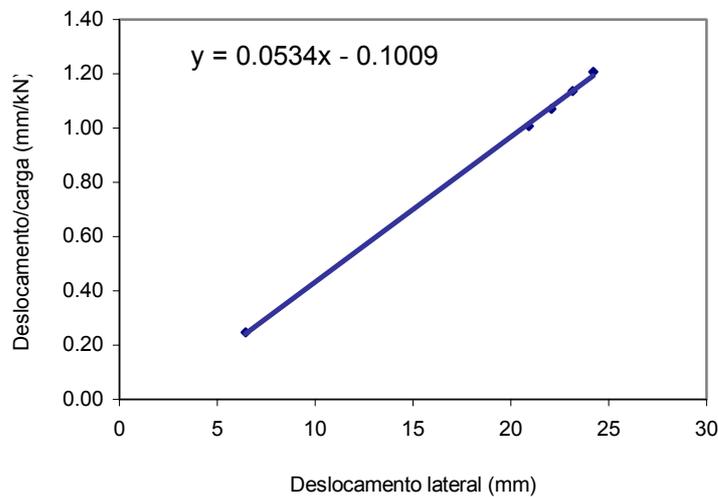


Figura 4.14. Trecho linear do diagrama de Southwell.

A Equação (4.11) caracteriza o comportamento da inércia física no elemento ensaiado. A partir desta equação determinou-se o valor da inércia física em $L/2$ por ser este o local onde ocorreram as maiores deflexões.

$$I_f = -45,033 (L/2) + 400830 \quad (4.11)$$

$$I_f = 360300 \text{ mm}^4$$

A determinação de I_f em $L/2$ permite o cálculo do módulo de elasticidade de Southwell utilizando a Equação (4.1). Considerando o valor de P_{SOUTH} obtida do

diagrama de Southwell e a inércia constante e igual à inércia física em $L/2$, obtêm-se que o módulo de elasticidade $E_{SOUTH} = 17,065 \text{ GPa}$.

4.6.2. Cálculo das imperfeições iniciais do diagrama de Southwell

Usando a Equação (4.10), pode-se obter o valor das imperfeições geométricas partindo do diagrama de Southwell.

$$\delta_{0S} = 0,1009/0,0534 = 1,89 \text{ mm}$$

Como pode-se apreciar, a deflexão máxima medida com o paquímetro dá resultados próximos ao valor de δ_0 obtido do diagrama de Southwell. Isto confirma a validade da metodologia empregada na determinação das imperfeições geométricas.

Colocando a Equação (4.6) na forma:

$$(\delta/P)P_E - \delta = \delta_0 + 4e/\pi \quad (4.12)$$

$$\delta_{0S} - \delta_{0EXP} = 4e/\pi \quad (4.13)$$

sendo $\delta_{0EXP} = 3,5 \text{ mm}$ e $\delta_{0S} = 1,89 \text{ mm}$, obtemos uma excentricidade $e = 1,26 \text{ mm}$, valor considerado aceitável dentro das condições do ensaio.

4.6.3. Determinação da carga crítica a partir da fórmula de Euler

Se considerar o módulo de elasticidade longitudinal médio E_L , obtido dos ensaios de compressão simples de corpos de prova com dimensão $L = D$, extraídos da parte basal dos colmos estudados como constante ao longo do mesmo e igual a 21 GPa e momento de inércia correspondente a estes corpos de prova (I), constantes em todo o elemento e igual a 300000 mm^4 , poderia-se calcular a carga crítica à compressão (P_{CR}) através da equação de Euler para uma coluna sem imperfeições iniciais, atingindo esta um valor de $19,19 \text{ kN}$.

Lembrando que $P_{EXP} = 20,097 \text{ kN}$, pode-se dizer que os valores obtidos para a carga crítica a partir do diagrama de Southwell e da análise teórica são coerentes com o valor obtido experimentalmente.

4.6.4. Determinação das deformações máximas durante o ensaio de flambagem

Como dito anteriormente, para a determinação das deformações longitudinais, transversais e a 45° nos corpos de prova colocaram-se strain gages tridimensionais que registraram as deformações até o elemento atingir a carga crítica. Os strain gages foram colocados na proximidade do nó, em posições ortogonalmente opostas para registrar as deformações compressivas e possivelmente de tração que ocorreriam com a aplicação da força de compressão. As Figuras 4.15 e 4.16 referem-se aos resultados dos strain gages colocados em $L/2$ para o corpo de prova em análise.

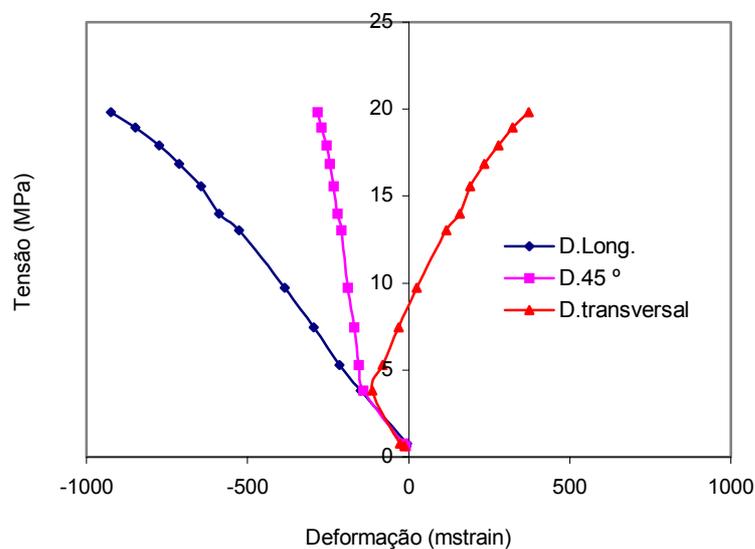


Figura 4.15. Deformação no eixo comprimido em $L/2$.

Dos gráficos apresentados verifica-se que no eixo comprimido houve uma tendência à compressão no sentido longitudinal às fibras e à tração no sentido transversal às mesmas. A um ângulo de 45° com relação ao eixo longitudinal do

elemento as deformações foram de compressão. No eixo tracionado observou-se deformações de tração no sentido longitudinal às fibras e compressão no sentido transversal as mesmas. As Figuras 4.17 e 4.18 mostram o posicionamento dos strain gages e LVDTs no elemento assim como o deslocamento ocorrido durante o teste.

