



DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS SANDUÍCHES DE
CONCRETO COM NÚCLEO LEVE E FACES EM LAMINADOS
REFORÇADOS COM FIBRAS LONGAS DE SISAL

M'hamed Yassin Rajiv da Gloria

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Civil, COPPE, da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Mestre
em Engenharia Civil.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

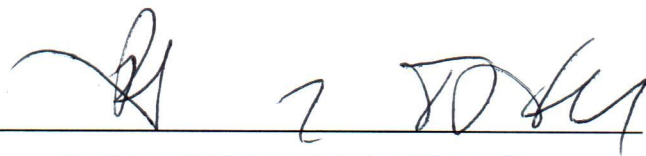
Rio de Janeiro
Outubro de 2015

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS SANDUÍCHES DE
CONCRETO COM NÚCLEO LEVE E FACES EM LAMINADOS
REFORÇADOS COM FIBRAS LONGAS DE SISAL

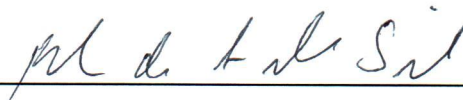
M'hamed Yassin Rajiv da Gloria

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

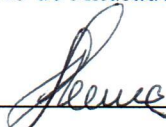
Examinada por:



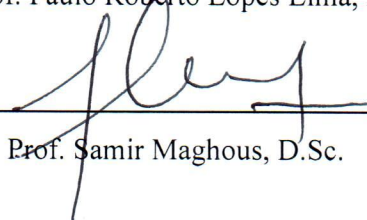
Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D.Sc.



Prof. Flávio de Andrade Silva, D.Sc.



Prof. Paulo Roberto Lopes Lima, D.Sc.



Prof. Samir Maghous, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ-BRASIL

OUTUBRO DE 2015

da Gloria, M'hamed Yassin Rajiv

Desenvolvimento e caracterização de painéis sanduíches de concreto com núcleo leve e faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal/ M'hamed Yassin Rajiv da Gloria.

– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

XVIII, 115 p.: il.; 29,7 cm

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 110-115.

1. Compósitos cimento - madeira 2. Fibras longas de Sisal 3. Painéis sanduíches I. Toledo Filho, Romildo Dias. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

À minha avó e ao Lucien Sogansa, no céu,
mas sempre presentes no meu cotidiano (*in memoriam*).

Agradecimentos

Louvado seja Deus, Senhor do Universo, o Clementíssimo, o Misericordiosíssimo.

Je te rends hommage maman, pour ton amour, tes prières, ton appui indéfectible pendant chacune des étapes de ma vie. Cette victoire est l'aboutissement de tes efforts. A toi aussi je rends un vibrant hommage cher papa, pour tout ce que tu m'as enseigné, ainsi que les sacrifices consentis afin que je sois une valeur sûre.

A mon frère de coeur, de sang et d'armes Mahaffouz, pour l'immensité que tu représentes pour moi; à ma mère Leilath, mes frères John, Salam, mes soeurs Osnath, Kadidjath. Une profonde reconnaissance à l'endroit de mon cher oncle Joël, pour tous les efforts qu'il a consentis pour que je réalise mon rêve brésilien, ainsi qu'à maman Cia pour l'inestimable soutien et affection. A messieurs Gonçalves et Yamadjako, madame Gounongbé, Aurore, ainsi que mes tantes et oncles je vous dis merci.

Ao meu carismático orientador Romildo pela honra que me fez aceitando me orientar. Você entendeu em poucas palavras meus motivos, e soube me direcionar com muito profissionalismo, didática e sabedoria ao longo da minha pesquisa.

Este sonho brasileiro foi possível graças à contribuição muito especial da professora Isabel Aguiar, quem me ensinou com muita destreza os fundamentos da língua portuguesa. Agradeço também aos meus professores Maxime e Hervé, meus amigos Gildas, Bobby, Arthur, Jean Paul e Estone, principais atores desta conquista .

Aos meus anjos Djamiath, Karintha e Hadjarath que iluminam há anos meu cotidiano. Aos meus queridos amigos do Benin, Sixte, Cédric, Jude, Kola, Adam,

Yannick, Francis, Kadir, Ouahid, Ulysse, Joël, Malick, Sylvie, Sakinath, Esther, Chahi, Villejiquel, Michèle. Agradeço também à minha família africana no Brasil, Lucien, Fabrice, Francisco, Giresse, Samir, Zio, Bernard, Loïc, Caito, Selma, Rebecca, Thaissi, Mwana, Bénédicte e Camelle.

Aos professores Dudu, Guilherme, assim como os professores Flávio, Paulo Roberto, Samir e Helcio pela contribuição ao perfeiçoamento deste trabalho.

Meus agradecimentos à minha grande amiga Daniele Paiva, assim como à Daniele Justo cuja implicação no meu trabalho foi fantástica, ainda bem que encontrei vocês. À Renata e Anne que foram minhas luzes ao longo desse ano 2015, agradeço pela atenção, a preocupação e o carinho. À dupla mágica do NUMATS Mayara e Carol, presentes desde do começo do meu mestrado, obrigado pela amizade e o apoio. Ao Otávio, Samantha, Saulo e Dimas que facilitaram minha inserção no laboratório, à Cristina Frazão quem abriu o caminho para as pesquisas do meu trabalho.

Agradeço também ao Alfredo, Karyne, Mostafa, Tamara, Tina, Nathália, Aline, Bruna e Adriana pela ajuda, a força e a energia. Ao Elton, Gonzalo, Vitor, Rodolfo, Fabrício, Raphael, Barthos, Oscar, Mazza, Mariana Carvalho, Nathália da Silva, Lívia, Iolanda, Laila, Dianelys, Camila, Katelyn, Clarice, Carol, Vivian e Nina.

Aos funcionarios do NUMATS e LABEST, Sandra, Luzidelle, Paulinho (*in memoriam*), Carmen, Márcia, Flávio. Devo agradecer também aos técnicos Adailton, Jean, Clodoaldo, Alessandro, Thalès, Renan, Rosângela, Márcio, Anderson, Sr Anísio, pela participação muito especial no desenvolvimento da minha pesquisa.

Meus agradecimentos à empresa Madeirama que disponibilizou a serragem utilizada nesta pesquisa, e ao Danilo quem me ajudou com muito profissionalismo ao longo dos ensaios de condutividade térmica.

Ao CNPq através do programa PEC PG, pela oportunidade de estudo e o apoio financeiro.

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 PAINÉIS SANDUÍCHES DE
CONCRETO COM NÚCLEO LEVE E FACES EM LAMINADOS
REFORÇADOS COM FIBRAS LONGAS DE SISAL

M'hamed Yassin Rajiv da Gloria

Outubro/2015

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Programa: Engenharia Civil

Neste trabalho foram produzidos painéis sanduíches de núcleos leves contendo serragem de madeira e cimento, e faces em laminados reforçadas com fibras longas de sisal alinhadas unidirecionalmente. Na produção do núcleo, foram estudados seis traços variando-se a relação cimento serragem em massa, afim de analisar a faixa de resistência, densidade e condutividade térmica. Esta análise foi necessária para escolher dois traços, que serviram de núcleo. Em seguida foram analisados, os laminados reforçados com fibras alinhadas de sisal, através dos ensaios de flexão e tração. Quanto aos painéis sanduíches, eles foram caracterizados mecanicamente através de ensaios de compressão longitudinal e transversal, ensaio de tração, cisalhamento e flexão.

Abstract of 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 SANDWICH PANELS
COMBINING LIGHTWEIGHT CONCRETE AND LONGER SISAL
FIBER-CEMENT COMPOSITES

M'hamed Yassin Rajiv da Gloria

October/2015

Advisor: Romildo Dias Toledo Filho

Department: Civil Engineering

In this work, sandwich panels have been produced with lightweight cores containing wood cement composites, and facing in laminate reinforced with long sisal fiber unidirectionally aligned. In the production of the core, six different traces have been studied, varying the cement sawdust ratio, in order to examine the strength, the density, and thermal conductivity range. This analysis was necessary to choose two traces used to produce the sandwich panels cores. Next were analyzed, laminates reinforced with sisal fibers aligned through the bending, tensile tests. The sandwich panels have been characterized mechanically by edgewise, flatwise compressive tests and also tensile, shear and bending tests.

Sumário

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização do trabalho	3
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 A madeira	4
2.1.1 Generalidades	4
2.1.2 Classificação da madeira	6
2.1.3 Química da madeira	9
2.1.4 Higroscopia da madeira	12
2.2 Compósito Cimento Madeira	14
2.3 Compatibilidade química entre o cimento e a madeira	16
2.3.1 Problema de incompatibilidade química	16
2.3.2 Tratamentos visando melhorar a compatibilidade	17
2.4 Compósitos cimentícios reforçados por fibras de Sisal	18
2.4.1 Fibras de Sisal	18
2.4.2 Composição e propriedades das fibras de sisal	19
2.4.3 Compósitos reforçados com fibras de sisal	20
2.4.4 Durabilidade dos compósitos	22
2.5 Painéis Sanduíches	24
2.5.1 Estrutura do painel sanduíche	25

2.5.2	Modos de ruptura dos sanduíches	27
2.5.3	Estudos realizados sobre estruturas sanduíches com compósitos cimentícios	30
3	Materiais e procedimentos experimentais	33
3.1	Caracterização dos Materiais	33
3.1.1	Serragem de madeira	33
3.1.2	Fibras de sisal	37
3.1.3	Cimento portland, metacaulinita e cinza volante	38
3.1.4	Areia	40
3.1.5	Água	40
3.1.6	Aditivos químicos	40
3.2	Produção dos compósitos	41
3.2.1	Compósito Cimento-Madeira	41
3.2.2	Laminados reforçados com fibras de sisal	45
3.2.3	Painéis sanduíches	50
3.3	Ensaio mecânicos e físicos	52
3.3.1	Resistência à compressão uniaxial	52
3.3.2	Ensaio de Cisalhamento	55
3.3.3	Flexão em quatro pontos	58
3.3.4	Ensaio de tração direta	60
3.3.5	Caracterização física	62
3.3.6	Ensaio de Condutividade térmica	65
4	Resultados e Discussões	68
4.1	Compósitos Cimento - Madeira	68
4.1.1	Densidade e condutividade térmica	69
4.1.2	Resistência à compressão	70
4.1.3	Resistência ao cisalhamento	73
4.1.4	Absorção capilar	76
4.1.5	Retração por secagem	77
4.2	Laminados reforçados com fibras de sisal	77
4.2.1	Resistência à compressão da matriz	77

4.2.2	Resistência à flexão em 4 pontos	78
4.2.3	Resistência à tração direta	81
4.3	Painéis sanduíches	83
4.3.1	Aspecto visual dos painéis sanduíches	83
4.3.2	Densidade	84
4.3.3	Absorção capilar	85
4.3.4	Compressão uniaxial longitudinal	86
4.3.5	Compressão uniaxial transversal	89
4.3.6	Tração direta	91
4.3.7	Flexão em 4 pontos	95
4.4	Cisalhamento por flexão em 4 pontos	102
4.4.1	Painel PS 0,5	102
4.4.2	Painel PS 2,5	104
5	Considerações finais	107
5.1	Conclusões	107
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	108

Lista de Figuras

2.1	Aspectos macroscópicos da madeira em uma secção transversal de tronco	4
2.2	Representação de uma seção de tronco, mostrando os planos de corte	5
2.3	Forma geral das coníferas (a) e dicotiledôneas (b)	6
2.4	Madeira macia a) Representação esquemática b) Anatomia	7
2.5	Madeira dura a) Representação esquemática b) Anatomia	8
2.6	Representação da molécula de celulose	10
2.7	Diferentes escalas de observação da madeira	10
2.8	Estrutura química parcial de uma hemicelulose	11
2.9	Monômeros da lignina	12
2.10	Efeito da inserção das moléculas de água na madeira	14
2.11	a) Corte das folhas; b) Enfardamento para venda	18
2.12	Estrutura e microestrutura da fibra de sisal	20
2.13	Representação esquemática da decomposição das fibras no meio alcalino	23
2.14	Superfície de fratura de compósitos reforçados com fibras de sisal antes (0 ciclo) e após o envelhecimento acelerado (12 ciclos e 25 ciclos) (LIMA 2004)	24
2.15	Estrutura geral de painel sanduíche	25
2.16	Seção transversal de um painel sanduíche	26
2.17	Efeito da espessura do núcleo sobre a rigidez na flexão do sanduíche .	26
2.18	Estrutura geral de painel sanduíche	27
2.19	Flambagem general das faces	28
2.20	Flambagem local das faces	28
2.21	Ruptura das faces em compressão	29
2.22	Ruptura do núcleo por cisalhamento	29

2.23	Flambagem general do núcleo	30
2.24	a) Face inferior do pequeno painel b) Vista lateral do pequeno painel c) Vista lateral do grande painel	31
2.25	Dimensões do painel sanduíche com núcleo de fibras de coco	31
3.1	a) Peneiramento da serragem b) Fração < 1,18 mm c) Fração > 1,18 mm	34
3.2	Curva granulométrica da Serragem de madeira	35
3.3	Serragem de madeira utilizada	35
3.4	a) Embeбimento em água por 24h b) Secagem ao ar livre c) Serra- gem no molde tronco-cônico d) Aplicação de 25 golpes com a haste e) Material saturado superficialmente úmido f) Material saturado super- ficialmente seco g) 100 g de amostra no frasco de 500 ml h) Material após secagem na estufa de 105°C	36
3.5	Pente de pregos (esquerda) Guilhotina (direita)	38
3.6	Curva granulométrica do CP II E-32, da cinza volante e da metacau- linita	38
3.7	Curva granulométrica da areia utilizada	40
3.8	a) Início da lavagem na panela b) Coloração da água depois da 1ª la- vagem	42
3.9	Variação da tinta da água depois 9 lavagens	42
3.10	Secagem da serragem na sala de 20°C antes da moldagem	43
3.11	a) Lançamento do cimento b) Pasta de cimento c) Lançamento da ser- ragem de madeira d) Compósito obtido e) Compósitos colocados nos diferentes moldes e) Manta de proteção contra a perda de umidade	44
3.12	Análise termogravimétrica da matriz em diferentes idades	45
3.13	Espalhamento da mistura 5	46
3.14	a) Madeira inferior parcialmente vedada com folha de alumínio b) Fibras espalhadas na madeira c) Fibras prendidas nas extremidades d) Fibras alinhas e esticadas e) Colocação da pasta de cimento nas fibras f) Retirada das fibras com a pasta endurecida	47
3.15	a) Lançamento dos materiais cimentícios b) Lançamento da água c) Lançamento da areia d) Argamassa obtida	48

3.16	a) Molde lubrificado b) Pesagem da argamassa de uma camada c) Espalhamento da argamassa d) Colocação das fibras e) Prensagem manual das fibras f) Espalhamento da argamassa em cima das fibras	49
3.17	Distribuição das fibras de sisal no compósito	49
3.18	Estrutura do painel sanduíche	50
3.19	a) Espalhamento da 1ª camada de argamassa no fundo do molde b) Colocação da 1ª camada de fibras c) Ajuste manual das fibras d) Colocação da secunda camada de argamassa d) Espalhamento da argamassa com a espatulá	51
3.20	a) 1ª camada do compósito cimento madeira colocada em cima do laminado inferior b) Compactação com a haste c) Ajuste final da superfície	51
3.21	a) Colocação da 1ª camada de argamassa da face superior b) espalhamento da argamassa c) Ajuste manual das fibras d) Espalhamento da argamassa em cima das fibras e) Painéis moldados	52
3.22	a) CCM 2 faceado b) CCM 0,5 capeado c) Ensaio de compressão uniaxial	53
3.23	Ensaio compressão uniaxial longitudinal a) PS 0,5 b) PS 2,5	54
3.24	a) PS 0,5 b) Ensaio de compressão uniaxial transversal do PS 2,5	55
3.25	Ensaio de cisalhamento do núcleo	56
3.26	Cisalhamento por flexão em 4 pontos a) PS 0,5 b) PS 2,5	57
3.27	Ensaio de flexão 4 pontos de laminado	58
3.28	Disposição dos 8 LVDTs no painel a ensaiar	59
3.29	Montagem dos LVDTs 1 e 2 a) b) Disposição dos LVDTs 3,5 e 7	60
3.30	a) Fixação do CP b) Ensaio de tração	61
3.31	Ensaio de tração direta do sanduíche	62
3.32	Montagem dos LVDTs no CP a) Vista frontal b) Vista lateral	62
3.33	a) Corpos-de-provas selados b) Corpos-de-provas no recipiente	63
3.34	Registros de variações: dimensional (esquerda) e de massa (direita)	65
3.35	Analisador de condutividade térmica TCi C-Therm	66
3.36	a) Camada de graxa térmica na amostra b) Camada de graxa térmica no sensor c) Medição das propriedades	67
4.1	CCM após desmoldagem a) CCM3 b) CCM0,5	68

4.2	Curvas típicas de tensão - deformação axial dos CCM 0,5 e 1	70
4.3	Curvas típicas de tensão - deformação axial dos CCM 0,5 e 1	71
4.4	a) CCM 1 antes do ensaio b) CCM 1 após c) CCM 0,5 após o ensaio .	71
4.5	Curvas típicas de tensão - deformação axial dos CCM 2, 2.25 e 2.5 . .	72
4.6	Curvas típicas de tensão - deformação axial do CCM 3	73
4.7	Ruptura típica dos CCM 2; 2,25; 2,5 e 3	73
4.8	CP antes do ensaio de cisalhamento b) CP depois do ensaio	74
4.9	Curvas típicas dos CCM 0,5 e 2,5 no ensaio de Cisalhamento	74
4.10	CCM 0,5 a) Amostras ensaiadas ao cisalhamento b) Plano de ruptura	75
4.11	CCM 2,5 a) Amostras ensaiadas ao cisalhamento b) Plano de ruptura	75
4.12	Curvas de absorção de água por capilaridade	76
4.13	a) Curva de retração por secagem b) Curva de perda de massa	77
4.14	Curva típica tensão deformação da argamassa	78
4.15	a) Curvas Tensão - deflexão b) Ampliação até a deflexão de 5 mm . . .	79
4.16	Sequência de abertura das fissuras e deflexão correspondente	80
4.17	Espaçamento entre fissuras do CP submetido aos esforços de flexão .	81
4.18	Curva típica de tração dos laminados	82
4.19	Sequência de abertura das fissuras e deformações correspondentes . .	83
4.20	PS 2,5 a) Aspecto externo b) Seção longitudinal	84
4.21	PS 0,5 a) Aspecto externo b) Seção longitudinal	84
4.22	Curvas de absorção de água por capilaridade	85
4.23	Curvas força-deformação das faces e núcleo a) PS 0,5 b) PS 2,5	86
4.24	Ruptura em compressão a) PS 2,5 Núcleo b) PS 2,5 Faces c) PS 0,5 Núcleo d) PS 0,5 Faces	88
4.25	Curvas dos PS 0,5 e 2,5 submetidos à compressão transversal	89
4.26	a) Corpos de prova CP PS 0,5 rompidos b) Interface face núcleos . . .	90
4.27	a) Corpos de prova CP PS 2,5 rompidos b) Interface face núcleos . . .	90
4.28	Curvas típicas força deformação a) Núcleo PS 2,5 b) Núcleo PS 0,5 c) Faces 2,5 d) Faces 0,5	91
4.29	Ruptura dos núcleos de dois PS 0,5: (a,e) Início do ensaio de tração direta, (b,f) Surgimento da 1ª fissura, (c,g) 2ª fissuração (d,h) Final do ensaio	92

4.30	CP PS 0,5 após o ensaio de tração direta a) CP1 (c,d) CP2	93
4.31	CP PS 2,5 a) Início do ensaio de tração direta b) Final do ensaio c) Núcleo sem fissura d) Fissuras numa face e) Delaminação das faces	94
4.32	Curvas das faces dos PS 0,5 e 2,5 submetidas à tração direta	94
4.33	a) Fissuras finas na face inferior b) Painel depois o ensaio de flexão .	96
4.34	PS 0,5 a) Curvas Força-Deflexão b) Curvas Força - Abertura de fissuras	96
4.35	a) Vista lateral do Painel PS 0,5 b) Parte central c) Extremidade d) Face inferior do Painel PS 0,5 após o ensaio	97
4.36	a) Fissuras na face inferior durante o ensaio b) Fissuração principal do núcleo	98
4.37	Curvas Força-Deflexão PS 2,5	98
4.38	a) Fixação dos LVDTs b) LVDTs medindo as fissuras da face inferior	99
4.39	Curvas Força - Abertura de fissura	100
4.40	PS 2,5 após o ensaio de flexão a) Vista lateral b) Face inferior c) Parte central da face	101
4.41	Localizações de fissuras no PS 0,5 a,b) núcleo c,d) faces	102
4.42	Curva típica dos PS 0,5	103
4.43	PS 0,5 após o ensaio	104
4.44	Planos de fissuras do núcleo de fissuras no PS 2,5 a,b) núcleo c,d) faces	104
4.45	Localizações de fissuras na face inferior do PS 2,5	105
4.46	Curva típicas dos PS 2,5	105

Lista de Tabelas

2.1	Composição relativa dos diferentes componentes químicos da madeira	9
2.2	Valores típicos das propriedades das fibras de sisal	20
3.1	Identificação das espécies coletadas	34
3.2	Umidade, massa específica e absorção da serragem	37
3.3	Composição química: CP II E-32, metacaulinita e cinza volante . . .	39
3.4	Relação mássica entre os materiais	41
3.5	Valores de espalhamento da argamassa para diferentes teores de SP (Consumo em kg/m^3)	46
3.6	Consumo em kg/m^3 de materiais na matriz utilizada	46
4.1	Valores médios de densidade e condutividade térmica dos CCM e CV (% entre parênteses)	69
4.2	Valores médios das propriedades mecânicas sob compressão aos 28 dias dos compósitos e coeficientes de variação (% entre parênteses) . .	70
4.3	Resultados experimentais de resistência ao cisalhamento.	75
4.4	Valores médios de absorção de água por capilaridade	76
4.5	Valores médios das propriedades mecânicas sob compressão aos 28 dias da matriz empregada	78
4.6	Valores médios das propriedades em flexão dos laminados e os coefi- cientes de variação (%)	79
4.7	Cálculo de espaçamento e aberturas de fissuras	81
4.8	Valores médios das propriedades em tração direta dos laminados e os coeficientes de variação (%)	82
4.9	Valores médios de densidade dos painéis e coeficientes de variação (% entre parênteses)	85

4.10	Valores médios de absorção de água por capilaridade dos painéis . . .	85
4.11	Valores de cargas e de resistência obtidos na compressão longitudinal	87
4.12	Valores de resistência e deformação obtidos na compressão transversal	89
4.13	Propriedades dos painéis depois do ensaio de flexão	100
4.14	Propriedades dos PS 0,5 depois do ensaio de cisalhamento por flexão e coeficientes de variação (% entre parenteses)	103
4.15	Propriedades dos PS 2,5 depois do ensaio de cisalhamento por flexão e coeficientes de variação (% entre parenteses)	106
4.16	Recapitulativo dos resultados obtidos dos PS 0,5 e PS 2,5	106

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Hoje dia, a escolha de um material de construção não deve levar em conta apenas o custo. Fatores como a durabilidade, o consumo energético e a interação com o meio ambiente também têm que ser considerados, até porque eles influenciam diretamente no custo total de operação do edifício. Neste contexto, a indústria da construção que é o primeiro consumidor de recursos naturais, e também que gera muitos resíduos, deve trabalhar para converter suas práticas construtivas a fim de melhorar o desempenho energético dos edifícios novos e existentes, mas também oferecer materiais inovadores que atendam às novas necessidades dos utilizadores em termos de impacto ambiental, e conforto.

Neste grupo de materiais inovadores, têm-se os compósitos ligno-celulósicos que são basicamente compostos de agregados de origem vegetal, provendo da agricultura ou da floresta, ligados entre eles por um aglomerante sintético ou mineral. Alguns produtos derivados já estão desenvolvidos e comercializados em grande escala tais como o concreto de cânhamo na França, feito de mistura de partículas provendo do caule do cânhamo e da cal. Além de ser de origem vegetal e ecológico, este concreto é leve (500 kg/m^3) e tem uma baixa capacidade na condução de calor (AMZIANE 2013).

Embora o Brasil não seja um produtor de cânhamo, tem vários outros tipos de materiais ligno-celulósicos como a madeira, cujas partículas poderiam ser utilizadas também na construção. Por apresentar boas características e mecânicas e durabilidade, a madeira sempre foi empregada na construção, mas em tamanho maior. Com a crescente demanda de madeira serrada, as indústrias madeireiras geram uma quantidade importante de resíduos na forma de cavacos, maravalhas, serragem e pó de serra. Esses resíduos gerados nos diferentes processos de obtenção da madeira, podem ser incorporados numa matriz para fabricação de compensados, vigas laminadas, chapas de partículas e painéis cimento madeira. Assim o aproveitamento dos resíduos de madeira como agregados vegetais para a fabricação de concreto vegetal poderá ser um contribuição no desenvolvimento de materiais inovadores, de baixo custo e de baixo impacto ambiental.

