DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE LAMINADOS CIMENTÍCEOS REFORÇADOS COM FIBRAS LONGAS DE SISAL

João de Almeida Melo Filho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D. Sc.

Prof. Eduardo de Moraes Rego Fairbairn, Dr. Ing.

Prof. José Roberto Moraes d'Almeida, D. Sc.

Prof. Paulo Roberto Lopes Lima, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL SETEMBRO DE 2005

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

MELO FILHO, JOÃO DE ALMEIDA

Desenvolvimento e Caracterização de Laminados Cimentíceos Reforçados com Fibras Longas de Sisal [Rio de Janeiro] 2005

X, 114 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,

M.Sc., Engenharia Civil, 2005)

Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

- 1. Fibras de Sisal
- 2. Compósitos
- 3. Laminados
 - I. COPPE/UFRJ II. Título (série).

Aos meus pais e a tia Erunisa (in memorian) pelo apoio, confiança, amizade e carinho sempre demonstrados.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e capacitação em todas as minhas conquistas realizadas durante minha vida.

Aos meus pais, João e Antonieta, por terem me proporcionado o incentivo e condições para os meus estudos durante toda minha vida. Às minhas irmãs, que sempre me deram muita força e acreditaram em minha capacidade. A todos os tios e tias que me deram força, coragem e condições para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao casal Álvaro e Eliene pelo amparo, ajuda nas maiores dificuldades e, principalmente, amizade desenvolvida durante todo o tempo de minha dissertação, que nunca irei esquecer.

Ao meu orientador, Prof. Romildo, pela atenção, confiança e sugestões conduzidas durante todo o trabalho.

À tia Erunisa, tio Eliseu, Ana e toda a família Bandeira, pelo carinho e por sempre acreditarem em minha capacidade.

Às amigas que me faziam companhia nos muitos finais de semana, dando-me alegrias e divertimento: Isadora, Marina, Tatiana, Raquel, Jeisa, Maysa, Germana, Denise.

Aos incentivos demonstrados pelos professores da Universidade Federal do Piauí (UFPI), em especial Fernando Drummond e Pedro Wellington.

À Reila Velasco e ao Flávio, pela amizade e grande colaboração nos dados e ensaios deste trabalho.

Aos amigos e colegas que fiz durante este período de UFRJ, que serão lembrados sempre com muito carinho, especialmente: Felipe, Reijane, Joatan, Maurício, Ederli, Jonylson, Guilherme, Miguel, Thiago, Eugênia, Sidiclei, Fábio, Sérgio, Cíntia, Janine, Patrícia.

Aos amigos de apartamento Walber e Fabrício pelo companheirismo.

Aos técnicos do Labest pelo auxílio nos ensaios experimentais: Ailton, Santiago, Flávio e Arnaldo.

À Associação dos Pequenos Agricultores do Município de Valente (APAEB) pelo fornecimento das fibras de sisal.

Aos demais professores do Programa de Engenharia Civil (PEC) que estiveram sempre prontos para prestar ajuda: Ronaldo Battista, Eduardo Fairbairn e Carlos Magluta.

E a todos que colaboraram direta e indiretamente para que este trabalho pudesse ser realizado.

À CAPES e à Petrobrás pelo apoio financeiro, sem o qual esse trabalho não seria possível.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE LAMINADOS CIMENTÍCEOS REFORÇADOS COM FIBRAS LONGAS DE SISAL

João de Almeida Melo Filho

Setembro/2005

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e a caracterização física e mecânica de compósitos laminados cimentíceos reforcados com fibras longas de sisal alinhadas unidirecionalmente. Frações volumétricas de filamentos e cordões de sisal variando de 0 a 8% foram estudadas. Laminados planos reforçados por 3 e 5 camadas de fibras e moldados sob pressões de 2, 3 e 4 MPa foram produzidos visando desenvolver o melhor arranjo e pressão de moldagem. A matriz de cimento portland utilizada foi modificada pela substituição parcial do cimento por metacaulinita e tijolo moído para o completo consumo de hidróxido de cálcio gerado durante o processo de hidratação do cimento. A quantidade de hidróxido de cálcio presente na matriz foi determinada através de análise termogravimétrica tendo sido determinado que a mistura contendo 30% de metacaulinita e 20% de tijolo moído, como substitutos parciais, em massa, do cimento, é livre de hidróxido de cálcio. Ensaios de consistência foram efetuados visando à determinação da dosagem de superplastificante e da determinação do diâmetro máximo da areia a ser utilizada na matriz auto adensável reforçada por 5% de micro fibra de volastonita. Visando à determinação da tenacidade à flexão, tensão de primeira fissura e tensão pós-fissuração foram realizados ensaios de flexão em 3 e 4 pontos. Ensaios de compressão uniaxial foram realizados para se determinar à resistência das matrizes utilizadas. Ensaios de tração direta foram realizados nos materiais estudados para a determinação da tensão de primeira e pósfissuração e para a determinação indireta da adesão fibra matriz. Ensaios de flexão em 3 pontos foram feitos em compósitos corrugados e planos para se avaliar o benefício da corrugação. Propriedades físicas como densidade, porosidade aparente, capacidade de absorção de água e estangueidade foram determinadas. A variação dimensional dos compósitos e matrizes foi também aferida. Uma análise micro estrutural dos laminados foi efetuada utilizando-se microscópio óptico e eletrônico de varredura.

Abstract of the Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF CEMENTITIOUS LAMINATES REINFORCED BY LONG SISAL FIBERS

João de Almeida Melo Filho

September/2005

Advisor: Romildo Dias Toledo Filho

Department: Civil Engineering

Cement mortar laminates reinforced with long unidirectional aligned sisal fibers were developed and characterized in this study. The optimum fiber volume fraction of single filament and string sisal ranging from 0 to 8% was studied. Laminates reinforced with 3 and 5 fiber layers molded under a pressure of 2, 3 and 4 MPa were produced to determine the best fiber arrangement and molding pressure. The Ordinary Portland Cement (OPC) matrix was modified by the addition of metakaolin (MK) and calcined clay brick powder (CCB) in order to completely consume the calcium hydroxide (CH) generated during the cement hydration. The content of CH in the matrix was determined by thermal analysis and it was found that the mixture containing 30% of MK and 20% of CCB, as cement replacement in mass, was free of CH. Flow Table Spread (FTS) test was used to determine the content of superplasticizer and sand maximum diameter to be used in the self-consolidating matrix that was micro-reinforced with 5% of wollastonite fiber. Flexural toughness, first crack strength and ultimate strength of the composites were determined from four point bending tests. Uniaxial compression tests were performed to establish the resistance of the used matrices. Direct tensile tests were performed in the studied materials to determine the first crack strength, ultimate strength and the fiber-matrix bond strength. Three point bending tests were performed in corrugated and plain laminates to study the influence of corrugation. Physical properties such as apparent porosity, water tightness, water absorption capacity and specific weight were established. The dimensional variation of the composites and matrices were also determined. A micro structural analysis of the laminates was performed using a scanning electron microscopy (SEM) and optical microscopy.

<u>ÍNDICE</u>

1.	INTRODUÇÃO	1
	1.1. Considerações iniciais	1
	1.2. Estrutura da dissertação	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
	2.1. Introdução	4
	2.2. Material compósito	4
	2.3. Matriz cimentícea	5
	2.4. Uso de pozolanas nos compósitos	5
	2.4.1. Metacaulinita	6
	2.4.2. Resíduo cerâmico	7
	2.5. Fibras naturais	8
	2.5.1. Fibras naturais vegetais	8
	2.5.1.1. A fibra de sisal	10
	2.5.2. Fibras naturais minerais	14
	2.5.2.1. A fibra de asbesto	14
	2.5.2.2. A fibra de volastonita	15
	2.6. Processos produtivos	16
	2.7. Laminados cimentíceos	18
	2.8. Durabilidade de compósitos reforçados com fibras celulósicas	20
3.	MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	21
	3.1. Características dos materiais	21
	3.1.1. Cimento	21
	3.1.2. Argilas calcinadas: metacaulinita e resíduo cerâmico	22
	3.1.3. Areia	24
	3.1.4. Superplastificante	25
	3.1.5. Água	25
	3.1.6. Fibras	25
	3.1.6.1. Fibras de volastonita	25
	3.1.6.2. Fibras de sisal	26
	3.2. Métodos experimentais	28
	3.2.1. Desenvolvimento da Matriz livre de $Ca(OH)_2$ e com	adequado
	comportamento reológico	28

3.2.1.1. Obtenção de pastas isentas de Ca(OH) ₂	29
3.2.1.2. Comportamento mecânico das argamassas livres de	e Ca(OH) ₂ e
micro-reforçadas com volastonita	30
3.2.1.3. Determinação do diâmetro máximo da areia (DM)	e do teor de
superplastificante (SP) para uma adequada reologia	da matri32
3.2.2. Determinação da pressão de moldagem, volume de fibras e	e número de
camadas	34
3.2.3. Processo de produção dos laminados	35
3.2.4. Uso do cordão de sisal como reforço	41
3.2.5. Produção de placas planas e corrugadas	43
3.3. Caracterização mecânica dos compósitos	46
3.3.1. Ensaio de compressão	46
3.3.2. Ensaio de tração direta	48
3.3.3. Ensaio de flexão	51
3.4. Ensaios físicos	57
3.4.1. Ensaios de retração por secagem	57
3.4.2. Ensaios de estanqueidade	58
3.4.3. Ensaios de absorção de água, índices de vazios e ma	assa
específica	59
3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados	60
3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados	60
 3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 	60 61
 3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 4.1. Ensaios de compressão 	60 61 61
 3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 4.1. Ensaios de compressão	60 61 61 s diâmetros
 3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 4.1. Ensaios de compressão	60 61 s diâmetros 61
 3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados	60 61 s diâmetros 61 to M1cs6 na
 3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados	60 61 s diâmetros 61 to M1cs6 na 63
 3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados	60 61 s diâmetros 61 to M1cs6 na 63 64
 3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados	60 61 s diâmetros 61 to M1cs6 na 63 64 64
 3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados	60 61 s diâmetros 61 to M1cs6 na 63 64 64 64
 3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados	60 61 s diâmetros 61 to M1cs6 na 63 64 64 64 64
 3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados	
 3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados	60 61 s diâmetros 61 s diâmetros 61 to M1cs6 na 63 63 64 64 64 67 69 alinhadas 71
 3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados	60 61 s diâmetros 61 to M1cs6 na 63 63 64 64 67 69 alinhadas 71
 3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados	60 61 s diâmetros 61 to M1cs6 na 63 63 64 64 64 67 69 alinhadas 71 71
 3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados	

4.5.1. Tração direta em quatro pontos	75
4.5.2. Tração direta	77
4.5.3. Análise Microscópica	79
4.6. Influencia do tempo de cura dos compósitos	83
4.6.1. Tração na flexão em quatro pontos direta	83
4.6.2. Tração direta	85
4.7. Uso do cordão de sisal como elemento de reforço	87
4.7.1. Tração na flexão em quatro pontos	87
4.8. Comportamento na flexão das placas planas e corrugada	91
4.9. Determinações das propriedades físicas dos materiais	95
4.9.1. Massa específica, índice de vazios, absorção por	imersão e
estanqueidade	95
4.9.2. Determinação da retração por secagem	97
5. CONCLUSÃO	99
5.1. Conclusões	99
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
APÊNDICE	107

CAPÍTULO 1

1. Introdução

1.1. Considerações iniciais

Um dos passos mais importantes na elaboração de um projeto de engenharia é a escolha de um material adequado, que tenha, acima de tudo, propriedades mecânicas adequadas e durabilidade. Um dos materiais que apresenta grande potencial de aplicação, os materiais compósitos, são formados pela união de dois ou mais materiais e, juntos, produzem propriedades as quais não podem ser obtidas com qualquer um dos seus componentes individuais. O conceito de material compósito é bem antigo, e, de acordo com êxodos 5:6, os egípcios usavam a palha, para reforçar tijolos de barro.

Através da observação da natureza, pode-se entender melhor a idéia de compósitos. A madeira, por exemplo, é um compósito fibroso constituído de uma matriz de lignina e pectina, reforçada com fibras de celulose. Outro exemplo são os ninhos de barro reforçados com palha feito pelo João de Barro, um pássaro encontrado em várias regiões do Brasil, que trabalha cuidadosamente na construção de seus ninhos localizados em topos de arvores.

Nos dias de hoje, são bastante empregados na construção civil os compósitos à base de cimento: pastas, argamassas e o concreto fibroso. As matrizes desses compósitos são frágeis e rompem com pequena deformação sob esforços de tração. Apesar da boa resistência aos esforços de compressão, não suportam grandes solicitações de tração e cargas dinâmicas. Para compensar essa deficiência, outros materiais são empregados como reforço dos materiais a base de cimento. O aço, em forma de barras que são colocadas em locais específicos para resistir às solicitações de tração, é ainda o mais empregado. Dentre as fibras mais utilizadas nas matrizes cimentíceas, a fibra de aço tem sido a preferida. Entretanto, outras fibras tais como o

vidro, o PVA – (poliálcool vinílico) e o polipropileno (PP), também têm sido bastante usadas como reforço. Uma grande variedade de fibras vegetais, como sisal, coco, juta, bambu e fibras de celulose, tem sido usada como reforço de matrizes à base de cimento, nos países em desenvolvimento, para produzir componentes de construção de pouca espessura (mais finos que 20mm) e de baixo custo, para serem utilizados em construções urbanas e rurais. As vantagens do uso de fibras vegetais são: sua abundância, baixo custo e consumo de energia, representando assim uma alternativa para a indústria da construção civil na produção de elementos de cobertura e revestimento, painéis divisórios e componentes habitacionais e, consequentemente, podem contribuir para o rápido desenvolvimento da infra-estrutura do país.

Compósitos de argamassa reforçados com fibras naturais surgem, então, como desafio e ao mesmo tempo solução para combinar materiais de construções não convencionais com as técnicas tradicionais de construção. Pesquisas usando métodos científicos avançados podem ajudar na avaliação das propriedades de engenharia desses materiais locais, adaptando-os para que se tornem materiais de construção econômicos e duráveis; ademais, compósitos reforçados com fibras naturais podem ser uma alternativa viável para a substituição dos produtos à base de fibras de asbesto (conhecidos como cimento-amianto). Embora reconhecidos como prejudiciais à saúde dos seres humanos e animais e proibidos na maioria dos países industrializados, produtos à base de fibras de asbesto continuam sendo largamente utilizados nos países em desenvolvimento. Além disso, o sisal pode favorecer o desenvolvimento das regiões onde são cultivadas. Esses lugares são, na maioria das vezes, regiões pobres castigadas pela seca, onde a cultura de um outro produto muitas vezes é inviável. No Brasil, a maior ocorrência do cultivo de sisal se encontra no nordeste, região de clima semi-árido, onde uma população pobre tem esse cultivo como principal atividade econômica.

O presente trabalho tem como principal objetivo, o desenvolvimento de um compósito para uso semi-estrutural e estrutural através do uso de fibras longas de sisal alinhadas unidirecionalmente como reforço de matrizes cimentíceas livres de hidróxido de cálcio. A substituição parcial do cimento por metacaulinita e tijolo moído foi adotada como solução para o desenvolvimento de uma matriz livre de hidróxido de cálcio. Ensaios de termogravimetria foram realizados para determinar a quantidade de hidróxido de cálcio presente nas várias matrizes estudadas. Foram estudados laminados reforçados com

fibras, com fração volumétrica variando de 0 a 8% formados por 3 e 5 camadas de fibras. Pressões de moldagem de 2, 3 e 4 MPa foram estudadas. Para a produção do compósito foi utilizado um processo manual, onde o mesmo, com algumas implementações, pode ser utilizado em um processo de fabricação industrial com baixos custos. Ensaios de flexão em 4 pontos e tração direta foram realizados para determinar tensão de primeira fissura, tensão pós-fissuração, tenacidade e adesão fibra-matriz. Laminados corrugados foram desenvolvidos e caracterizados mecanicamente através de ensaio de flexão em 3 pontos. Ensaios físicos de densidade, absorção de água, porosidade aparente estanqueidade e variação dimensional além de uma análise micro-estrutural através de microscopia óptica e eletrônica de varredura foram efetuados.

1.2. Estrutura da dissertação

A presente tese foi dividida em seis capítulos descritos a seguir:

Capítulo 1: Introdução – No presente capítulo é feita uma breve introdução e descrição dos objetivos do trabalho.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica - Mostra uma revisão dos principais desenvolvimentos que estão ocorrendo voltados para materiais compósitos como também características da matriz cimentícea e fibras.

Capítulo 3: Materiais e procedimentos experimentais – Este capítulo descreve todos os materiais utilizados no presente trabalho. Toda a metodologia de produção dos laminados e configuração dos ensaios realizados para a caracterização dos compósitos laminados são descritos.

Capítulo 4: Apresentação e análise dos resultados - Neste capítulo são apresentados os resultados dos diferentes ensaios realizados para caracterização dos laminados.

Capítulo 5: Conclusões - São apresentadas as conclusões obtidas dos resultados dos diferentes ensaios realizados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

Nos dias de hoje, a engenharia busca desenvolver estruturas cada vez mais arrojadas e esbeltas e, para isso, conta com a evolução tecnológica das técnicas de modelagem computacional e com avanços na ciência dos materiais. A cada dia, novos materiais vêm sendo desenvolvidos com características superiores às dos tradicionais, como maior resistência, maior durabilidade e maior leveza. Nos últimos 20 anos, destacam-se os avanços nos materiais compósitos cimentíceos que tem resultado na obtenção de comportamento de múltipla fissuração na tração direta.

2.2. Material compósito

Os materiais compósitos podem surgir de combinações entre metais, material cimentíceo, cerâmicas, polímeros e outros. As possíveis combinações dependem das condições de processamento e das prováveis incompatibilidades entre os componentes. Compósitos, para aplicações estruturais, geralmente utilizam fibras – metálicas, sintéticas, e naturais – como agentes de reforço. As fibras podem ser contínuas ou descontínuas, alinhadas ou com distribuição aleatória, podendo ser obtidas em uma variedade de formas, como mantas e estruturas têxteis de diferentes arguiteturas (SILVA, 2003).

Materiais frágeis perdem a sua ductilidade após a primeira fissura. Para contornar tal problema, o reforço com diferentes tipos de fibras vem sendo estudado a fim de aumentar a ductilidade e obter melhores propriedades mecânicas para esses materiais. Ao se adicionarem fibras às matrizes, verificam-se, nas suas propriedades, mudanças consideráveis, que vão depender de fatores tais como: tipo de fibra, fração volumétrica de fibras, resistência, módulo de elasticidade, relação de aspecto, características da superfície e orientação das fibras. Os efeitos da adição de fibras são mais evidentes após

a fissuração da matriz. Depois desse estágio, percebe-se que o compósito apresenta um comportamento mais dúctil ao invés da ruptura brusca que ocorreria na ausência dessas fibras.