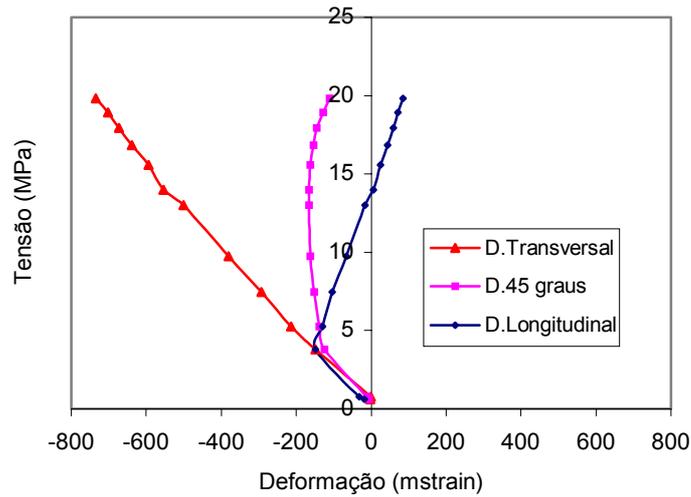


Figura 4.16. Deformação no eixo tracionado em L/2.



Figura 4.17. Posição dos strain gages no corpo de prova.



Figura 4.18. Ensaio de flambagem para corpo de prova de $L = 1800$ mm.

Uma vez atingida a carga máxima, o elemento continua deformando-se, porém a carga começa a diminuir de forma lenta e contínua. O elemento não chegou ao colapso, já que o teste foi interrompido para preservar os LVDTs de possíveis danos. Porém, a queda da carga pode ser atribuída às fissuras das fibras resistentes.

Analisando o elemento CP-1 de igual comprimento (1800 mm), porém com maior imperfeição geométrica inicial em $L/2$, observa-se nesse caso que a carga crítica atinge um valor de 16,022 kN, mostrando uma resistência a flexo-compressão menor durante o ensaio (ver Figura 4.19).

Calculando o valor da carga crítica através do diagrama de Southwell obtém-se um valor de 10,75 kN. Comparando os valores obtidos para os elementos CP-1 e CP-2, fica em evidência a influência das imperfeições geométricas na resistência da coluna. Colunas com imperfeições maiores podem chegar ao colapso antes que colunas que possuem um nível de deflexão inicial muito pequeno. Analisando a Figura 4.19 pode-se observar que o elemento comportou-se como uma coluna em regime elástico até atingir a carga crítica. Neste ponto a ruptura das fibras pode ter ocasionado a queda brusca de tensão, a partir da qual as deflexões aumentaram de forma considerável. Apesar de não ter-

se observado fissuras externas no elemento, chega-se à conclusão que houve ruptura das fibras internas que provocaram a perda de resistência do elemento.

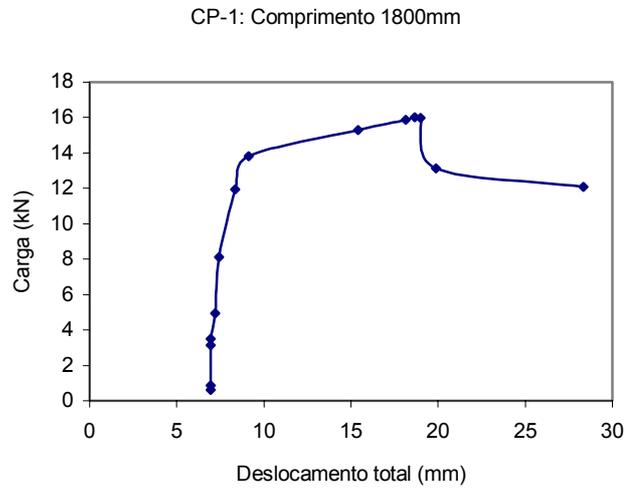


Figura 4.19. Deflexão total do elemento inicialmente mais deformado.

Para determinar as deformações longitudinais e transversais desenvolvidas durante o ensaio colocou-se um strain gage em cada um dos quatro eixos onde foram medidas imperfeições geométricas. Estes strain gages, diferentemente do elemento antes analisado, CP-2, foram colados afastados do nó, ou seja, no meio da região internodal. Os valores das deformações ocorridas nos quatro eixos são apresentados nas Figuras 4.20 a 4.23.

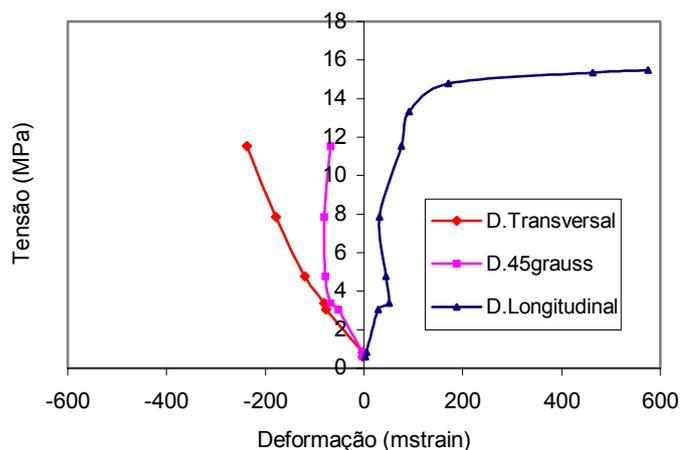


Figura 4.20. Deformações ocorridas no CP-1 durante o ensaio de flambagem. Eixo côncavo

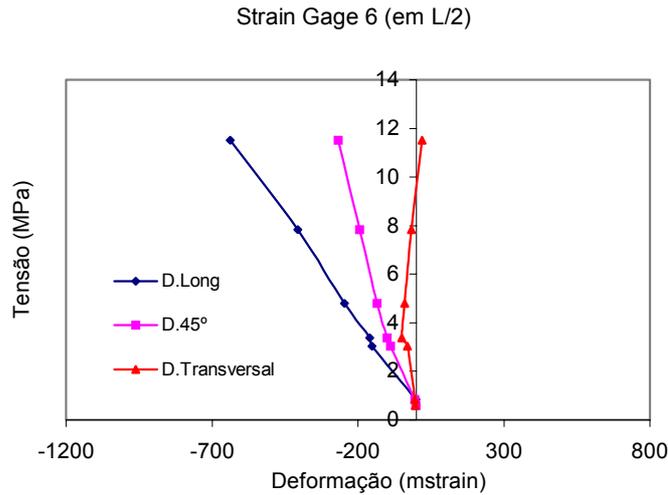


Figura 4.21. Deformações ocorridas no CP-1 durante o ensaio de flambagem.

