Célia Maria Martins Neves é engenheira civil pela Universidade de São Paulo - USP (1975). Obteve o título de mestre em Engenharia Ambiental Urbana na Universidade Federal da Bahia – UFBA em 2000. Exerce atividades na ABNT como colaboradora desde 1985, em comissões de estudo sobre solo-cimento e de argamassas para revestimentos de paredes e tetos. É atualmente servidor público enquadrado como pesquisador IV no CEPED desempenhando atividades de pesquisa relacionadas à Construção Civil. Coordena o Projeto de Investigação PROTERRA do Programa de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento – CYTED. Na área didática foi professora substituta na UFBA, no período de 1996 a 1998. É autora de vários livros e capítulos de livros na área da Construção Civil.
E-mails: cneves@ceped.br; cneves@ufba.br; cneves@superig.com.br

6. Componentes habitacionais de argamassa celulósica e espuma de poliuretano

Célia Maria Martins Neves

Sobre o resíduo

O processo de geração do resíduo

A argamassa celulósica corresponde ao compósito constituído da matriz de cimento e areia reforçada com fibras de celulose provenientes da reciclagem de papel imprensa.

O papel é um emaranhado de fibras de celulose obtido da massa pastosa composta de fibras e água vertida sobre uma tela fina. Enquanto a água escoa através da tela, as fibras que aí se depositam, após prensagem e secagem, constituem o papel.

As pastas podem ser obtidas por simples dispersão mecânica da celulose em água ou através de processos químicos que resultam na eliminação dos constituintes diferentes da celulose contidos na matéria-prima. As pastas ainda podem ser branqueadas pela ação do cloro ou hipoclorito.

Os materiais utilizados para a fabricação do papel variaram muito desde sua invenção: inicialmente vegetais arbustivos como matéria-prima do papiro, depois se usaram o linho, a palha de gramíneas, fibras de algodão e trapos. Só há pouco mais

de um século é que a madeira foi adotada como matéria-prima definitiva (DALVA, [1985?]; MEYER; OLMER, 1949).

A concepção básica do processo original para fabricação do papel, inventado no início do século II, permanece até os dias atuais. As inovações recaem em projetos de cubas, prensas, equipamentos de macerar, cavaletes, secadores, etc. (DALVA, [1985?]; MEYER; OLMER, 1949).

Para a fabricação do papel imprensa, é necessário adicionar à pasta mecânica cerca de 20% de pasta química, de modo que o papel ganhe resistência adequada à sua passagem pelos procedimentos de formação e secagem e 2% de cargas, geralmente caulim ou carbonato de cálcio, cola de breu e sulfato de alumínio (MEYER; OLMER, 1949; D'ALMEIDA, 1981).

As madeiras utilizadas para a fabricação de papel e celulose são basicamente o pinho e o eucalipto, que são madeiras de reflorestamento. Nesse aspecto, não representam risco de degradação ao meio ambiente, desde que haja planejamento e controle dessa atividade.

Caracterização do resíduo

A celulose é uma substância branca, insolúvel em água, com alta resistência à tração, composta de carbono, hidrogênio e oxigênio. Nas fibras de celulose encontram-se presentes açúcar, amido, carboidrato e lignina, que é um ácido orgânico que circunda a fibra, especialmente em células novas (MEYER; OLMER, 1949; AGOPYAN, 1991; CEPED, 1992). As células das fibras das plantas são ricas em celulose, que é a matéria mais importante do papel.

De acordo com a NBR 10004, devido à sua propriedade de biodegradabilidade, o papel e a fibra de celulose podem ser tratados como resíduo classe II – não inerte.

Sistema atual de gestão do resíduo

No Brasil, desde 1934, existem fábricas de reciclagem de papel. No início, existia preconceito em relação à reciclagem, cujos empresários, distantes dos movimentos ambientalistas de hoje, eram considerados lixeiros. A preocupação mundial com o meio ambiente e a busca do desenvolvimento sustentável impulsionaram, nos últimos anos, o setor de reciclagem. Atualmente, mais de 60% do volume total de papel ondulado consumido no Brasil é reciclado. A taxa média anual de recuperação

de aparas, relação entre a quantidade de material reaproveitado e o consumo de papel, gira em torno de 38%, compatível com os valores internacionais (BRASIL..., 1996).

A quantidade de madeira economizada com a substituição da pasta celulósica por aparas é significativa: uma tonelada de aparas equivale ao rendimento lenhoso de uma área plantada da ordem de 250 m^2; o consumo de energia por tonelada de papel produzido também é mais baixo (D'ALMEIDA, 1981). Tecnicamente, qualquer tipo de papel pode ser reaproveitado, porém nem todos são vantajosos.

A forma de obtenção do papel para reciclagem é a seguinte (BRASIL..., 1996):

- catadores, ou outro meio de coleta, separam do lixo os materiais com destino aos sucateiros;
- os sucateiros fazem seu enfardamento em prensa e encaminham os fardos aos aparistas; e
- os aparistas classificam as aparas[1] e as enviam para as fábricas.

Os papéis recicláveis são gerados principalmente nos supermercados, lojas de departamento, gráficas e fábricas de caixas. A maior parte do papel reciclado, cerca de 86%, é gerada por atividades comerciais e industriais. Apesar do apelo ecológico em torno da reciclagem e da coleta seletiva do lixo, ainda não existe incremento significativo da oferta de aparas geradas por residências e escritórios (RECICLANDO..., 1993).

Segundo Haddad (1994), o lixo domiciliar típico brasileiro contém cerca de 25% de papéis e papelões e, se selecionado pela população para posterior reciclagem, além de reduzir a quantidade de lixo transportada e exigir menores áreas de descarte, diminuiria o problema de poluição causado pela queima. A questão é identificar formas atrativas de coleta desses materiais, pois o aumento constante dos resíduos sólidos descartados pela população está se tornando um sério problema urbano.

A formação de preço do papel reciclado é vulnerável devido à coleta, que apresenta forte variação em função dos pontos de geração e do tipo de material disponível (BRASIL..., 1996).

[1] "Aparas" corresponde ao nome comercial dado a resíduos ou produtos de papel, cartas e papelões coletados antes e após sua utilização, que são escolhidos, selecionados, enfardados e vendidos usualmente como matéria-prima para as fábricas de papéis. As aparas comercializadas obedecem a terminologia e classificação próprias, em função de sua procedência.

A prática de reciclar o papel já está bastante consolidada no país e no mundo. A Figura 1 mostra um esquema do ciclo atual, inserindo a argamassa celulósica como alternativa de reutilização.

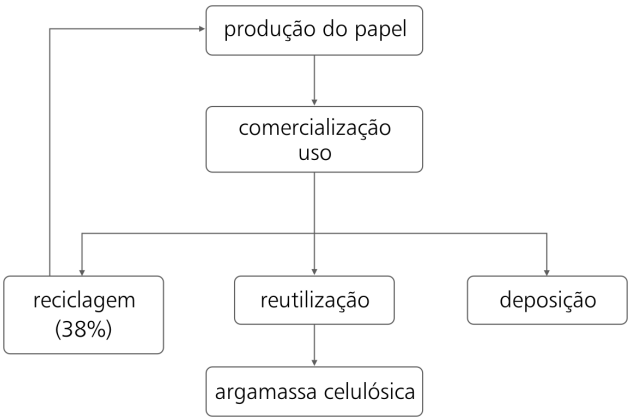


Figura 1 – O ciclo do papel

Dados estatísticos

A indústria de celulose e papel é bastante representativa no país. Os dados publicados na revista Celulose e Papel relativos ao ano de 1995 (INDÚSTRIA..., 1996) apontam o Brasil como o 7º e o 11º colocado entre os produtores mundiais de celulose e papel, respectivamente, com faturamento global anual de US$ 8,4 bilhões, cuja participação no Produto Industrial representa cerca de 4% e 5% no Produto Interno Bruto.

O setor, formado por 220 empresas operando com 252 unidades industriais, localizadas em 16 estados, responde por 107 mil empregos diretos, sendo 58% nas suas atividades industriais e 42% nas florestais.

O consumo interno, constituído de vendas domésticas e consumo próprio das empresas, absorveu nada menos que 77% da produção nacional de papel e 63% da produção de celulose, sendo o restante destinado ao mercado externo. O consumo anual *per capita* de papel atingiu a marca de 31,7 kg (INDÚSTRIA..., 1996).

O mercado externo vem suprindo a demanda de papel imprensa. Enquanto a produção nacional foi da ordem de 280 mil toneladas, o consumo, em 1995, foi da ordem de 620 mil toneladas.

A indústria papeleira reciclou cerca de 1,8 milhão de toneladas de aparas, produzindo, aproximadamente, 1,6 milhão de toneladas de reciclados (INDÚSTRIA..., 1996).

O consumo de madeira está em torno de 33 milhões de m^3, sendo 85% para a produção de celulose/pastas e 15% para fins energéticos. Estima-se que o reflorestamento no país abranja uma área de seis milhões de hectares, sendo 52% de eucalipto e 30% de *pinus* (DASSIE, 1996). A produtividade florestal média é da ordem de 24 m^3 de madeira/ha/ano de *pinus* e de 30 m^3 de madeira/ha/ano de eucalipto (INDÚSTRIA..., 1996). A técnica de clonagem de árvores, já adotada pela indústria, aumenta significativamente a produtividade florestal, com valores superiores a 50 m^3 de madeira/ha/ano de eucalipto (PLANTAS..., 1998).

Processo de reutilização proposto

No que se refere à questão habitacional, o Brasil apresenta um grande desafio na área social: uma carência habitacional que ultrapassa 10 milhões de unidades (KAUPATEZ, 1988; PRADO; PELIN, 1993; BECK, 1994). No enfrentamento dessa questão, a participação da comunidade científica dá-se especialmente no desenvolvimento de alternativas tecnológicas, que devem considerar aspectos técnicos, econômicos, sociais, culturais e, especialmente, ambientais. Faz-se necessário ampliar o conhecimento e transferi-lo ao setor produtivo, de modo a oferecer novas alternativas à área de edificações, visando principalmente à habitação popular.

