Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Arquitetura e Urbanismo

CONSTRUINDO COM TUBOS DE PAPELÃO:

UM ESTUDO DA TECNOLOGIA DESENVOLVIDA POR SHIGERU BAN

GERUSA DE CÁSSIA SALADO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre.

Área de concentração:
Tecnologia do Ambiente Construído

Orientador:
Prof. Assoc. EDUVALDO PAULO SICHIERI

São Carlos
2 0 0 6

*"A estabilidade de uma construção não
depende da resistência mecânica de
seu material."*

Shigeru Ban

Dedico este trabalho

*Ao Profº Carlos Eduardo T. Packer (in memoriam)
por, nos últimos anos de sua missão, ter me
apresentado as obras arquitetônicas de Shigeru
Ban com tubos de papelão e ter me despertado
o interesse por esta linha de pesquisa,
encorajando-me até o fim,*

*A todas as pessoas que valorizaram e
incentivaram a minha pesquisa, por
acreditarem e apoiarem o seu
desenvolvimento.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio sem o qual não seria possível a realização deste trabalho;

ao meu orientador, Eduvaldo Paulo Sichieri, pela parceria, disposição e ajuda em momentos de dificuldade;

à Zelepel Indústria e Comércio de Artefatos de Papel S/A, e em especial ao seu diretor-presidente Dr. Paulo Cavalcanti, por me receber em sua empresa tantas vezes, sempre disposto a ajudar, e por fornecer os tubos de papelão utilizados nesta pesquisa;

aos funcionários da Zelepel Indústria e Comércio de Artefatos de Papel S/A, Sr. Aguinaldo Jacomini, Sr. Helio Pamponet Cunha Moura, Joana e Marciel, por serem tão receptivos e atenciosos, colaborando com as informações necessárias para o desenvolvimento deste trabalho;

aos funcionários do Laboratório de Construção Civil da EESC-USP, Sérgio Trevelin, Paulo Pratavieira e Paulo Albertini, pela dedicação e capricho na montagem e execução dos ensaios técnicos realizados;

aos funcionários do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da EESC-USP, Marcelo Celestini, Sérgio Celestini, Geraldo Pereira e Paulo Ceneviva por todo o auxílio prestado;

às amigas Sandra Lima e Rafaelle Tiboni, pela força e companheirismo em boa parte do tempo gasto no desenvolvimento deste trabalho;

aos amigos Dominique Fretin, Valter Luis Caldana Jr, Ivana Bedendo e Mônica Junqueira, que sempre me incentivaram a seguir este caminho;

à minha amada família, minha mãe D. Rita, meus irmãos Rigeria e Thiago, e meu Anjinho Ricardo, pela paciência, compreensão, incentivo e companhia em todos os momentos.

Sem a participação de cada um de vocês, este trabalho não seria possível.

Muito obrigada!

Gerusa Salado.

RESUMO

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

Diante do contexto atual de grande preocupação com a preservação do meio ambiente e, ao mesmo tempo, milhares de pessoas desabrigadas devido à pobreza e às catástrofes ambientais, surge a necessidade de se estudar materiais de construção alternativos, que possam contribuir para amenizar essas questões.

Com base nisso, este trabalho enfoca o emprego de tubos de papelão na construção civil pelo arquiteto japonês Shigeru Ban.

Estudou-se os sistemas construtivos criados pelo referido arquiteto e as características técnicas dos tubos de papelão que este utiliza em suas obras.

Foram realizados alguns ensaios técnicos preliminares para a caracterização de tubos de papelão fabricados por uma indústria brasileira, e também para se chegar à conclusão se suas características técnicas possibilitariam gerar sistemas construtivos como os das obras japonesas.

Este estudo, porém, é apenas o início de muitas pesquisas que devem ser feitas até que se identifique a viabilidade de aplicação desta tecnologia no Brasil.

Palavras-chave: Materiais de construção, materiais de construção alternativos, tubos de papelão.

ABSTRACT

SALADO, G.C. **Building with paper tubes: A research into the technology developed by Shigeru Ban.** Dissertação (mestrado). São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2006.

According to the actual context of great concern with the environment preservation and, at the same time, millions of homeless people due poverty and environmental catastrophes, arises the necessity of studying alternative construction materials, which can contribute to soften these issues.

Based in this, this work focuses the use of paper tubes in the construction by the Japanese architect Shigeru Ban.

The construction systems created by the referenced architect and the technical characteristics of paper tubes that he uses in his works have been studied in this research.

Preliminary technical tests have been done to characterize paper tubes made by a Brazilian industry and to check if their technical characteristics would become possible the production of construction systems as the Japanese works.

This study, however, is only the beginning of several researches that will made until identify the viability of application this technology in Brazil.

Key-words: Construction materials, alternative construction materials, paper tubes.

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
1. Introdução.....	01
1.1. Considerações iniciais e definição de conceitos.....	01
1.2. Proposta e importância do estudo.....	04
1.3. Objetivos do trabalho.....	05
1.4. Conteúdo do trabalho.....	05
2. O material papelão.....	07
2.1. Histórico.....	07
2.2. As preocupações com o meio ambiente.....	10
2.3. A fabricação do papel kraft e dos tubos de papelão.....	14
2.3.1. Tipos, qualidades e aplicações de diversos tipos de papéis e seus derivados.....	20
3. O uso do papelão na construção civil.....	23
3.1. As chapas de papelão abrindo caminho para o uso desse material na construção civil.....	25
3.2. O uso de tubos de papelão na construção civil.....	36
3.2.1. Formas de papelão para pilares de concreto.....	36
3.2.2. Os tubos de papelão como elementos de vedação e estrutura.....	38
4. O uso dos tubos de papelão pelo arquiteto Shigeru Ban em suas	

obras.....	46
4.1. Apresentação e análise técnica das obras de Shigeru Ban com tubos de papelão.....	48
5. Ensaios técnicos realizados com tubos de papelão.....	96
5.1. Ensaios técnicos realizados por Shigeru Ban.....	97
5.1.1. Ensaios realizados para a Biblioteca do Poeta.....	97
5.1.2. Ensaios realizados para a Casa de Papelão.....	99
5.1.2.1. Ensaio de resistência à compressão.....	99
5.1.2.2. Ensaio de resistência à flexão.....	101
5.1.2.3. Ensaio de tensão ao cisalhamento simples.....	102
5.1.3. Ensaios realizados para o Domus de Papelão.....	104
5.1.3.1. Ensaio de resistência à compressão.....	105
5.1.3.2. Ensaio de resistência à flexão.....	106
5.1.3.3. Ensaio de resistência à compressão para diferentes teores de umidade.....	108
5.1.3.4. Ensaio de resistência ao cisalhamento na ligação.....	110
5.1.3.5. Ensaio de resistência à flexão na ligação.....	112
5.1.4. Ensaios realizados para o Pavilhão Japonês na Expo 2000.....	114
5.1.4.1. Ensaio de resistência à compressão.....	115
5.1.4.2. Ensaio de resistência à flexão.....	116
5.1.4.3. Simulação do ensaio de resistência à compressão, após a montagem.....	116
5.1.4.4. Ensaio de resistência à torção.....	117
5.1.4.5. Teste de aplicabilidade de revestimento impermeável nos tubos.....	118
5.1.4.6. Desempenho de proteção ao fogo da membrana de papel.....	119
5.2. Ensaios técnicos realizados por este trabalho.....	121
5.2.1. Ensaio de absorção de umidade.....	123
5.2.2. Ensaio de resistência à compressão.....	127
5.2.3. Ensaio de flambagem.....	131
5.2.4. Ensaio de resistência à flexão.....	137
6. Discussão.....	144
6.1. Quanto às obras de Shigeru Ban.....	144

6.2. Quanto aos ensaios técnicos realizados por Shigeru Ban.....	147
6.3. Quanto aos ensaios técnicos realizados por este trabalho.....	148
6.3.1. Quanto ao ensaio de absorção de umidade.....	149
6.3.2. Quanto ao ensaio de resistência à compressão.....	150
6.3.3. Quanto ao ensaio de flambagem.....	151
6.3.4. Quanto ao ensaio de resistência à flexão.....	151
6.4. Quanto à relação entre os ensaios técnicos e as obras arquitetônicas.....	152
6.5. Quanto à comparação, em termos de resistência, entre os tubos de papelão brasileiros e os tubos japoneses.....	154
6.6. Quanto à comparação entre os tubos de papelão e os materiais convencionais usados em estruturas.....	155
7. Conclusões.....	159
7.1. Prosseguimento do estudo.....	161
8. Bibliografia.....	163
8.1. Referências bibliográficas.....	163
8.2. Bibliografia complementar consultada.....	169
Lista de siglas e abreviaturas.....	174
Lista de quadros.....	176
Lista de tabelas.....	177
Lista de figuras.....	179

1 . I N T R O D U Ç Ã O

1.1. Considerações iniciais e definição de conceitos

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.

Ao longo dos tempos, a humanidade vem adaptando os recursos naturais, tais como pedra, madeira, barro, fibras vegetais, peles animais, etc para satisfazer suas necessidades. A metalurgia, a produção de vidros, plásticos e outros transformados são exemplos comuns deste processo de dominação da natureza pelo homem. A descoberta e o desenvolvimento contínuo de conhecimentos e técnicas têm revelado, ao longo dos anos, novas possibilidades de produção e utilização de materiais.

Dentro desta perspectiva observa-se, atualmente, uma mudança na relação estabelecida entre a humanidade e os recursos naturais. Materiais sintéticos que atendem às novas exigências de produção e utilização, superando os limites relacionados à disponibilidade dos recursos naturais, estão sendo desenvolvidos. Mas, como em todas as evoluções tecnológicas ocorridas

até hoje, as conseqüências desse progresso têm deixado marcas e questões a serem respondidas.

Assim, uma corrente tem estado em evidência nos últimos anos. Esta corrente é formada por ecologistas e baseada nos princípios do Desenvolvimento Sustentável definidos pela Agenda 21¹. Segundo ela, estamos enfrentando um grande dilema mundial e o homem já percebeu que com seus hábitos consumistas e inconseqüentes está levando o planeta a uma catástrofe ambiental.

Ao mesmo tempo, os altos níveis de pobreza têm se alastrado intensamente. Atualmente, uma parcela considerável da população tem baixo poder aquisitivo e encontra grandes dificuldades em adquirir os materiais de construção convencionais.

Como resultado dessa conjuntura, a pobreza e as catástrofes naturais fazem o número de pessoas desabrigadas no mundo atingir grandezas milionárias e ser maior a cada dia.

Por outro lado, o estudo de materiais alternativos para a construção civil, que busquem a preservação do meio ambiente e atender as necessidades de urgência e baixo custo da população de classe pobre, ainda significa uma porcentagem bem pequena das pesquisas desenvolvidas nas melhores universidades do mundo.

Essa deficiência talvez ocorra porque os materiais de construção convencionais são usados com tanta freqüência e de forma tão automática em nossa arquitetura, que podemos perceber um certo preconceito, desinteresse ou mesmo descaso por outras opções de materiais por parte dos profissionais da área.

¹ A ONU - Organização das Nações Unidas - através da sua Comissão Mundial para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, criou o conceito de Desenvolvimento Sustentável. Através deste, a ONU elaborou a Agenda 21 Global e a lançou na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Humano, conhecida como ECO-92, realizada no Rio de Janeiro em 1992. A Agenda 21 é um programa de ações que busca promover, em escala planetária, um novo padrão de desenvolvimento, conciliando métodos de proteção ambiental, justiça social e eficiência econômica.

“...se supõe que a tecnologia é uma constante e não uma variável manipulável com algum grau de liberdade.” (ALVA, 1984, p.32).

No entanto, cabe ao arquiteto e ao engenheiro perceberem isso e utilizarem a sua criatividade para encontrarem outras alternativas de materiais, que contribuam na solução das questões colocadas, ao invés de se limitarem ao que o mercado formal lhes oferece.

Em suma, pelos poucos estudos realizados, podemos perceber que os materiais alternativos possuem, assim como os materiais convencionais, as suas vantagens e desvantagens de uso. Assim sendo, os materiais alternativos têm o seu potencial - que depende de material para material e da aplicação que se pretenda - e, portanto, poderiam ser mais utilizados ou difundidos.

Para este trabalho, deve-se entender que os **materiais de construção convencionais** são os utilizados comumente na maior parte das edificações, e que os **materiais de construção alternativos** constituem opções de materiais para substituir o uso dos materiais convencionais.

Da mesma forma, **construções temporárias** deverão ser entendidas como construções feitas para serem usadas provisoriamente, apenas por pouco tempo ou alguns meses.

Além disso, toda vez que o termo **elemento construtivo** for usado, este referir-se-á a um tubo de papelão, ou outra peça, isolado. **Material de construção** será usado para um conjunto de elementos do mesmo tipo, utilizados numa construção. O conjunto de procedimentos para se executar uma construção será tratado por **técnica construtiva**, e **sistema construtivo** será referência ao conjunto de elementos construtivos dispostos e ordenados entre si de uma determinada forma, ou seja, o produto da união entre materiais e técnicas construtivos.

Por fim, deverá entender-se por **tecnologia** o conjunto de conhecimentos e técnicas que se aplicam a um determinado ramo de atividade.

1.2. Proposta e importância do estudo

Com base nas considerações citadas, esta pesquisa se propõe a estudar um material alternativo para a construção civil brasileira, o qual seja tubos de papelão.

No entanto, para que os tubos de papelão sejam aplicados na construção civil como elementos de vedação e estrutura, é necessário conhecer as características desse material.

Estas se referem a aspectos de custo, segurança, características técnicas, durabilidade, implicações ao meio ambiente, construtibilidade e mão-de-obra, aceitação cultural, conforto ambiental, plástica, manutenção, etc².

Baseando-se no trabalho do arquiteto japonês Shigeru Ban, este trabalho é apenas um estudo inicial a respeito da viabilidade de se utilizar tubos de papelão em construções no Brasil, pois se limita ao estudo de somente dois aspectos: as características técnicas do elemento construtivo e os sistemas construtivos que podem ser gerados a partir do mesmo.

Este é um material que, como todos os outros, possui as suas qualidades, vantagens, especificidades de uso e justificativas por existir; e que pode representar uma boa opção para alguns tipos de construções no Brasil, como as de caráter popular, emergencial e temporário, entre outras, sem gerar danos tão irreversíveis para o meio ambiente.

Este trabalho tem grande importância, uma vez que enfoca um material barato, de grande produção nacional e versatilidade, maior resistência do que se imagina, que pode ser oriundo de reciclagem e reciclado após seu uso. E tudo isso ainda pode gerar uma arquitetura de grande qualidade e beleza.

Certamente isso poderá ser muito útil principalmente num país onde o déficit habitacional é tão preocupante, como o Brasil.

A significância desse estudo está, ainda, em contribuir para a construção do conhecimento e sua utilidade para a prática profissional e, mesmo, para a

² Conhecendo-se essas características e associando-as a uma determinada época e local, pode-se determinar a viabilidade de implementação desta tecnologia.

formação de novas políticas. Isso porque a importância desta pesquisa está relacionada à melhor utilização de nossos recursos (não só os naturais, mas também no que se refere à reciclagem e à aceitação de novos materiais existentes no mercado) sempre usados com conveniência e criatividade e tendo seus atributos suficientemente explorados.

Face a esta exposição, torna-se clara a importância dessa pesquisa, a necessidade de se estudar, difundir e incentivar o uso dos materiais e técnicas construtivas alternativas e a urgência que temos em investir nessas áreas temáticas.

1.3. Objetivos do trabalho

O objetivo principal deste trabalho consiste em determinar se tubos de papelão fabricados no Brasil possibilitam gerar sistemas construtivos neste país.

Como objetivos complementares, pretende-se:

- estudar o emprego de tubos de papelão na construção civil, baseando-se principalmente nas obras do arquiteto japonês Shigeru Ban;
- focar o estudo dos sistemas construtivos utilizados por este arquiteto em suas obras com tubos de papelão, assim como estudar as características técnicas desses tubos;
- realizar alguns ensaios técnicos preliminares para a caracterização de tubos de papelão fabricados por uma indústria brasileira, e comparar os resultados obtidos com os resultados dos ensaios feitos por Shigeru Ban.

1.4. Conteúdo do trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

No **item 1**, é feita a introdução ao assunto estudado através de algumas considerações iniciais. São definidos os principais conceitos utilizados neste

trabalho, é apresentada a proposta de estudo e discutida a sua importância, além de serem expostos os objetivos do mesmo.

No **capítulo 2** é feito um estudo a respeito dos materiais papel e papelão, apresentando um histórico, discutindo as preocupações relacionadas à sua produção e ao meio ambiente, a fabricação do papel kraft e dos tubos de papelão, os tipos, qualidades e aplicações de diversos tipos de papéis e seus derivados.

No **capítulo 3** é apresentado o uso do papelão na construção civil, desde o início, através de chapas e outros tipos de elementos de vedação desenvolvidos a partir do papelão. Também são apresentadas algumas aplicações isoladas dos tubos de papelão na construção civil, tanto como formas de pilares de concreto quanto como elementos de vedação e estrutura, por alguns arquitetos e pesquisadores.

No **capítulo 4** são apresentadas as obras arquitetônicas de Shigeru Ban com tubos de papelão. A fim de entender como são os sistemas construtivos utilizados pelo arquiteto, é feita uma análise técnica da maioria das obras apresentadas.

No **capítulo 5** são estudados os ensaios técnicos realizados por Shigeru Ban e, a partir destes, são feitos ensaios técnicos preliminares com tubos de papelão fabricados no Brasil.

No **capítulo 6** são feitas discussões a respeito de cada tópico abordado nesta pesquisa, desde o estudo feito sobre as construções feitas por Shigeru Ban com tubos de papelão até os ensaios realizados com o material por ele e por este trabalho. Nesta parte, os materiais brasileiro e japonês são comparados e é discutida a relação existente entre os ensaios técnicos e os projetos arquitetônicos.

O **item 7** apresenta as conclusões obtidas com a realização deste trabalho, além de sugestões para futuros trabalhos.

Por fim, o **item 8** expõe a bibliografia utilizada para a elaboração deste trabalho, compreendendo as referências bibliográficas citadas e a bibliografia complementar consultada.

2 . O MATERIAL PAPELÃO

2.1. Histórico

Oficialmente, o papel foi fabricado pela primeira vez na China, por Ts' Ai Lun, no ano de 105, utilizando uma mistura de fibras de amoreira, bambu, rami, redes de pescar e roupas velhas para fazer a massa do papel, e formas de madeira para moldar as folhas. Logo, os pergaminhos feitos de peles de animais, até então usados para a escrita, foram substituídos pela folha de papel. (BRACELPA, 2005b).

No século VIII, a técnica de fabricação do papel começou a ser passada para outros povos, como os árabes, que contribuíram para sua evolução. Assim, outras fibras passaram a ser empregadas, como as fibras de linho e cânhamo, e o amido da farinha de trigo foi usado para dar liga às fibras.

A chegada do papel na Europa se deu pelas caravanas que transportavam seda para lá. A partir da França, Espanha e Itália, a fabricação de papel se espalhou por todo o continente, conforme mostra a figura 2.1.

Figura 2.1 – Invenção do papel e disseminação da tecnologia pelo Mundo.
Fonte: Ilustração da autora.

Os livros eram escritos à mão e exigiam quantidades maiores de papel, para atender a demanda do público. Porém, após Gutemberg ter criado a imprensa, em 1440, o desenvolvimento das técnicas de fabricação dos livros e do papel foi acelerado.

Quanto ao processo de produção do papel, após a idéia inicial de se utilizar fibras extraídas de vegetais, surgiu o uso de fibras extraídas de trapos de tecido. Este processo era demorado e levava de cinco a trinta dias, pois os trapos tinham que ser classificados, depurados, cortados e fermentados.

Algumas evoluções marcantes aconteceram no final do século XVIII e início do XIX. Em 1774, o químico alemão Scheele descobriu o potencial do cloro como branqueador do papel; em 1798 passou-se a fabricar papel em máquina de folha contínua, inventada pelo francês Nicolas Louis Robert que cedeu sua patente aos irmãos Fourdrinier; e em 1806, Moritz Illig substituiu a cola animal por resina e alumínio.

Em 1884, Friedrich Keller desenvolveu uma pasta de fibras de madeira, mas por um tempo as fibras extraídas de tecidos ainda foram misturadas a esta pasta.

Segundo Bracelipa (2005b), surgiram então diferentes formas de separar as fibras de celulose da lignina: processo de pasta mecânica, processo com soda, processo sulfito e processo sulfato (para papéis do tipo kraft).

No contexto brasileiro, figura 2.2, o primeiro papel foi feito no Rio de Janeiro, no dia 16 de novembro de 1809. A primeira fábrica brasileira, ali sediada, começou a operar entre 1810 e 1811.

Figura 2.2 – Os Estados que marcaram o início da produção de celulose e papel no Brasil.
Fonte: Ilustração da autora.

Em 1889 surgiu a primeira indústria de papel brasileira, também a primeira da América Latina, situada no interior de São Paulo. Assim, a Fábrica de Papel de Salto, de Melchert & Cia, funciona até hoje devidamente modernizada e produz papéis especiais, sendo uma das poucas no mundo a fabricar papel para a produção de dinheiro.

No começo, a indústria brasileira de papel utilizava papéis velhos. A produção industrial de celulose, no Brasil, iniciou-se em Monte Alegre, Paraná, apenas nos anos 40. Inicialmente, a celulose era extraída do pinheiro e os processos utilizados eram o sulfito e o soda/enxofre. O processo kraft e a produção em grande escala de celulose de eucalipto, a mais utilizada atualmente, surgiram no Estado de São Paulo, em 1957. (BRACELPA, 2005e).

Todo este desenvolvimento possibilitou a produção de uma grande variedade de tipos de papéis e, posteriormente, outros produtos feitos a partir do mesmo.

Nas últimas décadas, este setor passou por intenso processo de racionalização, aumentando consideravelmente a sua produtividade. Nos últimos anos, esse crescimento foi, em média, cerca de 6% para papel e 7% para celulose, ao ano. Com isso, as exportações, os rendimentos e os investimentos crescem cada vez mais.

Segundo Bracelpa (2005f), atualmente, o Brasil é considerado o sétimo produtor mundial de celulose de todos os tipos, com uma produção em torno

de 8 milhões de toneladas, e o 11º fabricante de papel, ou 7,7 milhões de toneladas ao ano.

No entanto, conforme Café Bandeira (2004), os maiores fabricantes de papel no mundo, atualmente, são os Estados Unidos, o Japão e o Canadá.

2.2. As preocupações com o meio ambiente

Pelo exposto acima, pode-se perceber que o Brasil possui grande potencial para a produção de celulose e papel. Além disso, é notável que o clima brasileiro, a extensão territorial do país e a sua disponibilidade de terras para o cultivo de árvores favorece o desenvolvimento deste setor.

O crescimento ou a redução desta produção, assim como dos investimentos feitos no setor, e os lucros ou prejuízos do mesmo, são levados em consideração para se aferir o desenvolvimento econômico do país.

Dessa forma, o governo brasileiro tende a expandir o setor cada vez mais, gerando facilidades para as indústrias do ramo, como redução de alguns impostos, e buscando atrair sempre mais investidores.

No entanto, embora não se use vegetação nativa, mas sim árvores de plantios florestais³, a produção de celulose e papel causa uma série de danos sócioambientais e, conseqüentemente, gera muitas polêmicas e problemas. Por causa disso, há países que preferem não investir neste tipo de produto.

No Brasil e no Mundo, diversas entidades e organizações não-governamentais (ONGs) observam atentamente as indústrias de celulose e papel e as pressionam por causa desses danos sócioambientais. Entre estas entidades, pode-se destacar a ONU (Organização das Nações Unidas), a Apedema (Assembléia Permanente de Entidades em Defesa do Meio Ambiente), a Fetag (Federação dos Trabalhadores de Agricultura), a Comissão

³ Atualmente, há no Brasil 1,4 milhão de hectares de florestas plantadas, distribuídas em 16 estados e 450 municípios, e 1,5 milhão de florestas nativas preservadas e cultivadas. (BRACELPA, 2005c, 2005e).

Pastoral da Terra, a CUT (Central Única dos Trabalhadores), o MST (Movimento dos Trabalhadores Sem-Terra) e a Associação dos Engenheiros Agrônomos⁴.

Freqüentemente, estas entidades realizam protestos, passeatas e até ocupações de terras e propriedades no Brasil, a fim de manifestarem suas reivindicações e se demonstrarem contra as indústrias de papel e celulose aqui instaladas.

Conforme Folha de São Paulo (2002), os motivos que levam estas entidades a fazerem tantos protestos, são que as indústrias do setor se apropriam das melhores terras, que serviriam para a agricultura, tomam terras indígenas e ocupam áreas de proteção permanente, substituindo mata nativa por eucaliptos, contaminam rios e córregos. Além disso, o eucalipto afasta as espécies animais e absorve muita água do solo, deixando-o exaurido, e grandes áreas de monocultura criam um “deserto verde”⁵.

O solo também perde seus nutrientes, ficando deteriorado, os rios da região secam e as fábricas de celulose contaminam o ar e a água (FOLHA DE SÃO PAULO, 2006).

Essa contaminação se dá devido ao processo de recuperação dos produtos químicos usados no cozimento da matéria-prima, que formam o chamado “licor negro”⁶. Essa recuperação é feita através de caldeiras que fazem a combustão deste líquido. Assim, este processo se torna a maior fonte emissora de materiais particulados e odores da fábrica; uma fumaça branca com cheiro de enxofre (EXPRESSÃO, 1998).

Segundo Folha de São Paulo (2003a), as indústrias de papel também emitem uma fumaça rica em gases não-condensáveis concentrados (GNCC).

⁴ Em termos mundiais, a ONU faz exigências às indústrias do setor sobre a organização e elaboração de relatórios ambientais. No Estado de São Paulo, a CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental) exige que as indústrias implantem tecnologias que reduzam os níveis de poluição (ECOLOGIA E DESENVOLVIMENTO, 1992).

⁵ O “deserto verde” é formado por uma extensa área de monocultura, que reduz a biodiversidade local e a possibilidade de geração de empregos no campo.

⁶ O “licor negro” é um resíduo tóxico composto por uma mistura de soda cáustica e sulfeto de sódio, resultante do cozimento da madeira para extração da celulose. (FOLHA DE SÃO PAULO, 2003b).

Este, inclusive, é um ponto que compromete o cumprimento das exigências do Protocolo de Kyoto⁷.

Uma outra questão, muito enfatizada pelo MST e CUT, é que a produção de eucalipto gera pouco emprego, necessitando apenas de um funcionário a cada 15 ou 20 hectares (FOLHA DE SÃO PAULO, 2005).

Por outro lado, as indústrias se defendem dizendo que reflorestam suas áreas sob a prática do manejo florestal⁸, o que possibilita a conservação do solo e dos recursos hídricos, além de auxiliar na preservação de espécies vegetais e animais ameaçadas de extinção. (KLABIN, 1998).

Além disso, segundo Lima⁹ *apud* Folha de São Paulo (2006), uma árvore de eucalipto plantada no padrão tradicional de reflorestamento (uma para cada seis metros quadrados) consome no máximo 15 litros de água por dia, e apenas em algumas épocas do seu crescimento e certas épocas do ano. Lima ressalta que algumas árvores nativas brasileiras possuem consumo semelhante, dependendo também das circunstâncias. Contudo, o eucalipto tem a grande vantagem de ser imune a pragas.

Com relação ao eucalipto afetar a biodiversidade, Lima diz que qualquer plantação agrícola, seja de soja, feijão, café, etc, é um ataque à variedade natural de espécies vegetais que existiam numa determinada área.

Lima ainda defende o uso do eucalipto, acácia e pinus para a produção de celulose e papel, pois estas espécies evitam que as matas nativas sejam usadas, e lembra que as florestas industriais também contribuem para a qualidade do ar.

⁷ O Protocolo de Kyoto é um documento que foi assinado entre diversos países em 1997 (em Kyoto, Japão), no qual estes se comprometem a reduzir a emissão de gases, a fim de desacelerar a destruição da camada de ozônio e, conseqüentemente, as mudanças climáticas ocorridas no planeta nas últimas décadas.

⁸ Manejo florestal é um conjunto de técnicas empregadas para colher cuidadosamente parte das árvores grandes de tal maneira que as menores, a serem colhidas futuramente, sejam protegidas. O plano de manejo inclui especificação de técnicas de extração para diminuir os danos à floresta, estimativas do volume a ser explorado, tratamentos silviculturais e métodos de monitoramento do desenvolvimento da floresta após a sua exploração. (MANEJO FLORESTAL, 2006).

⁹ Walter de Paula Lima é especialista em hidrologia florestal, professor e pesquisador do Departamento de Silvicultura da Esalq-USP (Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo), em Piracicaba.

Quanto ao consumo energético, 50% da eletricidade consumida é autogerada pelo próprio setor, no processo de produção da celulose.

Uma vez gerado o embate entre os danos ambientais ou mitos sobre a produção de papel e celulose, Aguiar¹⁰ (2006), diz acreditar que influências estrangeiras estejam ligadas aos ataques feitos às indústrias brasileiras. Segundo Aguiar, estas pretendem desestabilizar o setor de celulose no Brasil, para que tenham vantagens no mercado internacional.

Referindo-se à questão dos papéis descartados e da reciclagem, pode-se afirmar que a atividade de reciclagem de papel no Brasil começou praticamente junto com a fabricação do próprio papel.

Como não havia produção nacional de celulose quando o papel começou a ser produzido no Brasil¹¹, suas necessidades eram supridas por fornecedores do exterior. Paralelamente à importação de matéria-prima, em especial da celulose de fibras longas, as primeiras fábricas eram obrigadas a utilizar papéis descartados na produção de papéis novos, para atender à demanda existente.