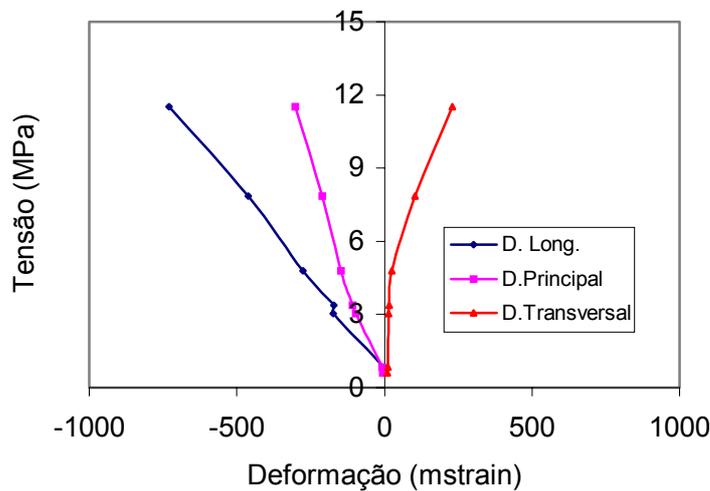


Figura 4.22. Deformações ocorridas no CP-1 durante o ensaio de flambagem. Eixo convexo.

Comparando os resultados da deformação obtidos para os dois elementos até aqui estudados, não se percebem diferenças significativas nas curvas tensão – deformação quando os strain gages são colocados na proximidade do nó. Pode-se atribuir este comportamento ao fato de que apesar de existir um aumento da espessura da parede e do diâmetro do nó, o comprimento da zona de influência do mesmo é curto em relação às distâncias internodais, não influenciando no aumento da rigidez global do elemento.

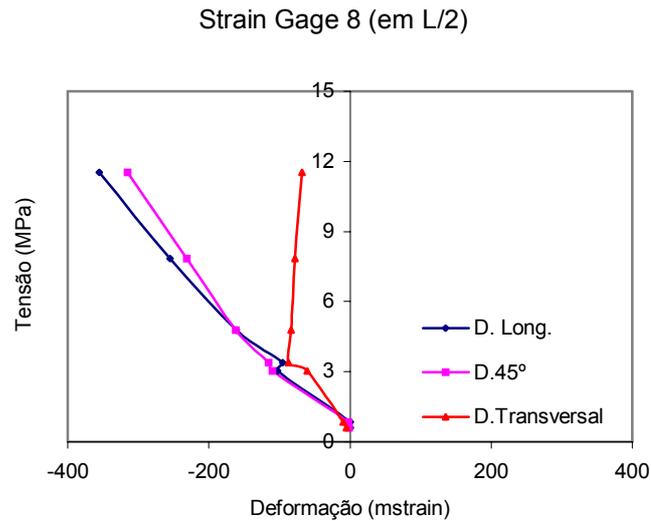


Figura 4.23. Deformações ocorridas no CP-1 durante o ensaio de flambagem.

4.6.5. Determinação da curva teórica de flambagem do colmo de bambu

Considerando que o bambu é uma coluna onde o módulo de elasticidade e a inércia variam segundo a seguinte regra:

$$E(x) = E_1 - \delta_E (x/L) \quad (4.14)$$

$$I(x) = I_1 + \delta_I x^4 \quad (4.15)$$

onde, E_1 é o módulo de elasticidade do extremo com menor seção transversal e I_1 é o momento de inércia do extremo com menor seção transversal.

Pode-se notar que:

$$E_{(L)} - E_{(0)} = -\delta_E \quad (4.16)$$

Portanto:

$$\delta_E = \Delta E \quad (4.17)$$

De forma similar, obtêm-se:

$$\Delta I = \delta_I L^4 \quad (4.18)$$

$$\delta_I = 2/3 - 2/3(I_1/I_{m\u00e9dia}) \quad (4.19)$$

Segundo estas considerações, pode-se calcular a carga crítica teórica para colunas de bambu imperfeitas com módulo de elasticidade e inércia variável utilizando a expressão desenvolvida por ARCE (1991)

$$P_{TEO} = \pi^2/L^2[EI_1 + 0,4494\Delta EI_1 + 0,4786\Delta IE_1 - 2,616\Delta E\Delta I] \quad (4.20)$$

Como pode-se destacar, a primeira componente da carga de flambagem de uma coluna de bambu corresponde a uma coluna com propriedades elásticas constantes ao longo do seu comprimento. A seqüência de gráficos apresentados a seguir (Figuras 4.24 a 4.27), representam a influência de cada termo para uma família de valores considerando o intervalo de variação destes parâmetros na região basal do colmo de bambu. Nos gráficos apresentados, a tensão crítica é calculada como $P_{CR} / A_{m\u00e9dia}$ e expressa em N/mm^2 e a esbeltez (λ) calculada como: $\lambda = L/r$, sendo $r = (I_1/A_1)^{0,5}$, onde A_1 é a área correspondente à menor seção transversal.

