

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Curso de Especialização: Produção e Gestão do**  
**Ambiente Construído**

**Daniel Moreira Freire**

**Durabilidade de fibrocimentos reforçados com fibras  
vegetais: levantamento do estado da arte**

**Belo Horizonte,**  
**2016.**

**Daniel Moreira**

**DURABILIDADE DE FIBROCIMENTOS  
REFORÇADOS COM FIBRAS VEGETAIS:  
LEVANTAMENTO DO ESTADO DO ARTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização: Produção e Gestão do Ambiente Construído do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

**Orientador:** Aldo Giuntini de Magalhães

**Belo Horizonte,  
2016.**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus, pela sabedoria, saúde e pela possibilidade de vencer essa etapa na vida. Aos meus pais, pelo exemplo de vida e apoio. Aos meus irmãos, Bruno e Thiago e a toda minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Aldo pela oportunidade de me orientar na condução do trabalho final de curso. A UFMG, instituição notoriamente reconhecida pela excelência dos cursos ofertados, infraestrutura e corpo docente.

## RESUMO

Apesar de o fibrocimento reforçado com fibras vegetais ser um material com produção em escala industrial há mais de duas décadas, estudos ainda são necessários para a melhoria de seu comportamento mecânico de longo prazo. A alta alcalinidade da matriz cimentícia e a instabilidade dimensional das fibras vegetais são os principais fatores de degradação do fibrocimento. Este trabalho tem o objetivo de fazer um levantamento acerca do estado da arte desse material, verificando os principais agentes de degradação e os métodos de tratamento usualmente adotados para melhoria do seu desempenho. Serão estudados os efeitos da adição de resíduos da agroindústria, principalmente da cinza da casca de arroz (CCA), como material de substituição parcial do cimento Portland. Para caracterização da CCA, ensaios, como a termogravimetria e o índice de atividade pozolânica - NBR 5752 são realizados para verificar a sua reatividade pozolânica. Esses ensaios são importantes para analisar o potencial de substituição desses tipos de adições na produção de materiais a base de cimento. Para avaliar a durabilidade do material em estudo serão descritos os métodos empregados para a sua degradação acelerada. Por último, foram apresentados os resultados das propriedades mecânicas de compósitos produzidos com algum percentual de CCA, com base nos estudos disponíveis na literatura. Foi verificado que a adição de CCA é extremamente benéfica para o desempenho do fibrocimento, a médio e longo prazo, e ainda pode reduzir o seu custo de produção.

**Palavras-chave:** Fibrocimento.Cinza da casca de arroz.Durabilidade.Atividade Pozolânica.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cinza da casca de arroz - a) sem beneficiamento , b)material passante na peneira #1.2mm .....	25
Figura 2 - Curva DTG para pastas de cimento com 5 % de CCA em diferentes idades de cura.....	27
Figura 3 - Imagem da superfície de fratura do compósito reforçado com polpa Kraft, após submetido ao envelhecimento .....	28
Figura 4 - Adição dos constituintes .....	30
Figura 5 - Aspectos inicial e final das placas após aplicação de vácuo.....	31
Figura 6 - Ensaio de flexão de três pontos .....	32
Figura 7 - Software de leitura das cargas X deflexões .....	33
Figura 8 - Resultados do MOR para compósitos de referencia e com adição de CCA, na condução de umidade variável .....	34
Figura 9 - Resultados da energia especifica para os compósitos de referencia e com adição de CCA, na condução umidade variável.....	35
Figura 10 - Resultados do limite de proporcionalidade para os compósitos de referencia e com adição de CCA, na condução de umidade variável .....	36
Figura 11 - Curva tensão x deformação para amostras não degradadas .....	37
Figura 12 - Curva tensão x deformação para amostras degradadas .....	37

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Produção mundial de fibras de amianto (DNPM, 2015).....	10
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABREA	Associação Brasileira dos Expostos ao Amianto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A-C-H	Aluminatos de Cálcio Hidratados
S-C-H	Silicatos de Cálcio Hidratados
CCA	Cinza da Casca de Arroz
CH	Hidróxido de Cálcio
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CSH	Silicato de Cálcio Hidratado
DTG	Diferencial da Curva Termogravimétrica
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
IAP	Índice de Atividade Pozolanica
LOP	Limite de proporcionalidade
MEV	Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura
MOE	Módulo de Elasticidade
MOR	Módulo de Ruptura
S-A-C-H	Silicoaluminatos de cálcio hidratados
TG	Curva Termogravimétrica

# SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
2.1. DURABILIDADE E MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DE FIBROCIMENTO SEM AMIANTO .....	14
2.2. RETRAÇÃO DE MATERIAIS Á BASE DE CIMENTO .....	16
2.3. MÉTODOS DE DEGRADAÇÃO: CICLOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO E NATURAL .....	18
2.4. MÉTODOS DE TRATAMENTO .....	21
2.4.1 Processo de cornificação .....	21
2.4.2 Efeitos das adições minerais na produção de fibrocimento .....	23
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>26</b>
3.1. ENSAIO DE TERMOGRAVIMÉTRIA PARA ANÁLISE DA POZOLANICIDADE DA CINZA DA CASCA DE ARROZ .....	26
3.2. ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA PARA ANÁLISE DA MORFOLOGIA DAS PLACAS DE FIBROCIMENTO.....	28
3.3. ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA - NBR 5752 .....	29
3.4. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE FIBROCIMENTO .....	29
3.4.1. Mistura dos constituintes em um recipiente plástico .....	30
3.4.2. Retirada do excesso de água pela aplicação de vácuo .....	30
3.4.4. Retirada da água absorvida pelas fibras por compressão mecânica .....	31
3.4.5. Cura das placas .....	31
3.4.6. Obtenção das amostras .....	31
3.4.7. Preparação das amostras .....	32
3.5. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	32
<b>4. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS .....</b>	<b>34</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>38</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>39</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Um dos primeiros registros de aplicação de fibras naturais em componentes de construção com características frágeis foi na produção de tijolos de adobe. Durante a produção dos tijolos de terra crua (abode), raízes eram empregadas previamente à etapa de secagem. Embora a utilização de fibras como reforço em materiais cerâmicos teve início nas construções do antigo Egito, o seu primeiro emprego em escala industrial ocorreu apenas no ano de 1900 (ZILLE, 2009). Esse método de produção em larga escala foi proposto e patentado pelo austríaco Ludwing Hatschek, que utilizou processos similares adotados na indústria de papelão para produção de placas de fibrocimento reforçadas com fibras naturais de amianto. O processo de fabricação até hoje empregado com poucas alterações compreendia na drenagem a vácuo e compactação de uma mistura fluída de cimento e fibras de amianto lançadas em pequenas camadas até que se fosse atingida a espessura do produto final. Neste caso, as fibras foram utilizadas para melhoria do desempenho mecânico da matriz cimentícia após o início de fissuração.

O cimento-amianto é um material compósito constituído em maior volume por uma pasta de cimento, responsável pelas características de rigidez e resistência à compressão, sendo reforçada pelas fibras de amianto, conferindo ao material ductilidade e aumento de resistência à tração. Além dessas duas fases, esse material compósito apresenta uma zona de transição interfacial, que é uma região micrométrica formada entre as fibras de amianto e a pasta de cimento, responsável pela interação entre fibra/matriz, influenciando dessa forma significativamente nas propriedades do cimento-amianto.

Desde então, a consolidação da popularidade do cimento- amianto no mundo e no Brasil a partir da segunda metade do século XX se deve principalmente às características de desempenho apresentadas pela fibra de amianto. O amianto apresenta alta resistência à tração e ao desgaste superficial, bom isolamento térmico, flexibilidade, baixo custo e afinidade com outros materiais para comporem matrizes estáveis (ABREA, 2015). Estas propriedades são fundamentais para produção de produtos á base de fibras como material de reforço com durabilidade, comportamento mecânico e isolamento térmico compatível com suas diversas aplicações na indústria da construção civil.

No Brasil é principalmente utilizado na construção civil para produção de caixa d'água destinadas a habitações de interesse popular e, para produção de telhas corrugadas, sendo consideradas aplicações de baixa tecnologia. Nos últimos anos, o seu uso vem sendo intensificado em sistemas de fachadas racionalizadas, com o aproveitamento das técnicas construtivas já consolidadas na execução das vedações internas em gesso acartonado. Nos países industrializados, o fibrocimento é principalmente empregado na forma de placas planas delgadas para confecção dos painéis pré-fabricados de vedação, externo e interno, aplicados no sistema construtivo do tipo *dry wall*. Neste sistema de construção industrializado a fixação dos componentes de fechamento é realizada a seco sem a atualização de argamassas de assentamento com características rígidas de ligação. Essa tecnologia de fachadas industrializada, embora de maior custo quando comparado ao método tradicional de execução do subsistema de vedação de edifícios permite a redução do seu tempo de construção e aumento da qualidade, devido ao melhor controle de produção dos painéis em fábrica, que já chegam prontos no canteiro de obra.

Segundo a ABREA (Associação Brasileira dos Expostos ao Amianto), mais de 90 % do amianto produzido no Brasil é empregado na indústria de cimento-amianto ou fibrocimento (ABREA, 2015). O Brasil foi o terceiro maior produtor do mineral asbesto, conhecido também como crisotila, com produção de 306.321 toneladas de fibras de amianto, valor que representa cerca de 15% da produção mundial (DNPM, 2015). A produção conjunta de crisólita do Brasil e Rússia corresponde mais de 63% da produção mundial, conforme Tabela 1.

Na década 60, o cimento-amianto teve seu uso restrito ou mesmo eliminado em muitos países pela descoberta dos efeitos nocivos à saúde dos trabalhadores expostos ao mineral asbesto durante os processos de extração e beneficiamento do amianto. A inalação das fibras naturais de asbesto liberadas no ar durante sua extração contem substâncias altamente tóxicas, podendo causar doenças respiratórias e até mesmo o desenvolvimento de câncer de pulmão. No Brasil, os primeiros casos de asbestose, doença associada ao amianto foi reportada apenas no final de 1970 (TERRACINI, 2006). De acordo com autor, uma pesquisa realizada em 1988 com trabalhadores de uma indústria de médio porte de fibrocimento revelou uma alta taxa de ocorrência de radiografias compatíveis com asbestose em funcionários com mais de 10 anos de exposição.

