



ENSAIO DE FLAMBAGEM EM TUBOS DE PAPELÃO UTILIZADOS EM SISTEMAS CONSTRUTIVOS

Gerusa C. Salado (1); Eduvaldo P. Sichieri (2)

(1) Departamento de Arquitetura e Urbanismo – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: gesalado@sc.usp.br

(2) Departamento de Arquitetura e Urbanismo – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: sichieri@sc.usp.br

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo aferir a resistência à compressão axial de tubos de papelão esbeltos e medianamente esbeltos, utilizados em sistemas construtivos, para se identificar com quais cargas estes sofreriam flambagem, e aferir as flechas geradas. Em consequência de não existirem normas técnicas específicas para ensaios em tubos de papelão, tomou-se como base normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas destinadas a outros materiais, como o aço e o concreto, e em procedimentos de ensaios adotados pelo arquiteto japonês Shigeru Ban. Foram realizados ensaios em laboratório com amostras de tubos de papelão fabricados por uma indústria brasileira, em três espessuras de parede diferentes, sendo 04 mm, 11 mm e 20 mm. Os tubos de papelão com maior espessura de parede resistiram a uma carga um pouco superior que os tubos com espessura intermediária. Porém, a resistência de ambos foi cerca de três vezes superior a carga resistida pelos tubos de menor espessura de parede. Quanto ao comportamento do material, pode-se observar em todos os corpos-de-prova que a partir da aplicação de uma determinada carga começou-se a formar flecha, os corpos-de-prova tenderam a rotacionar, e também foram observadas ondulações e esmagamento próximo as suas extremidades. Este trabalho tem grande importância, uma vez que enfoca um material de grande produção nacional e maior resistência do que se imagina, podendo representar uma boa opção para alguns tipos de construções no Brasil, como as de caráter temporário, popular, emergencial e móvel, entre outras, e ainda contribuindo para a sustentabilidade.

Palavras-chave: tubos de papelão; materiais de construção reciclados; ensaio de flambagem.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, existe uma grande variedade de materiais que podem ser utilizados na Arquitetura. Dentre estes, encontram-se materiais que são utilizados há séculos por nossa civilização, como a pedra, a madeira, a terra e o aço, além do concreto, dos materiais cerâmicos, polímeros e vidros.

Cada um destes materiais possui as suas qualidades, vantagens, especificidades de uso e justificativas por existir. Seus usos e aplicações são diferenciados, de acordo com as suas propriedades, compondo sistemas construtivos de diversos tipos e funções.

Contudo, a sociedade atual está cada vez mais preocupada com o meio ambiente e a sua sobrevivência na Terra, devido ao crescimento acelerado da exploração de recursos naturais para suprir sua demanda de consumo, à grande quantidade de resíduos gerados e aos danos que isso tem causado ao planeta.

Esses fatores têm gerado questões que devem ser consideradas atualmente por arquitetos, engenheiros civis e demais profissionais da área, no exercício de suas atividades, demonstrando o quanto tornou-se fundamental o estudo de materiais alternativos para a construção civil.

Muitas vezes, esses materiais alternativos são compostos por resíduos gerados por outras indústrias ou produtos descartados pela população. Assim, é possível fabricar papel Kraft a partir da reciclagem de papéis descartados e utilizá-lo na fabricação de tubos de papelão para servirem como elementos de vedação e estrutura na Arquitetura.

A atratividade em se utilizar tubos de papelão na construção civil se dá por estes serem facilmente relocados e substituídos – quando danificados, de baixa tecnologia, manterem sua cor natural e não gerarem desperdício. Além disso, podem ser reciclados ou reutilizados, caso estejam em perfeitas condições de uso. (McQUAID, 2003).

É possível manter as características simples do tubo de papelão, utilizá-lo oco e com tratamento contra a ação do fogo e umidade, e aumentar as suas qualidades básicas para gerar um material estrutural com resistência satisfatória. (SALADO, 2006).

Os tubos de papelão são um material bastante versátil e podem ser usados de diversas maneiras, possibilitando sistemas construtivos variados que, muitas vezes, geram obras arquitetônicas arrojadas, surpreendendo quem as contempla.

Como exemplo, uma das primeiras construções realizada com tubos de papelão foi o Pavilhão de Odawara, no Japão, construído em 1990 para comemorar o aniversário da cidade, na qual Shigeru Ban utilizou tubos de papelão como elementos de vedação – figura 1. (THE JAPAN ARCHITECT, summer 1998).