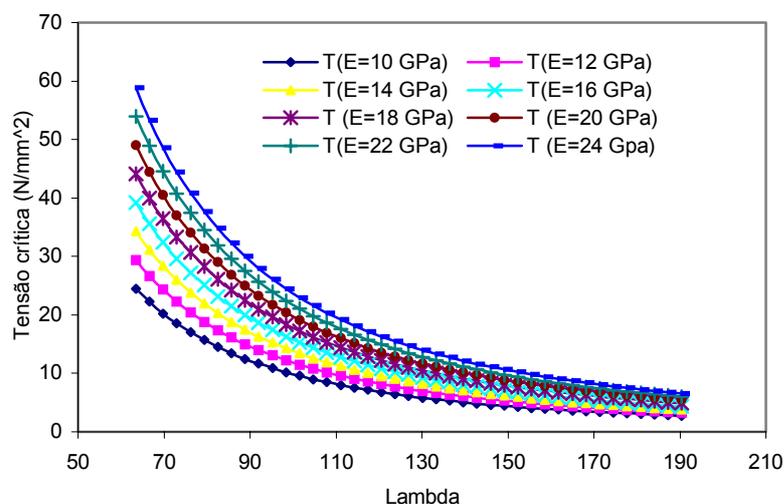


Figura 4.24. Primeira componente da tensão crítica.

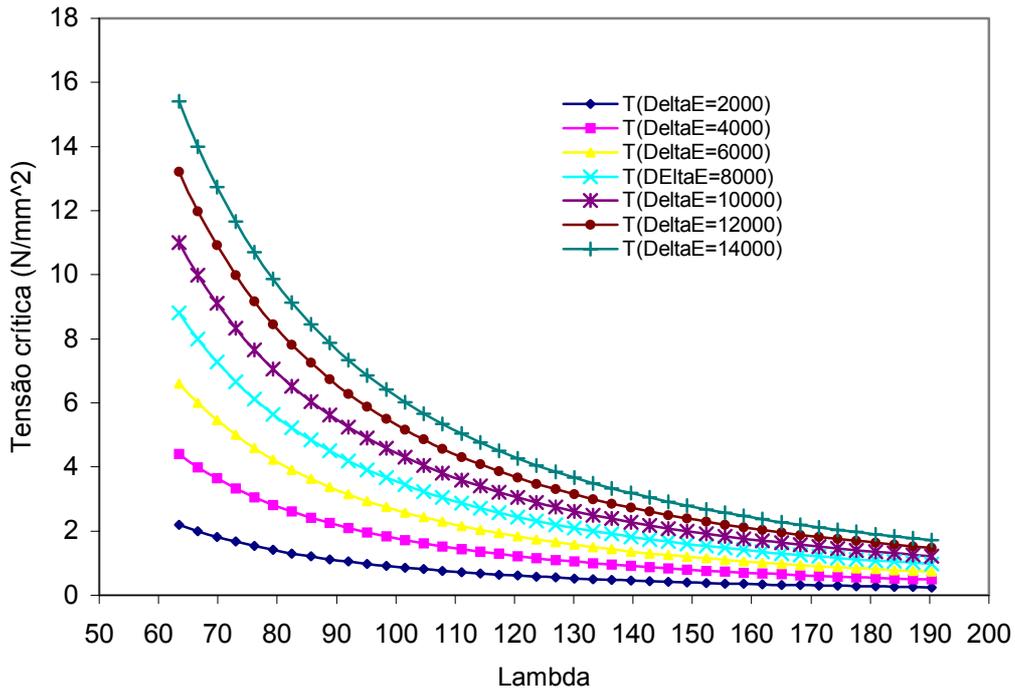


Figura 4.25. Segunda componente da tensão crítica.

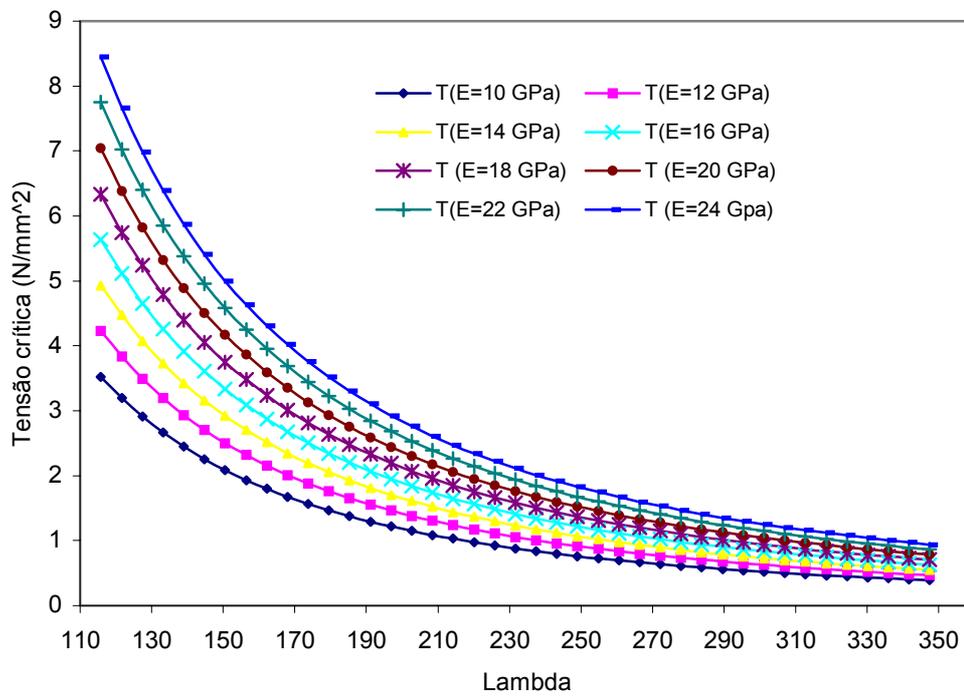


Figura 4.26. Terceira componente da tensão crítica.