Tabela 2 – Produção mundial de fibras de amianto

<b>Produção mundial de fibras de crisotila</b>			
<b>Países</b>	<b>Produção em (t)</b>		
	2010	2011*	2010(%)
<b>Brasil</b>	302000	306321	15,1
<b>Rússia</b>	1000000	1000000	49,1
<b>China</b>	400000	400000	19,6
<b>Cazaquistão</b>	214000	210000	10,3
<b>Canadá</b>	100000	100000	4,9
<b>Outros países</b>	21000	20000	1,0
<b>Total</b>	2037000	2036321	

\* Dados preliminares

Fonte: DNPM,2013

Neste contexto, a Islândia foi o primeiro país a introduzir leis que proibissem o emprego do amianto a nível nacional em 1983. Nos anos seguintes, a Austrália e a maioria dos países da União Europeia adotaram o banimento do amianto na produção interna. O Brasil ainda está no processo de criação de leis (estaduais e nacionais) que proibam completamente a extração, beneficiamento e comercialização do amianto em todo país (ABREA, 2015). Porém, em algumas regiões do país já existe leis municipais que proibem sua utilização como o município de Recife. De acordo com a resolução nº 348/2004 do CONAMA (conselho nacional do meio ambiente) e a NBR 10004 (ABNT, 2004), o amianto é considerado um resíduo de construção de classe Perigosa, não podendo ser disposto no meio-ambiente da mesma forma que os resíduos classificados como não perigosos. Na presente norma, o amianto consta no anexo A (resíduos perigosos de fontes não específicas), sendo assim considerado como um resíduo sólido tóxico.

Diante destes problemas de saúde pública associado ao amianto, inúmeras pesquisas com início nas últimas décadas vem sendo realizadas com foco na substituição do amianto por outro material de reforço de origem natural ou sintética com um desempenho mecânico e durabilidade semelhante ao apresentado pelo cimento-amianto (STUDINKA, 1989). Dentre as fibras que vem sendo estudadas, as principais são: as fibras poliméricas (polipropileno), fibras vegetais (sisal, bambu) e as fibras de vidro.

Segundo Sales (2006), a opção da substituição do amianto por fibra vegetal apresenta inúmeras vantagens; entre elas, sua grande disponibilidade em países de clima tropical, rápido crescimento e baixo custo, além de eliminar o risco a saúde dos trabalhadores envolvidos no processo de obtenção do amianto. Nos países em desenvolvimento passa a ser a melhor opção

de substituição tendo em vista a ocorrência de grandes áreas cultiváveis e o baixo custo de produção.

Apesar de ser um produto com produção em escala industrial a mais de duas décadas, estudos ainda são necessários para melhoria de seu comportamento mecânico a longo prazo. Quando as fibras vegetais são empregadas sem nenhum tipo de pré-tratamento para produção de fibrocimento, estas apresentam substâncias solúveis em água e susceptíveis ao ataque pelos álcalis do cimento, principalmente pelo hidróxido de cálcio(CH). O seu emprego como reforço é limitado em função principalmente da sua variação volumétrica com a umidade (RODRIGUES. *et al.*, 2008). Essa característica apresentada pela fibra vegetal contribui para o aumento da porosidade da matriz cimentícia na região de transição interfacial, tornando o material compósito mais vulnerável à degradação. Dessa forma, a simples substituição da fibra de amianto por fibras vegetais não confere ao compósito desempenho mecânico de longo prazo satisfatório e adequado as suas condições de serviço, condição que era plenamente atingida pelo cimento-amianto (STUDINKA, 1989).

O desempenho desse material compósito pode ser melhorado por meio do processo de pré-tratamento das fibras e ou modificação da composição da matriz de cimento. Estes são os dois métodos de tratamento correntemente utilizados para produção de fibrocimentos com polpa celulósica com melhor desempenho e durabilidade. O primeiro método consiste na modificação das características das fibras por meio de processos físicos ou químicos. Dentre os métodos empregados, o processo de pré-tratamento conhecido como cornificação apresenta baixo custo e é menos complexo em relação aos métodos químicos, podendo contribuir significativamente para melhoria da durabilidade desse material (CLARAMUNT. *et.al.*, 2009). Segundo o autor, esse método consiste em um processo térmico de tratamento das fibras vegetais por meio de aplicação previa de ciclos de secagem e saturação. Durante esse processo ocorre à formação de ligações de pontes de hidrogênio entre as microfibras vegetais, substituindo as ligações fracas existentes entre a celulose e a hemicelulose que favorecia a movimentação da água com compostos alcalinos dissolvidos para o interior das fibras. Conseqüentemente, as fibras passam apresentar menor capacidade de absorção de água e menor variação volumétrica, contribuindo dessa forma para melhoria das características na região de interface fibra/matriz. Trata-se de um processo bastante conhecido na indústria de papelão, porém seus efeitos na produção de fibrocimentos ainda carecem de pesquisa.

O segundo método consiste na substituição parcial do cimento *Portland* por adições minerais com função de reduzir principalmente a alcalinidade e a porosidade da matriz

cimentícia. Materiais pozolânicos e *filler* calcário são exemplos de adições minerais usualmente empregadas para produção de compósitos de fibrocimento de melhor desempenho. O termo pozolânico engloba vários materiais, tais com a Cinza da Casca de Arroz (CCA), sílica ativa e metacaulinita. Os materiais pozolânicos são ricos principalmente em sílica amorfa, que quando finalmente moídos, na presença de água ou umidade reage quimicamente com o hidróxido de cálcio(CH) em temperatura ambiente, tornando-se um material com características aglomerante. Neste sentido, o emprego de materiais rico em sílica amorfa possibilita a produção de compósitos de fibrocimento reforçados com fibras vegetais menos susceptíveis a degradação, uma vez que reduz a quantidade de CH presente na matriz de cimento.

A CCA é um tipo de adição pozolânica proveniente geralmente da queima da casca do arroz, em condições não controladas pelos agricultores, que muitas vezes não é aproveitada e descartada de forma imprópria no ambiente, podendo gerar impacto ambiental e problemas de saúde devido à presença de partículas finas ricas em sílica. Esse resíduo ou subproduto apresenta alto teor de sílica amorfa, podendo assim ser empregado na produção de concretos, argamassas e outro produtos á base de cimento de melhor desempenho. A CCA pode ser também obtida durante o processo de geração de energia nas termoeletricas, onde a casca de arroz é empregada como fonte de combustível. Neste caso, passa a ser viável seu emprego na construção civil diante do grande volume gerado em condições de temperatura controlada, o que favorece o aumento da reatividade pozolânica da cinza. Diante das características desse subproduto agrícola, nos últimos anos cooperativas localizadas no estado do Rio Grande do Sul estão comercializando a CCA para a indústria de concreto e outros setores industriais (TASHIMA. *et al.*,2012)

A reatividade pozolânica da CCA quando empregada como adição mineral na substituição parcial do cimento *Portland* está associado a sua reação com o CH, formando produtos adicionais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que é o principal produto de hidratação responsável pelo ganho de resistência mecânica (VU, 2002). Na literatura, essa adição mineral é geralmente empregada de forma combinada com o *filler* calcário na substituição parcial do cimento. O *filler* calcário é considerado uma adição mineral inerte, atuando como micro agregado, tendo a função de reduzir a porosidade da pasta de cimento e prevenir a retração plástica.

Este trabalho tem como objetivo verificar a durabilidade de compósitos de fibrocimentos reforçados com fibras vegetais submetidos a ciclos de envelhecimento

acelerado. Como método de tratamento, será verificada a eficiência do emprego de fibras pré-tratadas e a substituição parcial do cimento *Portland* por CCA, com base nos resultados de trabalhos presente na literatura. Para atingir o objetivo proposto, o trabalho foi estruturado nos seguintes capítulos:

Capítulo 2 – nesse capítulo será apresentado os principais mecanismos de degradação dos compósitos de fibrocimentos e o método de degradação artificial empregado para simular os efeitos dos agentes de degradação presente no ambiente, principalmente a influência da ação da umidade, temperatura e da carbonatação no seu desempenho;

Capítulo 3 – nesse capítulo serão apresentados os métodos de tratamento correntemente empregados para produção de fibrocimento de melhor desempenho;

Capítulo 4 – nesse capítulo será apresentada a metodologia utilizada para caracterizar as matérias-primas empregadas e o processo de produção de placas planas de fibrocimento;

Capítulo 5 – nesse capítulo serão apresentados os resultados das propriedades mecânicas e físicas dos compósitos de fibrocimento reforçados com fibras vegetais, a partir de resultados de trabalhos na literatura;

Capítulo 6 – nesse capítulo serão apresentadas as considerações finais.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. Durabilidade e Mecanismos de Degradação de Fibrocimento Sem Amianto

A durabilidade de um material de construção civil está associada a sua capacidade de se manter íntegro, preservando suas características iniciais ao longo da sua vida útil quando submetido às condições de serviços previstas em projeto. Atualmente, existe uma grande preocupação com a sustentabilidade da construção, com emprego de componentes produzidos com o menor consumo de energia e maior ciclo de vida, com o intuito de diminuir a necessidade de intervenções de forma precoce para a manutenção dos subsistemas da edificação.

Para o estudo da durabilidade de um material de construção civil é necessário conhecer primeiramente suas condições de serviço e assim determinar suas propriedades requeridas, segundo normas específicas de desempenho. Quando em serviço, os materiais e componentes construtivos estão submetidos à ação de agentes de degradação que comprometem seu desempenho ao longo do tempo. A forma de atuação desses agentes de degradação nos materiais, isto é, os chamados mecanismos de degradação dependem das condições ambientais de exposição e das características físicas e químicas dos materiais.

Para Canovas *et al.* (1990) *apud* Zille (2009), as principais causas de deterioração do fibrocimento reforçado com fibras vegetais são:

- diferença de variações dimensionais entre as fibras e a matriz quando submetidas a variações de temperatura e umidade externa. Processo que leva o surgimento de fissuras no material principalmente na região interfacial;
- reações internas entre os compostos alcalinos da matriz de cimento com as fibras, causando dissolução de suas substâncias não celulósicas solúveis em água;
- ciclos de chuvas e insolação que provocam degradação na região interfacial, devido à fragilização das fibras;
- exposição à radiação ultravioleta levando a diminuição do grau de polimerização das fibras vegetais e conseqüentemente perda de resistência.

Segundo Rodrigues *et.al.* (2008), os principais mecanismos de degradação são:

- Fragilização das fibras (fenômeno conhecido como mineralização);
- Erosão na região da interface entre fibra e matriz;
- Ataque por álcalis presentes no cimento.