Além da madeira, no Brasil são produzidos vários tipos de fibras vegetais, tais como o sisal na região nordeste. Os estudos realizados por Toledo Filho (1999), Lima (2004), Silva (2009), Melho Filho (2005) mostraram resultados promissores para o uso do sisal no desenvolvimento de materiais de baixo impacto, mas servindo principalmente como reforços nos compósitos cimentícios de alto desempenho. Esses autores assim como vários, evidenciaram a durabilidade dos compósitos reforçados com fibras, e uma alternativa interessante será a combinação deste compósito, com o compósito cimento madeira, numa estrutura sanduíche.

A presente pesquisa visa o estudo do conceito de painéis tipo sanduíches constituídos de núcleo leve contendo o cimento e a serragem de madeira, e as faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal.

1.2 Objetivos

Acreditando no potencial desse material e sua relação com as questões que envolvem o desenvolvimento de materiais de baixo impacto ambiental, a presente pesquisa visa desenvolver painéis sanduíches autoportantes de materiais ligno-celulósicos para alvenaria de edifícios. Especificamente, pretende-se desenvolver painéis sanduíches:

- De condutividade térmica baixa;
- De boas resistências mecânicas;
- Duráveis e fáceis a implementar;
- De baixo custo;
- Que permitem reduzir problemas ambientais gerados por alguns resíduos.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho será composto de cinco capítulos:

Capítulo 1: Breve introdução ao tema, expondo a importância e a motivação do estudo, a proposta da dissertação, os objetivos e a organização do trabalho;

Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre os compósitos cimento madeira, os compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de sisal, e o conceito de estrutura sanduíche;

Capítulo 3: Apresentação das características dos materiais empregados assim como os procedimentos experimentais na produção e avaliação das propriedades dos compósitos, e do sanduíche;

Capítulo 4: Análise e tratamento dos resultados do programa experimental;

Capítulo 5: Último capítulo com as conclusões do estudo apresentado e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 A madeira

2.1.1 Generalidades

A madeira é um recurso natural, renovável produzido pela árvore durante seu crescimento. Extraída do tronco, ela é um material orgânico e heterogêneo cujas propriedades físico-químicas, mecânicas e biológicas variam extremamente de uma espécie de árvores para a outra. As diferenças de comportamento existem também numa mesma espécie, na mesma árvore (ROUX 1994 ; NATTERER *et al.*, 2000).

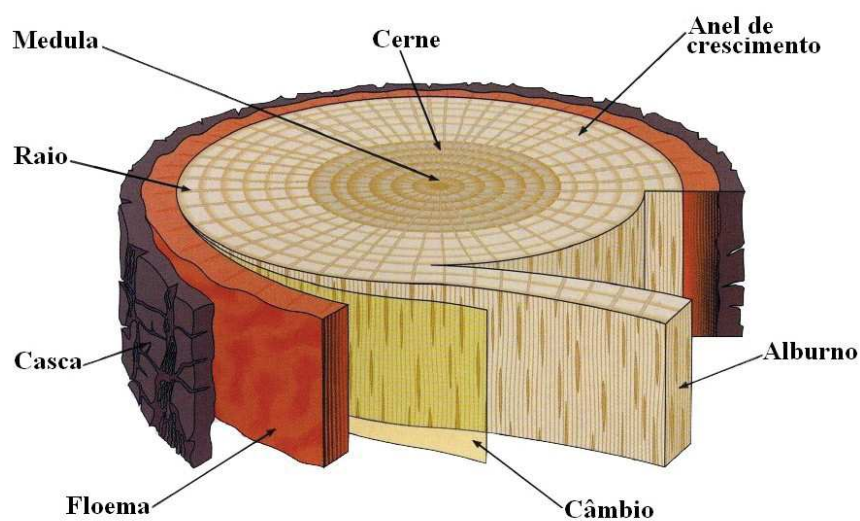


Figura 2.1: Aspectos macroscópicos da madeira em uma secção transversal de tronco
(Adaptada de ICPICS)

A madeira é formada por:

- Casca: Camada externa de tecido que envolve e protege o caule, armazena e conduz os nutrientes exercidos pelo floema;
- Floema: Tecido vascular vegetal cuja função principal é o transporte de água, sais minerais e compostos orgânicos produzidos pela fotossíntese;
- Câmbio: Camada fina de tecido celular vivo que vai formando a madeira nova, e suporta o crescimento dos anéis ;
- Alburno: Parte periférica do tronco das árvores, de cor clara, constituída por células vivas com função de transporte da seiva bruta das raízes para as folhas;
- Cerne: parte interna geralmente de cor escura do tronco, entre o alburno e a medula, formada por células mortas, em que não ocorre o transporte de água;
- Medula: Tecido mole e esponjoso no centro do tronco;
- Anéis de crescimento: Indicativos da idade da árvore, o espaçamento entre dois anéis é o tanto que a árvore cresceu num período vegetativo.

A madeira é também um material anisotrópico cujo aspecto varia de acordo com a face de corte, pois na sua organização, seus elementos estão orientados paralelamente ou perpendicularmente a um eixo de simetria (BOTOSSO 2009). Assim, temos três planos principais:

- O plano transversal que é perpendicular ao eixo do caule,
- O plano radial que passa pelos raios do caule;
- O plano tangencial é paralelo ao eixo do caule e tangencial ao anéis.

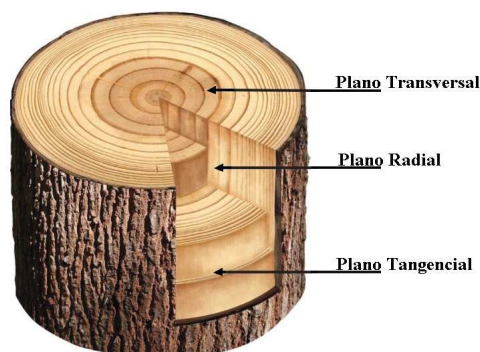


Figura 2.2: Representação de uma seção de tronco, mostrando os planos de corte
(Adaptada de BOTOSSO 2009)

2.1.2 Classificação da madeira

Distinguem-se duas classes de madeira: a macia (softwood) e a dura (hardwood). A madeira macia vem das árvores gimnospermas ou coníferas (não frutífera), que têm a folhagem na forma de cone, e as folhas no formato de agulhas. Quanto à dura, ela vem das árvores dicotiledôneas ou angiospermas (frutífera), de copa de folhas diferente, folhas largas, e com grande resistência mecânica.

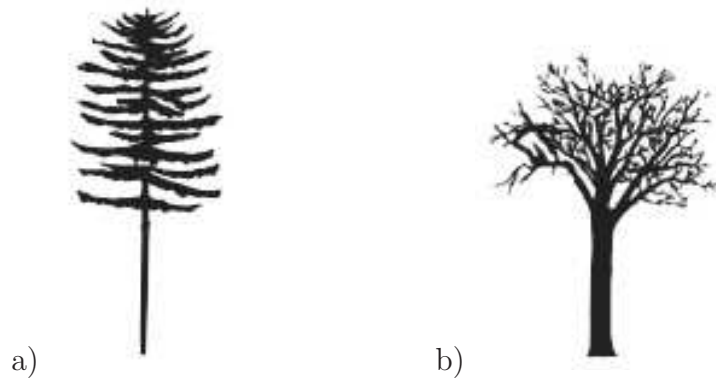


Figura 2.3: Forma geral das coníferas (a) e dicotiledôneas (b)

(Fonte: FPL 2010)

A madeira é basicamente constituída por tecidos formados de células com paredes celulares espessas, cujas formas e tamanhos variam de acordo com a espécie (ROWELL 2005). A anatomia das coníferas é relativamente simples (2.4). Elas são constituídas por 95% de traqueídeos, células alongadas e fechadas nas extremidades, que se comunicam entre si por meio de pontuações (FENGEL 1983). Além dos traqueídeos, elas têm também os raios lenhosos, conjuntos de células lenhosas cuja função principal é o transporte e armazenamento de nutrientes; e de canais resiníferos que são limitados por células secretoras de resina.

No entanto, as dicotiledôneas apresentam uma organização celular mais complexa, constituídas de vasos, fibras, raios lenhosos (fig 2.5). Os vasos são tubos longitudinais de células que permitem o fluxo da seiva através do lenho. As fibras, dispostas longitudinalmente no caule e fortemente aglomeradas, constituem os elementos de resistência e sustentação da árvore. As características mecânicas da madeira estão ligadas à densidade, textura e disposição do tecido fibroso.

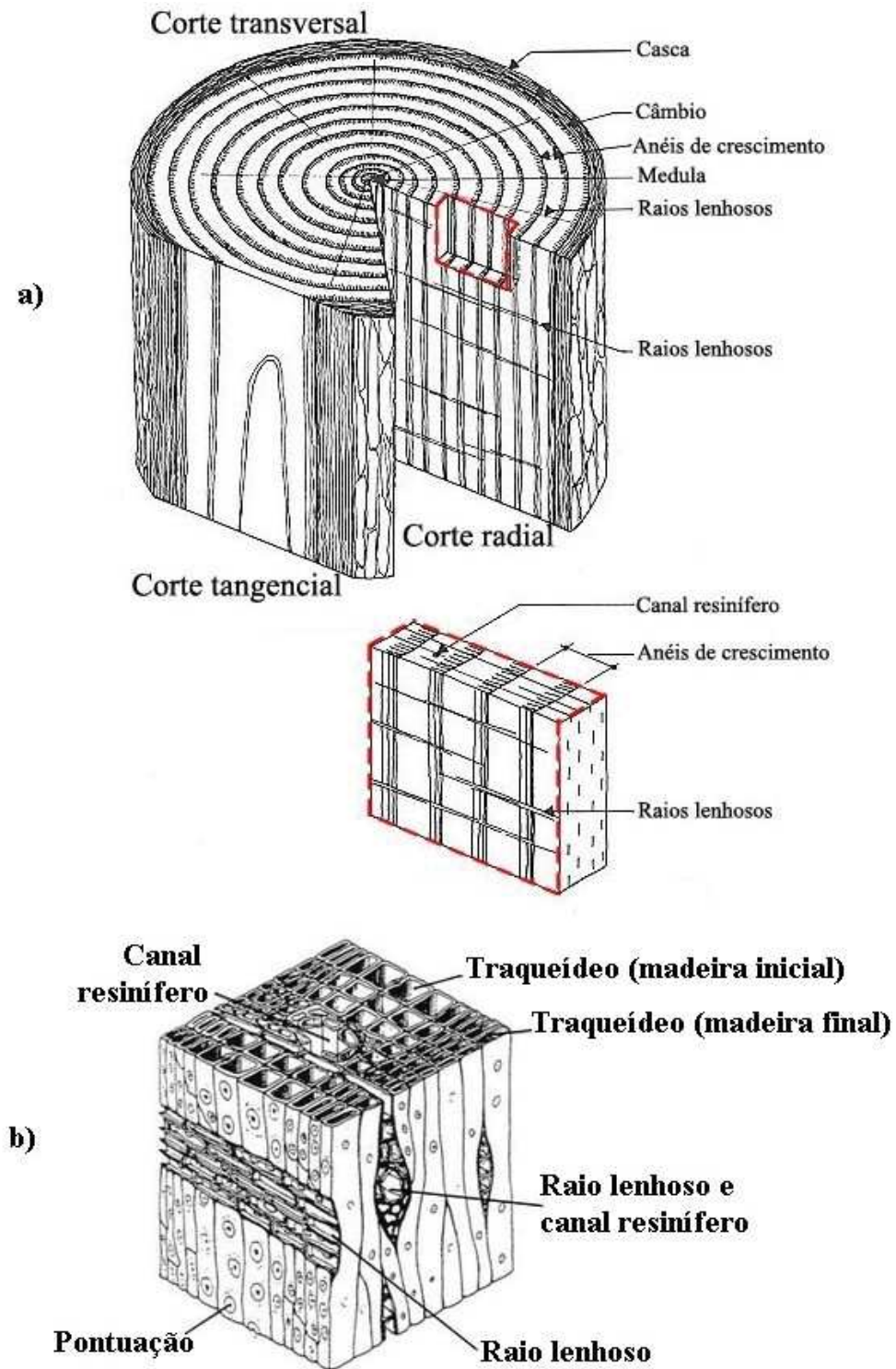


Figura 2.4: Madeira macia a) Representação esquemática b) Anatomia
(Adaptada de Lignum e GOVIN 2004)

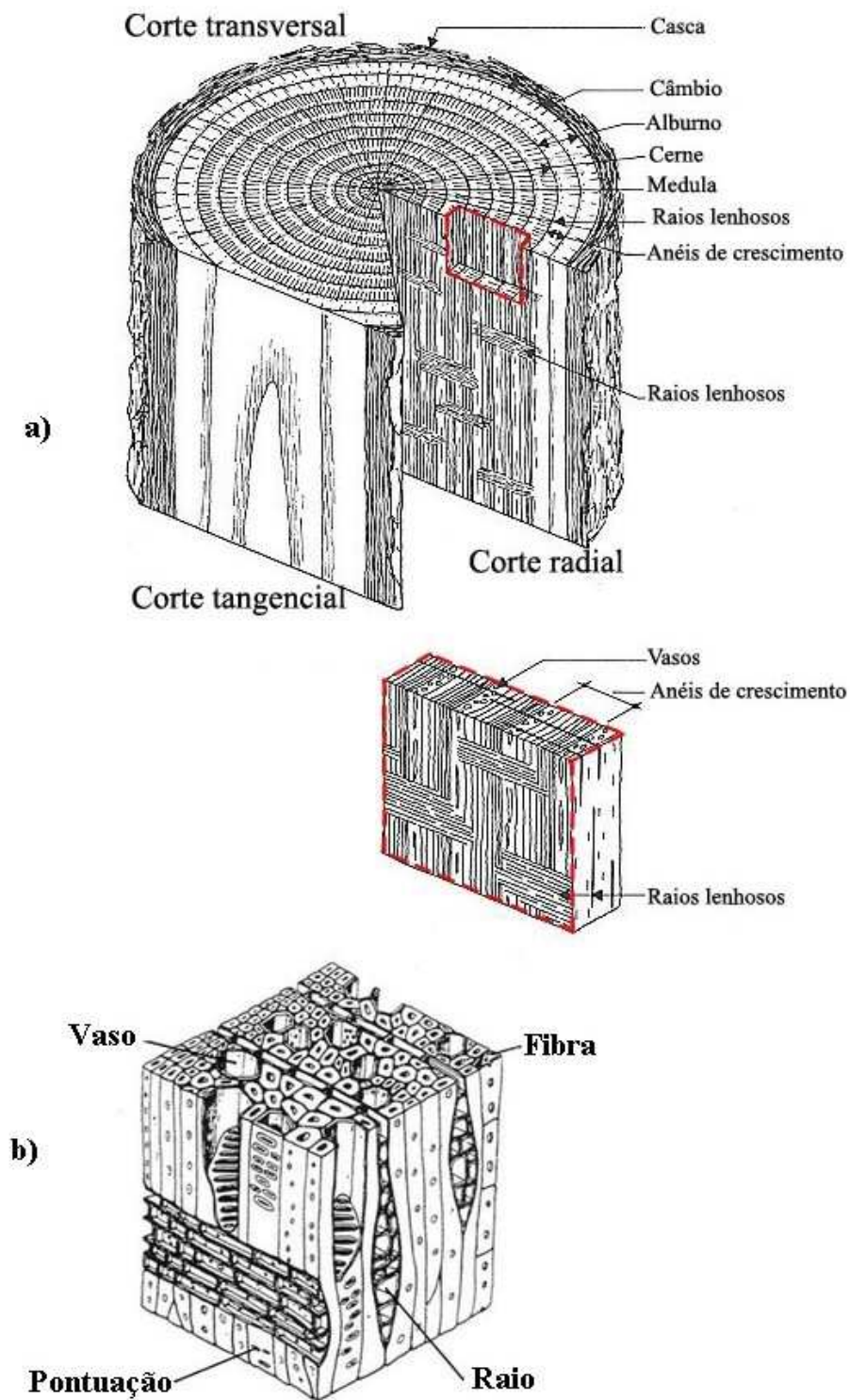


Figura 2.5: Madeira dura a) Representação esquemática b) Anatomia
(Adaptada de Lignum e GOVIN 2004)

2.1.3 Química da madeira

A composição química da madeira é complexa. A árvore, como a maioria dos vegetais, é composta de polissacarídeos e lignina. Os polissacarídeos provêm da transformação, por fotossíntese do dióxido de carbono e da água em oxigênio e glucídios (GOVIN 2004).

A madeira é composta de: celulose, hemicelulose e lignina, responsáveis pela formação da parede celular, de seus elementos anatômicos e pela maioria das suas propriedades. Além destes componentes, ela é composta também de moléculas livres, orgânicas e inorgânicas chamadas extrativos. (LEPAGE 1986, BORDINI *et al.* 2004). A proporção dos diferentes constituintes varia em função das classes de madeira. A repartição média é apresentada na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Composição relativa dos diferentes componentes químicos da madeira

(Fonte: GOVIN 2004)

	Gimnospermas (% em massa)	Angiospermas (% em massa)
Celulose	42 ± 2	45 ± 2
Hemicelulose	27 ± 2	30 ± 5
Lignina	28 ± 3	20 ± 4
Extrativos	3 ± 2	5 ± 3

Celulose

A celulose é o polímero de origem natural mais abundante na Terra. Esta macromolécula é produzida essencialmente pela fotossíntese, entre 50 e 100 bilhões de toneladas por ano. Constituída dos três elementos: carbono, hidrogênio e oxigênio, a celulose é o componente principal das paredes celulares das árvores e também de outras plantas (entre 40 e 55% na madeira, até 95% nas fibras de algodão) (MAZZA 2009, HOCINE 2013).

A estrutura da celulose é formada por longas cadeias de celobiose repetidas n vezes (n até 15.000), e assim, tem uma alta massa molecular (CASTRO 2009).

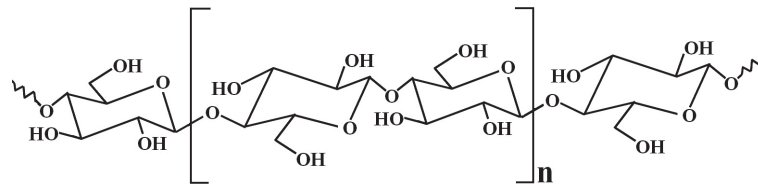


Figura 2.6: Representação da molécula de celulose

A presença de vários grupos hidroxilos permite a formação de ligações de hidrogênio e confere para a celulose uma linearidade, e uma rigidez considerável. As ligações de hidrogênio favorecem a organização cristalina da celulose e a tornam insolúveis em água. Pelo intermediário destas ligações, as cadeias de celulose se aglomeram na madeira em microfibrilas que formam as regiões cristalinas e amorfas. As microfibrilas são aglomeradas em fibrilas e depois em fibras (GOVIN 2004).

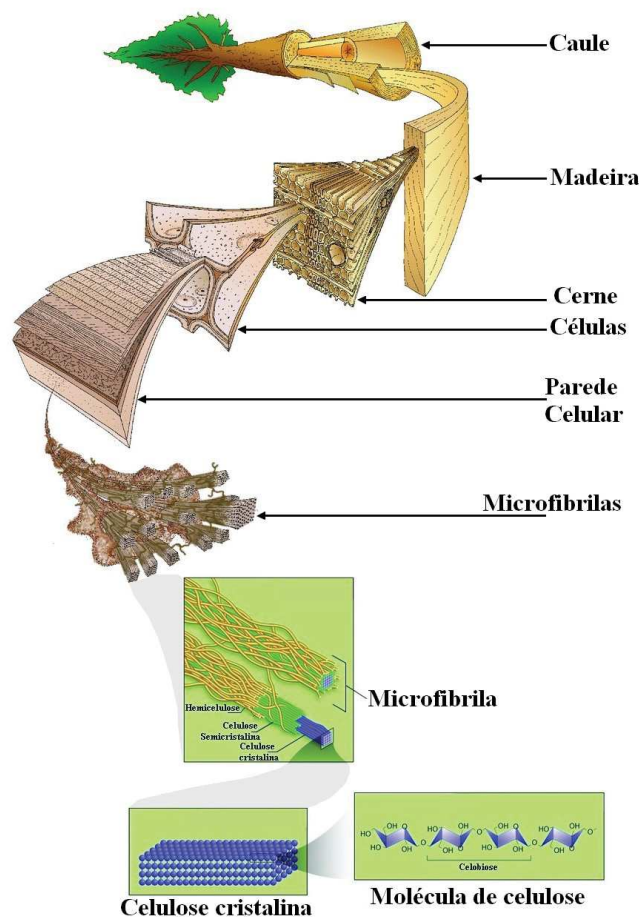


Figura 2.7: Diferentes escalas de observação da madeira
(Adaptada de HARRINGTON 1998 e OBES)

A estrutura da celulose fornece para a madeira, elasticidade e resistência à tração devido às ligações covalentes (SOUZA 2006). Mas ela pode ser hidrolisada em meio ácido e parcialmente degradada em meio básico (CASEY 1980).

Hemiceluloses

As hemiceluloses são hetero-polissacarídeos amorfos, formados de cinco açúcares: a glicose, a galactose, a xilose, a arabinose, a manose e os ácidos urônicos (JOSELEAU 1980). Presentes nas paredes celulares, elas têm um grau de polimerização baixo e sua molécula não possui arranjo fibroso (MORAIS *et al.*, 2005).

Sua presença fornece para a madeira várias propriedades como a higroscópica, o inchamento, a plasticidade. Elas são geralmente solúveis em água, soluções básicas, e mais fáceis a hidrolisar pelas soluções ácidas do que a celulose (CASEY 1980).

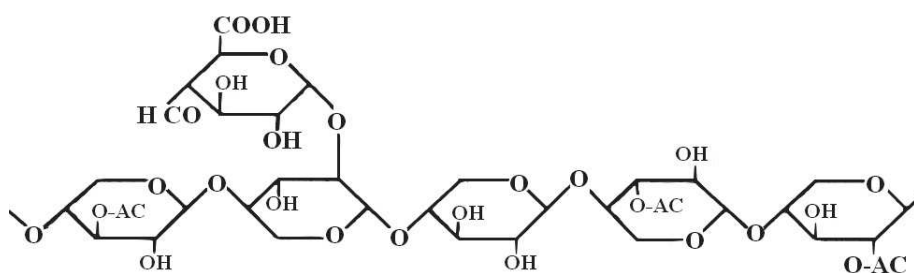


Figura 2.8: Estrutura química parcial de uma hemicelulose (HALUK 1994)

Lignina

A lignina é um componente importante dos tecidos das plantas vasculares e representa em média 18 até 35% do peso total dos tecidos (DOMMERGUE 1970, KÄÄRIK 1974). É um polímero amorfo e heterogêneo, distribuído (entre 70 e 80%) ao redor da parede secundária da lamela média (ERIKSSON 1990). Assim, a lignina envolve a celulose e as hemiceluloses com dois papéis. Ela serve de ligante entre as microfibrilas para a formação da madeira e também de cobertura de proteção contra os ataques das enzimas (celulase e hemicelulase), reduzindo assim a suscetibilidade à degradação (SCHEFFER 1966, DOMMERGUE 1970, CASTRO 2009).

Ela é obtida por polimerização de três alcoóis (figura 2.9), *p*-cumarílico, coniferílico e sinapílico (CHEUMANI 2009). Sua estrutura química difere conforme que seja angiospermas ou gimnospermas.

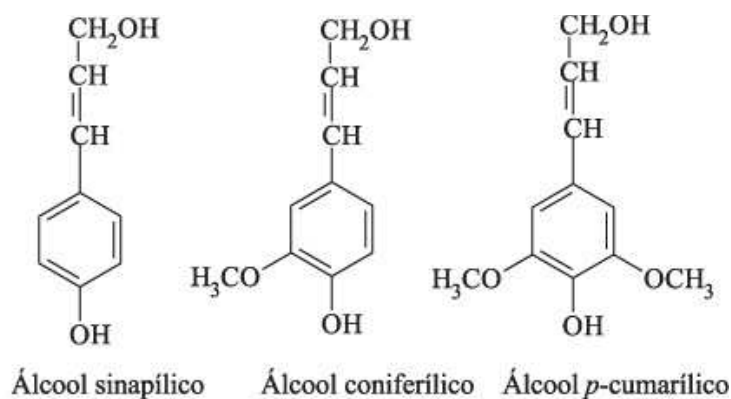


Figura 2.9: Monômeros da lignina

(Fonte: Budziak *et al.* 2004)

Os extrativos

Além dos três polímeros, a madeira possui moléculas de baixo peso chamadas extrativos. Eles são localizados no lúmen, nos canais resiníferos, na lamela média, e nos espaços intercelulares. Os principais são os taninos, terpenos, terpenóides, resinas, gorduras ácidas, fenóis e açúcares. Eles fornecem para a madeira propriedades como a cor, o cheiro, o gosto, a resistência natural ao ataque de organismos destruidores da madeira. Os extrativos podem ser removidos com água fria ou quente, ou ainda com solventes orgânicos, tais como etanol, tolueno, acetona (LATORRACA 2000, CHEUMANI 2009).