Objetivando a preservação do meio ambiente e a redução dos lixos urbanos, a reciclagem de papel tem demonstrado, até hoje, uma forte tendência ao crescimento. Atualmente, são recicladas 3 milhões de toneladas de papel por ano, no Brasil; o correspondente a 41,4% do consumo aparente nacional¹².

Segundo Bracelpa (2005a), os estados brasileiros que mais consomem aparas são: São Paulo (37,12%), Santa Catarina (17,37%) e Minas Gerais (12,81%).

¹⁰ Carlos Aguiar é o atual presidente da indústria Aracruz Celulose.

¹¹ Apenas no início da década de 70, a produção brasileira de celulose passou a ser significativa e a indústria de papel passou a utilizá-la juntamente com a de origem estrangeira. Portanto, a fabricação de papel foi ampliada no país e estimulou um aumento considerável no seu consumo. Isso gerou maior quantidade de material disponível à reciclagem e fortaleceu esta atividade. (BRACELPA, 2005b).

¹² Pode-se entender "consumo aparente" como o consumo da produção nacional somada das importações, subtraindo-se as exportações.

Do total, 80% das aparas são destinadas à fabricação de embalagens, 18% à fabricação de papéis sanitários e 8% à produção de papéis para impressão e escrita. (PROJETO..., 2004).

2.3. A fabricação do papel Kraft e dos tubos de papelão

Todo papel é constituído de matérias-primas fibrosas e não-fibrosas. Conforme Ino (1984), as matérias-primas fibrosas podem ser de origem vegetal, animal, mineral ou artificial. No entanto, as madeiras representam quase 100% das matérias-primas fibrosas utilizadas no Brasil para a obtenção da pasta celulósica.

Por conseguinte, as matérias-primas não-fibrosas são aglutinantes, estabilizantes, aditivos e outras substâncias que têm a finalidade de melhorar as características do produto final, além de água.

As etapas principais da fabricação do papel continuam as mesmas desde a época da sua invenção, quando ainda era manual, até os dias de hoje, nos processos industrializados. Estas são, basicamente, o preparo da massa, a formação da folha e a secagem da mesma.

O papel Kraft utilizado para a fabricação dos tubos de papelão, geralmente, é um papel reciclado e, portanto, utiliza celulose de materiais descartados. Seu processo de fabricação é ilustrado na figura 2.3.

Primeiramente, as aparas de papel são lançadas juntamente com água¹³ em *hidrapulpers*¹⁴ que as desagregam e trituram.

¹³ A celulose é dissolvida em água, formando uma solução de 95% de água para 5% de celulose. Essa água usada é mantida num sistema fechado e re-aproveitada por várias vezes. No decorrer do processo, a proporção de água na pasta vai sendo diminuída até que, quando o papel está pronto, tem-se cerca de apenas 7% de água para 93% de celulose. (PINHEIRO, 2004).

¹⁴ *Hidrapulpers* são equipamentos semelhantes a liquidificadores gigantes, que contêm grandes hélices internamente e servem para hidratar os papéis a serem reciclados.

Figura 2.3 - Esquema da produção de papel kraft
Fonte: São Carlos S/A

A polpa produzida é bombeada para um tanque e em seguida para *cliners*¹⁵, que lhe retira os rejeitos pesados. A partir disso, a polpa fica armazenada num segundo tanque. (SÃO CARLOS S/A, 2006).

Continuando, a polpa passa por engrossadores e chega a refinadores. Depois de refinada, a polpa está pronta¹⁶ e fica armazenada em outros tanques, até seguir para a mesa plana, onde se inicia a formação da folha.

A mesa plana possui micro-perfurações por onde escoar parte da água da massa. A seguir, a folha pré-formada é prensada em cilindros, a fim de se retirar mais água.

Por fim, a folha passa por cilindros secadores (aquecidos) e obtém-se o produto final. Este é estocado em bobinas, que são preparadas nas rebobinadeiras.

Conforme São Carlos S/A (2006), após todo esse processo, o papel pode ser cortado no formato e tamanho desejados.

Para a fabricação dos tubos de papelão, ainda na fábrica de papéis, o papel kraft é cortado em faixas e enrolado em bobinas, que são enviadas para as indústrias de tubos de papelão (figura 2.4).

Figura 2.4 – Bobinas de papel armazenadas na indústria de tubos de papelão.
Fonte: Foto da autora.

¹⁵ *Cliners* são separadores centrífugos que retiram da massa os rejeitos pesados, tais como pedriscos, metais, plásticos, etc.

¹⁶ Durante a preparação da massa, se adiciona breu ou colas especiais e aditivos para se melhorar a qualidade do papel. Neste momento, também ocorre a correção do pH, com adição de sulfato de alumínio, que ainda ajuda na colagem.

Conforme as figuras 2.5 e 2.6, na indústria de tubos e tubetes, várias bobinas de papel kraft são dispostas numa mesma máquina.

Figuras 2.5 e 2.6 – Bobinas de papel Kraft dispostas na máquina que produz os tubos de papelão. Fonte: Fotos da autora.

De acordo com Lacerda (2006), as faixas de papel kraft que formam as camadas internas da parede do tubo são banhadas em uma cola líquida à base de silicato de sódio, e as duas faixas que formam as camadas de revestimento interno e externo do tubo são banhadas em outra cola líquida, à base de acetato de polivinila, mais conhecido como PVA¹⁷ (figuras 2.7 e 2.8).

Figuras 2.7 e 2.8 – Faixas de papel Kraft passando pelos tanques de colas. Fonte: Fotos da autora.

¹⁷ A cola à base de silicato de sódio não é usada nos papéis de revestimento do tubo porque lhe daria um acabamento áspero, uma vez que esta cristaliza após a secagem. No entanto, é utilizada nos papéis da estrutura do tubo, ou seja, os papéis que formam as camadas internas da parede do mesmo, pois lhe propicia maior resistência à flexão e à compressão diametral. (LACERDA, 2006).

Após passarem pelos tanques de colas, as faixas de papel kraft são enroladas em espiral num cilindro metálico giratório (figuras 2.9 e 2.10); deixando-se um pequeno espaçamento entre as mesmas, de no máximo 2 mm¹⁸.

Figuras 2.9 e 2.10 – Produção do tubo de papelão.
Fonte: Fotos da autora.

De acordo com as figuras 2.11 e 2.12, ao atingir o comprimento desejado, uma serra corta automaticamente o tubo.

Figuras 2.11 e 2.12 – Tubo de papelão sendo cortado após atingir o comprimento desejado.
Fonte: Fotos da autora.

Segundo Lacerda (2006), os tubos com espessura de até 8 mm contêm cerca de 12% de umidade imediatamente após a sua fabricação e secam naturalmente. Assim, passado um período de 8 a 10 horas, estes estabilizam com aproximadamente 10% de umidade.

¹⁸ A espessura da parede do tubo é proveniente do número de camadas de papel kraft. O seu diâmetro e comprimento podem variar muito e ficam à escolha do cliente.

Porém, os tubos com espessura superior aos citados anteriormente saem do processo de fabricação com cerca de 14% de umidade. Por terem uma parede muito espessa, estes precisam secar em estufa até atingirem 10% de umidade (figura 2.13); o que costuma ocorrer após um tempo de 30 minutos a duas horas.

Figura 2.13 – Tubos de papelão secando na estufa.
Fonte: Foto da autora.

Finalmente, os tubos seguem para o estoque da indústria, como é mostrado nas figuras 2.14 e 2.15.

Figuras 2.14 e 2.15 – Tubos de papelão armazenados no estoque da indústria.
Fonte: Fotos da autora.

Conforme Lacerda (2006), os grandes tubos fabricados no Brasil, incluindo os compreendidos nesta pesquisa, utilizam faixas de papel kraft que variam de

54 a 240 mm de largura. A espessura de sua parede pode variar entre 1,5 e 20 mm e o seu diâmetro interno pode ter de 24,8 a 505,5 mm¹⁹.

2.3.1. Tipos, qualidades e aplicações de diversos tipos de papéis e seus derivados

Para atender a ampla variedade de aplicações, os papéis possuem propriedades que variam consideravelmente de um tipo para outro, como dureza, resistência, durabilidade e características ópticas.

Assim, a qualidade do material interfibrilar, a estrutura e a formação das suas lâminas, a classe e o comprimento da fibra interferem nas propriedades do papel. A resistência e a durabilidade estão associadas à dureza e também são altamente variáveis. E quanto às propriedades ópticas, o brilho depende do acetinado, a cor é dada pelos tratamentos químicos e a opacidade varia conforme o processo de fabricação. (CAFÉ BANDEIRA, 2004).

A classificação dos tipos de papel é feita através de critérios relacionados a sua aplicação. Alguns exemplos, entre outros, são:

- papéis para impressão em máquina: apresentam superfície áspera e são impróprios para a escrita manual, sendo usados na produção de jornais e livros;
- papéis acetinados: estes papéis se tornam lisos e brilhantes por serem submetidos previamente à operação de calandragem ou passagem por cilindros. São empregados para a escrita;
- papéis cartolina: são mais espessos e podem ser usados tanto na escrita quanto para embrulhos especiais;

¹⁹ Estas dimensões variam conforme o fabricante e estes tubos são empregados como embalagens cilíndricas ou grandes bobinas (destinadas a indústrias de grande porte, como siderúrgicas) e também como formas para pilares cilíndricos de concreto (na construção civil). Os tubos de pequeno diâmetro, ou tubetes, são destinados à produção de cânulas de papel, canudos para diplomas, bobinas e pequenas embalagens cilíndricas. Estes pequenos tubos têm seu emprego nas indústrias têxtil (linhas e tecidos), de papéis de todos os tipos, de fogos de artifício, alimentícia, farmacêutica, de fumo, etc.

- papel-moeda: feito de fibras têxteis, é destinado à produção de dinheiro;
- papel carbono: utilizado para cópias diretas por pressionamento da folha;
- papel pintado: mais conhecido como papel de parede, é utilizado em decoração de ambientes;
- papel-filtro: é um tipo de papel muito poroso, usado para filtrar líquidos e na fabricação de coadores de papel;
- papel crepom: usado na confecção de arranjos e enfeites, possui um aspecto enrugado;
- papel fotográfico: uma de suas faces é revestida com material fotossensível;
- papel vegetal: papel transparente usado para desenhos e projetos arquitetônicos;
- papel-bíblia: muito fino, geralmente é usado em publicações de luxo e grandes volumes;
- papel kraft: é um papel pardo, utilizado na produção de papel ondulado e papelão;
- papel semikraft: papel kraft de qualidade inferior, oriundo de reciclagem;
- papelão: é como um papel cartão de alta gramatura e resistência, na maioria dos casos fabricado a partir de aparas, material este que dá a sua coloração. Existe o papelão madeira, ou Paraná, o papelão cinza e o papelão laminado.

Cada tipo de papel ainda é dividido numa série de categorias, ou seja, papéis do mesmo tipo com qualidades finais diferentes, superiores ou inferiores. Além disso, há papéis que diferem na sua cor, podendo ser brancos, coloridos ou estampados, na sua espessura e gramatura.

De todos, o papel kraft, ou semikraft, é o mais importante para o desenvolvimento deste trabalho, pois é a matéria-prima para tubetes e tubos de papelão.

No entanto, uma grande porcentagem de todo o papel kraft produzido no mundo é destinado à produção de chapas de papelão e, conseqüentemente, à produção de caixas ou embalagens para indústrias de diversos segmentos.

3 . O USO DO PAPELÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Os materiais e técnicas de construção alternativos²⁰, geralmente, são adotados quando se objetiva suprir determinadas necessidades numa obra, que podem ser redução do tempo de execução, redução da mão-de-obra, aumento de produtividade, racionalização no uso de materiais, redução do impacto ambiental, uso de materiais locais, entre outros.

Neste contexto, alguns materiais ou técnicas construtivos podem ser citados, como por exemplo, o uso da madeira, da pedra, da terra, do aço, ou até do solo-cimento.

A madeira e a pedra são materiais usados desde tempos remotos, na construção de moradas (tocas, cabanas,...), em associação com outros materiais, como a terra e a palha.

No Brasil, antes da chegada dos colonizadores portugueses, estes materiais já eram utilizados pelos índios. Porém, após a colonização, houve uma mistura entre as técnicas construtivas dos dois povos, sendo que as construções

²⁰ Entre os materiais e técnicas de construção alternativos, pode-se considerar os materiais e técnicas de construção vernaculares.

passaram a ter formas européias, mas ao mesmo tempo eram construídas sob as técnicas indígenas em madeira (AKZONOBEL, 2006).

A partir daí, reconheceu-se o emprego potencial da madeira como elemento estrutural ou de vedação, e até os dias atuais esta tem sido utilizada como um material alternativo nas construções brasileiras²¹.

As técnicas construtivas que utilizam terra também foram trazidas para o Brasil pelos portugueses durante o período colonial, mas segundo ABCTerra (2006), estas já eram utilizadas em vários outros países, como França, EUA, Marrocos, China e Japão.

Existem diversas técnicas de construção com terra, como taipa de pilão, pau-a-pique e terra-palha. No Brasil, muitos casarões, mosteiros e igrejas construídos com essas técnicas continuam em pé há mais de 250 anos.

No século XVIII iniciou-se a utilização do aço na construção civil. Assim, desde as primeiras obras, como a Ponte *Ironbridge* na Inglaterra, em 1779, até os edifícios atuais, as estruturas metálicas têm gerado construções arrojadas, inovadoras e de alta qualidade nas grandes cidades. (COSIPA, 2006).

Quanto ao solo-cimento, conforme Habitar (2006), este começou a ser empregado no Brasil em 1948, com a construção das casas do Vale Florido, em Petrópolis (RJ).

A partir daí, o produto da mistura, compactação e cura de solo, cimento e água teve seu uso consideravelmente ampliado, devido às boas qualidades que apresentou.

Da mesma forma como ocorreu para os exemplos anteriores, a procura por materiais de construção alternativos levou a testar-se o uso do papelão.

Assim, desde a segunda metade do século XIX, tenta-se empregá-lo na construção de casas, abrigos e outras edificações. Estudantes, pesquisadores e profissionais passaram a buscar neste material algumas vantagens e a possibilidade de uma construção rápida, leve, barata e que atendesse às necessidades de cada ocasião.

²¹ Em termos mundiais, a Noruega e os países do Oriente, em especial o Japão, utilizam tradicionalmente este material nas suas construções.

Como resultado, embora este não seja um material dos mais utilizados na construção civil, o papelão pôde ser empregado na forma de chapas, painéis tipo colméia e, finalmente, elementos tubulares.

Essas diferentes formas de aplicações do papelão na construção civil serão expostas com mais detalhes nos próximos itens.

3.1. As chapas de papelão abrindo caminho para o uso desse material na construção civil

Segundo Minke (1980), os primeiros projetos a utilizarem o papelão em construções o fizeram na forma de chapas, no século retrasado. Na maioria dos casos, estes eram pequenos protótipos de casas ou abrigos desenvolvidos para estudos ou construções temporárias.

Com o passar do tempo, a indústria da construção civil desenvolveu uma série de produtos compostos de papelão destinados a serem usados, principalmente, em sub-sistemas de vedação.

Como exemplos, podem ser citados o papelão alcatroado²² e alguns tipos de painéis de vedação, como o *dry wall* e os painéis-sanduíche²³.

A seguir foi montado um panorama, em ordem cronológica, desse desenvolvimento.

²² O papelão alcatroado é um produto comercialmente vendido, feito de papel kraft betumado. Atualmente, em poucos casos, é usado para impermeabilizar coberturas e, antigamente, era usado para impermeabilizar vigas-baldrame e evitar o fenômeno chamado umidade ascendente. Este fenômeno ocorre devido às paredes térreas da construção tenderem a absorver a umidade retida no solo, gerando estragos em argamassas e pinturas. Hoje em dia, para impermeabilizar vigas-baldrame tem-se usado emulsões asfálticas ou sintéticas e outras películas selantes. (NOGUEIRA, 2006).

²³ Alguns painéis, chamados de *dry wall* e muito utilizados para se fazer paredes divisórias internas, são compostos pela combinação de placas de gesso com chapas de papelão. Existem os painéis cujo miolo é feito de gesso e o revestimento externo é formado por placas de papelão nas faces interna e externa, e os painéis nos quais a chapa de papelão é a estrutura interna e o gesso a reveste externamente. Além disso, há ainda os painéis-sanduíche cujo miolo é feito de uma estrutura em formato de colméia, produzido com papel Kraft reforçado. Esse tipo de painel, de uso muito comum atualmente em divisórias de espaços internos, pode ter acabamento das faces externas em chapa de fibra de madeira, chapa de alumínio, laminado melamínico, etc.

- **1869 - ADT, Pont-à-Mousson, França**

A empresa ADT expôs casas pré-fabricadas feitas de chapas de papelão na Exposição Internacional de Paris.

Três modelos diferentes foram expostos pela ADT: um deles era uma pequena habitação medindo 6,00 x 8,00 m (figura 3.1), um outro era um abrigo de apenas 5,00 x 3,00 m (figura 3.2) e o terceiro era uma casa feita especialmente para locais de clima quente, com dimensões de 20,00 x 5,00 m (figura 3.3).

Figura 3.1 – Casa pré-fabricada de chapas de papelão, desenvolvida pela empresa ADT – Modelo 01. Fonte: Minke, 1980, p.51.

Figura 3.2 – Casa pré-fabricada de chapas de papelão, desenvolvida pela empresa ADT – Modelo 02. Fonte: Minke, 1980, p.51.

O terceiro modelo fez uso de painéis de papelão ondulado medindo de 0,60 a 0,80 m de largura e 3,00 m de altura, fixados uns aos outros com grampos. A parede era dupla, com um vazio de 10 cm entre as chapas de 4 mm de espessura.

Para se ter idéia da leveza dessas estruturas, um metro linear de fachada deste modelo pesava apenas 92 kg. (MINKE, 1980).

Figura 3.3 – Casa pré-fabricada de chapas de papelão, desenvolvida pela empresa ADT – Modelo 03. Fonte: Minke, 1980, p.51.

- **1944 - Instituto de Química do Papel dos Estados Unidos, EUA**

O Instituto de Química do Papel dos Estados Unidos recebeu um pedido do governo para que desenvolvesse uma casa portátil de papel.

O Mundo vivia o fim da Segunda Guerra Mundial e era necessário amparar os desabrigados pelas catástrofes da guerra. Para isso, a casa deveria ser barata e ter capacidade para ser produzida e montada rapidamente e em série.

Como uma das consequências da crise mundial, as fibras de celulose virgens estavam em falta. Então as placas de papelão ondulado, de 2,5 cm de espessura, tiveram que ser fabricadas a partir de aparas de papéis descartados e, com isso, ficaram muito porosas.

De acordo com Sheppard (1974), para solucionar o problema, impregnaram-se as chapas com enxofre, o que aumentou sua qualidade e as tornou rígidas, contribuindo com os processos de serragem e fixação das peças com pregos.

Assim, projetou-se um abrigo de 2,40 x 4,80 m (figura 3.4), que pudesse ser eventualmente aumentado e que pesava, no total, 500 kg.

Pode-se dizer que as qualidades obtidas no produto final superaram todas as expectativas; além de poder ser montado por apenas uma pessoa em uma hora de trabalho, o abrigo que foi elaborado tendo-se em mente algo

provisório, para durar cerca de um ano, ainda se mantinha erguido 25 anos após ter sido construído.

Figura 3.4 – Abrigo desenvolvido pelo Instituto de Química do Papel dos Estados Unidos.
Fonte: Minke, 1980, p.52.

- **1954 - Container Corporation of America, EUA, e Richard Buckminster Fuller, Itália**

A figura 3.5 mostra um abrigo emergencial de planta circular que foi desenvolvido com painéis plastificados de papelão. A *Container Corporation of America*, sediada em Chicago, utilizou 24 painéis grampeados uns aos outros. (MINKE, 1980).

Figura 3.5 – Abrigo emergencial desenvolvido pela *Container Corporation of América*.
Fonte: Minke, 1980, p.52.

No mesmo ano, na Feira Trienal de Milão, Richard Buckminster Fuller ganhou um prêmio com uma cúpula geodésica feita de chapas de papelão

ondulado. Esta construção teve seu custo estimado, na época, em US\$ 500,00 e possuía uma área de 93 m². (INO, 1984).

- **1957 - Richard Buckminster Fuller, Canadá**

Richard Buckminster Fuller deu sequência aos seus estudos e orientou alunos da Universidade de McGill, em Montreal, a construir uma estrutura geodésica de 9,5 m de diâmetro, com chapas de papelão em formato de losangos, conforme mostra a figura 3.6. (MINKE, 1980).

Figura 3.6 – Estrutura geodésica de chapas de papelão elaborada por Richard Buckminster Fuller. Fonte: Minke, 1980, p.52.

- **1962 - Universidade de Michigan, EUA**

No Laboratório de Pesquisas Arquitetônicas da Universidade de Michigan, iniciaram-se estudos sobre a aplicação da espuma de poliuretano em conjunto com o papelão, para aplicação estrutural. Os resultados foram satisfatórios. (MINKE, 1980).

- **1966 - Sanford Hirshen e Sym van der Ryn, EUA**

Na Califórnia, Sanford Hirshen e Sym van der Ryn projetaram abrigos temporários de papelão para agricultores imigrantes – figura 3.7. As placas de papelão, impermeabilizadas com filme de polietileno, formavam painéis

sanduíche com miolo de espuma de poliuretano de 10 mm de espessura. (MINKE, 1980).

Figura 3.7 – Abrigos temporários de placas de papelão na Califórnia.
Fonte: Minke, 1980, p.54.

- **1968 - Hatch Mill Foundation School, Inglaterra**

Conforme Minke (1980), estudantes da *Hatch Mill Foundation School*, Inglaterra, fizeram um novo experimento sob a coordenação de Keith Critchlow. Eles fizeram uma cúpula poliédrica de 142 m², toda em papelão.

- **1969 - Universal Paper-tech Corp. e City Investing Co., EUA**

Duas empresas norte-americanas, a *Universal Paper-tech Corp.* e a *City Investing Co.*, desenvolveram uma casa com papelão quimicamente tratado.

A casa, destinada à população de classe média, custava cerca de US\$ 800,00. Era feita com chapas de papelão de espessura equivalente a 8,0 mm, com um revestimento superficial de fibra de vidro. (ENGINEERING NEWS RECORD, 1969).

- **1972 - Hübner, Huster e Häusermacher, Alemanha**

Nas Olimpíadas de Munique, Hübner, Huster e Häusermacher projetaram instalações temporárias com placas de papelão ondulado, como mostra a figura 3.8. (MINKE, 1980).

Figura 3.8 – Instalações de papelão para a Olimpíada de Munique.
Fonte: Minke, 1980, p.57.

- **1974 - Polytechnic of Central London, Inglaterra**

Um outro modelo de abrigos emergenciais, figura 3.9, também originados na Inglaterra, foi desenvolvido por John Gibson, Hong Lee e John Zerning, na *Polytechnic of Central London*. (MINKE, 1980).

Figura 3.9 – Abrigos emergenciais de papelão na Inglaterra.
Fonte: Minke, 1980, p.53.

- **1975 - Universidade de Surrey, Inglaterra**

Vinzenz Sedlak desenvolveu em sua dissertação de mestrado, na Universidade de Surrey, Inglaterra, estudos sobre construções de papelão, dando maior ênfase às questões estruturais. Como produto final, construiu um protótipo com papelão dobrado em vários planos, figura 3.10, e submeteu-o a testes de cargas. O resultado constatou uma grande estabilidade. (MINKE, 1980).

Figura 3.10 – Protótipo de papelão desenvolvido por Vinzenz Sedlak em sua dissertação de mestrado, Inglaterra. Fonte: Minke, 1980, p.54.

▪ **1977 - California Polytechnic State University, EUA, e protótipos em Kassel, Alemanha**

Na Califórnia, foram desenvolvidos dois outros protótipos de abrigos provisórios, por estudantes da *California Polytechnic State University* – figuras 3.11 e 3.12.

O papelão usado foi oriundo de caixas de verduras, frutas e plantas, foi impregnado com cera a 160 °C e usado para formar painéis duplos. (MINKE, 1980).

Figura 3.11 – Protótipo de papelão desenvolvido por estudantes da *California Polytechnic State University* – Modelo 01. Fonte: Minke, 1980, p.53.

Figura 3.12 – Protótipo de papelão desenvolvido por estudantes da *California Polytechnic State University* – Modelo 02. Fonte: Minke, 1980, p.53.

O desenvolvimento deste material gerou outros frutos. O primeiro foi um abrigo em forma de arco, construído em Kassel - figura 3.13. Com área de 52 m², a estrutura foi toda feita em madeira e a vedação utilizou os painéis duplos com chapas de papelão impregnados de cera. (MINKE, 1980).

Figura 3.13 – Abrigo em arco, construído em Kassel com papelão.
Fonte: Minke, 1980, p.58.

A figura 3.14 mostra uma outra aplicação, uma construção de 79 m², na qual os mesmos tipos de painéis foram usados para vedação. Contudo, para preencher o espaço entre as suas duas faces, usou-se garrafas plásticas e latas coladas com betume. (MINKE, 1980).

Figura 3.14 – Construção experimental de placas de papelão e garrafas plásticas em Kassel.
Fonte: Minke, 1980, p.59.

▪ **1984 - Escola de Engenharia de São Carlos, Brasil**

A pesquisa de mestrado da Engenheira Civil Akemi Ino, realizada na Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (EESC-USP), resultou em mais um modelo, o qual é mostrado na figura 3.15.

O estudo, cujo objetivo principal foi avaliar a viabilidade do uso do papelão ondulado pintado em casas provisórias, foi concluído com a construção de uma pequena casa, de apenas um cômodo e 7,60 m². Pode-se dizer que dois anos e meio após sua construção, o protótipo ainda mantinha boas condições de uso. (INO, 1984).

Figura 3.15 – Protótipo de casa provisória desenvolvido por Akemi Ino com chapas de papelão ondulado. Fonte: Ino, 1984, p.168.

• **1999 - Museu de Arte das Crianças Nemunoki, Japão**

O Museu de Arte das Crianças Nemunoki (figura 3.16) é um espaço de 300 m² que foi projetado pelo arquiteto japonês Shigeru Ban e construído para

uma escola de crianças especiais, servindo para estas exporem os seus trabalhos de arte.

A cobertura, em formato triangular, é feita de painéis de papelão suportados por quinze pilares metálicos. Cada painel é produzido com um miolo tipo colméia e folhas de papel coladas nas duas faces, formando uma unidade.

Algumas dessas placas medem 0,60 m x 1,00 m, outras medem 0,60 m x 3,00 m. De três em três, elas formam triângulos com lados de 3,00 m ou 1,00 m, e altura de 0,60 m. No encontro dos triângulos de 3,00 m de lado são colocados os pilares e, dentro destes grandes triângulos, são inseridos os menores – figura 3.17. As juntas, desenvolvidas especialmente para este projeto, são de alumínio. (McQUAID, 2003).

A figura 3.18 mostra que essa composição forma uma estrutura muito forte e é coberta por uma membrana translúcida de PVC e fibra de vidro reforçada e corrugada, permitindo a entrada de luz natural, pois é a única fonte de iluminação da galeria. (THE JAPAN ARCHITECTURE, winter 1999).

Figura 3.16 – Vista interna do Museu de Arte das Crianças Nemunoki.
Fonte: McQuaid, 2003, p.59.

Figura 3.17 – Estrutura da cobertura do Museu de Arte das Crianças Nemunoki
Fonte: McQuaid, 2003, p.57.

Figura 3.18 – Perspectiva explodida do Museu de Arte das Crianças Nemunoki
Fonte: McQuaid, 2003, p.56.

3.2. O uso de tubos de papelão na construção civil

3.2.1. Formas de papelão para pilares de concreto

Tubos de papelão já são fabricados no Brasil há muitos anos e empregados como formas para pilares de concreto cilíndricos ou de outros formatos, como retangulares ou hexagonais, conforme as figuras 3.19 e 3.20. Estes tubos são feitos de papel kraft ou semi-kraft, de diversas gramaturas, enrolado no sistema espiral.

Figuras 3.19 e 3.20 – Formas e tubos de papelão empregados na construção civil.
Fonte: Dimibu, 2004, p.02.

Segundo Dimibu (2004), as maiores vantagens desse tipo de forma são a sua leveza, a possibilidade de rápida colocação e fácil desforma com uma mão-de-obra reduzida – figura 3.21.

Figura 3.21 – Tubo de papelão sendo usado para a moldagem de um pilar.
Fonte: Dimibu, 2004, p.03.

Além disso, os tubos possuem revestimento interno impermeabilizado e não aderente ao concreto, não absorvem a água do concreto nem deixam vazar a sua nata e não requerem escoramento. Podem ser feitos de diversos diâmetros, comprimentos e espessuras, vide tabela 3.1, para terem a resistência necessária e suportarem a pressão da concretagem. Apresentam grande rigidez e não reagem com nenhum componente do concreto.

Tabela 3.1 – Peso por metro linear dos tubos de papelão. Fonte: Dimibu, 2004, p.03.

Diâmetro interno (mm)	Peso por metro linear (kg)
100	1,000
150	1,400
200	1,850
250	2,400
300	3,200
350	3,800
400	4,400
450	4,950
500	6,500
550	7,150
600	8,350
650	9,200
700	10,700
750	11,500
800	13,000
850	13,800
900	14,600
950	15,400
1.000	18,000

Também podem ser aplicados na construção de tetos abobadados, estacas, lajes, peças pré-moldadas e como forma perdida para tabuleiros de pontes ou lajes – figuras 3.22 e 3.23.

Figuras 3.22 e 3.23 – Tubos de papelão sendo usados para caixão perdido.
Fonte: Dimibu, 2004, p.05.

3.2.2. Os tubos de papelão como elementos de vedação e estrutura

A atratividade em se utilizar tubos de papelão na construção civil se dá por estes serem baratos, 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).

