

64 – Resistências à compressão axial e à flexão de tubos de papelão brasileiros e japoneses utilizados em sistemas construtivos

SALADO, Gerusa de Cássia (1); SICHIERI, Eduvaldo Paulo(2)

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

(2) Engenheiro de materiais, Prof^o Titular do Departamento de Arquitetura e Urbanismo – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: sichieri@sc.usp.br

Resumo

Proposta: O presente trabalho tem como objetivo aferir a resistência à compressão axial e a resistência à flexão de tubos de papelão fabricados no Brasil, além de identificar o comportamento deste material quando submetido a estes tipos de esforços, e comparar os resultados obtidos com os resultados de ensaios feitos pelo arquiteto Shigeru Ban com os tubos de papelão de origem japonesa que utiliza em suas obras. **Método de pesquisa:** Baseando-se em normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas e nos próprios procedimentos de ensaios adotados por Shigeru Ban, foram realizados ensaios em laboratório com amostras de tubos de papelão fabricados por uma indústria brasileira, a fim de se obterem os valores correspondentes às resistências à compressão axial e à flexão. **Resultados:** Os tubos de papelão testados neste trabalho apresentaram resistências à compressão e à flexão cerca de 20% e 30%, respectivamente, inferiores aos tubos japoneses. O tubo de papelão não entra em colapso quando submetido a cargas; a tendência é se deformar até perder a estabilidade. Quando um tubo de papelão é submetido a uma carga de compressão, a força se propaga através das faixas de papel kraft, no sentido de seu enrolamento, rotacionando o elemento. Os tubos de papelão possuem resistência à flexão um pouco maior que sua resistência à compressão. **Contribuições/Originalidade:** 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 – um país onde o déficit habitacional é tão preocupante, como as de caráter popular, emergencial e móvel, entre outras, sem gerar danos tão irreversíveis para o meio ambiente.

Palavras chave: tubos de papelão; materiais de construção alternativos; materiais de construção sustentáveis.

Abstract

Propose: *This article has the objective to measure the axial compression strength and the bending strength of paper tubes made in Brazil, besides to identify the behavior of this material when submitted to this kinds of forces and to compare the results obtained with the results of tests made by architect Shigeru Ban with the paper tubes from Japan that he uses in his buildings. **Methods:** Based on the standards practice from Associação Brasileira de Normas Técnicas and in the testing process used by Shigeru Ban, were made tests in laboratory with samples of paper tubes made by a Brazilian industry, to aim to obtain the values of the axial compression strength and bending strength. **Findings:** The paper tubes tested in this research present compression and bending strengths about 20% and 30%, respectively, low to Japanese tubes. The paper*

tube doesn't led to ruin when submitted to loads; the tendency is deform itself until lose the stability. When a paper tube is submitted to a compression load, the force through the kraft paper sashes, in direction of your, rotating the element. The paper tubes have bending strength a little bigger that your compression strength. **Originality/value:** This article is very important because focus a material with a national large production and higher strength that imagine, presenting a good option to same kinds of constructions in Brazil – a country where the housing deficit is a big preoccupation, as the popular character, emergency and movable, among others, doesn't generate damages very irreversible to environment.

Key words: paper tubes; alternative construction materials; sustainable construction materials.

INTRODUÇÃO

O arquiteto japonês Shigeru Ban vem utilizando tubos de papelão em suas obras em diversas partes do mundo, como Alemanha, Ruanda, Turquia, Índia, EUA, França e Japão, desde 1986.

Os sistemas construtivos gerados por este arquiteto formam construções de pequeno, médio e grande portes, permanentes ou temporárias. Alguns exemplos de suas obras podem ser vistos nas figuras 01 a 04.



Figura 01 - Pavilhão de Odawara, Japão.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.104.



Figura 02 – “Log house” em Kobe, Japão.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.89.



Figura 03 - Casa de papelão, Japão.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.95.