2.3. Matriz cimentícea

As matrizes cimentíceas mais utilizadas na produção de compósitos são formadas por cimento portland, agregados e água. Uma grande vantagem da matriz cimentícea é o fato de ser um material de construção simples e barato que pode ser produzido com uso de equipamentos simples e pode ser moldado adquirindo qualquer forma, sendo um material de boas propriedades de resistência e vida útil (AZIZ, 1981).

2.4. Uso de pozolanas nos compósitos

Pesquisadores têm verificado os benefícios da substituição de parte do cimento por outros aditivos minerais (microssílica, cinza volante, metacaulinita, resíduo cerâmico, e outros) que tenham atividade pozolânica, proporcionando assim uma estrutura de poros mais densa e, em conseqüência, aumento de resistência química (ROY D, 2001), aumento de resistência à compressão e impermeabilidade nos componentes à base de cimento. (RODRÍGUEZ-CAMACHO, 2001).

A principal finalidade da adição destes aditivos minerais é provocar reações pozolânicas, as quais consomem o hidróxido de cálcio formando o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e diminuindo a alcalinidade. Com relação à reação de formação do C-S-H, é útil uma comparação entre sua formação no processo de hidratação do cimento Portland comum e do cimento Portland com adições pozolânicas:

Formação do C-S-H no Cimento Portland Comum: C₃S + H \rightarrow C-S-H + CH

Formação do C-S-H a partir da reação pozolânica: Pozolana + CH + H \rightarrow C-S-H

O desempenho de uma dada pozolana no concreto depende de fatores tais como:

(i) composição química, teor de fase vítrea, índice de atividade pozolânica, teor de substituição, granulometria, diâmetro médio, forma e massa específica do material pozolânico; e

 (ii) proporção dos materiais, relação água/cimento, tipo de cimento, tipo de agregados, aditivos químicos, idade e grau de hidratação do concreto (GONÇALVES, 2004).

Um outro dado muito importante na substituição do cimento por adições minerais é a diminuição de emissões de poluentes. Para o ano de 2001, as emissões atingiram 25,22 milhões de toneladas, tendo como fator de emissão cerca de 0,651 tonelada de CO₂ para cada tonelada de cimento produzido. Uma redução de cerca de 5,04 milhões de toneladas poderia ter sido obtida se 20% de resíduo cerâmico tivesse sido utilizado em substituição ao cimento Portland (GONÇALVES, 2004). Neste trabalho, utilizaram-se a metacaulinita e o resíduo cerâmico para realizar a reação pozolânica, como forma de diminuir a quantidade de hidróxido de cálcio no compósito diminuindo, assim, a agressividade do meio alcalino nas fibras vegetais.

2.4.1.Metacaulinita

A metacaulinita é uma sílica amorfa obtida pela calcinação de argila caulinítica (caulim), a temperaturas entre 500 ° C e 650 ° C; moída até a finura de 700 m²/kg ou 900 m²/kg, o que resulta num material de grande pozolanicidade (LIMA, 2004).

A substituição de parte do cimento por metacaulinita tem trazido muitos benefícios às argamassas e concretos. GONÇALVES (2004) estudou diferentes porcentagens de substituição chegando à conclusão de que o teor de 20% apresenta maior incremento na resistência à compressão, maior refinamento da estrutura de poros, redução da absortividade e redução da penetração acelerada de íons cloretos, enquanto que um teor de 10% apresenta maior resistência ao ataque por sulfato de magnésio, redução de absortividade e penetração acelerada de íons cloretos.

LIMA (2004) constatou, através de análises térmicas, a ausência total de Ca(OH)₂ para pastas com teores de 30% de metacaulinita, sendo essa conclusão baseada em

ensaios realizados em amostras curadas por 28 dias e 2 anos, comprovando a eficiência da metacaulinita na eliminação do Ca(OH)₂.

2.4.2. Resíduo cerâmico.

A reciclagem e a reutilização de determinados tipos de resíduos industriais contribuem para diminuir a demanda por matéria prima e o consumo de energia, e protegem o meio-ambiente de resíduos, que levariam, em muitos casos, milhões de anos para serem decompostos pela natureza. Além dos custos ambientais, há também os custos referentes ao gerenciamento da deposição clandestina e do não aproveitamento de resíduos que poderiam ser reciclados e utilizados como matéria prima em outros processos industriais (COSTA, 2004).

O resíduo cerâmico (vide Figura 2.1(a)), o qual vem sendo utilizado por vários pesquisadores como material pozolânico, é resíduo de origem das indústrias produtoras de materiais cerâmicos (vide Figura 2.1(b)). Esses resíduos são beneficiados através de processos industriais com a utilização de moinhos.



Figura 2.1 – Industria cerâmica, (a) Lixo das cerâmicas e (b) Produção de tijolos de furo.

GONÇALVES (2004) e ANJOS (2003) mostraram que a substituição de 20% de resíduo cerâmico mantém as propriedades mecânicas e promove maior refinamento da

estrutura de poros, reduzindo a absortividade e a penetração acelerada de íons cloretos aumentando a resistência ao ataque por sulfato de magnésio. Tudo isso acarreta em economia no produto final, considerando-se que a pozolana foi produzida a partir de resíduos de tijolos.

2.5. Fibras naturais

As fibras naturais são subdivididas de acordo com a sua origem, podendo ser de origem vegetal, animal ou mineral. As fibras de origem mineral vêm sendo usadas há bastante tempo, sendo as principais, as fibras de amianto. As fibras de origem vegetal são uma matéria prima renovável e possuem um baixo custo, tendo um futuro promissor.

As fibras naturais como reforço em concreto consistem, na maioria dos casos, em fibras curtas sendo dispersas aleatoriamente nas matrizes cimentíceas. As fibras atuam nas microfissuras restringindo o crescimento de fissuras quando submetidas a tensões que levam a ruptura do compósito. A dispersão de fibras em matriz frágil oferece um meio conveniente e prático de alcançar melhorias em muitas propriedades dos materiais de engenharia, como fratura, módulo de elasticidade na flexão, fadiga e resistência a impacto (AZIZ, 1981).

Desde de que foi descoberto que as fibras de asbesto representam um potencial perigo para a saúde, iniciou-se a busca de possíveis substituições que proporcionassem ao concreto o mesmo desempenho e o tornassem competitivo em qualidade e preço. Um grupo de fibras naturais – fibras de coco, sisal, bambu, banana, celulose, entre outras – tem sido motivo de vários estudos para a sua possível aplicação como reforço (ALVARADO, 2004).

2.5.1. Fibras Naturais vegetais

O uso das fibras de celulose como reforço já está bem estabelecido em alguns países do mundo, sobretudo naqueles que dispõem dos produtos chamados *asbestos-free*, caso da Austrália que, já há algum tempo, comercializa produtos de qualidade comprovada reforçados com fibras de celulose. Esses países empregam técnicas como o

uso de fibras em formato de polpa e utilizam processos fundamentados no método *Hatscheck* (SILVA, 2002).

Condições climáticas, idade e absorção de alimento não só influenciam a estrutura das fibras, mas também a composição química. Os principais componentes das fibras vegetais são a celulose, hemi-celulose, lignina, pectina, ceras e água solúvel (BLEDZKI, 1999).

Um problema encontrado nas fibras vegetais é decorrente de sua estrutura porosa, que causa elevada capacidade de absorção de água e inchamento, possibilitando uma diminuição da aderência na interface fibra/matriz (TOLEDO FILHO, 1997). A região interfacial é de fundamental importância na determinação das propriedades dos compósitos, pois é através da interface que os esforços atuantes na matriz são transmitidos ao reforço. Métodos químicos e físicos podem ser usados para modificar a fibra e otimizar a interface (SILVA, 2003). A tensão de aderência da interface fibra/matriz pode ser melhorada por várias operações:

- a- Limpeza da superfície dessas fibras eliminando gorduras e camadas de restos de resinas e graxas.
- Beação das fibras com substâncias que proporcionassem às fibras vegetais uma menor capacidade de absorção de água.
- c- Reação das fibras com substâncias que tornem a superfície das mesmas mais protegidas do meio externo, propiciando uma maior rugosidade para uma melhora na transferência de tensões.
- d- Um processo de moldagem que traga a melhor homogeneidade de distribuição das fibras no interior da matriz.

Um dos métodos, muito utilizado por vários pesquisadores, é a modificação das fibras vegetais através de tratamento alcalino, propiciando um aumento da rugosidade e, assim, melhorando a aderência mecânica entre a fibra e a matriz. O tratamento com 0,5% de hidróxido de cálcio proporcionou um melhor desempenho mecânico e limpou a superfície das fibras, a qual possui uma camada de parênquima impregnada de ceras e graxas (BISANDA, 2000).

Um outro problema encontrado com o uso destas fibras em matrizes cimentíceas é relacionado à sua durabilidade ao ser inserida em meios alcalinos. Como alternativas para se evitar a deterioração das fibras vegetais, em conseqüência da alcalinidade ou da umidade do meio a que estão expostas, existem diversos procedimentos de aplicação viável. Um desses procedimentos é o desenvolvimento de uma matriz livre de hidróxido de cálcio através da substituição parcial do cimento por pozolanas as quais consomem o hidróxido de cálcio formando o C-S-H.

2.5.1.1. A fibra de sisal

A exploração do sisal no Brasil concentra-se no Nordeste, geralmente em áreas de pequenos produtores, cujas condições de clima e solo são pouco favoráveis com escassa ou nenhuma alternativa para a exploração de outras culturas que ofereçam resultados econômicos satisfatórios. A Bahia e a Paraíba são os principais produtores de sisal. Ali, aproximadamente 1 milhão de pessoas dependem da cultura para a sua sobrevivência. Apesar da importância, a cultura do sisal é explorada com baixo índice de modernização e capitalização, o que tem dado origem, nos últimos anos, a um acentuado declínio, tanto na área plantada quanto na produção. O Brasil exporta cerca de 62% da produção de sisal, em forma de fibras e manufaturados. As exportações brasileiras no ano de 1996 ultrapassaram os 89 milhões de dólares. Dos 38% da produção brasileira, que é consumida internamente, o destaque é dado para as indústrias de pequeno e grande porte, na fabricação de fios, cordoalhas, mantas e tapetes (SILVA E BELTRÃO, 1999).

Algumas iniciativas pioneiras têm incentivado a utilização de fibras vegetais, principalmente na indústria automobilística e na de utilidades domésticas, embora a construção civil seja um setor com enorme potencial para a difusão desses compósitos. Dessa forma, a fibra de sisal pode ter seu valor agregado multiplicado se utilizado como reforço em compósitos poliméricos ou cimentíceos (AMICO, *et al.*, 2001).

A fibra de sisal mostra-se promissora no desenvolvimento de materiais compósitos devido ao seu baixo custo, excelentes propriedades mecânicas de tração e sua grande disponibilidade no mercado. O incentivo do seu uso é fundamental para as regiões onde são produzidas essas fibras pois, na maioria das vezes, são regiões pobres. Na Tabela 2.1 estão apresentadas propriedades físicas e mecânicas típicas da fibra de sisal obtidas por TOLEDO FILHO (1997).

Tabela 2.1 – Valores típicos das propriedades das fibras de sisal.

Propriedades	Média		
Massa Específica (g/cm ³)	0,90		
Resistência à Tração (MPa)	615,00		
Módulo de Elasticidade (GPa)	18,82		
Deformação na ruptura (%)	3,13		
Absorção de água até a saturação (%)	220		
Diâmetro (mm)	0,19		
Fonte: TOLEDO FILHO, 1997.			

Na Figura 2.2(a), pode-se visualizar a planta de sisal (*Agave sisalana*), de onde são extraídas as fibras e, na Figura 2.2(b), são mostradas as fibras após todo o processo de extração e beneficiamento. O sisal é uma planta de fácil cultivo e de curto tempo de renovação, produzindo, em média, 200 folhas. Cada folha produz uma média de 1000 fibras, o que corresponde a apenas 4% do volume da folha, que é composta por aproximadamente 80% de água.



(a)

(b)

Figura 2.2 – (a) Planta de sisal; (b) Fibras após beneficiamento.

No interior das folhas de sisal verifica-se que as fibras encontram-se embebidas em parênquima. Tais fibras são de dois tipos: as mecânicas e as em forma de arco. As primeiras são chamadas mecânicas porque são as responsáveis pelo reforço e pela rigidez da folha; situam-se na zona periférica, abaixo da epiderme, sendo as de maior interesse comercialmente. As fibras do segundo tipo ocorrem na linha mediana, que cruza a folha de uma margem à outra, ou distribuem-se aleatoriamente, no próprio tecido da folha (SILVA E BELTRÃO, 1999).

Na Figura 2.3(a) observa-se um esquema de uma planta de sisal; a Figura 2.3(b) mostra a seção transversal de uma folha de sisal, onde pode ser visualizada a localização de fibras mecânicas e fibras arco. A Figura 2.3(c) apresenta a estrutura de uma fibra de arco.



Figura 2.3 – (a) Planta de sisal; (b) Seção das folhas de sisal e (c) Seção de uma fibra arco (LI *et al.*, 2000).

A fibra de sisal, em particular, foi escolhida neste trabalho por apresentar grande potencialidade em nosso país, possibilitar a produção de componentes em que a ductilidade é fundamental e ser uma fibra de menor custo em relação às disponíveis no mercado. LI *et al.* (2000) compararam o preço da fibra de sisal com o de algumas outras.

Em relação às fibras sintéticas, o preço da fibra de sisal (U\$ 0,36/kg) é muito baixo, custa cerca de 1/9 do valor da fibra de vidro (U\$ 3,25/kg) e 1/500 da fibra de carbono (U\$ 500/kg).

A fibra é formada por várias microfibrilas que são mantidas unidas por meio da lamela média, que consiste de hemicelulose e lignina. As fibrilas são constituídas de várias camadas que juntas constituem a estrutura das fibras (SAVASTANO, 1999). A resistência destas fibras depende do conteúdo de celulose e do ângulo espiral que as microfibrilas formam em relação ao eixo central da fibra.

O cordão de sisal é formado pela união de várias fibras (de 40 a 260) em um processo industrial. O processo tem início com o trabalho mecânico das fiadeiras que transformam a mecha de sisal em cordão através da estiragem e torção. As torcedeiras desempenham o papel de envolver dois ou mais filamentos singelos formando um só e as bobinadeiras finalizam o estágio fazendo a bobina de fio retirando-o dos carretéis que vêm da fiadeira, torcedeira ou barbeador. A Figura 2.4 apresenta uma curva força-deformação típica obtida na tração de um cordão de sisal conforme recebido do fornecedor. Sendo que chega a uma tensão média de 143 MPa, mostrando a inferioridade com relação a fibra unitária. (AMICO, *et al.*, 2001)



Figura 2.4 – Curva força x deformação para o fio de sisal.

2.5.2. Fibras naturais minerais

Com relação às fibras naturais minerais, as mais empregadas são a fibra de asbesto (também conhecido como amianto) e a fibra de volastonita.

2.5.2.1. A fibra de asbesto

A fabricação do cimento amianto essencialmente consiste na mistura de uma matriz altamente diluída de cimento Portland com fibras de amianto. A morfologia especial da estruturas das fibras que se ligam quimicamente com o cimento e o alto módulo são as grandes vantagens dessa fibra, dando origem a uma ótima adesão fibra-matriz.

A fibra de asbesto é uma fibra mineral com ótimas características mecânica e química e com grande compatibilidade ao ser adicionada à matriz cimentícea. A Figura 2.5 mostra a superfície de fratura de uma amostra de amianto, observando-se a perfeita impregnação do cimento entre as fibras.



Figura 2.5 – Superfície de fratura de uma amostra de amianto: (a) Ampliação de 100 x e (b) Ampliação de 500 x.

Um estudo realizado pelo médico industrial americano Selikoff mostrou que esta fibra pode provocar vários problemas de saúde, como asbestose, câncer de pulmão e mesotelioma, devido ao contato direto com essa fibra. Em sua pesquisa, percebeu numerosos casos de mortes em operários que trabalharam em uma indústria naval nos Estados Unidos, onde o amianto era utilizado como isolamento e proteção contra incêndio

nos navios da Primeira Guerra Mundial. Como conseqüência da técnica de *spray*, os trabalhadores ficavam expostos a altas concentrações de pó fibroso de amianto (STUDINKA, 1989).

A Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz) estima que o Brasil tem cerca de 50 mil trabalhadores expostos ao amianto. O número pode ser ainda maior, se forem considerados os atingidos indiretamente, como os operários da construção civil (ALMEIDA & TAVARES, 2004).

Devido aos problemas de saúde que o amianto pode provocar, o mesmo já foi banido de quase todos os países industrializados. Nesse sentido, vários estudos estão sendo feitos com o propósito da substituição dessa fibra por uma outra que venha a ter as mesmas características e que dê origem a produtos similares aos produzidos pelo amianto.

Desde 1976, vêm sendo testados vários tipos de fibras à procura de uma que possa substituir o amianto. Em muitos casos, as fibras de amianto são comparáveis às outras fibras, quanto a critérios como resistência à tração, módulo de elasticidade, comprimento e diâmetro. Porém, o fator decisivo na fibra de amianto em relação às outras fibras é a sua propriedade de combinação com a matriz cimentícea, já que o amianto possui uma ótima tensão de aderência e estabilidade química, dimensional e morfológica. (STUDINKA, 1989).

2.5.2.2. A fibra de volastonita

Microfibras minerais como a volastonita proporcionam certo grau de ductilidade ao concreto no estado endurecido, além de contribuir significantemente na resistência à tração. O aumento da resistência à tração é influenciado pela razão de aspecto da fibra (d/l) e o teor presente na mistura, quanto maior a razão de aspecto maior a resistência à tração (FORMAGINI, 2005).



Figura 2.6 – Microfibras de volastonita. (FORMAGINI, 2005)

2.6. Processos produtivos

Vários processos produtivos vêem sendo continuamente estudados e colocados em prática.

Os processos mais utilizados na produção de compósitos de matrizes cimentíceas são:

- Pulverização (*Spray-up*) Esta técnica é bem útil para adição de fibras de vidro a matrizes cimentíceas. Fibras de vidro e matrizes cimentíceas são pulverizadas simultaneamente dentro de moldes conseguindo-se incorporar até 6% de volume de fibras de vidro.
- Jateamento Utilizando uma modificação do processo de jateamento convencional é possível produzir compósitos cimentíceos reforçados com fibras de aço para o uso em paredes de túneis e outras aplicações similares. Neste processo o volume de fibras adicionado é da ordem de 10%.
- Moldagem a vácuo (Processo *Hatschek*) Este processo é muito utilizado para a produção de cimento-amianto (cimento-asbestos). O processo consiste na dispersão de fibras em uma pasta de matriz cimentícea sendo moldado a vácuo.