A perda de ductilidade das fibras vegetais e o ataque por álcalis são mecanismos resultantes da presença do CH (produto de hidratação do cimento). A migração deste produto solúvel em água para o interior das fibras vegetais ocasiona perda da sua capacidade de absorção de energia de deformação, processo conhecido como mineralização. As fibras, então, passam a ter um comportamento frágil, reduzindo sua capacidade de deformação plástica e comprometendo assim o desempenho dos fibrocimentos. Esse processo de degradação ocorre quando o material é submetido à variação de umidade, sendo simulado em laboratório por meio de aplicação de ciclos de saturação e secagem em uma estufa.

Segundo Claramunt *et.al.* (2011), esse processo de degradação se desenvolve segundo os seguintes ciclos:

- 1) No primeiro ciclo de secagem, as fibras sofrem redução de volume devido à perda de água inicialmente absorvida, ocorrendo à formação de vazios na interface entre fibra/matriz;
- 2) Na etapa de saturação, o CH é dissolvido pela água e transportado para o interior das fibras, provocando a sua expansão;
- 3) No segundo ciclo de secagem, com a evaporação da água, o CH se precipita na superfície e no lúmen das fibras, provocando a densificação na região interfacial. Esse processo acontece de forma cíclica e é considerado o principal mecanismo de degradação de fibrocimentos reforçados com polpa vegetal.

O ataque por álcalis ocorre devido principalmente à presença do CH na matriz de cimento, responsável pelo meio altamente alcalino que é extremamente prejudicial ao comportamento das fibras ao longo prazo. Os componentes das microfibras vegetais solúveis em água são extremamente atacados por esse produto de hidratação do cimento.

Um completo conhecimento desses mecanismos de degradação envolvidos no envelhecimento de materiais de fibrocimento é requisito essencial para inferir sua durabilidade e o aparecimento de fissuras (PEREIRA, 2011). Na maioria dos trabalhos na literatura, a durabilidade é determinada em função de ciclos de envelhecimento acelerado, que consistem em condensar e amplificar a ação desses principais agentes de degradação presente no ambiente. Este método de degradação artificial consiste na aplicação de ciclos de saturação e secagem em estufa, simulando dessa forma suas condições de serviço quando submetido a ciclos de insolação e chuva. Assim os seus parâmetros físicos e mecânicos são monitorados ao longo do tempo para cada ciclo de degradação, estabelecendo dessa forma a influência dos mecanismos de degradação e a eficácia do método de tratamento adotado para eliminar ou reduzir estes efeitos. Tais processos de degradação podem ser eliminados ou mesmo ter seus efeitos reduzidos com a incorporação de adições pozolanas como material de substituição parcial na matriz de cimento, tratadas no item 3.2. Mais recentemente, vem sendo estudado o efeito do processo de cornificação das fibras de polpa vegetal antes da sua incorporação no processo de produção das placas planas de fibrocimento.

## **2.2 Retração de materiais á base de cimento**

A retração da pasta de cimento é um dos principais fatores associado à degradação de materiais cimentícios, pois quando não controlada, provoca o aparecimento significativo de fissuras no material. A retração desses materiais é devida principalmente à perda de água por evaporação. Esse fenômeno é agravado nos fibrocimentos com polpa vegetal em função da falta de compatibilidade física entre fibra/matriz, que compromete a eficiência da fibra como material de reforço, com objetivo de aumentar à resistência a tração e principalmente a tenacidade da matriz. Este problema principalmente observado na região interfacial está associado às características das fibras vegetais. Devido a sua natureza higroscópica, as mesmas sofrem maior variação volumétrica em relação à matriz de cimento, criando uma descontinuidade nessa região, que prejudicará a aderência entre essas duas fases.

A retração pode ser dividida em dois estágios de acordo com o estado físico da matriz de cimento. Na fase de hidratação ou estado fresco ocorre á retração plástica; no estado endurecido ocorre à retração por secagem, retração por carbonatação e retração autógena. De

acordo com Neto *et. al.* (2002), a retração de materiais cimentícios pode ser classificada como:

1) A retração plástica - é definida pela variação volumétrica da pasta de cimento antes do seu início de pega, devido à perda inicial e rápida de água superficial para o ambiente por evaporação;

2) A retração por secagem - ocorre diante da perda de água contida nos poros da matriz de cimento por evaporação após o tempo de cura, devido à diferença de temperatura entre o ambiente e o interior da matriz. De acordo com o autor, não existe norma específica de ensaio de retração por secagem no Brasil, sendo determinada por normas estrangeiras como a ASTM C 490/97;

3) A retração autógena; assim como a retração por secagem, acontece devido à perda de água aprisionada nos poros da matriz de cimento após o fim de pega, porém com temperatura constante. Neste caso, a água presente nos poros da matriz de cimento é consumida pela reação de hidratação dos compostos cristalinos do cimento.

A retração ainda pode ser classificada em função do tipo de condição de contorno que o componente está submetido, sendo considerada restrita nas condições que não existe liberdade de movimentação, onde os materiais estão unidos a outros componentes ou elementos construtivos, ou livre, quando não existe restrição de deslocamento (PEREIRA,2011). A retração restrita é considerada a forma mais grave de deterioração, podendo aumentar a magnitude das tensões nos materiais cimentícios e conseqüentemente o surgimento de fissuras. De acordo com Claramunt *et. al.*(2011), a migração de produtos de hidratação do cimento solúveis em água para o interior e ao redor do lúmen das fibras pode restringir a sua movimentação durante os ciclos de secagem e saturação, reduzindo sua ductilidade.

Além dessas retrações mencionadas, existe também a retração por carbonatação. Este tipo de retração acontece na superfície dos materiais cimentícios no estado endurecido. A retração por carbonatação Eq.1 ocorre devido à reação entre o CO<sub>2</sub> do ambiente com o CH, com umidade relativa em torno 50%, formando o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>).



Já o processo de carbonatação, outro fenômeno associado a materiais a base de cimento acontece devido à ação da frente de carbonatação. Nesse caso, esse processo passa a ser benéfico para os fibrocimentos. O gás carbônico do ambiente pode penetrar na matriz de cimento e ser transportado por difusão pela solução aquosa presente nos poros. Este gás no interior da matriz reage quimicamente com o CH e outros produtos da pasta de cimento carbonatáveis, como o hidróxido de potássio (KOH) e o hidróxido de sódio (NaOH), formando um produto estável de maior volume, reduzindo assim a porosidade e a alcalinidade dos materiais a base de cimento (BARIN, 2008).

### **2.3. Métodos de Degradação: Ciclos de envelhecimento acelerado e natural**

Para avaliar a eficiência dos diferentes métodos de tratamento adotados na produção de compósitos de fibrocimento com polpa vegetal na durabilidade, ciclos de envelhecimento acelerado são empregados de forma a reproduzir em laboratório a ação dos diferentes tipos de agentes de degradação presentes no ambiente ao longo de sua vida útil.

Conhecendo as propriedades de durabilidade do material a ser analisado e os mecanismos de degradação a serem simulados, estabelece-se a metodologia de envelhecimento, isto é, o tempo de cada ciclo e o meio necessário para priorizar a ação desses agentes de degradação. No ensaio de envelhecimento acelerado, as amostras de fibrocimento são submetidas a ciclos de saturação e secagem em laboratório, com o intuito de reproduzir seu comportamento em ambiente natural, quando submetidas a ciclos de insolação e chuvas.

O método de envelhecimento acelerado apresenta como vantagem o menor tempo de teste necessário para avaliar o desenvolvimento de um novo produto ou alteração de um processo. Mas, por outro lado, apresenta como ponto negativo a dificuldade de reproduzir de forma fiel os mecanismos presentes no envelhecimento natural. Contudo, este método artificial pode ser utilizado de forma confiável para analisar o desempenho de fibrocimentos, tendo resultados que indicam a tendência geral de comportamento natural quando submetidos a ciclos de chuva e insolação (PEREIRA, 2009). Esse método é considerado uma das formas mais intensas de degradação dos materiais de fibrocimento, uma vez que favorece a degradação na região de interface e o transporte de umidade através da matriz de cimento (RODRIGUES, 2004).

Paralelamente aos ensaios em laboratório, são realizados ensaios de envelhecimento em condição natural de degradação com o objetivo de estabelecer uma correlação entre as propriedades apresentadas pelo material nas condições natural e artificial. Entretanto, existem na literatura poucos trabalhos com este objetivo, uma vez que demanda maior tempo de ensaio bem como existe uma grande dificuldade de estabelecer uma relação direta entre o número de ciclos com o tempo de envelhecimento natural. A seguir serão apresentados os resultados de diversos trabalhos e a metodologia de envelhecimento adotada respectivamente em cada estudo.

Akers e Stundika (1989) analisaram o efeito dos ciclos de envelhecimento acelerado no comportamento mecânico de compósitos de fibrocimento reforçados com 8% de polpa celulósica de bambu. Testes de degradação acelerada foram realizados em amostras submetidas a dois diferentes tipos de cura (normal e autoclave) e os resultados das propriedades mecânicas foram comparados com o das amostras sem envelhecimento. No mesmo trabalho foi também estabelecida uma correlação entre o comportamento mecânico das amostras submetidas ao envelhecimento acelerado em relação às amostras degradadas naturalmente durante 4 e 5 anos. Dois métodos de degradação acelerado foram propostos para verificar qual deles apresentaria resultados mais próximos do observado no envelhecimento natural. O primeiro teste de envelhecimento acelerado foi realizado em um ambiente natural com temperatura elevada, com o seguinte ciclo de degradação: 9 horas de submersão em água a 20°C, 3 horas ao ar livre mantendo a temperatura anterior, 9 horas de radiação infravermelha no ar a 80°C e fechando o ciclo com 3 horas de resfriamento no ar até 20°C. O segundo método de ensaio foi realizado em ambiente rico em CO<sub>2</sub> com o seguinte ciclo: 8 horas de submersão em água a 20°C, 1 hora em estufa a 80°C, 5 horas na estufa em ambiente saturado com CO<sub>2</sub>, 9 horas em estufa a 80°C e 1 hora de resfriamento variando a temperatura entre 80°C até atingir 20°C. Estes dois diferentes tipos de ciclos foram determinados a partir de testes preliminares, que consistiram em analisar o grau de carbonatação e absorção de água das amostras. Com base nos resultados dos parâmetros mecânicos, as amostras submetidas ao envelhecimento acelerado em ambiente rico em CO<sub>2</sub> apresentaram comportamento semelhante às amostras degradadas naturalmente. Em ambos os casos, houve um aumento do módulo de elasticidade e resistência à tração na flexão com o tempo de envelhecimento. O método de degradação acelerada em ambiente rico com CO<sub>2</sub> simulou com melhor precisão o comportamento de fibrocimentos nas suas condições naturais de degradação, sendo considerado o mais indicado para o estudo de durabilidade.