As universidades e os centros de pesquisas têm procurado investigar e incentivar a implantação de inovações tecnológicas. Sua produção é bastante diferenciada nas várias regiões do país, pois visa a atender com prioridade às demandas regionais. Pelas características socioeconômicas do Nordeste, as pesquisas são orientadas para o aproveitamento de materiais naturais e reciclados, que sejam abundantes, e para a utilização de técnicas simplificadas, especialmente na produção de componentes empregados na produção de habitação de interesse social.

O desenvolvimento de materiais e sistemas construtivos destinados a edificações envolve aspectos diretamente relacionados com as suas propriedades e o uso a que se destinam, e a outros aspectos, mais genéricos, tais como a qualidade do processo de produção e do produto, a utilização dos insumos e o comportamento do produto no contexto ambiental. O considerável elenco de variáveis envolvidas exige definições de requisitos básicos a serem atendidos, evidenciando as características principais para esse desenvolvimento.

Em se tratando de compósitos, como a argamassa celulósica, um dos fatores mais importantes para a sua caracterização é a proporção dos materiais que os compõem. Nesse sentido, o estudo da argamassa celulósica está voltado para avaliar seu desempenho em relação à resistência e estanqueidade através da determinação de propriedades físicas, mecânicas e de permeabilidade para diversas dosagens, a fim de identificar suas características, que, associadas às solicitações de uso, indicam os componentes habitacionais mais adequados.

De modo semelhante ao desenvolvimento de outros materiais e outros sistemas construtivos direcionados para produção de habitação, o estudo da argamassa celulósica e sua aplicação na produção de componentes habitacionais apresentam exigências quanto ao atendimento de critérios de desempenho e qualidade, assim como de redução dos custos desses componentes. Em princípio, os requisitos de segurança estrutural, estanqueidade e durabilidade são apontados como essenciais ao desempenho de materiais destinados ao uso em edificações.

Uma vez conhecidas as características físicas e mecânicas, bem como as relacionadas com a permeabilidade, e asseguradas as exigências de segurança, conforto e custo, um dos pontos críticos do processo de desenvolvimento de um novo componente habitacional refere-se à sua durabilidade no ambiente em que está inserido.

A durabilidade representa a capacidade do material ou produto em manter suas propriedades ao longo da vida útil em condições normais de exposição e uso. Seu estudo exige a identificação do ambiente e das relações intervenientes e a determinação de indicadores, quantitativos e qualitativos, que permitam avaliar o comportamento do produto em uso. As inter-relações entre as características químicas, físicas e biológicas[2] com o meio ambiente, e as solicitações que devem suportar, condicionam a maior ou menor degradação, o que determina, portanto, a sua durabilidade.

Flauzino (1985) caracteriza os distintos agentes de degradação e salienta que estes normalmente agem conjuntamente, seja nos materiais como nos produtos. Araújo (1997) amplia os agentes condicionantes da durabilidade dos materiais de construção ao comentar o *ciclo de vida útil das edificações*, ressaltando que a maioria dos estudos de

[2] A biodegradação dos materiais de construção vem sendo alvo de preocupação de diversos pesquisadores; em julho do ano 2000 foi realizado, em São Paulo, o *1st International RILEM Workshop Microbiological Impact on Building Materials*.

durabilidade resume-se às considerações técnico-construtivas; porém, existem outros aspectos que não devem ser esquecidos: a renovação urbana, a evolução das atividades, hábitos e costumes e a evolução tecnológica. Lembra que a durabilidade das edificações urbanas está também condicionada às intervenções de caráter sociocultural, além dos agentes relacionados ao meio de exposição e da sua constituição física.

Tratando-se do aspecto técnico da durabilidade da argamassa celulósica, a complexidade do mecanismo de envelhecimento pode ser inicialmente simplificada, devido ao comportamento já conhecido das argamassas de cimento e areia, considerando-se, então, como fator principal de estudo a fibra de celulose bem como as conseqüências de sua interação com a matriz.

A principal forma de degradação da fibra de celulose é através da biodeterioração: microrganismos celulolíticos[3] podem decompor as fibras em velocidade superior à vida útil do material em que elas estão inseridas, comprometendo as características necessárias ao uso do componente produzido. Essa biodeterioração pode ser determinada através da medida da perda de massa que ocorre durante a exposição controlada do material em contato com microorganismos específicos, em ambiente conhecido (SANTOS; NEVES, 2000).

Outro aspecto de desempenho da argamassa celulósica, mais genérico e subjetivo, refere-se aos seus efeitos na qualidade ambiental. Para avaliar o impacto de uma atividade qualquer no meio ambiente, é necessário estabelecer e selecionar os fatores que poderão alterar o ambiente mediante a prática da atividade. Tratando-se de materiais de construção, ainda não são claramente definidos indicadores que avaliem seus efeitos na qualidade ambiental; o mais freqüentemente adotado é a durabilidade, pois acarreta, entre outros danos, a deposição de resíduos no ambiente (NEVES, 2000b).

Outro indicador apontado pelos especialistas refere-se ao grau de imunidade do material devido à presença e possível liberação de substâncias que podem representar risco à saúde pública ou efeitos adversos ao meio ambiente[4].

[3] Organismos que se desenvolvem nutrindo-se de celulose.

[4] Considerações fundamentadas em comunicações diversas, especialmente comentadas nos seguintes eventos:
· COPMAT 97. Reunião Anual do Comitê dos Professores de Materiais. Novas tendências em materiais para o próximo milênio, 1997, Salvador;
· Workshop Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais e Urbanos na Construção Civil, 1998, Salvador; e
· Curso Internacional Aproveitamento de Resíduos Sólidos na Construção Civil. Uma alternativa econômica para o uso de matérias-primas secundárias e melhoria da qualidade ambiental, 1998, Salvador.

As investigações de caráter técnico adotam, em geral, normas e procedimentos que estabelecem os processos e medidas a serem realizados para obter as avaliações pretendidas e garantir a repetição dos dados obtidos. Assim, para o estudo da argamassa celulósica, foram definidos métodos para o preparo do material e determinação da suas características físicas, químicas e biológicas.

Projeto experimental, materiais e métodos

O Projeto foi desenvolvido em duas etapas distintas. Inicialmente, estudou-se o material a fim de identificar dosagens adequadas à produção de painéis de vedação, com base em critérios de seleção previamente definidos, e avaliar seus efeitos na qualidade ambiental, mediante o estudo de durabilidade e de risco de contaminação do meio ambiente. Em seguida, definiram-se sistemas construtivos, com seus respectivos componentes de argamassa celulósica e processo de produção, e avaliou-se o desempenho dos componentes em relação às solicitações de uso. A Figura 2 mostra as etapas do projeto e produtos resultantes.

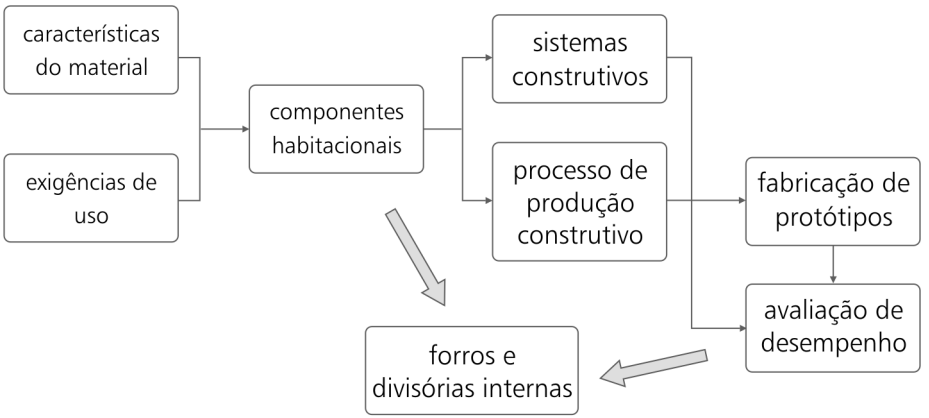


Figura 2 – Esquema do processo de desenvolvimento de componentes habitacionais de argamassa celulósica

Para o estudo da argamassa celulósica, relativo à etapa denominada características do material, realizaram-se as seguintes atividades:

- dosagem do material e identificação de traços adequados ao uso;
- definição do procedimento de preparo da mistura;
- determinação das características físicas e mecânicas; e
- análise da durabilidade, inclusive efeitos bioquímicos e grau de imunidade.

A Tabela 1 apresenta o plano de dosagem adotado para o estudo do material, e a Tabela 2 relaciona as características físicas e mecânicas determinadas.

Traço	Matriz[1]	Teor de fibras[2] (%)						
T1	1:1	0	3	5	7	14	18	-
T1,5	1:1,5	0	-	-	7	14	18	20
T2	1:2	0	-	-	7	-	18	-

[1] Relação de cimento e areia, em massa
[2] Percentual da quantidade de fibras em relação ao cimento, em massa

Tabela 1 – Dosagem – traços estudados

Discriminação	Procedimento	Corpo-de-prova	
		quantidade	dimensões (cm)
Massa específica	NBR 9778	3	Ø 5 x 10
Porosidade			
Absorção por imersão			
Absorção por capilaridade	NBR 9779[1]	4	
Resistência à compressão	NBR 7215	6	
Resistência à tração na compressão	NBR 7222		
Resistência à tração na flexão	NBR 12142	12	4 x 4 x 16
Resistência ao impacto e moldagem	NBR 12764	3	20 x 20 x 2

[1] Procedimento adaptado

Tabela 2 – Programação de ensaios

Os corpos-de-prova cilíndricos foram moldados em quatro camadas com adensamento mediante 30 golpes por camada, conforme procedimento estabelecido na NBR 7215; os corpos-de-prova prismáticos foram moldados em duas camadas com 20 golpes por camada; e as placas, em uma camada com aproximadamente 20 golpes, seguidos da regularização da superfície com a colher de pedreiro.