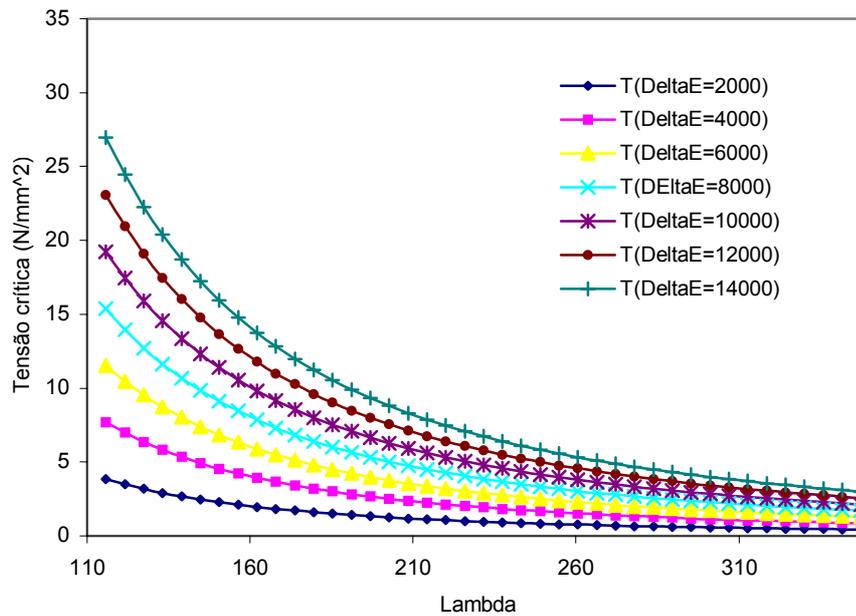


Figura 4.27. Quarta componente da tensão crítica.

A partir dos resultados obtidos experimentalmente pode-se calcular a curva tensão-esbeltez para os corpos de prova ensaiados com comprimento variável entre 800 e 1800 mm (ver Tabela 4.6.5.1 e Figura 4.28).

Tabela 4.6.5.1. Valores de tensão e esbeltez críticos obtidos nos testes de flambagem.

Corpo de prova	Comprimento (mm)	Área (mm ²)	Carga (kN)	Tensão crítica (MPa)	Esbeltez crítica
CP-7	800	863,95	30,60	35,41	42,64
CP-5	1200	1115,85	34,96	31,33	53,80
CP-3	1400	738,33	17,21	23,31	73,06
CP-2	1800	1013,12	20,09	19,83	94,08

A pontos determinados experimentalmente demonstram ser coerente com os resultados obtidos de forma teórica para esta espécie de bambu (ver Figuras 4.24 a 4.27).

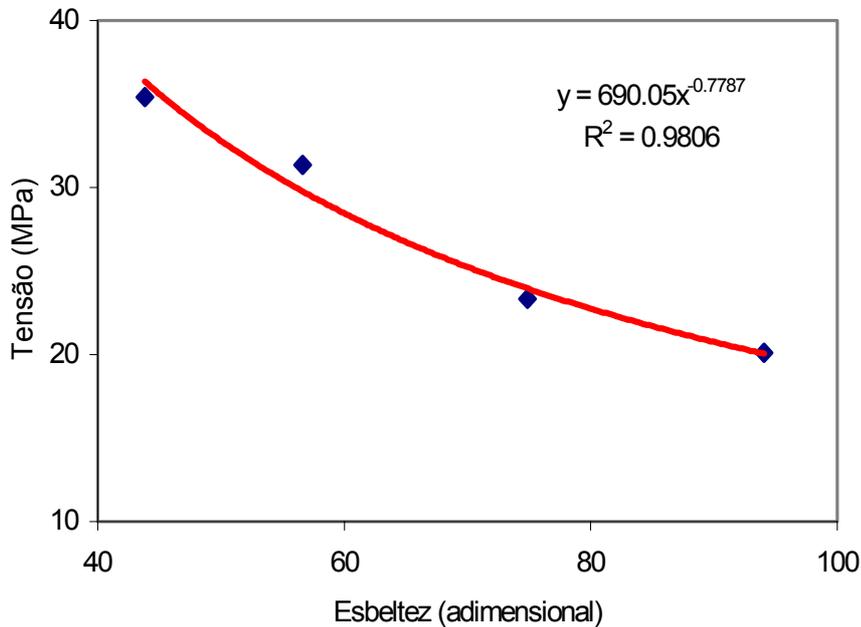


Figura 4.28. Curva tensão – esbeltez determinada experimentalmente.

4.7. Resultados obtidos para os corpos de prova de comprimentos variáveis entre 800 e 1400 mm

4.7.1. Resumo das características geométricas determinadas a partir do mapeamento

Seguindo o mesmo procedimento utilizado nos CP-1 e CP-2 foram determinadas as máximas deflexões ocorridas nos testes de flambagem (ver Figura 4.29) e foram confeccionados os diagramas de Southwell correspondentes para cada corpo de prova, cujo trecho linear é apresentado na Figura 4.30. A Tabela 4.7.1.1 apresenta o comportamento médio dos parâmetros geométricos para os corpos de prova com comprimento variável entre 800 e 1400 mm, ensaiados à flambagem.

Tabela 4.7.1.1. Comportamento médio dos parâmetros geométricos para corpos de prova ensaiados em flambagem.

CP	L (mm)	D _{EXT.} (mm)	t (mm)	I _g (mm ⁴)	I _f (mm ⁴)	δ ₀ (mm)
CP-3	1400	51,45	5,06	200995	231391	5,43
CP-4	1400	48,08	5,97	178908	207589	11,94
CP-5	1200	59,36	6,78	392344	454205	6,62
CP-6	1200	53,08	5,74	244096	309188	12,63
CP-7	800	49,52	6,38	205412	238778	8,95
CP-8	800	50,00	6,52	215252	250361	2,37

A Tabela 4.7.1.2 contém as equações características destes ajustes, assim como o coeficiente de correlação linear (R^2). A partir destas equações calcula-se a carga crítica (P_{SOUT}), as imperfeições (δ_{0SOUT}), o módulo de elasticidade (E_{SOUT}), a excentricidade na aplicação da carga (e) e a esbeltez (λ) para cada corpo de prova.