Pensando nisso, alguns engenheiros, arquitetos e pesquisadores desenvolveram experimentos de aplicação deste material. O primeiro deles surgiu em 1970, nos EUA, mas foi apenas na década de 80 que o arquiteto japonês Shigeru Ban passou a estudar, desenvolver e disseminar de fato esta tecnologia; projetando e construindo diversas obras em vários lugares do mundo até os dias atuais.

Na sequência serão mostrados, em ordem cronológica, os projetos que utilizaram tubos de papelão. Inicialmente, serão expostos os projetos feitos por outros arquitetos e, no próximo capítulo, o trabalho de Shigeru Ban.

a) Ponte de tubos de papelão, EUA

O engenheiro estrutural norte-americano Lev Zetlin, no ano de 1970, construiu uma ponte com tubos de papelão para a *International Paper Company*.

A ponte possuía um tabuleiro de 9,60 m de comprimento por 3,00 m de largura e vigas de 1,20 m de altura. O tabuleiro era formado por tubos de papelão dispostos transversalmente, em meio a duas camadas de chapas espessas e maciças de papelão (figuras 3.24 e 3.25).

O dimensionamento da ponte foi feito para que esta suportasse uma carga de 8,0 toneladas. Com uma sobrecarga de 5,0 toneladas, a ponte apresentou uma flecha de 12 mm. (MINKE, 1980).

Figuras 3.24 e 3.25 - Ponte de tubos de papelão, EUA.
Fonte: Minke, 1980, p.52.

b) Experimento de Martin Pawley

No *Rensselaer Polytechnic Institute*, Nova Iorque, Martin Pawley fez um experimento, em 1976. A construção tinha 60 m² e apoios de tubos de papelão de diâmetro de 10 cm, preenchidos internamente com latas e garrafas – figura 3.26.

Figura 3.26 – Experimento de Martin Pawley com tubos de papelão, EUA.
Fonte: Minke, 1980, p.56.

c) Shared Ground, Reino Unido

No ano de 2000, o Reino Unido construiu um gigantesco domus, cerca de 80.000 m², para abrigar diversas zonas temáticas e expor construções.

O *Domus Millenium* teve a função de expor ao longo de um ano produtos de construção e técnicas inovadoras a profissionais da área, como administradores, projetistas, técnicos, engenheiros e arquitetos.

Uma das zonas temáticas, a *Shared Ground*, foi projetada por Philip Gumuchdjian e Stephen Spence, com o intuito de mostrar às pessoas que é possível fazer uma arquitetura de boa qualidade com materiais não refinados. (HART, 2000).

Assim, os arquitetos solicitaram a consultoria de Shigeru Ban e Buro Happold e construíram um edifício de 1500 m², feito quase que inteiramente de papelão reciclado.

O espaço, figuras 3.27 e 3.28, consiste de 100 colunas feitas de tubos de papelão, com alturas variando entre 9,0 e 18,0 m, 35 cm de diâmetro e 15 mm de espessura. Esses tubos foram reforçados internamente com diafragmas de madeira, para aumentar a sua resistência.

Além disso, cada tubo foi composto por 32 camadas de papel kraft, especialmente fabricado com uma massa de pedaços de jornal e papéis descartados, na qual o fabricante adicionou fibras longas para melhorar a sua resistência.

Figuras 3.27 e 3.28 – Construção da *Shared Ground*.
Fonte: Hart, 2000, p.44-5.

Essa estrutura foi aparafusada em painéis de papelão de 1,20 x 1,80m. Esses painéis foram constituídos de duas chapas exteriores de papelão, aderidas a um miolo de papelão corrugado e uma espuma de isolamento. Cabos de aço fizeram a amarração do conjunto e peças de madeira foram usadas para conectar os tubos.

Segundo Hart (2000), duas questões muito importantes preocuparam com relação às características do material: a sua capacidade de absorver umidade do ar e a sua combustibilidade.

Assim, para evitar a absorção de umidade, a terceira camada a partir do exterior do tubo foi composta de um polímero que funcionou como uma barreira ao vapor.

Quanto à ação do fogo, alguns tubos foram envernizados com tinta intumescente, que expande como uma espuma resistente ao fogo quando exposta a temperaturas muito elevadas. Esses tubos foram testados e, como resultado, queimaram em processo de combustão lento e sem chama num pequeno pedaço, mas não pegaram fogo.

A capacidade de carregamento da coluna foi determinada como para a madeira, por Buro Happold. (HART, 2000).

d) Clube de música pós-aula – Anexo escolar, Inglaterra

Construído por Cottrell e Vermeulen em 2002, esse clube pós-aula é a primeira construção permanente da Europa que possui componentes de papelão na estrutura e vedação.

Conforme Slessor (2002), os alunos da escola coletaram papéis descartados para serem reciclados e darem origem aos tubos de papelão. A opção por este material foi seu caráter essencialmente ecológico e seu baixo custo, além da rapidez e facilidade de construção.

O espaço é um pavilhão musical de apenas um pavimento, cercado por paredes e teto em forma de sanfona – figuras 3.29 e 3.30. A estrutura é constituída de 22 tubos de papelão de 18 cm de diâmetro, que suportam uma

treliça de madeira e o telhado. Os tubos foram revestidos com uma camada de verniz.

Figuras 3.29 e 3.30 – Clube de música pós-aula construído com tubos de papelão, Inglaterra.
Fonte: Slessor, 2002, p.57.

A vedação é feita com painéis. Sua estrutura é feita em madeira e o miolo é de papelão do tipo colméia. A face externa é coberta com uma placa de fibrocimento e a interna é uma placa de papel reciclado. (SLESSOR, 2002).

Os painéis também contêm uma camada de barreira ao vapor e a massa do papelão foi quimicamente tratada para reduzir sua capacidade de absorção.

O projeto foi elaborado para durar 20 anos e ser 90% reciclado.

e) Ecovila de papel em Campinas, Brasil

No ano de 2003, Anita de Domenico, Mirian Vaccari e Mônica Marcondes, alunas do último ano do curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (USP), desenvolveram uma proposta de intervenção para a Vila dos Ferroviários, em Campinas.

O projeto, que não foi construído, seguiu as proposições da “Agenda 21 – Comunidades sustentáveis ambiental, econômica e socialmente” e utilizou tubos de papelão.

Elementos de papelão são propostos na estrutura, cobertura e vedação das casas, com o intuito de demonstrar que o papelão pode ser usado em caráter permanente e durável. (VACCARI, 2003).

As residências, de dois pavimentos, têm sua estrutura em tubos de papelão, formando pilares, vigas de alma cheia e vigas-vagões. Estas últimas

foram propostas com tubos de menor diâmetro, geralmente fabricados para a indústria têxtil, e possibilitariam vencer vãos maiores – figuras 3.31 e 3.32.

Figuras 3.31 e 3.32 – Foto da maquete do sistema estrutural e elevação da casa projetada por estudantes da FAU-USP. Fonte: Vaccari, 2003, p.70.

A vedação é proposta através de painéis-sanduíche formados por placas externas de papelão ondulado e miolo de colméia de papel. Os mesmos painéis são propostos na cobertura, sob embalagens longa-vida re-utilizadas.

A alvenaria convencional apenas é proposta no módulo hidráulico, contribuindo para o contraventamento da unidade.

De acordo com Vaccari (2003), como solução para impermeabilizar o material e torná-lo resistente a altas temperaturas, o grupo de estudantes sugere que, durante o processo de fabricação, sejam usadas colas especiais resistentes à umidade e ao calor.

As casas, de sistema estrutural modular, são elevadas do solo para evitar contato com umidade.

f) Centro Cultural Zona Norte, Brasil

Gerusa Salado, ao concluir seu curso de graduação na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Presbiteriana Mackenzie, apresentou como Trabalho Final de Graduação o projeto de um centro cultural no bairro de Santana, região Norte da capital paulista.

Fruto de uma pesquisa abrangente sobre materiais e técnicas construtivas alternativas, o projeto arquitetônico é um exercício projetual baseado em todo o estudo, tido como o seu produto final. Nele, alguns dos materiais levantados e estudados são aplicados, em sistemas de estrutura, vedação e cobertura. Entre

eles, os mais importantes são o concreto reciclado, a terra-palha, os tubos de papelão e a madeira.

O projeto, com área de 23.000 m² e capacidade para atender a 18.000 pessoas por dia, possui um programa amplo, compreendendo bibliotecas, salas de leitura, auditórios, espaços para exposições e apresentações artísticas, restaurante, etc – figura 3.33.

Figura 3.33 – Centro Cultural Zona Norte.
Fonte: Salado, 2003, p.142.

Segundo Salado (2003), por se tratar de uma edificação muito grande e conter vários andares, os tubos de papelão foram empregados somente como vedação.

Assim, dependendo do ambiente a ser vedado, os tubos foram dispostos com espaçamentos diferentes entre si e intercalados com panos de vidro, e em algumas situações foram unidos uns aos outros com espuma de poliuretano.

Todos os tubos de papelão, 30 cm de diâmetro, 6,0 mm de espessura e 4,0 m de altura, foram propostos sobre bases de madeira, nas quais seriam parafusados, para evitar o contato com superfícies molhadas.

Com esse material ainda se fizeram os reservados, nos sanitários feminino e masculino. Tubos com diâmetro de 1,20 m e espessura de 6 mm possuem um corte frontal, possibilitando o encaixe da porta, ventilação e iluminação. Foi proposto banhá-los em amônia e uretano para ficarem impermeáveis e

protegidos da sujeira e do mau cheiro. Também devem ser pintados internamente de branco para aumentar a claridade. (SALADO, 2003).

4 . O USO DOS TUBOS DE PAPELÃO PELO ARQUITETO SHIGERU BAN EM SUAS OBRAS

O arquiteto japonês Shigeru Ban desde o princípio buscou se destacar em sua carreira. Estudou na União Cooper, em Nova Iorque, sob a orientação do renomado arquiteto americano John Hejduk, um dos integrantes do *New York Five*²⁴ no fim dos anos 60, e se formou em 1984, junto com a obtenção de um prêmio.

Nesse período de estudos, o Racionalismo lhe propiciou uma rica apreciação do Modernismo ocidental e uma versão racionalizada do espaço japonês tradicional. Ban também conheceu o voluntariado, e se surpreendeu com a disposição de estudantes americanos para distribuir sopas aos pobres.

²⁴ O *New York Five* era um grupo formado por cinco arquitetos atuantes em Nova Iorque, sendo Peter Eisenman o líder e Michael Graves, Charles Gwathmey, John Hejduk e Richard Meier os outros integrantes. No fim da década de 60 e início de 70, a partir dos princípios da arquitetura moderna e da obra de Le Corbusier, estes arquitetos buscaram desenvolver uma nova base teórica, tão ideológica e rigorosa quanto a conseguida pela vanguarda européia do pré-guerra, rompendo com o Modernismo. (FRAMPTON, 1997).

Ao retornar para o Japão, ele trabalhou um ano para Arata Isozaki, em Tóquio, antes de abrir o seu escritório.

O uso do papel na arquitetura tradicional japonesa, em biombos, vedações de janelas, papéis de parede, etc, o levou a experimentar as qualidades do papelão em tubos²⁵.

Ban não gosta de desperdício e defende e promove a reciclagem como uma solução pós-tecnológica e pós-industrial. (BERET; PENWARDEN, 2000).

E além de ser especialmente preocupado em usar os materiais com sensibilidade ecológica, ele gosta de fazê-lo para atender aos ricos e aos pobres.

O arquiteto investe em fundamentos de pesquisa e nos clientes mais ricos para subsidiar os projetos que ele faz para os mais pobres; e incentiva os estudantes de arquitetura a serem voluntários de suas construções. Além disso, para suas obras sociais, Ban sempre tenta conseguir tubos de papelão e outros materiais doados.

Shigeru Ban defende uma idéia muito importante dizendo que a arquitetura faz, atualmente, pouca coisa para servir aos necessitados. O arquiteto pensa que enquanto muitos chamam as pessoas pobres de minoria, em termos globais esse grupo é muito grande e representa um desafio para todos os arquitetos. (BUNTROCK, 1996).

O trabalho de Ban mantém as características simples do tubo de papelão e aumenta as suas qualidades básicas para gerar um material estrutural sólido.

Com isso, ele transforma simples tubos em construções grandiosas e de diversos tipos, fazendo-se repensar as idéias de fraqueza, durabilidade e natureza efêmera do papelão.

Após as primeiras experiências, Ban logo concluiu:

²⁵ De forma muito mais intensa que a cultura ocidental, a cultura oriental e mais especificamente a japonesa tem, por muitos séculos, a tradição de explorar o uso do papel para diversas aplicações. Cabe salientar que o Japão foi um dos primeiros países a produzir papel após a China, em 610, e até hoje é o maior produtor de papel de arroz (*washi*) do mundo. Os japoneses usam o *washi* para produzir origamis, luminárias, embalagens de presente, objetos de decoração, biombos, papéis de parede e vedação de janelas, propiciando ao ambiente interno uma iluminação difusa e agradável. (MADE IN JAPAN, 2006).

“Uma das melhores formas para revelar a beleza desses tubos é colocá-los em curvas.” (FROMNOT; EGO, 1996, p. 43).

4.1. Apresentação e análise técnica das obras de Shigeru Ban com tubos de papelão

Para que os tubos de papelão sejam aplicados na construção civil como elementos de vedação e estrutura, é necessário conhecer as suas características; como resistência e durabilidade, custo, detalhes e técnicas construtivas, possibilidades plásticas, etc.

Com relação a estas características, a revisão bibliográfica nos dá algumas informações preliminares.

Shigeru Ban enfatiza algumas relações entre os tubos de papelão e a madeira. No caso, como o primeiro material é derivado do segundo, ele se refere ao papelão como “madeira evoluida” e diz que a durabilidade de uma construção feita com tubos de papelão é de dez anos ou mais. (ARCHITECTURE AND URBANISM, 1997).

Comparando os dois materiais, o engenheiro norte-americano André Chaszar diz que a construção feita de tubos de papelão é similar à feita em madeira; mas que o espaçamento entre os tubos deve ser menor²⁶. Chaszar diz ainda que os tubos de papelão têm, genericamente, $1/10$ da dureza da madeira e $1/15$ da sua resistência. (TALARICO, 2000).

Quanto ao aspecto da resistência, pode-se dizer que Shigeru Ban modificou a relação existente entre a resistência e a sustentabilidade do material e a resistência correspondente e a sustentabilidade da estrutura. Para ele, esses fatores dependem da técnica construtiva adotada e do conhecimento dos materiais escolhidos. (McQUAID, 2003).

²⁶ Como com a madeira, as especificações para as construções em tubos de papelão mudam conforme o projeto e a aplicação do material.

Para demonstrar isso, o mestre da arquitetura com tubos de papelão faz uma observação muito importante:

“O material estrutural não tem que ser forte; até as estruturas de concreto podem ser facilmente destruídas por terremotos. A estabilidade de uma construção não depende da resistência mecânica de seu material.” (BAN *et al.*, 1997, p. 132).

Devido ao relato de Shigeru Ban a respeito da importância de se conhecer as técnicas construtivas e os materiais adotados, a seguir serão apresentadas as suas obras que utilizam tubos de papelão, fazendo-se para a maioria delas uma análise técnica dos sistemas construtivos gerados.

Esta análise é uma observação dos aspectos técnicos das obras, como sua área, as dimensões dos tubos de papelão utilizados, os outros materiais usados em associação, os sistemas estrutural e de vedação, a fundação, a cobertura, as ligações entre os diversos elementos, etc²⁷.

As obras serão apresentadas em três grupos diferentes, sendo estes:

A) obras que utilizam tubos de papelão em painéis divisórios;

B) obras que utilizam tubos de papelão para estrutura e vedação;

C) obras que utilizam tubos de papelão apenas para vedação ou apenas para estrutura.

Dentro de cada grupo, as obras serão apresentadas em ordem cronológica, mostrando a trajetória percorrida por Shigeru Ban no desenvolvimento dos seus projetos.

A) Obras que utilizam tubos de papelão em painéis divisórios

Os projetos expostos neste grupo não são tecnicamente analisados, devido à falta de dados divulgados a respeito e, também, por se constituírem

²⁷ A análise técnica das obras foi feita apenas com base nas informações as quais se teve acesso e através da observação das fotos encontradas. Devido a isso, em alguns pontos a análise não pode ser completa, para algumas obras.

de simples painéis sem função estrutural ou de vedação; mas servindo apenas como elemento estético na divisão de ambientes.

Mesmo se tratando de pequenos projetos, através destes já é possível perceber o efeito visual que uma sinuosa parede de tubos de papelão gera num espaço.

A1) Mostra de Alvar Aalto, Tóquio (Japão)

A primeira vez que o arquiteto Shigeru Ban experimentou usar tubos de papelão foi em 1986. Ele ia projetar uma mostra de móveis de Alvar Aalto na Galeria de Tóquio e acabou tendo a idéia de utilizar vários tubos de papelão que tinha em sua oficina.

Essa foi a forma que Ban encontrou para imitar, sem muito custo, os telhados sinuosos de madeira de Aalto. A partir dessa ocasião, sua imagem começou a ser associada aos tubos de papelão e Ban passou a reconhecer e explorar o potencial arquitetônico deste material. (BUNTROCK, 1996).

As figuras 4.1 e 4.2 ilustram a primeira aplicação arquitetônica dos tubos de papelão por Shigeru Ban.

Figuras 4.1 e 4.2 – Perspectiva e vista interna da Mostra de Alvar Aalto em Tóquio, em 1986.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.174.

A2) Mostra de Emilio Ambasz, Califórnia (EUA)

Nesta ocasião, ocorrida em 1989, Shigeru Ban ainda não havia desenvolvido grandes projetos usando tubos de papelão.

Assim, deu uma pequena demonstração de seu uso na criação deste espaço, no Museu de Arte Contemporânea de *La Jolla*, Califórnia, adicionando-lhe uma divisória sinuosa feita com o material, conforme demonstrado na figura 4.3. (THE JAPAN ARCHITECT, summer 1998).

Figura 4.3 – Perspectiva da Mostra de Emilio Ambasz na Califórnia, em 1989.

Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.172.

A3) Mostra de Emilio Ambasz, Tóquio (Japão)

A mostra citada no item anterior viajou por alguns lugares do mundo.

Nesta ocasião, na Galeria de Tóquio, em 1993, o projeto de Shigeru Ban sofreu apenas algumas adaptações referentes a sua disposição no ambiente. (THE JAPAN ARCHITECT, summer 1998).

No entanto, continuou representando apenas uma forma de se usar os tubos de papelão como elemento arquitetônico, de acordo com as figuras 4.4 e 4.5.

Figuras 4.4 e 4.5 – Perspectiva e vista interna da Mostra de Emílio Ambasz em Tóquio, em 1993.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.173.

A4) Palco de papelão, Tóquio (Japão)

Em 1997, Shigeru Ban usou tubos de papelão para fazer o pano de fundo de um palco, num teatro onde seria apresentado um drama por japoneses e chineses em conjunto.

Utilizando-se de uma série de tubos idênticos, Shigeru Ban criou quatro configurações diferentes, demonstradas nas figuras de 4.6 a 4.9. Alguns tubos eram móveis e outros foram fixados em bases de madeira.

Figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 – Disposições dos tubos de papelão, respectivamente da esquerda para a direita, dos 1º, 2º e 3º atos e dos intervalos.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.85.

Assim, por uma simples movimentação de alguns tubos, o cenário se modificava de um ato para outro e nos intervalos, deixando o espaço disponível para a atuação maior ou menor, conforme a disposição dos mesmos. (THE JAPAN ARCHITECT, summer 1998). Um exemplo pode ser visto na figura 4.10.

Figura 4.10 – Palco com pano de fundo de tubos de papelão.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.84.

Como o palco era giratório, dependendo do caso, bastava rotacioná-lo e mover alguns tubos. Nos dois primeiros atos, uma cortina foi introduzida entre os elementos, para isolar os tubos desnecessários.

O uso de refletores de luz e o espaçamento deixado entre as peças causaram efeitos interessantes de luz e sombra sobre o chão.

B) Obras que utilizam tubos de papelão para estrutura e vedação

Conforme os dados obtidos para cada uma das obras expostas a seguir, através de pesquisa bibliográfica, estas terão seus atributos técnicos comentados.

B1) Caramanchão de papel, Nagoya (Japão)

Este pequeno recinto, figuras 4.11, 4.12 e 4.13, foi a primeira obra que utilizou tubos de papelão estruturalmente, datada do ano de 1989. (THE JAPAN ARCHITECT, summer 1998).

Seis meses após sua construção, a estrutura foi desmontada e os tubos foram testados. Mesmo ficando tanto tempo expostos à chuva, ventos e insolação, os tubos tiveram a sua resistência à compressão aumentada, devido ao endurecimento da cola existente na sua composição.

Figuras 4.11 e 4.12 – Perspectiva e vista interna do Caramanchão de Papel.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.106-7.

Figura 4.13 – Vista externa do Caramanchão de Papel.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.107.

Quadro 4.1 – Aspectos técnicos do Caramanchão de papel.

Aspectos técnicos
Dimensões da obra 22 m².
Dimensões dos tubos de papelão 48 tubos de papelão com 33 cm de diâmetro, 15 mm de espessura e 4 m de comprimento.
Materiais associados Perfis de aço, membrana para tenda, concreto e madeira.
Fundação A obra não possui fundação, sendo apoiada diretamente sobre o solo. Os tubos são dispostos sobre bases de concreto, para evitar contato com umidade.
Estrutura e/ou Vedação A disposição dos tubos ocos e sem elementos internos enrijecedores forma um único painel portante, no qual todos os elementos exercem a função estrutural e de vedação.
Cobertura A cobertura é estruturada através de barras de aço que, por sua vez, são cobertas por uma membrana.
Elementos de ligação e fixação Os tubos de papelão são fixados em bases de concreto, inferiormente, e numa cinta de amarração confeccionada em madeira, acima. Esta peça de madeira também faz a ligação entre os tubos de papelão e a estrutura da cobertura, além de servir para a fixação da membrana.
Aberturas para passagem e ventilação Possui apenas uma abertura de passagem, vedada com batentes e porta de madeira.
Tratamento das peças Os tubos de papelão foram tratados à prova d'água com parafina.
Observações

B2) Galeria de arte Miyake, Tóquio (Japão)

Esta galeria, figura 4.14, foi construída em 1994. O espaço foi criado por Shigeru Ban, inspirado nas praças públicas gregas, formadas apenas por pilares e cobertura. (THE JAPAN ARCHITECT, summer 1998).

Figura 4.14 – Vista externa da Galeria Miyake.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.93.

Através das figuras 4.15 e 4.16, pode-se observar a planta baixa e a perspectiva da galeria de arte.

Figuras 4.15 e 4.16 – Perspectiva e planta baixa da Galeria Miyake.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.90.

Um efeito natural muito bonito, gerado neste espaço é mostrado nas figuras 4.17 e 4.18. A iluminação externa, ao penetrar no recinto, projeta a sombra de todos os tubos frontais no piso, como uma paginação que se

modifica conforme a luz do dia. Da mesma forma, no corredor formado na parte posterior da galeria, um feixe de luzes se forma no piso e parede.

Figura 4.17 – Efeito de paginação causado pela sombra dos tubos de papelão.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.92.

Figura 4.18 – Efeito de luz gerado pelo espaçamento entre os tubos, ao fundo da Galeria Miyake. Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.93.

Móveis feitos de tubos de papelão foram especialmente criados para este espaço.

Quadro 4.2 – Aspectos técnicos da Galeria de arte Miyake.

Aspectos técnicos
Dimensões da obra 86 m².
Dimensões dos tubos de papelão Sem informações.
Materiais associados Perfis metálicos, policarbonato, telhas metálicas, gesso e concreto.
Fundação Sem informações.
Estrutura e/ou Vedação Duas fileiras de tubos suportam as cargas verticais. Uma delas é curva e forma um painel portante e a outra é formada por tubos alinhados e espaçados entre si. Num dos cantos, ao fundo, um tubo isolado faz a função de pilar. Os tubos são ocos e não possuem enrijecedores internos. Externamente, foi feita uma vedação com perfis metálicos e placas de policarbonato na parte frontal da galeria e as paredes do fundo e laterais são de alvenaria convencional.
Cobertura Cobertura plana metálica com forro de gesso.
Elementos de ligação e fixação Sem informações.
Aberturas para passagem e ventilação Não existem aberturas específicas para passagem e ventilação; no entanto, os vãos são vedados pela estrutura externa em policarbonato.
Tratamento das peças Sem informações.
Observações No fundo da galeria foi construído um pequeno sanitário utilizando-se um painel divisório.

B3) Casa de papelão, Yamanashi (Japão)

Em 1995, o arquiteto construiu sua própria casa de papelão, figura 4.19, no aterro de Lake Yamanaka, Japão. Essa foi sua primeira construção permanente que obteve autorização oficial e aprovação do governo japonês para utilizar tubos de papelão estruturalmente. (BERET; PENWARDEN, 2000).

Figura 4.19 – Vista externa da Casa de papelão.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.95.

Conforme as figuras 4.20 e 4.21, a casa de campo tem sua planta configurada em formato de “S”, definindo ambientes internos e externos multifuncionais; como numa planta livre. O grande e unificado espaço da casa pode ser subdividido e usado de diferentes formas pelo dia ou a noite, como ocorre tradicionalmente em muitas casas japonesas. Para isso, ela possui painéis de correr e armários móveis.

A curva maior do “S” envolve a área principal da casa, com sala, cozinha e ambientes de dormir; a menor cerca o banheiro e o jardim interno. (FROMNOT; EGO, 1996). Em alguns locais, os tubos são levemente espaçados uns dos outros; isso permite uma iluminação difusa no espaço interno, o que também é uma característica da arquitetura japonesa.

Figuras 4.20 e 4.21 – Planta baixa e perspectiva da Casa de Papelão.
Fonte: McQuaid, 2003, p.25-6.

Ao redor da casa há portas de vidro de correr, protegendo a construção. No verão, essas portas podem ser abertas, integrando completamente os espaços interno e externo, aumentando a amplitude da casa, e enfatizando a sua pureza estrutural.

As figuras 4.22 e 4.23 mostram o pilar que demarca a entrada da casa e o espaço interno do banheiro.

Figuras 4.22 e 4.23 – Vistas da entrada e do banheiro da Casa de Papelão.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.98-9.

Quadro 4.3 – Aspectos técnicos da Casa de papelão.

Aspectos técnicos
Dimensões da obra
Sem informações.
Dimensões dos tubos de papelão
108 tubos de papelão com 28 cm de diâmetro, 5 mm de espessura e 2,8 m de comprimento e 1 tubo com a mesma espessura e comprimento, porém com 123 cm de diâmetro.
Materiais associados
Madeira, vidro, aço, gesso e revestimentos cerâmicos.
Fundação
Sem informações.
Estrutura e/ou Vedação
Nove tubos com enrijecedores internos de madeira, dispostos estrategicamente, funcionam como pilares. Os demais, a princípio, servem apenas para vedação. No entanto, por formarem um painel contínuo, devem contribuir no sustento da cobertura. Externamente, há portas de vidro de correr, que fecham e protegem a construção.
Cobertura
Cobertura plana em aço corrugado e forro de gesso.
Elementos de ligação e fixação
Na parte inferior, os tubos são parafusados em bases de madeira que contêm diafragmas. Essas bases são fixadas na fundação.
Aberturas para passagem e ventilação
A casa não possui janelas ou portas, mas é envolta por um pano de vidro móvel que fecha suas entradas e a protege dos ventos.
Tratamento das peças
Sem informações.
Observações
Um tubo de papelão de grande diâmetro foi usado para fazer o sanitário. Cortou-se um vão frontal e adaptou-se uma porta.

B4) Igreja de papelão, Kobe (Japão)

Quando um terremoto atingiu Kobe, em janeiro de 1995, Shigeru Ban era consciente de que dois grupos de desabrigados não teriam atenção imediata: os imigrantes, que são marginalizados no Japão, e a Igreja Católica, que serve a menos de 2% da população.

Por esse motivo, começou a desenvolver suas estruturas de papel para usar em comunidades de refugiados. (BUNTROCK, 1996).

Essas estruturas deveriam ter baixo custo, possibilitar com facilidade e segurança a participação de voluntários e ser facilmente desmontáveis para uma futura relocação, numa outra área de desastre, depois de terem sido usadas em Kobe.

A primeira estrutura a ser reconstruída foi a Igreja, constituída de uma casca de polycarbonato corrugado e translúcido, tecido para tenda em poliéster e tubos de papelão, conforme a figura 4.24.

Figura 4.24 – Vista noturna da Igreja de papelão.
Fonte: McQuaid, 2003, p.42.

A planta retangular tem capacidade para acomodar oitenta pessoas e foi cercada com janelas estruturais de aço e polycarbonato. Estas podem ser abertas para promover uma maior ventilação no ambiente interno. (McQUAID, 2003).

As figuras 4.25 a 4.27 ilustram o projeto.

Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 – Planta baixa, corte transversal e perspectiva explodida da Igreja.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.86.

A construção teve um custo modesto; porém, uma elaboração engenhosa. Foi construída em cinco semanas por 160 voluntários estudantes de arquitetura, com pouca habilidade em construção. O material utilizado foi todo doado por várias empresas. (THE JAPAN ARCHITECT, summer 2001).

A Igreja ainda está montada e em perfeitas condições de uso, onze anos após sua construção. Através das figuras 4.28 e 4.29, pode-se observar a Igreja em fase de construção e em uso.

Figuras 4.28 e 4.29 – Igreja em construção e após concluída, em uso.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.87.

Quadro 4.4 – Aspectos técnicos da Igreja de papelão.