Na mesma linha de pesquisa, Bentur e Akers (1989) estudaram a durabilidade de compósitos de fibrocimento (autoclavados e com cura normal) reforçados com polpa celulósica, quando submetidos a ciclos de envelhecimento acelerado. O principal objetivo do trabalho foi relacionar a mudança de desempenho mecânico em amostras envelhecidas com as alterações na microestrutura da matriz de cimento. Nas amostras produzidas com cura normal, durante os ciclos de envelhecimento acelerado em ambiente rico em CO<sub>2</sub> ocorreu à petrificação das fibras, devido o acúmulo de produto de reação no seu núcleo, aumentando sua resistência à flexão e rigidez. Foi observado que com o aumento da rigidez ou módulo de elasticidade, as fibras perdem parcialmente sua capacidade de deformação, apresentando ruptura frágil. No entanto, segundo o autor, sua resistência foi aumentada provavelmente devido à densificação da matriz cimentícia na região de interface fibra/matriz. Já nas amostras autoclavadas não houve alteração micro-estrutural significativa durante a degradação, ocorrendo pouca petrificação das fibras vegetais, apesar de terem sido submetidas a um alto grau de carbonatação. Tal fato foi explicado em função das amostras autoclavadas não apresentam hidróxido de cálcio (CH) em sua composição, sendo este o principal agente responsável pela fragilização das fibras.

Pereira (2011) em sua pesquisa analisou, isoladamente, a influência da umidade e temperatura durante os ciclos de degradação acelerada no comportamento mecânico e físico de compósitos de fibrocimento reforçados com polpa celulósica. Em um dos tipos de amostras foi empregado CCA como substituição parcial ao cimento *Portland*. Os ciclos de degradação acelerado foram dimensionados para duas condições diferentes, denominadas de condição A e B. Para a condição A, a temperatura foi mantida constante com variação apenas de umidade e com ciclo de saturação e secagem consistindo em: saturação em água durante 3 horas seguidas de 21 horas de secagem a 25°C em ambiente com umidade relativa de 20%. Esse tempo de ciclo foi considerado ideal com base nos resultados de testes preliminares e análise da curva de saturação x secagem das amostras ensaiadas. No processo de saturação o tempo necessário para completa saturação das amostras foi de 3 horas, enquanto que na fase de secagem, o tempo foi significativamente maior para evaporação da água absorvida durante a saturação. Para a condição B, a umidade foi mantida constante com variação apenas de temperatura e com o seguinte ciclo de saturação e secagem: saturação durante 160 minutos a 20°C, aquecimento de 1°C por minuto até 60°C em câmara climática, secagem durante 120 minutos a 60°C e resfriamento de 1°C por minuto até 20°C. Durante o ensaio na condição B a temperatura variou de 20°C a 60°C com umidade constante de 50%. Os resultados

indicaram que a umidade foi a principal variável de degradação das amostras de fibrocimento, apresentando influencia significativa na durabilidade. Ao longo dos ciclos de envelhecimento acelerado foi observada uma redução da tenacidade das placas de fibrocimento e redução da sua retração. Entretanto, para as amostra com CCA essa redução ocorreu de forma mais regular.

Com base nos resultados dos trabalhos apresentados, verifica-se que existe um consenso das principais variáveis presente no ambiente que degradam o material, apresentando maior potencial de influência a umidade e o dióxido de carbono. Entretanto, em relação à metodologia de degradação tal condição não foi verificada.

## **2.4 Métodos de tratamento**

### **2.4.1 Processo de cornificação**

Segundo Dinis *et.al.* (2004), cornificação é um termo técnico empregado para caracterizar alterações físicas irreversíveis que ocorrem nas fibras de madeira e no papel durante o processo de secagem. Segundo o autor, o primeiro estudo relatado na literatura sobre esse assunto foi em 1943, pelo pesquisador Jayme. Estes primeiros estudos foram voltados para indústria de papel e celulose, onde o efeito desse processo já é bastante conhecido. Entretanto, essa abordagem ainda é incipiente na produção de compósitos de fibrocimento.

O processo de cornificação é considerado um processo térmico de tratamento de baixo custo quando comparado aos métodos químicos. No processo químico, as fibras são previamente submersas em uma solução contendo um reagente químico com o objetivo de diminuir a concentração dos álcalis do cimento na região de interface quando incorporadas na produção das placas de fibrocimento. Já no processo de cornificação, a melhoria das propriedades das fibras está associada a alterações que ocorrem em sua superfície quando submetidas a um tratamento térmico por meio de aplicação de ciclos de secagem e saturação.

Segundo Claramunt *et.al.* (2009), o efeito desses ciclos é bem conhecido, provocando alterações químicas e físicas (retração) irreversíveis nas fibras vegetais. Segundo o autor, durante a fase de secagem em estufa a temperaturas em torno de 60°C ocorre à formação de ligações de pontes de hidrogênio entre as microfibras vegetais, substituindo as ligações fracas

existentes entre a celulose e a hemicelulose, que favorecia a movimentação da água contendo compostos alcalinos dissolvidos para o interior das fibras. Neste processo conhecido como cornificação, as microfibras passam a ser organizar em um arranjo compacto, reduzindo o tamanho dos macro poros superficiais, dificultando assim a passagem de água para o seu interior. Como resultado, as fibras passam a ter maior estabilidade dimensional, absorvendo menor quantidade de água quando saturadas novamente. Ao reduzir a absorção de água pelas fibras, espera-se que o processo de mineralização, considerado o principal mecanismo de degradação dos fibrocimentos, seja minimizado ou mesmo eliminado (MOHR. *et al.*, 2005). A eficiência do processo de cornificação é avaliada em função da porcentagem em peso de redução de água absorvida pelas fibras ao longo dos ciclos (ACKERMAN *et al.*, 2000 *apud* CLARAMUNT *et al.*, 2009). A seguir, serão apresentados os resultados dos poucos trabalhos presente na literatura sobre esse processo de pré-tratamento.

Claramunt *et.al.*, (2009), analisaram a influencia do processo de cornificação em termos da estabilidade dimensional e redução da porcentagem de água absorvida por 2 tipos de fibras ( fios de algodão e polpa celulósica). As fibras foram submetidas a 4 ciclos de secagem e saturação como forma de pré-tratamento. A sequencias dos ciclos empregados foi baseada em 4 etapas: 1) secagem em estufa com circulação de ar a 60°C durante 7 horas; 2) saturação por imersão durante a noite; 3)desintegração da polpa molhada; 4) filtração da polpa em suspensão por meio de um funil de Buchner equipado com uma tela de arame. Os resultados mostraram redução da porcentagem de água retida e retração das fibras ao longo dos ciclos de saturação e secagem. Esse processo foi mais intenso para as fibras de polpa vegetal, uma vez que segundo o autor apresentaram maior quantidade de substâncias não celulósica como a hemicelulose e lignina. Dessa forma, foi constatado que o processo de cornificação pode contribuir para o aumento da tensão de aderência entre fibra/matriz, promovendo ganho de resistência mecânica, durabilidade e maior estabilidade dimensional das fibras vegetais.

Na mesma linha de pesquisa, Claramunt *et.al.* (2011) avaliaram o desempenho mecânico e durabilidade de argamassas reforçadas com dois tipos de fibras vegetais, ambas submetidas a um pré-tratamento de 4 ciclos de saturação e secagem. O ciclo empregado para o pré-tratamento das fibras foi o mesmo apresentando anteriormente. Os resultados indicaram melhoria do comportamento mecânico e durabilidade das argamassas envelhecidas e reforçadas com fibras tratadas termicamente em relação as argamassa envelhecidas com fibras

sem tratamento. Entretanto, foi observado perda de desempenho mecânico em todas as amostras envelhecidas.

#### 2.4.2 Efeitos das adições minerais na produção de fibrocimento

O emprego de adições minerais na produção de fibrocimentos reforçados com fibras vegetais tem como principal objetivo melhorar as características físicas e químicas na região de interface entre fibra e matriz, conhecida como zona de transição interfacial (ZILLE, 2009). Tendo em vista que, essa região além de ocupar uma área significativa da superfície interna do fibrocimento na ordem de  $3000\text{cm}^2 / 1\text{ cm}^3$  (CHAWLA, 1987 *apud* ZILLE, 2009), apresenta composição química e física significativamente diferente da pasta de cimento, com maior concentração de poros e produtos de hidratação que quase não confere ganho de resistência mecânica e ainda são responsáveis pelos principais processos de degradação do fibrocimento. A zona de transição interfacial apresentar maior concentração de CH, diferenciando dessa forma substancialmente do restante das regiões da pasta de cimento. O CH é um produto resultante da hidratação do cimento que quase não contribui no ganho de resistência mecânica do compósito. Essa região de transição é conhecida por ser a fase do compósito de menor resistência e mais sujeita aos mecanismos de degradação. Além disso, o CH é solúvel em água e o principal responsável pela degradação das fibras vegetais.

A substituição parcial do cimento *Portland* por adições minerais é um método de tratamento bastante empregado em diversos trabalhos na literatura com o objetivo de aumentar a durabilidade de compósitos de fibrocimento com fibras vegetais. Dentre as principais adições minerais empregadas, destacam-se: os materiais pozolânicos, como a CCA, cinza do bagaço da cana de açúcar e o metacaulim.

De acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 1992), o termo pozolana é empregado para representar materiais constituídos principalmente por sílica ou sílica e alumina sem característica cimentícia, que quando finamente moído, na presença de água ou umidade reage com o CH em temperatura ambiente, formando materiais com propriedades aglomerantes. Nesta reação Eq. 2 ocorre a redução do hidróxido de cálcio e aumento do silicato de cálcio hidratado, que é precipitado principalmente na região de interface fibra e matriz.