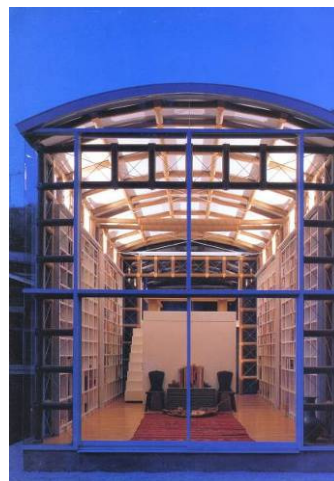


Figura 04 – Biblioteca do poeta, Japão.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.102.

Dada a importância de arquitetos, engenheiros civis e demais profissionais da área, no exercício de suas atividades, 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 a tecnologia desenvolvida por Shigeru Ban 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. (SALADO, 2006).

A princípio, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial e ensaios de resistência à flexão. Durante estes ensaios, foi observado o comportamento do material submetido a tais esforços e, posteriormente, os resultados destes ensaios foram comparados com os resultados obtidos por Shigeru Ban ao testar os tubos japoneses.

ENSAIOS TÉCNICOS REALIZADOS COM TUBOS DE PAPELÃO JAPONESSES

Shigeru Ban costuma realizar ensaios técnicos diferentes para cada um de seus projetos. Assim, têm-se como referência alguns ensaios de resistência à compressão e de resistência à flexão que o arquiteto executou antes de construir a Casa de Papelão e o Domus de Papelão.

Ensaio de resistência à compressão

Nos testes feitos para a Casa de Papelão foram ensaiados cinco corpos-de-prova com 280 mm de diâmetro externo, 250 mm de diâmetro interno, 15 mm de espessura e 600 mm de comprimento. (McQUAID, 2003).

Ao final do teste, figuras 05 e 06, os tubos estavam torcidos e visivelmente deformados, com dobras bastante aparentes nas emendas do enrolamento espiral.



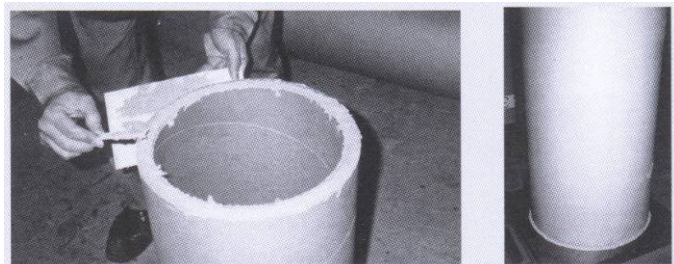
Figuras 05 e 06 – Aspecto dos tubos após o teste de resistência à compressão, para a Casa de Papelão. Fonte: McQuaid, 2003, p.75.

A tabela 01 mostra os resultados do ensaio.

Tabela 01 – Resultados do teste de resistência à compressão para a Casa de Papelão. Fonte: McQuaid, 2003, p.75.

Corpo-de-prova	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
Resistência à compressão (MPa)	10,60	11,32	11,41	11,27	11,27
	Média = 11,17				
Módulo Young (GPa)	2,55	2,40	2,34	2,45	2,33
	Média = 2,41				
Coefficiente de Poisson	0,113	0,155	0,150	0,135	-
	Média = 0,138				
Teor de umidade (%)	8,3	8,8	8,9	9,2	8,8
	Média = 8,8				

Para o Domus de Papelão também foram ensaiados cinco corpos-de-prova, porém com 600 mm de comprimento, 291 mm de diâmetro externo, 250 mm de diâmetro interno e 20,5 mm de espessura. Seguiram-se os mesmos procedimentos do ensaio realizado para a Casa de Papelão. Entretanto, para se retificar as superfícies cortadas nas extremidades dos tubos, aplicou-se adesivo epóxi e uma placa metálica em cada ponta; o que minimizou os danos nas bordas dos mesmos durante o ensaio – figuras 07 e 08. (McQUAID, 2003).