A cura dos corpos-de-prova foi feita no próprio ambiente do laboratório, com temperatura da ordem de (26±2) ºC e umidade relativa do ar de (75±5)%. Os ensaios foram realizados em corpos-de-prova secos ao ar aos 28 dias de idade.

A durabilidade da argamassa celulósica foi avaliada mediante sua deterioração, decorrente da ação de microrganismos e da água, e sua capacidade de resistir às solicitações de uso ao longo da vida útil. Os indicadores adotados foram (NEVES, 2000a):

- capacidade de resistência do material submetido a condições de envelhecimento "acelerado";
- grau de interação entre os materiais constituintes; e
- taxa de decomposição do material celulolítico constituinte da argamassa celulósica.

A capacidade de resistência do material ao longo de sua vida útil foi avaliada através da resistência à tração na flexão, determinada de acordo com o procedimento estabelecido na NBR 12142. Foram comparadas as médias dos valores obtidos no ensaio de quatro corpos-de-prova tratados em condições ambientais normais e de quatro corpos-de-prova submetidos ao processo de envelhecimento "acelerado" correspondente a dez ciclos de imersão em água e de secagem em estufa a 70 ºC, com duração de 24 horas para cada uma das atividades do ciclo. O processo de envelhecimento iniciou-se 28 dias após a moldagem dos corpos-de-prova.

O grau de interação entre os materiais constituintes foi avaliado pela observação da microestrutura do compósito através da microscopia. Comparando-se a microestrutura das amostras da argamassa celulósica, foi possível verificar a integridade da fibra de celulose, com e sem a solicitação de molhagem e secagem, e o comportamento da fibra na matriz, principalmente sua aderência.

A taxa de decomposição do material celulolítico por ação de microrganismos, que indica a biodeterioração da argamassa celulósica, foi determinada com a medida da perda de massa do material.

O efeito da argamassa celulósica na qualidade ambiental foi avaliado por meio de análises químicas em que é verificada a presença dos metais denominados pesados – arsênio, bário, cádmio, chumbo, cromo, mercúrio, prata e selênio –, em extratos obtidos da amostra submetida a condições de lixiviação e de solubilização, conforme procedimentos estabelecidos nas NBR 10005 e 10006. Os valores obtidos são comparados com os limites especificados na NBR 10004.

As atividades realizadas para o desenvolvimento de sistemas construtivos foram:

- projeto de sistemas construtivos e respectivos componentes;
- definição do processo de produção dos componentes;
- fabricação de componentes; e
- análise de desempenho dos componentes.

Entre os diversos sistemas construtivos estudados para forros e divisórias internas, decidiu-se desenvolver três deles, dois para forros e um para divisórias, com as seguintes particularidades:

- forro instalado diretamente sobre a parede de uma habitação com componentes colocados lado a lado, denominado FORRO T;
- forro instalado sobre vigas de madeira, com componentes encaixados no sentido longitudinal e dispostos lado a lado no sentido transversal, denominado FORRO TELHA; e
- divisória interna com componentes de altura igual à do pé-direito da habitação, dispostas lado a lado, denominada DIVICEL.

Alguns exemplares do FORRO T foram armados com tela de aço galvanizado, visando a avaliar melhorias no manejo, transporte e segurança de uso. A denominada tela dura corresponde à armação de aço galvanizado, soldada, com abertura de malha retangular de dimensões 50 mm x 100 mm e fio 12 (f 2, 77 mm); a tela mole corresponde à armação de aço galvanizado, trançada, com abertura de malha hexagonal de dimensão 12, 5 mm e fio 24 (f 0, 56 mm).

Após a definição dos respectivos componentes, foram desenvolvidos seus moldes, adotando-se os seguintes requisitos:

- uso de molde metálico composto de peças de fácil execução;
- uso de balcões ou cavaletes apropriados para permitir a moldagem na altura de aproximadamente 0,95 m, em posição confortável para o operário;
- processo de adensamento com alguma forma de controle de modo a garantir uniformidade nas características do componente fabricado; e
- desmoldagem imediata.

Algumas características dos componentes desenvolvidos são apresentadas na Tabela 3, e a programação de ensaios para análise de desempenho, na Tabela 4.

Discriminação	Unidade	Componente		
		FORRO T	FORRO TELHA	DIVICEL
Comprimento	m	2,50	1,20	2,50
Largura	m	0,33	0,50	0,30
Altura	m	0,15	0,08	0,08
Área total	m^2	0,82	0,60	0,75
Área útil	m^2	0,78	0,58	0,72
Volume total	m^3	0,038	0,021	0,029
Massa	kg	60	25	50
Massa específica aparente[1]	kg/m^3	1,58	1,19	1,72
Momento de inércia	cm^4	2330	507	432
Centróide	cm	3,91	2,07	2,37

[1] Relação entre a massa e o volume total do componente

Tabela 3 – Especificação dos componentes

Componente	Nº componente fabricado	Ensaios
FORO T	50	resistência à flexão e carga suspensa
FORRO TELHA	20	resistência à flexão e impacto (corpo duro)
DIVICEL	20	resistência à flexão, impacto (corpo mole) e carga suspensa

Tabela 4 – Programação para avaliação de desempenho de componentes

O ensaio de flexão avalia a ação de cargas acidentais no componente e mede sua capacidade de resistência. Consiste em aplicar, no meio do vão do componente apoiado nas duas extremidades, uma carga com velocidade constante até sua ruptura. Os dispositivos de aplicação da carga e de apoio constituem-se de semicilindros de aço, acoplados a roletes, também de aço, de modo a permitir a distribuição da carga ao longo da largura da peça e o giro livre desta durante o ensaio de flexão.

O ensaio de carga suspensa avalia a ação de objetos pendurados no componente. O ensaio realizado no FORRO T mede a deformação do componente quando sub-

metido a cargas constantes durante determinado período; em DIVICEL, avalia o comportamento, tanto do material quanto do componente, sob a ação de uma carga excêntrica, que equivale à fixação de tanques, pias, prateleiras, entre outras, na parede.

O ensaio de carga suspensa realizado no FORRO T consistiu em aplicar, no meio do vão do componente apoiado nas duas extremidades, uma carga estática, que variou em 100 N, 200 N e 300 N, durante 30 dias, cada uma em um exemplar; em outro, foi aplicada, durante 7 dias, a carga superior a 50% da carga de ruptura no ensaio de flexão. As deformações ocorridas são comparadas à deformação medida em um exemplar sem carga.

Para o DIVICEL, adaptou-se o método de ensaio estabelecido na NBR 11678, que trata da verificação do comportamento sob ação de cargas provenientes de peças suspensas para divisórias leves internas moduladas e consiste em aplicar uma carga de 980 N, por meio de quatro apoios paralelos dois a dois. O suporte para aplicação da carga é constituído de duas mãos francesas interligadas no sentido horizontal, distantes 500 mm. A distância entre os dois apoios verticais de cada mão francesa é de 150 mm, e a carga é aplicada a 300 mm da superfície da divisória. Os apoios superiores são engastados no material da divisória. O tempo de duração do ensaio é de 24 horas.

Para o ensaio de DIVICEL, usou-se apenas uma mão francesa e carga aproximada de 500 N. O suporte foi fixado por sua extremidade superior por meio de dois elementos de fixação distintos: bucha embutida na argamassa celulósica com parafuso para fixação e parafuso passante fixado com porca na sua extremidade. O comportamento da argamassa celulósica quanto a esforços de arrancamento é avaliado pela verificação do elemento de fixação do ponto de contato superior e pela deformação do componente.

O ensaio de impacto avalia a ação de carga dinâmica atuando acidentalmente no componente em situações normais de uso. O ensaio de corpo mole corresponde a impactos casuais de pessoas, móveis e outros objetos e avalia seu comportamento quanto à segurança estrutural; o ensaio de corpo duro corresponde a impactos acidentais de objetos pontudos e avalia o dano superficial no componente e seu comportamento estrutural.

O ensaio de corpo mole realizado em DIVICEL consistiu em aplicar, no meio do vão do componente colocado em posição horizontal e apoiado nas suas extremidades, a carga de uma massa de 30 kg abandonada em queda livre em alturas a partir de

0,15 m (45 J) até sua ruptura. Os impactos são aplicados por meio de um saco cilíndrico, com diâmetro de 250 mm e comprimento de 500 mm, contendo areia seca.

O ensaio de corpo duro, realizado no FORRO TELHA, foi adaptado da NBR 12764 e consistiu em aplicar 11 impactos regularmente distribuídos sobre a superfície do componente colocado em posição horizontal e apoiado nas suas extremidades. Os impactos são aplicados por meio de uma esfera de aço com massa de 1 kg abandonada em queda livre em alturas a partir de 0,20 m (2 J) até 0,90 m (9 J).

Resultados e discussão

Caracterização do material

Características físicas

A Figura 3 apresenta o comportamento das diferentes composições da argamassa celulósica sob a ação da água, e a Figura 4, a relação entre duas de suas características.