Embora em menor percentual em relação aos demais componentes, o teor de extrativos tem efeitos negativos na interação cimento-madeira e é um importante indicador para sua utilização com fins industriais (SOUZA 2006).

2.1.4 Higroscopia da madeira

Como todo material ligno-celulósico, a madeira é um material higroscópico, sensível às condições climáticas do meio ambiente (umidade, temperatura). Sua umidade é determinada pela equação 2.1.

$$U = \frac{(M_u - M_a)}{M_a} \times 100 \quad (2.1)$$

Onde:

U= teor de umidade (%);

M_u = massa da madeira úmida (g);

M_a = massa da madeira anidra (secada a 105°C até constância de massa) (g).

De acordo com Govin (2004), as variações de umidade mudam as propriedades da madeira (densidade, dimensões, propriedades mecânicas, resistência aos fungos). A água tem um papel de plastificante para as cadeias de polímeros constituindo as paredes celulares e aumenta a mobilidade das cadeias. Na madeira, ela se encontra em dois estados: a água livre ou capilar, e a água de impregnação ou higroscópica (CHEUMANI 2009, MELLADO 2007).

A água livre é a água que se encontra nos lúmens dos elementos vasculares e espaços intercelulares. Retida por forças capilares, ela não age nas variações dimensionais da madeira (GOVIN 2004). Segundo Mellado (2007), no processo de secagem, a água livre é a primeira água a ser removida, pois as forças capilares que a retêm são apreciavelmente menores do que as forças que mantêm a água de impregnação. O mesmo autor afirma que a retirada da água capilar ocasiona apenas uma perda de peso na madeira.

A água de impregnação é a água encontrada nas paredes celulares. Ligada por forças elétricas, sua retirada afeta a maioria das propriedades físicas e mecânicas da madeira. A água higroscópica move-se por difusão através das paredes celulares, em consequência de forças geradas pelo gradiente de umidade. A rapidez ou facilidade de secagem varia diretamente com a temperatura e a umidade. As hemiceluloses são os polímeros mais hidrofílicos. A hidrofília dos outros constituintes decresce na ordem seguinte segundo Rowell (2005), citado por Cheumani (2009): Celulose amorfa > Lignina > Celulose cristalina. O efeito da inserção das moléculas de água nas paredes celulares da madeira é ilustrada na figura 2.10.

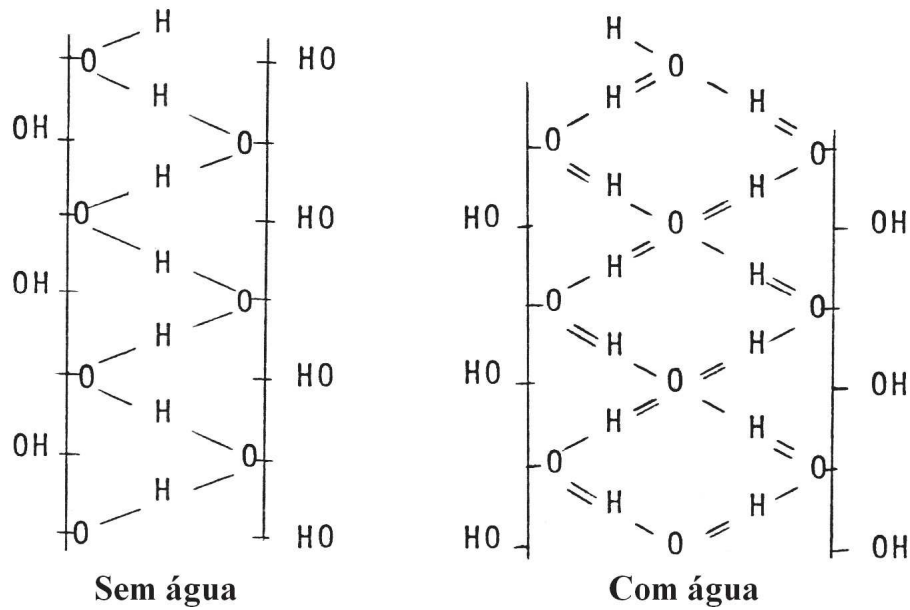


Figura 2.10: Efeito da inserção das moléculas de água na madeira
(Fonte: Moreschi 2014)

A inserção das moléculas entre as cadeias celulósicas gera a distorção da rede anatômica e o inchamento das paredes celulares. Esse processo é quase-reversível, e gera uma retração na secagem. Assim, esses dois fenômenos retração e inchamento são as variações dimensionais da madeira.

2.2 Compósito Cimento Madeira

O compósito cimento - madeira é um material de matriz cimentícia com substituição parcial ou total de agregados minerais pelas partículas da madeira (GOVIN 2004). Além da madeira, existe também outros compósitos cimento - biomassa vegetal, tais como o sisal, a juta, o curauá, o bambu, o cânhamo, bagaço de cana-de-açúcar (TOLÊDO FILHO 1997; FIDELIS 2014; BERALDO 1994; SARMIENTO 1996; AMZIANE S. e ARNAUD L. 2013).

Beraldo (1994) afirma que o interesse comercial pelos compósitos cimento madeira começou nos anos 1930, com a fabricação de painéis leves cujo ligante era o cimento magnésiano. Esses painéis eram conhecidos como Excelsior nos Estados Unidos, e Heraklit na Europa. Em meados dos anos 1950, várias patentes (utilizadas

pela maioria das fábricas de painéis cimento-madeira) foram depositadas pela empresa Elmendorf (DINWOODIE e PAXTON, 1984). Moslemi (1988) associou esse interesse dos fabricantes pela grande disponibilidade das matérias primas. Assim, as indústrias de fabricação podem se instalar perto dos recursos vegetais, afim de reduzir os custos de transporte.

Um interesse suplementar é valorizar os resíduos de matérias celulósicas (pó de serra, serragem...) provendo da indústria de madeira e de papel. Nesse sentido, o uso de cimento como aglutinante tem um curso bem menor do que os adesivos sintéticos (LATORRACA 2000). Segundo Pimentel (2000) e Santos (2008), os compósitos cimento-madeira são de grande potencial de aplicação devido às características tais como:

- Disponibilidade de matéria-prima renovável, em grande quantidade;
- Baixa massa específica - variando de 400 a 1500 kg/m³, que permite sua utilização como painel de fechamento, forros, telhas;
- Boa resistência às agentes deterioradores de madeira;
- Ruptura dúctil;
- Pode ser serrado, furado e receber parafusos;
- Bom isolamento termo-acústico;
- Resistência mecânica que, embora não seja tão alta quanto à do concreto, não chega a ser desprezível.

Dix (1989), citado por Latorraca (2000), destaca o uso para paredes de casas pré-fabricadas, bancadas, pisos, revestimentos de túneis, paredes divisórias, paredes isolantes (térmicos e/ou acústicos), portas corta-fogo, forros de casas, etc.

No entanto, várias dificuldades atrapalham o desempenho deste compósito numa escala maior. Podemos citar principalmente, a incompatibilidade química entre o cimento e certas espécies vegetais, devido à presença de açúcares, resinas, fenóis e amido, que afetam negativamente a hidratação do cimento. Observam-se também, problemas de instabilidade dimensional ligada às variações de umidade. Outras desvantagens são:

- Longo tempo de pega;
- Durabilidade reduzida no meio alcalino.

2.3 Compatibilidade química entre o cimento e a madeira

2.3.1 Problema de incompatibilidade química

Nos anos 60, os autores Weathermax (1967) e Biblis (1968) observaram um longo tempo de pega durante a associação do cimento com as partículas de madeira. Em alguns casos, foi observada uma inibição total da pega, e as misturas ficaram no estado de pasta. Quarenta anos depois, várias pesquisas foram feitas com intuito de determinar os fatores influenciando a hidratação do cimento.

De acordo com Pimienta *et al.* (1994), a celulose devido a sua característica cristalina, provavelmente não reaja com o cimento e a lignina não apresenta efeito inibitório. Segundo Sandemann e Shmitz (1966), citados por Simatupang *et al.* (1978), os extrativos da madeira são os principais responsáveis pela inibição da solidificação do cimento. Eles formam uma camada inibitória reduzindo a velocidade da reação de hidratação do cimento. Os extrativos mais inibidores são geralmente os açúcares, as gorduras ácidas, os fenóis, e também as substâncias provendo da hidrólise das hemiceluloses no meio alcalino (ZHENG TIAN e MOSLEMI, 1986; SEMPLE *et al.*, 2004).

Os estudos de determinação da concentração máxima dos compostos inibidores feitos por Simatupang *et al.* (1978) citado por Latorraca (2000), mostraram, que por exemplo no caso dos açúcares, o efeito inibidor é influenciado pela concentração baseada no peso do cimento. Uma concentração abaixo de 0,1% de glicose não afeta as propriedades do compósito, enquanto uma concentração de 0,125% de amido, produz um alto efeito inibidor, comparável a uma concentração de 0,25% de glicose. Esses efeitos podem também ser observados com sacaroses e xiloses.

Segundo Beraldo e Carvalho (2004) citados por Souza (2006), a concentração de 1% de glicose inibe completamente a pega de um tipo de cimento. Eles assumem que o ambiente alcalino do cimento poderá contribuir para a conversão parcial da hemicelulose e dos polímeros de açúcar provocando problemas na pega. Os extrativos solúveis em água, que migram para a superfície da madeira formam uma camada hidrófoba sobre o grão de cimento, que reduzem as pontes de hidrogênio entre a madeira e o cimento, implicando em uma diminuição de resistência na interface.

Além dos açúcares, outras substâncias liberadas pela madeira onde os princípios ativos são os compostos fenólicos e os carboidratos, alteram tanto a morfologia quanto a taxa de crescimento dos cristais de etringita. Isto ocorre pelo fato que, uma vez depositadas na interface cimento-madeira, as substâncias retardadoras são rapidamente absorvidas pela camada de cimento já hidratado e alteram a taxa de crescimento dos cristais de hidróxido de cálcio (MEHTA e MONTEIRO 1994; NEVILLE 1997).

2.3.2 Tratamentos visando melhorar a compatibilidade

Para minimizar ou mesmo evitar os efeitos inibidores da madeira na hidratação do cimento, algumas soluções foram propostas. Wienhaus (1979) citado por Beraldo (1994) sugeriu o uso de cimento de alta resistência inicial, e a impregnação das partículas da madeira pelo silicato de sódio. Gram (1986) propôs uma substituição do cimento Portland pelo cimento com alto teor de alumínio.

Segundo Pimentel (2000), pode-se também utilizar impermeabilizantes como, por exemplo, Neutrol, para criar sobre as partículas de madeira uma camada impermeável, que impeça a água de solubilizar os extrativos. Biblis *et al.* (1968) lavaram as partículas em água quente, para remover os extrativos.

Vários autores, citados por Moslemi *et al.* (1983), consideraram que alguns aditivos, como, por exemplo, o cloreto de cálcio, podem ser utilizados para acelerar a pega do cimento. Outros, como o cloreto férrico (FeCl_3), sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), cloreto de magnésio (MgCl_2) e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), têm sido usados para minimizar o efeito inibitório da madeira sobre a pega do cimento. Normalmente usam-se sais com dosagem de 1% a 5% em relação à massa de cimento.

2.4 Compósitos cimentícios reforçados por fibras de Sisal

2.4.1 Fibras de Sisal

O sisal é uma planta originada do México, fazendo parte da família Agavaceae. Segundo a literatura, o nome sisal tem como origem a cidade de Sisal, localizada no estado mexicano Yucatán, cujo porto foi o primeiro na exportação destas fibras no mundo. Apesar de ser de origem mexicana, os três principais produtores mundiais de sisal são o Brasil, a China e a Tanzânia. Segundo Melo Filho (2005), Ferreira (2012), e Martins (2014), a produção nacional de sisal concentra-se na região Nordeste, sendo os estados da Bahia e Paraíba os maiores produtores (cerca de 90% da produção).

As fibras de sisal são localizadas dentro das folhas da Agave no sentido longitudinal, e podem medir entre 1,0 e 1,5 m de comprimento, com um diâmetro em torno de 0,1 - 0,3 mm (LI *et al.* 2000, citado por SANTOS 2014). Após a colheita realizada manualmente, a desfibragem é feita golpeando-se vigorosamente a folha, sendo que a polpa que a envolve é eliminada mediante raspagem e lavagem simultânea (MOCHNACZ 2003). Em seguida, as fibras são secadas, escovadas, enfardadas e transportadas até a unidade de beneficiamento, onde são removidas as impurezas aderidas às fibras. Após essa etapa, as fibras são organizadas em fardos de aproximadamente 250 kg, identificados segundo normas do Ministério de Agricultura e Abastecimento (MAPA) e comercializados para as indústrias da Bahia, para outros estados ou o mercado internacional.



a)



b)

Figura 2.11: a) Corte das folhas; b) Enfardamento para venda

(Fonte: FERREIRA 2012)

As pesquisas de Neis (2008) mostraram pelo meio dos indicadores ambientais em energia (energia necessária para um ecossistema produzir um recurso), que o sistema de produção de fibras de sisal é sustentável. Este sistema apresenta melhor uso dos recursos em energia, e causa menor estresse ambiental em comparação com as fibras de curauá.

Segundo Chociai (1987) citado por Mochnacz (2003), a fibra de sisal industrializada é convertida em barbante, corda, tapetes, sacos, bolsas, chapéus, vassouras. Elas são utilizadas também em forma de mantas ou como carga em compósitos, na produção de peças para acabamento interno de veículos (NEIS 2008).

2.4.2 Composição e propriedades das fibras de sisal

Quimicamente, as fibras vegetais são constituídas de celulose, hemicelulose, lignina, pectina e uma pequena quantidade de substâncias graxas (MARTINS 2014). De acordo com Silva (2009), cada fibra é composta por várias fibro-células formadas pelas paredes primária, secundária, terciária e o lúmen. As fibro-células são ligadas umas as outras pela lamela central, a qual consiste de hemicelulose e lignina. O lúmen possui tamanho variado, porém a sua geometria é bem definida. As paredes celulares são formadas por varias camadas de estrutura fibrilar a qual é constituída por fibrilas conectadas por lignina. Na parede primária, as fibrilas possuem uma estrutura reticulada. Na parede secundária exterior (S1) as fibrilas são arranjadas em espirais com um ângulo de 40° em relação ao eixo longitudinal da fibra. As fibrilas na parede secundária interna (S2) possuem uma inclinação de 18 a 25° . A parede terciária (S3) possui estrutura fibrilar paralela e engloba o lúmen. As fibrilas são formadas por micro-fibrilas, que são compostas de cadeias moleculares de celulose conectadas por hemicelulose.

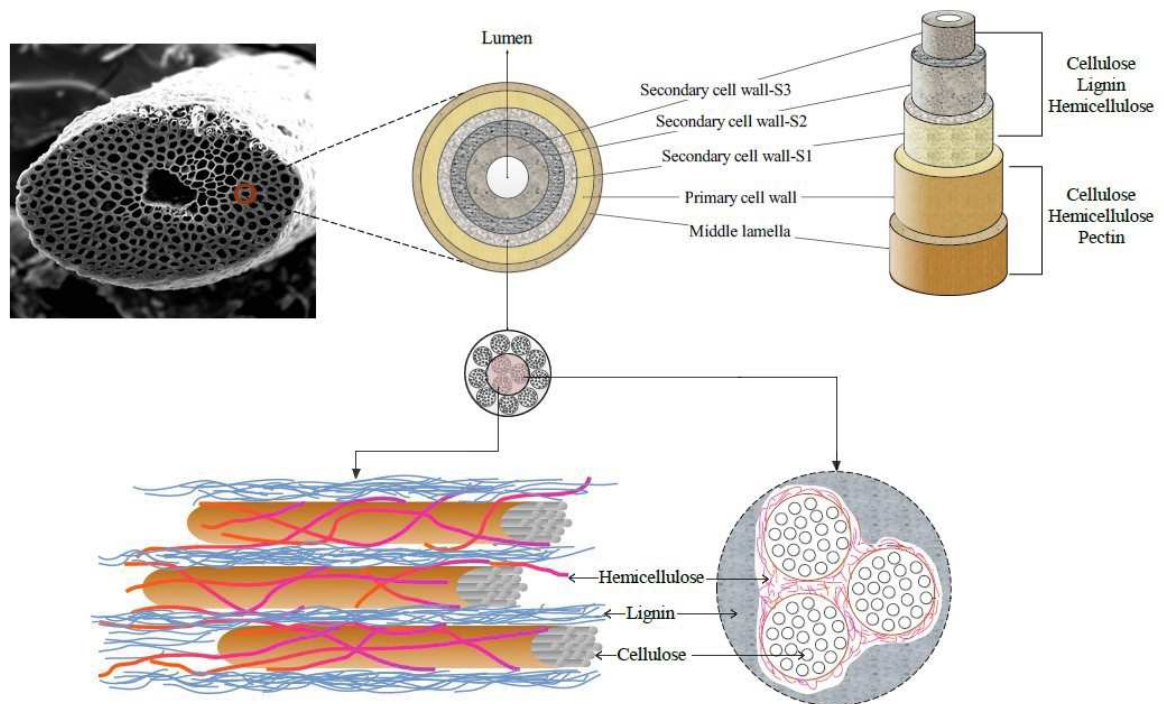


Figura 2.12: Estrutura e microestrutura da fibra de sisal
(Adaptada de FIDELIS 2014 e WEI 2014)

Na Tabela 2.2, são apresentadas propriedades físicas e mecânicas típicas da fibra de sisal segundo alguns pesquisadores.

Tabela 2.2: Valores típicos das propriedades das fibras de sisal

Propriedades	Valores	Referência
Massa específica aparente (g/cm^3)	0,9	Toledo Filho (1997)
Resistência à tração (MPa)	447	Ferreira (2012)
Módulo de elasticidade (GPa)	19	Toledo Filho (1997)
Deformação na ruptura (%)	$2,6 \pm 0,8$	Silva (2008)
Absorção de água (%)	220	Toledo Filho (1997)
Diametro (μm)	50-200	Mohanty <i>et al.</i> (2000)

2.4.3 Compósitos reforçados com fibras de sisal

Um compósito fibroso é um material constituído por um conjunto de fibras resistentes, incorporado numa matriz, que tem algumas propriedades menores do que

as fibras. No caso dos compósitos cimentícios, a matriz tem uma baixa resistência à tração, e uma baixa capacidade de absorção de energia após a fratura. Enquanto a matriz assegura a coesão do compósito e a transferência de tensões, as fibras têm o papel de aumentar a resistência à tração, a ductilidade e limitar a fissuração de primeiras idades por retração autógena (MAGNIONT 2010).

As propriedades mecânicas dos compósitos fibrosos dependem do tipo de fibras, da sua geometria (relação de aspecto), da fração volumétrica, das propriedades do compósito, do arranjo das fibras (particuladas, descontínuas, contínuas, randômicas), da adesão fibra-matriz.

Ferreira (2012) desenvolveu compósitos reforçados com 2, 3, 4, e 6% de fibras de sisal de comprimento 25 e 50 mm, dispersadas aleatoriamente. As fibras foram tratadas em vários ciclos de molhagem - secagem e incorporadas numa matriz autoadensável livre de hidróxido de cálcio (composta por 33% de cimento, 27% de metacaulinita e 40% de cinza volante). Seus resultados indicaram que quanto maior o volume e o comprimento das fibras, melhor o processo de fratura em tração e flexão. Nos compósitos confeccionados com 4 e 6% de fibras (comprimento 50 mm), observou-se o surgimento de múltiplas fissuras, tanto na flexão como na tração, com um aumento na capacidade de absorção de energia, e maior controle na abertura de fissuras. Também, os valores de primeira fissura em flexão diminuíram com o aumento do volume, enquanto na tração o comportamento contrario foi observado.

Melo Filho (2005) estudou o comportamento mecânico de laminados prensados e reforçados com fibras longas e alinhadas de sisal. Com frações volumétricas variando de 0 a 8%, os laminados foram formadas por 3 e 5 camadas de fibras. Ele usou uma matriz livre de CH, com 50% de substituição do cimento com metacaulinita e tijolo moído. Seus resultados indicaram um incremento na resistência à flexão dos compósitos, em cerca de 27% e um grande acréscimo na tenacidade, cerca de 120%. O comportamento pós-fissuração foi caracterizado pelo aparecimento de múltiplas fissuras, com um aumento significativo na resistência última do compósito (3 a 3,5 vezes na flexão).

Fidelis (2014) produziu compósitos cimentícios têxteis com fibra de juta tratada com polímero, incorporadas numa matriz livre de CH (composta por 40% de metacaulinita e 10% de cinza volante). A impregnação do polímero estireno butadieno aumentou a adesão fibra matriz. Isso foi anotado através da tensão nominal de aderência do filamento que passou da faixa 0,20 - 0,51 MPa para 0,37 - 1,02 MPa. O tratamento foi responsável pelo aumento da tenacidade em 155,7% e a melhora no processo de formação de fissuras (quantidade e espaçamento), além de aumento na tensão última. O autor observou também que o aumento do número de camadas de tecido mesmo sem tratamento, promoveu a formação de fissuras e acrescentou os valores de tensão última.

2.4.4 Durabilidade dos compósitos

Como os compósitos cimento madeira, os compósitos reforçados com fibras vegetais ainda não estão desenvolvidos a uma escala grande devido à sua durabilidade. A eficiência das fibras no desempenho ao longo do tempo dos compósitos depende principalmente, da durabilidade das fibras dentro da matriz de cimento. A maioria dos autores concorda sobre o fato que a alcalinidade da matriz, é em grande parte responsável da degradação das fibras.

Juarez *et al.* (2005) , mediram a resistência a tração e alongamento na ruptura de fibras de sisal, imersas numa solução de Ca(OH)_2 de pH igual a 12,5. Após 12 meses de imersão, as fibras conservaram cerca de 30% da resistência à tração, e somente 17 até 27% da ductilidade. Segundo Gram (1988), o primeiro mecanismo é a decomposição química da lignina e da hemicelulose na lamela media, que quebra a ligação entre as fibras individuais (fig 2.13), seguido pela mineralização da fibra. A mineralização da fibra ocorre por migração do CH nas suas paredes celulares, e afeta sua resistência (TOLEDO *et al.* 2000).

Para resolver esses dois problemas, foram desenvolvidos vários procedimentos, tanto no pré-tratamento da fibra, quanto na modificação da matriz. O mais eficiente foi o emprego de matrizes livres de hidróxido de cálcio, substituindo o cimento por materiais pozolânicos. Ferreira (2012) e Santos (2014) conseguiram matrizes livres

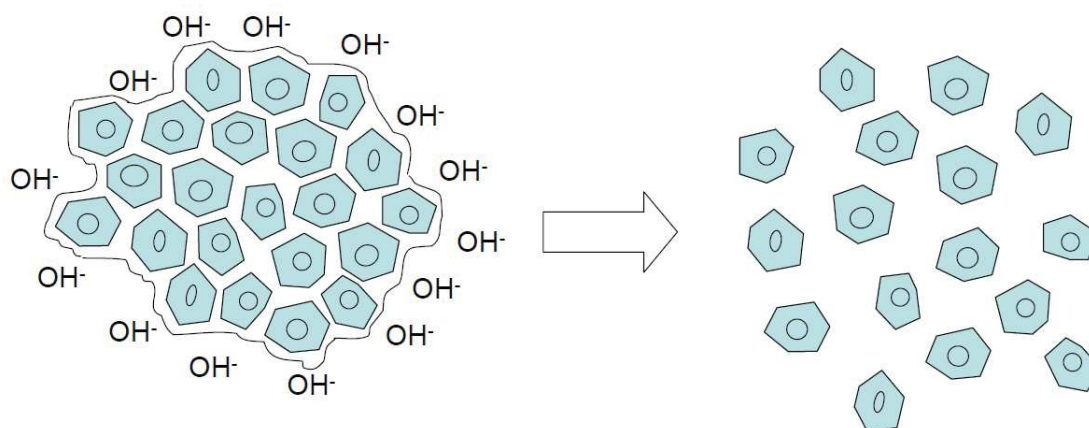


Figura 2.13: Representação esquemática da decomposição das fibras no meio alcalino (GRAM 1988)

de hidróxido de cálcio utilizando apenas 33% de cimento, 27 % de metacaulinita e 40% de cinza volante. A argamassa que eles desenvolveram teve ótima resistência à compressão (32 MPa) bem próxima da argamassa sem substituição de cimento.