A cinza da casca de arroz e o bagaço da cana de açúcar são resíduos da agroindústria, obtidos pela queima da biomassa durante o processo de geração de energia nas termoeletricas e produção do etanol, respectivamente. Ambas as adições minerais apresentam alto potencial de reação com os compostos do cimento devido à presença de grande quantidade de sílica na fase amorfa. Adições minerais com características pozzolânicas contribuem para a melhoria da durabilidade de materiais à base de cimento devido ao seu efeito físico e químico. O efeito físico está associado ao preenchimento dos poros da matriz de cimento pelos produtos gerados pela reação pozzolânica, efeito conhecido como *filler* (RODRIGUES, GHAVAMI, STROEVEN, 2006). Enquanto que, o efeito pozzolânico é devido ao consumo ou redução do CH durante sua reação com a sílica ativa, formando produtos adicionais de silicato de cálcio hidratado (CSH). Este produto formado é o principal responsável pelo ganho de resistência mecânica e contribui também com o aumento da densidade do material (VU, 2002).

Segundo o ministério da agricultura, o Brasil é o nono país com maior produção de arroz no mundo, sendo os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Mato Grosso os principais responsáveis pelo plantio, com colheita de 11,6 milhões de toneladas na safra de 2009. Desse total de produção, a casca representando cerca de 20% do volume do arroz não é aproveitada pelos agricultores, gerando um resíduo ou subproduto com grande potencial de emprego para geração de energia elétrica nas termoeletricas. Neste caso, passa a ser viável seu emprego na construção civil diante do grande volume gerado em condições de temperatura controlada, o que favorece o aumento da reatividade pozzolânica da cinza. Quando a casca de arroz é submetida a um processo de queima com controle de temperatura de até 600°C, a cinza resultante é praticamente rica em sílica amorfa (PAYÀ *et. al.*, 2001).

A atividade pozzolânica da CCA, principal característica do resíduo para emprego na construção civil como material de substituição parcial ao cimento *Portland* depende da região de cultivo do arroz e principalmente do processo de queima adotado para obtenção da cinza. Variando a faixa de temperatura para calcinação da casca de arroz, os componentes produzidos variam em quantidade e tipo. A sua eficiência como adição mineral depende do teor de sílica na fase amorfa, distribuição granulométrica e área da superfície específica (FOLETTI, *et al.*, 2005).

Após o processo de queima, as cinzas passam por um processo de moagem para serem utilizadas na forma de adição mineral, podendo ter aspecto conforme Fig.1. Nesse processo, as partículas da cinza são reduzidas a grãos inferiores as dimensões das partículas de cimento.



Figura 1 - Cinza da casca de arroz - a) sem beneficiamento , b)material passante na peneira #1.2mm 2  
Fonte: KRUG, 2011

Segundo Della *et al.*(2001), quando a CCA é obtida em processos de queima com baixa temperatura ou quando o tempo de exposição da casca de arroz a altas temperaturas é pequeno, a sílica obtida é praticamente amorfa.

Pereira (2011) avaliou a influencia da CCA com alto teor de carbono como adição suplementar do cimento *Portland* na produção de placas de fibrocimento reforçada com polpa vegetal. Esta característica da cinza aumentou significativamente o fator água/aglomerantes para produção de uma mistura com consistência normal devido ao maior volume de poros na sua superfície, modificando também a cor do produto final. Entretanto, os resultados mostraram que a resistência mecânica dos fibrocimentos com CCA foi superior às amostras de referencia (sem CCA), mesmo apresentando maior porosidade aparente e absorção de água. Resultados semelhantes de ganho de desempenho mecânico na produção de fibrocimento com CCA foram obtidos por (RODRIGUES, *et al.*, 2010). A utilização da CCA possibilitou a produção de fibrocimentos com melhor desempenho mecânico e menos susceptíveis aos mecanismos de degradação.

O desenvolvimento de materiais de construção civil com incorporações de resíduos de outras atividades industriais possibilita a redução do volume de sólidos dispostos em aterro, além de diminuir a demanda de matéria prima para produção de materiais a partir de processos convencionais. Outra vantagem do seu emprego está relacionada à redução da quantidade de CO<sub>2</sub> emitido no processo de produção do cimento quando empregado resíduos com características aglomerantes com potencial de substituição do clínquer. Dessa forma, a incorporação de resíduos em materiais de construção civil pode contribuir para minimização dos problemas ambientais e melhoria do seu desempenho mecânico.

### **3. Ensaaios de caracterização e processos de fabricação**

A metodologia adotada nesse trabalho foi uma revisão bibliográfica sobre o emprego de adições minerais na produção de fibrocimento reforçados com fibras vegetais e o levantamento dos principais mecanismos de degradação associado a esse material.

Na segunda parte do trabalho serão apresentados os ensaios normalmente realizados para caracterização da matéria-prima empregada e o processo de produção de placas planas de fibrocimento, conforme modelo adotado pelo CEFET-MG .

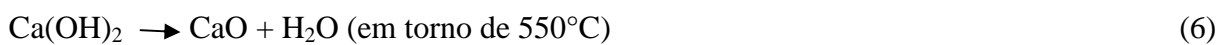
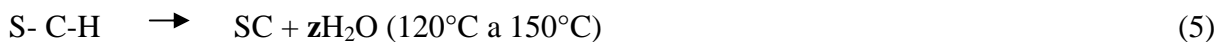
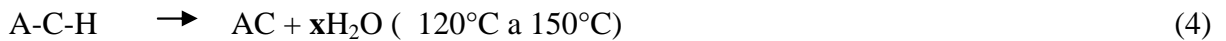
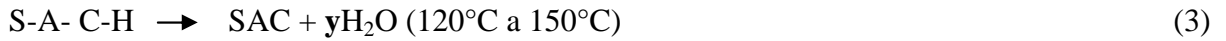
#### **3.1. Ensaio de Termogravimetria para análise da pozolanicidade da cinza da casca de arroz**

O ensaio de termogravimetria é considerado um método térmico utilizado para analisar a variação de massa de uma amostra em função da temperatura ou tempo. Neste ensaio a amostra é submetida a um aquecimento progressivo a uma taxa constante em uma termobalança, enquanto sua massa é monitorada continuamente. O equipamento utilizado é composto basicamente de uma balança de precisão, um forno que atinge temperaturas em torno de 1200°C, sensores de temperatura e um sistema de aquisição de dados (PEREIRA, 2011). Com esse ensaio é possível analisar a estabilidade térmica do material e sua composição química.

Como resultado do ensaio é gerado dois tipos de curva, a curva termogravimétrica (TG) e a curva termogravimétrica-diferencial (DTG). A primeira curva representa a variação de massa do material em função da variação de temperatura e tempo, podendo assim indicar ganhos ou perdas de massas. A partir da análise dessa curva é possível determinar a porcentagem de perda de massa da amostra em cada estágio ou faixa de temperatura. Cada estágio de perda de massa (TG) ou pico térmico (DTG) representa uma reação química, que no caso dos materiais cimentícios está associada à perda de água quimicamente ligada aos compostos do cimento, como por exemplo, o silicato de cálcio hidratado (S-C-H) e a portlandita. A segunda curva é obtida pela derivada da curva TG, sendo utilizada para analisar a velocidade de perda ou ganho de massa da amostra com o tempo, conforme Figura 2. A curva (DTG) representa a ocorrência de picos exotérmicos ou endotérmicos durante o ensaio,

que facilitam a identificação das perdas de massa observada na curva TG, mesmo para pequenas perdas.

Para os materiais cimentícios com ou sem a presença de adições pozolanas, essa perda de massa está associada à desidratação dos produtos da pasta de cimento em picos característicos, segundo as seguintes reações químicas (TASHIMA, 2006):



A equação 6 representa a temperatura de desidrolixação do hidróxido de cálcio, sendo objetivo de estudo desse trabalho.

Para faixa de temperatura inferior a  $120^\circ\text{C}$ , a perda de massa é devido à evaporação da água livre presente no material.

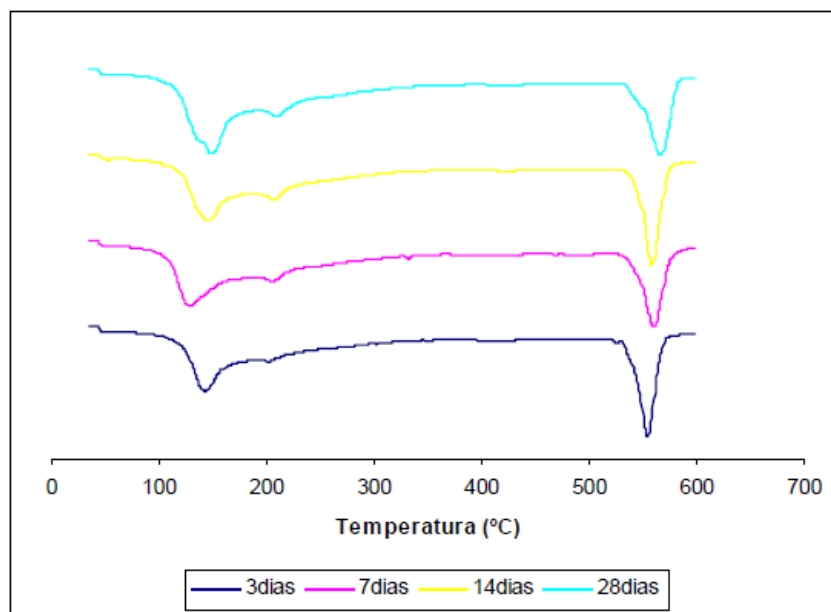


Figura 2-Curva DTG para pastas de cimento com 5 % de CCA em diferentes idades  
Fonte: TASHIMA, 2006

A Figura 2 representa uma curva típica do ensaio de termogravimétrica obtida por Tashima (2006) para pastas de cimento produzidas com e sem cinza da casca de arroz. Neste trabalho, a técnica termogravimétrica foi selecionada para analisar a estabilidade térmica dos compósitos de fibrocimento produzidos com fibras tratadas termicamente e sem tratamento bem como para verificar a atividade pozolânica da CCA. Pode-se observar que a redução do

CH é crescente com o aumento da idade de cura da pasta de cimento. Uma vez que, a reação pozolânica acontece de forma lenta, sendo mais significativa em idades de cura mais avançada.

Segundo Pereira (2011), a adição de CCA com teor de 30% em massa de substituição do cimento *Portland* apresentou melhor resultado em termos da redução do CH presente na matriz cimentícia. Entretanto, foi verificado que para idades de ensaio mais avançada essa redução do CH foi ainda mais eficiente, apresentando melhor resultado o ensaio realizado com amostras submetidas a 104 dias de cura.

### **3.2. Ensaio de Microscopia eletrônica de varredura para análise da morfologia das placas de fibrocimento**

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) é empregado para analisar a microestrutura dos materiais, uma vez que o equipamento apresenta grande capacidade de resolução. Para avaliar a composição química de diferentes pontos da amostra juntamente com o MEV é aplicada a técnica conhecida como Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). Antes do ensaio é necessário cobrir a superfície da amostra com uma fina camada de ouro, processo conhecido como metalização. Essa etapa é de fundamental importância para aumentar o contraste da amostra e torna-la condutora.