Figuras 07 e 08 – Aplicação de adesivo epóxi e capeamento da superfície cortada do tubo usado no ensaio de resistência à compressão para o Domus de Papelão. Fonte: McQuaid, 2003, p.78.

Os resultados do ensaio são apresentados na tabela 02.

Tabela 02 – Resultados do teste de resistência à compressão para o Domus de Papelão. Fonte: McQuaid, 2003, p.78.

	D = 291 mm		d = 250 mm		
Corpo-de-prova	$f_{c \max}$	E	Poisson	U	ρ
C-1	9,60	2,18	0,134	10,2	0,816
C-2	9,96	2,09	0,138	9,9	0,821
C-3	9,94	2,14	0,140	9,9	0,819
C-4	9,58	1,98	0,142	9,8	0,811
C-5	9,58	2,16	0,151	10,2	0,817
Médias	9,74	2,11	0,141	10,0	0,817

Sendo,

D = diâmetro externo (mm)

d = diâmetro interno (mm)

$f_{c \max}$ = resistência à compressão (MPa)

E = Módulo Young (GPa)

U = Teor de umidade, em porcentagem do peso total (%)

ρ = densidade (g/cm^3)

Ensaio de resistência à flexão

No ensaio de resistência à flexão para a Casa de Papelão foram ensaiados cinco corpos-de-prova com 4,00 m de comprimento, 280 mm de diâmetro externo, 250 mm de diâmetro interno e 15 mm de espessura.

O vão utilizado no teste foi prolongado para minimizar as deformações parciais do tubo nos pontos de suporte e carregamento. Uma força vertical (P) solicitou o tubo no ponto médio do seu comprimento, com uma velocidade de carregamento de 0,01 MPa/s – figura 09. (McQUAID, 2003).

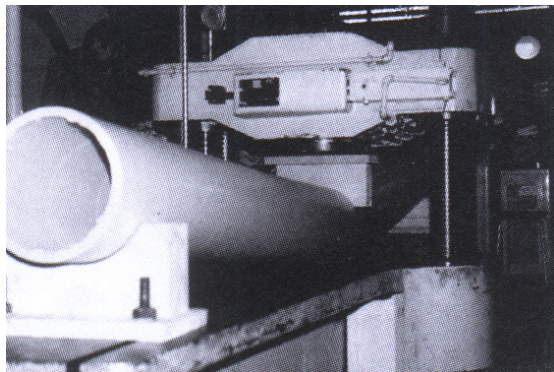


Figura 09 – Tubo de papelão tocando a mesa de teste no centro do vão em ensaio de resistência à flexão para a Casa de Papelão. Fonte: McQuaid, 2003, p.76.

Os resultados obtidos neste ensaio podem ser observados na tabela 03.

Tabela 03 – Resultados do teste de resistência à flexão para a Casa de Papelão. Fonte: McQuaid, 2003, p.76.

Corpo-de-prova	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
Resistência à flexão (MPa)	16,91	14,84	15,53	15,57	16,25
	Média = 15,82				
Módulo Young (GPa)	2,18	2,15	2,26	2,20	2,29
	Média = 2,22				
Teor de umidade (%)	9,3	9,3	8,6	8,7	8,5
	Média = 8,9				

Para o Domus de Papelão, neste ensaio, os cinco corpos-de-prova testados possuíam 1758 mm de comprimento, diâmetros externo/interno de 291/250 mm, 20,5 mm de espessura e enrijecedores internos nos dois pontos de suporte e nos dois pontos de carregamento, para evitar deformações locais – figura 10. (McQUAID, 2003).