Este processo possibilita uma melhor trabalhabilidade do material uma vez que o excesso de água pode ser retirado através do vácuo. Estes produtos são feitos em camadas e através deste método é possível adicionar de 9% a 20% de fibras em volume.

- Pré-impregnação Neste método, camadas de fibras que podem ser em forma de manta ou tecido são colocadas em moldes impregnados com uma pasta de matriz cimentícea, e então vibradas ou comprimidas, para a produção de materiais densos com uma grande quantidade de fibras. Neste processo o volume de fibras adicionado é da ordem de 25 %.
- Produção Contínua Mantas contínuas e tecidos de fibras podem ser impregnadas com uma pasta de matriz cimentícea através de um banho em cimento. As fibras impregnadas ou as finas placas podem ser pressionadas, para alcançar volumes de fibra acima de 15%.

Dos processos apresentados acima, os três primeiros são mais adequados para a produção de compósitos onde as fibras funcionam como reforço secundário enquanto que os últimos são mais adequados para fibras utilizadas como reforço primário. Isto se deve ao fato de que para as fibras serem utilizadas como reforço secundário ou primário um fator que deve ser levado em conta é a quantidade de fibras que podem ser adicionadas a matriz. E como pode-se notar, os três primeiros permitem uma adição pequena enquanto que os últimos possibilitam uma adição de percentuais maiores.

Outra constatação importante é que existem processos mais adequados para a adição de um determinado tipo de fibra. Isto ocorre porque cada fibra é feita de um material que pode ser trabalhado mais facilmente por um determinado processo, ou seja, a trabalhabilidade é um fator fundamental na escolha do processo de produção.

Quando o objetivo da adição de fibras é o controle de fissuras dizemos que as fibras constituem um reforço secundário. Contudo, se a incorporação de fibras pretende ter como função o aumento da resistência à tração e da tenacidade de forma a tornar-se um reforço estrutural, dizemos que as fibras constituem um reforço primário.

2.7. Laminados cimentíceos

Componentes laminares (de seção fina) para construção civil são conhecidos desde o século XVIII, quando, na Áustria, Ludwing Hatschek produziu placas de cimento e asbesto com uma máquina de prensar papel modificada (GALE, 1994). O aperfeiçoamento desse processo de fabricação, denominado Hatschek, fez com que o cimento amianto (cimento + fibras de asbesto) se tornasse o principal produto laminado utilizado na construção civil sob a forma de telhas, caixa d´água, painéis e divisórias.

LIMA (2004), verificou que, mesmo utilizando fibras vegetais, com baixo módulo de elasticidade e baixa aderência fibra-matriz, é possível obter compósitos laminados com resistências, à tração e à flexão, superiores às da matriz. Alem disso, obtém-se um produto com maior tenacidade e deformação de ruptura, o que conseqüentemente lhe confere mais utilidade e segurança. Comparando as resistências obtidas com as especificações para placas de cimento amianto, em uso geral e em construções (17,6 MPa), percebe-se que as placas laminadas reforçadas com fibras de sisal (15,3 MPa) têm grande potencial para substituição do mesmo em algumas aplicações específicas.

Para a produção de placas de concreto reforçadas com malhas de fibras de sisal ou fibras isoladas, PERSSON E SKARENDAHL (1980) classificam os métodos de produção em três níveis, a depender do desenvolvimento tecnológico empregado: nível manual; escala semi-industrial e mecanizado. No processo semi-industrial a matriz é produzida em betoneira simples e lançada sobre um molde plano ou corrugado, onde já se encontra o reforço. A mistura é então compactada sobre uma mesa de vibração. Antes de ser colocada para curar a superfície sofre um acabamento final. Esse processo gera produtos laminados, com camadas de propriedades bem definidas, seja na geometria seja no tipo de material.

JONES (1975) classifica os materiais compósitos em três classes, quais sejam: compósitos com fibras, que consiste em fibras dispersas ou alinhadas dentro de uma matriz; compósitos laminados, que são constituídos de camadas de diferentes materiais e compósitos particulados (ou em partículas) que são partículas de um determinado material inserido dentro de uma matriz.

Nos dias de hoje, os compósitos mais produzidos consistem em fibras curtas dispersas no interior da matriz. Nesse tipo de reforço, a contribuição das fibras para as propriedades mecânicas do compósito é inferior à que ocorre quando são utilizadas fibras longas orientadas paralelas ao carregamento. Diversas são as formas em que fibras podem ser dispersas no interior das matrizes. A Figura 2.7 mostra diferentes distribuições de fibras em laminados. Distribuição em forma de malhas e tecidos como reforço primário de polímeros foi utilizado extensivamente na indústria da aeronáutica. Essas configurações de fibras podem ser saturadas facilmente por polímeros, o qual não acontece com matrizes cimentíceas, devido à dificuldade de penetração da matriz no interior desses tecidos, o que pode explicar porque não tem sido utilizado para produção de compósitos com matriz cimentíceas (NAAMAN, 2000).



Figura 2.7 – Distribuição de fibras em laminados: (a) dispersas aleatoriamente; (b) hibridização com fibras curtas de longas; (c) fibras alinhadas em uma única direção e (d) fibras longas distribuídas em camadas perpendiculares.

2.8. Durabilidade de compósitos reforçados com fibras celulósicas.

As pesquisas desenvolvidas até o momento, com a utilização de fibras celulósicas, tem apresentado problemas com relação à durabilidade dos compósitos (capacidade do material de manter suas principais características, sob determinadas condições de exposição a longo tempo), esse é um dos principais motivos que explicam a ainda pouca difusão dos compósitos reforçados com fibras celulósicas.

Dessa forma, um estudo sistemático de durabilidade de um novo material deve contemplar as seguintes etapas:

- Identificação da função e das características (exigências do usuário) desejadas do material ao longo do seu uso e verificação das suas condições de exposição;
- Caracterização dos principais agentes de degradação atuantes;
- Identificação dos mecanismos de degradação causados pelos agentes;
- Quantificação do dano presenciado devido à ação imposta pelos agentes através dos mecanismos de degradação;

Isso nos leva a concluir pela durabilidade ou não do material, possibilitando o seu aperfeiçoamento ou adaptação e permitindo, assim, avaliar a viabilidade da inserção do novo produto no mercado a que se propõe. (SILVA, A. C., 2002).

Existe uma grande preocupação sobre as propriedades de longa duração dos compósitos reforçados com fibras naturais que podem ocorrer em fibras dispersas ou alinhadas dentro de uma matriz; como por exemplo, a perda da capacidade de absorver energia devido ao ataque químico do hidróxido de cálcio, proveniente das reações do cimento, à lignina e hemi-celulose presente nas fibras vegetais, com isso as fibras se mineralizam e perdem toda sua resistência. (TOLEDO FILHO, *et al.*,2000).

A degradação dos compósitos pode ser estudada por envelhecimento natural, mais confiável, ou por ensaios acelerados, cuja vantagem e a de fornecerem resultados em menor intervalo de tempo. (SAVASTANO, 2004).

3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

No presente capítulo são apresentados as características dos materiais utilizados na fabricação das matrizes e dos compósitos, as dosagens, os procedimentos de produção e as técnicas experimentais.

3.1. Características dos materiais

3.1.1. Cimento

Neste trabalho foi utilizado o Cimento Portland CP II F-32, cujas propriedades químicas e físicas são apresentadas na Tabela 3.1

Tabela 3.1 - Propriedades químicas e físicas do cimento CP II F-3

Propriedades	CP II F-32		
químicas e físicas			
CaO (%)	62,80		
SiO ₂ (%)	19,98		
Al ₂ O ₃ (%)	3,70		
$Fe_2O_3(\%)$	3,12		
MgO (%)	3,10		
K ₂ O (%)	0,80		
Na ₂ O (%)	0,07		
TiO ₂ (%)	-		
Resíduo insolúvel (%)	1,50		
Densidade (g/cm^3)	3,10		
Perda ao fogo (%)	4,93		
Fonte: (GONÇALVES, 2005)			

Na Figura 3.1 é apresentada a curva granulométrica para o cimento CP II F 32. Nota-se que o resíduo na peneira 75µm é de 7.7%, inferior aos 12% exigidos pela NBR 11578 (1991).



Figura 3.1 - Curva granulométrica (GONÇALVES, 2005).

3.1.2. Argilas Calcinadas: metacaulinita e resíduo cerâmico

A metacaulinita utilizada neste trabalho foi fornecida pela empresa METACAULIM do Brasil Indústria e Comercio LTDA. O resíduo cerâmico foi fornecido por uma indústria de cerâmica localizada em Itaboraí – RJ. Esse resíduo foi recebido em fragmentos inferiores a 6,3 mm, que foram posteriormente moídos em moinho vibratório até que se atingisse uma granulometria que atendesse aos requisitos da norma NBR 12653 (1992) para uso como material pozolânico. A moagem foi realizada no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/MCT).

Essas argilas calcinadas foram caracterizadas química e fisicamente por GONÇALVES (2005). Sendo os resultados apresentados na Tabela 3.2.

Propriedades	Metacaulinita	Resíduo		
químicas e físicas		ceramico		
SiO ₂ (%)	51,2	63,89		
Al ₂ O ₃ (%)	35,30	25,49		
$Fe_2O_3(\%)$	4,00	7,73		
CaO (%)	2,62	0,29		
K ₂ O (%)	0,97	0,95		
$TiO_2(\%)$	0,41	-		
MgO (%)	0,40	0,4		
$P_2O_5(\%)$	0,20	-		
MnO (%)	0,16	-		
SO ₃ (%)	0,09	-		
Área superficial (m ² /Kg)	22,60	18,98		
Densidade (g/cm ³)	2,65	2,65		
Fonte: GONÇALVES, 2005				

Tabela 3.2 – Propriedades químicas e físicas para a metacaulinita.

As curvas granulométricas da metacaulinita e do resíduo cerâmico foram obtidas utilizando um equipamento Malvern MasterSizer Micro – MAF 5001 e são mostradas na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Curvas granulométricas massa retida acumulada (%) x tamanho (μ m): (a) Metacaulinita e (b) Resíduo de tijolo moído (GONÇALVES, 2005).

3.1.3. Areia

Foi empregada uma areia quartzosa de rio com massa específica de 2,67g/cm³, cuja curva granulométrica é mostrada na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Curva granulometria da areia

Foram utilizadas durante as moldagens duas classes de areia. Para isso, foram feitos dois cortes em sua granulometria: (i) uso de partículas menores que 2,36 mm e (ii) uso de partículas menores que 1,18 mm. Com os cortes, os módulo de finura (MF) das areias utilizadas foram de 2,46 e 2,43, respectivamente.

3.1.4. Superplastificante

O superplastificante usado FOSROC REAX CONPLAST SP 430, tem sua composição baseada em Naftaleno Sulfonado com teor de sólidos de 44%. Estudos de compatibilidade e ponto de saturação do superplastificante com o cimento CP II F32 indicaram que os mesmos são compatíveis. (GONÇALVES, 2005).

3.1.5. Água

A água utilizada em toda a fase experimental foi a proveniente da rede de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.

3.1.6. Fibras.

Para a fabricação dos compósitos deste trabalho, foram utilizados dois tipos de fibras: mineral (volastonita) e vegetal (sisal). Algumas propriedades e características dessas fibras serão mostradas abaixo.

3.1.6.1. Fibras de Volastonita

As microfibras minerais de volastonita JG, utilizadas no presente estudo, são comercializadas com a marca Energyarc encontradas facilmente no mercado. A dimensão transversal da microfibra de volastonita pode variar de 5 μ m a 100 μ m e a longitudinal de 50 μ m a 2 mm. (SILVA, 1999).
3.1.6.2. Fibras de Sisal

As fibras de sisal utilizadas no presente estudo são originárias do Município de Valente-BA e foram fornecidas pela Associação dos Pequenos Agricultores (APAEB).

As fibras de sisal apresentaram comprimento variando de 80 cm a 120 cm. Antes de serem misturadas à matriz, as mesmas passavam por dois processos de beneficiamento. Primeiramente, foram submetidas a uma lavagem em água quente durante 15 minutos, para retirada de graxas e restos de resinas naturais que ficaram aderidas à superfície das fibras. Foi necessário ate duas lavagens para a total limpeza das mesmas. Em seguida, as fibras foram deixadas ao ar livre durante 24 horas para a secagem superficial. Então passavam pelo segundo processo, onde eram desembaraçadas, para separá-las em filamentos individuais e tomarem um aspecto alisado.

Na Figura 3.4, pode-se observar a seqüência do processo de desembaraçamento, onde em (a), é mostrado as fibras após o processo de lavagem e secagem, em (b), é mostrado o instrumento utilizado para o processo de desembaraçamento das fibras e em (c), as fibras após o processo de beneficiamento.



(a)



Figura 3.4 – (a) Fibras após lavagem e secagem, (b) Processo de desembaraçamento das fibras (c) Fibras limpas e separadas.

Após o processo de desembaraçamento, as fibras eram cortadas com um comprimento de 400 mm e pesadas de acordo com o número de camadas a ser utilizado na produção dos laminados. Dois procedimentos foram adotados visando encontrar a melhor forma de distribuição das camadas de fibras no interior da matriz. Inicialmente, as fibras eram colocadas manualmente em cada camada, como está apresentado na Figura 3.5 (a). No segundo procedimento de distribuição de fibras, as mesmas eram costuradas transversalmente garantindo um melhor alinhamento e facilitando sua inserção no molde (Figura 3.5 (b)).



Figura 3.5 – Distribuição das fibras (a) Sem costura e (b) Com costura.

3.2. Métodos experimentais

3.2.1. Desenvolvimento de uma Matriz Livre de Ca(OH)₂ e com adequado comportamento reológico.

No presente trabalho foi dado continuidade aos estudos desenvolvidos por LIMA, (2004) e VELASCO *et al.*, (2004), com o objetivo de se desenvolver uma matriz cimentícea livre de Ca(OH)₂ e que apresentasse um adequado comportamento reológico.

Em seu estudo, LIMA (2004) usou uma metacaulinita produzida em laboratório, conseguindo consumir 100% de hidróxido de cálcio com substituição parcial do cimento por 30% e 40% de metacaulinita. Já no seu trabalho, VELASCO *et al.*, (2004), utilizaram uma metacaulinita comercial, menos reativa que a utilizada por LIMA, (2004), e observaram que, devido a menor reatividade, seria necessário a substituição do cimento por teores ainda mais altos de metacaulinita o que comprometeria ainda mais a reologia da mistura. Com o objetivo de garantir uma boa reologia à matriz, VELASCO *et al.*, (2004), utilizaram resíduo cerâmico em adição a metacaulinita como substituição parcial do cimento, já que a reologia da mistura contendo igual teor de resíduo cerâmico e

metacaulinita era superior no caso da primeira (GONÇALVES, 2005). No seu estudo, VELASCO *et al.*, (2004), utilizaram teores de 25% e 30% de metacaulinita combinados com 20% e 25% de resíduo cerâmico, o que permitiu o consumo de 100% do Ca(OH)₂.

3.2.1.1. Obtenção das pastas isentas de Ca(OH)₂.

Na Tabela 3.3 são mostrados os teores de substituição utilizado por VELASCO *et al.*, (2004). Análises térmicas diferenciais (DTA) e termogravimetria (TG) foram realizadas ao final dos 28 dias de cura em pastas de cimento e argilas calcinadas (metacaulinita e resíduo cerâmico) para determinar o consumo de Ca(OH)₂ promovido pelas pozolanas.

Tabela 3.3– Teores de substituição de 50% e 55% do cimento CP F32 por argilas calcinadas.

Substituição do cimento	Mistura	Teor de argila calcinada
-	P0	-
50%	P1	30% MC* + 20% TM**
50%	P2	25% MC + 25% TM
55%	P3	30% MC + 25% TM

*MC=Metacaulinita e **TM=resíduo de tijolo moído

Os termogramas mostrados na Figura 3.6 indicam a ausência, nas misturas P1, P2 e P3 da desidroxilação do Ca(OH)₂ observado no termograma da mistura P0. Este comportamento indica que a substituição parcial do Cimento Portland pela metacaulinita e resíduo cerâmico em teores de, respectivamente, 30% e 20%, 25% e 25% e 30% e 25% garantiram o consumo de todo o Ca(OH)₂ gerado no processo de hidratação do cimento, permitindo a obtenção de uma matriz a base de cimento mais adequada ao uso de fibras vegetais que mineralizam na presença de hidróxido de cálcio.



Figura 3.6– Análise de DTA (a) e de TG (b), para as pastas P0, P1, P2 e P3 após 28 dias. (VELASCO *et al.*, 2004).

3.2.1.2. Comportamento mecânico das argamassas livres de Ca(OH)₂ e micro-reforçadas com volastonita.

VELASCO *et al.* (2004) produziram e estudaram o comportamento mecânico das argamassas produzidas com os teores de substituição que garantiam matrizes livres de Ca(OH)₂. As argamassas foram moldadas no traço de 1:1:0,4 (material cimentíceo: areia : água/material cimentíceo) e superplastificante foi utilizado para garantir a consistência de 30±1cm. Além disso, VELASCO *et al*, (2004), também estudaram a influência do uso de fibras de volastonita no comportamento mecânico das argamassas. As frações volumétricas de volastonita variaram de 2,5 a 7,5%. Na Tabela 3.4 são apresentados os teores de superplastificante e os valores de consistência das argamassas estudadas. A consistência padrão foi determinada de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 1995).

U	• (70)	SP (%)	Consistencia media (cm)
M0	-	-	30,83
M1V0	-	1,0	29,83
M1V2,5	2,5	1,2	30,00
M1V5,0	5,0	1,4	30,57
M1V7,5	7,5	1,6	30,50
M2V0	-	1,0	29,67
M2V2,5	2,5	1,2	30,83
M2V5,0	5,0	1,4	31,53
M2V7,5	7,5	1,6	32,33
M3V0	-	1,0	28,50
M3V2,5	2,5	1,2	28,50
M3V5,0	5,0	1,4	30,03
M3V7,5	7,5	1,6	30,83
	M0 M1V0 M1V2,5 M1V5,0 M1V7,5 M2V0 M2V2,5 M2V5,0 M2V7,5 M3V0 M3V2,5 M3V5,0 M3V7,5	M0 - M1V0 - M1V2,5 2,5 M1V5,0 5,0 M1V7,5 7,5 M2V0 - M2V2,5 2,5 M2V5,0 5,0 M2V7,5 7,5 M3V0 - M3V2,5 2,5 M3V0,5 7,5	M0 - - M1V0 - 1,0 M1V2,5 2,5 1,2 M1V5,0 5,0 1,4 M1V7,5 7,5 1,6 M2V0 - 1,0 M2V2,5 2,5 1,2 M2V5,0 5,0 1,4 M2V7,5 7,5 1,6 M3V0 - 1,0 M3V2,5 2,5 1,2 M3V0 - 1,0 M3V2,5 2,5 1,2 M3V0,5,0 5,0 1,4 M3V7,5 7,5 1,6

Tabela 3.4 – Consistência média das argamassas isentas de Ca(OH)₂, com traço 1:1:0,4 e adição superplastificante (SP) e de volastonita (V).