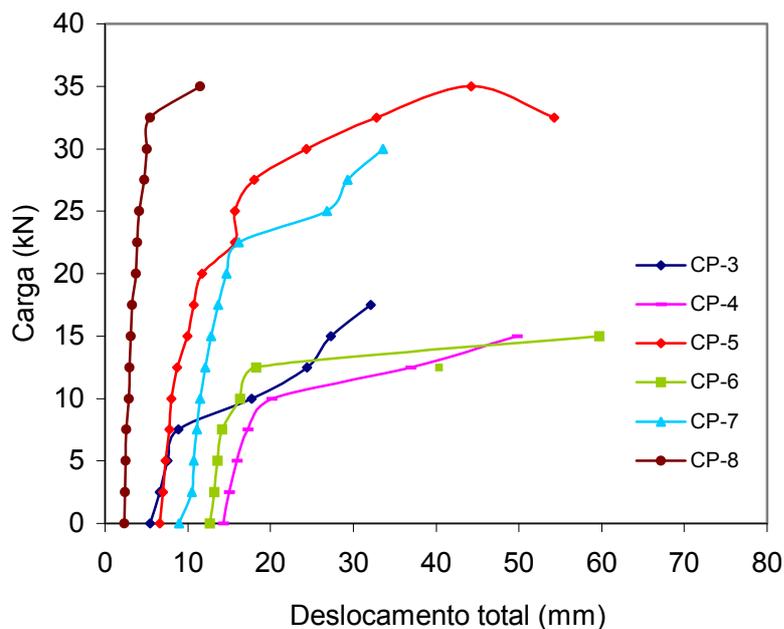


Figura 4.29. Curvas carga – deslocamento dos testes de flambagem.

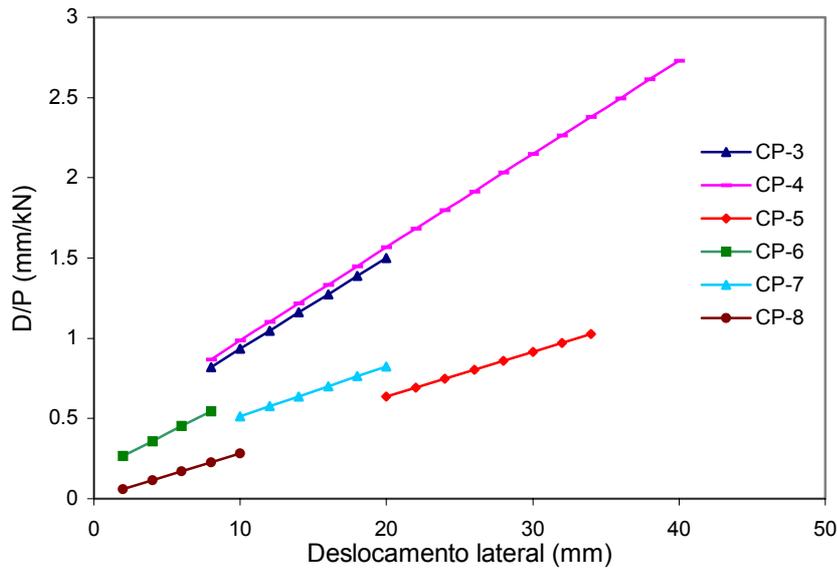


Figura 4.30. Trecho linear do diagrama de Southwell.

Tabela 4.7.1.2. Resultados dos ensaios de flambagem.

CP	L (mm)	Equação da curva	R ²	P _{SOUT} (kN)	δ _{0sout} (mm)	E _{sout} (GPa)	E (mm)	λ
CP-3	1400	$\delta/P=0,0567\delta+0,367$	0,9954	17,63	6,47	15,13	0,81	73,06
CP-4	1400	$\delta/P=0,0581\delta+0,404$	0,9799	17,21	6,95	16,46	3,92	77,00
CP-5	1200	$\delta/P=0,0280\delta+0,074$	0,9995	35,71	2,64	11,47	3,12	53,80
CP-6	1200	$\delta/P=0,0470\delta+0,170$	0,9827	21,27	3,62	10,04	7,07	60,20
CP-7	800	$\delta/P=0,0340\delta+0,204$	0,9752	29,41	6,00	8,00	2,31	42,64
CP-8	800	$\delta/P=0,0301\delta+0,006$	0,9998	33,22	1,990	11,38	0,30	59,61

Ao analisar a curva carga – deslocamento correspondente ao ensaio do CP-7 observa-se uma mudança de curvatura (ver Figura 4.29). Esta mudança corresponde ao esmagamento progressivo das fibras que levou o elemento ao colapso ao atingir a carga crítica. Neste caso, no elemento ocorre a transição de comportamento elástico a inelástico, entrando num estado permanente de deformação (ver Figura 4.29). A carga máxima atingida foi de 30,60 kN e a

deflexão máxima em $L/2$ foi de 52,66 mm. As Figuras 4.31 e 4.32 mostram o esmagamento sofrido pelas fibras e o colapso do elemento.

Como era esperado, a flambagem aconteceu no eixo onde foram medidas as maiores imperfeições geométricas. As deformações medidas mediante strain gages colocados em $L/2$ demonstram que o comportamento nos eixos côncavo e convexo do elemento foi coincidente com o resultado obtido para os elementos de 1800 mm de comprimento (ver Figuras 4.33 e 4.34).



Figura 4.31. Esmagamento progressivo das fibras.



Figura 4.32. Colapso do elemento.

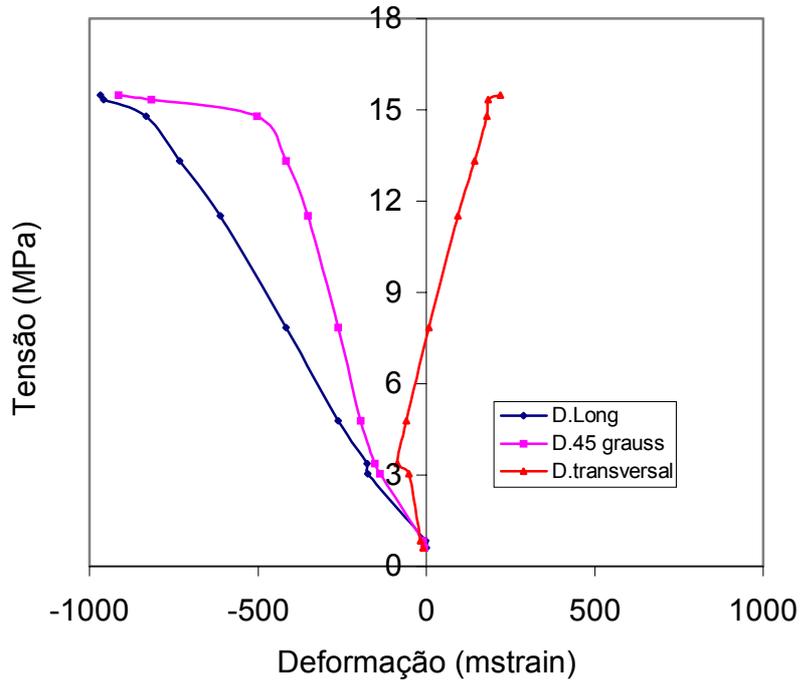


Figura 4.33. Deformações limites ocorridas durante o ensaio de CP-7.