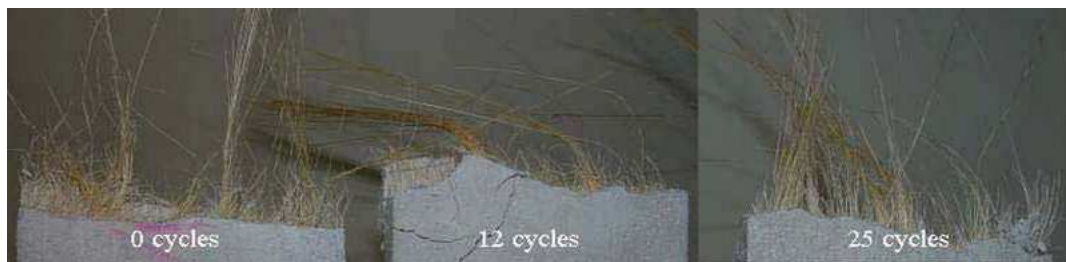
Melo Filho (2012) estudou a durabilidade química dos compósitos cimentícios, com matriz livre de hidróxido de cálcio (50% de cimento e 50% de metacaulinita) reforçados com fibras de sisal. Ele usou tanto fibras curtas (fração volumétrica de 2, 4 e 6%), como longas alinhadas unidirecionalmente e bidirecionalmente (fração de 6% e 10%). Algumas amostras foram submetidas a poucos ciclos de molhagem e secagem (5, 10, 15, 20 e 25), outras envelhecidas em sala climatizada por até cinco anos. Ele observou que mesmo após 25 ciclos de molhagem e secagem, os compósitos mostraram elevada resistência mecânica (tensão última de cerca de 21 MPa) e tenacidade (cerca de 10 kJ/m²), com formação de múltiplas fissuras. Quanto aos envelhecidos por 5 anos, eles apresentaram excelente comportamento mecânico com tensão última de cerca de 34 MPa e tenacidade de cerca de 18 kJ/m².

Lima (2004) obteve matriz livre de hidróxido de cálcio substituindo parcialmente 30% do cimento por metacaulinita. Usando esta matriz, ele avaliou através de ensaios de flexão em 4 pontos, a durabilidade de compósitos reforçados por 3% de fibras longas de sisal, distribuídas em duas camadas. Os compósitos foram submetidos ao envelhecimento acelerado, por meio de 12 ciclos e 25 ciclos de molhagem e secagem.

As amostras foram saturadas em água a 22°C durante 17 horas e depois, secadas por 30 horas em estufa a 70°C até perderem 65% da massa ganha. No final do ciclo, elas foram esfriadas ao ar por uma hora antes do ciclo seguinte para evitar fissuração por choque térmico. Após 25 ciclos de envelhecimento acelerado, o compósito apresentou menos de 30% de perda de resistência e tenacidade. O comprimento de arrancamento, após a ruptura por flexão, mostrou-se inalterado, quando comparado com a mistura sem envelhecimento, pois as fibras não apresentaram qualquer tipo de alteração visível.



a) Compósito de matriz com 100% de cimento



b) Composito de matriz com 70% de cimento e 30% de metacaulinita

Figura 2.14: Superfície de fratura de compósitos reforçados com fibras de sisal antes (0 ciclo) e após o envelhecimento acelerado (12 ciclos e 25 ciclos) (LIMA 2004)

2.5 Painéis Sanduíches

O painel sanduíche é um material compósito, formado basicamente de duas faces finas de material resistente, separadas por uma camada mais espessa de material (núcleo) com menor densidade. Mantendo uma distância constante entre as faces, a inserção do núcleo permite aumentar o momento de inércia da estrutura, e consequentemente sua rigidez em flexão, minimizando a massa do conjunto.

A junção das faces e do núcleo permite otimizar as funções de cada um. As faces fornecem o aspecto do painel, a resistência, a rigidez, enquanto o núcleo fornece resistência ao cisalhamento e impacto, baixa densidade, isolamento térmico e acústico. Assim, os painéis sanduíches podem ser elementos estruturais, isolantes térmicos e/ou acústicos. Em termos de desenvolvimento durável, devido à sua leveza, o elemento sanduíche apresenta um balanço energético vantajoso na fabricação, no transporte e na implementação. Tudo isto faz que as estruturas sanduíches venham sendo utilizadas nas mais diversas áreas, tais como aeroespacial, naval, civil, automobilística.

2.5.1 Estrutura do painel sanduíche

Uma estrutura sanduíche é representada de maneira esquemática na figura 2.15.

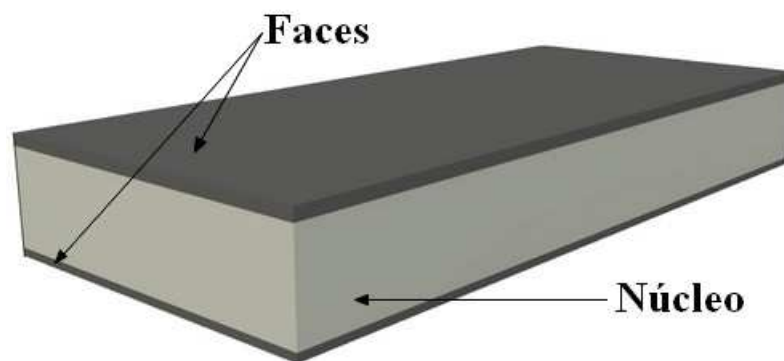


Figura 2.15: Estrutura geral de painel sanduíche

As faces

Geralmente finas e de mesma espessura, as faces são compostas de materiais rígido e resistente. Elas podem ser em madeira, alumínio, chapa de aço inoxidável, concreto, argamassa, entre outros. As faces devem apresentar estanqueidade ao vento, à água e vapor de água, resistência à flexão, à corrosão e ao fogo.

ALLEN (1969) classifica as faces das estruturas tipo sanduíche em função das espessuras das faces, com base nas seguintes relações:

Faces muito finas: $\frac{d}{t} > 100$

Faces finas: $100 > \frac{d}{t} > 5,77$

Faces grossas: $\frac{d}{t} < 5,77$

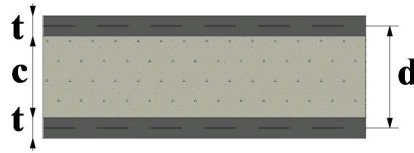


Figura 2.16: Seção transversal de um painel sanduíche

Onde:

d: a distância entre os eixos das faces;

t: a espessura das faces;

c: a espessura do núcleo.

O núcleo

Quanto ao núcleo, ele tem uma espessura maior e uma baixa densidade. O objetivo da grande espessura é aumentar a inércia do painel, sem um aumento significativo da massa volumétrica. Como mostra a figura 2.17, uma estrutura sanduíche de espessura «4.t» é 37 vezes mais rígida do que aquela de espessura «t», para um aumento de apenas 6% do seu peso (MAROUENE 2010).

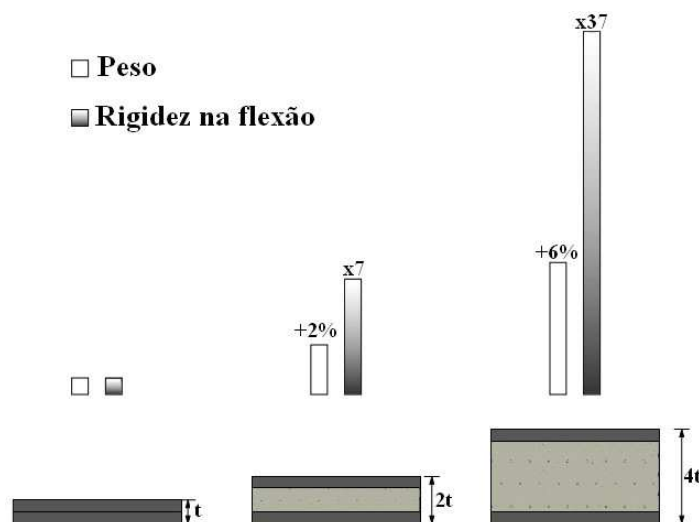


Figura 2.17: Efeito da espessura do núcleo sobre a rigidez na flexão do sanduíche
(Adaptada de MAROUENE 2010)

O núcleo tem baixa resistência à flexão, trabalha em compressão e cisalhamento. Ele deve apresentar uma rigidez suficiente para manter constante a distância entre as faces, assim como não permitir o deslizamento delas. Os núcleos fornecem também o isolamento térmico e/ou acústico. Eles podem ser uma variedade de espumas (vidro, borracha, poliuretano), lãs materiais reciclados de rejeitos industriais, concreto celular, gesso, ou favos de mel (SPOSTO 1995).

Os adesivos

Entre o núcleo e as faces, em alguns casos e dependendo dos tipos de materiais utilizados é necessária a utilização de uma camada de ligação chamada adesivo. Ele assegura a ligação entre as faces e o núcleo. Ela tem que ser contínua, sem porosidade, de espessura constante, com uma ótima resistência ao cisalhamento (NOOR AK. *et al.* 1996). Eles são a base de solvente e aplicado na forma líquida em ambas as superfícies e posteriormente prensadas.

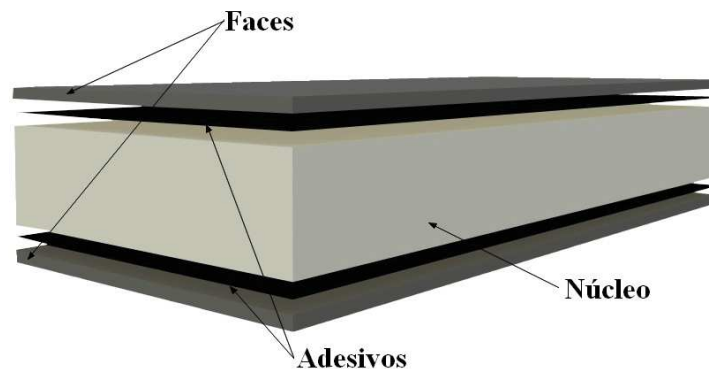


Figura 2.18: Estrutura geral de painel sanduíche

2.5.2 Modos de ruptura dos sanduíches

Flambagem geral das faces

Uma viga sanduíche submetida à compressão pode flambar sob o efeito da instabilidade ao longo do seu comprimento. A flambagem generalizada pode também ocorrer mesmo quando, as tensões nas faces e no núcleo são inferiores às suas resistências à ruptura respectivas. Esse tipo de deformação é causado por uma espessura insuficiente da estrutura ou uma baixa rigidez das faces e do núcleo (ARBAOUI 2009).

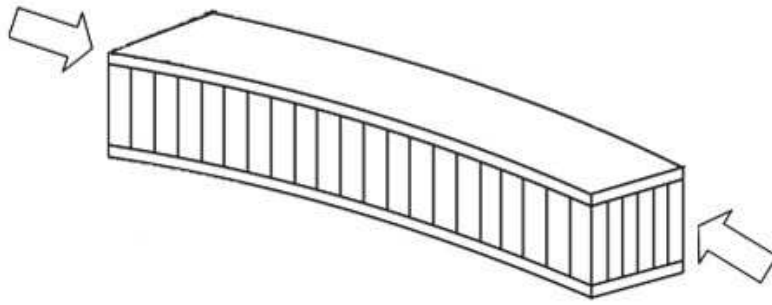


Figura 2.19: Flambagem general das faces
(ARBAOUI 2009)

Flambagem local das faces

Considerando-se as faces sozinhas, sem a conexão com o núcleo, elas flambam facilmente por causa da baixa espessura. Então a presença do núcleo impede a flambagem. No entanto, ultrapassando a resistência à compressão das faces, o núcleo não consegue mais assegurá-las e assim, a flambagem local das faces ocorre.

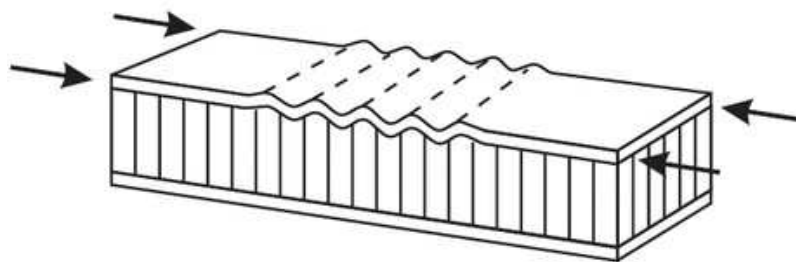


Figura 2.20: Flambagem local das faces
(ARBAOUI 2009)

Ao contrário da flambagem geral, a flambagem local pode ter varias configurações diferentes, independentemente da geometria da estrutura. Mas a flambagem é influenciada pelos módulos de elasticidade das faces e do núcleo, e também o módulo de cisalhamento do núcleo. Para evitar esta flambagem, pode-se utilizar para as faces, um material de alto módulo de elasticidade, ou um núcleo apresentando propriedades elásticas mais elevadas (ARBAOUI 2009).

Ruptura das faces em tração ou em compressão

Neste caso, as tensões nas faces são superiores às tensões admissíveis pelo material constituindo as faces. Esse fenômeno pode ser evitado utilizando faces de material mais resistente, ou aumentando a espessura das faces (isto reduz as tensões aplicadas), ou aumentando a espessura do núcleo (isto reduz também as tensões nas faces). No entanto, um núcleo mais denso não afeta as tensões nas faces (LACHGUER 2013).

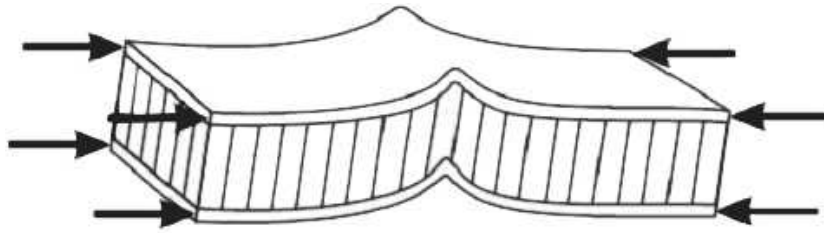


Figura 2.21: Ruptura das faces em compressão
(ARBAOUI 2009)

Ruptura do núcleo em cisalhamento

Se a tensão de cisalhamento ultrapassa a resistência ao cisalhamento do material do núcleo, ocorre sua ruptura. Neste caso, pode-se utilizar um núcleo mais resistente ao cisalhamento ou aumentar sua espessura. A troca de material ou o aumento da espessura, das faces não terá influência no comportamento (ARBAOUI 2009).

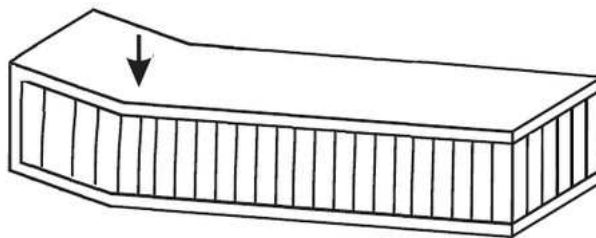


Figura 2.22: Ruptura do núcleo por cisalhamento
(ARBAOUI 2009)

Flambagem geral do núcleo ou crimping

Este tipo de flambagem, também chamado flambagem irregular ocorre quando a resistência ao cisalhamento do núcleo é muito baixa (LACHGUER 2013). A flambagem do núcleo não depende das propriedades das faces, mas aumenta linearmente com a espessura e o módulo de cisalhamento do núcleo. A flambagem general do núcleo pode se evitar, aumentando sua espessura, ou usando um núcleo com maior resistência ao núcleo.

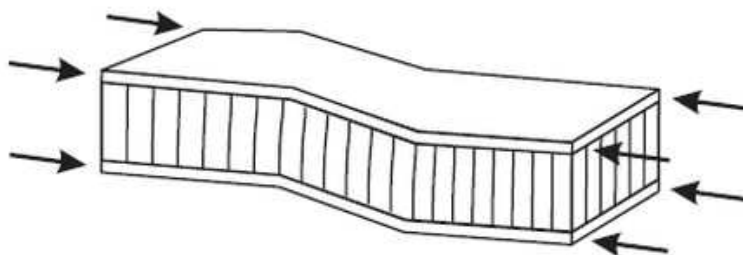


Figura 2.23: Flambagem general do núcleo
(ARBAOUI 2009)

2.5.3 Estudos realizados sobre estruturas sanduíches com compósitos cimentícios

Vários autores estudaram os comportamentos das estruturas sanduíches através de ensaios de laboratório e análise numérica.

Colombo *et al.* (2014) buscaram as características mecânicas de painéis sanduíches com núcleo em poliestireno expandido (EPS 250) e faces em concreto reforçado por tecido de vidro (TRC). Cada face tinha 10 mm de espessura enquanto o núcleo tinha 100 mm. Através de ensaios de flexão em 4 pontos de 2 vigas sanduíches (grande e pequena), juntamente com as simulações numéricas desenvolvidas, os autores conseguiram identificar vários mecanismos de ruptura. Na pequena viga de dimensões 550x150x120 mm, a principal ruptura foi por tração da face inferior, através de um processo de múltipla fissuração. Pode se citar também a ruptura por cisalhamento do núcleo e seu descolamento da face superior nas extremidades da viga, devido a uma concentração de deformação plástica nestas regiões (figura 2.24 a, b). Na

viga maior de dimensões 1200x300x120 mm, o cisalhamento do núcleo foi mais perceptível e precipitou a ruptura da viga, que não foi por tração da face inferior como no caso da viga menor (figura 2.24 c).

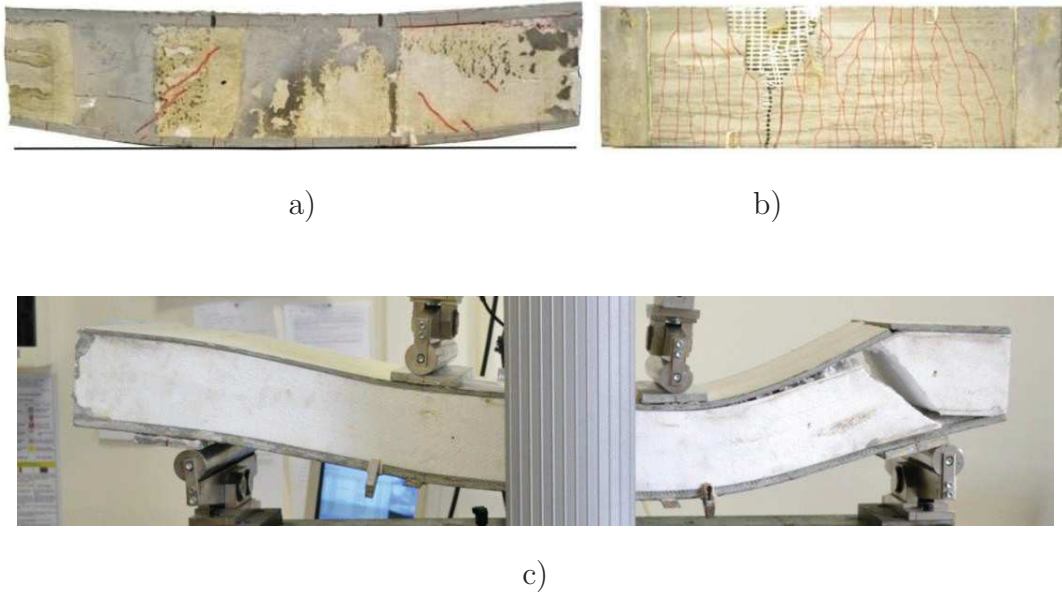


Figura 2.24: a) Face inferior do pequeno painel b) Vista lateral do pequeno painel c) Vista lateral do grande painel

(Fonte Colombo *et al.* (2014))

Alacez-Ramires *et al.* (2012) avaliaram o potencial uso de fibra de coco como material de isolamento térmico para paredes do painel de ferrocimento (figura 2.25) na configuração sanduíche de escolas e casas em Puerto Escondido no México. Através de ensaio de condutividade térmica, eles compararam o comportamento térmico de paredes de painel de ferrocimento com núcleo em fibra de coco e outros materiais de construção típica da região. O painel apresentou uma condutividade de 0.221 W/mK, e se mostrou mais isolante do que os materiais convencionais.

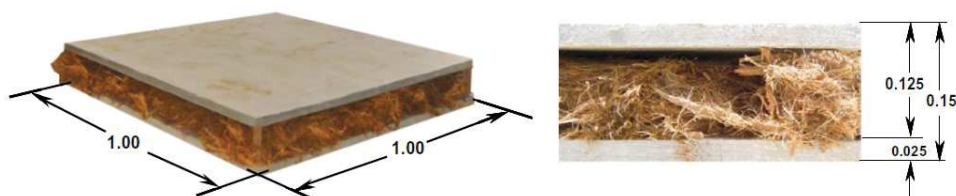


Figura 2.25: Dimensões do painel sanduíche com núcleo de fibras de coco

(Fonte Alacez-Ramires *et al.* (2012))

Raj *et al.* (2015) investigaram o comportamento experimental de painéis sanduíches de faces compostas por compósitos reforçados por fibras de basalto (BFRC), enquanto o núcleo foi em folhas de aço nervuradas. A carga máxima atingida no ensaio foi 25 kN para um deflexão de 10 mm. Na região pos-pico, o painel apresentou uma deflexão de 200% a mais do que a deformação de pico, com apenas 10% de redução de carga. A ruptura principal ocorreu por esmagamento da face superior.

Dey *et al.* (2015) estudaram o comportamento na flexão em 3 pontos sob carregamento estático e dinâmico de baixa velocidade de dois painéis sanduíches, de faces em argamassa reforçada por duas camadas de tecido de fibras de vidro álcali-resistente. Um tinha seu núcleo em concreto autoclavado celular (AAC) enquanto o outro era em concreto celular reforçado por fibras poliméricas (FRAC). Os autores observaram que as faces tanto inferiores quanto superiores promoveram significativamente a rigidez na flexão, a resistência e a capacidade de absorção de energia dos painéis. A resistência sob carregamento dinâmico se mostrou 4 vezes maior. Eles ressaltaram também que o comportamento dos sanduíches dependia das propriedades de cada elemento constitutivo e das interfaces núcleo-faces.

Capítulo 3

Materiais e procedimentos experimentais

A pesquisa realizou-se em quatro etapas a seguir:

- a) Caracterização dos materiais por meio de ensaios normalizados;
- b) Estudo progressivo de vários traços alterando as relações cimento/serragem em massa (de 0,5 até 3), por meio da medida de resistência à compressão uniaxial e da densidade aparente, e condutividade térmica. Esta etapa permitiu a escolha de dois traços, que serviram de núcleos para os painéis sanduíches. O primeiro núcleo teve uma densidade baixa, enquanto o segundo núcleo, uma densidade elevada.
- c) Avaliação do comportamento em flexão e tração direta de laminados de argamassa reforçada por 6% de fibras longas de sisal alinhadas unidirecionalmente, e repartidas em três camadas.
- d) Moldagem dos painéis sanduíches, com os dois núcleos de cimento madeira escolhidos na etapa b, e as faces em laminados de argamassa reforçada com fibras longas de sisal, para avaliação das propriedades físico-mecânicas.

3.1 Caracterização dos Materiais

3.1.1 Serragem de madeira

Os resíduos de madeira usados nesse estudo foram coletados na marcenaria Madeirama no Rio de Janeiro, na forma de serragem. Ela provem de mistura aleatória de quatro árvores que são: Maçaranduba, Angelim Pedra, Cedro e Cedrinho.

Tabela 3.1: Identificação das espécies coletadas

Nome comum	Família	Nome científico	Tipo de madeira
Maçaranduba	Sapotaceae	Manilkara salzmanni	Dicotiledônea
Angelim pedra	Fabaceae	Hymenolobium petraeum	Dicotiledônea
Cedro	Meliaceae	Cedrela fissilis	Dicotiledônea
Cedrinho	Vochysiaceae	Erisma uncinatum Warm	Conífera

Após homogeneização, a serragem coletada foi peneirada na peneira de 1,18 mm, para tirar sua parte fina, que potencialmente poderia liberar mais extrativos, e absorver mais água (devido a sua grande área específica). Assim, a fração de partículas utilizada no trabalho foi a maior do que 1,18 mm.



a)



b)



c)

Figura 3.1: a) Peneiramento da serragem b) Fração < 1,18 mm c) Fração > 1,18 mm

A serragem foi em seguida acondicionada em sacos plásticos e armazenada numa sala de 20°C até sua utilização. A figura 3.2 mostra a distribuição granulométrica da serragem através de peneiramento, de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR NM 248 (2003), enquanto a figura 3.3 mostra a serragem empregada.