Fonte: VELASCO et al., 2004.

Na Tabela 3.5 são apresentados os valores médios de resistência à compressão uniaxial (f_c), módulo de elasticidade (E), deformação de ruptura (ϵ_a) e resistência à tração indireta (f_t) para as argamassas estudadas no trabalho de VELASCO *et al.*, (2004).

Tabela 3.5– Valores médios de resistência à compressão (f_c), módulo de elasticidade (E), deformação (ϵ_a), tração indireta (f_t) e respectivos coeficientes de variação (CV) para as argamassas isentas de Ca(OH)₂, com traço 1:1:0,4 e adição de volastonita.

Argamassa	f _c (MPa)	E (GPa)	$\epsilon_a(\mu\epsilon)$	f _t (MPa)
M0	45,07	23,90	3550,00	4,72
M1V0	57,33	22,27	5255,00	4,18
M1V2,5	59,30	23,30	5126,67	4,78
M1V5,0	63,37	24,30	5156,67	5,24
M1V7,5	63,40	25,30	4716,67	6,10
M2V0	52,07	22,30	4343,33	4,80
M2V2,5	57,47	22,23	4793,33	4,76
M2V5,0	57,63	22,93	4526,67	5,34
M2V7,5	63,87	25,27	5136,67	4,20
M3V0	51,80	20,63	4593,33	5,30
M3V2,5	50,67	20,30	4850,00	4,35
M3V5,0	55,70	21,53	4973,33	5,21
M3V7,5	62,90	23,53	5540,00	5,76

Fonte: VELASCO et al., 2004.

Observa-se na Tabela 3.5 que o uso das argilas calcinadas provocaram uma elevação na resistência à compressão da mistura de referência M0. No caso da argamassa M1V0, um acréscimo de 27% no valor de fc foi observado, as misturas M2V0 e M3V0 apresentaram um acréscimo de fc na ordem de 15%. Já para o módulo de elasticidade, observou-se uma redução de cerca de 7% para as misturas M1V0 e M2V0 e de cerca de 15% para a mistura M3V0. A deformação de ruptura (a) da matriz M0 foi aumentada de 24% quando a argila foi usada como substituição parcial do Cimento Portland. O acréscimo no valor da resistência à compressão da matriz de Cimento Portland esta relacionado com a formação de mais produtos de hidratação da mistura devido as reações pozolânicas. Já a redução do módulo de elasticidade e o aumento da deformação de pico estão relacionados com a maior deformabilidade das argilas calcinadas quando comparadas aos grãos de Cimento Portland.

No que se refere à resistência à tração indireta, nota-se que a adição de argilas calcinadas não alterou significativamente o comportamento da matriz já que tanto uma redução de 12 % para a mistura M1V0 quanto acréscimo de 1,7 % e 11% foram observados para as misturas M2V0 e M3V0, respectivamente.

O efeito da adição de microfibras de volastonita sobre a resistência à compressão das matrizes pode ser observado nos resultados apresentados na Tabela 3.5. Nota-se que, no que se refere ao f_c, as matrizes que apresentaram os melhores resultados foram as do tipo M1 (30% de MC e 20% de TM), seguidas pelas matrizes M2 (25% de MC e 25% de TM). De uma forma geral, houve aumentos de resistência em função de acréscimos no teor de volastonita adicionado às misturas. Com relação à resistência de tração das misturas, em comparação às misturas de referência (M0), nota-se uma tendência de aumento da resistência à tração em função do teor de volastonita.

3.2.1.3. Determinação do diâmetro máximo da areia (DM) e do teor de superplastificante (SP) para uma adequada reologia da matriz

Quando os primeiros compósitos foram moldados, tendo como finalidade o estudo da melhor pressão de moldagem, foi utilizada a matriz M1V5,0, pois foi uma das que apresentou maior valor de resistência à compressão e tração indireta e a de maior deformação. Durante as moldagens dos primeiros laminados observou-se que o diâmetro máximo (DM) da areia, deveria ser reduzido para 1,18 mm para obter-se uma matriz com melhor penetração de grãos entre as fibras de cada camada. Com isso o volume de superplastificante (SP) foi alterado para 1,6%, pois as partículas menores reduziram a trabalhabilidade da mistura, e desejou-se manter o espalhamento de 30±1 cm. Durante os ensaios de flexão em quatro pontos dos primeiros compósitos, foi observado na zona fraturada que as fibras não estavam sendo impregnadas completamente na matriz. Assim, uma nova modificação foi feita na matriz, alterando o volume de SP, que passou de 1,6 para 2,5, aumentando o espalhamento de 31cm para 37cm. A fluidez das misturas foi medida por meio do ensaio de espalhamento da mesa, cuja seqüência é mostrada na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Sequência do ensaio de consistência (a) Vista da mesa e fôrma utilizada no ensaio, (b) A fôrma cônica sendo levantada antes da aplicação dos golpes, (c) Espalhamento de 31 cm, e (d) Espalhamento de 37 cm.

A proporção final da mistura foi então, 1:1:0.4 (material cimentíceo : areia : água/material cimentíceo) com substituição, em massa, de 50% do cimento por metacaulinita e tijolo moído (30% de MC e 20% de TM), adição de 5% de volastonita, 2.5% de superplastificante e diâmetro máximo de areia de 1.18 mm.

Na Tabela 3.6 encontram-se as matrizes que foram utilizadas até se chegar à otimização final que será utilizada no restante do estudo. As misturas passaram a receber a seguinte nomenclatura: M1a, que corresponde a matriz de origem M1V5,0; M1b e M1c onde foi modificado o DM da areia e o teor de superplastificante para se ter uma melhor reologia. A matriz M0c teve DM e teor de SP igual a M1c, sendo que, não teve substituição do cimento.

Misturas	DM (%)	SP (%)	Consistência média
			(cm)
M1a	2,36	1,4	30,57
M1b	1,18	1,6	31,00
M1c	1,18	2,5	37,00
M0c	1,18	2,5	42,00

Tabela 3.6 – Características e consistência média das matrizes utilizadas na produção dos compósitos.

3.2.2. Determinação da pressão de moldagem, volume de fibras e número de camadas.

A partir da matriz livre de Ca₂(OH) e micro reforçada com 5% de volastonita, iniciou-se o processo de produção dos compósitos que inicialmente tiveram as finalidades de determinar:

- A melhor pressão de moldagem adequada ao processo de produção utilizado.
- (ii) A fração volumétrica das fibras
- (iii) O número ótimo de camadas de fibras alinhadas e arranjadas unidirecionalmente a ser utilizado na produção dos laminados

Na otimização da pressão de moldagem foi utilizada a matriz M1a reforçada com uma fração volumétrica de 6% de fibras de sisal arranjadas em 3 camadas unidirecionalmente alinhadas. Esse laminado foi denominado de M1as6. Como referência foram produzidos corpos-de-prova sem pressão. Na série seguinte, destinada ao estudo da fração volumétrica "ótima" de fibras, foi utilizada a matriz M1b, utilizando pressão de moldagem "ótima" de 3MPa, obtida da otimização da pressão. As frações volumétricas estudadas foram: 6 e 8%, sendo que o valor inicial de 6%, foi decorrente do trabalho realizado por LIMA, (2004), onde o mesmo utilizou volumes de 4 e 6%, tendo melhores resultados com 6%. Os laminados obtidos foram denominados de M1bs6 e M1bs8.

O estudo do número "ótimo" de camadas de fibras alinhadas unidirecionalmente foi realizado na matriz M1c. Os compósitos com 3 e 5 camadas foram produzidos com a pressão "ótima" de 3 MPa e com o volume de fibras "ótimo" de 6%. Os laminados obtidos foram denominados de M1ce6. Uma amostra sem substituição parcial do Cimento Portland por argilas calcinadas foi também utilizado para produção do laminado M0cs6 produzido nas mesmas condições do laminado M1ce6.

3.2.3. Processo de produção dos laminados

Os compósitos utilizados nesse trabalho foram reforçados com fibras alinhadas e contínuas, as quais eram colocadas manualmente, em camadas, no molde. A Figura 3.8 mostra o esquema do arranjo das camadas de fibras no laminado.



Figura 3.8 – Distribuição das fibras no interior do compósito.

O processo de fabricação dos laminados pode ser resumido nos seguintes passos:

a) Produção da matriz

Os constituintes secos da argamassa foram misturados em um misturador de bancada, com capacidade de 20 dm³, (vide Figura 3.9(a)), na seguinte ordem: cimento, tijolo moído, metacaulinita, areia e volastonita. O material seco foi misturado durante 2

minutos, até que se verificasse a homogeneização completa da mistura. O SP foi diluído na água e adicionado lentamente à mistura (vide Figura 3.9(a)).

b) Produção do laminado

Após a produção da argamassa, iniciou-se a moldagem do laminado, colocandose a primeira camada de matriz no molde (vide Figura 3.9(b)). Para se garantir a espessura dessa camada, foi calculado o seu volume e, com o peso específico da mistura fresca, calculou-se a massa de argamassa da primeira camada, procedimento que foi repetido para todas as outras camadas. Desta maneira, evitou-se que a camada ultrapassasse a espessura desejada. Após a colocação da primeira camada, foi usada uma espátula para regularização, sendo a mesma vibrada externamente logo em seguida (vide Figura 3.9(c)).











(c)

Figura 3.9 – Processo de produção dos laminados. (a) Adição do superplastificante e água aos constituintes secos (b) Colocação da primeira camada de argamassa no molde e (c) vibração do laminado em mesa vibratória.

Após a colocação da primeira camada de argamassa, foi colocada a primeira camada de fibras, as quais foram distribuídas e pressionadas manualmente para que penetrassem na matriz (vide Figura 3.10). Observe na Figura 3.10 (d) que as fibras, por serem flexíveis, não ficavam completamente alinhadas na matriz. Esse problema foi corrigido nas moldagens posteriores com o uso de costuras transversais feitas nas camadas de fibras a cada 15 cm, ao longo do seu comprimento, formando um tecido unidirecional.



Figura 3.10 – (c) Colocação da primeira camada de fibras. (d) Pequena prensagem para que as fibras penetrem na argamassa.

Após a colocação das fibras uma nova camada de argamassa era lançada, regularizada com espátula (vide Figura 3.11) e, em seguida, procedeu-se a vibração externa, com o molde apoiado sobre uma mesa vibratória ate surgir um filme de água na superfície das camadas.

Os passos referentes à colocação das camadas de fibras e argamassa eram repetidos, até chegar-se à última camada de argamassa. A última etapa na produção dos laminados era a aplicação da pressão de moldagem.



Figura 3.11– (e) Colocação da segunda camada de argamassa e (f) Regularização da mesma.

Na Figura 3.12(a) mostra-se uma camada de fibras costurada colocada sobre uma da camada da matriz, notando-se uma melhor distribuição das fibras, que não apresentavam como no caso das camadas sem costura (vide Figura 3.10 e Figura 3.11). Na Figura 3.12(b), é mostrada a colocação da camada de argamassa com maior teor de superplastificante sobre a camada de fibra.



Figura 3.12 – (a) Aspecto das camadas de fibras com costura após sua colocação no molde (b) Lançamento da matriz mais fluida sobre a camada de fibras.

c) Pressão

A fôrma utilizada na moldagem das placas de 400 mm x 150 mm x 12 mm foi confeccionada em aço e a mesma foi importante na contenção lateral da argamassa, impedindo a saída de material da amostra durante a vibração. Após a moldagem, foi colocada uma chapa de aço com espessura de 17 mm, que encaixava na fôrma e distribuía a carga uniformemente sobre toda a amostra, como é mostrado no esquema da Figura 3.13. A fôrma foi colocada sobre uma chapa fina de aço que servia para o transporte do corpo-de-prova, sendo que essa chapa foi forrada com um geotêxtil e um filtro de papel. O geotêxtil absorvia e permitia a passagem da água expulsa do corpo-de-prova durante a prensagem e o filtro impedia que os constituintes finos da argamassa se perdessem junto com a saída da água.



Medidas em cm

Figura 3.13 – Fôrma para moldagem e prensagem dos corpos-de-prova.

A prensagem foi realizada em um pórtico da placa de reação do LABEST/PEC/COPPE utilizando um atuador servo-hidráulico, (Figura 3.14(a)), com capacidade de carga de 50 toneladas controlados pelo sistema MTS 406.







Figura 3.14 – Sistema de prensagem. (a) Visualização do pórtico com o atuador e (b) Relógios comparadores para medida de deflexão durante a prensagem.

Durante a aplicação da pressão, o deslocamento da amostra foi medido utilizandose de dois relógios comparadores colocados sobre a placa espessa que transmitia a carga para o corpo-de-prova, (Figura 3.14(b)). A carga foi aplicada a uma taxa de aproximadamente 1,8 ton/min. Ao atingir a carga máxima, a mesma era mantida constante durante 5 minutos. O descarregamento foi realizado em cerca de 2 minutos.

A Figura 3.15 mostra a carga em função do deslocamento para o laminado M1as6 produzidos sob pressão de 3 MPa. Observa-se que as leituras dos dois relógios comparadores são bastante próximas demonstrando uma aplicação uniforme e bem distribuída de pressão de moldagem.



Figura 3.15 – Curva carga x deslocamento durante a moldagem do laminado M1as6, com pressão de 3 MPa.

3.2.4. Uso do cordão de sisal como reforço

Pensando no futuro, a utilização, em escala industrial do processo de produção contínuo desses laminados, estudou-se o comportamento de compósitos reforçados com cordão de sisal (resultado da torção de vários filamentos de fibras de sisal). Os cordões utilizados são fabricados em grande escala no Brasil, e são conhecidos popularmente como barbante.

Foi adotada a mistura M1b para este estudo. A fração volumétrica de cordão foi de 6%, pressão de moldagem de 3MPa e 3 camadas de reforço. Esse laminado foi denominado de M1bs6fio, sendo que a única diferença desse laminado para o M1bs6 é o tipo de reforço (cordão x filamento)

Na produção dos compósitos reforçados com cordão de sisal, houve algumas modificações na fôrma, que foi produzida em acrílico pela facilidade de ser perfurado, permitindo o posicionamento dos cordões de sisal. A fôrma foi perfurada com diâmetro de

2 mm nas duas extremidades, sendo que o número e o espaçamento entre os furos foram calculados conforme a fração volumétrica de fibras para cada camada. Pode-se observar na Figura 3.16(a) um desenho ilustrativo do posicionamento dos cordão e na Figura 3.16(b) um detalhe da fôrma com a colocação do cordão concluída.



Figura 3.16 – (a) Esquema dos cordões no interior da fôrma e (b) Fôrma com os cordões já posicionados.

Os cordões foram colocados de forma artesanal, como num processo de costura de uma extremidade a outra da fôrma (vide Figura 3.17(a)), sendo que nessa colocação, os cordões ficavam com uma pequena protensão para que durante a colocação da matriz os mesmos permanecessem em seus locais de origem em toda extensão do corpo-deprova.



(a) (b) Figura 3.17 – (a) Fôrma com os cordões já colocados e (b) Início do processo de lançamento da matriz na fôrma.

O processo de lançamento da matriz foi mais simples nesse caso do que quando se utilizou a mesma fração volumétrica em filamento. A matriz foi lançada facilmente no interior do molde, tendo-se sempre o cuidado para que a mesma penetrasse totalmente entre os cordões (vide Figura 3.17(b)). A vibração foi realizada externamente utilizando mesa vibratória.

3.2.5. Produção de placas planas e corrugadas

Placas laminadas lisas com dimensões de 400 mm x 400 mm x 12 mm e corrugadas com área projetada no plano 400 mm x 343 mm com espessura de 13 mm foram produzidas para realização de ensaios de variação dimensional (placas planas) e ensaios de flexão em três pontos para verificar o ganho de carga que a ondulação traz aos laminados. O processo de moldagem foi similar ao das placas de 150 mm x 400 mm x 12 mm. Nesse caso, a fôrma utilizada para a produção das placas planas foi madeira, como mostra a Figura 3.18. Antes de o corpo-de-prova ser levado para a prensa, a fôrma de madeira foi retirada, permitindo a deformação lateral durante a prensagem deixando assim livre a deformação lateral. Um rolo foi utilizado para melhorar a impregnação das fibras na matriz. As fibras eram costuradas transversalmente com duas costuras formando um "tecido" unidirecional. A Figura 3.18 (a) mostra o uso do rolo após a colocação da primeira camada de fibras e a colocação da argamassa para a segunda camada de matriz (Figura 3.18 (b))



Figura 3.18 – Produção das placas planas, (a)Uso do rolo para melhorar impregnação das fibras na matriz e (b) Colocação da segunda camada de matriz.

Na Figura 3.19(a), pode ser visto o lançamento da camada final de argamassa e na Figura 3.19(b) o aspecto do laminado antes da aplicação do carregamento de compressão. O processo de prensagem foi o mesmo descrito no item 3.2.3.



(a)

(b)

Figura 3.19 – (a) Acabamento da ultima camada de argamassa (b) Conjunto pronto para aplicação da pressão.

Para a produção das placas corrugadas, produziu-se inicialmente, as placas planas conforme descrito anteriormente. No processo de prensagem, a fim de proporcionar ondulações à placa, utilizou-se moldes que consistiam de um sistema macho-e-fêmea, produzidos em concreto armado (vide Figura 3.20(a)). A parte superior do molde foi acoplada ao atuador de carga conforme mostra a Figura 3.20(b). A colocação do corpo-de-prova entre os moldes foi realizada da seguinte forma: o corpo-de-prova após ser moldado foi transportado até o molde por uma chapa plana, a qual facilitou o arrasto do corpo-de-prova sobre o molde inferior; depois, foi pressionado manualmente para que fosse acomodado sobre as ondulações do molde, (vide Figura 3.20(c)) e, em seguida, foi colocado um filtro sobre o corpo-de-prova evitando a aderência ao molde superior como mostra a Figura 3.20(d).





Os corpos-de-prova ficaram durante as primeiras 24 horas, cobertos com uma manta úmida e, após esse período, foram levados para a câmara úmida, que tinha uma temperatura de 22±1 °C e uma umidade relativa de 100%. Após 28 dias, os corpos-de prova foram retirados para os ensaios (vide Figura 3.21(b)). Na Figura 3.21(a) são apresentadas as medidas de projeto da placa ondulada.

3:33



(a) medidas em mm

Figura 3.21 - corpo-de-prova ondulado pronto para o ensaio.