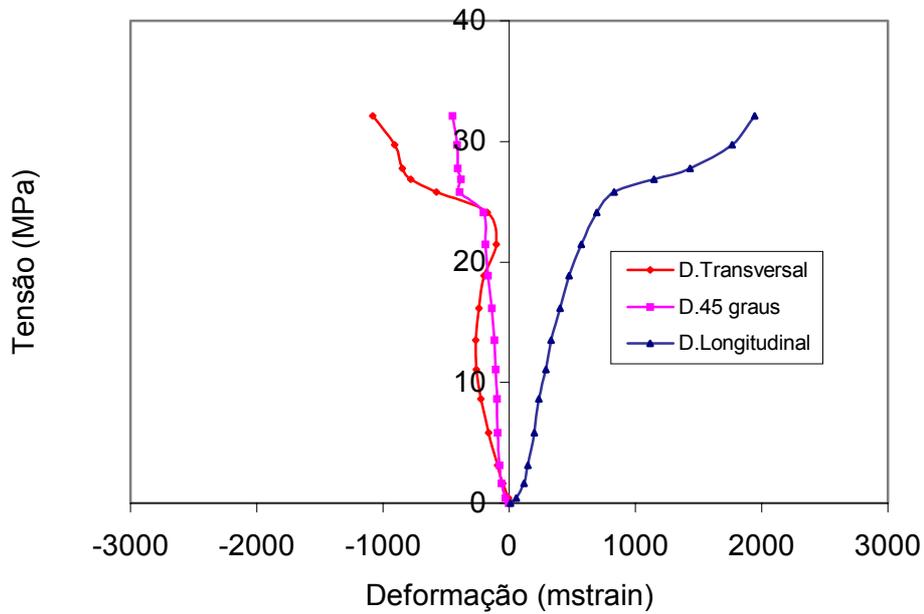


Figura 4.34. Deformações ocorridas no eixo côncavo do elemento.

O valor máximo de tensão registrado para o CP-5 corresponde à tensão crítica em regime elástico. O elemento não chegou ao colapso. Uma vez atingida a carga crítica o elemento aumentou de forma considerável sua deformação lateral para uma lenta diminuição da carga de compressão. Para preservar os LVDTs que poderiam sofrer dano durante o teste, o ensaio foi interrompido antes de ocorrer a ruptura do elemento. A tensão crítica foi de 31,33 MPa para uma deflexão máxima de 54,30 mm. Os resultados das deformações são apresentados nas Figuras 4.35 e 4.36 para strain gages situados na metade do comprimento do elemento, situados na face que provavelmente trabalharia à compressão ou tração de acordo com as imperfeições determinadas no mapeamento das características geométricas. Os mesmos foram colocados na proximidade do nó três, não apreciando-se influência do mesmo nas deformações do elemento nessa região.

Quanto aos resultados obtidos a partir dos LVDT o comportamento do elemento é compatível com o comportamento de colunas de aço em regime elástico com imperfeições iniciais e semelhante ao analisado para colunas com carga excêntrica (ver Figura 4.29).

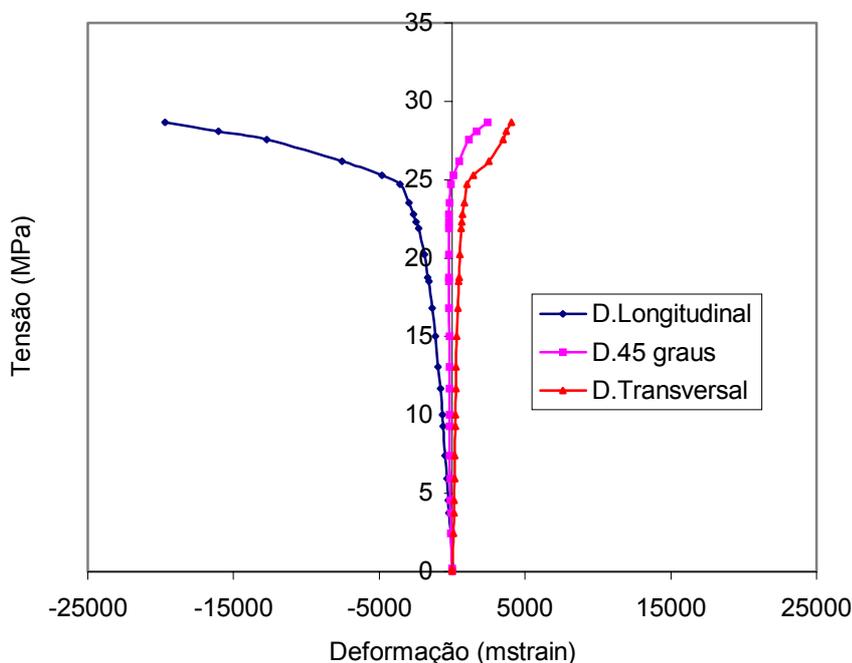


Figura 4.35. Deformações do elemento no eixo comprimido.