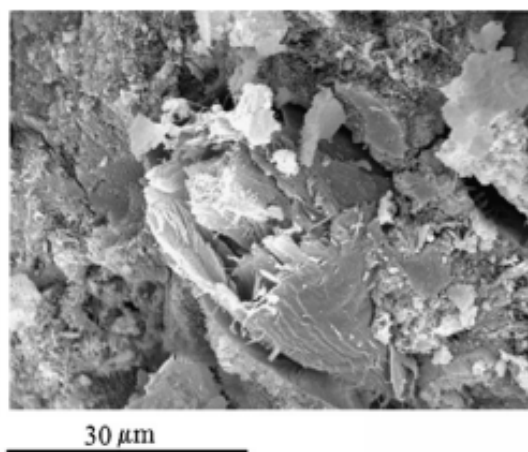


Figura 3 - Imagem da superfície de fratura do compósito reforçado com polpa Kraft, após submetido ao envelhecimento  
Fonte: CLARAMUNT. *et. al.*, 2011

A figura 3 ilustra uma imagem típica de MEV da região de precipitação dos produtos de hidratação do cimento no lúmen e na superfície das fibras.

### **3.3. Índice de atividade Pozolânica - NBR 7215**

Segundo a NBR 7215(ABNT, 1992), a atividade pozolânica de um resíduo com o cimento Portland pode ser avaliada pela sua resistência a compressão simples. Nesse ensaio é realizado primeiramente a dosagem, mistura e moldagem de corpos de prova de argamassa com formato cilindro, com diâmetro de 50mm e altura de 100 mm.

Para obtenção da argamassa de referência é utilizado areia padronizada, cimento Portland e água. A argamassa produzida com o material de estudo é obtida pela substituição parcial de cimento Portland por 35% de material pozolânico, sendo que a relação água/cimento a ser utilizada em cada traço é terminada em função do índice de consistência estabelecido por norma de  $225 \pm 5$ mm. Após a moldagem, os corpos de prova são submetidos a uma cura de 28 para realização do ensaio mecânico.

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1994), um resíduo é classificado como pozolânico quando a razão da resistência a compressão simples da argamassa produzida com o material de estudo em relação a argamassa de referência (sem material pozolânico) for superior a 75%.

Menezes *et.al.* (2009) avaliaram a atividade pozolânica dos resíduos provenientes do beneficiamento do caulim pelo método IAP (Índice de Atividade Pozolânica). Para cada teor de resíduo empregado em substituição parcial ao cimento Portland foram produzidos cinco corpos de prova de argamassa. Com base nos resultados das propriedades mecânicas foi verificado que para o teor de 15 % de adição de resíduo natural houve um aumento de 150 % da resistência a compressão simples em relação a argamassa de referencia. O IAP foi superior ao valor mínimo estabelecido por norma, sendo assim classificado como material pozolânico.

### **3.4. Processo de Produção de Fibrocimento**

O processo de produção de fibrocimento adotado para produção de placas planas de fibrocimento é derivado do processo á vácuo e compactação *Hatschek* empregado em escala industrial. Os resultados alcançados em laboratório são de qualidade, já que o processo segue

a mesma lógica de produção da indústria. Desse método, que em escala laboratorial recebe o nome de *Hatschek* modificado são produzidas placas planas delgadas de fibrocimento com dimensões de aproximadamente 160x160 mm<sup>2</sup>. O processo de produção das placas de fibrocimento é composto basicamente de 6 etapas: 1) Mistura dos constituintes em um recipiente plástico; 2) Retirada do excesso de água pela aplicação de vácuo; 3) Retirada da água absorvida pelas fibras por compressão mecânica; 4) Cura das placas; 5) obtenção das amostras; 6) Preparação das amostras.

### 3.4.1. Mistura dos constituintes em um recipiente plástico

Primeiramente, os materiais pulverulentos são colocados em um recipiente plástico, contendo cerca de 200 ml de água com fibras dispersas. Para obtenção de uma mistura homogênea, estes constituintes são misturados com o auxílio de um agitador mecânico durante aproximadamente 2 minutos, conforme Figura 4.



Figura 4 - Adição dos constituintes  
Fonte: Grupo de pesquisa do CEFET-MG

### 3.4.2. Retirada do excesso de água pela aplicação de vácuo

O excesso de água é retirado inicialmente pela aplicação de vácuo no molde metálico em que a mistura foi colocada logo após a etapa 1, auxiliada pelo adensamento mecânico com soquete metálico. A aplicação de vácuo é feita por meio de uma bomba de sucção. O molde metálico é constituído por duas partes: A parte superior tem como principal função dar forma à placa, enquanto a parte inferior cria uma câmara fechada necessária para a aplicação de vácuo. É fundamental o emprego de materiais filtrantes no molde para evitar a passagem de finos junto com a água pela linha de sucção. A válvula da linha de pressurização é fechada no

momento que a superfície da placa passar do aspecto inicialmente brilhante para o seco, conforme Figura 5. A água retirada das placas nesta etapa é armazenada em um cilindro.

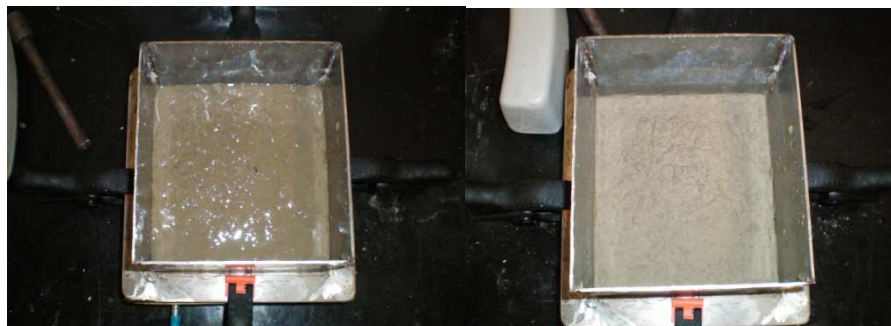


Figura 5- Aspectos inicial e final das placas após aplicação de vácuo  
Fonte: Grupo de pesquisa do CEFET-MG

#### **3.4.4. Retirada da água absorvida pelas fibras por compressão mecânica**

A terceira etapa consiste na retirada da água absorvida pelas fibras vegetais. Um conjunto de seis placas são empilhadas e separadas por chapas metálicas de mesma dimensão. Nesta etapa, esse conjunto de placas serão submetidas a uma tensão de compressão de 3,2 MPa em uma prensa hidráulica durante 10 minutos. Esse valor de tensão foi considerado ótimo pela literatura, sendo avaliado nestes trabalhos o efeito do incremento de tensão na porosidade aparente e densidade do material (RODRIGUES. *et. al.*, 2008).

#### **3.4.5. Cura das placas**

Para a etapa de cura, as placas serão armazenadas durante os 7 primeiros dias em um saco plástico com umidade relativa de 100%. Esta etapa é de fundamental importância para as placas não perderem água em excesso para o ambiente. Após esse período, as placas serão retiradas do saco plástico e mantidas em ambiente laboratorial com temperatura a 25 °C e umidade relativa de 50% até a idade de 21 dias de cura.

#### **3.4.6. Obtenção das amostras**

Previamente ao ensaio mecânico, nesta etapa as placas serão cortadas com emprego de uma serra de mármore de corte úmido, apoiada sobre uma mesa em amostras com dimensões

de aproximadamente de 160x40x6, 5 mm. Cada placa fornece 3 amostras do mesmo tipo de mistura para serem ensaiadas.

### 3.4.7. Preparação das amostras

Para analisar a influência da umidade no comportamento mecânico dos compósitos de fibrocimento, metade das amostras será saturada em água e a outra metade submetida a um ambiente com umidade controlada de 50%, ficando exposta a este ambiente por cinco dias antes dos testes mecânicos.

### 3.5. Determinação das propriedades mecânicas

Para determinação das propriedades mecânicas pode ser realizado um ensaio de flexão de três pontos em uma máquina universal de carregamento, conforme Figuras 4 e 5. A partir da curva de carregamento gerada durante o ensaio são calculadas as seguintes propriedades mecânicas: módulo de elasticidade, módulo de ruptura, energia específica e limite de proporcionalidade, conforme Figura 7.

Segundo Claramunt *et. al.* (2011), esse ensaio é considerado o mais importante para mostrar o efeito das fibras empregadas como material de reforço em materiais compósitos de matriz cimentícia.

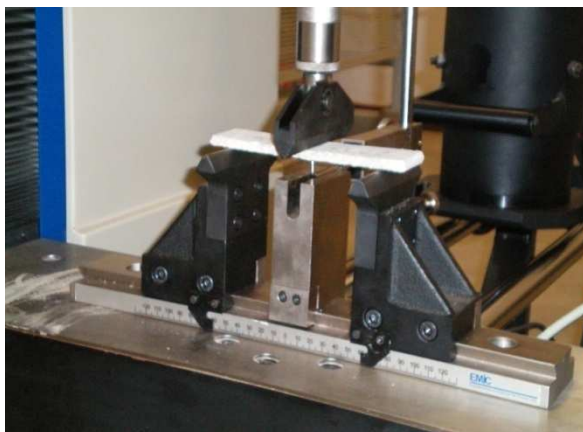


Figura 6-Ensaio de flexão de três pontos  
Fonte: Grupo de pesquisa do CEFET-MG

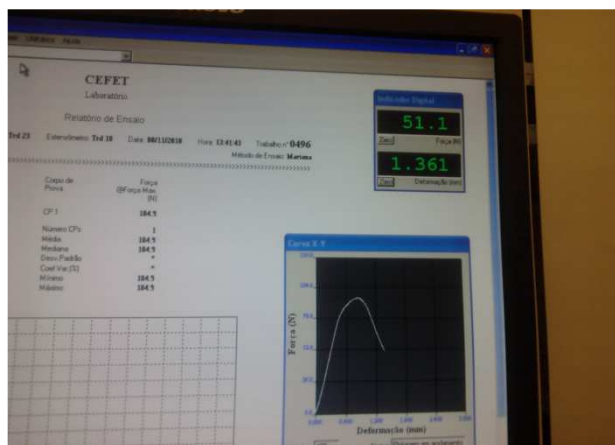


Figura 7-Software de leitura das cargas X deflexões  
 Fonte: Grupo de pesquisa do CEFET-MG

O módulo de ruptura (MOR) é calculado de acordo com a Eq.7, levando em consideração a inércia da seção resistente, a distância entre os apoios que é de 120 mm e a espessura da amostra. Esse parâmetro mecânico representa a resistência á tração na flexão das placas de fibrocimento.

$$MOR = \frac{3f_{máx}l}{2bh^2} \quad (7)$$

$f_{máx}$  representa à força de ruptura;  
 $l$  é a distancia entre os apoios;  
 $h$  é a espessura média da amostra;  
 $b$  é a largura média da amostra.