Figura 1 – Vista externa do Pavilhão de Odawara.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.104.

Outro exemplo é o anexo escolar construído por Cottrell e Vermeulen na Inglaterra, em 2002; a primeira obra permanente em tubos de papelão da Europa – figuras 2 e 3. (SLESSOR, 2002).



Figura 2 – Clube de música pós-aula construído com tubos de papelão, Inglaterra – vista interna.

Fonte: Slessor, 2002, p.57.



Figura 3 – Clube de música pós-aula construído com tubos de papelão, Inglaterra – vista externa.

Fonte: Slessor, 2002, p.57.

As construções realizadas com tubos de papelão incitam reflexões sobre as idéias de fraqueza, durabilidade e natureza efêmera do papel.

Dada a importância de arquitetos, engenheiros civis e demais profissionais da área criarem novas propostas de materiais e sistemas construtivos para atender às mais diversas situações e necessidades da população - como rapidez na construção, limpeza e facilidade na obra, mobilidade, baixo custo, etc – e considerando esta tecnologia interessante frente a estas questões, surgiu o interesse em testar tubos de papelão fabricados no Brasil, a fim de se identificar as possibilidades de uso deste material compondo sistemas construtivos neste país.

2 OBJETIVO

Inicialmente, o objetivo deste ensaio era comprimir tubos de papelão medianamente esbeltos e esbeltos, utilizados em sistemas construtivos, para se identificar com quais cargas estes sofreriam flambagem, e aferir as flechas geradas.

No entanto, como os parâmetros de índice de esbeltez¹ existentes referem-se aos materiais concreto e aço, sendo incoerente aplicá-los para os tubos de papelão, os corpos-de-prova foram dimensionados por outro critério.

Assim sendo, o primeiro objetivo deste experimento foi identificar se ocorreria flambagem nos corpos-de-prova com as dimensões propostas e, caso isto ocorresse, o segundo objetivo seria identificar a carga que levaria os tubos a flambarem e aferir a flecha gerada.

3 METODOLOGIA

3.1 Amostragem

Decidiu-se, neste ensaio, testar tubos de papelão de mesmo diâmetro interno, 150 mm, e espessuras de 04 mm, 11 mm e 20 mm. Como comprimento, adotou-se uma medida possível e usual de pé-direito, sendo 2500 mm. Foram ensaiados três corpos-de-prova de cada espessura.

3.2 Materiais e equipamentos

Para este ensaio usou-se um pórtico de reação, dotado de um macaco hidráulico acionado por uma bomba eletro-hidráulica, uma célula de carga com capacidade para 24 toneladas e um aparelho Transdutec² (figuras 4 e 5).

Também foram utilizados paquímetros digital e analógico, trena e uma régua de madeira.



Figura 4 – Bomba eletro-hidráulica utilizada no ensaio de flambagem.

¹ O índice de esbeltez é a relação entre o comprimento da peça e o seu raio de geração, e mede o quanto esbelto é um pilar e a sua facilidade ou dificuldade de flambar. Assim, se o índice de esbeltez é pequeno, menor é a probabilidade de o pilar flambar e se o índice de esbeltez é grande, maior é a probabilidade de ocorrer flambagem.

² A leitura das cargas foi feita através do Transdutec, equipamento que lê a variação de corrente gerada pela deformação dos “strain gages” (extensômetros) dentro da célula de carga, em mV (miliVolts). Através de uma tabela de aferição da célula de carga, sabe-se a quais cargas os valores indicados no visor do equipamento correspondem.



Figura 5 – Equipamento Transdutec utilizado no ensaio de flambagem.

3.3 Procedimentos do ensaio

Os corpos-de-prova foram rigorosamente cortados nas medidas definidas acima, a 90° com relação ao seu eixo, e tiveram suas superfícies cortadas lixadas, para remoção de rebarbas.

As peças não receberam nenhum tipo de capeamento em suas bordas, mas isso não afetou os resultados, pois as minúsculas rebarbas de papel kraft restantes se acomodaram facilmente com o início da aplicação das cargas.

Antes do ensaio, todos os corpos-de-prova tiveram suas medidas de diâmetros interno e externo, espessura e comprimento aferidas com o auxílio de paquímetros e trena.

Após serem dispostos no equipamento de ensaio, foi feita uma pequena marca nos corpos-de-prova, para possibilitar que se verificassem possíveis ângulos de rotação, gerados durante a compressão.

A velocidade de carregamento foi bem lenta; porém, controlada manualmente pelo técnico que operava os equipamentos.