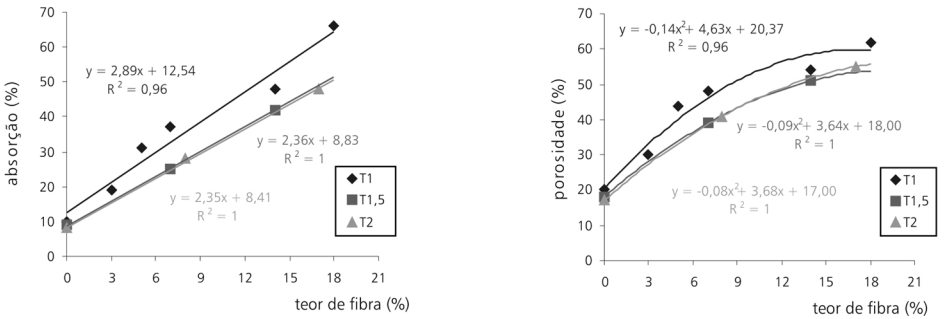


Figura 3 – Variação da absorção por imersão e da porosidade por matriz

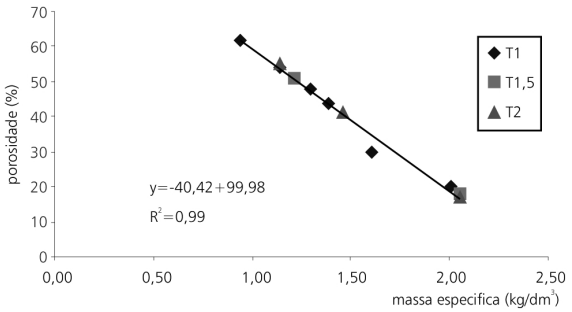


Figura 4 – Relação entre massa específica e porosidade

Constata-se que o aumento do teor de fibras na argamassa celulósica aumenta consideravelmente a porosidade e a absorção de água por imersão. Para compósito com 18% de fibras, o acréscimo da porosidade supera 200%, e o da absorção de água, 500% em relação ao da matriz.

Para a argamassa celulósica, constata-se que a porosidade é afetada, significativamente e de modo direto, pelo teor de fibras, porém é pouco influenciada pela proporção dos materiais da matriz. A porosidade apresenta forte correlação linear com a massa específica da argamassa celulósica, independentemente da proporção de materiais da matriz, cujos valores, para cada teor de fibras, pouco diferem entre as três matrizes estudadas.

Características mecânicas

A Figura 5 apresenta os resultados das resistências à compressão e à flexão das composições da argamassa celulósica estudadas.

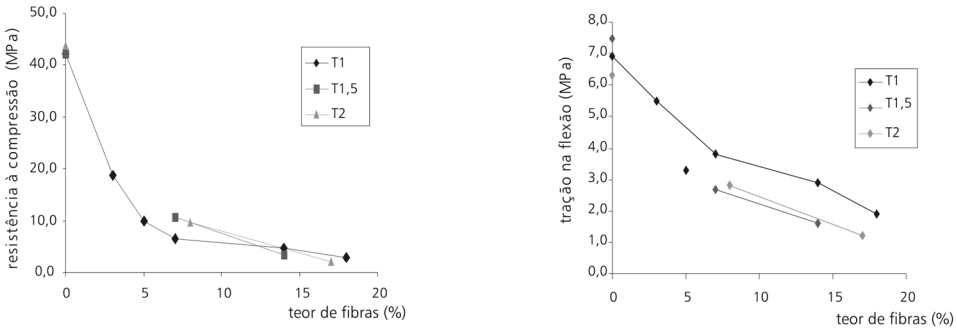


Figura 5 – Variação da resistência à compressão e da flexão por matriz

Os vazios introduzidos na argamassa pela adição das fibras de celulose aumentam significativamente a porosidade do material, que, conseqüentemente, reduz sua resistência mecânica, conforme se observa na Figura 5. Aparentemente, a alteração da matriz pouco afeta as propriedades mecânicas da argamassa celulósica.

A relação entre resistência à compressão e resistência à tração da matriz – argamassa de cimento e areia – está entre 8 e 10; ao se adicionar a fibra, esta relação vai diminuindo e chega até a 1,5 para o teor de 18% de fibra.

A resistência ao impacto, contudo, aumenta consideravelmente, comprovando-se a grande contribuição das fibras de baixo módulo de elasticidade nos compósitos

de matrizes frágeis. Corpos-de-prova (placas de 20 cm x 20 cm x 2 cm) de argamassa sem fibras fissuram e rompem bruscamente com o impacto de uma esfera de 1 kg; corpos-de-prova de argamassa celulósica absorvem o impacto da esfera, apresentando maiores deformações (visíveis a olho nu) e ocorrências de fissuras, cujas aberturas aumentam com o aumento da altura de queda da esfera. Enquanto um dos três corpos-de-prova de argamassa sem fibras rompeu-se devido ao impacto da esfera com altura de queda de 20 cm, os corpos-de-prova de argamassa celulósica com teor de fibras superior a 14% resistiram ao impacto da esfera com altura de queda de 40 cm.

As referências T1, T1,5 e T2 significam os traços com matrizes de proporção 1:1, 1:1,5 e 1:2 de cimento e areia, respectivamente.

O comportamento mecânico da argamassa celulósica é bastante diferente do comportamento da matriz. A primeira tem mais ductilidade e é mais tenaz, porém menos resistente. Em decorrência dos resultados, deduz-se que a argamassa celulósica é adequada para fabricação de componentes sujeitos a impactos.

A argamassa celulósica é relativamente sensível às condições de exposição. Quando submetida a variações de temperatura e umidade, o comportamento mecânico e hidráulico observado indica que seu uso não é adequado em ambientes com solicitações dessa natureza, tais como nas coberturas e fachadas de edificações em regiões de clima tropical. No entanto, pode ser usada para fabricação de painéis internos para vedações horizontais ou verticais, tais como forros e divisórias.

Em função desses resultados, decidiu-se não dar continuidade ao desenvolvimento de painéis-sanduíche com placas de argamassa celulósica e núcleo de espuma de poliuretano, pois se pretendia usá-los para vedação externa.

Durabilidade da argamassa celulósica

Capacidade de resistência

Os resultados da resistência à tração na flexão após o processo de envelhecimento "acelerado" (ciclos de molhagem e secagem em relação ao material mantido em ambiente normal), comparados aos da resistência à tração na flexão sem o processo de envelhecimento adotado, indicam que ocorre perda de até 40% da resistência à tração na flexão da argamassa celulósica submetida ao envelhecimento "acelerado". A redução não é proporcional ao teor de fibras, nem apresenta relação aparente com a proporção da matriz. A Figura 6 apresenta resistências à tração na flexão da

argamassa celulósica da matriz de proporção 1:1 com e sem o processo de envelhecimento, identificados como T1env e T1amb, respectivamente, cuja perda de resistência atingiu 30% para o teor de fibra de 5%.

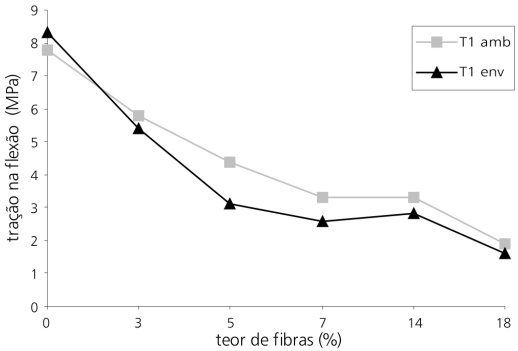


Figura 6 – Variação da resistência à tração na flexão devido ao envelhecimento "acelerado"

O comportamento da matriz, no entanto, é contrário ao da argamassa celulósica: existe ganho de resistência à tração na flexão após o envelhecimento acelerado. Essa constatação sugere que, provavelmente, o processo de molhagem e secagem proporciona uma pós-cura do cimento, melhorando sua hidratação e modificando a forma e quantidade dos produtos hidratados, resultando em ganho de resistência para a argamassa de cimento e areia; as fibras de celulose incorporadas à matriz modificam consideravelmente seu comportamento.

Agopyan e Savastano Jr. (1998) comentam que os ensaios de envelhecimento acelerado, mesmo que não representem o envelhecimento natural do material, permitem, de qualquer modo, inferir comportamentos relativos à sua qualidade, através de análises comparativas. Dessa forma, o resultado do ensaio de capacidade de resistência da argamassa celulósica submetida ao processo de envelhecimento "acelerado" deve ser registrado como mais um indicador de desempenho, porém sem o caráter conclusivo sobre o comportamento do material quanto à sua durabilidade.

Comportamento da microestrutura

Na zona de transição fibra-matriz, as alterações na argamassa celulósica decorrentes da movimentação higroscópica e a integridade das fibras foram avaliadas pela observação da microestrutura através dos microscópios ótico e do eletrônico de varredura (MEV). Algumas imagens são apresentadas nas Figuras 7 a 10.

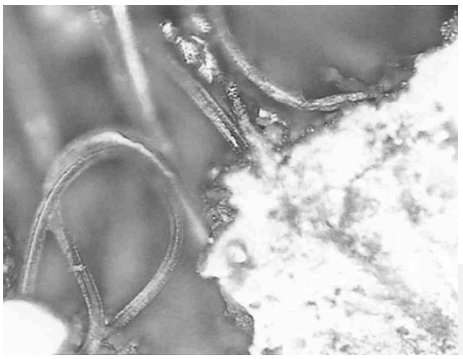


Figura 7 – Microscópio ótico – Amostra polida – tratamento normal – aumento 100x

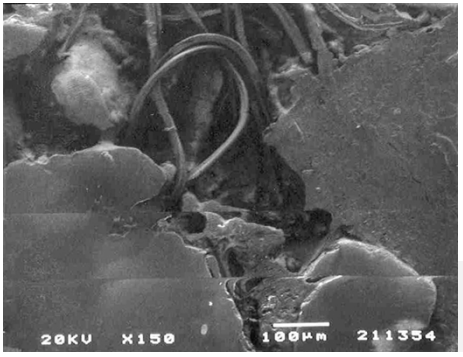


Figura 8 – MEV/SEI – Amostra polida – tratamento normal – aumento 150x

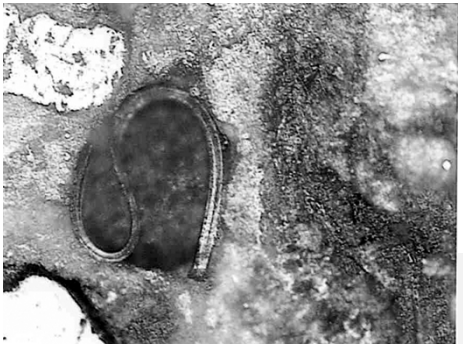


Figura 9 – Microscópio ótico – Amostra polida – envelhecimento "acelerado" – aumento 100x