Por definição o módulo de elasticidade (MOE) é dado pela a inclinação da reta tangente a curva de carregamento no trecho de deformação elástico, onde a lei de Hook é valida. O módulo de elasticidade será calculado de acordo com a Eq.8.

$$MOE = \tan \alpha \frac{l^3}{4bh^3} \quad (8)$$

Onde  $\alpha$  representa a inclinação da reta tangente na região elástica

O limite de proporcionalidade (LOP) é o ponto da curva de carregamento que divide a fase elástica do carregamento da fase plástica até o ponto onde existe linearidade entre tensão e deformação. Esse parâmetro mecânico representa a resistência da matriz de cimento.

A energia específica (energia por unidade de volume) representa a energia absorvida pela amostra desde o início do carregamento até o ponto onde a tensão de flexão é igual a 0,4 do módulo de ruptura. Será calculada através da razão da área da curva de carregamento pela área da seção transversal

#### 4. Resultados das propriedades mecânicas

De acordo com a metodologia adotada, neste item serão apresentados os resultados das propriedades mecânicas de alguns trabalhos presente na literatura que avaliaram a influência da adição da cinza da casca de arroz como material de substituição parcial do cimento *Portland* na produção de fibrocimento reforçado com fibras vegetais.

Pereira (2011) analisou a influência da variação da umidade e temperatura, isoladamente, no desempenho de compósitos de fibrocimento reforçados com fibras vegetais. Metade das amostras foi produzida com CCA, como material de substituição parcial do cimento *Portland* e a outra metade, as de referência com 50% cimento e 50 % *filler* calcário. Os resultados das propriedades mecânicas estão representados nas Figuras 8, 9 e 10.

A Figura 8 representa os resultados do módulo de ruptura das amostras ensaiadas. Pode-se notar que os compósitos com CCA apresentaram melhor comportamento mecânico em relação aos compósitos de referência na condição de equilíbrio e também que não houve perda ou alteração de resistência significativa ao longo dos ciclos de degradação.

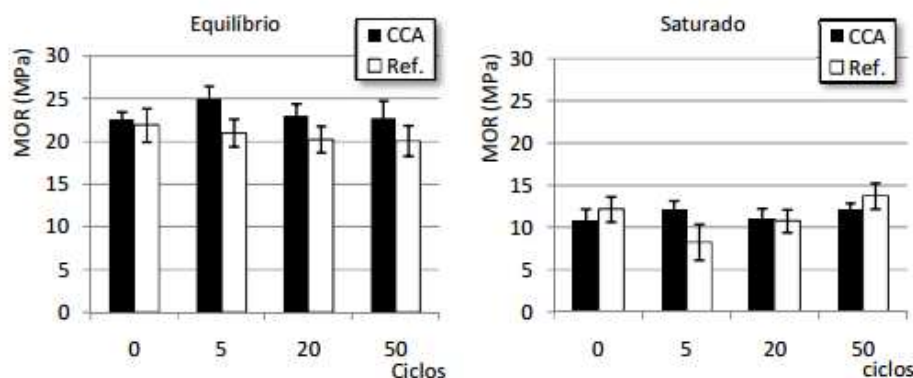


Figura 8 – Resultados do MOR para compósitos de referência e com adição de CCA, na condição de umidade variável  
Fonte: PEREIRA, 2011.

A manutenção das propriedades mecânicas com o tempo pode ser explicada pela melhoria das características físicas e química da matriz, principalmente na região de transição.

A Figura 9 representa os resultados da energia específica das amostras ensaiadas. Pode-se observar que na condição em equilíbrio (50% de UR), para ambas os tipos de amostras houve perda significativa da capacidade de absorção de energia de deformação nos primeiros 5 ciclos. O mesmo resultado foi verificado por Zille (2009). Tal fato foi explicado devido possivelmente à perda de aderência entre a fibra e matriz, sendo mais intensa nesse primeiro ciclo de saturação e secagem. Quando submetida à variação de umidade, as fibras apresentam maior capacidade de deformação em relação à matriz de cimento, resultando na erosão interfacial.

A figura 10 apresenta os resultados do limite de proporcionalidade das amostras ensaiadas. Verificou-se que os compósitos com CCA apresentaram melhor desempenho na fase de pré-fissuração, o que indica melhoria na microestrutura da matriz de cimento. Uma vez que, o limite de proporcionalidade depende somente das características da matriz. A adição de CCA contribuiu para o refinamento dos poros da matriz dos fibrocimentos.

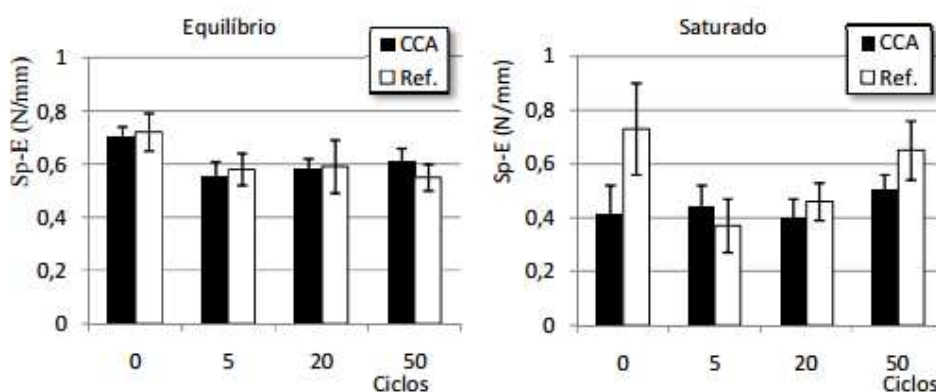


Figura 9 – Resultados da energia específica para os compósitos de referencia e com adição de CCA, na condução de umidade variável  
Fonte: PEREIRA, 2011.

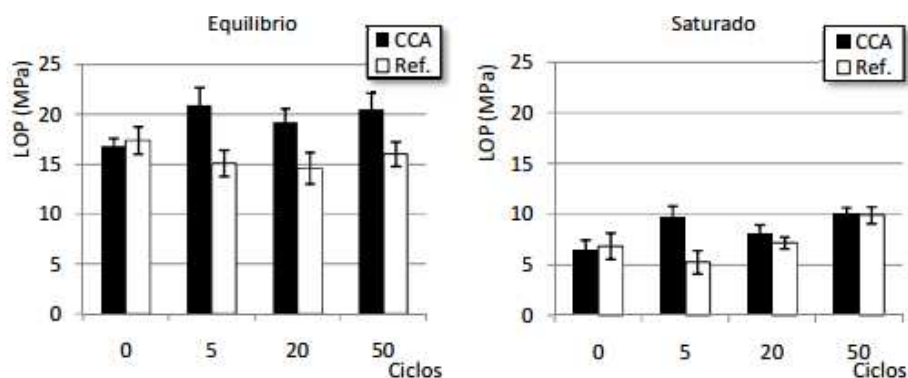


Figura 10 - Resultados do limite de proporcionalidade para os compósitos de referência e com adição de CCA, na condução de umidade variável  
 Fonte: PEREIRA, 2011

Nesse trabalho foi verificado que os compósitos com CCA apresentaram maior porosidade aparente e absorção de água em relação ao compósito de referência. Mesmo assim tiveram melhor desempenho mecânico, traduzido em termos do maior valor do módulo de ruptura e limite de proporcionalidade.

Rodrigues *et. al.* (2010) avaliaram a influência da adição de 2 tipos de cinzas da casca de arroz, obtidos em processos de queima diferentes, na substituição parcial do cimento Portland. Para produção das amostras de fibrocimento foi empregado 15% e 30% de cinza. Com base nos ensaios realizados, foi verificado que o emprego de 30% da cinza, com maior teor de sílica, contribuiu para redução da permeabilidade da matriz de cimento e melhoria das características da região de transição. O LOP dos compósitos com 30% de cinza foi em torno de 22% maior que o compósito de referência, na condição de equilíbrio. Tais características são fundamentais para produção de compósitos de fibrocimento menos susceptíveis a degradação.

Pereira *et. al.* (2013) utilizaram cinza da casca de arroz, obtida no processo de queima em um forno a uma temperatura superior a 1000°C para substituição parcial do cimento Portland empregado na produção de compósitos de fibrocimentos reforçados com fibras de coco. Após o envelhecimento proposto, as mostras produzidas com cinco diferentes tipos de formulações foram submetidas aos ensaios mecânicos e físicos.