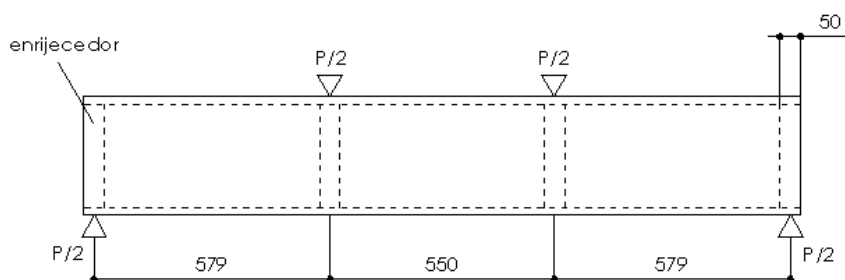


Figura 10 – Desenho esquemático do ensaio de resistência à flexão realizado para o Domus de Papelão. Medidas em mm. Fonte: McQuaid, 2003, p.78.

Pode-se observar que a região central tocou a mesa de ensaio e que se formaram ondulações na parte superior desta mesma área, antes de ocorrer a ruptura.

Os valores das resistências máximas à flexão são mostrados na tabela 04.

Tabela 04 – Resultados do teste de resistência à flexão para o Domus de Papelão. Fonte: McQuaid, 2003, p.78.

D = 291 mm		d = 250 mm	
Corpo-de-prova	f_f^*	E	U
B-1	14,63	2,29	10,5
B-2	14,78	2,19	10,4
B-3	15,45	2,01	10,0
B-4	15,25	1,97	10,1
B-5	14,42	2,27	10,1
Médias	14,91	2,15	10,2

Sendo,

D = diâmetro externo (mm)

d = diâmetro interno (mm)

f_f^* = resistência à flexão para um deslocamento = 36 mm (MPa)

E = Módulo Young (GPa)

U = Teor de umidade, em porcentagem do peso total (%)

ENSAIOS TÉCNICOS REALIZADOS COM TUBOS DE PAPELÃO BRASILEIROS

A realização de ensaios preliminares para caracterização de tubos de papelão fabricados no Brasil teve por objetivo possibilitar a comparação deste material com o utilizado pelo arquiteto Shigeru Ban, no que diz respeito à resistência aos esforços de compressão e flexão solicitados numa construção.

Ensaio de resistência à compressão

Objetivo

O objetivo deste experimento foi determinar a resistência à compressão axial de tubos de papelão fabricados por uma indústria brasileira, secos e sem revestimento.

Corpos-de-prova

Foram ensaiados nove corpos-de-prova, sendo três com 04 mm de espessura, três com 11 mm, e três com 20 mm. Todos possuíam 150 mm de diâmetro interno e um teor de umidade em torno de 9%. Com relação

à altura e diâmetro externo, os corpos-de-prova tiveram as seguintes dimensões: 316 x 158 mm, 344 x 172 mm, e 380 x 190 mm.¹

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. Após serem dispostos no equipamento de ensaio, figura 11, foi feita uma pequena marca nos corpos-de-prova, para possibilitar a verificação do ângulo de rotação, gerado durante a compressão. A velocidade de carregamento utilizada foi constante de 1,0 mm/min, para todos os corpos-de-prova.



Figura 11 – Corpo-de-prova durante o ensaio de resistência à compressão. Fonte: SALADO, 2006, p. 128.

Resultados

Os resultados do ensaio podem ser conferidos na tabela 05 e na figura 12:

Tabela 05 – Resultados do ensaio de resistência à compressão. Fonte: SALADO, 2006, p. 129.

CPs	Φ_e (mm)	Φ_i (mm)	S_L (cm ²)	S_B (cm ²)	$P_{m\acute{a}x}$ (Kgf)	$f_{cm\acute{a}x^*}$ (MPa)	$f_{cm\acute{a}x^{**}}$ (MPa)
01	193,3	152,6	108,6	293,3	8427	7,8	2,9
02	193,3	152,7	109,4	293,3	8779	8,0	3,0
03	193,3	152,5	110,1	293,3	8492	7,7	2,9
Média	193,3	152,6	109,4	293,3	8566	7,8	2,9
04	173,5	151,0	57,3	236,3	4282	7,5	1,8
05	173,5	150,9	57,6	236,3	4357	7,6	1,8
06	173,5	151,0	57,3	236,3	4373	7,6	1,9
Média	173,5	151,0	57,4	236,3	4337	7,6	1,8
07	161,7	152,4	23,0	205,3	1273	5,5	0,6
08	161,8	152,4	23,2	205,5	1190	5,1	0,6
09	161,4	152,1	22,9	204,5	1294	5,7	0,6
Média	161,6	152,3	23,0	205,1	1252	5,4	0,6