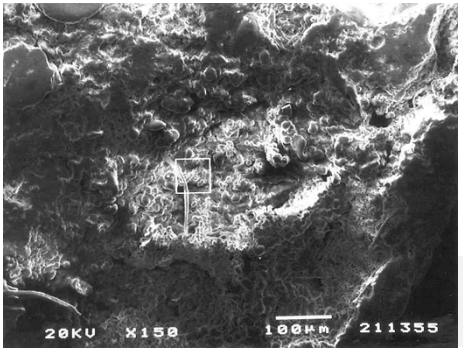


Figura 10 – MEV/SEI - Amostra polida – envelhecimento "acelerado" – aumento 150x

Em função das imagens obtidas na exploração efetuada na microestrutura da argamassa celulósica com auxílio dos microscópios, pode-se concluir que as fibras de celulose estão incorporadas à matriz de forma isolada ou em feixes. Constata-se que a elevada quantidade de vazios da argamassa celulósica, já identificada nos ensaios de caracterização, concentra-se, preferencialmente, na região em que se encontram as fibras, principalmente nas proximidades dos feixes de fibras. A matriz mostra-se compacta e uniforme, com grãos de areia bem distribuídos e envolvidos pelo cimento hidratado.

Não foram observadas diferenças significativas nas microestruturas da amostras de tratamento normal e de envelhecimento "acelerado". Em princípio, pode-se afirmar que existe boa aderência entre a fibra e a matriz, mesmo nas amostras submetidas ao envelhecimento "acelerado". Não ocorrem fissuras na argamassa celulósica como os registrados por Savastano Jr., Dantas e Agopyan (1994) e por Savastano Jr. e Agopyan (1999) em compósitos de pasta de cimento reforçados com fibras vegetais – coco, sisal, malva, e fibras de polipropileno e de amianto. Talvez, os vazios resultantes dos processos de moldagem e de evaporação da água utilizada no preparo do compósito permitam a movimentação dos materiais constituintes sem proporcionar fissuração.

Biodeterioração

A Figura 11 apresenta o comportamento de biodeterioração da polpa de celulose e da argamassa celulósica, com matriz 1:1,5, teor de fibras de 14% e relação a/c de 1,52. Indica a perda de massa individual em função do tempo e a análise de regressão da decomposição de cada material, incubados durante 75 dias em ambiente com 100% de umidade.

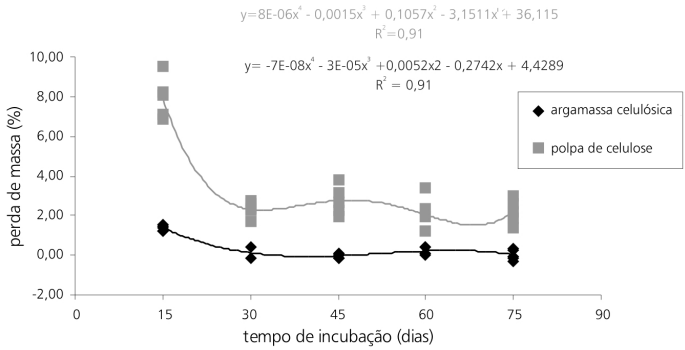


Figura 11 – Biodeterioração da polpa de celulose e da argamassa celulósica

Os resultados obtidos mostram que a celulose apresenta rápida decomposição quando as condições são favoráveis ao desenvolvimento dos microorganismos celulolíticos, especialmente relacionadas aos teores de umidade do material e do ambiente – umidade relativa do ar.

Agopyan (1991) comenta que as fibras vegetais procedentes da madeira, basicamente fibras de celulose, apesar de higroscópicas, não são afetadas pelos agentes de deterioração de vegetais no ambiente natural. Relata estudos realizados referentes aos mecanismos de deterioração de compósitos em que materiais reforçados com fibras de madeira mostraram-se duráveis, tendo alguns produtos mais de 30 anos de idade. Agopyan e Savastano Jr. (1998) ressaltam que o ataque biológico por meio de fungos xilófagos não apresenta maiores preocupações quanto à durabilidade dos compósitos formados por matrizes frágeis e fibras vegetais porque as matrizes apresentam pH alcalino capaz de inibir sua ação.

Porém, os microorganismos basólifos ou neutrófilos, que vivem em ambientes alcalino ou neutro, como as bactérias utilizadas neste estudo, podem proporcionar a troca de matérias para sua atividade vital, porém indesejável do ponto de vista humano e da durabilidade do material. É importante ressaltar que, no estudo realizado, a inoculação da argamassa celulósica com microorganismos celulolíticos é intensa (maciça), o que geralmente não ocorre em condições normais de exposição.

Impacto Ambiental

Por conhecer a origem das matérias-primas da argamassa celulósica, cujas substâncias mais prováveis de contaminação correspondem, certamente, aos metais pesados, decidiu-se analisar apenas essas concentrações, embora a NBR 10004 relacione outras substâncias prejudiciais ao meio ambiente. A Tabela 5 apresenta as concentrações dos metais pesados determinadas nos testes de lixiviação e solubilização da argamassa celulósica, traço 1:1:0,18:1,80, e os respectivos limites máximos permitidos para resíduos sólidos pela NBR 10004.

A técnica de análise utilizada não permite assegurar que haja ausência de determinadas substâncias analisadas, entretanto pode-se afirmar que, se presente, sua concentração não atinge o limite de detecção do aparelho, cuja sensibilidade é representada por valores após o símbolo menor que (<). O bário presente na argamassa celulósica origina-se, provavelmente, da argila ou da rocha calcária usada para fabricação do cimento.

Todos os resultados encontram-se abaixo aos limites especificados pela norma de referência, comprovando que a argamassa celulósica não apresenta risco à saúde pública no que se refere à possível liberação de metais pesados para o meio ambiente.

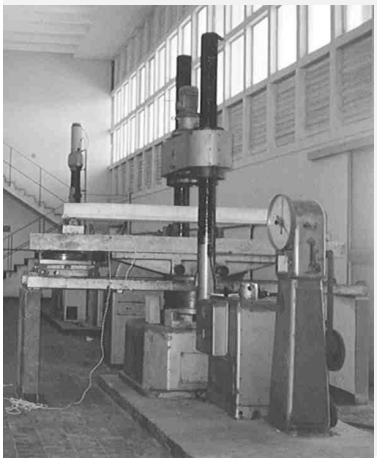
Metal	por lixiviação (mg/l)		por solubilização (mg/l)	
	teste	limite máximo NBR 1004	teste	limite máximo NBR 10004
Arsênio	<0,005	5,0	<0,005	0,05
Bário	0,66	100,0	0,73	1,0
Cádmio	<0,02	0,5	<0,005	0,005
Chumbo	<0,2	5,0	<0,05	0,05
Cromo	0,15	5,0	0,006	0,05
Mercúrio	<0,001	0,1	<0,001	0,001
Prata	<0,05	5,0	<0,05	0,05
Selênio	<0,002	1,0	<0,002	0,01
Procedimento	NBR 10005		NBR 10006	

Tabela 5 – Concentração de metais

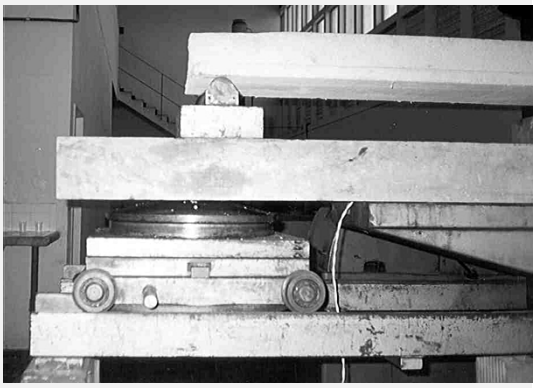
Avaliação de desempenho dos componentes

Conforme programado, foram realizados ensaios de resistência à flexão, carga suspensa e impacto de corpo mole e corpo duro nos componentes desenvolvidos, apresentados na Figura 12.

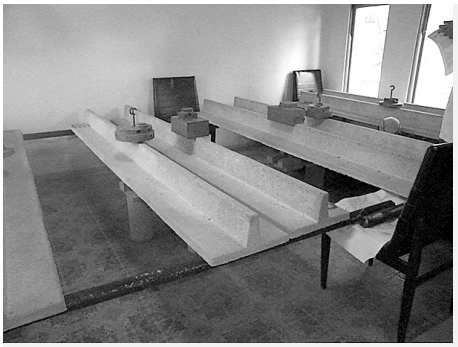
ensaio de resistência à flexão - FORRO T



máquina de ensaio



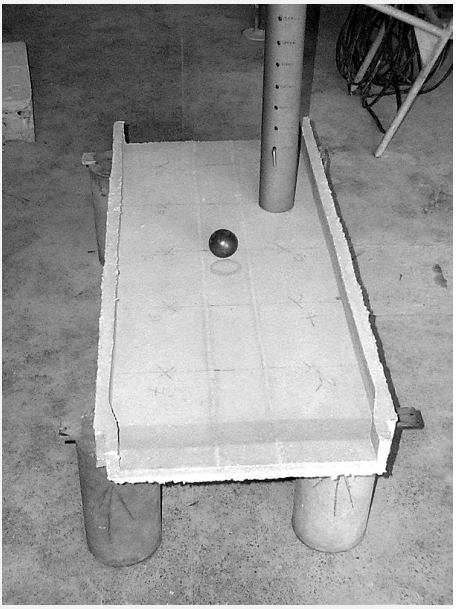
dispositivo de apoio do FORRO T



carga suspensa em FORRO T

extensômetro para medir deformação

carga suspensa em DIVICEL



impacto de corpo duro em FORRO TELHA

Figura 12 – Ensaio dos componentes

No ensaio de resistência à flexão, a carga de ruptura representa a capacidade de carga de cada componente e depende, principalmente, do material, do formato da seção e do vão livre. Para avaliar esses valores e comparar com outras referências e entre os próprios componentes desenvolvidos, deve-se calcular a resistência à flexão ou módulo de ruptura.