3.3. Caracterização mecânica dos compósitos

Foram realizados três ensaios mecânicos para a caracterização das matrizes e dos compósitos: compressão, tração direta e flexão. Todos os ensaios mecânicos foram realizados por uma máquina de ensaios universal SHIMADZU com capacidade de carga de 1000kN.

3.3.1. Ensaios de Compressão.

Através da curva tensão x deformação foi calculado o módulo de elasticidade de acordo com a NBR 8522 (1995). O controle de deslocamento axial para este ensaio teve uma taxa de 0,05 mm/min. A deformação axial do corpo-de-prova foi medida a partir da média fornecida por dois LVDT's, acoplados por anéis metálicos posicionados na região central do corpo-de-prova. As deformações e o carregamento aplicado foram lidos por um sistema de aquisição de dados "ADS 2000", de 16 bits, da marca Lynx. A Figura 3.22 é ilustrada toda configuração do ensaio. Por último, foi aplicado carregamento sobre o corpo-de-prova ate que sua ruptura fosse atingida.



Figura 3.22 - Instrumentação do corpo-de-prova para o ensaio de compressão simples

Foram utilizadas neste ensaio duas geometrias: corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura que teve a finalidade de avaliar as mudanças na matriz e corpos-de-prova com 75 mm de diâmetro por 150 mm de altura, que teve a finalidade de verificar como corpos-de-prova cilíndricos se comportavam com uma distribuição de fibras alinhadas em seu interior, os quais as fibras foram distribuídas como mostra a Figura 3.23. Para esses compósitos não foi aplicada pressão.

As moldagens para os corpos-de-prova sem fibras foram realizadas conforme a NBR 7215 (1996). Houve um cuidado especial na regularização das superfícies extremas dos corpos-de-prova, o que foi executado com auxílio de um torno mecânico diminuindo as imperfeições decorrentes do processo de moldagem. Esse faceamento mecânico fornece paralelismo entre as faces do corpo-de-prova, permitindo que o carregamento seja aplicado perpendicularmente às suas faces.



Medidas em mm.

Figura 3.23 – Esquema da distribuição das fibras para os compósitos submetidos a ensaios de resistência na compressão.

3.3.2. Ensaios de Tração Direta

Neste estudo foi adotado o sistema de ensaio desenvolvido por LIMA (2004), onde o mesmo utilizou um aparato metálico constituído por dois acessórios ligados entre si através de uma rótula esférica como é mostrado na Figura 3.24. O acessório da esquerda era conectado na garra da máquina de ensaio, e o da direita conectado à outras placas através de um pino, as quais eram coladas ao corpo-de-prova com uma camada fina de adesivo epóxi (Sikadur 32).



Figura 3.24 – Configuração do sistema de tração. (LIMA, 2004).

Visando a obtenção da deformação do corpo-de-prova durante o carregamento, foi desenvolvido um aparato formado por suportes de alumínio onde eram acoplados LVDT's. Esses suportes foram fixos ao corpo-de-prova em seis pontos por parafusos, impedindo assim a sua rotação em relação ao eixo do corpo-de-prova.

Na Figura 3.25(a) pode-se observar os suportes presos ao corpo-de-prova: "b" suporte superior onde os LVDT's "d" são acoplados, "c" suporte que serve como referência da leitura do LVDT, "e" guias inicialmente presas aos suportes para que a distancia entre os mesmos, padronizada em 10 cm, permaneça sempre igual para os diferentes corpos-de-prova. Após os seis parafusos que se encontram nos suportes serem presos ao corpo-de-prova, as guias eram retiradas dos suportes e então o corpo-de-prova era acoplado à prensa através de uma rótula pino. Na Figura 3.25(b), é mostrada a configuração do ensaio.





(b)

Figura 3.25 – (a) Detalhe da colocação dos LVDT's e (b) Configuração do ensaio de tração direta.

Inicialmente, os corpos-de-prova para o ensaio de tração direta tinham dimensões de 50 mm de largura, 200 mm de comprimento e espessura de 12 mm. Como a colagem com as placas de aço se dava nos 35 mm finais dos corpo-de-prova, o comprimento da amostra ficava reduzida a 130 mm (ver Figura 3.26). Durante a realização dos ensaios nos laminados com essas dimensões, ocorria a ruptura do adesivo epóxi usado entre as placas de aço e o corpo-de-prova antes de se atingir a ruptura do compósito.



Medidas em mm

Figura 3.26 – Configuração dos corpos-de-prova à tração com colagem de 35mm nas suas extremidades.

Para se resolver esse problema, aumentou-se o tamanho do corpo-de-prova para 250 mm. A Figura 3.29 mostra a nova configuração do corpo-de-prova onde se observa que o conjunto placa de aço/corpo-de-prova aumentou de 35 mm para 60 mm, o que corresponde uma área de colagem de 3000 mm², ou seja, 70% maior que a anterior. Com isso não ocorreu mais ruptura na interface adesivo/placa de aço.



Medidas em mm

Figura 3.27 – Configuração dos corpos-de-prova a tração com colagem de 60 mm nas suas extremidades

Uma última mudança na geometria do corpo-de-prova foi realizada aumentando-se o comprimento do mesmo para 400 mm. As chapas de aço foram coladas em uma das faces do corpo-de-prova, esperava-se a secagem do adesivo epóxi e com o uso de uma broca os mesmos foram furados nos locais de colocação da rótula pino. Em seguida, a outra chapa era colada, tomando-se sempre o cuidado de deixar a passagem do pino bem perpendicular ao eixo da amostra e lembrando que a distancia entre as chapas era de 130 mm (ver Figura 3.28). Durante os ensaios se notou que esse aumento conduziu a resultados similares aos obtidos com as amostras de 50 mm x 250 mm.



Medidas em mm

Figura 3.28 – Configuração dos corpos-de-prova a tração com colagem de 100mm nas extremidades

3.3.3. Ensaios de Flexão.

Ensaios de flexão em quatro pontos.

Foram utilizados corpos-de-prova com dimensões de 150 mm x 400 mm x 12mm. Os corpos-de-prova foram retirados da câmara úmida e armazenados em uma sala com temperatura controlada de 21±1 °C, sendo ensaiados após um intervalo de 40 horas. Antes da execução dos ensaios os corpos-de-prova foram pintados de branco com uma tinta a base de PVA para se verificar melhor o aparecimento das fissuras.

A Figura 3.29 mostra o dispositivo de ensaio com quatro cutelos, montado sobre a máquina de ensaio. O sistema de aquisição de dados, contínuo, foi baseado no programa Trapézio, obtendo-se a carga e a flecha no meio do vão por meio do sensor da prensa e um LVDT, respectivamente. A velocidade de ensaio utilizada foi de 0,5mm/min, padronizada para todos os ensaios de flexão. Os pontos de carga distavam 100 mm e o vão entre apoios distava 300 mm.



Figura 3.29 - Configuração do ensaio de flexão em quatro pontos

Devido a uma variação na altura dos corpos-de-prova ensaiados, os resultados foram expressos em tensão de tração na flexão, onde foi utilizada a equação 5.1 para o cálculo dessa tensão. A energia absorvida pelo corpo-de-prova equivale à área sob a curva do gráfico carga x deformação que, para esse calculo foi utilizado a equação 5.2.

$$\sigma = \frac{6M}{bd^2} \tag{5.1}$$

$$T = \frac{A}{bd}$$
(5.2)



A maioria dos ensaios era interrompida quando a carga atingia um valor próximo ou inferior a 40% em seu ramo descendente da carga máxima suportada pelo corpo-deprova. Em alguns casos, o ensaio foi interrompido após a carga máxima ser atingida. Na Figura 3.30, pode-se observar a configuração inicial do ensaio.



Figura 3.30 – Ensaio dos corpos-de-prova sob flexão, configuração inicial.

Ensaios de flexão em três pontos.

Placas Planas

Esse ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 5641 (ABNT, 1977) "Chapas estruturais de cimento amianto – determinação da resistência à flexão", e tem como objetivo avaliar o comportamento de uma placa de fibro-cimento esbelta sob carga de serviço. Os corpos-de-prova possuíam dimensões de 400 mm x 400 mm x 12 mm. Na Figura 3.31, pode-se ver a configuração do ensaio em três pontos para as placas planas.



Figura 3.31 - Configuração do ensaio de flexão em 3 pontos.

Para a medição das deflexões nos pontos da placa, foram colocados quatro flexímetros como ilustrado na Figura 3.32(a), sendo os sinais condicionados e adquiridos automaticamente pelo sistema de aquisição de dados ADS2000 de 16 bits da Lynx. Foi adotado o número de quatro flexímetros para se avaliar a simetria das deflexões em toda a placa. Na Figura 3.32(b), pode-se visualizar os pontos em que os flexímetros foram posicionados.

O vão entre apoios era 340 mm e o carregamento central e linear foi transmitido para a placa através de uma barra de seção redonda de aço, como se pode ver na Figura 3.32(a), Os apoios da placa eram constituídos de barras de aço redondas, uma fixa e outra móvel.



Figura 3.32 - (a) Visualização da localização dos flexímetro que foram colocados para a leitura dos deslocamentos e (b) pontos na placa, sendo que aqueles afastados do centro distavam de 10 cm do mesmo.

Na interface da barra de transmissão da carga e nos apoios foi usada uma borracha de 3 mm de espessura para melhorar a transferência e distribuição da carga para a placa. Na Figura 3.33(a), tem-se uma visão geral da máquina de ensaio e seu sistema de aquisição computadorizado, e na Figura 3.33(b) um detalhe da configuração inicial da placa.



Figura 3.33 – Configuração do ensaio em placas de 400 mm x 400 mm em ensaios de flexão em três pontos. (a) Máquina de ensaio e (b) Configuração inicial da placa.

Placas corrugadas

Os ensaios nas placas corrugadas foram realizados em corpos-de-prova com área projetada no plano 400 mm x 343 mm e espessura de 13 mm. Os apoios e a barra de aplicação de carga foram produzidos em aço seguindo a mesma ondulação das placas. Com o objetivo de garantir que as tensões fossem distribuídas perfeitamente em toda faixa linear do carregamento. A distância entre os apoios também era de 340 mm.

Foi utilizado "durepoxi" para a regularização da interface corpo-de-prova/apoios e corpo-de-prova/barra de aplicação da carga. Adicionalmente, foram colocadas borrachas de cerca de 3 mm de espessura entre a camada do durepoxi e as placas a serem ensaiadas, garantindo-se assim uma adequada distribuição do carregamento aplicado. A configuração do ensaio está mostrada na Figura 3.34



Figura 3.34 - Configuração do ensaio das peças corrugadas

Na Figura 3.35, pode-se observar todo a configuração do ensaio, sendo ilustrado o estágio inicial de carregamento. Pode-se perceber também a localização dos flexímetros, a borracha entre os apoios e o corpo-de-prova e o sistema de aplicação da carga.

Para a aquisição dos deslocamentos foram utilizados quatro flexímetros, sendo dois posicionados na linha do carregamento e dois em lados opostos que distavam 10 cm da linha do carregamento. Esse número de flexímetros, como relatado para placas planas, foi utilizado para se verificar a simetria dos deslocamentos de cada ponto do corpo-de-prova, como também a distribuição do carregamento.



Figura 3.35 – (a) Configuração inicial do carregamento.

3.4. Ensaios Físicos

3.4.1. Ensaios de Retração por Secagem

Para determinação da retração por secagem dos laminados foi fabricado um pórtico em aço, com medidas na Figura 3.36(a), onde foram colocados dois relógios comparadores que serviam para as medidas de retração. Placas planas com dimensões de 400 mm x 400 mm x 13 mm do compósito M1ce6 e matrizes M1c e M0c foram utilizadas no referente estudo.

As amostras foram retiradas da câmara úmida após um período de 60 dias e deixadas em uma sala com temperatura de 21±1 °C, e após 48 horas se iniciavam as leituras nas placas. As leituras eram feitas após o posicionamento da placas sobre o pórtico sendo lidos os deslocamentos nos dois relógios, primeiramente em um sentido, depois a placa era girada para as medidas no outro sentido, como está mostrado pelas linhas tracejadas na Figura 3.36(b). Esse ensaio foi conduzido em uma sala climatizada onde era controlada a umidade e a temperatura local.



Figura 3.36 – (a) Medidas do pórtico e (b) corpo-de-prova sendo medido.

3.4.2. Ensaios de Estanqueidade.

Para se avaliar a estanqueidade desse material, adotou-se a norma NBR 5642 – Telhas de fibrocimento – Verificação da impermeabilidade.

As amostras foram recortadas com as dimensões de 150 mm x 150 mm x 12 mm de altura, tendo sido utilizadas quatro amostras para se ter uma boa média entre os resultados. Também foi utilizada uma amostra cerâmica, uma telha comercialmente encontrada no mercado, como comparação. Na Figura 3.37 está mostrada toda a montagem do ensaio



Figura 3.37 – Configuração do ensaio de impermeabilidade das amostras (a) Visão geral e (b) Detalhe do ensaio.

Um tubo de PVC de seção circular reta, aberto nos extremos, com diâmetro interno de 35 mm e altura de 250 mm (Figura 3.37 (b)) foi utilizado no ensaio. Os corposde-prova foram apoiados em suas laterais em posição horizontal, foi colado, com uma cola selante, no centro de cada amostra. Após a secagem da cola, encheu-se o tubo com água até formar a coluna de 250 mm. No intervalo de 5 dias observa-se a ocorrência de vazamentos ou manchas de umidade na superfície inferior das amostras.

3.4.3. Ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica

O ensaio de absorção de água dos laminados foi realizado seguindo-se a norma NBR 9778 (1987)– Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica.

As amostras utilizadas nos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica foram recortadas de amostras maiores e permaneceram com dimensões de 200 mm x 50 mm x 12 mm.

Todas as amostras permaneceram na câmara úmida até a data do ensaio, onde as mesmas foram retirados e deixados em uma sala com temperatura constante de 21±1 °C por um intervalo de 48hs. Após esse período de tempo, as amostras foram colocadas na estufa com temperatura constante de 60°C. Após 24hs era feita a primeira pesagem e as amostras retornavam a estufa, e essa pesagem foi feita até que a diferença de peso num intervalo de 24hs fosse inferior a 0,5% do menor peso para todos as amostras. Após essa fase, as amostras foram imersas em um recipiente contendo água, e após o tempo estipulado em 24 horas, as mesmas foram retiradas, secas superficialmente com um papel absorvente, pesadas e imediatamente recolocadas na água. Esse procedimento foi repetido ate se alcançar à saturação, ou seja, onde a diferença de massa fosse menor que 0,5% da menor massa no intervalo de 24 horas. Por ultimo, após a amostra estar completamente saturada, era feita a pesagem do peso submerso. Foi calculado o índice de vazios, a absorção por imersão e a massa específica seca e saturada das amostras.

3.4.4. Análise micro-estrutural dos laminados

Para a análise da microestrutura dos compósitos, foram utilizadas microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV), com imagem de elétrons retroespalhados e de elétrons secundários, e analise por espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS). No estudo de microscopia ótica utilizou-se um equipamento Olympus SZ – CTV com câmera Panasonic Super Dynamic II WV CP 460 acoplada ao equipamento. Os ensaios foram realizados no CETEM/MCT. Para as análises de MEV foram utilizados os seguintes: o modelo JEOL JSM 5800 LV, pertencente ao IME, o modelo Leika S440, pertencente ao CETEM/MCT e o modelo JEOL JSM-6460 pertencente ao Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFRJ. Voltagens de 10 e 20 kV foram utilizados no presente estudo.

As amostras analisadas foram obtidas a partir dos compósitos, utilizando-se para isso uma serra diamantada. O polimento foi realizado utilizando-se uma sequência de lixas diamantadas, com granulometria de 400, 200, 100, 75, e 50 µm. Para a metalização das amostras foram utilizados dois diferentes materiais: o ouro e a prata. Em alguns casos, quando utilizou-se baixo vácuo, a amostra não foi metalizada.

CAPÍTULO 4

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Ensaios de compressão

4.1.1. Comportamento mecânico das argamassas com diferentes diâmetros máximos da areia e teor de superplastificante.

Na Figura 4.1, estão apresentadas curvas típicas obtidas dos ensaios de resistência à compressão com tempo de cura de 28 dias, realizados nas matrizes com diferentes diâmetros máximos de areia e teores de superplastificante. Na Tabela 4.1 são apresentados os valores médios de resistência à compressão (fc), módulo de elasticidade (E) e deformação na tensão de pico (ϵ_a) para os ensaios realizados.

Os resultados obtidos indicam que a redução do diâmetro máximo da areia de 2,36 mm para 1,18 mm resultou uma redução de 4 % na resistência à compressão, de 13 % no módulo de elasticidade e de 1,3 % na deformação de pico da mistura M1a com relação à mistura M1b. Quando o teor de superplastificante da mistura M1b foi aumentado para 2,5%, mantendo-se constante o diâmetro máximo da areia em 1,18 mm, as propriedades das misturas foram todas aumentadas: a resistência à compressão aumentou em 6 %, o módulo de elasticidade em 8 % e a deformação em 2 %. Esse comportamento deve-se, provavelmente, ao melhor comportamento reológico da mistura que permitiu uma melhor compactação da mesma.


Figura 4.1 – Curvas típicas de tensão x deformação para as misturas M1a, M1b, M1c e M0c.

Para efeito de comparação, a mistura M0c, produzida com o mesmo traço da mistura M1c, mas sem a adição de argila calcinada, foi ensaiada à compressão e os resultados indicaram que a presença da argila calcinada aumentou o f_c e a deformação de pico da mistura de Cimento Portland em, respectivamente 30% e 42 %. O módulo de elasticidade, por sua vez, apresentou uma redução de 16 %. Esse comportamento é similar ao observado por VELASCO *et al.* (2004).

	f _c	CV	E	CV	E a	CV
misturas	(MPa)	(%)	(GPa)	(%)	(με)	(%)
M1a	64,97	2,10	24,90	0,91	5169,77	2,64
M1b	62,39	1,28	21,65	0,05	5102,15	1,70
M1c	68,94	3,11	26,89	0,06	5258,28	7,31
M0c	53,32	5,83	32,11	5,09	3696,21	3,54

Tabela 4.1 – Valores médios de resistência à compressão (f_c), módulo de elasticidade (E), deformação (ϵ_a) e respectivos coeficientes de variação (CV) para as matrizes M1a, M1b, M1c e M0c.

4.1.2. Comparação mecânica entre a matriz M1c e o compósito M1cs6 na conpressão .

Na Figura 4.2, estão apresentadas curvas médias comparando o comportamento à compressão da matriz M1c com o compósito M1cs6, os quais foram curados por 60 dias. Observa-se que até uma deformação de 2500 $\mu\epsilon$ houve um comportamento similar para a matriz e para o compósito.



Figura 4.2 – Ensaios de compressão para corpos-de-prova com 75mm x 150mm, mostrando os resultados da influência do tempo de cura e da adição de fibras na matriz.