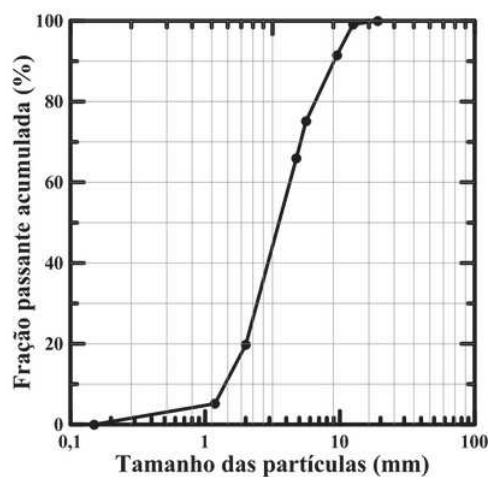


Figura 3.2: Curva granulométrica da Serragem de madeira



Figura 3.3: Serragem de madeira utilizada

Baseado na NBR 9939/2011, foi determinado o teor de umidade do resíduo de madeira seco ao ar livre. Três amostras de 100 g do resíduo foram colocadas em bandejas metálicas, e levadas à estufa em temperatura regulada para 105°C, durante 24 horas. Após este período, foram novamente pesadas, sendo que o teor de umidade foi calculado utilizando-se a equação 3.1.

$$U = \frac{(M_i - M_f)}{M_f} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

U= teor de umidade, em porcentagem;

M_i = massa inicial da amostra (g);

M_f = massa final da amostra seca (g).

Além da umidade da serragem de madeira, foram também determinados a massa específica assim como a absorção pela norma NM 52:2002 (Figura 3.4).

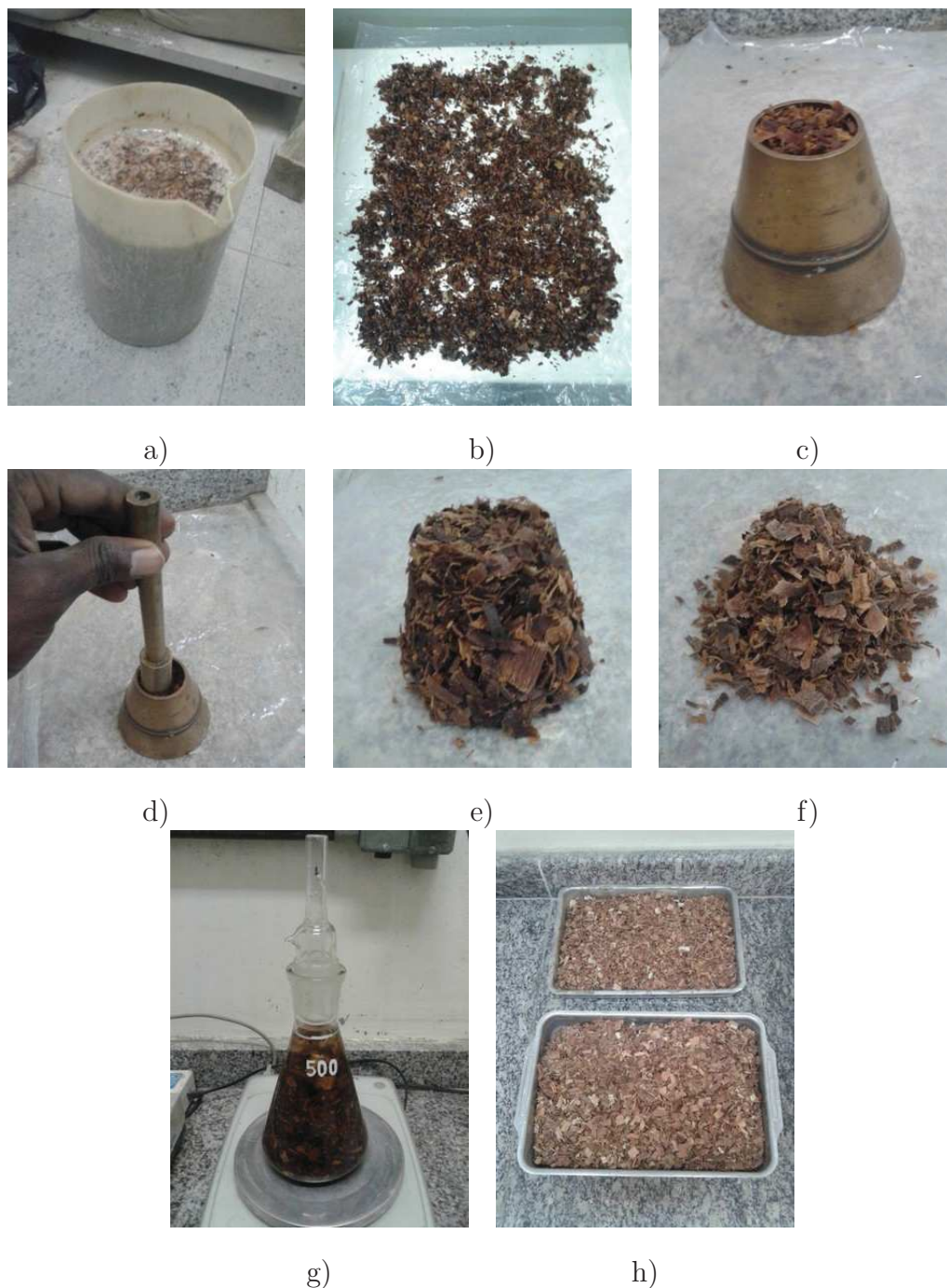


Figura 3.4: a) Embebimento em água por 24h b) Secagem ao ar livre c) Serragem no molde tronco-cônico d) Aplicação de 25 golpes com a haste e) Material saturado superficialmente úmido f) Material saturado superficialmente seco g) 100 g de amostra no frasco de 500 ml h) Material após secagem na estufa de 105°C

A massa específica e a absorção foram calculadas respectivamente pelas equações (3.2) e (3.3):

$$\gamma = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (3.2)$$

$$A = \frac{(m_s - m)}{m} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde:

γ = massa específica da serragem (g/cm³);

A = absorção de água (%);

m = massa da amostra seca em estufa (g);

m_s = massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

V = volume do frasco (cm³);

V_a = volume de água adicionada ao frasco (cm³);

ρ_a = massa específica da água (g/cm³).

A tabela 3.2 apresenta os valores da umidade da serragem utilizada, sua massa específica e absorção.

Tabela 3.2: Umidade, massa específica e absorção da serragem

Umidade (%)	Massa específica (g/cm ³)	Absorção (%)
13.66	1.20	48.12

3.1.2 Fibras de sisal

As fibras de sisal foram fornecidas pela APAEB (Associação de Desenvolvimento Sustentável e Solidário da Região Sisaleira, município de Valente, Bahia), na forma de fardos e em comprimentos variando de 90 cm a 100 cm. Antes de serem introduzidas na matriz, as fibras foram lavadas durante uma hora em água quente (80°C) com o objetivo de remover os resíduos aderidos na sua superfície (graxas e resinas naturais). Em seguida, elas foram hornificadas em cinco ciclo de molhagem secagem, segundo o processo utilizado por Ferreira (2012). Depois da hornificação, elas foram secadas em uma sala com temperatura controlada de 40°C. Uma vez secas, as fibras

foram escovadas para alinhamento, através de uma prancha de madeira com pregos, facilitando assim o seu corte com uma guilhotina (figura 3.5), nos comprimentos desejados (40cm, 90cm).



Figura 3.5: Pente de pregos (esquerda) Guilhotina (direita)

3.1.3 Cimento portland, metacaulinita e cinza volante

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o CP II E-32, composto com escória de alto forno. A cinza volante foi fornecida pela POZOFLY, e a metacaulinita

Os ensaios de caracterização foram feitos no laboratório de Técnicas Analíticas do Labest/COPPE/UFRJ. As granulometrias (figura 3.6) foram determinadas por meio do equipamento a laser Malvern MasterSizer 2000.

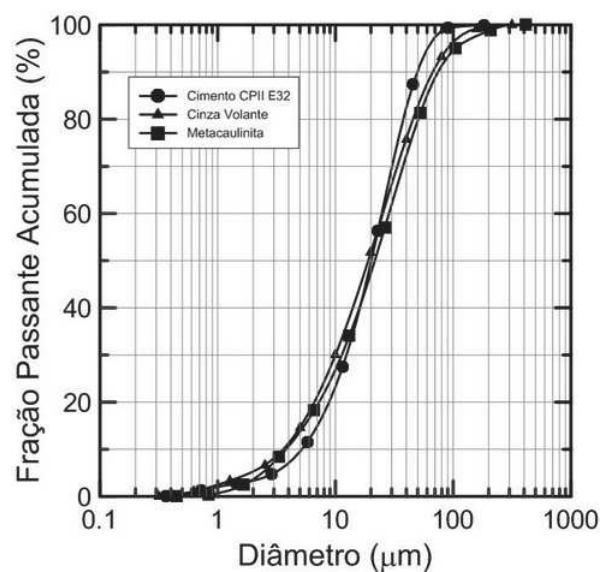


Figura 3.6: Curva granulométrica do CP II E-32, da cinza volante e da metacaulinita

O Malvern MasterSizer 2000 se baseia na técnica de espalhamento de luz, ou seja, consiste na medição dos ângulos de difração do raio laser, que são relacionados aos diâmetros das partículas. Para promover a separação dos aglomerados de partículas, de forma a evitar erros nas medidas de tamanho, usa-se dispersante em que o material analisado não seja solúvel. O dispersante usado para a metacaulinita e a cinza volante foi a água, enquanto o álcool etílico absoluto P.A. foi usado para o cimento.

Foram também determinadas as composições químicas desses materiais, usando espectrômetro de fluorescência de Raios X por energia dispersiva de raios X (EDS), modelo EDX-720 da Shimadzu. Este espectrômetro tem tubo de tensão 5kW, alvo de ródio (Rh), e detector de silício-lítio (SiLi) resfriado por nitrogênio líquido. A densidade foi determinada em picnômetro a gás hélio, da marca Micromeritics, modelo AccuPyc 1340.

Tabela 3.3: Composição química: CP II E-32, metacaulinita e cinza volante

Elementos Químicos	CP II E-32	Cinza Volante	Metacaulinita
CaO	65,800	2,47	2,62
SiO ₂	23,050	51,58	46,22
SO ₃	1,930	1,51	0,38
Al ₂ O ₃	5,240	38,24	48,22
Fe ₂ O ₃	2,010	-	1,02
TiO ₂	0,280	1,3	0,41
MgO	1,690	-	-
K ₂ O	-	3,39	0,97
MnO	-	1,51	0,16
Densidade (g/cm³)	3,12	2,18	2,65

As análises termogravimétricas foram realizadas no equipamento modelo SDT Q600 TGA/DTA/DSC Simultâneo da TA Instruments. O equipamento operou com taxa de aquecimento de 10°C/min com temperatura ambiente até aproximadamente 1000°C em atmosfera de nitrogênio e fluxo do registrador de 100 mL/min.

3.1.4 Areia

Para a realização da presente pesquisa, foi utilizada uma areia quartzosa de rio, com massa específica de $2,67 \text{ g/cm}^3$ e partículas menores de que $840 \mu\text{m}$ (ABNT Peneira n° 20) (ver Figura 3.7.).

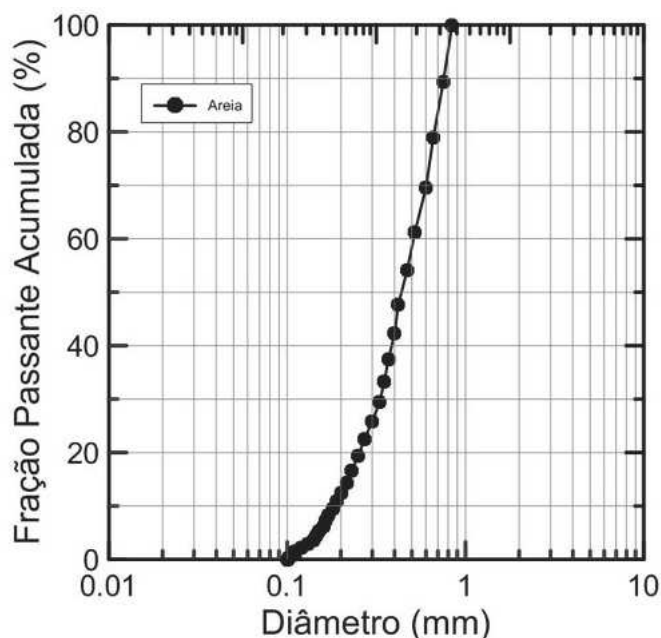


Figura 3.7: Curva granulométrica da areia utilizada

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 Aditivos químicos

Superplastificante

O superplastificante utilizado foi o Glenium 51 de tipo éter policarboxílico, produzido pela empresa BASF. Com um teor de sólidos de 30%, o dispersante tem uma densidade em torno de $1,073 \text{ kg/m}^3$ e o pH em torno de 6.

Cloreto de Cálcio

O cloreto de cálcio puríssimo anidro foi utilizado com o objetivo de acelerar a pega do cimento. O teor de 3% em relação à massa de cimento foi usado, se baseando no bom desempenho nas pesquisas realizadas por Fuwape *et al.* (1993), Latorraca (2000), Pimentel (2000) e Iwakiri *et al.* (2012).

3.2 Produção dos compósitos

3.2.1 Compósito Cimento-Madeira

Dosagem dos compósitos

Para a produção dos compósitos cimento serragem, várias relações Cimento/Serragem foram utilizadas, com o intuito de avaliar as variações de densidade e resistência. Foram escolhidas na primeira produção as relações C/S em massa de 0,5, 1, 2 e 3. Nas produções seguintes, foram introduzidas as relações C/S de 2,5 e 2,25. Foi utilizado 3% de cloreto de cálcio por massa de cimento, e uma relação água/cimento inicial de 0,4 para todos os compósitos. Na moldagem dos compósitos de C/S 0,5 e 1, a mistura foi muito seca e a relação A/C teve que ser aumentada para 0,45 no caso desses dois compósitos com menor cimento.

Tabela 3.4: Relação mássica entre os materiais

Mistura	Cimento	Serragem	Água	CaCl ₂
CCM 0,5	1	2	0,45	0,03
CCM 1	1	1	0,45	0,03
CCM 2	1	0,5	0,4	0,03
CCM 2,25	1	0,444	0,4	0,03
CCM 2,5	1	0,4	0,4	0,03
CCM 3	1	0,333	0,4	0,03

Tratamento da serragem

O primeiro passo da produção dos compósitos cimento-madeira foi a lavagem da serragem de madeira em água quente (80°C), para tirar os extrativos. Esta lavagem

foi feita colocando a água morna e a serragem dentro de uma panela, que foi aquecida sobre uma chapa quente. A lavagem demorou uma hora, e é seguida por trinta minutos de resfriamento e troca da água. Depois da primeira lavagem, foi observada uma forte coloração marrom escura da água figura 3.8.a, devido à grande presença dos extrativos, como o extrativo responsável da cor.



Figura 3.8: a)Início da lavagem na panela b)Coloração da água depois da 1ª lavagem

A variação da coloração da água foi analisada fazendo mais lavagens até a obtenção de uma coloração mais clara, sinônimo de maior retirada de extrativos. Assim foram feitos nove ciclos (lavagem - resfriamento- troca da água), como ilustrado na figura 3.9. Para as moldagens, foi adotado cinco ciclos de lavagens, pois a coloração da água na quinta lavagem, ficou muito mais clara do que das três primeiras.



Figura 3.9: Variação da tinta da água depois 9 lavagens

Uma vez lavada, a serragem foi seca numa sala de 40°C por dois dias, tempo suficiente para voltar à umidade natural da serragem. Antes da moldagem, ela foi pesada, saturada em água por 24h para evitar a absorção da água de hidratação do cimento. Em seguida a serragem foi seca numa sala de 20°C, UR 60%, até o estado saturado superficialmente seco.



Figura 3.10: Secagem da serragem na sala de 20°C antes da moldagem

Moldagem

Na produção dos compósitos cimento-madeira, a sequência do processo de mistura consistiu em:

- Mistura prévia da água e do cloreto de cálcio (em recipiente);
- Lançamento do cimento e da água na betoneira, misturando-os por 1 minuto para iniciar as primeiras reações entre o cimento, a água e o acelerador de pega;
- Parada de 30 segundos para retirada de cimento retido na argamassadeira;
- Mistura por mais 1 minuto;
- Lançamento da serragem de madeira no estado saturado superficialmente seco;
- Mistura por 3 minutos;
- Parada de 30 segundos para retirada de material retido na argamassadeira;
- Mistura por 1 minutos.

No final da mistura, os compósitos frescos foram colocados em três camadas nos moldes previamente lubrificadas por óleo mineral. Cada camada foi adensada manualmente por meio de haste, e depois do adensamento da última camada, os corpos-de-prova foram vibrados mecanicamente na mesa vibratória (68 Hz) por 30 segundos.

Os corpos-de-prova foram mantidos por 24h nos moldes, protegidos da perda de umidade. Os compósitos CCM 0,5 e CCM 1 por terem pouco cimento, ficaram 72h antes de serem desmoldados, afim de apresentar uma boa rigidez. Após a desmoldagem, os corpos-de-prova foram levados para a câmara úmida, com umidade relativa de 100% e temperatura de $21 \pm 2^\circ \text{C}$, onde permaneceram no tempo de cura.



Figura 3.11: a) Lançamento do cimento b) Pasta de cimento c) Lançamento da serra-gem de madeira d) Compósito obtido e) Compósitos colocados nos diferentes moldes e) Manta de proteção contra a perda de umidade

3.2.2 Laminados reforçados com fibras de sisal

Dosagem da matriz

A matriz escolhida neste trabalho foi baseada no traço utilizado por Ferreira (2012) com intuito de obter uma matriz livre de hidróxido de cálcio. Em seu estudo, Ferreira (2012) substituiu parcialmente o cimento CP II F por 27% de metacaulinita comercial, e 40% de cinza volante, tendo assim apenas 33% de cimento. Uma mudança do cimento foi feita para avaliar as características dos compósitos com outro cimento com adição, o CP II E. Como pode ser observado na figura 3.12, as análises termogravimétricas da pasta nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias indicaram que o hidróxido de cálcio foi consumido pelas pozolanas pois entre 380° e 450°C onde ocorre a desidroxilação do hidróxido de cálcio, não houve nenhuma perda de massa.

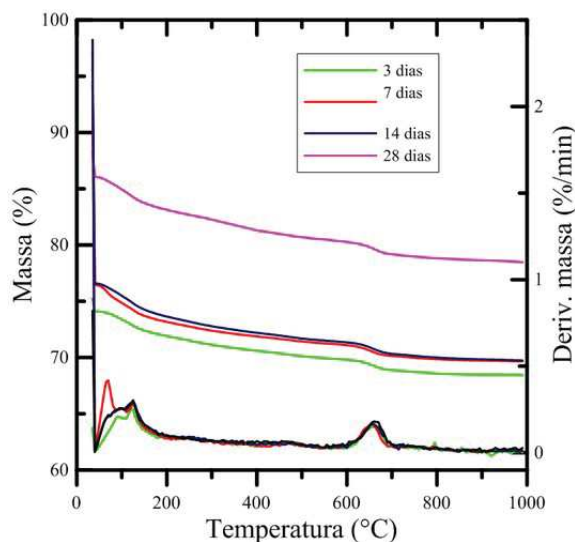


Figura 3.12: Análise termogravimétrica da matriz em diferentes idades

A matriz foi produzida com uma areia de diâmetro máximo de 840 μm , uma relação aglomerante:areia de 1:0,5 e o fator água:aglomerante de 0,40. Em ausência de fibras curtas na misturas, não foi necessário o uso de modificador de viscosidade (VMA). De acordo com a norma NBR 13276 (ABNT, 2005), a consistência padrão foi determinada, para a avaliação do ponto de saturação do superplastificante na matriz bem como a quantidade de aditivo para a manter fluida (tabela 3.5).

Como a mistura 5 apresentou o maior espalhamento e uma boa consistência (figura 3.13), o teor SP* de 18,95 foi escolhido. Assim a dosagem por metro cúbico da argamassa é mostrada na tabela 3.6:

Tabela 3.5: Valores de espalhamento da argamassa para diferentes teores de SP (Consumo em kg/m³)

Mistura	Aglomerante	Água	Areia	SP	Espalhamento (mm)
1	1097	548,5	439	16,62	24,5
2	1097	548,5	439	17,29	26
3	1097	548,5	439	17,95	28
4	1097	548,5	439	18,62	31,5
5	1097	548,5	439	18,95	37

Tabela 3.6: Consumo em kg/m³ de materiais na matriz utilizada

Cimento	MTC	CV	Água	Areia	SP
362	296	439	548,5	439	18,95

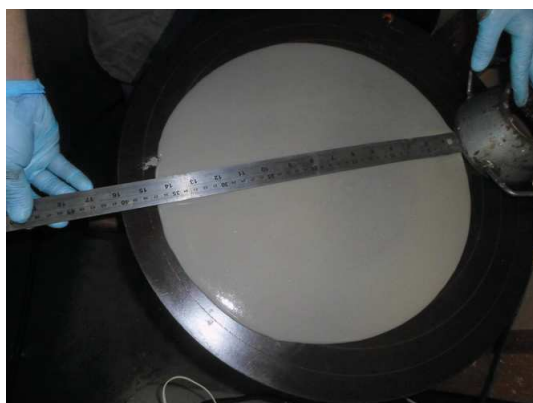


Figura 3.13: Espalhamento da mistura 5

Preparação das fibras de sisal

Para se garantir uma distribuição uniforme, um bom alinhamento das fibras nos diferentes laminados, e facilitar a moldagem, as fibras foram coladas com uma camada fina de pasta de cimento ($A/C=0,5$). Uma vez pesadas, as fibras foram distribuídas em função da largura do laminado a obter, e suas extremidades prendidas entre duas madeiras para esticá-las. A pasta foi colocada nas fibras apoiadas na madeira inferior usando uma pipeta e uma espátula, a madeira inferior sendo vedada com folha de alumínio, para facilitar a retirada da pasta endurecida no dia seguinte (Figura 3.14).

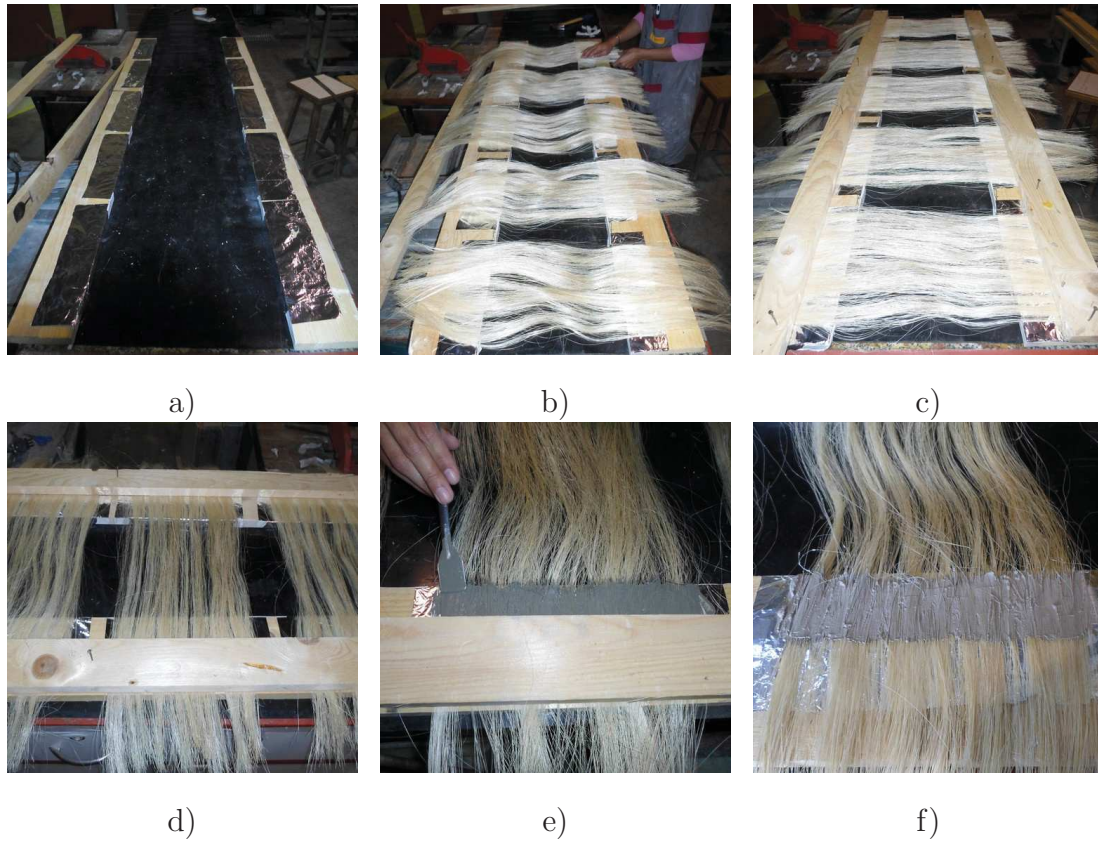


Figura 3.14: a)Madeira inferior parcialmente vedada com folha de alumínio b)Fibras espalhadas na madeira c)Fibras prendidas nas extremidades d)Fibras alinhadas e esticadas e)Colocação da pasta de cimento nas fibras f)Retirada das fibras com a pasta endurecida

Produção da argamassa

A argamassa foi preparada em uma argamassadeira com capacidade de 20l se baseando no método utilizado por FERREIRA (2012). A moldagem consistiu em:

- Mistura prévia da água + superplastificante;
- Mistura dos materiais finos na argamassadeira (1 min) e lançamento da água;
- Mistura dos materiais durante 2 minutos;
- Parada de 30 segundos para retirada de material retido na argamassadeira;
- Mistura por mais 2 minutos.