A Tabela 6 apresenta o valor médio das cargas de ruptura de cada componente, obtidas no ensaio de flexão, e a resistência à flexão, calculada pela expressão:

$$\sigma_f = \frac{M}{I/c} = P \times \frac{\ell}{4} \times \frac{c}{I}$$

sendo:

σ_f – módulo de ruptura ou resistência à flexão em MPa;

M – momento máximo em N´m;

P – carga de ruptura em N;

ℓ – vão livre em m;

I – momento de inércia em m4; e

c – centróide, distância entre a aplicação da carga e a linha neutra, em m.

Componente	FORRO T				FORRO TELHA		DIVICEL
Traço	1:1,5:0, 12:1, 10	1:3,0:0,12:1,31			1:3,0:0,12:1, 10		1:3,0:0, 12:1,31
		sem armação	tela dura	tela mole	nas abas	na base	
Média	1552	917	1746	694	2375	1357	158
Desvio	*166*	*200*	*112*	*425*	*119*	*64*	*39*
CV (%)	*11*	*22*	*6*	*61*	*5*	*5*	*24*
Nº exemplares	4	4	2	4	4	4	3
Resistência à flexão (MPa)	153	90 156[1]	172	68	267	152	51

[1] Componente com vão livre de 1,17 m

Tabela 6 – Resistência à flexão dos componentes

Constata-se que o uso da tela na base do FORRO T proporcionou resultados variados, sugerindo que o processo de colocação deve ser modificado. Ao se programar o componente armado, teve-se a intenção de obter maior deformação no componente sem comprometimento de sua integridade. A tela colocada permitiu deformações do componente três vezes maiores do que no componente sem a armação. A tela mole apresentou diferenças na resistência à flexão: valores mais baixos e variação significativa entre eles.

Não foi definido um valor de referência da resistência à flexão para os componentes desenvolvidos. A intenção, quando se determinou a resistência à flexão como principal requisito para a análise de desempenho estrutural, foi avaliar também as condições de manuseio, armazenamento e instalação de cada componente e associá-las aos valores de resistência à flexão obtidos, momento de inércia e vão livre. Fabricados no CEPED, em Camaçari, os componentes destinados ao ensaio de flexão foram transportados por caminhão para o Laboratório de Materiais da Escola Politécnica, em Salvador, a 60 km de distância, ocasião que possibilitou avaliar a capacidade de suportar solicitações que eles serão normalmente submetidos antes do seu uso na edificação. Assim, constatou-se a fragilidade do DIVICEL e a facilidade de manuseio do FORRO TELHA.

O ensaio de carga suspensa do FORRO T foi realizado com um exemplar para cada carga, no total de cinco exemplares por componente, com acompanhamento do carregamento e deformação durante 30 dias. A Figura 13 mostra o comportamento do componente fabricado com o traço 1:1,5:0,12:1,10 durante as solicitações.

O carregamento máximo do componente com relação entre areia e cimento de 1,5 foi de 900 N, equivalente a 58% da média das cargas de ruptura no ensaio de flexão, e o do componente com relação entre areia e cimento de 3 foi de 630 N, equivalente a 68% da média das cargas de ruptura no ensaio de flexão. Os dois exemplares com carregamento máximo romperam aos 20 dias de ensaio com deformações da ordem de 4 mm.

Os componentes com relação entre areia e cimento de 1,5 apresentaram comportamento uniforme com as deformações diretamente relacionadas com as cargas: quando maior a carga, maior a deformação. Nos componentes com relação entre areia e cimento de 3, não se observou essa relação.

É interessante ressaltar os valores de deformação alcançados nos ensaios realizados: no de carga suspensa, em que o carregamento é estático e permanente, após 30 dias de ensaio, os componentes atingiram deformação da ordem de 4 mm e não apresentaram fissuras; no ensaio de flexão, em que o carregamento é crescente, eles romperam com deformações da ordem de 9 mm e 6 mm para componentes com relação entre areia e cimento de 1,5 e 3, respectivamente. Por uma questão de progra-

mação de ensaio, não foi possível dar continuidade ao ensaio de carga suspensa para verificar a possível estabilidade da deformação ou seu crescimento até a ruptura do componente.

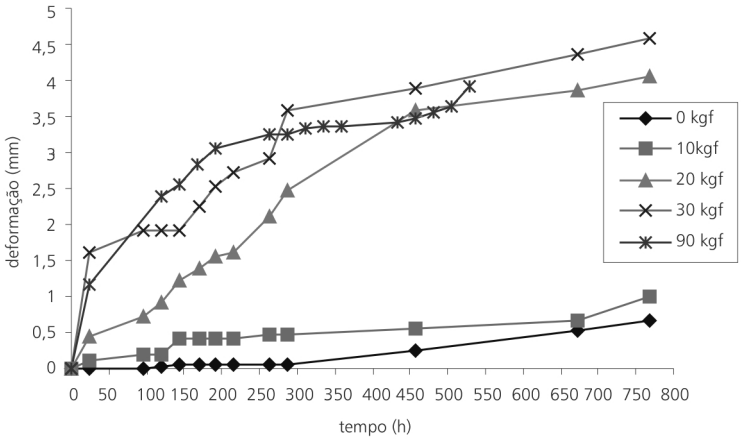


Figura 13 – Deformação do FORRO T no ensaio de carga suspensa – Traço 1:1,5:0,12:1,10

Para avaliar o comportamento de DIVICEL em relação à solicitação de carga suspensa, foram ensaiados três exemplares: dois com a carga de ensaio localizada no meio e outro com a carga colocada a dois terços da sua altura. Foram testados dois tipos de fixação do equipamento do ensaio: bucha plástica embutida na argamassa celulósica com parafuso apropriado e parafuso passante com porca e arruela. A fixação com bucha plástica não foi eficiente: verificou-se a tendência do espaço aberto para a colocação da bucha aumentar durante a solicitação, folgando o sistema de fixação que se soltou, juntamente com a carga nele pendurada. A fixação com parafuso passante foi eficiente.

A carga de 500 N (50 kgf) foi mantida suspensa por quatro dias sem apresentar deformação ou outros danos nos componentes ensaiados.

Para avaliar o comportamento de DIVICEL quanto ao impacto de corpo mole, foram ensaiados três exemplares. Nenhum deles resistiu ao impacto da massa de 30 kg com altura de queda livre de 20 cm, correspondente a energia de 60 J.

Três exemplares de FORRO TELHA foram ensaiados para avaliar seu comportamento quanto ao impacto de corpo duro. Para cada energia do ensaio, cada exemplar foi marcado em 11 posições de impacto, conforme mostrado na Figura 14. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

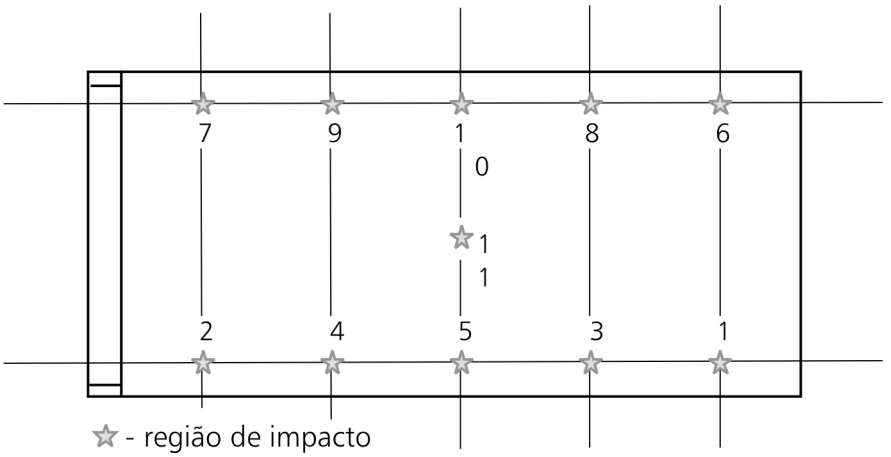


Figura 14 – Locais do impacto da esfera em FORRO TELHA

Altura de queda (m)	Energia (J)	Identificação do exemplar		
		O	M	S
0, 2	2	sem alteração	sem alteração	sem alteração
0, 3	3	sem alteração	sem alteração	sem alteração
0, 4	4	sem alteração	sem alteração	sem alteração
0, 5	5	sem alteração	sem alteração	sem alteração
0, 7	7	sem alteração	sem alteração	ruptura em 3
0, 9	9	fissura em 6, 7 e 11	ruptura em 8	

Tabela 7 – Comportamento de FORRO TELHA no ensaio de impacto

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o FORRO TELHA suporta energia de impacto de corpo duro de 5 J. Segundo a orientação constante em *Critérios mínimos de desempenho para habitações em terras de interesse social* (INSTITUTO..., [1999?]), no ensaio de impacto de corpo duro, os componentes não devem sofrer

fissuras, escamações, delaminações ou qualquer outro tipo de dano sob ação dos impactos de utilização, nem ruptura ou trespassamento sob ação dos impactos de segurança. Define também os limites de energia de impactos de utilização e de segurança para os diversos usos de componentes. Para forros, não existem limites específicos, porém, para telhados e coberturas, se estabelece o valor mínimo de 1 J como impacto de segurança. Os valores obtidos no ensaio de impacto de corpo duro atendem ao limite adotado.