Na deformação de 2500 $\mu\epsilon$ o compósito atinge sua resistência máxima, já a matriz se deforma até 5000 $\mu\epsilon$, onde alcança sua maior resistência.

Na Tabela 4.2, estão apresentados resultados dos ensaios à compressão uniaxial realizados no compósito M1cs6 e em sua matriz. Verificou-se que a adição de fibras de sisal acarretou em uma diminuição de 38% da resistência à compressão quando comparado com a matriz.

Misturas	f _c	CV	E	CV	E a	CV
	(MPa)	(%)	(GPa)	(%)	(με)	(%)
M1c 60d	83,56	1,46	25,37	4,38	5312,20	2,30
M1cs6 60d	51,48	5,10	25,39	1,44	2587,17	1,44

Tabela 4.2 – Resultados de resistência à compressão (f_c), módulo de elasticidade (E), deformação (ϵ_a) e respectivos coeficientes de variação (CV).

4.2. Determinação da pressão de moldagem ótima

Para se avaliar a melhor pressão de moldagem a ser utilizada neste estudo, foram realizados ensaios de resistência à flexão e de resistência à tração direta.

4.2.1. Tração na flexão em quatro pontos

Na Tabela 4.3 estão encontrados os resultados de tração na flexão para a matriz M1a. Nota-se um aumento da resistência à tração na flexão de respectivamente, 15,2%, 21,7% e 24,5% para as matrizes moldadas sob pressão de 2, 3 e 4 MPa em relação àquele moldados sem pressão. Todas as matrizes apresentaram ruptura frágil refletindo em valores de tenacidade médios de 0,007±0,001 kJ/m².

	Pressão de				
Misturas	moldagem	σ_{crt}	CV	Т	CV
	(MPa)	(MPa)	(%)	(kJ/m²)	(%)
	0	7,87	8,84	0,006	15,00
M1a	2	9,07	5,95	0,007	11,00
	3	9,58	0,81	0,006	8,00
	4	9,77	2,50	0,008	10,00

Tabela 4.3 – Valores médios de tensão de tração na flexão (σ_{crt}), tenacidade (T) e coeficiente de variação (CV).

*A tenacidade foi calculada ate a tensão de ruptura

Na Figura 4.3 estão apresentadas as curvas tensão-deflexão para os compósitos denominados de M1as6, submetidos ao ensaio de flexão em 4 pontos. Observa-se que para os compósitos, com e sem pressão de moldagem, ocorreu, a partir da primeira fissura, um endurecimento até uma deflexão central entre 20 e 30 mm. No caso da mistura moldada sob pressão de 2 MPa o amolecimento iniciou com uma deflexão de cerca de 20 mm enquanto que para as misturas com 3 e 4 MPa, o mesmo iniciou com 23 e 30 mm, respectivamente. A partir dessas deflexões ocorre o fenômeno de localização de fissura onde uma das fissuras abre muito mais que as demais, ocorrendo o amolecimento da curva tensão-deflexão.



Figura 4.3 – Curvas médias de tensão de tração na flexão x deflexão para a mistura M1as6 submetida a diferentes pressões de moldagens.

Na Tabela 4.4 estão apresentados os resultados médios de tensão de primeira fissura (σ_{crb}), tensão última (σ_{ub}), tenacidade (T) e coeficiente de variação (CV) para os ensaios de tração na flexão. Nos resultados, observou-se na tensão de primeira fissura um aumento de 2,5%, 35% e 23% para as pressões de 2, 3 e 4 MPa, respectivamente, com relação àqueles moldados sem pressão. Com relação à tensão máxima, os compósitos moldados com 2 MPa de pressão apresentaram um aumento de 7%, enquanto que, para os compósitos moldados com 3 e 4 MPa de pressão apresentaram um incremento em torno de 22% em relação à referência. Para a tenacidade (calculada até uma deflexão de 20 mm), foram encontrados incrementos de 6% para a pressão de 2 MPa e em torno de 21% para as pressões de 3 e 4 MPa. Com essas análises, concluiuse que as pressões de 3 e 4 MPa apresentaram valores próximos e superiores em relação à pressão de 2 MPa. Devido a menor quantidade de energia utilizada para impor a pressão de 3 MPa, essa foi escolhida como a pressão ótima de moldagem. Nos resultados foram encontrados elevados coeficientes de variação devido ao arranjo das fibras, que foram, nesse caso, colocadas sem costuras, o que dificultava a moldagem dos corpos-de-prova.

Pressão de		Valores de 1 ^a fissura			Máximos valores pós-fissuração			
Misturas	moldagem (MPa)	σ _{crb} (MPa)	CV (%)	σ _{ub} (MPa)	CV (%)	T CV (kJ/m²) (%)		
	0	4,36	13,38	13,33	15,61	9,93 1,07		
M1as6	2	4,47	17,61	14,31	1,75	10,51 1,87		
WT230	3	5,90	21,57	20,90	26,04	11,89 5,78		
	4	5,39	17,39	22,76	22,19	12,21 14,19		

Tabela 4.4 – Valores médios de tensão de primeira fissura (σ_{crb}), tensão ultima (σ_{ub}), tenacidade (T) e coeficiente de variação (CV) para ensaio de tração na flexão.

4.2.2. Tração direta

Os ensaios de tração direta foram realizados em corpos-de-prova com dimensões de 50 mm de largura, 200 mm de comprimento e 12 mm de espessura e área de colagem chapa metálica/corpo-de-prova de 17,5 cm².

Na Figura 4.4, estão apresentadas as curvas típicas de tensão-deslocamento na tração direta para o compósito moldado sob diferentes pressões.



Figura 4.4 – Curvas típicas tensão de tração x deslocamento para ensaios de tração direta realizados no compósito M1as6 moldado com diferentes pressões.

Observou-se para todos os compósitos o aparecimento de múltiplas fissuras seguido por um endurecimento até um deslocamento em torno de 2 mm, que representa uma deformação de 1,5%. Para carregamentos acima de 3,4 kN acontecia um descolamento da interface do adesivo epóxi (Sikadur 32)/corpo-de-prova comprometendo a aquisição de dados a partir desse ponto.

Os valores médios de tensão de primeira fissura, σ_{crt} , máxima tensão pósfissuração, σ_{ut} , e coeficientes de variação (CV) estão apresentadas na Tabela 4.5. A maior tensão média de primeira fissura foi observada no corpo-de-prova moldado com pressão de 3 MPa ($\sigma_{cr} = 5.41$ MPa), observando-se, para este compósito, um aumento de 18% e 33% em relação aos resultados obtidos com as pressões de 2 e 4MPa, respectivamente.

	Pressão de	Valores de 1°	^a fissura	Máximos valores pós-fissuração
Misturas	moldagem	σ_{crt}	CV	σ_{ut} CV
	(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa) (%)
	2	4,58	29,24	6,62 4,43
M1as6	3	5,41	30,22	7,67 0,28
	4	4,00	7,26	6,14 -

Tabela 4.5 – Valores de resistência de tração direta para o compósito M1as6 com diferentes pressões de moldagem.

Em relação aos valores de tensão pós-fissuração, obteve-se para o compósito moldado com pressão de 3 MPa (7,67 MPa) o maior valor dentre as 3 pressões de moldagem estudadas. Comparando os resultados de tensão de pós-fissuração obtidos para a pressão de 3 MPa com 2 e 4 MPa, nota-se um aumento de 15% e 24%, respectivamente. Os resultados obtidos a partir do ensaio de tração direta mostram que a pressão de moldagem de 3 MPa resulta em um melhor desempenho, confirmando os resultados obtidos a partir dos ensaios de tração na flexão.

4.3. Determinação do volume de fibras "ótimo"

Para se determinar a fração volumétrica ótima de fibras, foram realizados ensaios de tração na flexão.

Na Figura 4.5 são apresentadas as curvas médias de tensão-deformação para os compósitos reforçados pelas duas frações volumétricas de fibras estudados, 6% e 8%. Os dois compósitos apresentaram comportamento semelhante com a formação de múltiplas fissuras e endurecimento até um deslocamento de 15 mm.



Figura 4.5- Curvas médias de tensão de tração na flexão x deslocamento para compósitos com diferentes frações volumétricas de fibras (6% e 8%).

Na Tabela 4.6, observa-se que o compósito reforçado com uma fração volumétrica de fibras de 8% teve um desempenho inferior ao compósito reforçado com 6%: 37% menor para a tensão de primeira fissura, 27% menor para tensão pós-fissuração e 7% menor para a tenacidade.

	Valores de	1 ^a fissura	Ma	io		
Misturas	σcrb	CV	σ_{ub}	CV	T *	CV
	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(kJ/m²)	(%)
M1bs6	11,45	9,42	19,45	13,60	16,29	17,10
M1bs8	8,17	19,76	15,39	34,09	15,01	34,60

Tabela 4.6 – Valores médios da resistência à tração na flexão (σ_{crb}), tenacidade (T) e coeficiente de variação (CV)..

T* - A tenacidade foi calculada ate uma deflexão de 20 mm.

O desempenho inferior apresentado pelo laminado reforçado por uma fração volumétrica de fibras de 8% pode ser explicado pela dificuldade observada durante a

moldagem dos compósitos. Foi notado que a matriz não penetrava adequadamente nas camadas de fibras devido a uma grande concentração destas, que passaram a funcionar como barreira em alguns pontos ao longo do corpo-de-prova. Conclui-se então que a fração volumétrica "ótima" entre as estudadas é a de 6%.

4.4. Determinação do número "ótimo" de camadas de fibras alinhadas unidirecionalmente a serem utilizadas na produção dos laminados

Para se determinar o número de camadas de fibras "ótimo" utilizadas na produção do compósito foram realizados ensaios de tração na flexão em 4 pontos e tração direta.

4.4.1. Tração na flexão em quatro pontos

A figura 4.7 mostra o gráfico de tensão de tração na flexão x deflexão para compósitos reforçados por 6% de fibras arranjadas em 3 e 5 camadas e moldadas com pressão de 3 MPa.



Figura 4.6 – Curvas típicas de tensão de tração na flexão x deflexão para compósitos reforçados com fibras arranjadas em 3 e 5 camadas.

As curvas referentes aos compósitos reforçados por fibras arranjadas em 3 e 5 camadas demonstraram comportamentos semelhantes. Entretanto, o compósito moldado com 3 camadas apresentou uma inclinação na fase de endurecimento 6% menor em relação àquele moldado com 5 camadas.

Os resultados de tração na flexão são mostrados na Tabela 4.7. O compósito moldado com 5 camadas apresentou um aumento de tensão de primeira fissura, pós-fissuração e tenacidade, em relação ao moldado com 3 camadas, de 56%, 22% e 8%, respectivamente. A partir desses dados, considerou-se a distribuição em cinco camadas como o arranjo "ótimo" entre os estudados.

Tabela 4.7 – Resultados de tensão de primeira fissura (σ_{crb}) e tensão de pós-fissuração (σ_{ub}) obtidos por ensaio de flexão em 4 pontos para compósitos com variação do número de camadas.

		Máximos valores pós-fissuração							
Misturas	Nº de camadas (Unid.)	σ _{crb} (MPa)	CV (%)	σ _{ub} (MPa)	CV (%)	δ _u (mm)	CV (%)	T * (kJ/m²)	CV (%)
M1cs6	3	7,49	6,56	30,45	3,88	34,84	2,11	41,00	4,88
M1cs6	5	11,68	7,51	37,16	3,46	24,80	0,57	44,32	1,83

*T – Valores de tenacidade calculados com um decaimento da carga de 50% da carga máxima.

A ruptura dos corpos-de-prova à flexão (Figura 4.7 (a) caracterizou-se pelo aparecimento de múltiplas fissuras em sua face inferior, submetida à tração, tendo maior concentração de fissuras no terço central, como mostrado na Figura 4.7(b).



Figura 4.7 – Configuração final do ensaio de flexão, (a) Deflexão do corpo-de-prova e (b) Múltipla fissuração na face inferior do corpo-de-prova.

Na analise das fissuras (Figura 4.7(b)) verificou-se um número médio de 23 fissuras com espaçamentos médios de 1,2 cm. Esse padrão foi similar para os dois números de camadas estudados.

4.4.2. Tração direta

Na Figura 4.8, pode-se ver o comportamento do compósito na tração direta para os dois números de camadas considerados, sendo utilizados para esse ensaio corpos-deprova com dimensões de 50 mm de largura, 250 mm de comprimento e 12 mm de espessura, sendo que a área de colagem da chapa metálica/corpo-de-prova foi de 30 cm².



Figura 4.8– Curvas típicas para os compósitos com diferentes números de camadas.

Na Tabela 4.8, pode-se notar que o compósito reforçado por fibras distribuídas em 5 camadas apresentaram uma melhora de 6,1% na carga de primeira fissura e de 6,7% na carga pós-fissuração suportada pelo compósito. Conclui-se, dessa forma, que a

distribuição em 5 camadas mostrou ser mais vantajosa em relação à distribuição em três camadas.

	V	alores de 1	^a fissura	Má	Máximos valores pós-fissura			
Misturas	№ de camadas (Unid.)	0 crt (MPa)	CV (%)	(MPa)	CV (%)	δ _u (mm)	CV (%)	
M1cs6	3	3,77	11,99	9,82	8,78	1,77	15,18	
M1cs6	5	4,04	12,86	10,48	9,09	1,92	12,59	

Tabela 4.8 – Resultados de tensão de primeira fissura (σ_{crt}) e tensão de pós-fissuração (σ_{ut}) obtidos a partir de ensaios de tração direta para compósitos com variação do número de camadas.

A Figura 4.9 mostra o estado de múltipla fissuração dos corpo-de-prova moldados com os dois diferentes números de camadas após o ensaio de tração. A distribuição das fissuras em número e espaçamento foi semelhante para os dois números de camadas, tendo sido calculado um número de 13 fissuras ao longo da região tracionada com um espaçamento médio de 0,9 cm.



Figura 4.9– Distribuição típica das fissuras nos ensaios a tração direta, (a) Distribuição em 3 camadas e (b) Distribuição em 5 camadas.

4.5. Comparação mecânica dos compósitos M1cs6 e M0cs6 produzidos em cinco camadas com pressão de moldagem de 3 MPa.

Após ter-se chegado a uma otimização final do compósito, denominado de M1cs6, foi feita uma comparação entre esse e o compósito formado com a matriz sem substituição do cimento, denominada de M0cs6. Para tal, foram realizados ensaios de tração na flexão em 4 pontos e de tração direta.

4.5.1. Tração na flexão em quatro pontos

Na Figura 4.10 são apresentadas as curvas típicas de tensão de tração na flexão x deflexão para os compósitos M0cs6 e M1cs6.



Figura 4.10 – Curvas típicas de tensão de tração na flexão x deflexão dos compósitos M0cs6 e M1cs6.

Nota-se um comportamento semelhante para os dois compósitos sendo que o M1cs6 apresentou uma tensão de pós-fissuração de 37,16 MPa com uma deflexão de 25 mm e o M0cs6, 29,04 MPa com deflexão de 22 mm e apresentaram uma razoável diferença na rigidez pós-fissuração.

Na Tabela 4.9, são apresentados os valores de tensão de primeira fissura, tensão de pós-fissuração, tenacidade e respectivos coeficientes de variação para os compósitos M1cs6 e M0cs6 e suas matrizes. Percebe-se que, a tensão de tração na flexão última da matriz M0c foi superior, apresentando um aumento de 26%, em relação à matriz M1c. Para os resultados de tração na flexão nos compósitos, pode-se perceber uma melhora do M1cs6 em relação ao M0cs6 de 2% na tensão de primeira fissura, de 27% na tensão de pós-fissuração e de 120% na capacidade de absorção de energia

	Valores de 1 ^a fissura		Máximos valores pós-fissuração							
Misturas	_{Ocrb} CV (MPa) (%)	σ _{ub} (MPa)	CV (%)	δ _u (mm)	CV (%)	T * (kJ/m²)	CV (%)			
M1c	9.24 7.90	-	_	-	_	0,08	7,53			
M0c	11,70 5,67	-	-	-	-	0,10	9,74			
M1cs6	11,68 7,507	37,16	3,46	24,80	0,57	44,32	1,83			
M0cs6	11,99 10,851	29,04	4,20	21,39	6,04	20,85	8,60			

Tabela 4.9 – Resultados de tensão de primeira fissura (σ_{crb}) e tensão de pós-fissuração (σ_{ub}) obtidos por ensaio de flexão em 4 pontos para os compósitos M0cs6 e M1cs6 e suas respectivas matrizes .

 T^* – Valores de tenacidade calculados até a carga máxima para a matriz e calculados com um decaimento da carga de 50% da máxima para os compósitos.

Na Figura 4.11, pode-se verificar o comportamento de múltipla fissuração apresentado pelos compósitos M1cs6 e M0cs6. Para o compósito M1cs6, foi notado um número médio de 23 fissuras, com espaçamento médio de 1,2 cm, enquanto que o compósito M0cs6 apresentou um número médio de 31 fissuras com espaçamento médio de 0,7 cm



Figura 4.11 – Estado de múltiplas fissuras apresentado pelos compósitos após ensaio de flexão, (a) Compósito M1s6 e (b) Compósito M0s6.

4.5.2. Tração direta.

A Figura 4.12, mostra curvas típicas dos ensaios de tração direta para as misturas M0cs6 e M1cs6. Os dois compósitos mostraram comportamento semelhante à tração direta sendo que o M0s6 apresentou maiores tensões de primeira fissura (7,62 MPa) e de pós-fissuração (15,79 MPa) com uma mesma deflexão de 2 mm.



Figura 4.12 – Curvas típicas de tensão de tração direta x deslocamento para os compósitos M1cs6 e M0cs6.

Na Tabela 4.10, são apresentados valores médios de tensão de primeira fissura e tensão de pós-fissuração para os ensaios de tração direta realizado nas matrizes M1c e M0c e nos compósitos M1cs6 e M0cs6. A matriz M0c teve um acréscimo de 11% na tensão última em relação a M1c, demonstrando um melhor desempenho para a tração. Para o compósito M0cs6 foi obtido uma tensão de primeira fissura de 7,62 MPa e uma tensão ultima de 15,79 MPa que representa uma melhoria de 125% na tensão última quando comparada a sua matriz. Para o compósito M1as6, foi obtida uma tensão de primeira fissura e tensão última de 4,04 MPa e 10,48 MPa, respectivamente, que apresenta uma melhoria de 66% na tensão última quando comparada a sua matriz.

	Valores de 1	^a fissura	Máximos valores pós-fissuração						
Misturas	ocrt (MPa)	CV (%)	σ _{ut} (MPa)	CV (%)	δ _u (mm)	CV (%)			
M1c	6,30	28,07	-	-	-	-			
M0c	7,00	28,59	-	-	-	-			
M1cs6	4,04	12,86	10,48	9,09	1,92	12,59			
M0cs6	7,62	1,15	15,79	19,94	1,81	26,16			

Tabela 4.10 – Influência da substituição do Cimento Portland para os compósitos na tração direta

Comparando-se os compósitos, notou-se que o M0cs6 apresentou um acréscimo de 90% e 50% para as tensões de primeira fissura e última, respectivamente, comparada ao compósito M1cs6.