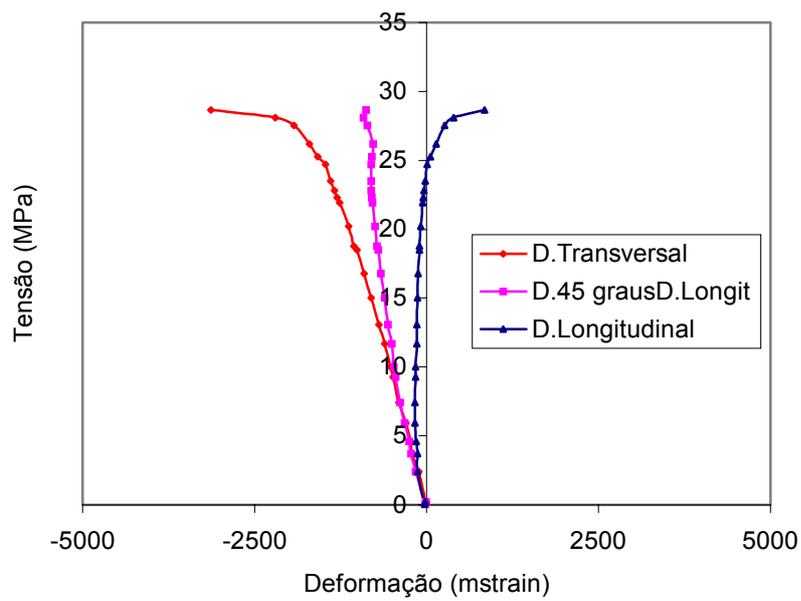


Figura 4.36. Deformações do elemento no eixo tracionado.

Como visto nas Figuras 4.35 e 4.36 o corpo de prova apresentou deformações de 0,019 no sentido longitudinal e 0,0024 no transversal para o eixo convexo e $\varepsilon_L = 0,0031$, $\varepsilon_T = 0,00084$ para o eixo côncavo. A Figura 4.37 mostra o ensaio realizado neste corpo de prova.



Figura 4.37. Posição dos strain gages na proximidade do nó.

No caso do elemento CP-3, de 1400 mm de comprimento, as tensões máximas atingiram o valor de 23,31 MPa e deslocamento total de 48,91 mm, sendo o deslocamento inicial de 5,43 mm.

Embora o elemento não tenha chegado ao colapso, seu comportamento foi similar ao apresentado pelo elemento de 800 mm (CP-7). A mudança na curvatura do gráfico carga – deslocamento (ver Figura 4.29), faz acreditar na fissura das fibras que debilitaram o corpo de prova provocando a perda da resistência da coluna. As Figuras 4.38 e 4.39 mostram o ensaio e a posição dos strain gages no elemento. Fotos complementares dos ensaios são apresentadas no Apêndice B.



Figura 4.38. Ensaio de flambagem para corpo de prova de 1400 mm.

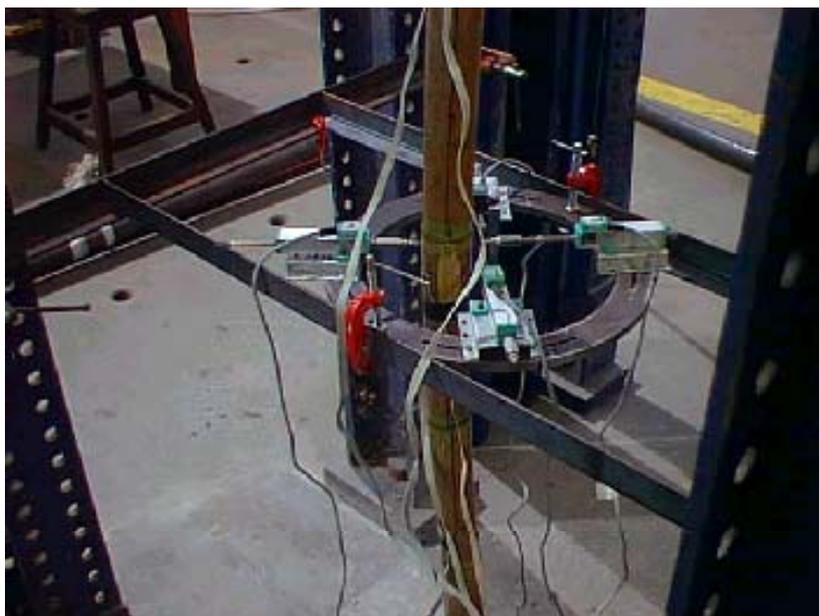


Figura 4.39. Posição dos strain gages nas proximidades do nó. Corpo de prova de $L = 1400$ mm.

Dos resultados até aqui analisados pode-se chegar as seguintes conclusões:

- Comprovou-se que o módulo de elasticidade obtido a partir do diagrama de Southwell é menor que o dos testes à compressão simples para um cilindro de $L = D$. Este resultado coincide com o apresentado por MOREIRA (1998) o qual o atribui ao fato de que elementos de bambu não possuem seções perfeitamente cilíndricas, como foi considerado na análise. Quando calculamos o módulo de elasticidade a partir do diagrama de Southwell, considera-se a inércia em $L/2$ como sendo maior que a inércia correspondente ao local de máxima deflexão do elemento. Outro aspecto a considerar é a presença de possíveis erros no cálculo da inércia física devido à variação da espessura da parede e do valor do gradiente de densidade k , o qual foi estimado a partir de estudos realizados por MOREIRA para a espécie *Dendrocalamus giganteus*.
- Nos ensaios foi possível constatar que o eixo centroidal dos colmos de bambu apresenta curvatura variada, o que dificulta a determinação do plano de deflexão para a obtenção de δ_0 .

- No caso de bambus com arqueamento definido, a imperfeição geométrica pode ser determinada medindo a distância desde uma haste retilínea até o ponto mais afastado da região côncava do elemento.
- A excentricidade na aplicação da carga é inevitável devido a própria geometria dos elementos de bambu.
- Observou-se ruptura por esmagamento das fibras. Este esmagamento esteve acompanhado por rachaduras longitudinais como foi mostrado na análise dos resultados obtidos para corpos de prova de 800 mm.
- Apesar de existir um aumento da espessura da parede e do diâmetro do nó, o comprimento da zona de influência do mesmo é curto em relação às distâncias internodais, não influenciando no aumento da rigidez global do elemento. Não obstante, este aspecto deve ser estudado com profundidade em trabalhos posteriores.
- A análise dos resultados dos ensaios através de flambagem de colunas, considerando o material homogêneo e isotrópico demonstrou ser satisfatório e se ajustar adequadamente ao estudo de colunas de bambu.