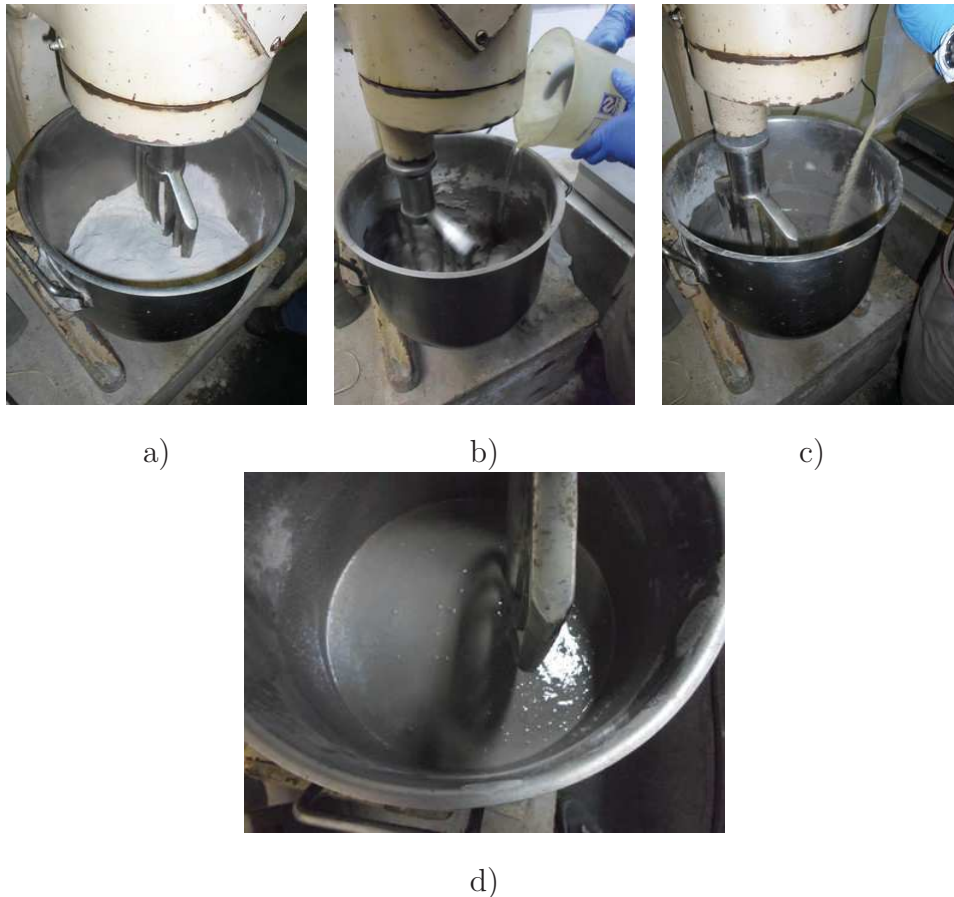


Figura 3.15: a) Lançamento dos materiais cimentícios b) Lançamento da água c) Lançamento da areia d) Argamassa obtida

Produção do laminado

Após a produção da argamassa, iniciou-se a moldagem do laminado (espessura 1 cm) reforçado com fibras longas de sisal se baseando no procedimento de MELHO FILHO (2005). Para se garantir a espessura das camadas de argamassa, foi calculada a massa de argamassa por camada, usando o volume e a massa específica da mistura fresca. Uma vez o molde (45 x 45 x 2,5 cm) lubrificado, a sequência de produção foi:

- Colocação da camada de argamassa (946 g); (a)
- Espalhamento da argamassa usando uma espátula; (b)
- Colocação da camada de fibras (32,4 g), pressionada manualmente para que as fibras penetrassem na matriz; (c)
- Repetição duas vezes das etapas a, b, e c;
- Colocação da última camada de argamassa;

- Vibração mecânica por meio da mesa vibratória (30s).

Após a moldagem, os corpos de prova foram colocados na câmara úmida, onde foram desmoldados, e curados até o dia de ensaio (figura 3.16).

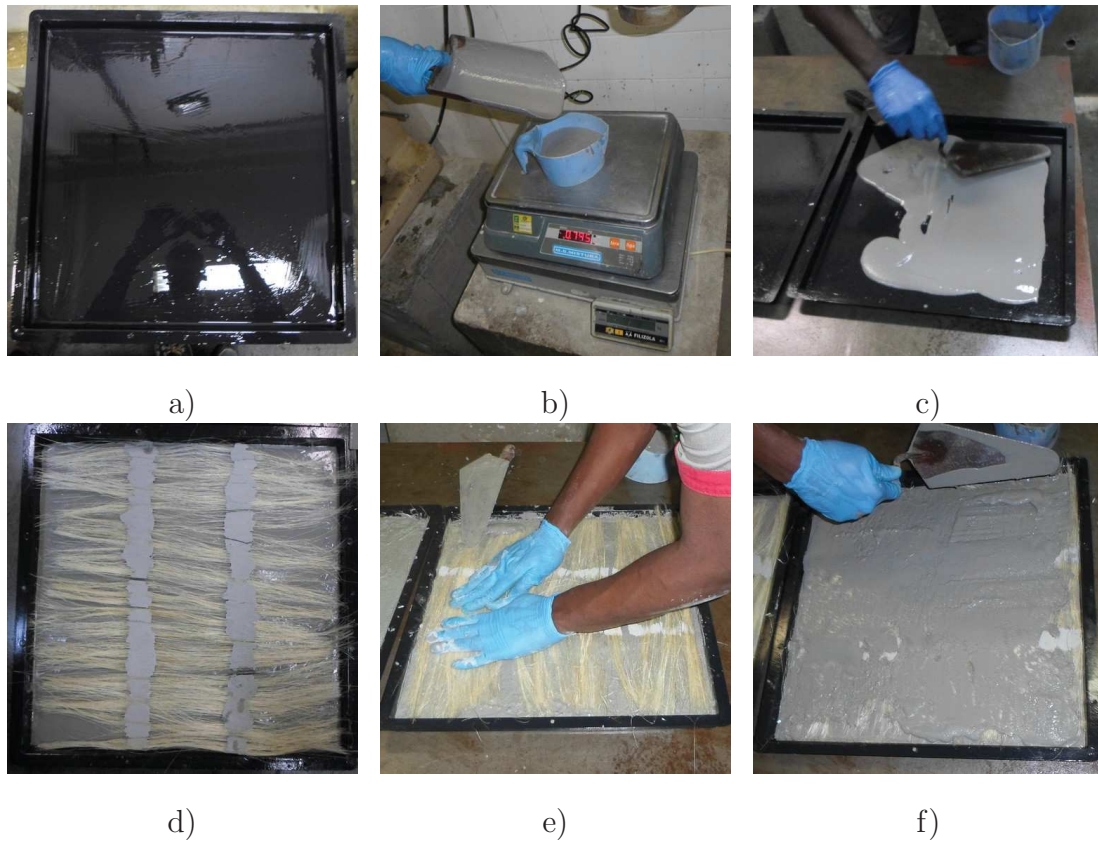


Figura 3.16: a) Molde lubrificado b) Pesagem da argamassa de uma camada c) Espalhamento da argamassa d) Colocação das fibras e) Prensagem manual das fibras f) Espalhamento da argamassa em cima das fibras

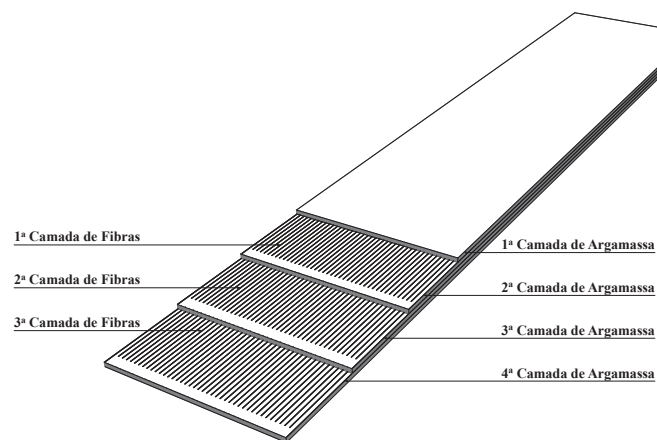


Figura 3.17: Distribuição das fibras de sisal no compósito

3.2.3 Painéis sanduíches

A produção dos painéis sanduíches foi feita juntando os métodos precedentes de produção de laminado, e de compósitos cimento-madeira (3.2.1., 3.2.2.). A argamassa foi preparada no misturador de 20l, enquanto o compósito cimento-madeira na betoneira. Foram produzidos por moldagem três painéis de comprimento 90 cm, largura 25 cm e espessura 10 cm. A sequência de produção foi:

- O primeiro laminado de espessura 1 cm, constituído por quatro camadas de argamassa separadas por três camadas de fibras longas alinhadas unidirecionalmente;
- O núcleo de cimento e serragem de madeira de espessura 8 cm compactado em três camadas;
- O segundo laminado idêntico ao primeiro;
- Vibração mecânica por meio da mesa vibratória (30 s).

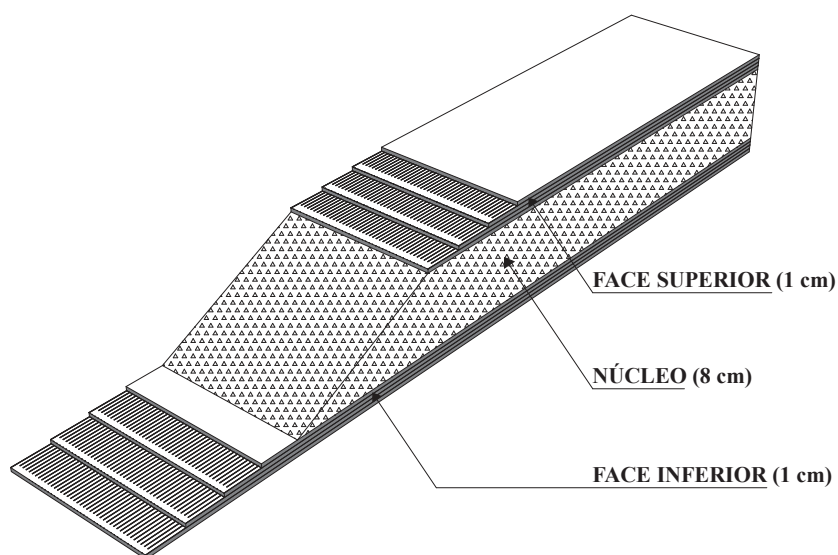


Figura 3.18: Estrutura do painel sanduíche

Face Inferior

A face inferior foi produzida na sequência ilustrada pela figura 3.19.



a)

b)



c)

d)

e)

Figura 3.19: a)Espalhamento da 1ª camada de argamassa no fundo do molde b)Colocação da 1ª camada de fibras c)Ajuste manual das fibras d) Colocação da segunda camada de argamassa d) Espalhamento da argamassa com a espatulá

Núcleos

O núcleo foi produzido na sequência ilustrada pela figura 3.20.



a)

b)

c)

Figura 3.20: a) 1ª camada do compósito cimento madeira colocada em cima do laminado inferior b)Compactação com a haste c)Ajuste final da superfície

Face Superior

A face superior foi produzida na sequência ilustrada pela figura 3.19

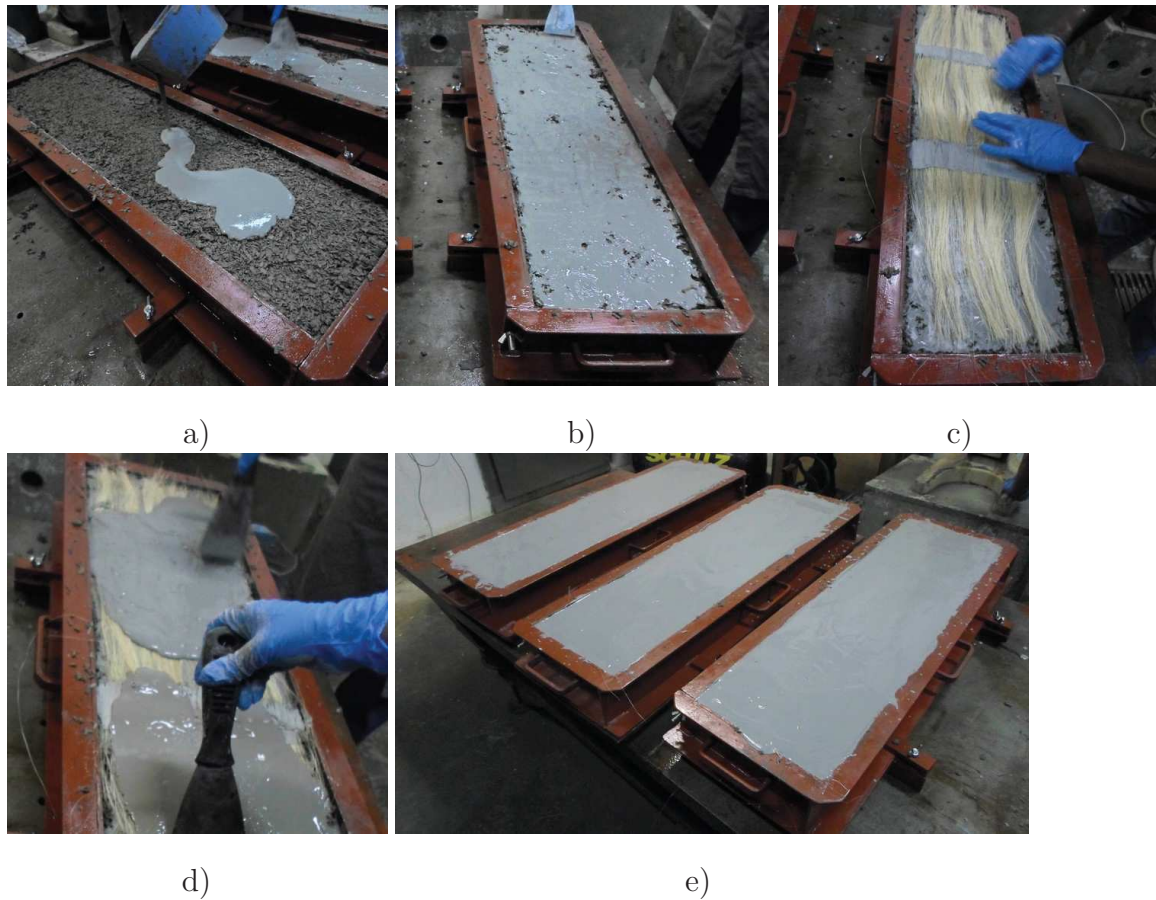


Figura 3.21: a) Colocação da 1ª camada de argamassa da face superior b) espalhamento da argamassa c) Ajuste manual das fibras d) Espalhamento da argamassa em cima das fibras e) Painéis moldados

3.3 Ensaios mecânicos e físicos

3.3.1 Resistência à compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado em uma máquina de ensaio universal modelo Shimadzu-1000 kN a uma velocidade de deslocamento de 0,03 mm/min. A resistência à compressão uniaxial foi obtida tanto para os compósitos cimento-madeira, como para os painéis sanduíches produzidos.

3.3.1.1. Compósitos Cimento Madeira

A resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos CCM foram determinados segundo as prescrições da norma NBR 5739 (2007). Para cada mistura, foram moldados três corpos-de-prova cilíndricos de diâmetro 50 mm e altura 100 mm, sendo o ensaio realizado após 28 dias de cura na câmara úmida. Antes dos ensaios, os corpos-de-prova tiveram suas extremidades regularizadas e paralelizadas com auxílio de um torno mecânico (figura 3.22a). Os corpos-de-prova dos compósitos CCM 0,5 e CCM 1, devido às suas grandes porosidades foram, além do faceamento, capeados em suas extremidades com uma mistura de enxofre e escória, para garantir uma distribuição uniforme de cargas durante o ensaio (figura 3.22b). A deformação axial consistiu na média fornecida por dois LVDTs, acoplados por anéis metálicos posicionados na região central do corpo de prova (figura 3.22c)

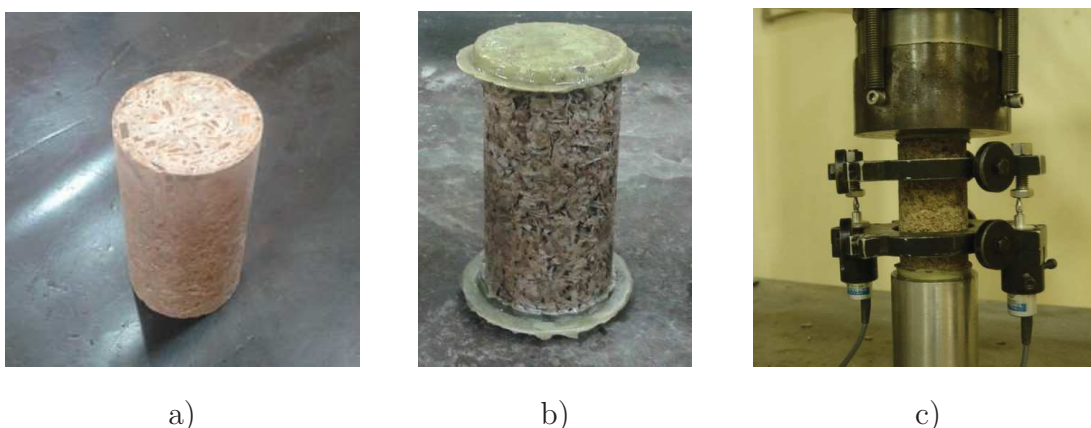


Figura 3.22: a)CCM 2 faceado b)CCM 0,5 capeado c)Ensaio de compressão uniaxial

O cálculo do módulo de elasticidade dos CCM foi feito segundo NBR 8522 (2003) pela equação 3.4.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.4)$$

Onde:

E: módulo de elasticidade;

σ_2 : tensão de compressão correspondente a 40% da carga última;

σ_1 : tensão de compressão correspondente à deformação axial, ε_1 , de $5 \cdot 10^{-5}$;

ε_2 : deformação axial produzida pela σ_2 ; ε_1 : deformação axial igual a $5 \cdot 10^{-5}$.

3.3.1.2. Painéis sanduíches

Compressão uniaxial longitudinal

As resistências dos painéis sanduíches à compressão uniaxial longitudinal foram determinadas segundo as prescrições da norma C364M-07 aplicando a carga no sentido paralelo à direção das fibras de sisal. Este ensaio serve para avaliar a capacidade de carregamento do painel, e analisar o comportamento das faces e das interfaces faces-núcleo, assim como os modos de ruptura. Foram utilizados corpos-de-prova prismáticos 200x100x100 mm. Os deslocamentos axiais das faces e dos núcleos foram obtidos colando os LVDTs nas quatro faces laterais dos painéis (figura 3.23).



Figura 3.23: Ensaio compressão uniaxial longitudinal a)PS 0,5 b) PS 2,5

Compressão uniaxial transversal

As resistências dos painéis sanduíches à compressão uniaxial transversal foram determinadas segundo as prescrições da norma ASTM C365-11. O ensaio foi realizado aplicando a carga no sentido perpendicular às faces, com intuito de avaliar o comportamento do sanduíche quando solicitado nesta direção. Foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos de diâmetro 50 mm e altura 100 mm. A deformação axial consistiu na média fornecida por dois LVDTs, acoplados por anéis metálicos posicionados na região central do corpo de prova (figura 3.24).



a)



b)

Figura 3.24: a) PS 0,5 b) Ensaio de compressão uniaxial transversal do PS 2,5

3.3.2 Ensaio de Cisalhamento

Cisalhamento direto dos Compósitos Cimento-Madeira

Numa estrutura sanduíche, além da compressão, o núcleo trabalha também em cisalhamento. Para avaliar esta propriedade, foram feitos os ensaios de cisalhamento dos compósitos cimento-madeira, se baseando na norma japonesa JSCE-SF6, e seguindo o procedimento implementado por Marangon (2005). O aparato desenvolvido para a medição de deslocamento, no ensaio de cisalhamento, foi montado na prensa Shimatzu de 1000 kN. As amostras utilizadas são prismáticas, com dimensões 400x100x100 mm. Foram feitos entalhes, utilizando-se uma serra de mármore, nas seções das amostras em que o cisalhamento se verifica, conforme pode ser visto na Figura 3.25. A profundidade média foi de 10 mm e o largura do entalhe 2,4 mm.

Para a medição dos deslocamentos, foram acopladas à mesa da máquina duas bases magnéticas, contendo dois LVDTs, em ambos os lados da amostra a ser ensaiada. Os LVDTs foram apoiados em uma placa de alumínio colada no meio da base da amostra (fig).



Figura 3.25: Ensaio de cisalhamento do núcleo

O ensaio foi realizado numa velocidade de 0,3 mm/min, e a resistência máxima foi calculada a partir da equação 3.5.

$$\tau = \frac{0,5.P}{(b - 2e)(h - 2e)} \quad (3.5)$$

Onde:

P: Carga maxima (N);

b: Largura da seção transversal da amostra (m);

h: Altura da seção transversal da amostra (m);

e: Profundidade média do entalhe (m).

Cisalhamento por flexão em 4 pontos dos sanduíches

O ensaio de cisalhamento por flexão em 4 pontos dos painéis sanduíches foi feito de acordo com a norma ASTM C393M-11. O objetivo do ensaio é determinar principalmente a resistência ao cisalhamento do núcleo e também a resistência à tração da face inferior do painel. Foram utilizados corpos-de-prova de dimensões 250 x 50 x 100mm (comprimento - largura - espessura). A máquina utilizada foi a prensa Shimatzu AGX, com célula de carga de 100 kN e velocidade de deslocamento de 0,3 mm/min. Os pontos de aplicação de carga distam entre si de 100 mm, e os apoios de 200 mm, e a deflexão central foi obtida por meio do sensor da prensa e um LVDT acoplado.



a)

b)

Figura 3.26: Cisalhamento por flexão em 4 pontos a)PS 0,5 b) PS 2,5

A resistência ao cisalhamento do núcleo e a resistência à tração da face inferior do painel foram calculadas respectivamente a partir das equações 3.6 e 3.7.

$$\tau = \frac{P_{max} \cdot S}{(d + c)b} \quad (3.6)$$

$$\sigma = \frac{P_{max} \cdot S}{4t(d + c)b} \quad (3.7)$$

Onde:

σ = Resistência das faces (MPa);

τ = Resistência ao cisalhamento do núcleo (MPa);

P_{max} = Força máxima (N);

S= distancia entre os apoios (mm);

b = largura do sanduíche (mm);

d = espessura do sanduíche (mm);

c = espessura do núcleo (mm);

t = espessura de uma face (mm).

3.3.3 Flexão em quatro pontos

Foram ensaiados à flexão em quatro pontos, os laminados de argamassa reforçada com fibras longas de sisal e os painéis sanduíches.

Laminados de argamassa reforçada com fibras longas de sisal

O ensaio de flexão em quatro pontos dos laminados foi feito na máquina de ensaios modelo Shimatzu AGX, com célula de carga de 100 kN, e velocidade de deslocamento de 0,3 mm/min. Foram utilizados quatro corpos-de-prova prismáticos de 400mm x 100mm x 10mm (comprimento x largura x espessura).

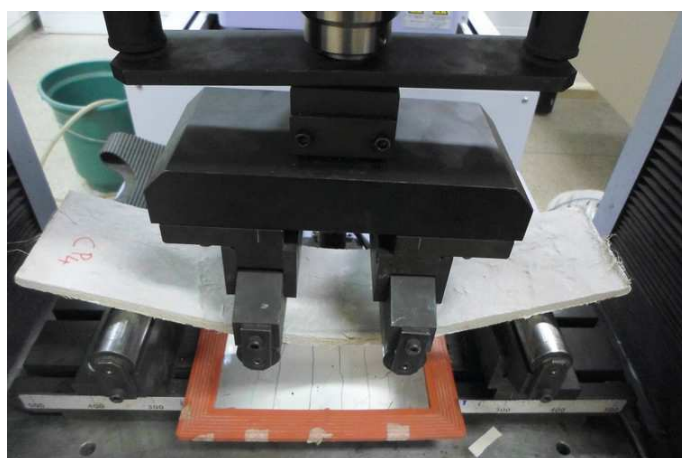


Figura 3.27: Ensaio de flexão 4 pontos de laminado

Antes da execução dos ensaios, as faces inferiores dos CP foram pintadas em branco com uma tinta a base de água para visualizar as fissuras. Os pontos de aplicação de carga distam entre si de 100 mm, e os apoios de 300 mm. O software Trapezium foi utilizado para adquirir a carga e a flecha no meio do vão, por meio do sensor da máquina de ensaios mecânicos e um LVDT acoplado ao dispositivo. O cálculo da tensão equivalente das curvas obtidas no ensaio de flexão foi feito utilizando a equação 3.8.

$$\sigma = \frac{6M}{bd^2} \quad (3.8)$$

Onde:

σ = tensão equivalente; M = momento fletor;

b = largura do CP; d = espessura do CP.