Calculou-se a tensão de aderência fibra-matriz, de forma indireta, a partir dos resultados obtidos no ensaio de tração direta, utilizando-se a equação 3, baseada no modelo ACK (AVESTON et al., 1974).

$$x' = \left(\frac{V_m}{V_f}\right) \frac{\sigma_{mu}r}{2\tau}$$
(3)

Onde V_f e V_m são a fração volumétrica de fibras e o volume da matriz, respectivamente, r é o diâmetro da fibra de sisal calculado por TOLEDO FILHO (1997), σ_{mu} é a resistência última da matriz e x' é a distância entre fissuras obtida nos compósitos fraturados.

Os compósitos M1cs6 e M0cs6 apresentaram uma tensão de aderência de 0,37 \pm 0,09 MPa, e 0.69 \pm 0.03 MPa, respectivamente. Essa diferença representa um aumento de 46% para compósito M0cs6 em relação ao M1cs6. Os valores médios de tensão de aderência obtidos neste trabalho são próximos aos valores máximos de tensão de adesão fibra-matriz encontrados por TOLEDO FILHO (1997). Isso pode ser explicado pois, no presente trabalho, de forma diferente à realizada por TOLEDO FILHO (1997), os compósitos foram moldados sob pressão o que pode ter aumentado a adesão fibra-matriz. O número de fissuras para o compósito M0cs6 foi de 19, com um espaçamento médio de 0,6 cm e para o compósito M1cs6 foi observado 13 fissuras com espaçamento médio de 0,9 cm, como mostrado na Figura 4.13.



Figura 4.13 – Comparação entre os compósitos após os ensaios de tração direta, (a) M1cs6 e (b) M0cs6

4.5.3. Análise microscópica

Nos ensaios de microscopia foram feitas análises na zona de fratura e na interface das fibras com a argamassa. As Figura 4.14(a) e (b) mostram imagens obtidas por microscopia óptica da zona de fratura dos compósitos M0cs6 e M1cs6, respectivamente. Verificou-se que, para o compósito M0cs6, estava ocorrendo o desfibramento das fibras devido ao ataque da alcalinidade nas mesmas, o que não era percebido no compósito M1cs6.



Figura 4.14 – Imagens obtidas por microscopia óptica: (a) Compósito M0cs6 e (b) Compósito M1cs6.

Foram observadas fibras extraídas do interior das matrizes M0cs6 e M1cs6 através de microscopia eletrônica de varredura para uma melhor avaliação do desfibramento das fibras. Para isso foi tomado o máximo de cuidado para que a degradação mecânica não alterasse a superfície das fibras durante a extração. Nas Figura 4.15(a) e (b) são mostradas as micrografias, confirmando que, para as fibras retiradas da matriz M0cs6, o ataque alcalino estava degradando as fibras, pois notou-se um maior desfibramento das mesmas.



(a) Figura 4.15 – Micrografia de fibras retiradas do interior do compósito. (a) M0cs6 e (b) M1cs6 metalizadas com prata.

(b)

Uma análise usando microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada nos compósitos M0cs6 e M1cs6, para uma possível identificação de migração de íons cálcio para o interior das fibras. A Figura 4.16 (a) e (b) mostra uma grande concentração de cálcio no interior da fibra de sisal (pontos 1,2 e 3 o que pode ser uma indicação de hidróxido de cálcio lixiviado.



Figura 4.16 – Microscopia eletrônica de varredura do compósito M0cs6 sem metalização: (a) visão geral das fibras de sisal no interior da matriz e (b) grande concentração de cálcio na fibra de sisal.

Para as amostras do compósito M0cs6 foram feitas além de analises de MEV, análises com EDS semiquantitativo (vide Figura 4.17), o que mostrou uma grande concentração de íons de cálcio, provenientes da matriz, no interior das fibras, circundando as fibrocélulas. Esse comportamento pode ser visualizado claramente na Figura 4.16(b).



Figura 4.17 – Análise de EDS na seção das fibras de sisal para o compósito M0cs6, onde (a) Ponto 1, (b) Ponto 2, (c) Ponto 3 e (d) Ponto 4.

Nos pontos 1, 2 e 3 (ver Figura 4.16(b)) é notado nas análises de EDS que além de C (carbono) e O (oxigênio), constituintes da fibra vegetal, verifica-se a presença de Ca (cálcio) e, em proporções menores, de Si (sílica), que são elementos provenientes da matriz de cimento. Na Tabela 4.11, estão mostradas as concentrações dos elementos químicos sobre a superfície da fibra obtida por análises de EDS.

Pontos	С	0	Na	Mg	Al	Si	S	К	Ca
01	17.66	48.24			0.45	2.90			30.74
02	20.96	44.51	0.87	0.22	0.24	2.86	0.23		30.10
03	16.28	46.94	0.64	0.13	0.22	2.41	0.23		33.15
04	33.85	41.68	0.83	0.19	0.37	4.08	0.27	0.25	18.49

Tabela 4.11 - Concentração (%) dos elementos nos pontos da fibras

Para as amostras do compósito M1cs6, não foi verificado a ocorrência de indícios de hidróxido de cálcio lixiviado no interior das fibras, como pode ser visto na Figura 4.18 (a) e (b), indicando que a matriz M1cs6 é realmente livre de Ca(OH)₂.



(a) (b)
Figura 4.18 – Microscopia eletrônica de varredura do compósito M1cs6 sem metalização:
(a) vista geral das fibras no interior da matriz e (b) detalhe da fibra de sisal.

4.6. Influência do tempo de cura dos compósitos

Durante todo o estudo os corpos-de-prova foram ensaiados com um tempo de cura de 28 dias. Desejou-se verificar o comportamento mecânico nos materiais com um maior tempo de cura. Para isso foram utilizados apenas os compósitos que possuíam matriz livre de Ca(OH)₂, denominado de M1cs6. Foram realizados ensaios de tração na flexão em 4 pontos e tração direta nos compósitos M1cs6 com 180 dias.

4.6.1. Tração na flexão em quatro pontos

A Figura 4.19 mostra as curvas típicas de tração na flexão x deflexão para o compósito M1cs6 com 28 e 180 dias. Nota-se um comportamento similar para as duas curvas com uma pequena melhora na tensão de pós-fissuração (10%) do compósito curado por 180 dias em relação ao curado por 28 dias. Isso pode indicar que não houve degradação da fibra de sisal durante esses 180 dias.



Figura 4.19 – Curvas típicas de tensão na flexão x deslocamento para o compósito M1cs6 com diferentes tempos de cura.

Na Tabela 4.12 são apresentados os resultados de tensão de primeira fissura, tensão de pós-fissuração, deslocamento, tenacidade e respectivos coeficientes de variação para os ensaios de tração na flexão realizados no compósito M1cs6. Foram verificados acréscimos de tensão de primeira fissura, tensão de pós-fissuração e tenacidade de 3%, 10% e 26%, respectivamente, quando comparados os tempos de cura de 180 com 28 dias.

Tabela 4.12 – Resultados de tensão de primeira fissura (σ_{crb}), tensão de pós-fissuração (σ_{ub}), deslocamento (δ_u) e tenacidade (T) e respectivos coeficientes de variação (CV) obtidos por ensaio de flexão em 4 pontos para os compósitos M1cs6.

			Máximos valores pós-fissuração							
Misturas	Tempo de cura	Nº de camadas	σcrb	CV	Jub	CV	δu	CV	Т	CV
	(dias)	(Unid.)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(mm)	(%)	(kJ/m ²)	(%)
M1cs6	28	5	11,68	7,507	37,16	3,46	24,80	0,57	44,32	1,83
M1cs6	180	5	11,99	10,85	40,77	6,35	22,35	1,87	56,00	2,53

4.6.2. Tração direta

A Figura 4.20 mostra as curvas típicas de tensão de tração direta x deslocamento para compósitos M1cs6 curados por 28 e 180 dias. Notou-se que o compósito curado por 180 dias apresentou maior rigidez após a formação da primeira fissura levando-o à ruptura com um menor deslocamento (1 mm) do que o compósito curado aos 28 dias (2 mm).



Figura 4.20 – Curvas típicas de tensão de tração x deslocamento para compósitos M1cs6 curados por 28 e 180 dias.

A Tabela 4.13 apresenta os resultados de tensão de primeira fissura (σ_{crt}), tensão de pós-fissuração (σ_{ut}), deslocamento (δ_u) e respectivos coeficientes de variação (CV) obtidos por ensaio de tração direta para os compósitos M1cs6. Notou-se um aumento de tensão de primeira fissura e tensão pós-fissuração de 69% e 53%, respectivamente, quando comparados os tempos de cura de 180 ao de 28 dias.

Tabela 4.13 – Resultados de tensão de primeira fissura (σ_{crt}), tensão de pós-fissuração (σ_{ut}), deslocamento (δ_u) e respectivos coeficientes de variação (CV) obtidos por ensaio de flexão em 4 pontos para os compósitos M1cs6.

		V	alores de 1	^a fissura	Máx	Máximos valores pós-fissuração			
Misturas	Tempo de cura	Nº de camadas	O crt	CV	Out	CV	δu	CV	
	(dias)	(Unid.)	(IVIPa)	(%)	(IVIPa)	(%)	(mm)	(%)	
M1cs6	28	5	4,04	12,86	10,48	9,09	1,92	12,59	
M1cs6	180	5	6,82	1,83	16,09	2,02	0,91	17,09	

Na Figura 4.21, são mostrados os corpos-de-prova curados por 180 dias após os ensaios de tração direta e flexão, respectivamente. O compósito curado por 28 dias apresentou uma formação de 13 fissuras, enquanto que o compósito curado por 180 dias apresentou 5 fissuras para os ensaios de tração direta. Para os compósitos ensaiados à flexão, o número de fissuras foi reduzido de 23 (28 dias de cura) para 11(180 dias de cura).



Figura 4.21 – Compósitos multi-fissurados (a) Submetidos aos ensaios de tração direta e (b) Submetidos aos ensaios de flexão.

4.7. Uso do cordão de sisal como elemento de reforço

Foram realizados ensaios de flexão em 4 pontos em compósitos reforçados por cordão e filamento.

4.7.1. Tração na flexão em quatro pontos

Na Figura 4.22, estão apresentadas as curvas para as duas diferentes formas de distribuições de fibras. Pode-se notar que a tensão de primeira fissura foi praticamente igual nas duas distribuições (em torno de 11 MPa), o que era de se esperar, pois até esse estágio apenas a matriz está sendo solicitada. Quando as fibras foram solicitadas verificou-se a maior diferença entre os dois tipos de reforço.



Figura 4.22 – Curvas típicas tensão de tração x deflexão para o compósito reforçado por cordão e filamento ($V_f = 6\%$).

Na Tabela 4.14 são apresentados os resultados de tensão de primeira fissura, tensão pós-fissuração, tenacidade e correspondentes valores de coeficiente de variação. Comparando os resultados obtidos para o compósito reforçado por filamentos com o reforçado por cordão notou-se um incremento de tensão de primeira fissura, tensão pósfissuração e tenacidade de 2%, 137% e 300%, respectivamente.

Tabela 4.14 – Resultados de tensão de primeira fissura (σ_{crt}), tensão de pós-fissuração (σ_{ut}) e respectivos coeficientes de variação (CV) obtidos por ensaio de flexão em 4 pontos para os compósitos reforçados por cordão e filamento.

		Valores de 1 ^a fissura		Ma	Máximos valores pós-fissuração				
Misturas	Distribuição	ocrb	CV	σ _{ub}	CV	Т *	CV		
		(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(kJ/m²)	(%)		
M1bs6	cordão	11,22	18,85	8,00	10,00	4,05	40,16		
M1bs6	filamento	11,45	9,42	19,45	13,60	16,29	17,10		

T* A tenacidade foi calculados ate uma deflexão de 20 mm.

Os corpos-de-prova reforçados com cordões apresentaram um modo de fratura caracterizado pela formação e localização de uma ou no máximo, duas fissuras, as quais levaram o colapso dos compósitos (vide Figura 4.23). Esse comportamento foi bem diferente comparado ao modo de múltiplas fissuras apresentado pelos compósitos com fibras em filamentos





O pior desempenho dos compósitos reforçados com cordões deu-se pela diminuição da área específica de contato fibra-matriz. Ao serem trocados os 40 filamentos dispersos (Figura 4.24(a)) pelos 40 filamentos cochados, formando o cordão (Figura

4.24(b)), reduziu-se a área de contato fibra-matriz em mais de 80%, ou seja, com uma área menor de contato fibra-matriz, o compósito não teve a mesma capacidade de transferência de esforços.



Figura 4.24 – (a) Reforço em filamentos de fibras e (b) Reforço em cordão. Amostras sem metalização.

Na Figura 4.25, pode-se ver um cálculo simplificado do que aconteceu em relação à área da interface fibra-matriz. Um filamento de fibra foi analisado, sendo que, para tornar o cálculo mais simples, adotou-se a fibra como se tivesse seção circular, o que não é exato, pois as fibras têm um formato de seção bastante irregular, como mostrado na Figura 4.24(a).



Figura 4.25- Relação entre a área de um filamento de fibra e o cordão.

Com relação ao cordão, também foi assumida seção circular, o que é próximo da realidade (Figura 4.24(b)., sendo que esse diâmetro foi obtido com a ajuda de um paquímetro. Foram feitas várias medições ao longo do comprimento do cordão, sendo adotada a média de tais medições.

Para essa comparação, adotou-se um diâmetro para o filamento de 0,2 mm e para o cordão um diâmetro de 1,5 mm. A área calculada da seção do cordão resultou em um valor de 1,76 mm² e sua superfície lateral apresentou uma circunferência de 4,71 mm. Já no caso dos 40 filamentos dispersos, tem-se um somatório da medida da circunferência de 29,7 mm, ou seja, um valor 75% maior que a circunferência dos cordões e, assim, uma maior área de transferência de esforços fibra-matriz.

Em uma vista lateral (vide Figura 4.26(a)), novamente é mostrado que a área lateral do cordão envolvido pela matriz é bastante inferior, uma vez que somente as fibras externas entram em contato com a matriz, diferentemente da distribuição em filamentos, onde a matriz envolve completamente cada filamento de fibra (vide Figura 4.26(b)).



Figura 4.26 – Vista lateral de fibras no interior da matriz (a) Distribuída em cordão (amostra sem metalização) e (b) Distribuída em filamentos (metalizada com ouro).

Concluiu-se que a disposição das fibras em filamentos proporciona um melhor desempenho para o compósito, sendo utilizada no restante do estudo.

4.8. Comportamento na flexão das placas planas e corrugadas

Verificou-se o comportamento de placas planas e corrugadas, nas quais desejouse observar quais benefícios em termos de capacidade de carga a corrugação traria para o compósito com a otimização final denominado de M1cs6, com pressão de 3 MPa e 5 camadas de fibras em filamentos. Para esse fim, foram realizados ensaios de flexão em três pontos.

Curvas carga-deflexão para placas planas são apresentadas na Figura 4.27, onde se encontram as quatro medições feitas em quatro pontos diferentes da placa (vide Figura 3.32 (b)). Os resultados mostram que, ao longo da linha central, os deslocamentos medidos pelos LVDT's 10 e 11 foram parecidos (estão superpostos na Figura 4.27). Ficou claro, também, a simetria entre os deslocamentos em pontos afastados 10 cm da linha central, medidos pelos LVDT's 9 e 12 (também superpostos na Figura 4.27). Obteve-se através do ensaio de flexão em 3 pontos resultados de carga de primeira fissura de 1,24 \pm 0,06 kN e carga de pós-fissuração de 3,9 \pm 0,21 kN, o que representa um acréscimo de 200%.



Figura 4.27 – Curvas carga-deflexão obtidas a partir de ensaio de flexão em 3 pontos para placas planas.

Na Figura 4.28, pode-se ver a representação da deflexão no estado final de carregamento nas placas planas. O ensaio era interrompido quando a deflexão atingiu 45 mm.



Figura 4.28 – Configuração final do ensaio de flexão em três pontos.

A forma de ruptura das placas caracterizou-se por múltiplas fissuras que se localizavam na região central da parte tracionada, sendo que uma fissura maior ao longo do eixo do carregamento foi observado (vide Figura 4.29).



Figura 4.29 – Distribuição típica de fissuras nas placas planas (a) Foto sem tratamento de imageml e (b) foto com tratamento de imagem para evidenciar as microfissuras.

Curvas carga-deflexão para placas corrugadas são apresentadas na Figura 4.30. Assim como no caso das placas planas, os resultados mostraram que, ao longo da linha central, os deslocamentos foram semelhantes. Ficou clara, também, a simetria entre os deslocamentos em pontos afastados 10 cm da linha central.

Obteve-se, para o compósito corrugado, através do ensaio de flexão em 3 pontos valores de carga de primeira fissura de 6,81 \pm 2 kN e de carga de pós-fissuração de 10,19 \pm 2,37 kN.



Figura 4.30 - Curva carga-deflexão. Placas onduladas.

Na Figura 4.31, são mostrados o estado do corpo-de-prova ao final do ensaio e o aparecimento de fissuras na parte inferior do mesmo. Os ensaios foram interrompidos quando se atingia uma deformação de 40 mm



Figura 4.31 – (a)Estado final do corpo-de-prova rompido e (b)Aparecimento de várias fissuras na parte inferior do corpo de prova.

A figura Figura 4.32 apresenta as curvas carga x deflexão dos compósitos planos e corrugados. Observa-se que as corrugações melhoraram em 150% a capacidade de carga do produto, diminuindo a deflexão em 150% devido as ondulações terem aumentado a rigidez das placas. Nota-se que mesmo para deflexões de até 25 mm o compósito corrugado apresenta capacidade de carga superior ao compósito plano.



Figura 4.32 – Curvas carga x deflexão obtidas através de ensaio de flexão em 3 pontos para compósitos lisos e corrugados.

4.9. Determinação das propriedades físicas dos materiais

4.9.1. Massa específica, índice de vazios, absorção por imersão e estanqueidade.

Na Tabela 4.15 estão apresentados os resultados de absorção por imersão, massa específica, índice de vazios e massa específica.

Misturas	Absorção por	CV	Indice de	CV	Massa específica	CV
iviisturas	imersão (%)	(%)	vazios (%)	(%)	seca (g/cm ³)	(%)
M1bs6 cordão	3,73	2,24	7,52	1,95	1,86	0,80
M1bs8	7,55	13,82	13,29	11,96	1,80	5,59
M1bs6	8,07	1,61	14,97	2,06	1,76	1,99
M1c	3,88	7,26	8,31	7,35	2,14	0,26
M0c	3,52	5,13	8,17	5,15	2,32	0,03
M1cs6	6,92	20,51	13,52	18,54	1,96	1,85
M0cs6	6,47	2,75	13,32	2,13	2,06	0,67

Tabela 4.15 – Valores médios de absorção por imersão, índice de vazios e massa específica.