Aspectos técnicos
Dimensões da obra 170 m².
Dimensões dos tubos de papelão 58 tubos de papelão com 33 cm de diâmetro, 15 mm de espessura e 5 m de comprimento.
Materiais associados Perfis metálicos, policarbonato, madeira.
Fundação Sem informação.
Estrutura e/ou Vedação Perfis metálicos estruturais e placas de policarbonato envolvem a igreja, fazendo a vedação externa e suportando a cobertura. Internamente, os tubos de papelão formam um painel com espaçamentos diferenciados entre si. Assim delimita-se o espaço do culto religioso e criam-se corredores ao redor.
Cobertura A cobertura é estruturada com barras de aço sob uma membrana para tenda.
Elementos de ligação e fixação Os tubos são fixados na parte superior numa cinta de amarração feita de madeira, que também serve como elemento de ligação entre os tubos e a estrutura da cobertura e para se fixar a membrana. Na parte inferior são parafusados em bases de madeira que contêm diafragmas.
Aberturas para passagem e ventilação As aberturas existentes estão dispostas nos painéis de vedação formados pelas placas de policarbonato.
Tratamento das peças Para aumentar sua durabilidade, os tubos foram revestidos com tinta poliuretana. (ARCHITECTURE AND URBANISM, 1997).
Observações A estrutura da cobertura une o retângulo de policarbonato à elipse de tubos de papelão, dando uma continuidade estrutural e a rigidez necessária. (THE ARCHITECTURAL REVIEW, 1999).

B5) Residências emergenciais em Kobe (Japão)

Seis meses depois do grande terremoto atingir a cidade de Kobe, em 1995, muitas famílias ainda estavam desabrigadas. Para solucionar este problema rapidamente, Shigeru Ban teve a idéia de projetar algo de baixo custo, esteticamente agradável, que fosse rápido e fácil de construir, usasse materiais descartados e pudesse ser desmontado sem gerar resíduos, ou podendo-se reutilizar os materiais. (BAN, 1997).

Ban se enfocou no desenvolvimento de diversas tipologias de tendas para uso familiar e para grandes estruturas de uso comum, necessárias num acampamento, que pudessem ser feitas pelo simples corte de tubos de papelão em diferentes comprimentos.

Assim, chegou ao que chama de *"Log House"*, certo de sua utilidade para situações emergenciais, e à decisão de usar tubos de grande diâmetro como sanitários, como já havia testado em sua própria casa. (BUNTROCK, 1996).

A partir daí, começou a procurar por materiais doados e voluntários. Os mesmos voluntários que construíram a Igreja de Papelão, ajudaram a construir as casas.

Um grupo de dez voluntários, incluindo um líder, foi designado a cada casa. As primeiras seis casas estavam prontas em menos de seis horas. Dessa mesma forma, foram construídas aproximadamente vinte e sete casas. (McQUAID, 2003).

As figuras 4.30 e 4.31 mostram a construção de uma das casas e seu aspecto interno, após estar concluída.

Figuras 4.30 e 4.31 – “Log House” em construção, por voluntários, e vista interna após sua conclusão. Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.89.

Através da figura 4.32 é possível entender a construção das casas.

Figura 4.32 – Perspectiva explodida da “Log House”.
Fonte: McQuaid, 2003, p.37.

As famílias que tinham filhos grandes receberam duas “Log Houses” dispostas lado a lado. O espaço entre elas serviu como uma área em comum.

Cada unidade, na época, custou cerca de \$1970. (BAN, 1997).

Quadro 4.5 – Aspectos técnicos das Residências emergenciais em Kobe.

Aspectos técnicos
Dimensões da obra 16 m².
Dimensões dos tubos de papelão Tubos de papelão com 108 mm de diâmetro, 4 mm de espessura e 2 m de comprimento.
Materiais associados Madeira, membrana para tenda, areia, engradados plásticos de cerveja.
Fundação Feita de engradados plásticos de cerveja cheios de sacos de areia.
Estrutura e/ou Vedação Os tubos formam painéis portantes com função estrutural e de vedação.
Cobertura Tesouras feitas de tubos de papelão, formando uma cobertura de duas águas coberta com membrana de tenda.
Elementos de ligação e fixação Os tubos foram fixados na parte inferior em bases de madeira que possuíam diafragmas, e na parte superior em sarrafos de madeira, que funcionaram como cinta de amarração e base para a cobertura. Os elementos das tesouras foram ligados através de encaixes feitos de madeira. Os tubos foram unidos uns aos outros com uma espuma impermeável adesiva sob pressão e por cabos de aço que os atravessavam horizontalmente em duas alturas. Isso aumentou a rigidez do conjunto.
Aberturas para passagem e ventilação Em três paredes havia janelas feitas de madeira e, em uma parede, porta. Para fazer os vãos das janelas usou-se tubos mais curtos, e para fazer o vão da porta interrompeu-se a disposição dos tubos num segmento da parede.
Tratamento das peças Sem informações.
Observações Usou-se restos de papéis e plásticos para preencher os tubos que formaram as paredes e fibra de vidro no forro, para propiciar isolamento térmico e acústico ao ambiente interno. A cobertura possuía um mecanismo de abertura na membrana para aumentar a ventilação. Cada casa foi construída por um grupo de dez pessoas, em seis horas, a um custo de \$1970.

B6) Residências emergenciais em Kaynasli (Turquia)

Após grandes terremotos ocorridos na Turquia, em 1999, milhares de famílias ficaram desabrigadas.

Como membro da *Voluntary Architects' Network (VAN)*, fundada pelo próprio Shigeru Ban na época do ocorrido em Kobe, o arquiteto prestou seus serviços para socorrer cerca de 200.000 pessoas desabrigadas por esta catástrofe.

Imediatamente, Ban recorreu a empresários para conseguir doações de dinheiro e materiais de construção, principalmente de lonas enceradas para cobrir as casas. Muitos materiais foram doados pelos próprios governos da Turquia e do Japão, e estudantes de arquitetura e moradores se incumbiram da construção (figuras 4.33 e 4.34).

Figuras 4.33 e 4.34 – Residências emergenciais em fase de construção na Turquia.
Fonte: McQuaid, 2003, p.38.

Nesta ocasião, Ban utilizou suas *“Log Houses”* de papelão, numa forma adaptada com relação à aplicação feita em 1995, em Kobe. As mudanças feitas foram melhorias com relação ao modo de vida das pessoas e às condições climáticas locais.

Devido à medida padrão da madeira compensada na Turquia e ao fato de as famílias turcas serem numerosas, o tamanho das casas foi aumentado. As figuras 4.35 e 4.36 ilustram o projeto.

Figura 4.35 – Planta baixa das casas construídas na Turquia.
Fonte: McQuaid, 2003, p.39.

Figura 4.36 – Elevação longitudinal das casas construídas na Turquia.
Fonte: McQuaid, 2003, p.39.

A figura 4.37 mostra o aspecto interno de uma das residências.

Figura 4.37 – Vista interna da residência na Turquia.
Fonte: McQuaid, 2003, p.38.

Quadro 4.6 – Aspectos técnicos das Residências emergenciais na Turquia.

Aspectos técnicos
Dimensões da obra 18 m².
Dimensões dos tubos de papelão Sem informações.
Materiais associados Madeira, lonas enceradas, areia, engradados plásticos de cerveja.
Fundação Feita de engradados plásticos de cerveja cheios de sacos de areia.
Estrutura e/ou Vedação Os tubos formam painéis portantes com função estrutural e de vedação.
Cobertura Tesouras feitas de tubos de papelão, formando uma cobertura de duas águas coberta com lonas enceradas.
Elementos de ligação e fixação Os tubos foram fixados na parte inferior em bases de madeira que possuíam diafragmas, e na parte superior em sarrafos de madeira, que funcionaram como cinta de amarração e base para a cobertura. Os elementos das tesouras foram ligados através de encaixes feitos de madeira. Os tubos foram unidos uns aos outros com uma espuma impermeável adesiva sob pressão e cabos de aço os atravessavam horizontalmente em duas alturas, aumentando a rigidez do conjunto.
Aberturas para passagem e ventilação Em duas paredes há janelas feitas de madeira e porta em uma parede. Para fazer os vãos das janelas usou-se tubos mais curtos, e para fazer o vão da porta interrompeu-se a disposição dos tubos num segmento da parede.
Tratamento das peças Sem informações.
Observações Usou-se restos de papéis e plásticos para preencher os tubos que formaram as paredes e fibra de vidro no forro, para propiciar isolamento térmico e acústico ao ambiente interno.

B7) Residências emergenciais em Bhuj (Índia)

No Oeste da Índia, em 2001, o maior terremoto de sua história deixou mais de 600.000 pessoas desabrigadas.

Assim, Shigeru Ban foi contatado por uma empresária indiana, Sr^a. Neeta Premchand, para trabalhar em conjunto com um arquiteto local, Kartikeya Shodhan, e construir cerca de vinte unidades habitacionais para algumas das vítimas. O projeto foi financiado por ela. (McQUAID, 2003).

Dessa vez, Ban elaborou uma estrutura semelhante às anteriores, figuras 4.38 e 4.39. No entanto, foi difícil encontrar materiais para a fundação e cobertura.

Figura 4.38 – Vista interna das casas construídas na Índia.
Fonte: McQuaid, 2003, p.40.

Figura 4.39 – Vista externa das casas construídas na Índia.
Fonte: McQuaid, 2003, p.41.

Quadro 4.7 – Aspectos técnicos das Residências emergenciais na Índia.

Aspectos técnicos
Dimensões da obra 16 m².
Dimensões dos tubos de papelão Sem informações.
Materiais associados Madeira, cabos de aço, concreto, entulho, esteira de cana trançada, lona encerada, bambu.
Fundação A base das paredes foi feita de entulho de obras com lama.
Estrutura e/ou Vedação Os tubos formaram painéis protendidos através de um cabo de aço transpassando-os transversalmente, em duas alturas. Os tubos posicionados nas quinas e os que sustentavam o terraço, na frente da casa, possuíam internamente uma barra de aço e emboço, apoiados numa pequena base de concreto. Nos quatro cantos do ambiente, cabos de madeira foram presos para aumentar a rigidez da construção.
Cobertura A cobertura, em arco, usou bambu para a estrutura e foi coberta com duas camadas de esteiras de cana trançada. No meio destas, foi colocada uma lona encerada de cor clara, para não escurecer o ambiente.
Elementos de ligação e fixação Os encaixes e peças de ligação foram feitos de madeira; além dos cabos de aço citados acima.
Aberturas para passagem e ventilação Portas e janelas foram feitas de madeira compensada e bambu.
Tratamento das peças Sem informações.
Observações

C) Obras que utilizam tubos de papelão apenas para vedação ou apenas para estrutura

C1) Salão de Festival de Odawara, Kanagawa (Japão)

Este grande salão foi construído em 1990, para as comemorações dos 50 anos do município de Odawara (figura 4.40).

Figura 4.40 – Vista externa do Pavilhão de Odawara.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.104.

A princípio, se desejava uma construção feita em madeira. Porém, devido aos custos e ao tempo disponível, Shigeru Ban sugeriu uma construção em tubos de papelão.

Neste caso seria necessária a aprovação do governo para utilizar o material de forma estrutural. Mas como não havia tempo para esperar por este processo, os tubos foram usados apenas para vedar o espaço e dar proteção contra os ventos.

Nesta construção temporária, entre os tubos de papelão foram colocados tubos transparentes de vinil, de pequeno diâmetro, para permitir a entrada da luz natural.

Grandes tubos de papelão, de 123 cm de diâmetro, foram usados para os sanitários. (THE JAPAN ARCHITECT, summer 1998).

A planta baixa e o corte do projeto são mostrados nas figuras 4.41 e 4.42.

Figuras 4.41 e 4.42 – Planta baixa e corte do Pavilhão de Odawara.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.104.

A figura 4.43 mostra o detalhe construtivo de ligação entre os tubos de papelão e os tubos de vinil.

- 1 – tubos de vinil
- 2 – diafragma de madeira
- 3 – parafusos

Figura 4.43 – Detalhe da ligação entre os tubos de papelão e os tubos de vinil.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.105.

Quadro 4.8 – Aspectos técnicos do Salão de Festival de Odawara.

Aspectos técnicos
Dimensões da obra 1300 m².
Dimensões dos tubos de papelão 330 tubos de papelão com 53 cm de diâmetro, 8 m de comprimento e 15 mm de espessura, e 16 tubos com a mesma espessura e comprimento dos anteriores, porém com 123 cm de diâmetro.
Materiais associados Perfis metálicos, tubos de vinil, vidro, concreto, madeira.
Fundação Sem informações.
Estrutura e/ou Vedação Estrutura metálica independente composta por 10 pilares e treliças espaciais. A vedação foi feita por tubos de papelão, tubetes de vinil e panos de vidro.
Cobertura A cobertura foi feita em treliças espaciais metálicas.
Elementos de ligação e fixação Os tubos foram fixados sobre bases de madeira que continham diafragmas.
Aberturas para passagem e ventilação Existiam cinco aberturas para passagem e ventilação. Estas podiam ser fechadas através de panos de vidro.
Tratamento das peças Sem informações.
Observações Alguns pequenos tubetes de vinil foram intercalados com tubos de papelão, em determinados segmentos das paredes, para propiciar iluminação natural ao ambiente interno e ao mesmo tempo vedá-lo da entrada de som e ventos externos.

C2) Biblioteca do poeta, Kanagawa (Japão)

Em 1991, o arquiteto projetou uma biblioteca para um amigo – figura 4.44. Esta foi a primeira construção permanente com tubos de papelão. (McQUAID, 2003).

Figura 4.44 – Vista externa da biblioteca.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.102.

A estrutura de tubos de papelão foi feita exclusivamente de treliças e arcos. As figuras 4.45 e 4.46 ilustram o sistema adotado para as juntas entre os vários elementos.

Figuras 4.45 e 4.46– Detalhes da peça de madeira utilizada para ligar os tubos da Biblioteca do Poeta. Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.103.

Como vedação, Ban usou quatro estantes de madeira fabricadas especialmente para satisfazer algumas necessidades, além de suportar os livros. Essas estantes tiveram um acabamento externo especial, com um material isolante adicionado durante a fabricação. As figuras 4.47 a 4.49 ilustram o projeto.

Figura 4.47 – Perspectiva explodida da biblioteca.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.100.

Figuras 4.48 e 4.49 – Planta baixa e corte transversal da biblioteca.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.100.

Quadro 4.9 – Aspectos técnicos da Biblioteca do poeta.

Aspectos técnicos
Dimensões da obra Sem informações.
Dimensões dos tubos de papelão Tubos de papelão de 10 cm de diâmetro e 12,5 mm de espessura.
Materiais associados Madeira, cabos de aço, vidro, perfis metálicos, telhas de aço corrugado.
Fundação Sem informações.
Estrutura e/ou Vedação Há duas estruturas nesta obra. Internamente, a estrutura foi feita exclusivamente de treliças e arcos em tubos de papelão. Como vedação, usou-se quatro estantes de madeira. Externamente à biblioteca, foi feita outra estrutura com perfis metálicos e placas de vidro para proteger a construção interna dos ventos, chuva e neve.
Cobertura Os arcos de tubos de papelão foram subpostos a uma cobertura externa estruturada em perfis metálicos e coberta por telhas de aço corrugado.
Elementos de ligação e fixação Para formar as juntas, na estrutura de tubos de papelão, foram usados cubos de madeira de 10 cm de lado. E, para contraventar esta estrutura e ligar as junções de madeira, usou-se cabos de aço.
Aberturas para passagem e ventilação As aberturas se encontram na estrutura externa e são compostas por panos de vidro móveis.
Tratamento das peças Sem informações.
Observações O sanitário, ao fundo da biblioteca, foi construído com alvenaria convencional.

C3) Residências emergenciais em Ruanda

No verão de 1995, Shigeru Ban se envolveu com a *United Nations High Commissioner for Refugees* (UNHCR) para fornecer habitação temporária a mais de dois milhões de habitantes da Ruanda, que fugiram do genocídio na Tanzânia e no Zaire (atual República Democrática do Congo).

Quando Ban chegou com sua proposta, a UNHCR já estava há vários meses pensando em diversas opções de materiais com potencial estrutural para os abrigos. Entre eles, bambu, madeira, alumínio e plástico. Problemas como o desflorestamento local e o custo destes materiais levaram à escolha final pelos tubos de papelão, que puderam ser fabricados no próprio local, reduzindo custos e tempo de transporte. (McQUAID, 2003).

A partir disso, um fabricante de móveis suíço produziu três protótipos diferentes de abrigos, todos com 16 m², e os avaliou quanto à durabilidade, custo e resistência ao ataque de cupins.

O primeiro modelo, figura 4.50, tinha cobertura em duas águas. O segundo, figura 4.51, possuía uma cobertura em formato assimétrico e tinha pé-direito maior que o primeiro. E o terceiro protótipo, figura 4.52, com pé-direito maior ainda, ofereceu a possibilidade de ser unido a outros abrigos, sendo o mais apropriado para instalações de enfermarias e outros. Foi, então, a opção escolhida.

Figuras 4.50, 4.51 e 4.52 – Protótipos de abrigos desenvolvidos para a Ruanda.

Fonte: McQuaid, 2003, p.30.

Numa próxima etapa, representantes de uma fábrica de tubos de papelão treinaram um grupo para operar as máquinas, transportadas e

instaladas no local da obra, comprovando a possibilidade de produzir grande quantidade de tubos numa situação emergencial.

Por fim, a população foi monitorada até completar a construção de cinquenta abrigos. (McQUAID, 2003).

As figuras 4.53 e 4.54 mostram a construção dos abrigos.

Figura 4.53 – Abrigos sendo construídos em Ruanda.
Fonte: McQuaid, 2003, p.31.

Figura 4.54 – Abrigos construídos em Ruanda.
Fonte: McQuaid, 2003, p.33.

Quadro 4.10 – Aspectos técnicos das Residências emergenciais em Ruanda.

Aspectos técnicos
Dimensões da obra 16 m².
Dimensões dos tubos de papelão Sem informações.
Materiais associados Lonas enceradas e peças de plástico.
Fundação Não há fundação.
Estrutura e/ou Vedação Os tubos foram usados para fazer a estrutura, muito parecida com uma estrutura metálica de barraca.
Cobertura Sobre a estrutura de tubos de papelão colocou-se lonas enceradas.
Elementos de ligação e fixação A ligação entre os tubos foi feita através de peças de plástico.
Aberturas para passagem e ventilação Os abrigos são fechados em dois lados e abertos nos outros dois.
Tratamento das peças Sem informações.
Observações

C4) Domus de papelão, Gifu (Japão)

Esse galpão permanente, construído em 1998, foi solicitado a Shigeru Ban por uma empresa fornecedora de casas de madeira, pela relação existente entre os materiais.

Como exigências de projeto, o galpão deveria ter aproximadamente 25 x 28 m, ser aberto e fácil de ser montado pelo grupo de carpinteiros do próprio cliente. Dessa forma, Ban propôs a estrutura em arco mostrada na figura 4.55. (McQUAID, 2003).

Todos os tubos foram impermeabilizados com poliuretano claro antes de serem usados, com o intuito de minimizar a sua dilatação e contração devido à umidade e grandes mudanças de temperatura.

Acima da estrutura em arco, feita de tubos de papelão, colocou-se uma camada de chapas de madeira, conhecidas por OSB (*Oriented Strand Board*), para propiciar resistência lateral. Sobre esta colocou-se uma camada de painéis de polycarbonato corrugado, para proteger a estrutura de chuva e neve. (figura 4.56).

Figuras 4.55 e 4.56 – Corte longitudinal do Domus de Papelão e detalhe da montagem da cobertura. Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.80.

A elevação longitudinal e o espaço interno são mostrados nas figuras 4.57 e 4.58.

Figuras 4.57 e 4.58 - Elevação transversal do Domus de papelão e seu espaço interno.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.82.

Escoras foram feitas com tubos de papelão nas bases dos arcos, como mostram as figuras 4.59 e 4.60. (McQUAID, 2003).

Figuras 4.59 e 4.60 – Sistema de escoramento da estrutura.
Fonte: McQuaid, p.51-2.

Neste projeto, Ban teve que provar às autoridades a compatibilidade nos pontos de ligação entre os tubos de papelão e as juntas de madeira laminada (figuras 4.61 e 4.62); que geraram preocupação devido ao seu custo com relação ao custo total da estrutura. (BAN, 2000a).

Figuras 4.61 e 4.62 – Encaixes de madeira laminada utilizados no Domus de Papelão.
Fonte: The Japan Architect, summer 1998, p.83.

Quadro 4.11 – Aspectos técnicos do Domus de papelão.

Aspectos técnicos
Dimensões da obra 700 m ² .
Dimensões dos tubos de papelão Para os arcos, foram usados tubos de papelão de 1,8 m de comprimento e 29 cm de diâmetro externo. Para as fileiras transversais aos arcos, foram usados tubos de 0,90 m de comprimento e 14 cm de diâmetro.
Materiais associados Madeira, placas de policarbonato corrugado, chapas de OSB, cabos de aço, concreto.
Fundação Sem informações.
Estrutura e/ou Vedação A estrutura é um arco com vão de 27,2 m e flecha máxima no centro deste vão de 8,0m. Os arcos de tubos de papelão foram fixados em bases inclinadas de concreto, evitando o contato com o solo e possível umidade. Tubos de papelão foram usados para formar escoras nas extremidades dos arcos. A estrutura foi toda contraventada com cabos de aço.
Cobertura A cobertura é a própria estrutura de tubos de papelão em arco. Acima desta estrutura foi colocada uma camada de chapas de OSB, com uma circunferência de 50 cm vazada em seu centro, para permitir a entrada de luz natural. Acima desta, foi colocada uma outra camada de placas de policarbonato corrugado, para proteger a construção de chuva e neve.
Elementos de ligação e fixação Os tubos de papelão foram ligados uns aos outros através de peças feitas de madeira laminada e parafusos.
Aberturas para passagem e ventilação As duas laterais da construção são abertas, permitindo ventilação e acesso livre à pessoas e veículos.
Tratamento das peças Todos os tubos foram impermeabilizados com poliuretano claro.
Observações

C5) Pavilhão Japonês na Expo 2000, Hannover (Alemanha)

Este foi um espaço temporário, requisitado pela Organização do Comércio Exterior do Japão, construído para ser o pavilhão japonês na Feira Internacional de 2000, em Hannover. (BAN, 2000a).

A mais complexa estrutura construída até hoje com tubos de papelão formou um espaço imponente e generoso, com 74 m de comprimento, 25 m de largura e 16 m de altura. Uma foto noturna da obra pode ser vista na figura 4.63. (BERET; PENWARDEN, 2000).

Figura 4.63 – Vista noturna do Pavilhão Japonês.
Fonte: McQuaid, 2003, p.67.

Considerando o tema da feira, voltado para o desenvolvimento sustentável, Shigeru Ban teve a colaboração de Frei Otto para desenvolver este projeto. O sistema construtivo e os materiais foram especificados com o intuito de abolir os desperdícios e reciclar ou re-utilizar a maior quantidade possível dos componentes após a desmontagem do pavilhão. (RATTI, 2003).

A partir deste princípio, segundo Ban (2000b), os tubos de papelão utilizados foram fabricados com papéis recicláveis coletados na própria Alemanha.

Pelo mesmo princípio, uma membrana foi especialmente desenvolvida, pois o PVC usado nas membranas convencionais não pode ser reciclado e libera dióxidos quando é queimado. (BAN, 2000a)²⁸.

²⁸ Ban (2000a) diz que não foi fácil encontrar o equilíbrio entre resistência, impermeabilidade e proteção ao fogo nas membranas. Após dez experimentos e testes, eles conseguiram desenvolver uma membrana com a resistência exigida e a performance antichamas B2, a partir de um papel à prova de fogo com reforço de fibra de vidro e um filme laminado incombustível de polietileno.

A idéia inicial era fazer um projeto em formato de túnel. Mas quando surgiu a idéia de ter alguns estrangulamentos, teve-se de pensar numa ligação entre os tubos que permitisse o seu movimento tri-dimensional, além de suportar a tensão. As figuras 4.64 e 4.65 mostram a solução adotada com tiras de tecido, um detalhe que remete à cultura tradicional japonesa²⁹.

Figuras 4.64 e 4.65 – Tiras de tecido usadas para amarrar os tubos do Pavilhão Japonês.
Fonte: McQuaid, 2003, p.64.

Segundo Davey (2000), a estrutura foi toda montada no solo e depois gradualmente içada até tomar a configuração definida no projeto, o que levou duas semanas (figuras 4.66 a 4.68).

Figuras 4.66, 4.67 e 4.68 – Montagem e içamento da estrutura do Pavilhão Japonês.
Fonte: McQuaid, 2003, p.62.

Através da figura 4.69 é possível entender a obra.

²⁹ Ban, Otto e o engenheiro estrutural Buro Happold, adotaram esse sistema de juntas flexíveis e de baixa tecnologia para facilitar o processo de construção. (McQUAID, 2003).

Figura 4.69 – Perspectiva explodida da estrutura do Pavilhão Japonês.
Fonte: McQuaid, 2003, p.63.

Os tubos de papelão tiveram de ser submetidos a testes num instituto de ensaios público, na Alemanha.

Durante o processo de testes, Buro Happold identificou um grande problema estrutural: os tubos de papelão tinham uma fluência muito grande. Não era possível mudar muita coisa, pois os tubos já estavam prontos para a obra. Foi então que eles decidiram combinar a casca de tubos de papelão com arcos de madeira, abrindo mão da pureza estrutural. (BAN, 2000a).

Frei Otto propôs fixar treliças de madeira por cima das vigas transversais de tubos de papelão, para dar maior rigidez ao conjunto e servir para a fixação da membrana de cobertura. Essas treliças também poderiam ser úteis caso fosse necessário fazer a manutenção de algum elemento. (McQUAID, 2003).

De acordo com The Japan Architect (winter 2001), as duas extremidades do pavilhão foram parcialmente vedadas, nas quais foram deixadas aberturas para ventilação.

Conforme Davey (2000), caixas feitas de madeira de andaimes, amarradas com cabos de aço e cheias de areia foram enterradas e formaram a fundação.

As autoridades alemãs foram muito rigorosas para aprovar este projeto. Todos os novos materiais e técnicas tiveram que ser aprovados conforme a legislação alemã. Para atender a todas as exigências, inclusive de segurança, foram necessários vários ajustes. (McQUAID, 2003).

A primeira exigência foi que a estrutura fosse mais dependente de materiais convencionais, como a madeira e o aço; obrigando-os a aumentar a seção das vigas de madeira e utilizar reforços metálicos desnecessários.

Quanto à membrana de cobertura, embora já tivesse passado em todos os testes padronizados referentes à ação do fogo, com o pretexto de temer ataques terroristas, foi exigida a sua substituição pelas membranas convencionais de PVC, de classificação B1, a mais alta da escala de proteção ao fogo.

Recusando abandonar a membrana especialmente desenvolvida para este projeto, esta teve que ser colocada abaixo da membrana convencional. Isso formou uma membrana dupla e translúcida que possibilitou a penetração da luz natural. (BAN, 2000a).

Quadro 4.12 – Aspectos técnicos do Pavilhão Japonês.

Aspectos técnicos
Dimensões da obra 3100 m².
Dimensões dos tubos de papelão Tubos de papelão com 20 m de comprimento, 12 cm de diâmetro, 22 mm de espessura e 100 kg.
Materiais associados Tiras de tecido, areia, cabos de aço, membrana de PVC, reforços metálicos, madeira.
Fundação Caixas feitas de madeira de andaimes, amarradas com cabos de aço e cheias de areia foram enterradas e formaram a fundação.
Estrutura e/ou Vedação A estrutura foi constituída de uma casca gigantesca de formato irregular e orgânico, feita a partir de uma trama de tubos de papelão. Trelças de madeira foram fixadas por cima das vigas transversais de tubos de papelão, para dar maior rigidez ao conjunto. As duas extremidades do pavilhão foram parcialmente vedadas; esse sistema funcionou como diafragmas, dando resistência à tensão normal.
Cobertura A casca foi coberta com uma membrana translúcida de PVC e uma outra membrana especialmente desenvolvida para este projeto, a partir de um papel à prova de fogo com reforço de fibra de vidro e um filme laminado incombustível de polietileno.
Elementos de ligação e fixação Os tubos foram encaixados a peças de madeira em suas extremidades e amarrados com tiras de tecido em seus cruzamentos, buscando-se flexibilidade entre as mesmas. As trelças de madeira serviram para fixar a membrana de cobertura. Cabos de aço foram usados para contraventar a estrutura.
Aberturas para passagem e ventilação As aberturas estavam dispostas nas duas extremidades do pavilhão e foram parcialmente vedadas com painéis de papelão tipo colméia na forma de triângulos equiláteros, com 1,50 m de lado e 40 cm de profundidade.
Tratamento das peças Sem informações.
Observações

C6) Museu de Arte Moderna, Nova Iorque (EUA)

O arco de tubos de papelão foi uma estrutura muito leve encomendada pelo Museu de Arte Moderna de Nova Iorque, para o evento de celebração da virada do milênio, no ano de 2000.

Com um vão de 26,5 m e altura de 9,1 m, a cobertura em arco foi montada no jardim do museu, transformando o espaço num ambiente muito agradável ao ar livre.

O museu realizou uma mostra da história da construção de casas temporárias e outras estruturas no seu jardim e, para isso, solicitou alguns trabalhos diretamente relacionados com práticas construtivas correntes e avançadas. Assim, pediu a participação de Shigeru Ban, devido aos seus experimentos arquitetônicos modernos. (McQUAID, 2003).

Segundo Lotus International (2001), passada a experiência na Expo de Hannover, nesta ocasião Ban fez questão de construir uma pura arquitetura de papelão.

Na sua proposta original, Ban pretendia utilizar toda a área do jardim; porém, por limitações financeiras, apenas $\frac{1}{3}$ da área foi coberto. No entanto, isso não diminuiu a beleza do projeto.

A estrutura foi previamente montada por uma empresa de andaimes e transportada ao local em oito partes – figura 4.70. Essas partes foram, então, unidas com o auxílio de uma grua e formaram a cobertura. (McQUAID, 2003).

Figura 4.70 – Construção da estrutura de tubos de papelão no jardim do MoMA, NY.
Fonte: McQuaid, 2003, p.70.