Entre os componentes desenvolvidos, DIVICEL apresentou grande fragilidade para o transporte e manuseio, e até mesmo para suportar seu peso próprio, FORRO T apresentou alguma fragilidade durante o transporte, com a perda de alguns exemplares, e FORRO TELHA teve comportamento normal.

Associando essas observações aos resultados obtidos, pode-se afirmar que resistência à flexão da ordem de 50 MPa é inferior ao valor necessário para transporte e manuseio de componentes com comprimento de 2,50 m. Mesmo para componentes com momento de inércia maiores ($M_{FORRO\ T} > 5 \times M_{DIVICEL}$), constata-se que o comprimento dessa ordem de grandeza não é adequado para componentes de argamassa celulósica produzidos com o processo de fabricação adotado. Por outro lado, o FORRO TELHA, com comprimento de 1,20 m, não apresentou fragilidade no transporte e manuseio, mesmo com momento de inércia da mesma ordem de grandeza do de DIVICEL.

O desenvolvimento de componentes, tanto de forro como de divisória, com comprimento de 2,50 m baseou-se na intenção de utilizar um único exemplar para vencer o vão livre ou o pé direito de uma habitação popular. Considerando os resultados obtidos como ponto de partida para concepção de componentes de argamassa celulósica produzidos com o processo de fabricação adotado neste projeto, pode-se concluir que é preferível projetar componentes com comprimentos menores, da ordem de 1,20 m.

Desenvolvimento de sistemas construtivos

A produção de componentes habitacionais de argamassa celulósica engloba desde a preparação da polpa de celulose até o controle de qualidade do produto. O processo de produção compõe-se das seguintes etapas:

preparação da polpa – consiste em submeter o papel cortado em tiras a um processo mecânico de desfibramento por hélices, com agitação[5]. O papel é introduzido no equipamento, com bastante água, e agitado por, no mínimo, 30 minutos;

retirada de água da polpa – consiste em retirar o excesso de água utilizado no preparo da polpa[6]. Coloca-se o material em uma peneira e este é pressionado com as mãos;

preparo da mistura – a areia e o cimento são colocados no equipamento apropriado e misturados durante 2 minutos. Adiciona-se a polpa e, se necessário, água, misturando-se por mais 7 a 8 minutos;

fabricação de componentes – moldagem
adensamento
desmoldagem
cura
armazenamento

Devido à potência do motor do equipamento, foi necessário adicionar bastante água no processo de desfibramento do papel; por isso, procedeu-se à redução manual do volume de água da polpa. Nesse caso, ou quando não se dispõe de um sistema de controle da quantidade de água usada no preparo da polpa, é necessário determinar a umidade da polpa antes do preparo da argamassa celulósica, de modo a garantir sua consistência e outras características, tanto no estado fresco quanto endurecido. A umidade da polpa, correspondente à relação entre a massa de água e a massa do material seco, é determinada por secagem em estufa.

A Figura 15 mostra as etapas de preparação da polpa de celulose.

[5] O equipamento usado para o desfibramento, denominado *hidropulper*, foi desenvolvido pela PRE-LEVE – Pré-Moldados Leves Ltda.
[6] É possível eliminar esta etapa e obter polpa com menor quantidade de água.

colocação de tiras de papel imprensa no *hidropulper*

material liberado pelo desfibrador – *hidropulper*

retirada de água do material liberado pelo desfibrador

aspecto da polpa

Figura 15 – Preparação da polpa

Fabricação de Componentes

O processo de produção dos componentes varia em função da forma, porém, em geral, corresponde às seguintes atividades:

- instala-se o molde sobre o cavalete;
- coloca-se uma camada de argamassa celulósica no molde;
- compacta-se a argamassa celulósica com um soquete, cuja seção, retangular ou circular, tenha dimensões adequadas para que penetre nos espaços disponíveis;
- espalham-se outras camadas de argamassa celulósica no molde, compactando cada camada com soquetes apropriados;
- regulariza-se a superfície com a passagem de uma régua – sarrafo – tomando as bordas como guias;
- coloca-se uma placa de madeira (compensado naval ou *madeirit*) sobre o molde, com largura e comprimento superiores ao do molde, fixando-a com parafusos para permitir que o molde seja emborcado sem comprometer o material adensando; e
- vira-se o conjunto, retiram-se os parafusos e depois o molde, deixando o componente recém-fabricado sobre a placa de madeira até sua secagem.

Para o FORRO T e FORRO TELHA, após a regularização da superfície, a argamassa celulósica é adensada com a passagem de um rolo com largura de 300 mm e massa de 26 kg.

As Figuras 16 a 18 mostram o processo de moldagem dos componentes.

Não foi possível identificar um procedimento para determinação do "ponto ótimo" de adição de água à mistura, a não ser empiricamente. Para cada componente desenvolvido no processo de produção de componentes habitacionais, a quantidade de água adicionada foi determinada em função das proporções e das características dos materiais constituintes, dos equipamentos utilizados, do molde e do processo de moldagem do próprio componente.

Para a produção de componentes, os materiais que apresentam menor porosidade e menor absorção de água são preferíveis, pois produzirão componentes com características físicas melhores. Considerando somente esses aspectos, o traço 1:3,0:0,12:1,10 (cimento:areia:fibra:água) produzirá a argamassa celulósica mais adequada para fabricação de componentes. Devido ao processo de moldagem; no entanto, nem sempre é possível adotar essa proporção de água no traço, como ocorreu na argamassa celulósica usada na fabricação do FORRO T e DIVICEL.

Constatou-se que o teor de água no traço tem mais influência na capacidade de resistência mecânica da argamassa celulósica do que a proporção de areia em relação à massa de cimento. Por isso, é preferível trabalhar no sentido de reduzir a quantidade de água na mistura do que adotar traços mais ricos em cimento.

enchimento da forma

vista da forma

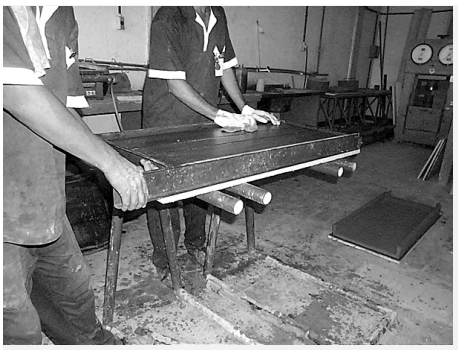
adensamento com soquete e com rolo

desmoldagem

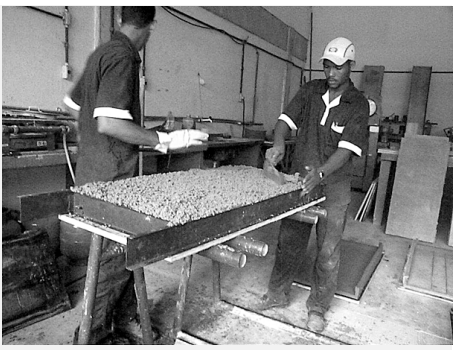
desmoldagem

componente recém-moldado

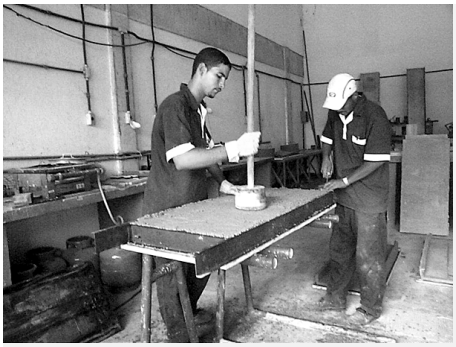
Figura 16 – Processo de moldagem do FORRO TELHA



vista da forma



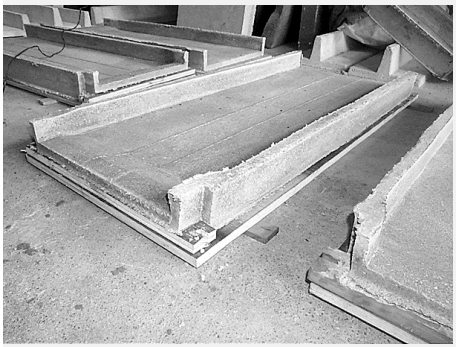
enchimento da forma



adensamento com soquete e com rolo

desmoldagem

desmoldagem



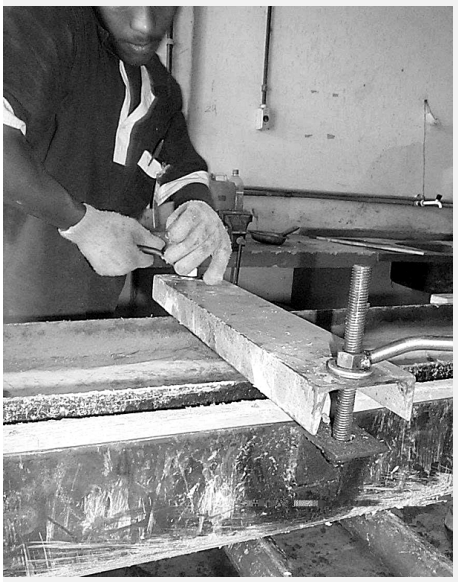
componente recém-moldado

Figura 17 – Processo de moldagem do FORRO TELHA

vista da forma

enchimento da alma

compactação da base



enchimento das laterais

desmoldagem

Figura 18 – Processo de moldagem de DIVICEL

Conclusão

O avanço de conhecimento proporcionado por este projeto pode ser notado, sobretudo, em três importantes aspectos.

O primeiro aspecto refere-se à amplitude e profundidade do estudo dirigido a um compósito específico: procurou-se delimitar a amplitude, como não estendê-lo ao emprego de outras fibras, por exemplo, em troca de maior aprofundamento, visando a obter melhor compreensão do comportamento desse compósito, considerando até os aspectos ambientais.