Numa primeira análise foram comparados os resultados obtidos para os compósitos produzidos a partir da matriz M1a, que tiveram a finalidade de determinar o volume de fibras (6% e 8%) e a melhor distribuição do reforço (filamentos ou cordão). Para os valores correspondentes a absorção por imersão e índice de vazios, notou-se que o compósito reforçado com filamentos apresentou um aumento da ordem de 102% e 77% em relação aos reforçados pelo cordão, indicando que a distribuição em filamentos proporciona ao compósito uma maior porosidade. Comparando os compósitos com frações volumetrias diferentes (M1bs8 e M1bs6) notou-se valores próximos para os resultados de absorção e índices de vazios. Com relação à massa específica, notou-se valores da ordem de 1,80 g/cm³ para os compósitos fabricados com a matriz M1b.

Comparando-se as matrizes M1c e M0c com seus respectivos compósitos M1cs6 e M0cs6, notou-se que a adição de fibras influenciou consideravelmente todos as propriedades analisadas: aumentos de 80 % e 63 % para absorção por imersão e índice de vazios, respectivamente, mostrando o aumento na porosidade gerado pelas fibras. Com relação aos valores de massa específica, notou-se um decréscimo de 10 % dos compósitos M1cs6 e M0cs6 em relação as suas respectivas matrizes.

Para o ensaio de impermeabilidade, como foi comentado no Capítulo 3, adotou-se uma telha canal comercializada na cidade do Rio de Janeiro como referência para os ensaios. Na primeira verificação do nível de água, feita 24 horas após o início do ensaio, notou-se que para as amostras do compósito, o nível de água não variou, já para a amostra cerâmica houve uma diminuição do nível de cerca de 2 cm, sendo que não era verificado nenhuma mancha ou vazamento na parte inferior da amostra. Após um intervalo de 48 horas uma nova verificação foi feita, sendo que o nível de água para a amostra de cerâmica abaixou mais 2 cm, enquanto que nas amostras do compósito houve um desnível de aproximadamente 2 mm, sendo que não era verificação foi feita. Na amostra cerâmica, todo o volume de água tinha sido absorvida pela amostra, não sendo notado manchas na em sua superfície inferior. Para as amostras do compósito M1cs6 verificouse um desnível de 1,5 \pm 0,2 cm. Na Figura 4.33 (a) e (b), é mostrado o ensaio em seu término, onde se é verificado o desnível nos compósitos e em (b) a face inferior do corpo-



Figura 4.33 – (a) Desnível após 7 dias e (b)Superfície inferior da amostra do compósito sem aparecimento de nenhuma mancha.

4.9.2. Determinação da retração por secagem

A Figura 4.34, mostra as curvas de retração x tempo das matrizes M0c e M1c até 60 dias. Aos 60 dias a matriz M1c retraiu 600 $\mu\epsilon$ enquanto que a matriz M0c retraiu 650 $\mu\epsilon$, o que representa um aumento de 8%.



Figura 4.34 – Curvas médias de retração por secagem x tempo das matrizes: (a) M1c e (b) M0c.

Na Figura 4.35, é mostrado a curva retração x tempo para o compósito M1cs6. Foi verificado que a inclusão de fibras de sisal na matriz cimentícea (M1c) aumentou a retração em 39%. A retração de matrizes cimentíceas está relacionada principalmente a porosidade e ao tamanho, forma e continuidade do sistema capilar na pasta de cimento hidratada. A adição de fibras vegetais aumenta a porosidade do compósito, contribuindo assim para um aumento na retração. A natureza porosa da fibra de sisal no seu nível micro-estrutural aliada a sua alta capacidade de absorção de água criou mais caminhos de transporte de água nos compósitos contribuindo assim para um aumento da retração.

Com relação à direção da medida da retração, paralela e perpendicular as fibras, não se notou diferença considerável entre as duas leituras como mostrado na Figura 4.34.


Figura 4.35 – Curvas médias de retração por secagem x tempo do compósito M1cs6.

5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

5.1. Conclusões

A utilização de argilas calcinadas (metacaulinita e tijolo moído) como substituição parcial do cimento em teores de 50% se mostraram eficientes para o consumo do hidróxido de cálcio presente na matriz cimentícea, o qual se verificou pelas análise de microscopia. Alem disso, essa substituição resultou em um incremento na resistência à compressão da matriz de cerca de 30%, na resistência à flexão dos compósitos, em cerca de 27% e um grande acréscimo de tenacidade de cerca de 120%, produzindo materiais de baixo custo, com baixa emissão de CO₂ e consumo de energia que são altamente apropriados para uma construção sustentável.

Durante o desenvolvimento dos laminados, foram verificadas algumas características tais como: pressão de moldagem, fração volumétrica de fibras e número de camadas. Foi concluído como características "ótimas" para a produção dos laminados deste trabalho a pressão de moldagem de 3MPa, a fração volumétrica de 6% de fibras e o arranjo das fibras em 5 camadas. Com essa otimização chegou-se a laminados que apresentaram resistência a flexão máxima da ordem de 40MPa e resistência à tração direta da ordem de 16MPa, mostrando seu alto potencial.

O comportamento à tração dos compósitos foi governado pela matriz até o surgimento da primeira fissura. Após a fissuração há uma transferência de carga para as fibras. O comportamento pós-fissuração foi caracterizado pelo aparecimento de múltiplas fissuras com um aumento na resistência última do compósito.

Para o comportamento a flexão dos compósitos verificou-se que a adição de fibras não estava influenciando a carga de primeira fissura, governada apenas pela matriz. Após a fissuração, os compósitos apresentaram um aumento de 3 a 3,5 vezes na resistência

ultima dos laminados com deslocamentos da ordem de 25 mm quando a carga máxima era atingida.

O reforço dos compósitos em forma de filamentos individuais apresentou comportamento mecânico na flexão superior quando comparado com o reforço distribuído em cordão. Foram observados valores de resistência ultima de 20MPa e 8 MPa, para os reforços em forma de filamentos e cordões, respectivamente.

A corrugação dos compósitos resultou em um aumento na carga última, resultante de ensaios de flexão em 3 pontos, de 10,19 kN, representando um aumento de 150% em relação aos compósitos planos.

A retração observada para as matrizes estudadas foi de 600 $\mu\epsilon$ para a matriz de referencia (M0c) e 650 $\mu\epsilon$ para a matriz com substituição parcial do cimento por argila calcinada (M1c). Quando se reforçou a matriz M1c por fibras longas de sisal alinhadas unidirecionalmente verificou-se uma retração em torno de 900 $\mu\epsilon$, o que corresponde a um aumento de 40% em relação a matriz.

O estudo realizado mostrou a enorme potencialidade do uso de fibras longas e alinhadas de sisal reforçando laminados produzidos com matrizes a base de cimento para aplicações semi-estrutural e estrutural.

Nos ensaios de estanqueidade, notou-se que o compósito final M1cs6 apresentou uma ótima impermeabilidade comparada a telhas cerâmicas.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Ainda devem ser feitos alguns estudos para que estes compósitos reforçados com fibras de sisal possam ser utilizados como elementos construtivos confiáveis. Mesmo sendo mostrado seu ótimo comportamento mecânico é necessário um maior incentivo no estudo da durabilidade desses materiais. Entre alguns itens que são indispensáveis para dar prosseguimento nas pesquisas futuras podemos citar os seguintes:

Avaliar a durabilidade desses compósitos em condições de envelhecimento natural e envelhecimento acelerado.

Avaliar os benefícios em comportamentos mecânicos e de durabilidade com utilização de tratamentos químicos nas fibras para que as mesmas possam ser protegidas contra os agentes nocivos das reações do cimento e impedir a absorção de água pelas mesmas.

Avaliar a distribuição das fibras no interior da matriz em forma de tecido ou malhas.

Desenvolvimento de um processo industrial que venha a produzir esse compósito.

Avaliar através de ensaios de fluência na tração ou flexão, os critérios de abertura máxima de fissuras quando esse material for submetido a ambientes agressivos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5641 Chapas estruturais de cimento amianto: determinação da resistência à flexão, 1977.
- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 5642, Telha de Fibrocimento Verificação da Impermeabilidade, 1993.
- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215 Cimento Portland Determinação da resistência à compressão, 1996.
- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 8522, Concreto Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão deformação, 1995.
- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 9778, Argamassa e Concreto Endurecido - Determinação da Absorção de Água por Imersão – índice de Vazios e Massa Específica, 1987.
- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653 Materiais Pozolânicos Especificação, 1992.
- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 13276 Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 1994.
- ALMEIDA, C., TAVARES, M. "Fiocruz estima em 50 mil o número de trabalhadores expostos ao amianto" *O GLOBO*, Rio de Janeiro, No 26.015, 2004.
- ALVARADO, C. A J., LÓPEZ, E. P. R., "Uso de fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en concreto". *Ingeniarías* v. VII, No. 22, 2004.

- AMICO S. C., COSTA, T. H. S., CARRERA, L. C. *et al.* "Caracterização de fibras de sisal da região nordeste do Brasil", *Materials Science*, v. 2, pp 33-41, 2001.
- ANJOS. M A. S. "Compósitos à base de cimento reforçado com polpa celulósica de bambu. Parte II: Uso de resíduos cerâmicos na matriz" *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.2, pp.346-349, 2003.
- AZIZ M. A., PARAMASIVAM P. and LEE S. L., "Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction". *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, V. 3, No 2, Singapura, 1981.
- BENTUR, A., MINDESS, S. Fibre reinforced cementitious composites, 1990, *Elsevier Science Publishers* LTD, U. K, 1990..
- BLEDZKI, A. K.,. GASSAN, J. "Composites reinforced with cellulose based fibres" *Progress in polymer science*, V. 24, pp 221-274, 1999.
- BISANDA, E. T. N., "The effect of alkali treatment on the adhesion characteristics of sisal fibres". *Applied Composite Materials* V 7, pp 331–339, 2000.
- COSTA, C. E. S., "Imobilização do Resíduo da Fabricação do Sulfato de Alumínio em Matrizes Cerâmicas Parte 1: Comportamento Mecânico" NOCMAT, Novembro, 2004.
- DWECK, J.,BUCHLER, P. M., "Hydration of a Portand cement blended with calcium carbnate" *Thermochimica acta*, n 346, pp. 105-113, 2000.
- EICHHORN, S. J. et al., "Review Current international research into cellulosic fibres and composites" Journal of Materials Science, v. 36, pp. 2107 2131, 2001.
- FISHER, A. K., BULLEN, F., "Permeability and sorptivity as durability indicators for cellulose fibre reinforced concrete piper". *Asic-Pacific Specialty Conference on Fibre Reinforced Concrete.* Singapore. 1997.

- FORMAGINI, S., "Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho". Tese de doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de janeiro, 2005.
- GALE, D.M. "Synthetic fibers in thin-section cement products: a review of the state of the art. In: ACI SP146 THIN REINFORCED CONCRETE PRODUCTS AND SYSTEMS, Porto Rico, 1992, Edited by P. Balaguru, Detroit, p 160, 1994.
- GONÇALVES, J. P., "Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental e contendo argila calcinada e areia artificial", Tese de doutorado PEC/COPPE/UFRJ, Rio de janeiro, 2005.
- GONÇALVES, J. P., "Desenvolvimento de materiais utilizando argila calcinada como substitutivo parcial do cimento portland". Seminário de Tese de Doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- JONES, R. M., "Mechanics of Composite Materials", McGraw-Hill Company, 1975.
- LIMA, P. R. L., "Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal". Tese de doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de janeiro, 2004.
- LI V. C. et al "Interface Tailoring for Strain-Hardening Polyvinyl Alcohol-Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC)" *ACI Materials Journal*, V. 99, No. 5, September-October 2002.
- MINDESS, S. and BENTURT A. "Technical notes: The fracture of wood fibre reinforced cement" The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, V. 4, No 4, November 1982.
- NAAMAN, A. E. *Ferrocement & laminates cementitious composites*, Techno Press 3000, Ann Arbor, 2000, 372p.
- NAAMAN, A. E., "Fibre Reinforced for Concret: LookingBack, Looking Ahear," Ann Arbor, USA, *RILEM 2000*. pp 65 82.

- NÓBREGA A. F., B. FILHO, A. C., S. JUNIOR, A. S. et al., "Desenvolvimento de Ligantes à Base de Resíduos de Cerâmica Vermelha Moída e Cal" *NOCMAT*, Novembro, 2004.
- PERSSON, H.; SKARENDAHL, "A. Sisal-fibre concrete for roofing sheets and other purposes", In: APPROPRIATE INDUSTRIAL TECHNIQUE FOR CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS. *Monographs on appropriate industrial technique*, N.12, 1980, United Nations, 1980.
- ROY D. M., ARJUNAN P, SILSBEE M.R., "Effect of silica fume, metakaolin, and lowcalcium fly ash on chemical resistance of concrete". *Cement and Concrete Research*, v. 31, pp.1809–1813, 2001.
- RODRÍGUEZ-CAMACHO, R. E., URIBE-AFIF R. "Importance of using the natural pozzolans on concrete durability" *Cement and Concrete Research* v. 32, pp. 1851–1858, 2002.
- SAVASTANO, H; "Zona de transição entre fibras e pastas de cimento portland: caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas dos compósitos". Tese de doutorado. Departamento de Engenharia de Construção Civil/EPUSP. São Paulo, 1992.
- SAVASTANO Jr. H., AGOPYAN, V., NOLASCO A. M., PIMENTEL, L., "Plant fibre reinforced cement components for roofing" *Construction and Building Materials* V.13 pp. 433-438, 1999.
- SAVASTANO Jr., H. WARDEN, P. G., COUTTS, R. S. P. "Mechanically pulped sisal as reinforcement in cementitious matrices." materials. *Cement and concrete composites*, v. 25, 2003. pp.389-397.
- SILVA, F. A., "Tenacidade de materiais compósitos não convencionais". Tese de Mestrado PUC, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2004.
- SILVA, R. V., Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais. Ciência e Engenharia de Materiais/USP, São Carlos, 2003.

- SILVA, A. C. "Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose". Tese de mestrado. Departamento de Engenharia de Construção Civil/EPUSP. – São Paulo, 2002.
- SILVA, O. R. R., BELTRÃO, N. E. M "*O agronegócio do Sisal no Brasil" Brasília*: Embrapa-SPI; Campina Grande: Embrapa-CNPA, 1999.
- STUDINKA J. B., "Asbestos substitution in the fibre cement industry" *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, V. 11, No 2 May 1989.
- SWIFT D.G. and SMITH R.B.L. "The flexural strength of cement-based composites using low modulus (sisal) fibers". *Composites*; pp. 145-148, 1979.
- TOLÊDO FILHO, R. D., Natural fibre reinforced mortar composites: experimental characterisation, 1997. Tese de Doutorado em Engenharia DECPUC-Rio / DEC Imperial College, Rio de Janeiro, 1997.
- TOLÊDO FILHO, R. D., SCRIVENER K., ENGLAND G. L. et al., "Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites" Cement & Concrete Composites, n. 22, pp 127-143, 2000.
- VEDALAKSHMI, R., SUNDARA RAJ, A., SRINIVASAN, S. et al.,"Quantification of hydrated cement products of blended cements products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique". *Thermochimica Acta*, n. 407, pp. 49-60, 2003.
- VELASCO, R. V.; FARAGE, M. C. R.; GONÇALVES, J. Pe et al. "Desenvolvimento e caracterização mecânica de matrizes a base de cimento para a produção de laminados de baixo impacto ambiental". *Jornadas Sud-Americanas de Ingenieria Estructural*. Maio, 2004.

APÊNDICE

9

8

Tensão de Tração Direta (MPa) N & P G O A

1

0

0.0

1. Determinação da pressão de moldagem ótima.

a. Resultados de tração direta



M1as6 com 2MPa

M1as6 com 3MPa

0.5

3MPa

1.0 1.5 Deslocamento (mm)

- CP 01

CP 02

2.0

2.5



M1as6 com 4MPa

b. Resultados de flexão





M1as6 sem pressão

M1as6 com 2Mpa



M1as6 com 2MPa







M1a sem pressão (referencia).





M1a com 3MPa

M1a com 4MPa

2. Determinação do volume de fibras e da distribuição (cordão e filamentos).





a. Resultados de flexão.



M1bs6

M1bs8



M1bs6(cordão)

3. Determinação do número "ótimo" de camadas de fibras, a substituição do cimento e o tempo de cura.



a. Resultados de tração direta



M1cs6 em 3 camadas aos 28 dias de cura

M1cs6 em 5 camadas aos 28 dias



M0cs6 em 5 camadas aos 28 dias



M1cs6 em 5 camadas aos 180 dias de cura

b. Resultados de flexão



M1cs6 em 3 camadas após um tempo de cura de 28 dias.

M1cs6 em 5 camadas após um tempo de cura de 28 dias.



M0es6 em 5 camadas após um tempo de cura de 28 dias.



M1cs6 em 5 camadas após um tempo de cura de 180 dias.

c. Comportamento na flexão das placas planas e corrugadas.



Placa plana

Placa ondulada



d. Ensaios de compressão













M1c 60d

M1cs6 60d

Livros Grátis

(<u>http://www.livrosgratis.com.br</u>)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração Baixar livros de Agronomia Baixar livros de Arquitetura Baixar livros de Artes Baixar livros de Astronomia Baixar livros de Biologia Geral Baixar livros de Ciência da Computação Baixar livros de Ciência da Informação Baixar livros de Ciência Política Baixar livros de Ciências da Saúde Baixar livros de Comunicação Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE Baixar livros de Defesa civil Baixar livros de Direito Baixar livros de Direitos humanos Baixar livros de Economia Baixar livros de Economia Doméstica Baixar livros de Educação Baixar livros de Educação - Trânsito Baixar livros de Educação Física Baixar livros de Engenharia Aeroespacial Baixar livros de Farmácia Baixar livros de Filosofia Baixar livros de Física Baixar livros de Geociências Baixar livros de Geografia Baixar livros de História Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura Baixar livros de Literatura de Cordel Baixar livros de Literatura Infantil Baixar livros de Matemática Baixar livros de Medicina Baixar livros de Medicina Veterinária Baixar livros de Meio Ambiente Baixar livros de Meteorologia Baixar Monografias e TCC Baixar livros Multidisciplinar Baixar livros de Música Baixar livros de Psicologia Baixar livros de Química Baixar livros de Saúde Coletiva Baixar livros de Servico Social Baixar livros de Sociologia Baixar livros de Teologia Baixar livros de Trabalho Baixar livros de Turismo