De acordo com Guiney (2000), os tubos de papelão foram amarrados com tiras de tecido, parafusados e contraventados com cabos de aço, e a curvatura final resultou do seu próprio peso, cerca de 6,0 toneladas.

Como os elementos ficariam expostos ao tempo, os fabricantes dos tubos adicionaram um material impermeabilizante apropriado ao papel³⁰, para evitar o amolecimento e a redução de sua resistência, e aplicaram em sua superfície externa um revestimento à base de poliuretano. (TALARICO, 2000).

Os elementos foram reciclados após a sua desmontagem.

As figuras 4.71 e 4.72 mostram a obra finalizada.

Figura 4.71 – Vista superior da obra do MoMA após sua conclusão.
Fonte: McQuaid, 2003, p.69.

Figura 4.72 – Vista da obra do MoMA após sua conclusão.
Fonte: McQuaid, 2003, p.71.

³⁰ A referência citada não indica o material utilizado.

Quadro 4.13 – Aspectos técnicos do Arco para o MoMA/NY

Aspectos técnicos
Dimensões da obra Vão de 26,5 m e altura de 9,1 m.
Dimensões dos tubos de papelão Sem informações.
Materiais associados Cabos de aço, tiras de tecido, peças metálicas e parafusos.
Fundação Não foi executada fundação para esta obra.
Estrutura e/ou Vedação A estrutura temporária era uma casca formada por uma trama de tubos de papelão. Para dar maior rigidez e estabilidade, esta casca foi reforçada com arcos longitudinais em tubos de papelão dispostos acima e abaixo da mesma. Não havia vedação.
Cobertura A cobertura era a própria estrutura de tubos de papelão e formava uma espécie de pergolado em arco, pois era vazada e não possuía nenhum material de cobrimento.
Elementos de ligação e fixação Os tubos de papelão que formavam uma trama foram amarrados em seus cruzamentos com tiras de tecido. Os tubos de papelão que formavam arcos longitudinais sobre esta trama foram presos por uma peça metálica e parafusos aos que a formavam (nos pontos de seus cruzamentos) e aos que formavam os arcos na parte inferior, travando o conjunto. Cabos de aço foram usados para contraventar a estrutura.
Aberturas para passagem e ventilação A cobertura era totalmente vazada e o espaço não possuía vedações laterais.
Tratamento das peças Os fabricantes dos tubos adicionaram um material impermeabilizante apropriado ao papel, para evitar o amolecimento e a redução de sua resistência, e aplicaram em sua superfície externa um revestimento à base de poliuretano. (TALARICO, 2000).
Observações

C7) Estaleiro em Borgonha (França)

Shigeru Ban foi requisitado, em 1998, para projetar um estaleiro e um museu para o Canal de Borgonha, construído entre os séculos XVII e XIX, para ligar o Sul ao Norte da França.

O estaleiro, projetado para abrigar um barco de grande significado histórico para o canal, é um túnel em arco de 20 m de comprimento, constituído de uma trama triangular de tubos de papelão. O diâmetro externo da estrutura, 11 m, é o mesmo dos túneis existentes ao longo do canal.

As figuras 4.73 e 4.74 mostram os cortes transversal e longitudinal do projeto, e a figura 4.75 mostra a maquete do mesmo.

Figura 4.73 – Corte transversal da estrutura de papelão do estaleiro.
Fonte: McQuaid, 2003, p.73.

Figura 4.74 – Corte longitudinal da estrutura de papelão do estaleiro.
Fonte: McQuaid, 2003, p.73.

Figura 4.75 – Maquete do projeto do estaleiro.
Fonte: McQuaid, 2003, p.73.

Ban usou tubos do mesmo tamanho dos utilizados no Pavilhão Japonês, na Expo 2000, e os mesmos testes feitos na Alemanha para a aprovação na França. Porém, ligou os tubos através de peças de alumínio, de acordo com as figuras 4.76 e 4.77.

Figura 4.76 – Ligação "A" entre os tubos e peças de alumínio usadas na construção do estaleiro.
Fonte: McQuaid, 2003, p.72.

Figura 4.77 – Ligação "B" entre os tubos e peças de alumínio usadas na construção do estaleiro.
Fonte: McQuaid, 2003, p.72-73.

A construção foi coberta com painéis de policarbonato corrugado e concluída em 2004. (McQUAID, 2003).

Quadro 4.14 – Aspectos técnicos do Estaleiro em Borgonha.

Aspectos técnicos
Dimensões da obra A obra possui 20 m de comprimento e o diâmetro de sua curvatura é 11 m.
Dimensões dos tubos de papelão Tubos de papelão com 20 m de comprimento, 12 cm de diâmetro, 22 mm de espessura e 100 kg.
Materiais associados Policarbonato corrugado, alumínio.
Fundação Sem informações.
Estrutura e/ou Vedação A estrutura é um arco feito a partir de uma trama triangular de tubos de papelão. As faces longitudinais são fechadas pelo prolongamento do arco até o chão e as faces transversais são abertas.
Cobertura A cobertura é a própria estrutura de tubos de papelão sob placas de policarbonato corrugado.
Elementos de ligação e fixação Os tubos foram conectados uns aos outros através de peças de alumínio.
Aberturas para passagem e ventilação A estrutura é fechada nas faces longitudinais e completamente aberta nas transversais, propiciando ventilação e passagem livre.
Tratamento das peças Sem informações.
Observações

5 . ENSAIOS TÉCNICOS REALIZADOS COM TUBOS DE PAPELÃO

No capítulo anterior estudou-se os sistemas construtivos utilizados por Shigeru Ban em suas obras com tubos de papelão, podendo-se verificar as possibilidades de uso deste material.

Dessa forma, para dar seqüência ao estudo da tecnologia desenvolvida por Shigeru Ban, este capítulo tem a finalidade de estudar os ensaios técnicos que o referido arquiteto fez com os tubos que utilizou.

Em seguida, deve-se realizar alguns ensaios preliminares para caracterização de tubos de papelão fabricados por uma indústria brasileira e compará-los entre si.

5.1. Ensaios técnicos realizados por Shigeru Ban

A partir de McQuaid (2003), pode-se observar ensaios que Shigeru Ban fez com os tubos de papelão para alguns dos seus projetos, como a Biblioteca do Poeta, a Casa de Papelão, o Domus de Papelão e o Pavilhão Japonês na Expo 2000.

Para cada projeto o arquiteto realizou testes diferentes, conforme as necessidades e particularidades de cada um.

5.1.1. Ensaios realizados para a Biblioteca do Poeta

Os ensaios foram feitos pela Universidade de Waseda, Tóquio, antes da sua construção. O objetivo foi determinar o efeito da fluência nos tubos devido a um carregamento axial constante, após um longo período. (McQUAID, 2003).

Os modelos eram constituídos de dez tubos de papelão de 100 mm de diâmetro, 12,5 mm de espessura e 400 mm de comprimento.

Primeiramente, foi realizado um ensaio de resistência à compressão em cinco corpos-de-prova, para se aferir a carga máxima resistida. A tabela 5.1 mostra os resultados do ensaio, além dos valores do módulo Young e do coeficiente de Poisson³¹.

Tabela 5.1 – Resultados do teste de resistência à compressão para a Biblioteca do Poeta, com coeficiente de Poisson e módulo Young. Fonte: McQuaid, 2003, p.74.

Corpo-de-prova	S (cm ²)	F (kgf)	f _c max (MPa)	E (GPa)	Poisson
α-1	33,26	3335	9,84	1,86	0,192
α-2	33,50	3640	10,66		
α-3	33,50	3405	9,97	1,88	0,180
α-4	33,20	3452,5	10,20	1,89	0,197
α-5	33,65	3405	9,92	1,82	0,187
Médias			10,12	1,86	0,189

³¹ Módulo Young, ou módulo de elasticidade, é uma grandeza que varia conforme o material que compõe o elemento ensaiado, ou seja, madeira, concreto, aço, papelão, etc. Seu valor pode ser obtido do gráfico de tensão x deformação do material, considerando apenas a fase elástica; é a razão entre a tensão e a deformação num dado ponto. Coeficiente de Poisson é a razão entre a deformação transversal e a deformação longitudinal num elemento ensaiado.

Shigeru Ban decidiu utilizar no ensaio de fluência apenas $\frac{1}{3}$ da carga máxima resistida no ensaio preliminar de resistência à compressão, ou 1000 kgf; pois considerou que esta era uma carga adequada ao intuito do ensaio de fluência e também para evitar que o carregamento fosse próximo da carga máxima resistida. (McQUAID, 2003).

Assim, cinco corpos-de-prova foram submetidos a uma força de compressão constante de 1000 kgf, por mais de um ano. As mudanças dimensionais no comprimento dos tubos, a temperatura e a umidade relativa do ar foram medidas regularmente, a cada semana.

As figuras 5.1 e 5.2 mostram, respectivamente, as variações de temperatura e umidade relativa e as variações dimensionais ocasionadas no comprimento dos tubos de papelão.

Figura 5.1 – Variações de temperatura e umidade relativa para os tubos ensaiados para a Biblioteca do Poeta. Fonte: McQuaid, 2003, p.74.

Figura 5.2 – Variações dimensionais no comprimento do tubo de papelão sob carregamento no sentido longitudinal, para a Biblioteca do Poeta. Fonte: McQuaid, 2003, p.74.

Segundo McQuaid (2003), concluiu-se que grande porcentagem da alteração dimensional nos tubos de papelão é causada pela umidade relativa do ar.

5.1.2. Ensaios realizados para a Casa de Papelão

Como os tubos de papelão são usados como elementos de vedação e estrutura na Casa de Papelão, foram feitos testes de resistência à flexão e compressão. Foi também realizado ensaio de resistência ao cisalhamento nos parafusos das ligações papelão-madeira, para se conhecer a sua resistência num longo período. Os ensaios foram feitos pela Universidade de Waseda, em 1991.

5.1.2.1. Ensaio de resistência à compressão

Cinco corpos-de-prova foram usados neste ensaio. Todos tinham 280 mm de diâmetro externo, 250 mm de diâmetro interno, 15 mm de espessura e 600

mm de comprimento. A área da seção transversal de cada um era 126,0 cm². A máquina utilizada foi um compressor de carregamento rápido (REH-200), que aplicou a carga à velocidade de 0,01 MPa/s.

Ao final do teste, figuras 5.3 e 5.4, os tubos estavam torcidos e visivelmente deformados, com dobras bastante aparentes nas emendas do enrolamento espiral. Sendo $\sigma_{\max}$ a tensão máxima de compressão, os modelos ondularam a $0,88 \cdot \sigma_{\max}$. (McQUAID, 2003).

Figuras 5.3 e 5.4 – Aspecto dos tubos após o teste de resistência à compressão, para a Casa de Papelão. Fonte: McQuaid, 2003, p.75.

A figura 5.5 mostra as relações da força-carregamento, muito semelhantes às do concreto. A curva formada pela série 1 (●) representa a força longitudinal (valores negativos) e a curva formada pela série 2 (▲) representa a força transversal (valores positivos).

Figura 5.5 – Resultados do teste de resistência à compressão para a Casa de Papelão: relação entre carregamento e deformação. Fonte: McQuaid, 2003, p.75.

Com base nas forças transversais e longitudinais medidas a $\frac{1}{3}$ da tensão máxima de compressão, a tabela 5.2 mostra os valores de Módulo Young e coeficiente de Poisson³².

Tabela 5.2 – 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				
Coeficiente 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				

A resistência à compressão média foi 11,17 MPa.

Como o teor de umidade tem grande influência na resistência do material, após o ensaio de compressão, este foi medido para cada corpo-de-prova. Uma pequena peça foi cortada a partir do centro de cada modelo e pesada. Depois de serem mantidas a 105°C por sete dias, foram pesadas novamente. O teor médio de umidade obtido foi 8,8%.

5.1.2.2. Ensaio de resistência à flexão

Os corpos-de-prova tinham 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. A máquina de teste foi a REH-200t. (McQUAID, 2003).

³² O módulo Young e o coeficiente de Poisson devem ser calculados com valores compreendidos no regime elástico. Pelo descrito acima, pode-se deduzir que no caso dos tubos de papelão, o regime elástico ocorre até $\frac{1}{3}$ da tensão máxima de compressão.

A figura 5.6 mostra o tubo de papelão na condição do esforço máximo, tocando a mesa de teste no centro do vão, com as ondulações provocadas. A flecha máxima, neste ponto, foi de 124 mm.

Figura 5.6 – 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.

Como resultados, de acordo com a tabela 5.3, a resistência à flexão foi 1,42 vezes maior que a resistência à compressão. Quanto ao módulo Young, devido à deformação parcial ocorrida, foi equivalente a 92% do valor obtido no ensaio de resistência à compressão.

Tabela 5.3 – 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				

5.1.2.3. Ensaio de tensão ao cisalhamento simples

Em situações de terremotos ou ventos fortes, no Japão, os pilares de tubos de papelão estão sujeitos a um esforço de momento em suas bases, na ligação com o piso. Por isso, este ensaio teve o intuito de gerar o efeito de um

cisalhamento simples para verificar a resistência dos parafusos. (McQUAID, 2003).

Para o teste, foram usados tubos de papelão de 600 mm de comprimento e 15 mm de espessura, juntas de madeira do gênero *Tsuga* e oito parafusos de 12 mm de diâmetro para cada modelo.

A ligação foi montada, deixando-se um espaço equivalente a 7 diâmetros entre os parafusos e a borda do tubo. Passou-se cera nos pontos de contato entre o tubo de papelão e a junta de madeira.

O método deste ensaio seguiu o mesmo método utilizado para o teste de resistência à compressão. O deslocamento entre o tubo de papelão e a junta de madeira foi considerado igual ao deslocamento entre a mesa de teste e a placa de aplicação de carga. A velocidade de carregamento foi 0,01 MPa/s.

A figura 5.7 mostra o tubo deformado próximo à cabeça do parafuso, que já não estava mais em posição perpendicular com relação ao mesmo.

Figura 5.7 – Corpo-de-prova após o ensaio de resistência ao cisalhamento na ligação para a Casa de Papelão. Fonte: McQuaid, 2003, p.77.

Na figura 5.8 pode-se observar a relação entre o carregamento aplicado e o deslocamento gerado entre as peças e na tabela 5.4 encontram-se os resultados do teste.

Figura 5.8 – Relação carregamento-deslocamento para o ensaio de resistência ao cisalhamento na ligação para a Casa de Papelão. Fonte: McQuaid, 2003, p.77.

Tabela 5.4 – Resultados do teste de tensão ao cisalhamento simples na ligação para a Casa de Papelão. Fonte: McQuaid, 2003, p.77.

Corpo-de-prova	J-1	J-2	J-3	J-4	J-5
Carregamento máximo (kgf)	4625	4395	4500	4865	4865
	Média = 4650				
Carregamento para 2mm de deslocamento (kgf)	1611	1424	1561	1483	1786
	Média = 1573				
Teor de umidade do tubo de papelão (%)	9,5	9,4	9,1	8,8	9,3
	Média = 9,2				

A tensão ao cisalhamento simples foi de 57 MPa por parafuso.

5.1.3. Ensaio realizados para o Domus de Papelão

Para este projeto, o Colégio Politécnico de Chiba, em 1997, realizou ensaios de resistência à flexão e à compressão com diferentes teores de umidade nos tubos, e determinou a resistência das ligações através de testes de resistência ao cisalhamento e à flexão.

Os tubos testados foram fabricados precisamente para terem alta resistência. Assim, foram feitos nos diâmetros interno/externo de 250/280 mm, 15 mm de espessura, de papel reciclado, enrolado a 74,5° com espaçamento de 2 mm, usando compósito de polivinil como cola, que representa cerca de 7 a 10% do peso total do tubo. A tabela 5.5 revela alguns dados sobre o papel kraft usado na confecção dos tubos. (McQUAID, 2003).

Tabela 5.5 – Propriedades mecânicas do papel kraft usado na confecção dos tubos para o Domus de papelão. Fonte: McQuaid, 2003, p.77.

Itens		Resultados	Método de ensaio
Massa/área (g/m ²)		521	JIS P 8124-1976
Espessura (mm)		0,728	JIS P 8118-1976
Densidade (g/cm ³)		0,72	
Teor de umidade (%)		6,6	JIS P 8127-1979
Resistência à tração (MPa)	MD*	87,28	JIS P 8113-1976
	CD**	24,81	
Resistência à compressão (MPa)	MD*	22,75	JIS P 8126-1987
	CD**	13,93	
Módulo Young (GPa)	MD*	7-8	JIS P 8113-1998
	CD**	2-2,5	

* No sentido longitudinal da amostra

** No sentido transversal da amostra

5.1.3.1. Ensaio de resistência à compressão

Testou-se cinco corpos-de-prova de 600 mm de comprimento, diâmetros externo/interno de 280/250 mm e 15 mm de espessura. Devido ao grande diâmetro e espessura das peças, estas não puderam ser cortadas perfeitamente. Assim, para retificar as superfícies cortadas nas pontas dos tubos, aplicou-se adesivo epóxi e uma placa metálica em cada ponta – figuras 5.9 e 5.10.

Figuras 5.9 e 5.10 – 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.

De acordo com McQuaid (2003), os procedimentos seguidos foram os mesmos dos ensaios para a Casa de Papelão; e a velocidade de carregamento da máquina foi de 0,01 MPa/s.

A resposta ao carregamento dos tubos para este ensaio apresentou a mesma deformação obtida no ensaio para a Casa de Papelão. No entanto, dessa vez o uso do adesivo epóxi e da capa metálica minimizou os danos nas bordas.

O coeficiente de Poisson e o módulo Young, calculados a partir da relação tensão-deformação, são apresentados na tabela 5.6.

Tabela 5.6 – 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/cm³)

A resistência à compressão foi de 9,74 MPa.

5.1.3.2. Ensaio de resistência à flexão

Para este ensaio, os cinco tubos tinham 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 5.11).

Figura 5.11 – Desenho esquemático do ensaio de resistência à flexão realizado para o Domus de papelão. Medidas em mm. Fonte: McQuaid, 2003, p.78.

As flechas foram medidas nos dois pontos de carregamento e no centro do vão. (McQUAID, 2003).

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

A tabela 5.7 mostra os resultados do ensaio.

Tabela 5.7 – 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_r^*	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_r^* = resistência à flexão para um deslocamento = 36 mm (MPa)

E = Módulo Young (GPa)

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

Os valores do módulo Young foram semelhantes ao do teste de resistência à compressão.

A resistência à flexão, neste caso, foi 1,53 vezes maior que a resistência à compressão.

5.1.3.3. Ensaio de resistência à compressão para diferentes teores de umidade

Neste ensaio foram testados quarenta e cinco corpos-de-prova de 259 mm de comprimento, 95 mm de diâmetro externo, 85 mm de diâmetro interno e 5 mm de espessura. Esses tubos foram fabricados da mesma forma que os utilizados no ensaio de resistência à compressão anterior; porém, o ângulo de enrolamento foi diferente, por terem sido confeccionados numa outra máquina. (McQUAID, 2003).

Os corpos-de-prova foram divididos em nove grupos, dos quais dois foram revestidos com uma resina impermeabilizante à base de uretano.

A resina foi diluída em tinner, na proporção 2,5:1 (resina:solvente). Em seguida, cada tubo teve suas bordas imersas nesta solução, garantindo um recobrimento de 15 mm, por apenas cinco minutos. Este procedimento foi feito para as duas extremidades do tubo. Além disso, as superfícies internas e externas dos tubos também foram revestidas com o agente, em duas demãos. Na primeira, a proporção da solução resina/diluyente foi a descrita acima. Na segunda, usou-se a proporção 10:1.

Após umidificados, os pesos dos tubos variaram conforme os teores de umidade. O teor de umidade nos dois grupos de corpos-de-prova impermeabilizados variou entre 0,2% e 19,2%.

A velocidade do carregamento do ensaio foi 0,01 MPa/s.

Os resultados são mostrados nas figuras 5.12 e 5.13. Contudo, é importante ressaltar que os valores do módulo Young são teóricos, pois foram resultantes da aplicação da Lei de Hooke para o deslocamento entre a mesa de ensaio e os corpos-de-prova.

Segundo McQuaid (2003), os deslocamentos tiveram a interferência do atrito gerado sobre as superfícies cortadas dos corpos-de-prova. Nestas condições, a tensão de compressão e o módulo Young decresceram em

proporção inversa ao teor de umidade. Assim, esses decréscimos ocorreram de forma gradativa até o teor de umidade atingir 7% e subitamente entre 7% e 13% de umidade.

Figura 5.12 – Relação entre resistência à compressão e teor de umidade, para o Domus de Papelão. Fonte: McQuaid, 2003, p.79.

Figura 5.13 – Relação entre o módulo de elasticidade e o teor de umidade, para o Domus de Papelão. Fonte: McQuaid, 2003, p.79.

5.1.3.4. Ensaio de resistência ao cisalhamento na ligação

No projeto do Domus de Papelão, os esforços solicitantes de compressão aplicados na estrutura são suportados pela resistência à compressão dos tubos e pelo adesivo epóxi usado para solidarizar as juntas de madeira. Os esforços de tração aplicados na estrutura são suportados pela resistência à tração dos parafusos na ligação papelão-madeira. Tais fatos justificaram a necessidade de ensaiar as ligações existentes.

Os corpos-de-prova eram constituídos de um tubo de papelão, 20 mm de espessura, com uma junta de madeira inserida em uma de suas extremidades e fixada com parafusos (figura 5.14). Foram feitos cinco corpos-de-prova do tipo J-2, com oito parafusos ($M12$, $l = 75$ mm) e cinco corpos-de-prova do tipo J-3, com doze parafusos ($M12$, $l = 12$ mm).

Figura 5.14 – Desenho esquemático do ensaio de resistência ao cisalhamento na ligação para o Domus de papelão. Medidas em mm. Fonte: McQuaid, 2003, p. 79.

A seção transversal de cada tubo foi banhada em adesivo epóxi e capeada. A junta cilíndrica de madeira foi introduzida no tubo, mantendo-se 30 mm para fora. A superfície dessa porção exposta da junta tornou-se o plano de compressão na base. (McQUAID, 2003).

Sobre o plano capeado aplicou-se a força, cuja ação foi transferida para as juntas cilíndricas através dos parafusos, sujeitando-os ao esforço de cisalhamento. O deslocamento causado foi medido entre a borda inferior do

tubo e a mesa do ensaio, significando o deslocamento relativo (δ) dos parafusos, provocado pelo cisalhamento.

A velocidade de carregamento foi de 200-300 kgf/min para os modelos do tipo J-2 e 300-450 kgf/min para os do tipo J-3.

Na tabela 5.8, vê-se os deslocamentos relativos (δ) dos modelos tipo J-2 em $P = 1530$ kgf, $P = 6120$ kgf e $P = 8568$ kgf. As ligações do tipo J-3 apresentaram o mesmo deslocamento relativo às do tipo J-2 quando submetidas a esforços de compressão 1,5 vez maior. Assim, os deslocamentos relativos do tipo J-2 em $P = 6120$ kgf e do tipo J-3 em $P = 9180$ kgf são similares.

Tabela 5.8 – Resultados do teste de resistência ao cisalhamento na ligação, para o Domus de papelão. Fonte: McQuaid, 2003, p.79.

Corpo-de-prova	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Fmax/nkgf /parafuso(n=8)	Teor de umidade (%)	Deslocamento relativo (mm)		
					F=1530kgf	F=6120kgf	F=8568kgf
J2-1	289,95	249,85	1396	10,40	0,195	2,115	4,2275
J2-2	289,75	249,80	1327	10,18	0,1975	2,4475	4,8725
J2-3	289,85	250,10	1344	10,31	0,4175	3,235	6,6825
J2-4	290,03	249,93	1321	10,51	0,4038	2,985	5,7175
J2-5	289,88	250,03	1556	10,55	0,16	1,83	3,985
Médias	-	-	1389	10,39	0,2748	2,5225	5,097
Corpo-de-prova	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Fmax/nkgf /parafuso(n=12)	Teor de umidade (%)	Deslocamento relativo (mm)		
					F=2244kgf	F=9180kgf	F=12852kgf
J3-1	290,23	250,13	1267	10,23	0,2713	2,7613	7,0925
J3-2	289,83	249,88	1210	10,21	0,3288	3,41	7,315
J3-3	289,85	250,00	1247	10,07	0,2438	2,6038*	5,935**
J3-4	290,08	250,03	1261	10,47	0,265	2,405	4,8788
J3-5	289,98	250,20	1231	10,40	0,2638	2,18	4,7825
Médias	-	-	1243	10,28	0,2745	2,672	6,0008

*Deslocamento para F=9177 kgf

**Deslocamento para F=12845 kgf

Os modelos J2-3, J2-4 e J3-2 apresentaram deslocamentos relativos comparativamente grandes. Provavelmente, isso foi em decorrência de parafusos apertados com forças diferentes, o que gerou variações na força de atrito entre o tubo de papelão e a junta de madeira.

A resistência ao cisalhamento na ligação foi de 2140 kgf por parafuso.

5.1.3.5. Ensaio de resistência à flexão na ligação

Os corpos-de-prova para este ensaio foram feitos com tubos de papelão de 290 mm de diâmetro externo, 250 mm de diâmetro interno e 20 mm de espessura. Estes tubos receberam uma junta cilíndrica de madeira de 249 mm de diâmetro e 150 mm de profundidade (figura 5.15). A fixação entre essas duas peças foi feita com adesivo epóxi e vinte parafusos (M12, $l = 5$ mm).

Figura 5.15 – Desenho esquemático do ensaio de resistência à flexão na ligação para o Domus de papelão. Medidas em mm. Fonte: McQuaid, 2003, p. 79.

Conforme McQuaid (2003), foram feitos dois corpos-de-prova do tipo BJ4, com os parafusos fixados no local de máxima força de flexão, e dois corpos-de-prova do tipo BJ5, com os parafusos fixados no local da linha neutra dos tubos, totalizando quatro corpos-de-prova.

O vão existente era de 2450 mm, em cujo centro foi aplicada uma carga, à velocidade de carregamento abaixo de 64 kgf/min. Mediu-se, então, as flechas nos pontos de carregamento (d_5 , d_6) e nos pontos de suporte (d_1 , d_2 , d_3 , d_4) e os deslocamentos relativos (d_7 , d_8) entre a face tracionada do tubo e um bloco de madeira tido como referência.

A tabela 5.9 mostra a resistência à flexão dos corpos-de-prova e as figuras 5.16 e 5.17 mostram as relações carregamento-deslocamento.

Tabela 5.9 – Resultados do teste de resistência à flexão na ligação para o Domus de Papelão.
Fonte: McQuaid, 2003, p.80.

Corpo-de-prova	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Fmax (kgf)	Teor de umidade (%)
BJ4-1	289,78	249,66	2873	10,47
BJ4-2	290,13	249,79	2776	10,50
BJ5-1	289,99	249,96	2868	10,45
BJ5-2	290,20	249,91	2841	10,31
Médias	-	-	2840	10,43

Nas figuras 5.16 e 5.17 observa-se, em negrito, o deslocamento no vão central obtido após a subtração das deformações nos pontos de suporte. Acompanhando a linha do gráfico, percebe-se próximo ao carregamento de 2400 kgf uma alteração na tendência da curva carregamento-deslocamento relativo ($d_7 + d_8$), causada pelo esforço de cisalhamento nos parafusos do lado tensionado do modelo.

$$1 - (d_7 + d_8)/2$$

$$2 - (d_5 + d_6)/2 - (d_1 + d_2 + d_3 + d_4)/4$$

Figura 5.16 – Relação carregamento-deslocamento para a ligação do tipo BJ4, para o Domus de Papelão. Fonte: McQuaid, 2003, p.80.

$$1 - (d_7 + d_8)/2$$

$$2 - (d_5 + d_6)/2 - (d_1 + d_2 + d_3 + d_4)/4$$

Figura 5.17 – Relação carregamento-deslocamento para a ligação do tipo BJ5, para o Domus de Papelão. Fonte: McQuaid, 2003, p.80.

A resistência à flexão das ligações dos tipos BJ4 e BJ5 foi de 1610 kgf.m. (McQUAID, 2003).

5.1.4. Ensaio realizados para o Pavilhão Japonês na Expo 2000

Como a construção seria realizada na Alemanha, os ensaios foram feitos pela Universidade de Dortmund.

O pavilhão seria uma estrutura em arco, no qual seu principal carregamento seria o seu próprio peso, que adicionado ao peso da neve geraria predominantemente esforços de compressão. (McQUAID, 2003).

O tubo de papelão especificado para esta obra foi o Durolene de 120mm de diâmetro externo, 76 mm de diâmetro interno e 22 mm de espessura, utilizando cola PVA (classe de resistência D2, segundo a Norma Alemã DIN EN 204).

5.1.4.1. Ensaio de resistência à compressão

Cinco corpos-de-prova com comprimento de 240 mm e 22 mm de espessura foram ensaiados.

O carregamento foi aplicado numa velocidade de 0,05 MPa/s. Extensômetros especiais (DDI) mediram o módulo de elasticidade e as alterações na distância entre dois pontos de leitura, que era inicialmente de 100 mm. (McQUAID, 2003).

Os corpos-de-prova sofreram deformações e empenamento – figura 5.18. A resistência à compressão foi 9,53 MPa e o módulo Young foi 1,6 GPa, conforme a tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Resultados do teste de resistência à compressão para o Pavilhão Japonês.

Fonte: McQuaid, 2003, p.84.

Corpos-de-prova	Deformação (‰)	f_c (MPa)	E (GPa)	Evolução de E (GPa)		f_c max (MPa)	Evolução de f_c (MPa)	
							Carga inicial	9,53
00	2,40	4,03	1,550	Carga inicial	1,570	9,46	Desvio padrão	0,15
01	2,37	4,00	1,560	Desvio padrão	0,021	9,60	Alívio de 5%	9,01
02	2,30	3,99	1,610			9,76		
03	2,35	3,98	1,570	Mínimo	1,550	9,41	Mínimo	9,40
04	2,34	3,99	1,580	Máximo	1,610	9,40	Máximo	9,76

Figura 5.18 – Deformação do corpo-de-prova devido à compressão na seção transversal, no ensaio realizado para o Pavilhão Japonês. Fonte: McQuaid, 2003, p.84.