Uma outra contribuição significativa deste trabalho refere-se ao estudo da durabilidade, aprofundando a questão da modificação da microestrutura e introduzindo, como importante mecanismo, a biodegradação. Para isso, foi aplicado um procedimento já desenvolvido anteriormente para avaliar microestruturas de compósitos e foi definida uma metodologia para investigação e análise da degradação dos materiais mediante a ação de microorganismos. O processo de envelhecimento "acelerado" adotado para avaliar a alteração da capacidade de resistência pode não reproduzir fielmente as condições de uso do material ao longo do tempo de sua vida útil, porém permite inferir aspectos do comportamento do compósito relativos à sua durabilidade.

E, finalmente, um terceiro aspecto relevante no estudo é a introdução da análise dos efeitos do material na qualidade ambiental, tema ainda incipiente para os materiais de construção, mas indispensável nos enfoques atuais da engenharia, principalmente no contexto da Engenharia Ambiental Urbana.

Do estudo realizado, conclui-se que a argamassa celulósica pode ser caracterizada como um compósito de matriz frágil com reforço de fibra orgânica de baixo módulo de elasticidade, cujas propriedades para os materiais e traços estudados apresentam basicamente as faixas de valores indicadas a seguir.

Propriedade	Matriz[1]	Faixa de variação
Massa específica (kg/dm^3)		1,0 - 1,5
Porosidade (%)		60 - 40
Absorção de água por imersão (%)		60 - 25
Resistência à compressão (MPa)		3,2 - 10,0
Resistência à tração na flexão (MPa)	1:1	2,5 - 4,2
	1:1,5 1:2	1,0 - 2,5
Resistência à tração por comp. diametral (MPa)		1,0 - 2,0
Massa específica real (kg/dm^3)		2,48 0,02

[1] Os resultados referem-se a compósitos com teor de fibras incorporadas às matrizes variando de 6% a 18%

Na determinação de traços adequados para a fabricação de componentes habitacionais, devem ser consideradas as características necessárias à argamassa celulósica para atender às exigências próprias de uso do componente. Em termos econômicos, adota-se o traço de menor consumo de cimento.

Constata-se que a argamassa celulósica é suscetível à ação da água devido, sobretudo, ao elevado índice de absorção e comportamento permeável. Quando submetida às condições variadas de temperatura e umidade, apresenta comprometimento de sua capacidade de resistência durante o envelhecimento. A ação da deterioração físico-química do compósito nessas condições de exposição assim como a ação de deterioração por agentes biológicos devem ser devidamente consideradas sempre.

Pode-se concluir que modificações no processo de preparo da argamassa celulósica, principalmente com redução da quantidade de água usada para a mistura, ou com retirada da água no processo de adensamento, resultarão em material mais compacto e, portanto, mais resistente à ação posterior da água e de microorganismos, prolongando-se a vida útil do componente.

A argamassa celulósica, em princípio, não apresenta efeitos diretamente prejudiciais à qualidade ambiental. Como não existe ainda uma metodologia específica para avaliação do impacto ambiental de materiais de construção, optou-se por tratar a argamassa celulósica simplesmente como um resíduo sólido, pois ela certamente desempenhará essa função em determinado momento, após sua vida útil na edificação. Para estabelecer o potencial de riscos da argamassa celulósica à saúde pública e ao meio ambiente , determinou-se a concentração de metais pesados, utilizando os parâmetros e ensaios de lixiviação e de solubilização adotados para classificar os resíduos sólidos. No entanto, considera-se que, nos estudos sobre os efeitos de materiais na qualidade ambiental, é necessário determinar a possível presença de outras substâncias que possam vir a pôr em risco o ambiente.

Evidentemente que será necessário investir ainda mais no desenvolvimento de sistemas construtivos e, conseqüentemente, no processo de produção dos componentes. Para viabilizar a utilização ampla e rotineira da argamassa celulósica na construção civil, mais estudos serão necessários, entretanto um importante primeiro passo já foi dado.

Visando a contribuir para o andamento harmonioso dos materiais de construção com o meio ambiente, principalmente no caso de reciclagem ou reutilização de resíduos, e tomando como referências os resultados e conclusões deste projeto e a responsabilidade da engenharia civil para com a preservação da qualidade ambiental, sugere-se aprofundar ou aperfeiçoar os seguintes aspectos em futuros estudos e pesquisas:

- estudar o desempenho da argamassa celulósica em relação ao isolamento térmico e acústico;
- desenvolver novos métodos de envelhecimento acelerado para os materiais de construção compatíveis com as condições reais de exposição;
- estudar a influência das dimensões dos poros e sua distribuição no comportamento dos materiais;

- incluir o estudo de biodegradação dos materiais, inclusive com variação da atividade de água, considerando possíveis modificações nas condições ambientais;
- analisar a provável presença e liberação de substâncias nos materiais de construção periculosas à saúde pública e ao meio ambiente; e
- planejar ensaios de envelhecimento natural dos materiais ou produtos ao longo da vida útil para servir de referência no estabelecimento de critérios na análise da durabilidade.

Referências bibliográficas

AGOPYAN, Vahan. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais**. 1991. 204 f. Tese (Livre Docência) - Universidades de São Paulo, Escola de Engenharia, São Paulo: EPUSP, 1991.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JR., H. A experiência brasileira com as fibras vegetais. **Téchne**, São Paulo, 32, p. 38-43, jan./fev. 1998.

ARAÚJO, Marcelo G. Condicionantes sócio-econômico-culturais do ciclo de vida útil das edificações urbanas. In: WORKSHOP DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES, 1997, São Leopoldo. **Anais...** São Leopoldo, RS: UNISINOS/ ANTAC, 1997. p. 175-184.

BECK, Maria Darcy M. Linhas de financiamento para recuperação de áreas urbanas degradadas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL RECUPERAÇÃO DE ÁREAS URBANAS DEGRADADAS, 2., 1993, Salvador. **Anais...** Brasília: PNUD/MBES, 1994. p. 81-97.

BRASIL acompanha média mundial. **Celulose e Papel**, São Paulo, v. 13, n. 54, p. 16-17, maio/jun. 1996.

CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. **Compósito fibra vegetal-cimento**: análise da durabilidade. Relatório Final. Camaçari: CEPED/FINEP, 1992. 38 p. (Documento THABA nº 243/92)

D'ALMEIDA, Maria Luiza O. **Celulose e papel**. São Paulo: SENAI: IPT, 1981. (Publicação IPT n. 1193). v. 1: Tecnologia de fabricação da pasta celulósica. 492 p.; v. 2: Tecnologia de fabricação do papel. 402 p.

DALVA, C. **Papel**. Salvador: Universidade Federal da Bahia. Escola de Biblioteconomia e Documentação. [1985?]. (Notas de aula da disciplina EBI-175 História do Livro e das Bibliotecas).

DASSIE, C. Silvicultura no caminho do desenvolvimento sustentável. **Celulose e Papel**, São Paulo, v. 13, n. 54, p. 20-24, maio/jun. 1996.

FLAUZINO, Wanderley D. Durabilidade de materiais e componentes das edificações. In: **Tecnologia de edificações.** São Paulo: IPT/PINI, 1985. IPT/ Ded 35. p. 51-56.

HADDAD, J. F. Alternativa da destinação de resíduos sólidos. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE DESTINAÇÃO DO LIXO, 1994, Salvador. **Anais ...** Salvador: CONDER/Projeto Metropolitano, 1994. p. 11-26.

INDÚSTRIA bate recordes e investe no crescimento. **Celulose e Papel**, São Paulo, v. 13, n. 52, p. 29-31, jan./fev. 1996.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Critérios mínimos de desempenho para habitações térreas de interesse social**. São Paulo: IPT, [1999?]. 84 p.

KAUPATEZ, Ros M. Z. A importância da racionalização em intervenções por ajuda mútua: a contribuição técnica do IPT. In: SEMINÁRIO LATINO-AMERICANO ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA HABITAÇÃO E SANEAMENTO, 1987, Olinda. **Anais...** Brasília: MHU/PNUD, 1988. p. 57-71.

MEYER, F.; OLMER, L.-J. **Le papier et les dérivés de la cellulose.** Paris: Presses Universitaires de France, 1949. 128 p.

NEVES, Célia M. M. Cellulose mortar: environmental impact evaluation. In: SUSTAINABLE CONSTRUCTION INTO THE NEXT MILLENNIUM: ENVIRONMENTALLY FRIENDLY AND INNOVATIVE CEMENT BASED MATERIALS, 2000, João Pessoa. **Proceedings...** João Pessoa, 2000a. p. 486-496.

NEVES, Célia M. M. **Comportamento de argamassa celulósica e avaliação de seus efeitos na qualidade na qualidade ambiental.** Salvador, 2000. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2000b.

PLANTAS de proveta. **Veja***,* São Paulo, v. 31, n. 31, ed. 1558, p. 86-87, ago. 1998.

PRADO, E. da S.; PELIN, E. R. **Moradias no Brasil**: reflexões sobre o problema habitacional brasileiro. Belo Horizonte: CBMM/FIPE, 1993. 86 p.

RECICLANDO há mais de 57 anos. **Celulose e Papel**, São Paulo, v. 9, n. 41, p. 28-29, mar./abr. 1993.

SANTOS, O. M.; NEVES, C. M. M. Evaluation of the cellulose mortar biodeterioration used as building components. In: FIRST INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP ON MICROBIAL IMPACTS ON BUILDING MATERIALS, 2000, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: RILEM, 2002. CD-ROM.

SAVASTANO JR., H.; AGOPYAN, V. Transition zone studies of vegetable fibre-cement past composites. **Cement and concrete composites**, n. 21, p. 49-57, 1999.

SAVASTANO JR., H.; DANTAS, F. de A. S.; AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras**: correlação entre a zona de transição fibra-matriz e as propriedades mecânicas. São Paulo: IPT/Pini, 1994. (Publicação IPT 2168 – Boletim 67)