As cargas foram aplicadas em graduações de 500 kgf até que se observasse a perda de estabilidade global do elemento.

A cada 500 kgf aplicados, observou-se se os corpos-de-prova haviam rotacionado, mediu-se com uma trena os deslocamentos entre os pratos inferior e superior do equipamento e, encostando uma régua de madeira no sentido longitudinal em vários pontos da face externa dos tubos de papelão, pode-se verificar o início da flecha e acompanhar o seu progresso; até que o elemento perdesse totalmente a estabilidade.

A cada graduação de carga, também se observou o aparecimento de ondulações nas faces externas dos tubos e o esmagamento de seus topes.

Os procedimentos do ensaio podem ser observados através das figuras de 6 a 11.



Figuras 6 e 7 – Corpo-de-prova antes da aplicação de carga e após o início da flecha.

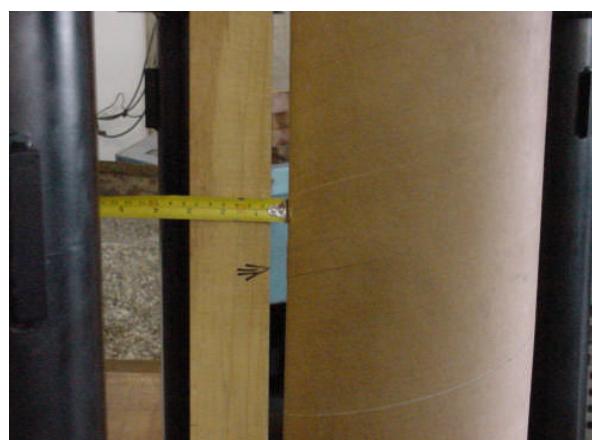


Figura 8 – Medição da flecha gerada no corpo-de-prova devido ao carregamento.

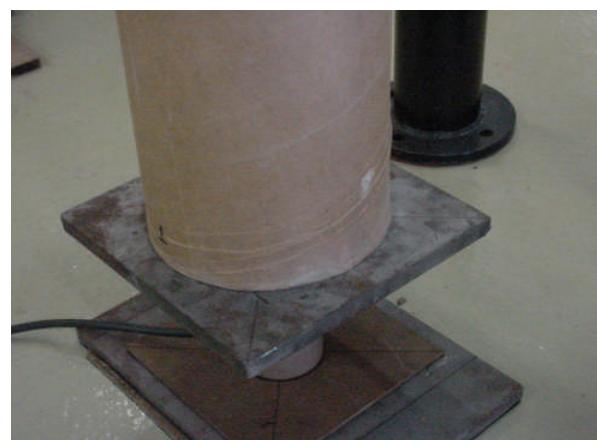


Figura 9 – Observação de enrugamento da extremidade do corpo-de-prova.



Figuras 10 e 11 – Tubo totalmente flambado e sem estabilidade e tubo rompendo com o acréscimo de carga.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Resultados

Os resultados do ensaio constam na tabela 1:

Tabela 1 – Resultados do ensaio de flambagem.

CPs	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Φ_i (mm)	173,7	172,3	172,8	162,5	162,5	162,5	157,4	156,4	157,4
Φ_e (mm)	194	193	193	174	174	174	162	161	162
e (mm)	20,3	20,7	20,2	11,5	11,5	11,5	4,6	4,6	4,6
l (mm)	2503	2503	2495	2507	2500	2506	2508	2505	2447
S_B (cm ²)	295,4	292,4	292,4	237,7	237,7	237,7	206,0	203,5	206,0
P^* (kgf)	2000	1500	1500	1500	1500	1500	500	500	500
Médias	1666,7			1500			500		
L^* (mm)	17	11	08	07	10	05	09	07	12
$P_{máx}$ (kgf)	7000	6166	6500	3500	3500	3500	1000	1000	1000
Médias	6555,3			3500			1000		
$L_{máx}$ (mm)	24	20	11	16	23	23	29	16	22
f_{fl} (Mpa)	2,4	2,1	2,2	1,5	1,5	1,5	0,5	0,5	0,5
Médias	2,2			1,5			0,5		
$Fl_{máx}$ (mm)	13	42	53	100	75	73	60	64	95
Médias	36			83			73		
D_{fts} (cm)	137	130	145	92	128	140	100	95	72

Sendo,

Φ_e o diâmetro externo;

Φ_i o diâmetro interno;

e a espessura da parede do tubo;

l o comprimento do tubo ensaiado;

S_B a área bruta da seção;

P^* a carga na qual percebeu-se o início da flambagem;

L^* o deslocamento entre os pratos superior e inferior do equipamento em P^* ;

$P_{máx}$ a carga máxima resistida;

$L_{máx}$ o deslocamento entre os pratos superior e inferior do equipamento em $P_{máx}$;

f_{fl} a tensão máxima de flambagem resistida;

$Fl_{máx}$ a flecha formada em $P_{máx}$;

D_{fis} a distância entre o ponto central da flecha formada e o topo superior do tubo.