Sendo,

Φ_e o diâmetro externo;

¹ Como não existe uma norma específica para o ensaio de resistência à compressão axial em tubos de papelão, nem foi encontrada uma que se referisse a elementos estruturais tubulares, suas alturas foram definidas conforme a NBR5739/1994, que determina que os corpos-de-prova cilíndricos de concreto devem possuir altura equivalente ao dobro de seu diâmetro, para este tipo de ensaio. Seguindo este princípio, adotou-se para os tubos de papelão uma altura equivalente ao dobro de seu diâmetro externo.

- Φ , o diâmetro interno;
- S_L a área líquida da seção;
- S_B a área bruta da seção;
- $P_{máx}$ a carga máxima resistida;
- $f_{cmáx}^*$ o módulo de resistência à compressão;
- $f_{cmáx}^{**}$ a tensão máxima de compressão resistida².

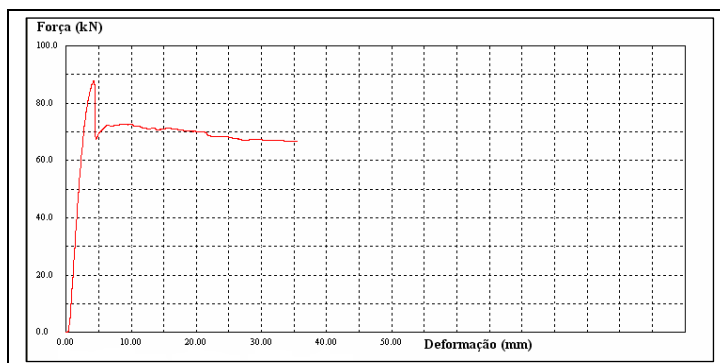


Figura 12 – Gráfico do ensaio de resistência à compressão. Fonte: SALADO, 2006, p. 130.

Todos os corpos-de-prova rotacionaram cerca de 0,5° no sentido horário.

Observação visual/táctil após o ensaio

Além do ângulo de rotação, pode-se perceber que os corpos-de-prova sofreram esmagamento da borda superior, junto à aplicação de carga. Também apresentaram ondulações paralelas às emendas de papel kraft, tanto na face externa quanto na face interna (figuras 13 e 14).



Figura 13 – Corpo-de-prova durante o ensaio. Fonte: SALADO, 2006, p. 130.



Figura 14 – Ondulações formadas no corpo-de-prova. Fonte: SALADO, 2006, p.131.

Ensaio de resistência à flexão

Objetivo

O objetivo deste ensaio foi aplicar uma carga concentrada e perpendicular ao centro de um tubo de papelão disposto horizontalmente, seco e sem revestimento, até este perder a sua resistência. Além disso, pretendeu-se aferir a flecha máxima gerada neste instante.

²

Para se calcular a tensão máxima de compressão resistida, $f_{cmáx}^{**}$, considerou-se a área bruta da seção; assim como é feito para os blocos cerâmicos e de concreto utilizados em vedação estrutural. No entanto, para gerar dados comparáveis com os obtidos e divulgados por Shigeru Ban em seus ensaios, calculou-se o módulo de resistência à compressão dos corpos-de-prova, $f_{cmáx}^*$; considerando para este cálculo apenas a área líquida da seção transversal.