Painéis sanduíches

Os painéis foram ensaiados na máquina de ensaios modelo Shimadzu-1000 kN a uma velocidade de deslocamento de 0,03 mm/min. Os pontos de aplicação de carga distam entre si 250 mm, e os apoios, 750 mm. O sistema de aquisição de dados ADS 2000, de 16 bits, da marca Lynx foi utilizado para adquirir os deslocamentos e o carregamento. Através de oito LVDTs posicionados como ilustrado na figura 3.26, foram lidos:

- As aberturas de fissuras (LVDTs 1 e 2);
- Os deslocamentos no meio do vão livre (LVDTs 5 e 6);
- Os deslocamentos no apoio frontal (LVDTs 3, 4), e posterior (LVDTs 7,8).

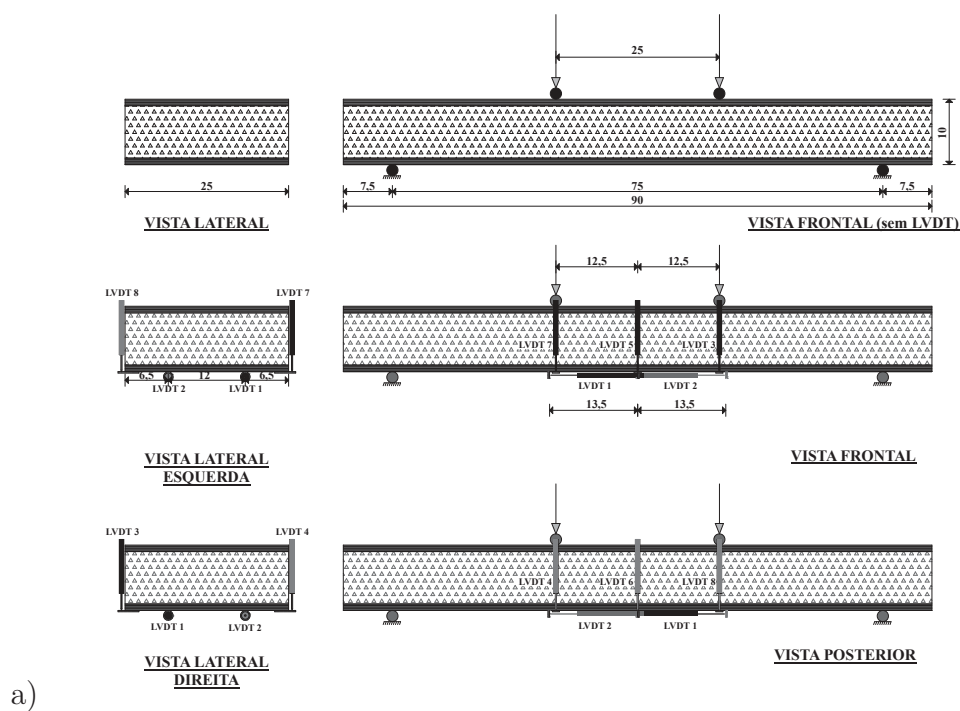


Figura 3.28: Disposição dos 8 LVDTs no painel a ensaiar

Os LVDTs 1 e 2 foram posicionados no meio da face inferior do painel para medir as aberturas de fissura na esquerda e direita do eixo transversal central.

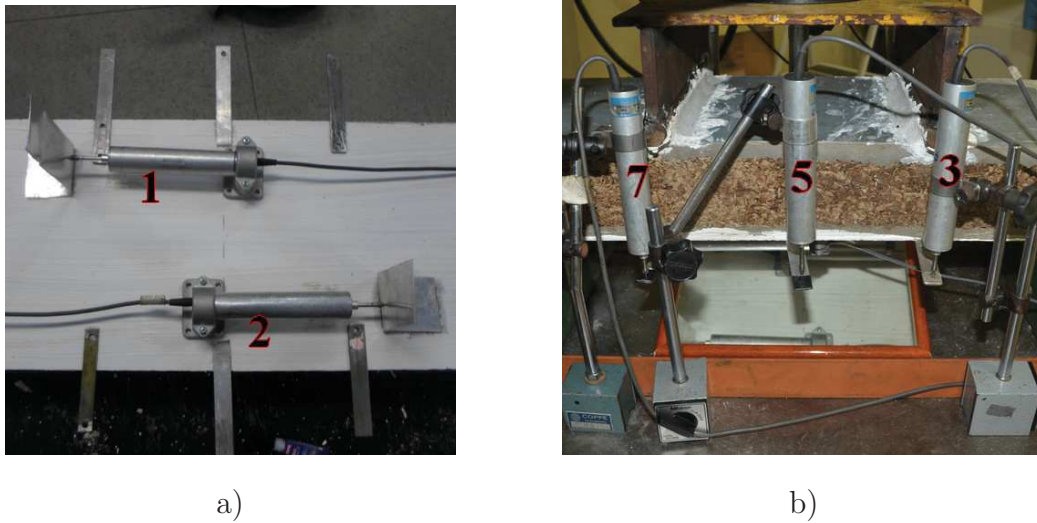


Figura 3.29: Montagem dos LVDTs 1 e 2 a) b) Disposição dos LVDTs 3,5 e 7

O cálculo da resistência à flexão das faces, assim como a resistência ao cisalhamento do núcleo foram feitos segundo a norma ASTM C393, através das equações 3.6 e 3.7.

3.3.4 Ensaio de tração direta

Foram também ensaiados em tração direta, os laminados de argamassa reforçada com fibras longas de sisal, e as amostras tiradas dos painéis sanduíches.

Laminados de argamassa reforçada com fibras longas de sisal

O ensaio de tração direta dos laminados, foi feito na máquina de ensaios modelo Shimatzu AGX, com célula de carga de 100 kN, e velocidade de deslocamento de 0,3 mm/min. Os deslocamentos axiais foram obtidos a partir da leitura média, de dois LVDTs posicionados longitudinalmente nas laterais do corpo de prova com comprimento de medida de 150 mm. Estes LVDTs foram acoplados num aparato formado por suportes de alumínio, fixados ao corpo-de-prova em quatro pontos por parafusos, impedindo assim a rotação em relação ao eixo do corpo de prova.

Foram utilizados quatro corpos-de-prova prismáticos de 300 mm x 55 mm x 10 mm (comprimento x largura x espessura). Estes corpos-de-prova, previamente pintados com tinta branca na região central para melhor visualização das fissuras, foram fixados em placas de aço, através de parafusos.



a)

b)

Figura 3.30: a)Fixação do CP b) Ensaio de tração

Amostras sanduíches

Para os ensaios de resistência à tração direta das amostras sanduíches foram utilizados corpos de prova prismáticos de 400 x 100 x 50 mm. O procedimento adotado foi o mesmo desenvolvido por Lima (2004) com as adaptações de Marangon (2011), sendo ilustrado na figura 3.31b. A transferência de cargas para a amostra era feita através de placas de aço coladas nas faces por meio de um adesivo epóxi de alta resistência, como mostra a figura 3.31a. As amostras foram tracionada no sentido do alinhamento das fibras, para poder solicitá-las durante o ensaio.

Os ensaios foram realizados na prensa shimatzu de 1000 kN, com controle de deslocamento do travessão a uma taxa de 0,3 mm/min. Um sistema com quatro LVDTs fixados na região central dos corpos-de-prova (Figura 3.32) foi utilizado para a determinação dos deslocamentos axiais no núcleo e nas faces.



a)

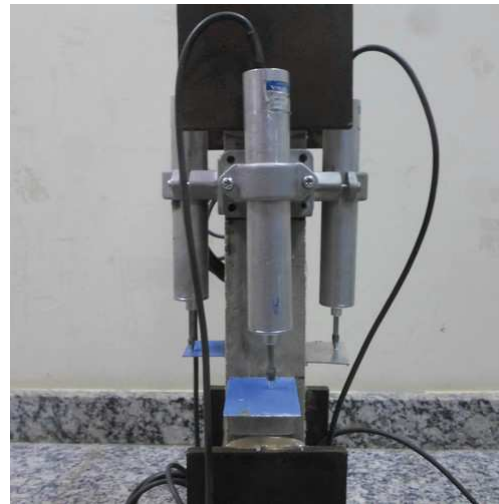


b)

Figura 3.31: Ensaio de tração direta do sanduíche



a)



b)

Figura 3.32: Montagem dos LVDTs no CP a) Vista frontal b) Vista lateral

3.3.5 Caracterização física

Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi executado conforme as recomendações da ABNT NBR 9779 (2012). O objetivo do ensaio foi obter o ganho de massa de água em função do tempo, refletindo a facilidade de ingresso da água por ascensão capilar. Foram ensaiados os compósitos cimento-madeira, e as amostras dos painéis sanduíches. Três corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura foram utilizados para os CCM, e três prismáticos de 100x50x50 mm para cada traço do sanduíche. Após a cura de 28 dias na câmara úmida, os

corpos de prova foram colocados em estufa com ventilação interna, à temperatura de 105°C, até constância de massa.

Após a secagem, as amostras esfriaram em dessecador até $23 \pm 2^\circ\text{C}$, sendo em seguida pesadas. As superfícies laterais das amostras foram seladas com fita alumínio, para garantir o fluxo unidirecional e evitar perda de umidade (figura 3.33a). Depois de seladas as amostras foram posicionadas sobre um suporte em um recipiente com nível de água de 5 ± 1 mm acima da face inferior, sendo esse nível mantido constante ao longo de todo o ensaio. No caso dos painéis, as faces foram em contato com a água.

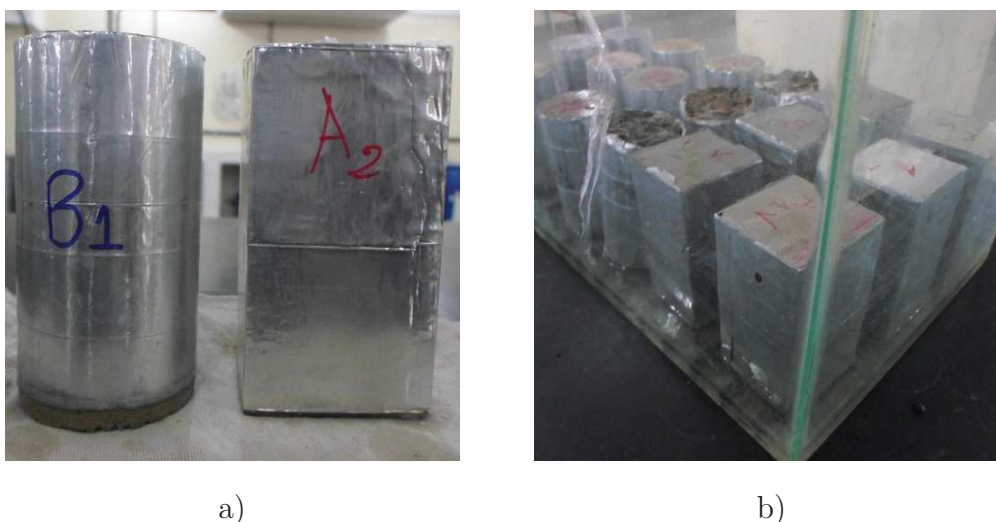


Figura 3.33: a) Corpos-de-provas selados b) Corpos-de-provas no recipiente

Os valores de absorção de água por capilaridade foram calculados a partir da equação 3.9:

$$A_c = \frac{M - M_s}{S} \quad (3.9)$$

Onde:

A_c : absorção de água por capilaridade (g/cm^2);

M : massa do corpo de prova em contato com água em um tempo t (g);

M_s : massa do corpo de prova seco quando atinge a constância de massa (g);

S : área da seção transversal do corpo de prova (cm^2).

Retração por secagem

O ensaio de retração por secagem foi utilizado para avaliar a variação dimensional dos compósitos cimento-madeira, quando a umidade relativa do ambiente foi menor que a do material, de acordo com a ASTM C157 (2003). Para realizá-lo, foram utilizados moldes prismáticos de dimensões 285 mm x 75 mm x 75 mm. Os moldes foram montados com pinos nos orifícios centrais das duas faces menores, pelo lado de dentro, de forma que a distância entre as extremidades interiores dos pinos fosse 250 mm (comprimento L). O valor de L foi utilizado no cálculo das deformações provenientes da retração.

Depois da moldagem, as amostras permaneceram cobertas com uma manta úmida em ambiente climatizado até a desmoldagem. Os corpos de prova de relação C/S igual a 2,5 foram desmoldados nos 24h seguintes, enquanto os de relação C/S igual a 0,5 após 72h. Esse tempo de 72h foi necessário, para que o material estivesse suficientemente endurecido, e não ocorresse o desprendimento dos pinos ancorados no interior da mistura. Após a desmoldagem, as amostras foram levadas para a câmara úmida ($T=21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, $\text{UR}=100\%$), onde permaneceram durante 28 dias.

Após os 28 dias de cura, as primeiras leituras de variação de comprimento e de massa foram feitas usando respectivamente um relógio comparador digital fixado a um pórtico, e uma balança (figura 3.31). Antes da realização das leituras de comprimento, o relógio comparador era zerado com o auxílio de uma barra de referência feita de aço inox. Os corpos de provas foram mantidos em sala de temperatura e umidade controladas ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $60 \pm 2\%$), onde ficaram os corpos de prova durante o processo de retração. Nos sete primeiros dias, foi realizada uma leitura e pesagem diárias, e após esse período, as leituras e pesagens foram realizadas a cada sete dias.

As deformações de retração foram calculadas de acordo com a equação 3.8:

$$\varepsilon = \frac{L_t - L_i}{L} \quad (3.8)$$

Onde:

ε deformação de retração por secagem;

L_t : leitura de comprimento em um instante t (mm);

L_i : leitura de comprimento inicial (após 28 dias de cura) (mm);

L: distância entre os pinos (mm).



Figura 3.34: Registros de variações: dimensional (esquerda) e de massa (direita)

A perda de massa ao longo do tempo foi calculada pela equação 3.9:

$$W = \frac{m_t - m_i}{m_i} \times 100 \quad (3.9)$$

Onde:

W: perda de massa de água durante a retração por secagem (%);

m_t : massa da amostra em um hora h (kg);

m_i : massa inicial da amostra após 28 dias de cura(kg).

3.3.6 Ensaio de Condutividade térmica

Os ensaios de condutividade térmica foram realizados no analisador de condutividade térmica TCi (figura 3.33), fabricado pela empresa C-Therm Technologies. Projetado para fornecer caracterização altamente precisa e de maneira simples para laboratórios, controle de qualidade e ambientes de produção, o analisador de condutividade TCi C-Therm tem ampla capacidade de testes (0 a 500 W/mK) em uma

larga faixa de temperatura (-50°C a 200°C). Ele faz a análise térmica e não destrutiva em sólidos, líquidos, pós e pastas em segundos, podendo ser operados em vários ambientes, inclusive câmaras térmicas, vasos de alta pressão.

O equipamento é pré-calibrado, e pode vir com as seguintes configurações:

1- Módulo Low K - Grupo de materiais: Espumas, Plásticos, Cerâmicas e Compósitos (K-Range de 0 a 10 W/mK).

2- Módulo Fluids K - Grupo de materiais: Líquidos e Pós (K-Range de 0 a 0,6 W/mK);

3- Módulo High K - Grupo de materiais: Metais e Compósitos (K-Range de 10 a 500 W/mK) e módulo Max K (que engloba todas as faixas de calibração: 1, 2 e 3).

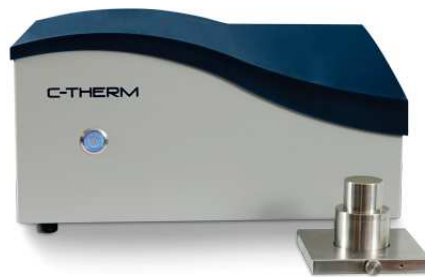


Figura 3.35: Analisador de condutividade térmica TCi C-Therm
(Fonte: Fabricante)

Princípios de operação

O TCi C-Therm é baseado na técnica modificada da fonte em plano transiente. Ele utiliza um sensor de refletância de calor, unilateral, interfacial que aplica uma fonte de calor constante momentânea na amostra. O calor gerado resulta em um aumento na temperatura na interface entre o sensor e a amostra - tipicamente menor que 2°C.

Este aumento de temperatura na interface induz uma mudança na queda de voltagem do elemento do sensor. A taxa de aumento de voltagem no sensor é utilizada para determinar as propriedades termo - físicas do material da amostra, que lhe são inversamente proporcionais. Quanto mais isolante térmico o material é, maior e mais íngreme é o aumento da voltagem. O sistema inclui um computador com o seu software intuitivo com interface baseada em Windows® e uma base de

dados relacional com capacidades de importação/exportação. Assim são fornecidas varias leituras da condutividade térmica e a efusividade da amostra, visualizáveis na tela do computador e exportáveis no programa Excel.

Preparação da amostra e medição

A preparação de amostra é mínima. Não é necessário preparar e padronizar corpos de prova específicos para os ensaios. A superfície da amostra tem que ser plana e ter no mínimo 18 mm de diâmetro para que caiba na área ativa do sensor. No caso dos materiais porosos ou absorventes como o concreto, é preciso passar uma fina camada de graxa térmica (indicada pelo fabricante), no sensor e na superfície da amostra. Esta graxa térmica serve de agente de contato, e melhora a medição.

Antes de qualquer medição, é necessário fazer um teste com um dos materiais de condutividades conhecidas, fornecidos pelo fabricante para verificar o funcionamento correto do sistema. As amostras usadas foram corpos-de-prova cilíndricos de diâmetro 5 cm, e espessura entre 5 e 10 mm. Os passos para a medição foram:

- Passar a graxa térmica na superfície do sensor e da amostra a analisar.
- Posicionar a amostra sobre o sensor;
- Selecionar no programa o módulo (Low K no caso dos materiais desta pesquisa);
- Iniciar as medições;
- Parar após 6 leituras, tirar a primeira, e fazer a média dos cinco valores;
- Retirar a amostra e limpar o sensor.

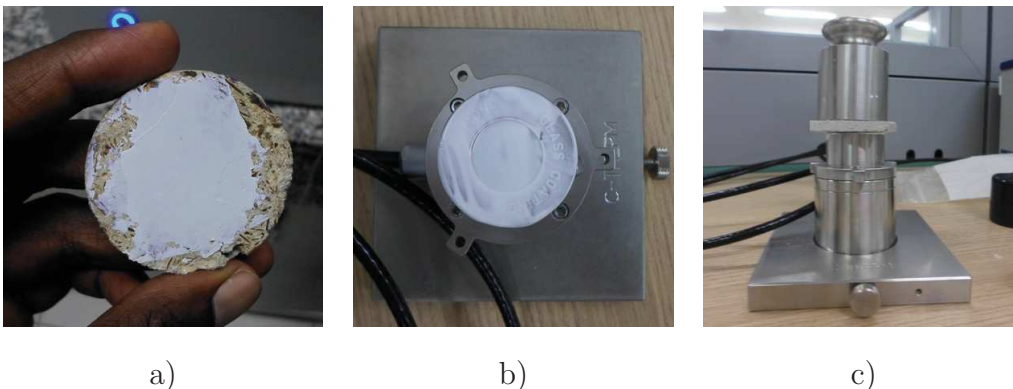


Figura 3.36: a) Camada de graxa térmica na amostra b) Camada de graxa térmica no sensor c) Medição das propriedades

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 Compósitos Cimento - Madeira

Na produção dos CCM, a lavagem em água quente da serragem e o uso do cloreto de cálcio na moldagem foram empregados com o objetivo de melhorar a compatibilidade química entre o cimento e madeira, assim com acelerar a pega do cimento. Após a desmoldagem dos diferentes traços de compósitos, foi anotado em geral uma boa coesão dos corpos de prova. Eles todos estavam no estado endurecido, mesmo aqueles que tiveram pouco cimento. Esta observação mostrou a necessidade do tratamento empregado, pois sem tratamento não haveria endurecimento dos compósitos.



Figura 4.1: CCM após desmoldagem a)CCM3 b)CCM0,5

4.1.1 Densidade e condutividade térmica

A densidade aparente dos compósitos variou de 800 até 1200 kg/m³. Nesta faixa de densidade, os compósitos podem se classificar como concretos leves, pois apresentam uma densidade menor do que 1800 kg/m³. Esta grande redução de massa, é devido aos agregados vegetais empregados, que além da leveza, fornece aos compósitos duas escalas de porosidade. A primeira é a porosidade própria do agregado vegetal, e a segunda é a porosidade criada no empacotamento das partículas da serragem durante a moldagem. Os compósitos com uma quantidade maior de cimento apresentaram uma massa maior com uma superfície externa mais uniforme, e parecida com os concretos de agregados usuais.

Tabela 4.1: Valores médios de densidade e condutividade térmica dos CCM e CV (% entre parenteses)

Mistura	Densidade (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/mK)
CCM 0,5	700 (3,83)	0,06 (5,49)
CCM 1	820 (1,58)	0,095 (4,32)
CCM 2	950 (1,45)	0,22 (0,99)
CCM 2,25	1000 (0,74)	0,38 (0,45)
CCM 2,5	1100 (1,07)	0,46 (0,84)
CCM 3	1250 (1,55)	0,535 (0,32)

Quanto à condutividade térmica, ela também aumentou com o crescimento do cimento nos compósitos (tabela 4.1). Isto se explica pelo fato que a incorporação da madeira na pasta de cimento, reduziu a capacidade de condução de calor no compósito. A madeira que tem uma condutividade entre 0,08 e 0,23 W/mK (YU *et al.* 2011, LAGÜELA *et al.* 2015) é menos condutiva do que a pasta de cimento cuja condutividade varia entre 0,6 e 1,2 W/mK (TANG *et al.* 2015, Abdelalim *et al.* 2010). Os valores obtidos depois do ensaio foram de modo geral semelhantes aos resultados encontrados por Taoukil *et al.* (2013) que apresentaram índices de condutividade térmica de 0,22 - 0,34 W/m.K em compósitos cimento madeira.

4.1.2 Resistência à compressão

Os compósitos cimento madeira foram avaliados sob esforços de compressão após 28 dias de cura na câmara úmida. Esta análise buscou avaliar a influência da proporção de serragem de madeira no comportamento mecânico do compósito. A resistência à compressão, a deformação na resistência máxima ($\mu\epsilon$), e o módulo de elasticidade E de cada compósito são apresentados na tabela 4.2 e as curvas típicas de tensão deformação na figura 4.2.

Tabela 4.2: Valores médios das propriedades mecânicas sob compressão aos 28 dias dos compósitos e coeficientes de variação (% entre parenteses)

Mistura	Resistência(MPa)	Deformação ($\mu\epsilon$)	E(GPa)
CCM 0,5	0,44 (6,32)	52285,415 (6,10)	0,029 (5,44)
CCM 1	1,22 (3,41)	39882,255 (4,71)	0,14 (4,7)
CCM 2	3,55 (1,2)	4127,742 (4,12)	1,038 (3,5)
CCM 2,25	6,44 (0,48)	7594,1 (3,62)	1,692 (3,1)
CCM 2,5	9,46 (0,98)	5270,24 (2,05)	2,472 (2,6)
CCM 3	15,97 (0,28)	7422,01 (0,89)	4,026 (0,79)

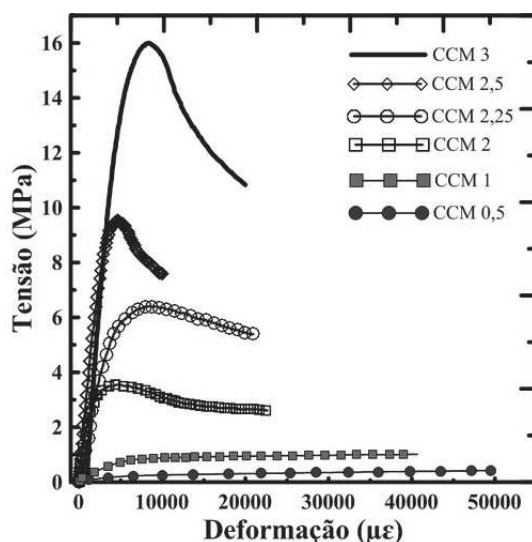


Figura 4.2: Curvas típicas de tensão - deformação axial dos CCM 0,5 e 1

De acordo com a Tabela 4.2 e a figura 4.2, observa-se que o aumento do cimento nos CCM acrescentou todas as propriedades mecânicas e pode se distinguir 3 faixas de resistência:

- $f_{C28} \leq 1$ MPa: contendo os CCM 0,5 e CCM 1. Estes compósitos apresentaram um comportamento na compressão parecido com um processo de compactação pois durante o ensaio, eles se deformaram muito sem uma diminuição da carga aplicada (figura 4.3). As figuras 4.4 mostram os CCM 0,5 e CCM 1 antes e depois do ensaio de compressão, e pode se observar quanto que eles se compactaram durante a realização do ensaio.