5.1.4.2. Ensaio de resistência à flexão

Com os mesmos diâmetros e espessura, os cinco corpos-de-prova usados para este ensaio tinham 2000 mm de comprimento.

Os prismas-suporte e os prismas de aplicação de carga foram fabricados de madeira, com o intuito de diminuir as deformações locais sobre a amostra. (McQUAID, 2003).

A ruptura global dos corpos-de-prova foi precedida de uma ruptura local na área comprimida, que levou à ruptura repentina na área tracionada. Registrou-se a carga e a deflexão da máquina de teste, além da deflexão no meio da seção transversal. A deflexão da máquina foi semelhante à deflexão devido ao carregamento aplicado. Os resultados estão na tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Resultados do teste de resistência à flexão para o Pavilhão Japonês.

Fonte: McQuaid, 2003, p.85.

Corpos-de-prova	Deflexão (mm)	Força (kgf)	E (GPa)	Evolução de E (GPa)		f _c máxima (MPa)	Evolução de f _c (MPa)	
							Carga inicial	14,52
00	12,69	664	1,430	Carga inicial	1,460	14,35	Desvio padrão	0,2
01	12,23	664	1,480	Desvio padrão	0,029	14,34	Alívio de 5%	13,84
02	12,27	666	1,480			14,70		
03	12,59	664	1,440	Mínimo	1,430	14,45	Mínimo	14,34
04	12,14	663	1,490	Máximo	1,490	14,76	Máximo	14,76

A resistência à flexão foi 1,52 vez maior que a resistência à compressão.

5.1.4.3. Simulação do ensaio de resistência à compressão, após a montagem

O objetivo deste ensaio foi identificar algum dano decorrente do processo de montagem, por causa das forças de flexão geradas. Para isso, usou-se quatro corpos-de-prova de 1000 mm de comprimento, 22 mm de espessura, possibilitando um vão de 1 m. (McQUAID, 2003).

Foi aplicada uma força de modo a gerar uma deformação no corpo-de-prova, cuja grandeza foi determinada com base nos ensaios anteriores. Primeiramente, aplicou-se uma força para moldar os tubos numa curvatura de

30 m; 48h após, forçou-se a curvatura para 8m de raio; finalmente, aliviou-se a estrutura obtendo-se um raio de 10 m, que era o raio mínimo previsto em projeto.

Nesta configuração, foram elaborados ensaios para verificar o estado de tensão dos tubos, conseguindo-se resultados similares aos ensaios de resistência à compressão da seção transversal.

Conforme McQuaid (2003), não foram detectados deformações residuais nos tubos³³. A tensão máxima decorrente da curvatura foi de 2,25 MPa. Os resultados estão na tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Resultados dos testes de resistência à compressão após a simulação de montagem, para o Pavilhão Japonês. Fonte: McQuaid, 2003, p.86.

Corpos-de-prova	Deformação (‰)	f _c (MPa)	E (GPa)	Evolução de E (GPa)		f _c máxima (MPa)	Evolução de f _c (MPa)	
031	2,38	3,47	1,460	Carga inicial	1,470	9,23	Carga inicial	9,56
032	2,32	2,47	1,500	Desvio padrão	0,037	9,32	Desvio padrão	0,28
033	2,33	3,46	1,490			9,46		
041	2,33	3,47	1,490			10,18	Alívio de 5%	8,61
042	2,47	3,47	1,410	Mínimo	1,340	9,39	Mínimo	9,23
043	2,28	3,49	1,530	Máximo	1,530	9,57	Máximo	10,18
051	2,29	3,49	1,520			9,91		
052	2,60	3,47	1,340			9,57		
053	2,38	3,46	1,460			9,45		

5.1.4.4. Ensaio de resistência à torção

Os testes foram realizados no sentido do enrolamento do papel kraft e no sentido oposto, usando seis tubos de 1500 mm e 22 mm de espessura.

Os tubos foram ligados a peças cilíndricas de madeira e colocados no torno mecânico, mantendo-se uma distância de 1,35 m entre o suporte de fixação e o ponto de aplicação da carga. A carga foi aplicada por uma alavanca com 1 m de comprimento e a deformação ocorreu na distância de 1,20 m, com relação ao suporte de fixação. (McQUAID, 2003).

³³ A deformação residual é aquela que permanece no corpo-de-prova mesmo após o descarregamento. Ocorre quando o elemento ensaiado ultrapassa o regime elástico e atinge o regime plástico, ou seja, quando o corpo-de-prova perde a capacidade elástica de voltar ao estado em que se encontrava antes do carregamento.

Como resultado, o módulo de elasticidade transversal (G)³⁴ no sentido do enrolamento foi de 0,143 GPa e no sentido oposto foi de 0,184 GPa, vide tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Resultados do teste de resistência à torção para o Pavilhão Japonês.
Fonte: McQuaid, 2003, p.86.

a) no sentido do enrolamento			
corpos-de-prova	G (GPa)	Carga inicial	0,140
		Desvio padrão	0,012
00	0,156		
01	0,131	Mínimo	0,131
02	0,141	Máximo	0,156
b) no sentido oposto ao enrolamento			
corpos-de-prova	G (GPa)	Carga inicial	0,180
		Desvio padrão	0,009
00	0,169		
01	0,188	Mínimo	0,169
02	0,177	Máximo	0,188

5.1.4.5. Teste de aplicabilidade de revestimento impermeável nos tubos

Para testar o efeito gerado por um revestimento à prova d'água nos tubos de papelão, alguns corpos-de-prova foram revestidos com duas camadas de tinta acrílica. As bordas foram cobertas com Perspex e silicone. Em seguida, os corpos-de-prova foram expostos ao tempo por 7 dias, conforme o EOTA, um guia para aprovação técnica europeia de sistemas de revestimento externo compostos de isolamento térmico. (McQUAID, 2003).

A média de chuva por ano, 645 l/m², foi aplicada nos corpos-de-prova diariamente, durante o período. Os corpos-de-prova ficaram sujeitos às seguintes condições diárias:

- 1º ao 5º dias: 3 horas a 70°C e 15% de umidade relativa, 1 hora de chuva;
- 6º e 7º dias: 2 horas a 15°C e 15% de umidade relativa, ciclos de gelo/degelo sem chuva a 50°C e -20°C.

³⁴ Uma barra de seção transversal circular carregada sob um esforço de torção pura, conseqüentemente sofre um esforço de cisalhamento puro e gera um ângulo de distorção. Assim, o módulo de elasticidade transversal (G) é a razão entre a tensão aplicada e o ângulo formado.

Em seguida, para verificar a eficiência da impermeabilização feita nos tubos, vinte corpos-de-prova de 240 mm de comprimento passaram pelo teste de resistência à compressão e cinco corpos-de-prova de 1000 mm de comprimento passaram pelo teste de resistência à flexão. Os resultados são apresentados nas tabelas 5.14 e 5.15.

Tabela 5.14 – Resultados do teste de resistência à compressão após exposição ao tempo, com umidade de 9,6%, para o Pavilhão Japonês. Fonte: McQuaid, 2003, p.86.

Ensaio	Def. (‰)	f _c (MPa)	E (GPa)	Ensaio	Def. (‰)	f _c (MPa)	E (GPa)	Evolução de E (N/mm ²)		f _c máx. (MPa)	f _c max. (MPa)	Evolução de f _c (MPa)	
11	2.55	3.70	1,452	33	2.46	3.70	1,504	Carga inicial	1,440	8.93	9.06	Carga inicial	8.70
12	2.60	3.73	1,435	34	2.66	3.73	1,406	Desvio padrão	0,055	8.75	8.63	Desvio padrão	0.19
13	2.60	3.72	1,435	41	2.52	3.70	1,471	Mínimo	1,359	8.67	8.98	Alívio de 5%	8.30
14	2.68	3.72	1,389	42	2.68	3.71	1,386	Máximo	1,561	8.67	8.65	Mínimo	8.39
21	2.38	3.71	1,561	43	2.53	3.75	1,486			8.76	8.95	Máximo	9.06
22	2.74	3.72	1,359	44	2.63	3.72	1,416			8.55	8.67		
23	2.62	3.73	1,427	51	2.65	3.74	1,411			8.59	8.70		
24	2.71	3.70	1,366	52	2.67	3.70	1,387			8.39	8.42		
31	2.43	3.73	1,540	53	2.52	3.71	1,474			8.89	9.01		
32	2.51	3.70	1,476	54	2.55	3.69	1,450			8.64	8.55		

Tabela 5.15 – Resultados do teste de resistência à flexão após exposição ao tempo, com umidade de 9,2%, para o Pavilhão Japonês. Fonte: McQuaid, 2003, p.87.

CP	Deflexão (mm)	f _r (MPa)	E (GPa)	Evolução de E (GPa)		f _r máx. (MPa)	Evolução de f _r (MPa)	
							Carga inicial	15,67
01	5,02	4,34	1,800	Carga inicial	1,780	15,64	Desvio padrão	0,2
02	5,16	4,45	1,800	Desvio padrão	0,025	15,79		
03	5,14	4,34	1,760	Mínimo	1,740	15,57	Alívio de 5%	15,01
04	5,10	4,27	1,740	Máximo	1,800	15,98	Mínimo	15,47
05	5,18	4,45	1,790			15,47	Máximo	15,98

5.1.4.6. Desempenho de proteção ao fogo da membrana de papel

Este ensaio foi feito pela Universidade Técnica Braunschweig, Alemanha, em julho de 1999.

Seu objetivo foi determinar o desempenho de proteção ao fogo da membrana de papel, produzida especialmente para ser a cobertura principal da estrutura de papelão, e conseguir aprovação obedecendo ao padrão de

inflamabilidade B2, conforme a norma DIN 4102 part1-6.2, de maio de 1998, para membranas de papel tipo C. (McQUAID, 2003).

A membrana era composta de cinco camadas sobrepostas: a primeira de filme incombustível, a segunda de papel 'OK Cosmo', a terceira de tecido de fibra de vidro, e as duas últimas iguais a segunda e primeira, respectivamente.

A espessura total da membrana era cerca de 0,56 mm e seu peso 0,54kg/m².

Dessa forma, cinco corpos-de-prova de 90 mm de largura x 190 mm de altura foram necessários para este teste, sendo acondicionados de acordo com a norma DIN 500 14-23/50-2 nas duas últimas semanas antes do ensaio.

O teste foi realizado de acordo com a norma DIN 4102-parte1-6.2.5. Assim, a sala de teste foi mantida a 20°C. Os corpos-de-prova foram posicionados nos equipamentos de teste e possuíam uma marcação feita 150 mm acima do seu limite inferior.

Foram feitas cinco aplicações, de 20 segundos cada, de uma chama no limite inferior do corpo-de-prova, no centro de sua largura e espessura. Posteriormente, a chama foi afastada. Marcou-se o tempo que o fogo levou para se propagar e alcançar a marca feita ou apagar.

A membrana seria aprovada se, para algum dos corpos-de-prova testados, a chama não alcançasse a marca antes de 20 segundos após a sua aplicação.

Segundo McQuaid (2003), este ensaio também analisou a ocorrência de fusão do material, quando exposto à chama. Dessa forma, após os 20 segundos de exposição ao fogo, a membrana de papel não poderia continuar em chamas por mais de 2 segundos, nem apresentar fragmentos destacados.

Todos os corpos-de-prova foram aprovados, conforme indica a tabela 5.16. Por conseguinte, o material foi classificado, por norma, como inflamável da classe B2, obtendo a seguinte qualificação: DIN 4102-B2.

Tabela 5.16 – Resultados do teste de resistência à combustão da membrana, para o Pavilhão Japonês. Fonte: McQuaid, 2003, p.87.

Corpo de prova	1	2	3	4	5
Tempo inicial de ignição (s)	1	1	1	1	1
Tempo para o fogo alcançar a marca feita (s)	-	-	-	-	-
Tempo para a chama se extinguir (s)	-	-	-	-	-
Altura máxima da chama (cm)	11	12	12	12	11
Duração da combustão sem chama (s)	-	-	-	-	-
Tempo para extinção da chama (s)	30	30	25	25	30
Liberação de fumaça	Moderada em todos os ensaios				
Ocorrência de fusão e destacamento	-	-	-	-	-

5.2. Ensaios técnicos realizados por este trabalho

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

A relação dos ensaios realizados neste trabalho foi definida levando-se em consideração os materiais e equipamentos disponíveis, as ações sobre os elementos construtivos nos diversos tipos de sistemas construtivos e os ensaios realizados por Shigeru Ban.

Assim, os ensaios realizados para este trabalho foram: ensaio de absorção de umidade, ensaio de resistência à compressão, ensaio de flambagem e ensaio de resistência à flexão.

Com relação à parte prática, um dos problemas encontrados para se realizar ensaios técnicos em tubos de papelão como elementos construtivos no Brasil é a ausência de normas técnicas; o que requer adaptações de procedimentos.

Dessa forma, para a realização destes ensaios, buscou-se utilizar as normas técnicas mais pertinentes, fazendo-se pequenas adaptações quando necessário.

Os ensaios realizados pelo arquiteto japonês Shigeru Ban, vide 5.1, também serviram como referência.

Quanto aos tubos usados como corpos-de-prova, estes foram fabricados com papel kraft do tipo W4³⁵, pelo processo descrito no item 2.3. Conforme a figura 5.19, com exceção dos tubos utilizados no ensaio de absorção de umidade, todos os outros estavam secos, anteriormente armazenados em local arejado, fresco, cobertos por um plástico, sem verniz ou qualquer outro tipo de tratamento.

Nos ensaios de resistência à compressão, resistência à flexão e flambagem foram ensaiados corpos-de-prova de três espessuras diferentes, sendo 04 mm, 11 mm e 20 mm. Todos possuíam 150 mm de diâmetro interno.

Figura 5.19 – Tubos de papelão armazenados antes dos ensaios.
Fonte: Foto da autora.

³⁵ O papel kraft W4 é o usado mais comumente na fabricação de tubos de papelão. Esta é uma classificação reconhecida internacionalmente que varia de W1 a W7, para os papéis de pior a melhor qualidade, respectivamente. A qualidade do papel, neste caso, está associada a sua resistência à delaminação. Assim, o ensaio feito para classificar um determinado papel é o Ensaio de delaminação de papel pelo plano inclinado em graus. (LACERDA, 2006).

5.2.1. Ensaio de absorção de umidade

Objetivo

O intuito deste ensaio foi identificar e comparar a absorção de umidade por tubos de papelão revestidos com diferentes tipos de vernizes e tubos sem revestimento.

Corpos-de-prova

Foram ensaiados quatro corpos-de-prova de 150 mm de diâmetro interno, 110 mm de altura e 11 mm de espessura; conforme a NBR 14257:1998.

Materiais e equipamentos

Foram utilizados três tipos de vernizes comerciais: verniz copal, verniz com filtro solar e verniz marítimo, todos da marca Suvinil, e aguarrás para diluí-los.

Usou-se pincel, bandeja e um pedaço de plástico; além de uma balança, uma estufa com capacidade para atingir 105°C, e uma câmara úmida que mantivesse 90% de umidade internamente.

Procedimentos do ensaio

Inicialmente, buscou-se aferir o percentual de umidade que os corpos-de-prova possuíam na condição de armazenamento.

Conforme ZELEPEL (2005b), os tubos de papelão continham 9,5% de umidade após o processo de fabricação.

Desde o recebimento até os ensaios, os tubos ficaram armazenados em local fresco, arejado, à temperatura ambiente e na sombra, cobertos por um plástico.

Dessa forma, foram realizados procedimentos para verificar se o conteúdo de umidade incorporado pelos corpos-de-prova variou durante o período de armazenamento. Assim, estes foram acondicionados numa estufa, sob temperatura constante de 105°C, até atingirem massa constante, conforme NBR 14257:1998.

A massa dos corpos-de-prova encontrou-se constante após 48 h, revelando que estes possuíam 9,2% de umidade incorporada.

Em seguida, objetivando proximidade aos procedimentos de impermeabilização dos tubos numa obra, os corpos-de-prova foram novamente mantidos à temperatura e umidade ambientes até entrarem em equilíbrio, apresentando novamente massa constante.

Isso aconteceu 06 dias após. Porém, os corpos-de-prova estabilizaram a um índice de 8,5% de umidade incorporada.

Com o intuito de identificar eficiências diferentes para o material em estudo, foram escolhidos três tipos de vernizes para madeira, indicados para ambientes externos: verniz copal, verniz com filtro solar e verniz marítimo, todos da marca Suvinil. Cada corpo-de-prova foi revestido com um tipo de verniz, em duas demãos, e um deles foi testado sem o revestimento.

Com referência ao ensaio de absorção de umidade realizado por Shigeru Ban (McQUAID, 2003), e para a finalidade deste ensaio, o processo de impermeabilização dos tubos constou em mergulhar cada borda dos corpos-de-prova no verniz diluído em aguarrás conforme a especificação do fabricante (10% do solvente para o verniz marítimo, 10 a 15% para o verniz com filtro solar e 20 a 30% para o verniz copal), e mantê-la imersa por 05 minutos a uma profundidade de 0,5 cm. As paredes interna e externa dos tubos foram banhadas por alguns segundos na mesma solução. A segunda demão foi dada após 12 horas, repetindo todo este procedimento.

Após a secagem total dos vernizes, mais 24 horas, feita de forma natural, em ambiente sombreado, fresco e arejado, os corpos-de-prova foram novamente pesados e acondicionados em câmara úmida, a 90% de umidade relativa, pelo período de 07 dias. Assim, a cada 24 horas suas massas foram aferidas e calculou-se a absorção de umidade de cada um deles – figura 5.20.

Figura 5.20 – Corpo-de-prova com revestimento impermeabilizante sendo pesado.
Fonte: Foto da autora.

Resultados

Os resultados do ensaio são apresentados na tabela 5.17 e na figura 5.21:

Tabela 5.17 – Resultados do ensaio de absorção de umidade.

CPs	Absorção de Umidade (%)						
	Dias						
	1	2	3	4	5	6	7
A	18,5	47,7	60,6	77,3	85,1	87,8	88,8
B	8,7	35,7	41,2	49,2	52,9	57,0	60,7
C	21,2	35,1	54,1	81,5	85,8	88,2	89,0
D	82,8	111,5	115,2	116,9	118,8	119,6	119,7

Sendo,

A corpo-de-prova revestido com verniz marítimo;

B corpo-de-prova revestido com verniz com filtro solar;

C corpo-de-prova revestido com verniz copal;

D corpo-de-prova não revestido.

Figura 5.21 - Resultados do ensaio de absorção de umidade.
Fonte: Gráfico da autora.

Observação visual/táctil após o ensaio

Quanto ao aspecto dos corpos-de-prova, todos eles apresentaram manchas de umidade e tiveram a sua espessura aumentada, devido ao inchamento. Os corpos-de-prova também apresentaram um aspecto amolecido, com as camadas interna e externa de papel Kraft suscetíveis a esfarelamento e os topos bastante suscetíveis a amassamento.

A figura 5.22 mostra como os corpos-de-prova se encontravam no terceiro dia de ensaio.

Figura 5.22 – Corpos-de-prova A, B, C e D, respectivamente, após 72 horas na câmara úmida.
Fonte: Foto da autora.

5.2.2. Ensaio de resistência à compressão

Objetivo

O objetivo deste experimento foi determinar a resistência à compressão de tubos de papelão secos e sem revestimento, com o intuito de se conhecer sua resistência máxima à compressão axial simples.

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.

Como não existe uma norma específica para este ensaio, 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 o ensaio de resistência à compressão.

Seguindo este princípio, adotou-se para os tubos de papelão uma altura equivalente ao dobro de seu diâmetro externo.

Dessa maneira, os corpos-de-prova tiveram as seguintes dimensões: 316 x 158 mm, 344 x 172 mm, e 380 x 190 mm; sendo estes valores para altura e diâmetro externo, respectivamente.

Os corpos-de-prova continham um teor de umidade em torno de 9%.

Materiais e equipamentos

Para este ensaio foi utilizada uma prensa dotada de uma célula de carga com capacidade para 30 toneladas. Ligado a este equipamento, havia um sistema de aquisição de dados.

Também foram utilizados paquímetros digital e analógico, escalas e um transferidor.

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 escalas.

Após serem dispostos no equipamento de ensaio, 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. Considerou-se que, através desta velocidade, a carga seria aplicada de forma bem lenta, não comprometendo o ensaio.

Figura 5.23 – Corpo-de-prova durante o ensaio de resistência à compressão.
Fonte: Foto da autora.

Dessa forma, aplicou-se carga até que os corpos-de-prova perdessem sua resistência (figura 5.23). Através do sistema de aquisição de dados, pode-se obter a carga máxima resistida para cada corpo-de-prova.

Com um transferidor, pode-se aferir o ângulo de rotação que os corpos-de-prova apresentaram após a compressão.

Resultados

Os resultados do ensaio podem ser conferidos na tabela 5.18 e na figura 5.24:

Tabela 5.18 – Resultados do ensaio de resistência à compressão.

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;

Φ_i o diâmetro interno;

S_L a área líquida da seção;

S_B a área bruta da seção;

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

$f_{cm\acute{a}x}^*$ o módulo de resistência à compressão;

$f_{cm\acute{a}x}^{**}$ a tensão máxima de compressão resistida³⁶.

³⁶ Para se calcular a tensão máxima de compressão resistida, $f_{cm\acute{a}x}^{**}$, 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, $f_{cm\acute{a}x}^*$, considerando para este cálculo apenas a área líquida da seção transversal.

Figura 5.24 – Gráfico do ensaio de resistência à compressão.
Fonte: Gráfico gerado pelo programa de aquisição de dados.

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 5.25 e 5.26).

Figura 5.25 – Corpo-de-prova sofrendo esmagamento durante o ensaio de resistência à compressão. Fonte: Foto da autora.

5.26 – Ondulações formadas no corpo-de-prova após o ensaio de resistência à compressão.
Fonte: Foto da autora.

5.2.3. Ensaio de flambagem

Objetivo

Inicialmente, o objetivo deste ensaio era comprimir tubos de papelão medianamente esbeltos e esbeltos, para se identificar com quais cargas estes sofreriam flambagem.

No entanto, como os parâmetros de índice de esbeltez³⁷ 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.

Corpos-de-prova

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,

³⁷ O índice de esbeltez é a relação entre o comprimento da peça e o seu raio de giração, e mede o quão 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.

adotou-se uma medida possível e usual de pé-direito, sendo 2500 mm. Foram ensaiados três corpos-de-prova de cada espessura.

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 Transdutech³⁸ (figuras 5.27 e 5.28).

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

Figura 5.27 – Bomba eletro-hidráulica utilizada no ensaio de flambagem.
Fonte: Foto da autora.

Figura 5.28 – Equipamento Transdutech utilizado no ensaio de flambagem.
Fonte: Foto da autora.

³⁸ A leitura das cargas foi feita através do Transdutech, 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.

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 topos.

Os procedimentos do ensaio podem ser observados através das figuras de 5.29 a 5.34.

Figuras 5.29 e 5.30 – Corpo-de-prova antes da aplicação de carga e após o início da flecha.
Fonte: Fotos da autora.

Figuras 5.31 e 5.32 – Medição da flecha e enrugamento da extremidade do corpo-de-prova.
Fonte: Fotos da autora.

Figuras 5.33 e 5.34 – Tubo totalmente flambado e sem estabilidade e tubo rompendo com o acréscimo de carga. Fonte: Fotos da autora.

Resultados

Os resultados constam na tabela 5.19:

Tabela 5.19 – 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_{fts} a distância entre o ponto central da flecha formada e o topo superior do tubo.

A figura 5.35 mostra a relação entre carregamento e flecha observada durante o ensaio.

Figura 5.35 – Relação carregamento-flecha observada durante o ensaio de resistência à flexão.
Fonte: Figura da autora.

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 5.36).

Figura 5.36 – Corpo-de-prova rompido durante o ensaio de flambagem.
Fonte: Foto da autora.

5.2.4. Ensaio de resistência à flexão

Objetivo

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

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 5.20 mostra os comprimentos utilizados.

Tabela 5.20 – 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 peças.

Materiais e equipamentos

Foram usados os mesmos equipamentos utilizados no ensaio de resistência à compressão: 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 Transdutech.

Também foram usados paquímetros digital e analógico, trena e três deflectômetros.

Procedimentos do ensaio

Inicialmente, todos os corpos-de-prova foram aferidos quanto as suas dimensões (diâmetros interno e externo, espessura e comprimento), utilizando-se os paquímetros e a trena.

O método utilizado foi o Método dos Três Pontos (NBR14576:2000), esquematizado na figura 5.37.

Figura 5.37 – Desenho esquemático do ensaio de resistência à flexão pelo Método dos Três Pontos (NBR14576:2000). Fonte: Desenho da autora.

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.

Assim, cada peça foi disposta horizontalmente sobre dois prismas-suporte apoiados sobre duas bases de concreto. Cada prisma-suporte tinha 50 mm de largura.

Seguindo as recomendações da NBR14576:2000, a distância entre estes prismas foi o comprimento de ensaio; e estes foram dispostos simétricos e eqüidistantes com relação ao ponto central do mesmo.

No ponto central do comprimento de ensaio, diametralmente oposto aos prismas-suporte, foi posicionado o prisma de pressão, com 100 mm de largura, vide figura 5.38. Neste mesmo ponto, também foi posicionada a prensa.

Figura 5.38: Desenho esquemático dos prismas-suporte e de pressão. Medidas em m.
Fonte: Desenho da autora.

Todos os prismas foram confeccionados conforme as especificações da NBR14576:2000 – figura 5.39.

Figura 5.39 – Prismas-suporte e de pressão confeccionados conforme a NBR14576:2000.
Fonte: Foto da autora.

Assim que o corpo-de-prova foi devidamente colocado no equipamento de ensaio, três deflectômetros foram dispostos na peça; estando dois sobre o elemento a ser ensaiado (exatamente sobre os pontos de apoio) e um sob o tubo (exatamente sob o ponto a receber a carga), conforme as figuras 5.40 e 5.41. Esses aparelhos controlaram a deformação do corpo-de-prova.

Figuras 5.40 e 5.41 – Deflectômetros posicionados no corpo-de-prova.
Fonte: Foto da autora.

A figura 5.42 mostra um corpo-de-prova pronto para ser ensaiado.

Figura 5.42 – Corpo-de-prova preparado para o ensaio de resistência à flexão.
Fonte: Foto da autora.

Segundo a NBR14576:2000, a velocidade de carregamento deveria ser constante e equivalente a uma deformação de 50 mm/min a 65 mm/min; mas devido aos equipamentos utilizados, esta foi controlada manualmente por um técnico.

A carga foi aplicada no ponto central do comprimento de ensaio, sobre o prisma de pressão, até o elemento ensaiado perder a resistência (figuras 5.43 e 5.44). Neste momento, considerou-se a flecha máxima gerada.

Figura 5.43 – Corpo-de-prova durante o ensaio de resistência à flexão.
Fonte: Foto da autora.

Figura 5.44 – Corpo-de-prova fletido.
Fonte: Foto da autora.

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)	$f_{ma'x}$ (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;

$f_{ma'x}$ 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 apresentaram comportamento semelhante durante o ensaio.

A primeira observação foi que os corpos-de-prova cederam em seu segmento central, mas não tiveram suas extremidades erguidas, como era esperado. Isso ocorreu porque os tubos sofreram um pequeno amassamento em seus pontos de apoio, devido aos prismas-suporte.

A figura a seguir mostra a perda de contato entre o primeiro corpo-de-prova ensaiado e o deflectômetro, devido a isso.

Figura 5.45 – Perda de contato entre o corpo-de-prova e o deflectômetro.
Fonte: Foto da autora.

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 5.46).

Figura 5.46 – Corpo-de-prova recebendo carga superior ao seu limite de resistência.
Fonte: Foto da autora.

6 . D I S C U S S Ã O

6.1. Quanto às obras de Shigeru Ban

Pelo estudo das construções feitas por Shigeru Ban, percebeu-se que apesar do papel ser um material aparentemente fraco, a forma tubular agrega resistência e estabilidade aos tubos de papelão.

Estes tubos podem ser empregados num projeto com função estrutural e de vedação, concomitantemente, ou estarem associados a uma estrutura independente feita de um material convencional e constituírem apenas a vedação.

Uma característica observada é a versatilidade com que os elementos feitos de tubos de papelão podem ser utilizados.

Na composição de estruturas, podem gerar sistemas construtivos em arcos, treliças, painéis portantes ou tesouras. Como elementos de vedação, as peças podem ser:

- fixas ou móveis;
- isoladas (figura 6.1a);
- agrupadas, impossibilitando a passagem de luz, som e ar (figura 6.1b);
- intercaladas, permitindo passagem de luz e som, além de ventilação, mas ainda propiciando certa privacidade ao ambiente interno (figura 6.1c);
- paredes em dupla camada, para potencializar as características do material (figura 6.1d);

- intercaladas com pequenos tubetes de vinil, que permitem apenas a passagem de luz (figura 6.1e);
- de diâmetros diferentes (figura 6.1f);
- de alturas diferentes (figura 6.1g);
- com espaçamentos diferentes entre si.

Figura 6.1 – Diferentes formas de uso dos tubos de papelão.
Fonte: Figura da autora.

Os sistemas construtivos gerados por Shigeru Ban com tubos de papelão dispensam a execução de acabamento, compõem uma construção muito leve (dispensando uma fundação complexa), limpa e que não necessita de mão-de-obra experiente ou especializada. Por outro lado, exigem coberturas leves.

Os sistemas em arcos e treliças são muito semelhantes ao sistema tubular em aço, inclusive necessitando de contraventamentos e um sistema de ancoragem até a fundação, para suportar as cargas horizontais como, por exemplo, a ação do vento.