Corpos-de-prova

Foram ensaiados 09 corpos-de-prova, sendo três com 04 mm de espessura, três com 11 mm, e três com 20 mm.

A tabela 6 mostra os comprimentos utilizados.

Tabela 6 – Dimensões dos corpos-de-prova testados no ensaio de resistência à flexão.

e (mm)	L_e (mm)	L_p (mm)
04	1900	2000
11	2100	2200
20	2300	2400

Sendo “e” a espessura das peças, “ L_e ” o comprimento de ensaio e “ L_p ” o comprimento das peças³.

Procedimentos do ensaio

O método utilizado foi o Método dos Três Pontos (NBR14576:2000), esquematizado na figura 15.

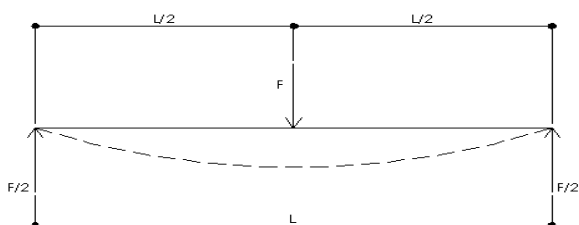


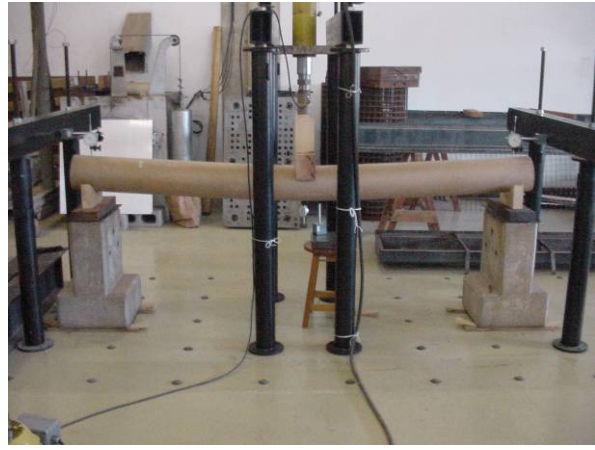
Figura 15 – Desenho esquemático do ensaio de resistência à flexão pelo Método dos Três Pontos (NBR14576:2000).

Fonte: SALADO, 2006, p. 138.

Cada peça foi disposta horizontalmente sobre dois prismas-suporte apoiados sobre duas bases de concreto. No ponto central do comprimento de ensaio, diametralmente oposto aos prismas-suporte, foi posicionado o prisma de pressão.

Assim que o corpo-de-prova foi devidamente colocado no equipamento de ensaio, a carga foi aplicada no ponto central do comprimento de ensaio, sobre o prisma de pressão, até o elemento ensaiado perder a resistência (figuras 16 e 17). Neste momento, considerou-se a flecha máxima gerada.

³ Segundo a NBR 14576:2000, o chamado comprimento de ensaio (L ou L_e) é a distância entre os prismas-suporte, e deve ser equivalente a pelo menos 12 vezes o diâmetro externo do corpo-de-prova ensaiado. Da mesma forma, segundo a NBR 14576:2000, o chamado comprimento do corpo-de-prova (L_p) é o comprimento real do elemento a ser ensaiado e deve ser equivalente ao comprimento de ensaio acrescido de 100 mm. Estes 100 mm foram divididos em dois balanços de 50 mm cada, e ficaram posicionados externos aos prismas-suporte.



Figuras 16 e 17 – Corpo-de-prova durante o ensaio de resistência à flexão. Fonte: SALADO, 2006, p. 141.

Resultados

Os resultados são expostos na tabela 5.21.

Tabela 5.21 – Resultados do ensaio de resistência à flexão.