O gráfico 1 mostra a relação entre carregamento e flecha observada durante o ensaio.

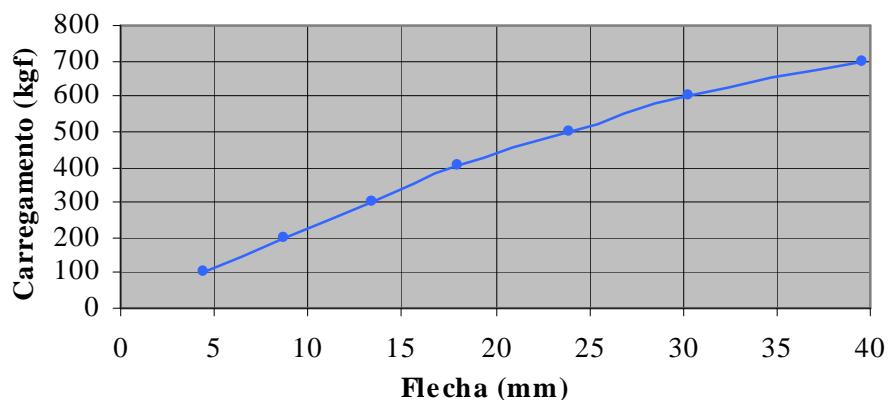


Gráfico 1 – Relação carregamento-flecha observada durante o ensaio de flambagem.

4.2 Observação visual/táctil após o ensaio

Até o momento em que a aplicação de carga começou a gerar a flecha, os corpos-de-prova não rotacionaram. Contudo, após o início desta, com o acréscimo de carga, estes tenderam a rotacionar e apresentaram esmagamento e ondulações próximo às suas extremidades.

Nenhum dos corpos-de-prova ensaiados apresentou aumento da espessura das suas paredes.

O único corpo-de-prova que recebeu aumento de carga mesmo após perder a estabilidade e rompeu, demonstrou que a ruptura do material se dá por destacamento entre as camadas de papel Kraft (figura 12).



Figura 12 – Corpo-de-prova rompido durante o ensaio de flambagem.

5 CONCLUSÕES

Primeiramente, pode-se constatar a ocorrência de flambagem. Isso demonstra que a resistência e estabilidade do material estão associadas a todas as suas dimensões (diâmetro, espessura e comprimento).

Dessa forma, tubos de diâmetros e espessuras iguais comportam-se de forma diferente, conforme o seu comprimento. Assim sendo, tubos curtos quando comprimidos apresentam apenas esmagamento das suas bordas e ondulações, e tubos longos apresentam essas mesmas características em suas bordas e flambagem ao longo de seu comprimento.

Este ensaio demonstrou que a partir de uma determinada carga os elementos flambam e, com o acréscimo de carga, perdem a sua resistência. Assim, verificou-se a perda da estabilidade global.

Os corpos-de-prova com espessura de 20 mm tiveram uma certa variação nos resultados, aceitável, e os com espessura de 11 mm e 04 mm apresentaram resultados próximos.

Quanto ao destacamento percebido entre as camadas de papel Kraft antes que este rompa, conclui-se que o papel Kraft é mais resistente que a cola utilizada no processo de fabricação dos tubos de papelão.

6 REFERÊNCIAS

McQUAID, M. **Shigeru Ban**. Nova York: Phaidon Press, 2003.

SALADO, G. C. **Construindo com tubos de papelão: Um estudo da tecnologia desenvolvida por Shigeru Ban**. Dissertação (Mestrado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2006. 186p.

SLESSOR, C. **Folding planes**. The Architectural Review, v211, n1262, abr 2002, p.56-7. Londres: Emap Construct.

THE JAPAN ARCHITECT. **Shigeru Ban**. Edição especial n30. Tóquio: A+U Publishing CO, summer 1998, 184p.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a FAPESP e o laboratório LCC do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos-USP.