Em compensação, as tesouras feitas de tubos de papelão remetem ao sistema construtivo em madeira e os painéis portantes às alvenarias estruturais.

Os pontos de encaixe entre os elementos e os pontos de apoio, que concentram os esforços de cisalhamento, possuem peças de ligação. Essas peças podem ser feitas de vários materiais, como madeira, plástico, aço, ou até concreto e reforçam estes pontos, possibilitando uma certa movimentação aos elementos.

As várias possibilidades de usos deste material podem gerar diferentes tipos de efeitos, como curvas, feixes de luz, etc numa parede portante ou de vedação, numa divisória ou numa estrutura.

As paredes curvas revelam perfeitamente os efeitos plásticos e a beleza que este material pode proporcionar, além de permitirem maiores balanços e espaços arquitetônicos diferenciados.

A mobilidade é uma outra grande característica dessas construções, possibilitando que estas sejam desmontadas e montadas novamente em outro local; o que evita desperdícios e reduz a quantidade de resíduos gerados.

Quanto às questões de conforto ambiental, empiricamente observou-se duas qualidades deste material. A primeira é o bom desempenho térmico, uma vez que o tubo é oco e possibilita uma camada de ar entre os ambientes interno e externo. A segunda é o bom desempenho acústico, pois o material é absorvente, a textura formada na parede pelos tubos dispostos lado a lado quebra as ondas sonoras e a camada de ar dentro dos tubos ajuda no isolamento acústico.

Com relação ao custo e à rapidez de execução dessas construções, a princípio pensa-se que podem ser baratas, devido ao material reciclado, e rápidas de se construírem. Contudo, os outros elementos que compõem a construção podem encarecê-la, como é o caso das peças de ligação, e em algumas obras é citada uma quantidade grande de pessoas para executá-las. Portanto, seriam necessários estudos mais detalhados a respeito destes quesitos.

6.2. Quanto aos ensaios técnicos realizados por Shigeru Ban

O estudo dos ensaios técnicos realizados por Shigeru Ban possibilita tecer alguns comentários.

No ensaio de fluência, realizado para a Biblioteca do Poeta, MacQuaid (2003) divulga algumas incoerências.

Primeiramente, na análise dos resultados, ao se relacionar as figuras 5.1 e 5.2 (vide p. 98-9) percebe-se uma incompatibilidade. Esta é que no período em que a deformação dos corpos-de-prova é grande, a umidade relativa do ar está em queda; e no período em que a umidade relativa do ar aumenta, a deformação diminui.

É estranho, também, que após os 200 primeiros dias a deformação dos corpos-de-prova tenha sido negativa, retornando ao marco zero, pois pela descrição do ensaio os corpos-de-prova permaneceram carregados por mais de um ano.

Além disso, ao observar detalhadamente, percebe-se que o eixo y deste gráfico (figura 5.2) foi nomeado de "deformação", enquanto o título do gráfico se refere às variações dimensionais.

Existem várias hipóteses para se tentar entender este ensaio. No entanto, este poderia ter sido melhor descrito, deixando claro seu objetivo, procedimentos e conclusões.

Referindo-se ao ensaio de resistência à flexão feito para o Domus de Papelão (vide p. 106), comparando-o com o mesmo ensaio feito para a Casa de Papelão (vide p. 101) e para o Pavilhão Japonês (vide p.116), pode-se observar duas diferenças nos seus procedimentos.

O ensaio realizado para a Casa de Papelão e para o Pavilhão Japonês aplicou a carga em apenas um ponto, central, e não utilizou peças para enrijecer os corpos-de-prova internamente. Quando o ensaio foi realizado para o Domus de Papelão, Shigeru Ban aplicou cargas em dois

pontos próximos ao centro dos corpos-de-prova e dispôs enrijecedores internos nestes pontos e nos dois pontos de apoio.

Contudo, pelos resultados iguais divulgados, pode-se perceber que estas diferenças nos procedimentos não interferiram na resistência do material; e que, provavelmente, os enrijecedores foram usados no ensaio para o Domus de Papelão apenas para evitar interferências de cisalhamento.

Quanto aos ensaios de resistência à compressão realizados para a Casa de Papelão e para o Domus de Papelão, vide p. 99 e 105, estes utilizaram velocidade de carregamento de 0,01 MPa/s, enquanto que no mesmo ensaio feito para o Pavilhão Japonês utilizou-se 0,05 MPa/s (vide p. 115).

No entanto, os resultados dos três ensaios foram da ordem de 10 MPa, demonstrando que a modificação na velocidade de carregamento não comprometeu o ensaio feito para o Pavilhão Japonês e não gerou resultados diferentes para este.

Para o Pavilhão Japonês também foi feita uma simulação do ensaio de resistência à compressão após a montagem de uma pequena parte. Na conclusão, McQuaid (2003) diz que não foram observadas deformações residuais nos tubos (vide p. 116).

Isso significa que os tubos de papelão resistiram bem ao esforço de compressão ao qual foram submetidos, não ultrapassando o regime elástico e não permanecendo deformados após o descarregamento.

6.3. Quanto aos ensaios técnicos realizados por este trabalho

A maior dificuldade para a realização dos ensaios foi o fato de não se encontrar normas técnicas aplicáveis a tubos de papelão como elemento construtivo para vedação e estrutura, devido a este não ter esse emprego na construção civil brasileira.

As poucas normas existentes nos acervos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) são referentes aos materiais: papel, papelão ou a tubetes de papelão, geralmente utilizados para outras finalidades e submetidos a esforços diferentes dos esforços ocorridos em edificações³⁹.

Devido a isso, foi preciso adaptar alguns métodos de ensaios a partir de métodos conhecidos ou elaborá-los conforme os objetivos do ensaio desejado. Por fim, foi possível realizar os ensaios técnicos e atingir os objetivos propostos.

Através dos ensaios realizados neste trabalho pode-se aferir, entre outros dados, as cargas e tensões máximas resistidas por elementos de uma determinada dimensão (diâmetro, espessura e comprimento).

Estes valores são importantes, pois permitem comparar os tubos de papelão aos outros materiais utilizados na construção civil e fornecem conhecimentos iniciais para se projetar e construir com este material.

Além disso, como Shigeru Ban fez ensaios específicos para cada uma de suas obras, e os divulgou, através de testes com tubos fabricados no Brasil pode-se, além de conhecer seu comportamento e limites de resistência, saber se estes teriam condições de gerar obras como as deste arquiteto.

6.3.1. Quanto ao ensaio de absorção de umidade

Através dos resultados obtidos neste ensaio, comprovou-se que os tubos de papelão são um material muito absorvente. Portanto, exigem alguma forma de impermeabilização, pois tendem a perder resistência com o aumento do teor de umidade incorporado.

³⁹ A busca por normas nos acervos da ABNT e da ASTM seguiram o seguinte critério: primeiramente, procurou-se por normas para tubos de papelão como elementos estruturais ou de vedação; depois, procurou-se por normas para tubetes de papelão, mesmo que aplicados para outras finalidades; e, por fim, procurou-se encontrar normas indicadas para ensaios em tubos de aço, devido à semelhança entre os sistemas construtivos.

Mesmo que a maior eficiência tenha se dado para o verniz com filtro solar, os índices de absorção foram muito altos. Assim, nenhum dos vernizes utilizados neste ensaio demonstrou atender às expectativas e necessidades de impermeabilização do material.

Isso pode ter ocorrido devido aos corpos-de-prova terem absorvido os vernizes; que não ficaram na superfície do material formando uma camada protetora.

Talvez o ideal seja encontrar um produto que forme uma película de revestimento sobre as paredes interna e externa dos tubos e sobre seus topos. Isso poderá ser mais eficaz, evitando a penetração da umidade.

6.3.2. Quanto ao ensaio de resistência à compressão

Inicialmente, através do gráfico gerado por este ensaio, pode-se perceber que até uma determinada carga, o material possui um comportamento elástico. Após este momento, o material se plastifica, perdendo paulatinamente sua resistência com aumento da deformação, mesmo sob solicitação constante.

O material não entra em colapso, o que comprova não ter ruptura frágil. Portanto, para este material é determinante o estado limite de serviço (ELS) e não o estado limite último (ELU)⁴⁰.

Devido às ondulações nos corpos-de-prova ocorrerem paralelamente às emendas de papel Kraft e também devido à rotação gerada pela compressão, pode-se perceber que a força de compressão se propaga no sentido e através das faixas de papel Kraft.

Quanto à resistência dos tubos de papelão aos esforços de compressão, pode-se perceber que o papel kraft⁴¹ é o componente que mais contribui para isso.

⁴⁰ Estados limites de serviço (ELS), ou de utilização, são estados nos quais se percebem efeitos estruturais que não respeitam as condições especificadas para o uso normal da construção ou que indicam o seu comprometimento. Estados limites último (ELU) são estados que determinam, no todo ou em parte, a interdição do edifício. (UFPR, 2003).

6.3.3. Quanto ao ensaio de flambagem

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 bem antes de se atingir as cargas máximas resistidas no ensaio de resistência à compressão, 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 iguais.

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.

6.3.4. Quanto ao ensaio de resistência à flexão

Os tubos de papelão apresentaram, neste ensaio, resistência a tensões bem superiores que no ensaio de flambagem. Com relação ao ensaio de resistência à compressão, neste ensaio, os tubos de 20 mm de espessura resistiram a uma tensão 20% maior, e os outros tubos resistiram à mesma tensão.

⁴¹ Deve-se considerar, também, a qualidade do papel kraft utilizado, ou seja, a qualidade das fibras de celulose, dos aditivos, aglutinantes e estabilizantes que o compõem, e a qualidade do seu processo de fabricação.

Com relação ao comportamento dos tubos durante a aplicação de carga, estes cederam em todo seu comprimento devido à pequena rigidez de seu material, o que possibilitou o amassamento em seus pontos de apoio.

No centro do vão, estes apresentaram rugas e ondulações na face superior, por conta das tensões de compressão, além de ser este o ponto de recebimento de carga e, ao mesmo tempo, o ponto central da flecha gerada; suscetível à máxima deformação.

Quanto à resistência dos tubos de papelão aos esforços de flexão, pode-se perceber que as colas⁴² utilizadas são os componentes que mais contribuem para isso.

6.4. Quanto à relação entre os ensaios técnicos e as obras arquitetônicas

Ensaio técnicos são importantes para se conhecer o comportamento dos materiais sob os esforços existentes nas construções, além do seu limite de resistência. Assim, busca-se montar em laboratório uma situação o mais próxima da real possível; a fim de se prever o comportamento de um material numa futura edificação.

Dessa maneira, quando o sistema construtivo é composto por arcos, a maior solicitação provém de esforços de compressão. Por outro lado, os elementos que compõem uma treliça também são solicitados à compressão e tração. Igualmente aos pilares, todos os elementos que compõem uma estrutura, se tiverem índice de esbeltez acima de um dado limite, podem sofrer flambagem a um determinado carregamento.

Além disso, um material de construção pode ser utilizado em locais das mais variadas características climáticas e, por isso, é necessário conhecer seu comportamento em ambientes de altos índices de umidade relativa do ar.

⁴² Deve-se considerar, também, a qualidade dos componentes utilizados na fabricação da cola e a qualidade do processo de colagem.

Conhecendo-se as características de um material, suas fragilidades e potencialidades, e o seu comportamento pode-se especificá-lo de forma mais adequada e, inclusive, tirar proveito disso na elaboração dos projetos.

Essas foram as idéias que levaram à realização dos ensaios deste trabalho, pois entre as obras de Shigeru Ban há sistemas construtivos como estes citados, e que geram esses esforços nos materiais.

Através dos ensaios realizados, percebeu-se que os tubos de papelão são um material menos resistente que os demais e de menor durabilidade quando não tratados adequadamente. Isso pode exigir manutenção e substituição de peças com maior frequência; porém, basta substituir as peças comprometidas.

Foi possível, também, perceber as potencialidades e as fragilidades do material em estudo. Dessa forma, pode-se observar que o material é bastante sensível à absorção de umidade (tornando imprescindível a busca por uma forma de impermeabilizá-lo) e possui resistência mais limitada que os materiais convencionais. No entanto, demonstrou melhor desempenho para resistir a esforços de flexão que os demais esforços.

Sabendo-se disso, algumas medidas devem ser tomadas na hora de se projetar utilizando este material.

Inicialmente, a escolha do sistema construtivo e a especificação das dimensões do material devem considerar as suas fragilidades, potencialidades e seus limites de resistência.

Dependendo da sua função ou local de implantação, deve-se buscar uma forma eficiente de tratar o material e torná-lo resistente à ação da água e do fogo. Pode-se, também, aumentar o tamanho dos beirais ou fazer uso de outras soluções em projeto para proteger o material e expô-lo menos a situações comprometedoras.

Se for associado a outros materiais, no intuito de se criar reforços e adquirir maior resistência, rigidez e estabilidade, pode-se gerar projetos maiores e mais arrojados.

Isso pode ser observado nas obras de Shigeru Ban, por exemplo, quando este utiliza ligações de madeira para aliviar os esforços de cisalhamento nos pontos de encontro e apoio entre os elementos.

Estas peças de madeira aumentam significativamente a resistência nestes pontos, não só ao cisalhamento, como também à compressão, como é mostrado nos ensaios de resistência ao cisalhamento nas ligações (vide p. 110).

Da mesma forma, quando o arquiteto usa diafragmas de madeira em todo o comprimento de alguns tubos, estes se tornam mais resistentes à compressão e flambagem. E os cabos de aço usados para amarrar horizontalmente painéis formados por vários tubos, servem para aumentar a rigidez e estabilidade do conjunto, tornando-o mais resistente à flambagem.

6.5. Quanto a comparação, em termos de resistência, entre os tubos de papelão brasileiros e os tubos japoneses

Dos quatro tipos de ensaios realizados por este trabalho, dois possibilitam uma comparação entre os resultados obtidos para os tubos de papelão fabricados no Brasil e 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 pelo 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 devem 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.

Outrossim, há de se considerar que obras como as referenciadas têm a disposição de seus elementos construtivos determinada não somente pela resistência do material, mas também, pelo seu aspecto estético e exigências de modulação.

Considerando a comparação feita entre os materiais brasileiro e japonês, para a aplicação em sistemas construtivos, seria vantajoso que a indústria brasileira melhorasse a sua tecnologia na fabricação de tubos de papelão.

6.6. Quanto à comparação entre os tubos de papelão e os materiais convencionais usados em estruturas

Após todo o estudo desenvolvido neste trabalho a respeito dos sistemas construtivos que utilizam tubos de papelão e das características técnicas desse material, pode-se compará-lo com materiais usados comumente em estruturas.

Em termos de resistência, como era previamente suposto, comprovou-se através dos ensaios técnicos realizados neste trabalho e do estudo dos ensaios técnicos realizados por Shigeru Ban que os tubos de papelão são menos resistentes que os demais materiais de construção.

Um concreto de baixa resistência à compressão, por exemplo, suporta até 20 MPa⁴³. (Metha & Monteiro *apud* Sichieri, 2005).

⁴³ Um concreto de resistência à compressão moderada tem entre 20 e 40 MPa e alta resistência acima de 40 MPa. (METHA & MONTEIRO, 1994 *apud* SICHIERI, 2005).

Quanto ao aço, a NBR 8261 *apud* Bellei (2000) especifica que um perfil tubular de aço-carbono e seção circular deve ter limite de resistência à tração equivalente a 400 MPa para a classe B e 427 MPa para a classe C. Os perfis tubulares de aço-carbono A500 e seção circular da série ASTM usados no Brasil devem ter limite de resistência à tração equivalente a 320 MPa para o grau A e 408 MPa para o grau B. (BELLEI, 2000)⁴⁴.

Com relação às madeiras, o *Pinus bahamensis* tem resistência à compressão paralela às fibras de 32,6 MPa, e o *Eucalyptus grandis* tem resistência à compressão paralela às fibras de 40,3 MPa. (SALES *et al*, 1996). Quanto à resistência à flexão, segundo Lahr (1989), o *Pinus hondurensis* chega a suportar 48 MPa.

Devido ao uso dos tubos de papelão para formar painéis portantes, pode-se compará-los também aos blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural.

Assim, conforme a NBR 6136/1994, para que estes blocos se enquadrem na classe de resistência AE é necessário que tenham resistência à compressão de, pelo menos, 6 MPa. E para que estes blocos se enquadrem na classe de resistência BE é necessário que tenham resistência à compressão de, pelo menos, 4,5 MPa⁴⁵.

Os dados acima são citados para possibilitar mera comparação entre os materiais, e não para concluir se os tubos de papelão servem ou não para se fazer construções, e para lembrar que materiais com resistências tão diferentes, como os próprios materiais supramencionados, certamente possuem características também muito distintas.

⁴⁴ Esses valores representam a tenacidade do material, que também pode ser associada ao cisalhamento, à flexão ou à compressão. Tenacidade, por definição, é uma combinação entre resistência e ductilidade que, por sua vez, é a capacidade que o metal tem de se deformar na fase inelástica sem fraturar. (BELLEI, 2000).

⁴⁵ A classe AE permite que o material seja aplicado para uso geral, como em paredes externas abaixo ou acima do solo, expostas ou não a umidades e intempéries, mesmo sem receber revestimento de argamassa de cimento. A classe BE limita o uso do material ao nível acima do solo, em paredes não expostas a intempéries e em paredes externas com revestimento de argamassa de cimento.

Essas características é que geram as diversas técnicas e os sistemas construtivos para cada material. Assim ocorre para a madeira, o concreto, o aço, ou os tubos de papelão.

O fato de os tubos de papelão serem menos resistentes que os materiais convencionais significa apenas que estes possuem características técnicas diferentes dos demais mas que, contudo, isso não impossibilita o seu uso como elemento de estrutura ou vedação.

Isso remete à citação de Shigeru Ban mencionada neste trabalho (vide p. 49). O mestre da arquitetura com tubos de papelão enfatiza que a resistência mecânica de um material não é o fator mais importante na estabilidade de uma construção; mas sim, a técnica construtiva adotada.

Nota-se, assim, o quanto é equivocada a impressão de fraqueza que se tem do material papel ou papelão, pois através do estudo das obras de Shigeru Ban pode-se perceber que a forma como o material é usado possibilita se fazer grandes obras arquitetônicas.

O mesmo pensamento deve ser levado aos tubos de papelão fabricados no Brasil e testados neste trabalho. Mesmo estes sendo um pouco menos resistentes que os tubos japoneses, a forma como estes devem ser usados é que determinará as possibilidades de aplicação na construção civil brasileira.

Afinal, essa diferença na resistência não é tão grande e pode muito bem ser recompensada com algumas soluções em projeto, como amarrações, reforços, dimensionamento, etc.

Além disso, como foi citado na introdução deste trabalho, todos os materiais de construção possuem as suas qualidades, vantagens e especificidades de uso.

Portanto, se os tubos de papelão são menos resistentes que os materiais de construção convencionais, por outro lado, estes têm grandes vantagens, como a facilidade de execução, a limpeza na obra, a leveza da construção, a mobilidade, a versatilidade, as possibilidades plásticas, as propriedades térmicas e acústicas, a reciclabilidade, a ausência de

acabamento e fundações complexas, a facilidade em transportar o material, a salubridade ao manuseá-lo, entre outras.

Dessa forma, deve-se utilizá-lo pelas suas vantagens e buscar soluções para que componham sistemas construtivos resistentes.

O maior exemplo disso é a própria obra de Shigeru Ban, que com um material de baixa resistência conseguiu desenvolver sistemas construtivos semelhantes aos em aço; o material mais resistente entre os citados acima.

Enfim, a comparação entre os diferentes materiais não deve se limitar ao aspecto da resistência mecânica, pois pouco ou muito resistentes, está mais do que comprovado que os tubos de papelão possibilitam construções no Brasil e no mundo.

7 . CONCLUSÕES

Com base no trabalho desenvolvido e nas discussões feitas anteriormente, conclui-se:

- é possível gerar sistemas construtivos com tubos de papelão fabricados no Brasil. Os tubos de papelão testados neste trabalho podem ser empregados em construções, mas necessitam de soluções em projeto para compensar a baixa resistência mecânica, além de um tratamento eficiente contra a absorção de umidade;

- apesar do papel ser um material aparentemente fraco, a forma tubular agrega resistência e estabilidade aos tubos de papelão;

- os tubos de papelão são um material bastante versátil, podendo ser usados de diversas formas tanto para vedação como para estruturas;

- em suas obras, Shigeru Ban utiliza os tubos de papelão para compor sistemas construtivos em forma de arcos, painéis portantes, treliças, tesouras, etc;

- os sistemas construtivos gerados por Shigeru Ban com tubos de papelão dispensam a execução de acabamento;

- estes sistemas compõem uma construção muito leve e não requerem uma fundação complexa;

- a construção é limpa e não necessita de mão-de-obra experiente ou especializada;

- devido à baixa resistência do material, as coberturas devem ser leves;
- em termos de forma, os sistemas construtivos em arcos e treliças são muito semelhantes ao sistema tubular em aço;
- as tesouras feitas de tubos de papelão remetem ao sistema construtivo em madeira;
- os painéis portantes se assemelham às alvenarias estruturais;
- para reforçar os pontos de apoio e aliviar as tensões geradas por esforços de cisalhamento deve-se usar peças de ligação feitas de outros materiais;
- efeitos plásticos diferentes e interessantes podem ser gerados conforme se usa o material;
- as linhas curvas possuem muita relação com o material, ressaltando a sua beleza;
- a mobilidade e a leveza são grandes vantagens das construções feitas com tubos de papelão;
- a falta de normas técnicas específicas dificulta a realização de ensaios técnicos;
- os tubos de papelão necessitam ser impermeabilizados, pois são muito absorventes;
- o tubo de papelão não entra em colapso quando é submetido a cargas; a tendência é se deformar até perder a estabilidade;
- quando o 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 possuem resistência à flambagem bem menor que resistência à compressão;
- a resistência à flexão é bem superior que a resistência à flambagem e um pouco maior que a resistência à compressão;
- os tubos de papelão testados neste trabalho possuem resistência à compressão e flexão cerca de 20% e 30%, respectivamente, inferiores que os tubos japoneses;
- seria vantajoso melhorar as qualidades dos tubos de papelão testados neste trabalho para aplicá-los na construção civil;

- os tubos de papelão são um material menos resistente que os demais e de menor durabilidade se não tratados adequadamente;
- o comportamento dos tubos de papelão aos diversos esforços existentes numa edificação, bem como seus limites de resistência, devem ser levados em consideração na escolha do sistema construtivo e dimensionamento das peças;
- para aumentar a resistência, rigidez e estabilidade do material, deve-se associá-lo a outros materiais.

7.1. Prosseguimento do estudo

Este é um estudo de tema inédito no Brasil e que, portanto, está apenas iniciando as pesquisas a seu respeito.

O desenvolvimento deste trabalho gerou novas idéias e sugestões de estudos. Assim, percebeu-se a necessidade de se investigar outras questões a fim de obter mais informações e conhecer melhor o comportamento do material.

Entre outras, esta pesquisa pode ser continuada das seguintes formas:

- realizando estudos de resistência à ação do fogo do material;
- realizando ensaios mecânicos em painéis formados por vários tubos, para se conhecer o comportamento do material em conjunto;
- testando o uso deste material em associação com outros, para fins de aumento de resistência, rigidez e estabilidade;
- realizando estudos sobre as suas ligações;
- realizando estudos para melhorar os desempenhos térmico e acústico do material;
- realizando estudos sobre a sustentabilidade ambiental do material;
- testando-se outros produtos a fim de obter uma impermeabilização eficiente para o material;
- realizando estudos para melhorar a qualidade e resistência dos tubos fabricados no Brasil, visando sua aplicação na construção civil;

- realizando estudos que visem e proponham a industrialização desta tecnologia;
- realizando estudos para se aumentar a durabilidade do material e a sua resistência contra a agressividade do meio;
- dando continuidade a estudos que investiguem a viabilidade de aplicação desta tecnologia no Brasil e a sua aceitação pelo consumidor.

8 . B I B L I O G R A F I A

8.1. Referências bibliográficas

ABCTERRA. **Arquitetura em terra**. Disponível em: www.abcterra.com.br.

Acessado em 12 jul 2006 às 11:00.

AGUIAR, C. **Campo minado**. In: Folha de São Paulo, 01 mai 2006.

Disponível em: www.folha.com.br. Acessado em 10 jul 2006 às 8:30.

AKZONOBEL. **Madeiras naturais**. Disponível em: www.akzonobel-ti.com.br/artigos. Acessado em 12 jul 2006 às 11:30.

ALVA, E. N. **Tecnologias Apropriadas e Produção de Bens e Serviços Habitacionais**. Revista Projeto, n63, mai 1984, p.30-5, Ed. Arco.

ARCHITECTURE AND URBANISM. **Paper tube architecture, sustainability and responsible citizenship**. Architecture and Urbanism, n320, mai 1997, p.132-43. Tóquio: A+U Publishing CO.

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. **Papel e cartão – Tubetes – Determinação da umidade – Método por secagem em estufa: NBR14257:1998.** Rio de Janeiro: ABNT, 1998. 02 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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural: NBR6136:1994.** Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

BAN, S. **Paper houses.** Revista Abitare, n362, mai 1997, p.130-3. Milão: Abitare Segesta.

BAN, S. **Shigeru Ban: Japan Pavilion at the Hannover Expo 2000.** Revista Casabella, v64, n681, set 2000b, p.56-61 e 97. Milão: Elemond Spa.

BAN, S. **Shigeru Ban Architect: the Japan Pavilion.** Architecture and Urbanism, n360, set 2000a, p.80-7 e 122-3. Tóquio: A+U Publishing CO.

BELLEI, I. H. **Edifícios industriais em aço – Projeto e cálculo.** 3ª ed. São Paulo: Pini, 2000.

BERET, C.; PENWARDEN, C. **Shigeru Ban: towards a minor, radical architecture.** Art-Press, n256, abr 2000, p.41-5.

BRACELPA (2005a). **Reciclagem.** Disponível em www.bracelpa.org.br. Acessado em 20 jan 2005, às 17:40.

BRACELPA (2005b). **História do papel no mundo.** Disponível em www.bracelpa.org.br. Acessado em 20 jan 2005, às 17:40.

BRACELPA (2005c). **História do papel no Brasil.** Disponível em www.bracelpa.org.br. Acessado em 20 jan 2005, às 17:40.

BRACELPA (2005d). **Matérias-primas fibrosas virgens.** Disponível em www.bracelpa.org.br. Acessado em 20 jan 2005, às 17:40.

BRACELPA (2005e). **Reflorestamento.** Disponível em www.bracelpa.org.br. Acessado em 20 jan 2005, às 17:40.

BUNTROCK, D. **Shigeru Ban: ethical experimenter**. Architecture, v85, out 1996, p.104-9. Nova Iorque: BPI Communications, Inc.

CAFÉ BANDEIRA. **História do papel**. Disponível em: <http://www.cafebandeira.com.br/histpapel.html>. Acessado em 04 out 2004 às 17:00.

COSIPA. **Arquitetura em aço**. Disponível em: www.arquitetura.com.br/matalica/artigo_cosipa.htm. Acessado em 12 jul 2006 às 11:10.

DAVEY, P. **Paper palace**. The Architecture Review, v208, n1243, set 2000, p.58-60. Londres: Emap Construct.

DAWSON, S. **An exhibition structure made of cardboard**. Architect's Journal, v218, n12, 02 out 2003, p.44-5. Londres: The Architecture Press.

DAWSON, S. **All a-board**. Architect's Journal, v218, n12, 02 out 2003, p.42-3. Londres: The Architecture Press.

DIMIBU. **Concretubo – Tubos de papelão para a construção civil**. Dimibu Indústria de Artefatos de Papel e Papelão Ltda., 2004. catálogo, 06p.

ECOLOGIA E DESENVOLVIMENTO. **Indústria de celulose**. Ecologia e desenvolvimento, ano 02, nº16, jun 1992, p.41. Rio de Janeiro: Ed. Terceiro Mundo.

ENGINEERING NEWS RECORD. **Paper house built to last 20 years**. 14 ago 1969.

EXPRESSÃO. **Ciclo fechado**. Revista Expressão, ano 08, nº92, 1998, p.74. Florianópolis: Editora Expressão Sul.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Suzano lança cartilha para manejo sustentável do eucalipto**. Folha de São Paulo, 18 out 2001. Disponível em: www.folha.com.br. Acessado em 10 jul 2006 às 8:05.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Ameaça de “deserto verde” provoca polêmica no RJ e no ES.** Folha de São Paulo, 20 mar 2002. Disponível em: www.folha.com.br. Acessado em 10 jul 2006 às 8:45.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Vazamento de gás pára produção de fábrica em Jacareí (SP).** Folha de São Paulo, 09 jun 2003a. Disponível em: www.folha.com.br. Acessado em 10 jul 2006 às 9:00.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Justiça decreta liberdade provisória para donos da Cataguazes.** Folha de São Paulo, 15 abr 2003b. Disponível em: www.folha.com.br. Acessado em 10 jul 2006 às 9:10.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Produção de eucalipto gera pouco emprego.** Folha de São Paulo, 18 jan 2005. Disponível em: www.folha.com.br. Acessado em 10 jul 2006 às 9:20.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Preconceitos cercam a “árvore de direita”.** Folha de São Paulo, 30 abr 2006. Disponível em: www.folha.com.br. Acessado em 10 jul 2006 às 8:10.

FRAMPTON, K. **História crítica da arquitetura moderna.** São Paulo: Martins Fontes, 1997.

FROMONOT, F; EGO, R. **Shigeru Ban: L’elegance et l’urgence.** L’Architecture d’Aujourd’hui, n306, set 1996, p.40-7.

GUINEY, A. **Paper bound.** Architecture, v89, n6, jun 2000, p.86-7. Nova Iorque: BPI Communications, Inc.