CPs	Φ_e (mm)	e (mm)	S_B (cm ²)	L_e (mm)	$P_{m\acute{a}x}$ (Kgf)	$f_{fma'x}$ (MPa)	E (GPa)	$Fl_{m\acute{a}x}$ (mm)
01	193	20,1	292,4	2300	900	12,0	1,4	38,5
02	193	20,2	292,4	2300	700	9,4	1,0	43,2
03	193	20,2	292,4	2300	700	9,4	1,1	39,6
Média	193	20,2	292,4	2300	766,7	10,3	1,2	40,4
04	173	11,3	234,9	2100	350	8,4	1,5	24,7
05	173	11,3	234,9	2100	350	8,4	1,5	23,9
06	173	11,4	234,9	2100	350	8,4	1,1	31,5
Média	173	11,3	234,9	2100	350	8,4	1,4	26,7
07	161	4,7	203,5	1900	100	5,4	0,6	32,7
08	161	4,7	203,5	1900	100	5,4	0,6	32,1
09	161	4,7	203,5	1900	100	5,4	0,6	34,5
Média	161	4,7	203,5	1900	100	5,4	0,6	33,1

Sendo,

Φ_e o diâmetro externo;

e a espessura da parede do tubo;

L_e o comprimento do ensaio;

S_B a área bruta da seção;

$P_{m\acute{a}x}$ a carga máxima resistida à flexão;

$f_{fma'x}$ a tensão de flexão máxima resistida;

E o módulo de elasticidade do material;

$Fl_{m\acute{a}x}$ a flecha máxima gerada em $P_{m\acute{a}x}$.

Observação visual/táctil após o ensaio

Todos os corpos-de-prova sofreram um pequeno amassamento em seus pontos de apoio, devido aos prismas-suporte. Percebeu-se, também, que ao ultrapassar o limite de sua resistência, os corpos-de-prova amassaram no local de aplicação de carga, devido à curvatura gerada, apresentando rugas e ondulações (figura 18).

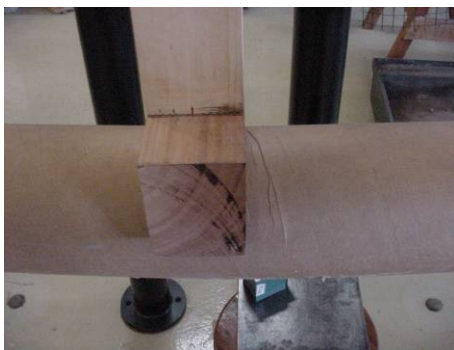


Figura 18 – Corpo-de-prova recebendo carga superior ao seu limite de resistência. Fonte: SALADO, 2006, p. 143.

Conclusões

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e à flexão realizados com tubos de papelão brasileiros, possibilitaram uma comparação com os valores respectivos para os tubos fabricados no Japão. Referindo-se aos valores obtidos para a tensão máxima de compressão resistida, os tubos de papelão brasileiros testados neste trabalho apresentaram resultados cerca de 20% inferiores aos obtidos por Shigeru Ban.

Quanto aos valores obtidos para a tensão máxima de flexão resistida, os tubos brasileiros apresentaram resultados 30% inferiores ao material japonês.

No entanto, esta discrepância pode ser devido ao fato das matérias-primas constituintes dos tubos de papelão japoneses (papéis e colas) serem de qualidades diferentes dos fabricados no Brasil. O processo de fabricação dessas matérias-primas e dos tubos também deve interferir em sua resistência.

Embora os tubos de papelão brasileiros apresentaram valores de resistência menores que os tubos japoneses, certamente, com soluções em projeto tais como o uso de enrijecedores, ligações menos espaçadas e amarrações seria possível construir obras semelhantes as do arquiteto japonês Shigeru Ban.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Papel e cartão – Tubetes – Determinação da resistência à flexão – Método dos três pontos: NBR14576:2000**. Rio de Janeiro: ABNT, 2000. 03 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio: NBR5739:1994**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

McQUAID, M. **Shigeru Ban**. Nova Iorque: 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.

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

Este trabalho foi desenvolvido com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.