As Figuras 11 e 12, a seguir apresentadas, ilustram o comportamento mecânico típico de amostras de fibrocimento reforçadas com fibras vegetais, antes e depois do envelhecimento, respectivamente, obtidas por Pereira *et. al.* (2013):

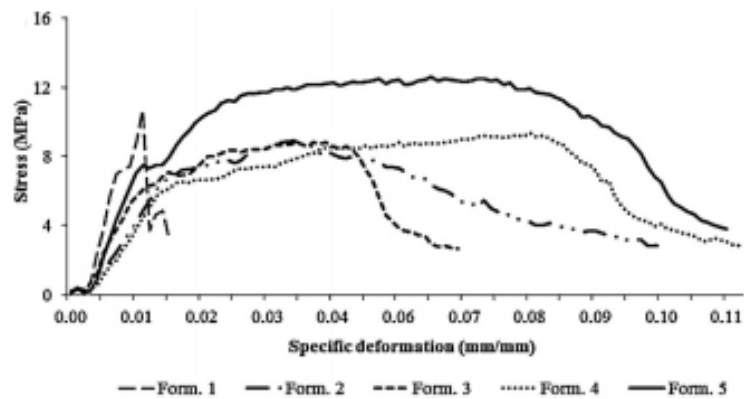


Figura 11 - Curva tensão x deformação para amostras não degradadas  
 Fonte: Pereira et. al, 2013

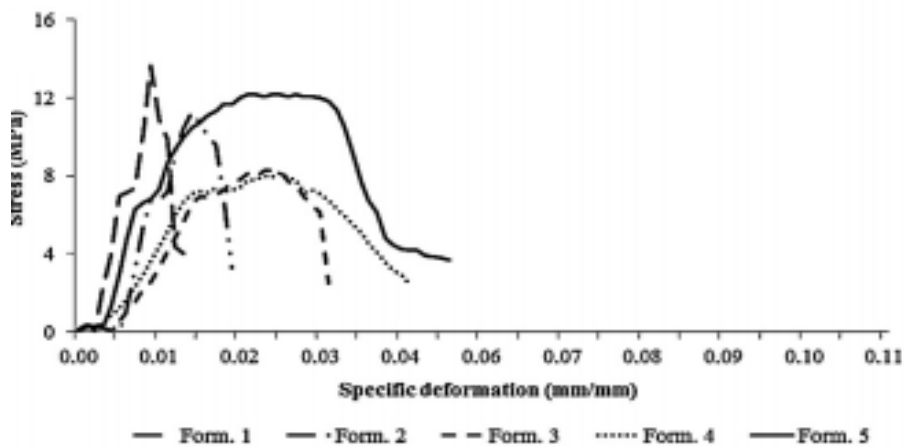


Figura 12 - Curva tensão x deformação para amostras degradadas  
 Fonte: Pereira et. al, 2013

Ressaltam-se, nos gráficos, as linhas dispostas como Form 1, Form 2, Form 3, Form 4 e Form 5, compostas de, respectivamente, 0%, 3%, 10, 40 e 50 % de cinza da casca de arroz.

Existe uma diferencia significativa de comportamento mecânico entre os compósitos envelhecidos e não envelhecidos. Nos compósitos envelhecidos, nota-se uma perda considerável na capacidade de absorção de energia de deformação, conhecida como tenacidade. Foi verificado que a amostra com maior teor de cinza incorporada (50%) apresentou melhor comportamento mecânico, em termos do modulo de ruptura (15,7MPa) e energia especifica em relação as demais amostras. Entretanto, a porosidade aparente e absorção de água das amostras com de cinza da casca de arroz foi significativamente superior a amostra de referência (100% cimento Portland). O mesmo comportamento em termos desses parâmetros físicos foi observado por Pereira (2011).

## 5. Considerações Finais

O emprego de resíduos na forma de adição mineral para substituição parcial do cimento *Portland* pode contribuir para minimizar os problemas ambientais decorrente da sua disposição irregular no meio ambiente e também para a melhoria do desempenho dos materiais a base de cimento. Dentre esses resíduos, a cinza da casca de arroz apresenta grande potencial de emprego na construção civil devido seu alto teor de sílica amorfa. A reatividade da cinza depende da faixa de temperatura de calcinação da casca de arroz, bem como da sua granulométrica e área da superfície específica.

Com base nos resultados dos trabalhos apresentados, pode-se observar que o emprego da CCA pode contribuir para melhoria do comportamento mecânico e durabilidade de fibrocimentos reforçados com fibras vegetais. A incorporação da CCA no processo de produção desse material pode contribuir para a redução da porosidade da matriz de cimento, tornando o fibrocimento mesmo susceptível aos mecanismos de degradação. Como resultado da sua reação pozolânica com o CH, a alta alcalinidade presente na matriz de cimento é reduzida, aumentando assim a compatibilidade entre fibra e matriz. Uma vez que, as fibras vegetais são extremamente atacadas pelos álcalis do cimento e pelo meio altamente alcalino criado pela pasta de cimento.

O processo de cornificação juntamente com o emprego de adições minerais pode contribuir ainda mais para a manutenção do desempenho de compósitos de cimento reforçados com polpa vegetal. Trata-se de um processo bastante conhecido na indústria de papel, porém ainda com aplicações incipiente na produção de fibrocimentos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREA - Associação Brasileira de Expostos ao Amianto. Disponível em: <http://www.abrea.com.br/amiantobrasil.htm> / <http://www.abrea.com.br/06historia.htm>.

Acessado em: Out.2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR - 5752, Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR - 7215, Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR – 12653: Materiais pozolânicos-Especificação. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR – 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

AKERS, S.A.S., STUDINKA, J. B. Ageing behaviour of cellulose fibre cement composites in natural weathering and accelerated tests. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, v. 11, n<sup>o</sup>2, p. 93-97. 1989.

BARIN, D.S. *Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento Portland branco com altos teores de adição de escória de alto forno e ativador químico*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008.

BENTUR, A., AKERS, S. A. S. The microstructure and ageing of cellulose fibre reinforced autoclaved cement composites. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, v. 11, n<sup>o</sup>2 p. 111-115. 1989.

CANOVAS, M. E., KAWICHE, G. M. and SELVA, N. H. Possible ways of preventing deterioration of vegetable fibers in cement mortars. 2<sup>nd</sup> Int. Symp. Vegetable Plants and Their Use as Building Materials. RILEM, Proceedings n.7, Chapman & Hall, London, 1990.

CHAWLA, K. K. *Composite Materials, Science and Engineering*. Springer-Verlag, 292p., 1987.

CLARAMUNT, J., ARDANUY, M., HORTAL, J. A.G. Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites. *The International Journal of Carbohydrate Polymers*, p. 200-205. 2009.

CLARAMUNT, J., ARDANUY, M., HORTAL, J. A.G., FILHO, R.D.T. The hornification of vegetable fibres to improve the durability of cement mortar composites. *The International Journal of Cement and Concrete Composites*, p. 586-595. 2011.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução N ° 348, 16 agosto de 2004. Disponível em: [http://www.mma.gov.br/port/conama/reunalt.cfm?cod\\_reuniao=892](http://www.mma.gov.br/port/conama/reunalt.cfm?cod_reuniao=892) . Acessado em: Dez.2015.

DELLA, V.P., KUHN, I., HOTZA, D. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica . *Quim.Nova*, v. 24, n °6 p. 778-782. 2001.

DINIS, F., GIL, M.H., Castro, J.A.A.M. Hornification - Its origin and interpretation in wood pulps. *Wood Sci Technol*, 2004.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral Brasileiro 2012 - Amianto (Crisotila). Disponível em: [https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7383](https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7383). Acessado em: Ago.2015.

FOLETTI, E.L; HOFFMANN, R; HOFFMANN, R,S; JAHN, S,L. Applicability of rice husk ash. *Quím.Nova*, São Paulo, V.28, N°6, P.1055-1060.2005.

KRUG, L.F. *Influência do beneficiamento por peneiramento no comportamento da cinza da casca de arroz: Estudo com adição pozolânica em concreto*. Dissertação (Mestrado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo , 2011.

PAYÁ, J. *et al*. Determination of Amorphous Silica in Rice Husk Ash by a Rapid Analytical Method. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 2, p. 227-231, 2001.

PEREIRA, M,A. *Influência da temperatura e umidade no ciclos de degradação acelerada de fibrocimentos com cinza de casca de arroz como adição mineral*. Dissertação (Mestrado). CETET-MG, Departamento de Engenharia Civil, Minas Gerais, 2011.

PEREIRA,C.L. et al.Use Of highly reactive rice husk ash in the production of cement matrix reinforced with green coconut fiber. *Industrial Crops and Products*.V.49,P.88-96.2013.

MENEZES, R. R. ;NEVES, G.A. ;SOUZA,J. Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, V.13,N°6, P. 795-801.2009.

MOHR, B.J. ;NANKO,H. ;KURTIS,K.E. Durability of Kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling. *Cement and Concrete Composites*. V.27,n°4. p 435-448,2005.

NETO, A.C.M;CINCOTTO, M.A; REPETTE,W.L. Influência do teor de ativador e da idade de exposição na retração por secagem de argamassas com cimentos de escória ativada com silicato de sódio.Boletim Técnico da escola Politécnica da USP, São Paulo.p 2-11, 2002.

RODRIGUES, C. S. *Efeito da adição de cinza de casca de arroz no comportamento de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu*. Tese (Doutorado). PUC – Rio, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2004.

RODRIGUES, C. S. ;GHAVAMI, K. ;STROEVEN,P. Porosity and water permeability of rice husk ash-blended cement composites reinforced with bamboo pulp.*Journal of materials Science*. V.41, n°21.P. 6925-6937,2006.

RODRIGUES, C. S. ;GHAVAMI, K. ;STROEVEN,P. The influence of compaction pressure and matrix composition on the strength and interfacial bonding of cellulosic-pulp-reinforced cement composites. In: Tenth Internacional Conference on Non- Conventional Materials and Technologies,2008.

RODRIGUES, C. S.; Stroeven, P. ; Ghavami, K. . Rice husk ash as a supplementary raw material for the production of cellulose-cement composites with improved performance. *Waste and Biomass Valorization*, v. 1, p. 241-249, 2010.

SALES, A. T. C. *Retração, fluência e fratura em compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu*. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2006.

STUDINKA, J.B. Asbestos substitution in the fibers cement industry. *The international journal of cement and lightweight concrete*. V.11, p73-78,1989.

VU, D.D. Strength properties of metakaolin-blended paste, mortar and concrete. *Deft universe:ed.DUP Science*;2002.P. 9 – 86.

TASHIMA, M. M., *Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland*. Dissertação(Mestrado). UNESP, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo, 2006.

TASHIMA, M. M et al . Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozzolânica. *Ambient. constr.*, Porto Alegre , v. 12, n. 2, p. 151-163, 2012

TERRACINI, BENEDETTO. Additional features of the worldwide double standards in the prevention of asbestos-related diseases.*Ann Ist Super Sanita*. V.42, N°2. P. 174-177.2006

ZILLE, H. R. B. *Influência de ciclos de saturação e secagem no comportamento de compósitos de cimento reforçados por polpas celulósicas*. Dissertação (Mestrado). CETET-MG, Departamento de Engenharia Civil, Minas Gerais, 2009.

Freire, Daniel Moreira.  
F866d Durabilidade de fibrocimentos reforçados com fibras  
vegetais  
[manuscrito]: levantamento do estado de arte / Daniel Moreira  
Freire. -  
2016.  
42 f., enc.: il.

Orientador: Aldo Giuntini de Magalhães.

“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em  
Produção e Gestão do Ambiente Construído da Escola de  
Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais”

Bibliografia: f. 39-42.

1. Construção civil. 2. Cinza de casca de arroz. 3.  
Durabilidade (Engenharia). 4. Fibras. I. Magalhães, Aldo Giuntini  
de. II. Universidade Federal de Minas Gerais.  
Escola de Engenharia. III. Título.

CDU:

691