HABITAR. **Cimento Portland/ Solo-cimento.** Disponível em: <http://arq.ufmg.br/habitar>. Acessado em 12 jul 2006 às 11:20.

HART, S. **21st – Century alchemist.** Architecture, v89, n2, fev 2000, p.42-5 e 154. Nova Iorque: BPI Communications, Inc.

INO, A. **Papelão Ondulado: Viabilidade de Utilização na Construção.** Dissertação (mestrado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 1984.

KLABIN. **Exemplo de biodiversidade.** Klabin Fabricadora de Papel e Celulose S.A., 1998. catálogo, 04p.

- LACERDA, M. **A fabricação dos tubos de papelão**. Zelepel Indústria e Comércio de Artefatos de Papel S/A. Entrevista em 28 jun 2006. 04p.
- LAHR, F. A. R. **Propriedades físicas, de resistência e de elasticidade de espécies de madeira para emprego em estruturas**. In: Anais do III Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira. São Carlos: 1989.
- LOTUS INTERNATIONAL. **Shigeru Ban: paper loghouse, 1995**. Revista Lotus International, n105, 2000, p.86-7.
- LOTUS INTERNATIONAL. **Paper arch: MoMA, New York, 2000**. Revista Lotus International, n111, 2001, p.52-3.
- MADE IN JAPAN. **Papel arroz**. Disponível em: <http://madeinjapan.uol.com.br>. Acessado em 25 jul 2006 às 00:30.
- McQUAID, M. **Shigeru Ban**. Nova Iorque: Phaidon Press, 2003.
- MANEJO FLORESTAL. **O que é o manejo florestal?** Disponível em: www.manejoflorestal.org. Acessado em 15 jul 2006 às 10:00.
- MEYER, K. F. **Estruturas metálicas - Construções com tubos**. Belo Horizonte: KM Engenharia, 2002.
- MINKE, G. **Bauen mit paper**. In: Alternatives Bauen. Kassel (Alemanha), 1980.
- NOGUEIRA, S. **Papelão alcatroado**. Disponível em: www.arcoweb.com.br/forum. Acessado em 10 jul 2006 às 9:35.
- PINHEIRO, P. **A fabricação do papel krfat**. São Carlos S/A – Indústria de Papel e Embalagens, 2004. Entrevista, 03p.
- PROJETO.... **Projeto Lixo Seletivo – Papel Ondulado**. Disponível em: <http://www.ipt.br/institucional/qualidade/laboratorio/?lab=1pr>. Acessado em 04 out 2004 às 17:10.
- RATTI, C. **The architecture of economy**. Revista Domus, n857, mar 2003, p.20-1.

REVISTA MÓDULO. **Em Busca de Tecnologias Alternativas.** Revista Módulo, n89/90, jan/abr 1986, p.140, Ed. Avenir.

SALADO, G. C. **Diferentes Alternativas de Materiais e Técnicas Construtivas.** Trabalho Final de Graduação. São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2003. 163p.

SALES, A.; CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R. **Agrupamento de espécies nativas e cultivadas no Brasil segundo o sistema de classes de resistência para madeira proposto na NBR 7190/96.** In: XII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Águas de Lindóia, SP: 8 a 11 de dezembro de 1996.

SÃO CARLOS S/A. **Informações necessárias para fundamentar laudos de funcionamento ininterrupto da fábrica de papel.** São Carlos S/A – Indústria de Papel e Embalagens, 2006.

SHEPPARD, R.; TREADGILL, R.; HLOMES, J. **Paper house.** Unicorn Bookshop, 1974.

SICHERI, E. P. (coord.); PABLOS, J. M.; FERREIRA, O. P.; ROSSIGNOLO, J. A.; CARAM, R. **Materiais de construção I – Aglomerantes minerais, agregados, argamassas, concretos e dosagem.** (apostila). São Carlos: SAP/EESC/USP, 2005.

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

TALARICO, W. **Cardboard-tube construction highlighted at MoMA exhibit and at Expo 2000 in Germany.** Architectural Record, v188, n8, ago 2000, p.173. Nova Iorque: Ed. Architectural Record.

THE ARCHITECTURAL REVIEW. **Sacred site.** The Architectural Review, v206, n1234, dez 1999, p.71. Londres: Emap Construct.

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

- THE JAPAN ARCHITECT. **Paper church/1995**. Revista The Japan Architect, n42, summer 2001, p.50-5. Tóquio: A+U Publishing CO.
- THE JAPAN ARCHITECT. **House of paper – paper structure-05**. Revista The Japan Architect, n20, winter 1995, p.160-1. Tóquio: A+U Publishing CO.
- THE JAPAN ARCHITECT. **Expo 2000 Hannover Japan Pavilion**. Revista The Japan Architect, n40, winter 2001, p.48-51. Tóquio: A+U Publishing CO.
- THE JAPAN ARCHITECT. **Nemunoki Art Museum/ paper honeycomb structure**. Revista The Japan Architect, n36, winter 1999, p.84-7. Tóquio: A+U Publishing CO.
- UFPR. **Sistemas B – Madeira**. (apostila). Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2003. 101p.
- VACCARI, M. **Habitação ecológica e econômica em papel**. In: Anais do III Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis (III ENECS). São Carlos, 2003. p. 67-80.
- ZELEPEL. **Tecnologia em artefatos de papel**. Zelepel Indústria e Comércio de Artefatos de Papel S/A., 2005a. catálogo, 08p.
- ZELEPEL. **Relatório de análise de tubete**. Zelepel Indústria e Comércio de Artefatos de Papel S/A., 2005b. relatório, 32p.

8.2. Bibliografia complementar consultada

- ABPO. **Associação Brasileira do Papelão Ondulado**. Disponível em: www.abpo.org.br.
- ABTCP. **Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel**. Disponível em: www.abtcp.org.br.
- AGOPYAN, V. **Estudos dos Materiais de Construção Civil – Materiais Alternativos**. 1994, 5fl. (Pesquisa Multidisciplinar de Tecnologia de Materiais, no Agrupamento de Avaliação de Componentes e Sistemas da Divisão de Edificações – IPT). São Paulo.

- AGOPYAN, V; DEROLLE, A. **Materiais de Construção Reforçados com Fibras: Uso do Papel-Imprensa**. Revista A Construção São Paulo, n 2080/2081, 21 dez 1987, p.43-6, Ed. Pini.
- AGOPYAN, V. **Elementos de Vedação Vertical: Observações sobre Características que Afetam o seu Desempenho**. Dissertação (mestrado). São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1978.
- ANTUNES, M. R. R. **Dinâmica da Demanda de Papel e Papelão no Brasil: Um Modelo de Ajustamento de Estado**. Dissertação (mestrado). Viçosa (MG): Universidade Federal de Viçosa, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Papel e cartão – Tubetes – Cálculo do módulo de flexão - Método dos três pontos: NBR14620:2000**. Rio de Janeiro: ABNT, 2000. 05 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Papel e cartão – Tubetes – Determinação da resistência à compressão plana: NBR14351:1999**. Rio de Janeiro: ABNT, 1999. 02 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Componentes construtivos estruturais – Determinação da resistência ao fogo: NBR5628:2001**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Paredes divisórias sem função estrutural - Determinação da resistência ao fogo: NBR10636:1989**. Rio de Janeiro: ABNT, 1989. 07 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento: NBR14432:2001**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Produtos tubulares de aço – Determinação das propriedades mecânicas à tração: NBR7433:1982**. Rio de Janeiro: ABNT, 1982. 18 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios – Método dos estados limites: NBR8800:1986**. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 200 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test methods for flammability of treated paper and paperboard: D777-97.** Philadelphia: ASTM, 2002. 04p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for surface burning characteristics of building materials: E84-05.** Philadelphia: ASTM, 2005. 19p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test methods for mechanical testing of steel products: A370-96.** Philadelphia: ASTM, 1996. 46p.

BATTISTELLE, R. A. G. **Análise da Viabilidade do Resíduo de Celulose e Papel em Tijolos de Adobe.** Tese (doutorado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 2002.

BORTOLETTO JUNIOR, G.; LAHR, F. A. R. **Aplicação da madeira de pinus na construção civil.** In: Madeira – Arquitetura e engenharia. Ano 1, nº2, p.13-18, mai/ago 2000.

CARVALHO, B. **Ecologia e Arquitetura – Ecoarquitetura: Onde Vive o Homem.** Rio de Janeiro: Ed. Globo, 1984.

DIMIBU. **Dimibu Indústria de Artefatos de Papel e Papelão Ltda.** Disponível em www.dimibu.com.br.

FERREIRA, A.B.H. **Novo Aurélio Século XXI: o dicionário da língua portuguesa.** 3ª ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1999.

GOOD, J. P. **Princípios de projeto de estrutura de aço para estudantes de arquitetura.** Croydon: Constrado, s.d.

HOUAISS, A. **Dicionário Houaiss da língua portuguesa.** Rio de Janeiro: Objetiva, 2001.

IDHEA. **Instituto para o Desenvolvimento da Habitação Ecológica.** Disponível em: www.idhea.com.br.

KLABIN. **Testes de Papel.** Klabin Fabricadora de Papel e Celulose S.A., s.d.

JORNAL DAS DEZ. **Construções Habitacionais com Materiais Alternativos e Tijolos de Solo-Cimento (UFRJ)**. Globo News, 27 jan. 2002.

JORNAL FUTURA. **Projeto de Casa popular Construída com Tijolos de Solo-Cimento (UFRJ)**. Canal Futura, 12 mar. 2002.

LIMA, M. H. T. **Cidade de Papelão: Mocós, Cachangas e Malocas**. 1998.

MEYER, K. F. **Estruturas metálicas - Construções com tubos**. Belo Horizonte: KM Engenharia, 2002.

MITIDIERI FILHO, C. V. **Avaliação de Desempenho de Componentes e Elementos Construtivos Inovadores Destinados a Habitações: Proposições Específicas à Avaliação do Desempenho Estrutural**. Tese (doutorado). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.

NASCENTES, A. **Dicionário de Sinônimos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1981.

PINHEIRO, A. C. F. B.; MONTEIRO, A. L. F. B. P. A. **Ciências do Ambiente – Ecologia, Poluição e Impacto Ambiental**. São Paulo: Ed. Makron Books, 1992.

PMESP, Corpo de Bombeiros. **Segurança estrutural nas edificações – Resistência ao fogo dos elementos de construção: Instrução técnica nº 08/2004**. São Paulo: PMESP, 2004, 14p.

REVISTA MÓDULO. **Em Busca de Tecnologias Alternativas**. Revista Módulo, n89/90, jan/abr 1986, p.140, Ed. Avenir.

SANTOS, M.C.L. **Cidades de plástico e papelão: o habitat informal dos moradores de rua em São Paulo, Los Angeles, e Tóquio**. Tese (Livre docência). São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 2003. 145p.

SAVASTANO JÚNIOR, H. **O Papel da Celulose na Construção Civil**. In: O Papel, v63, n10, out. 2002, p.77-80.

SILVA, A. C. **Estudo da Durabilidade de Compósitos Reforçados com Fibras de Celulose**. Dissertação (mestrado). São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2002.

TEIXEIRA, P. F. **Investigação sobre as Características Geotécnicas de um Resíduo de Papel**. Dissertação (mestrado). São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2002.

VLACK, V. **Princípios de Ciências dos Materiais**. São Paulo: Ed. Edgar Blücher, 1970.

ZELEPEL. **Zelepel Indústria e Comércio de Artefatos de Papel S/A**. Disponível em: www.wilke.ind.br.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- Apedema – Assembléia Permanente de Entidades em Defesa do Meio Ambiente
- ASTM – *American Society for Testing and Materials*
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
- cm – centímetro
- cm² – centímetro quadrado
- cm³ – centímetro cúbico
- CUT – Central Única dos Trabalhadores
- Def – deformação
- e – espessura
- E – módulo de elasticidade
- ECO-92 - Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento Humano
- EESC-USP – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo
- ELS – estado limite de serviço
- ELU – estado limite último
- Esalq-USP – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo
- EUA – Estados Unidos da América
- F – força
- FAU-USP – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo
- f_c máx – tensão máxima de compressão
- Fetag – Federação dos Trabalhadores de Agricultura
- f_f máx – tensão máxima de flexão
- g – grama
- G – módulo de elasticidade transversal
- GNCC – gases não-condensáveis concentrados
- GPa – gigaPascal

h – hora

Kg - kilograma

kgf – kilograma-força

kN – kiloNewton

l – comprimento

L_e – comprimento de ensaio

L_p – comprimento da peça

m – metro

m^2 – metro quadrado

min – minuto

mm – milímetro

MoMA – Museu de Arte Moderna

MPa – megaPascal

MST – Movimento dos Trabalhadores Sem-Terra

NBR – Norma Brasileira

NY – Nova Iorque

ONG – Organização Não-Governamental

ONU – Organização das Nações Unidas

OSB – *Oriented Strand Board*

P – carga

p. – página

pH – potencial de hidrogênio

P_{rup} – carga de ruptura

PVA – acetato de polivinila

PVC – Policloreto de vinila

S – área

s – segundo

Sr^a - Senhora

UFPR – Universidade Federal do Paraná

UNHCR – *United Nations High Commissioner for Refugees*

UR – umidade relativa

USP – Universidade de São Paulo

VAN – *Voluntary Architects' Network*

Φ_e – diâmetro externo

Φ_i – diâmetro interno

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 – Aspectos técnicos do Caramanchão de papel.....	55
Quadro 4.2 – Aspectos técnicos da Galeria de arte Miyake.....	58
Quadro 4.3 – Aspectos técnicos da Casa de papelão.....	61
Quadro 4.4 – Aspectos técnicos da Igreja de papelão.....	64
Quadro 4.5 – Aspectos técnicos das Residências emergenciais em Kobe.....	67
Quadro 4.6 – Aspectos técnicos das Residências emergenciais na Turquia.....	70
Quadro 4.7 – Aspectos técnicos das Residências emergenciais na Índia.....	72
Quadro 4.8 – Aspectos técnicos do Salão de Festival de Odawara.....	75
Quadro 4.9 – Aspectos técnicos da Biblioteca do poeta.....	78
Quadro 4.10 – Aspectos técnicos das Residências emergenciais em Ruanda.	81
Quadro 4.11 – Aspectos técnicos do Domus de papelão.....	84
Quadro 4.12 – Aspectos técnicos do Pavilhão Japonês.....	89
Quadro 4.13 – Aspectos técnicos do Arco para o MoMA/NY.....	92
Quadro 4.14 – Aspectos técnicos do Estaleiro em Borgonha.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Peso por metro linear dos tubos de papelão.....	37
Tabela 5.1 – Resultados do teste de resistência à compressão para a Biblioteca do Poeta, com coeficiente de Poisson e módulo Young.....	97
Tabela 5.2 – Resultados do teste de resistência à compressão para a Casa de Papelão.....	101
Tabela 5.3 – Resultados do teste de resistência à flexão para a Casa de Papelão.....	102
Tabela 5.4 – Resultados do teste de tensão ao cisalhamento simples na ligação para a Casa de Papelão.....	104
Tabela 5.5 – Propriedades mecânicas do papel kraft usado na confecção dos tubos para o Domus de papelão.....	105
Tabela 5.6 – Resultados do teste de resistência à compressão para o Domus de Papelão.....	106
Tabela 5.7 – Resultados do teste de resistência à flexão para o Domus de Papelão.....	107
Tabela 5.8 – Resultados do teste de resistência ao cisalhamento na ligação para o Domus de Papelão.....	111
Tabela 5.9 – Resultados do teste de resistência à flexão na ligação para o Domus de Papelão.....	113
Tabela 5.10 – Resultados do teste de resistência à compressão para o Pavilhão Japonês.....	115
Tabela 5.11 – Resultados do teste de resistência à flexão para o Pavilhão Japonês.....	116
Tabela 5.12 – Resultados do teste de resistência à compressão após a simulação de montagem, para o Pavilhão Japonês.....	117
Tabela 5.13 – Resultados do teste de resistência à torção para o Pavilhão Japonês.....	118
Tabela 5.14 – Resultados do teste de resistência à compressão após exposição ao tempo, com umidade de 9,6%, para o pavilhão Japonês.....	119
Tabela 5.15 - Resultados do teste de resistência à flexão após exposição ao tempo, com umidade de 9,2%, para o pavilhão Japonês.....	119

Tabela 5.16 – Resultados do teste de resistência à combustão da membrana, para o Pavilhão Japonês.....	121
Tabela 5.17 – Resultados do ensaio de absorção de umidade.....	125
Tabela 5.18 – Resultados do ensaio de resistência à compressão.....	129
Tabela 5.19 – Resultados do ensaio de flambagem.....	135
Tabela 5.20 – Dimensões dos corpos-de-prova testados no ensaio de resistência à flexão.....	137
Tabela 5.21 – Resultados do ensaio de resistência à flexão.....	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Invenção do papel e disseminação da tecnologia pelo Mundo.....	08
Figura 2.2 – Os Estados que marcaram o início da produção de celulose e papel no Brasil.....	09
Figura 2.3 – Esquema da produção do papel kraft.....	15
Figura 2.4 – Bobinas de papel armazenadas na indústria de tubos de papelão.	16
Figuras 2.5 e 2.6 – Bobinas de papel Kraft dispostas na máquina que produz os tubos de papelão.....	17
Figuras 2.7 e 2.8 – Faixas de papel Kraft passando pelos tanques de colas.....	17
Figuras 2.9 e 2.10 – Produção do tubo de papelão.....	18
Figuras 2.11 e 2.12 – Tubo de papelão sendo cortado após atingir o comprimento desejado.....	18
Figura 2.13 – Tubos de papelão secando na estufa.....	19
Figuras 2.14 e 2.15 – Tubos de papelão armazenados no estoque da indústria..	19
Figura 3.1 – Casa pré-fabricada de chapas de papelão, desenvolvida pela empresa ADT – Modelo 01.....	26
Figura 3.2 - Casa pré-fabricada de chapas de papelão, desenvolvida pela empresa ADT – Modelo 02.....	26
Figura 3.3 - Casa pré-fabricada de chapas de papelão, desenvolvida pela empresa ADT – Modelo 03.....	27
Figura 3.4 – Abrigo desenvolvido pelo Instituto de Química do Papel dos Estados Unidos.....	28
Figura 3.5 – Abrigo emergencial desenvolvido pela <i>Container Corporation of America</i>	28
Figura 3.6 – Estrutura geodésica de chapas de papelão elaborada por Richard Buckminster Fuller.....	29
Figura 3.7 – Abrigos temporários de placas de papelão na Califórnia.....	30
Figura 3.8 – Instalações de papelão para a Olimpíada de Munique.....	31
Figura 3.9 – Abrigos emergenciais de papelão na Inglaterra.....	31
Figura 3.10 – Protótipo de papelão desenvolvido por Vinzenz Sedlak em sua dissertação de mestrado, Inglaterra.....	32
Figura 3.11 – Protótipo de papelão desenvolvido por estudantes da <i>Califórnia</i>	

<i>Polytechnic State University</i> – Modelo 01.....	32
Figura 3.12 – Protótipo de papelão desenvolvido por estudantes da <i>Califórnia Polytechnic State University</i> – Modelo 02.....	33
Figura 3.13 – Abrigo em arco, construído em Kassel com papelão.....	33
Figura 3.14 – Construção experimental de placas de papelão e garrafas plásticas em Kassel.....	34
Figura 3.15 – Protótipo de casa provisória desenvolvido por Akemi Ino com chapas de papelão ondulado.....	34
Figura 3.16 – Vista interna do Museu de Arte das Crianças Nemunoki.....	35
Figura 3.17 – Estrutura da cobertura do Museu de Arte das Crianças Nemunoki	36
Figura 3.18 – Perspectiva explodida do Museu de Arte das Crianças Nemunoki	36
Figuras 3.19 e 3.20 – Formas e tubos de papelão empregados na construção civil.....	36
Figura 3.21 – Tubo de papelão sendo usado para a montagem de um pilar.....	37
Figuras 3.22 e 3.23 – Tubos de papelão sendo usados para caixão perdido.....	38
Figuras 3.24 e 3.25 - Ponte de tubos de papelão, EUA.....	39
Figura 3.26 – Experimento de Martin Pawley com tubos de papelão, EUA.....	39
Figuras 3.27 e 3.28 – Construção do Shared Ground.....	40
Figuras 3.29 e 3.30 – Clube de música pós-aula construído com tubos de papelão, Inglaterra.....	42
Figuras 3.31 e 3.32 – Foto da maquete do sistema construtivo e elevação da casa projetada por estudantes da FAU-USP.....	43
Figura 3.33 – Centro Cultural Zona Norte.....	44
Figuras 4.1 e 4.2 – Perspectiva e vista interna da Mostra de Alvar Aalto em Tóquio, em 1986.....	50
Figura 4.3 – Perspectiva da Mostra de Emílio Ambasz na Califórnia, em 1989.....	51
Figuras 4.4 e 4.5 – Perspectiva e vista interna da Mostra de Emílio Ambasz em Tóquio, em 1993.....	52
Figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 – Disposições dos tubos de papelão, respectivamente da esquerda para a direita, dos 1º, 2º e 3º atos e dos intervalos.....	52
Figura 4.10 – Palco com pano de fundo de tubos de papelão.....	53
Figuras 4.11 e 4.12 – Perspectiva e vista interna do Caramanchão de Papel.....	54
Figura 4.13 – Vista externa do Caramanchão de Papel.....	54
Figura 4.14 – Vista externa da Galeria Miyake.....	56
Figuras 4.15 e 4.16 – Perspectiva e planta baixa da Galeria Miyake.....	56
Figura 4.17 – Efeito de paginação causado pela sombra dos tubos de papelão.....	57
Figura 4.18 – Efeito de luz gerado pelo espaçamento entre os tubos, ao fundo	

da Galeria Miyake.....	57
Figura 4.19 – Vista externa da Casa de papelão.....	59
Figuras 4.20 e 4.21 – Planta baixa e perspectiva da Casa de Papelão.....	60
Figuras 4.22 e 4.23 – Vistas da entrada e do banheiro da Casa de Papelão.....	60
Figura 4.24 – Vista noturna da Igreja de papelão.....	62
Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 – Planta baixa, corte transversal e perspectiva explodida da Igreja.....	63
Figuras 4.28 e 4.29 – Igreja em construção e após concluída, em uso.....	63
Figuras 4.30 e 4.31 – “Log House” em construção, por voluntários, e vista interna após sua conclusão.....	66
Figura 4.32 – Perspectiva explodida da “Log House”.....	66
Figuras 4.33 e 4.34 – Residências emergenciais em fase de construção na Turquia.....	68
Figura 4.35 – Planta baixa das casas construídas na Turquia.....	69
Figura 4.36 – Elevação longitudinal das casas construídas na Turquia.....	69
Figura 4.37 – Vista interna da residência na Turquia.....	69
Figura 4.38 – Vista interna das casas construídas na Índia.....	71
Figura 4.39 – Vista externa das casas construídas na Índia.....	71
Figura 4.40 – Vista externa do Pavilhão de Odawara.....	73
Figuras 4.41 e 4.42 – Planta baixa e corte do Pavilhão de Odawara.....	74
Figura 4.43 – Detalhe da ligação entre os tubos de papelão e os tubos de vinil.	74
Figura 4.44 – Vista externa da biblioteca.....	76
Figuras 4.45 e 4.46 – Detalhes da peça de madeira utilizada para conectar os tubos da Biblioteca do Poeta.....	76
Figura 4.47 – Perspectiva explodida da biblioteca.....	77
Figuras 4.48 e 4.49 –Planta baixa e corte transversal da biblioteca.....	77
Figuras 4.50, 4.51 e 4.52 – Protótipos de abrigos desenvolvidos para a Ruanda..	79
Figura 4.53 – Abrigos sendo construídos em Ruanda.....	80
Figura 4.54 – Abrigos construídos em Ruanda.....	80
Figuras 4.55 e 4.56 – Corte longitudinal do Domus de Papelão e detalhe da montagem da cobertura.....	82
Figuras 4.57 e 4.58 - Elevação longitudinal do Domus de papelão e seu espaço interno.....	83
Figuras 4.59 e 4.60 –Sistema de escoramento da estrutura.....	83
Figuras 4.61 e 4.62 – Encaixes de madeira laminada utilizados no Domus de Papelão.....	83
Figura 4.63 – Vista noturna do Pavilhão Japonês.....	85

Figura 4.64 e 4.65 – Tiras de tecido usadas para amarrar os tubos do Pavilhão Japonês.....	86
Figuras 4.66, 4.67 e 4.68 – Montagem e içamento da estrutura do Pavilhão Japonês.....	86
Figura 4.69 – Perspectiva explodida da estrutura do Pavilhão Japonês.....	87
Figura 4.70 – Construção da estrutura de tubos de papelão no jardim do MoMA, NY.....	90
Figura 4.71 – Vista superior da obra do MoMA após sua conclusão.....	91
Figura 4.72 – Vista da obra do MoMA após sua conclusão.....	91
Figura 4.73 – Corte transversal da estrutura de papelão do estaleiro.....	93
Figura 4.74 – Corte longitudinal da estrutura de papelão do estaleiro.....	93
Figura 4.75 – Maquete do projeto do estaleiro.....	94
Figura 4.76 – Ligação “A” entre os tubos e peças de alumínio usadas na construção do estaleiro.....	94
Figura 4.77 – Ligação “B” entre os tubos e peças de alumínio usadas na construção do estaleiro.....	94
Figura 5.1 – Variações de temperatura e umidade relativa para os tubos ensaiados para a Biblioteca do Poeta.....	98
Figura 5.2 – Variações dimensionais no comprimento do tubo de papelão sob carregamento no sentido longitudinal, para a Biblioteca do Poeta.....	99
Figuras 5.3 e 5.4 – Aspecto dos tubos após o teste de resistência à compressão, para a Casa de Papelão.....	100
Figura 5.5 – Resultados do teste de resistência à compressão para a Casa de Papelão: relação entre carregamento e deformação.....	100
Figura 5.6 – Tubo de papelão tocando a mesa de teste no centro do vão em ensaio de resistência à flexão para a Casa de Papelão.....	102
Figura 5.7 – Corpo-de-prova após o ensaio de resistência ao cisalhamento na ligação para a Casa de Papelão.....	103
Figura 5.8 – Relação carregamento-deslocamento para o ensaio de resistência ao cisalhamento na ligação para a Casa de Papelão.....	104
Figuras 5.9 e 5.10 – Aplicação de adesivo epóxi e capeamento da superfície cortada do tubo usado no ensaio de resistência à compressão para o Domus de Papelão.....	105
Figura 5.11 – Desenho esquemático do ensaio de resistência à flexão realizado para o Domus de papelão.....	107
Figura 5.12 – Relação entre resistência à compressão e teor de umidade, para o Domus de Papelão.....	109
Figura 5.13 – Relação entre o módulo de elasticidade e o teor de umidade,	

para o Domus de Papelão.....	109
Figura 5.14 – Desenho esquemático do ensaio de resistência ao cisalhamento na ligação para o Domus de papelão.....	110
Figura 5.15 – Desenho esquemático do ensaio de resistência à flexão na ligação para o Domus de papelão.....	112
Figura 5.16 – Relação carregamento-deslocamento para a ligação do tipo BJ4, para o Domus de Papelão.....	113
Figura 5.17 – Relação carregamento-deslocamento para a ligação do tipo BJ5, para o Domus de Papelão.....	114
Figura 5.18 – Deformação do corpo-de-prova devido à compressão na seção transversal, no ensaio realizado para o Pavilhão Japonês.....	115
Figura 5.19 – Tubos de papelão armazenados antes dos ensaios.....	122
Figura 5.20 – Corpo-de-prova com revestimento impermeabilizante sendo pesado.....	125
Figura 5.21 - Resultados do ensaio de absorção de umidade.....	126
Figura 5.22 – Corpos-de-prova A, B, C e D, respectivamente, após 72 horas na câmara úmida.....	126
Figura 5.23 – Corpo-de-prova durante o ensaio de resistência à compressão....	128
Figura 5.24 – Gráfico do ensaio de resistência à compressão.....	130
Figura 5.25 – Corpo-de-prova sofrendo esmagamento durante o ensaio de resistência à compressão.....	130
Figura 5.26 – Ondulações formadas no corpo-de-prova após o ensaio de resistência à compressão.....	131
Figura 5.27 – Bomba eletro-hidráulica utilizada no ensaio de flambagem.....	132
Figura 5.28 – Equipamento Transdutec utilizado no ensaio de flambagem.....	132
Figuras 5.29 e 5.30 – Corpo-de-prova antes da aplicação de carga e após o início da curva de flambagem.....	134
Figuras 5.31 e 5.32 – Medição da flecha de flambagem e enrugamento da extremidade do corpo-de-prova.....	134
Figuras 5.33 e 5.34 – Tubo totalmente flambado e sem estabilidade e tubo rompendo com o acréscimo de carga.....	134
Figura 5.35 – Relação carregamento-flecha observada durante o ensaio de resistência à flexão.....	136
Figura 5.36 – Corpo-de-prova rompido durante o ensaio de flambagem.....	136
Figura 5.37 – Desenho esquemático do ensaio de resistência à flexão pelo Método dos Três Pontos (NBR 14576:2000).....	138
Figura 5.38 - Desenho esquemático dos prismas-suporte e de pressão.....	139

Figura 5.39 – Prismas-suporte e de pressão confeccionados conforme a NBR14576:2000.....	139
Figuras 5.40 e 5.41 – Deflectômetros posicionados no corpo-de-prova.....	140
Figura 5.42 – Corpo-de-prova preparado para o ensaio de resistência à flexão.....	140
Figura 5.43 – Corpo-de-prova durante o ensaio de resistência à flexão.....	141
Figura 5.44 – Corpo-de-prova fletido.....	141
Figura 5.45 – Perda de contato entre o corpo-de-prova e o deflectômetro.....	143
Figura 5.46 – Corpo-de-prova recebendo carga superior ao seu limite de resistência.....	143
Figura 6.1 – Diferentes formas de uso dos tubos de papelão.....	145