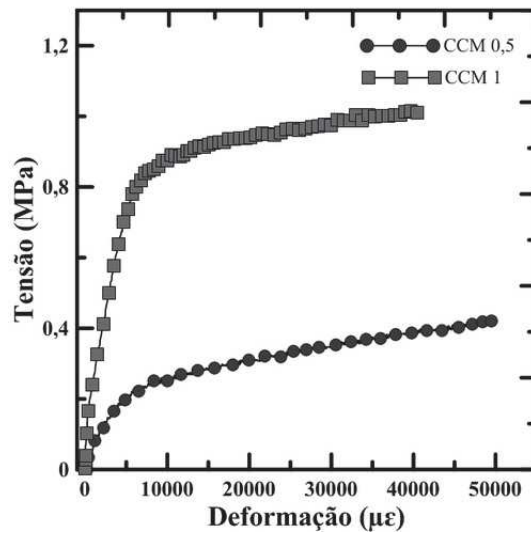


Figura 4.3: Curvas típicas de tensão - deformação axial dos CCM 0,5 e 1

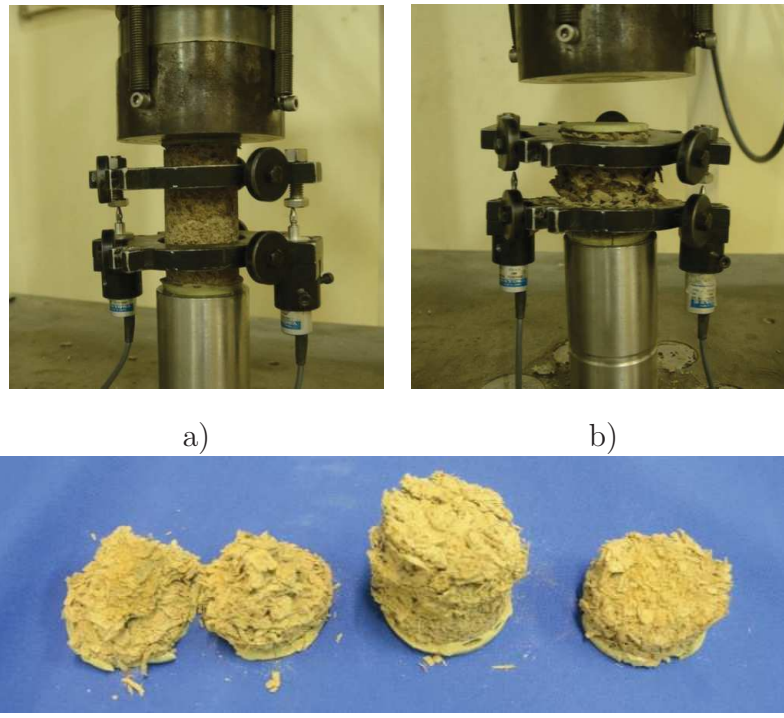


Figura 4.4: a) CCM 1 antes do ensaio b) CCM 1 após c) CCM 0,5 após o ensaio

- $4 \leq f_{C28} \leq 10$ MPa: Neste intervalo de resistência, tem se os CCM 2, CCM 2.25 e CCM 2,5 que tiveram um módulo de elasticidade variando de 1 até 2,47 GPa. Eles apresentaram um comportamento linear elástico até 56% (CCM 2), 53% (CCM 2,25) e 58% (CCM 2,5) do pico, que foi seguido de um trecho de não-linearidade até o pico máxima. Após a tensão máxima, houve uma redução de carga com o aumento da deformação (softening). A taxa de amolecimento do CCM 2,5 foi a maior como ilustrado nas curvas tensão deformação da figura 4.5. Eles tiveram uma ruptura cisalhante (figura 4.7).

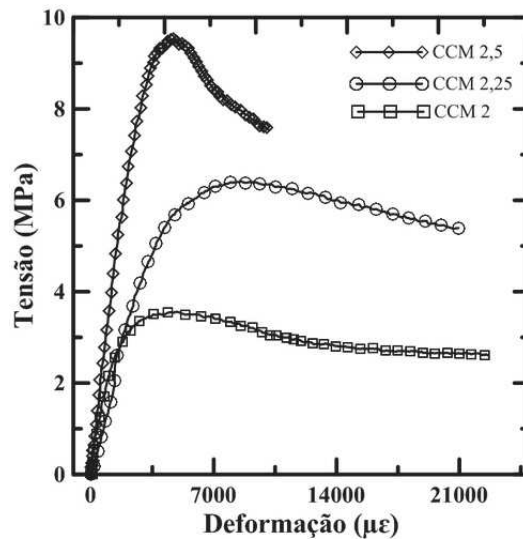


Figura 4.5: Curvas típicas de tensão - deformação axial dos CCM 2, 2.25 e 2.5

- $10 \text{ MPa} \leq f_{C28}$: O CCM 3 foi o compósito que apresentou maiores propriedades mecânicas. Ele atingiu uma resistência em compressão de 16 MPa, um módulo de elasticidade de 4 GPa, e sofreu de uma fratura cisalhante.

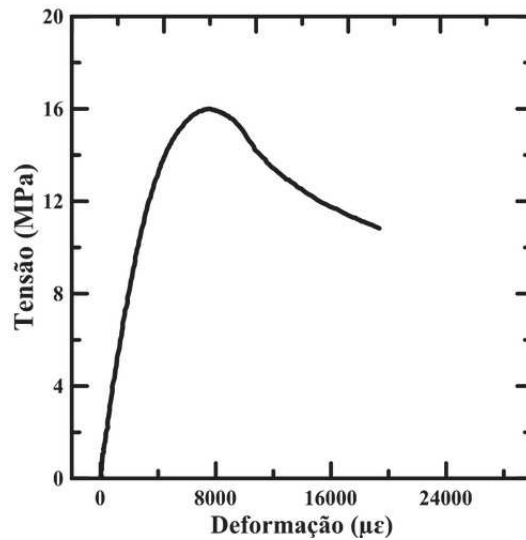


Figura 4.6: Curvas típicas de tensão - deformação axial do CCM 3

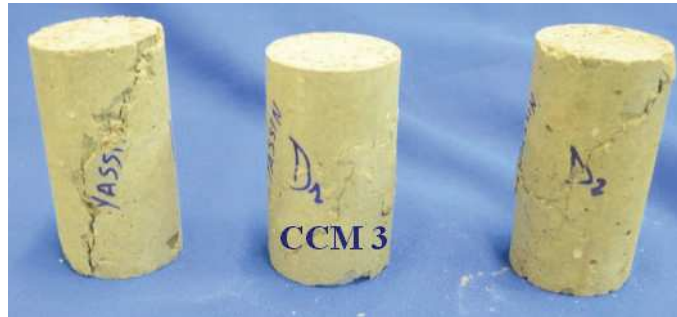


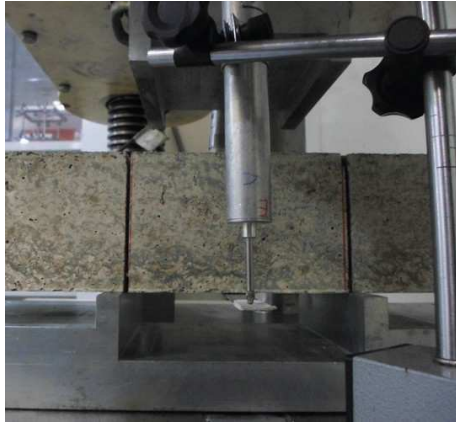
Figura 4.7: Ruptura típica dos CCM 2; 2,25; 2,5 e 3

Traços escolhidos

Para o desenvolvimento dos painéis sanduíches, foi escolhido estudar dois traços de CCM, sendo que o primeiro terá resistência à compressão e densidade baixas, enquanto o segundo terá resistência e densidade elevadas. Foram então escolhidos os CCM 0,5 e CCM 2,5, que apresentaram resistência e densidade respectivas de 0,5 MPa - 700 kg/m³; e 9,55 MPa - 1100 kg/m³. O CCM 0,5 foi escolhido por apresentar a menor densidade, e o CCM 2,5 por apresentar a densidade menor a 1200 kg/m³.

4.1.3 Resistência ao cisalhamento

O modo típico de ruptura dos compósitos cimento madeira ensaiados ao cisalhamento nesta pesquisa é ilustrado na figura 4.8b, enquanto a figura 4.8a mostra a amostra antes do ensaio.



a)



b)

Figura 4.8: CP antes do ensaio de cisalhamento b) CP depois do ensaio

A figura 4.9 mostra as curvas típicas de carga deslocamento dos CCM 0,5 e CCM 2,5 quando submetidos ao cisalhamento.

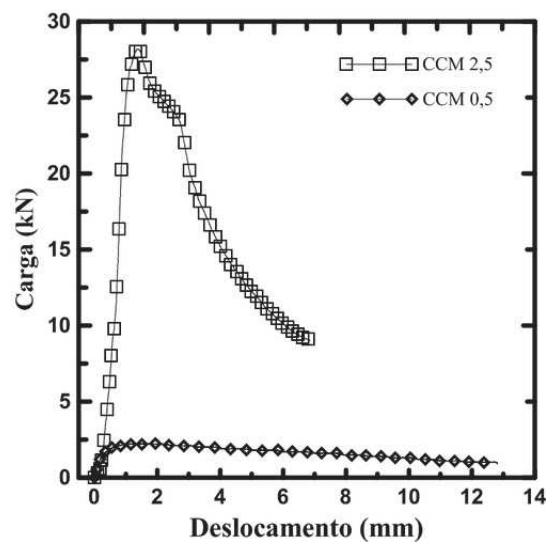


Figura 4.9: Curvas típicas dos CCM 0,5 e 2,5 no ensaio de Cisalhamento

Os resultados experimentais médios de cargas máximas, tensões últimas de cisalhamento dos diferentes compósitos, assim como os respectivos deslocamentos centrais no pico e coeficientes de variação estão apresentados na tabela 4.3. Nota-se uma diminuição da tensão de cisalhamento com a incorporação da serragem de am-deira. A tensão última de cisalhamento do CCM 2,5 foi 13 vezes maior do que a tensão do CCM 0.5, enquanto a amplitude de deslocamento do CCM 0,5 foi maior, com um amolecimento mais gradual.

Tabela 4.3: Resultados experimentais de resistência ao cisalhamento.

Mistura	Carga (kN)	τ_u (MPa)	δ (mm)
CCM 0,5	2,12(3,4)	0,166 (3,4)	0,865 (3,23)
CCM 2,5	26,53 (1,06)	2,073 (1,06)	1,37 (2,15)

Os modos de fratura dos compósitos foram similar, como ilustrado nas figuras 4.10b e 4.11b, que mostram a semelhança nos planos de ruptura dos dois compósitos.

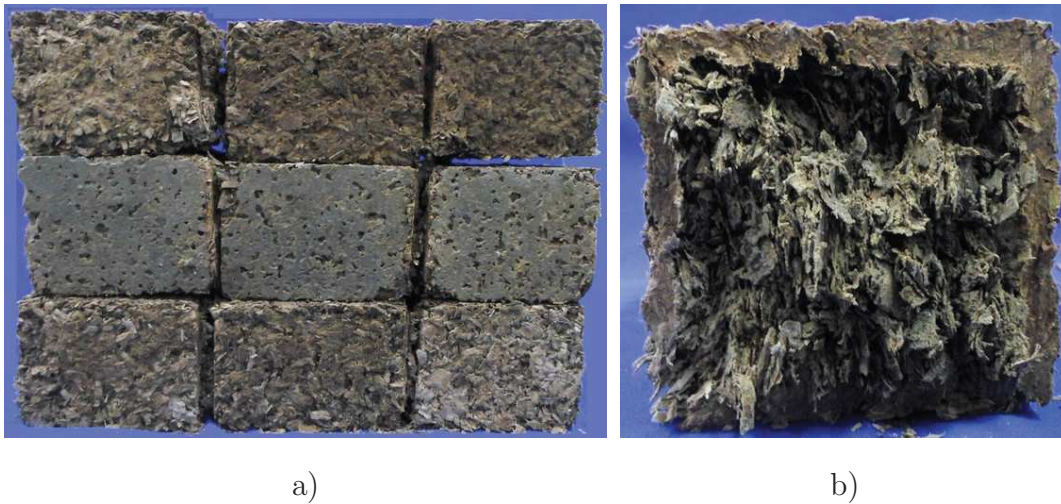


Figura 4.10: CCM 0,5 a) Amostras ensaiadas ao cisalhamento b) Plano de ruptura

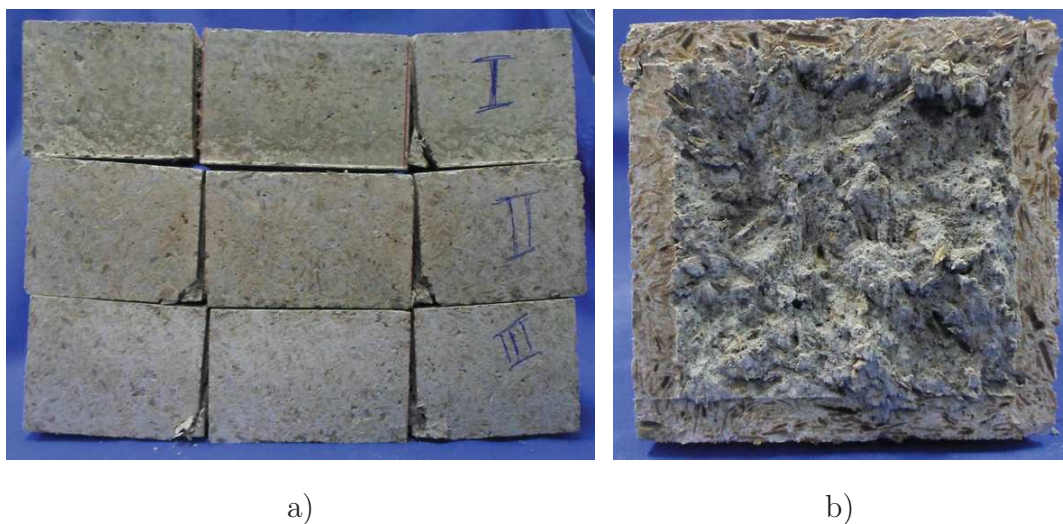


Figura 4.11: CCM 2,5 a) Amostras ensaiadas ao cisalhamento b) Plano de ruptura

4.1.4 Absorção capilar

A Tabela 4.4 apresenta os valores médios obtidos do ensaio de absorção de água por capilaridade dos CCM 0,5 e 2,5 após 72 horas e 1250 horas (52 dias) de ensaio.

Tabela 4.4: Valores médios de absorção de água por capilaridade

Mistura	Absorção capilar (g/cm ³)	
	72h	1250 h
CCM 0,5	3,17 (1,87)	3,42 (1,74)
CCM 2,5	1,56 (3,87)	3,18 (1,73)

Através dos valores da tabela 4.4, pode se notar que a absorção capilar dos CCM 0,5 foi maior. Esse comportamento pode se explicar pela quantidade maior de serragem nesse compósito, que conseqüentemente absorveu mais água. Além da quantidade de serragem maior, o CCM 0,5 era o mais poroso conseqüentemente tinha uma ascensão da água maior. Após 72h, o CCM 0,5 apresentou o dobro da absorção do CCM 2,5. Esta tendência se reduziu ao longo do tempo de 50% para 7%, pois o CCM 0,5 já estava perto do estado saturado após 72h e sua velocidade de absorção diminuiu, enquanto a absorção do CCM 2,5 ainda estava aumentando (figura 4.12).

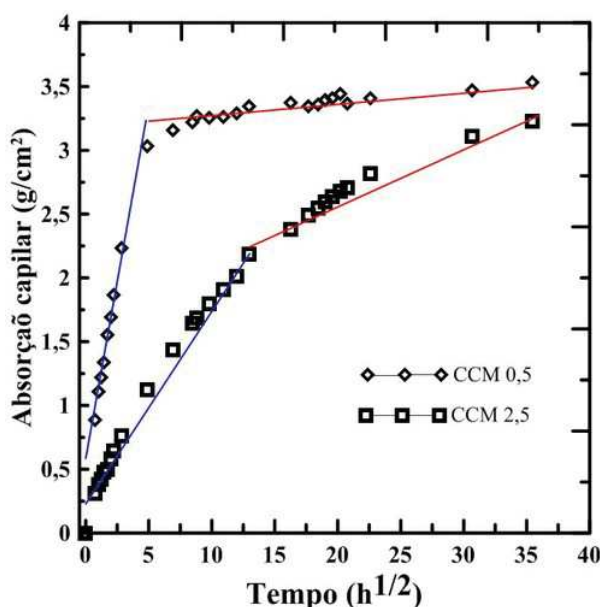


Figura 4.12: Curvas de absorção de água por capilaridade

4.1.5 Retração por secagem

As curvas médias de retração por secagem dos CCM 0,5 e CCM 2,5 após 17 dias de ensaio estão apresentadas na figura 4.13a. O compósito CCM 2,5 apresentou uma retração na ordem de $2000 \mu\epsilon$ aos 17 dias, equivalente a 50% da retração sofrida pelo CCM 0,5. Da mesma forma que ocorreu uma forte e rápida absorção de água por capilaridade na presença de uma grande quantidade de serragem no compósito, a liberação da água livre seguiu a mesma cinética. A perda de massa do CCM 2,5 apresentou também uma perda equivalente a 50% da perda de CCM 0,5, como mostrado na figura 4.13b. Foi anotado também que depois dos ensaios de retração, os compósitos não se fissuraram.

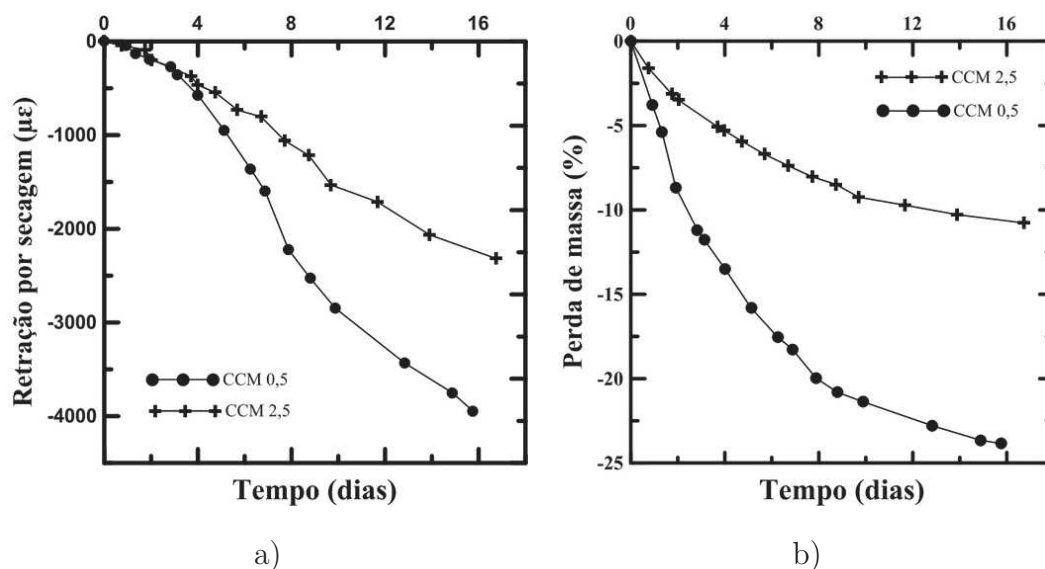


Figura 4.13: a) Curva de retração por secagem b) Curva de perda de massa

4.2 Laminados reforçados com fibras de sisal

4.2.1 Resistência à compressão da matriz

Na Figura 4.14, é apresentada a curva típica obtida do ensaio de resistência à compressão com tempo de cura de 28 dias, realizado na matriz sem reforço fibroso. Na Tabela 4.5 são apresentados os valores médios de resistência à compressão, deformação de pico (ϵ), e módulo de elasticidade E.

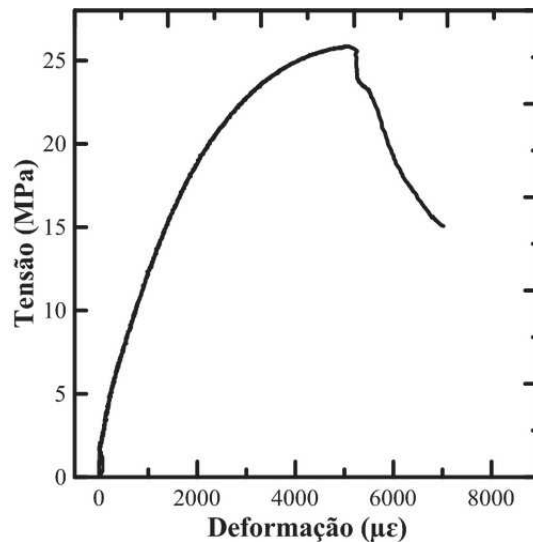


Figura 4.14: Curva típica tensão deformação da argamassa

Tabela 4.5: Valores médios das propriedades mecânicas sob compressão aos 28 dias da matriz empregada

Resistência(MPa)	Deformação de pico ($\mu\epsilon$)	E (GPa)
25,86 (2,37)	5063,501 (1,66)	11,58(3,45)

Comparando-se as propriedades da matriz desta pesquisa com a matriz produzida por Ferreira (2012), que se diferenciou pelo uso do CP II F, houve uma redução de 17% da resistência, e 12,75% do módulo de elasticidade. Esta diminuição de resistência em compressão pode se explicar pela quantidade menor de CaO presente no cimento CP II E (65,8%) em relação ao CP II F (73,090%), que conseqüentemente produziu menos CSH. Essa resistência mostrou um resistência 3 vezes maior do que o CCM 2,5 e 60 vezes maior do que o CCM 0.5, então pode servir na produção das faces dos painéis sanduíches.

4.2.2 Resistência à flexão em 4 pontos

As curvas do ensaio de flexão dos laminados reforçados com 6% fibras longas de sisal, estão mostradas na figura 4.15. Observa-se que os laminados apresentaram um comportamento linear até o surgimento da primeira fissura, que foi seguido por um ganho de resistência com múltipla fissuração, até uma deflexão de 25 mm. O amolecimento das curvas iniciou com a localização de uma fissura que se abriu mais.

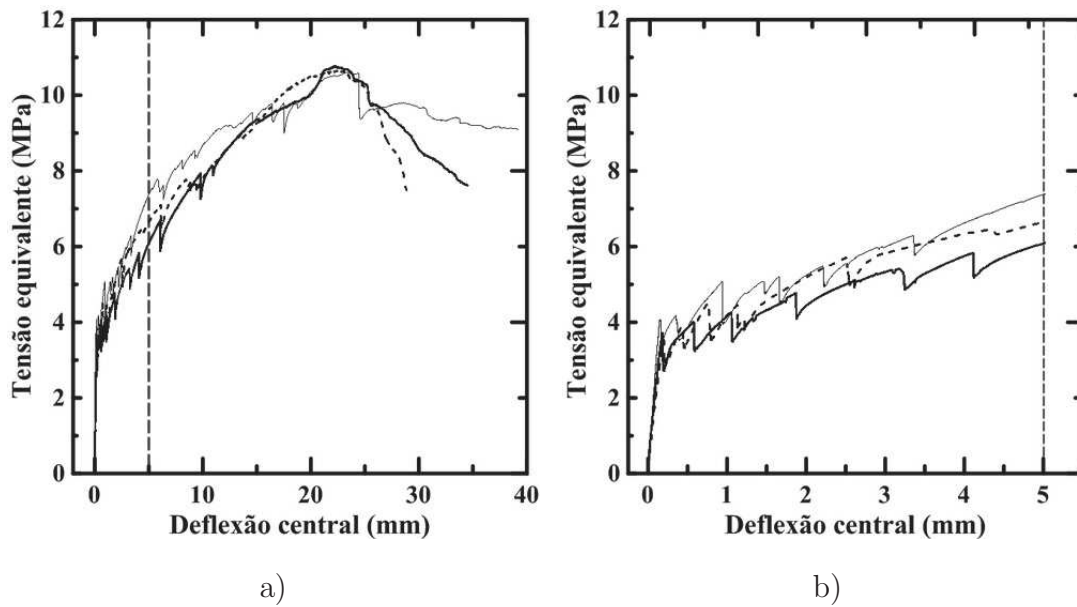


Figura 4.15: a) Curvas Tensão - deflexão b) Ampliação até a deflexão de 5 mm

Na Tabela 4.6 estão apresentados os resultados médios de tensão de primeira fissura (σ_f), deflexão de primeira fissura (δ_f), tensão máxima (σ_u), deflexão na tensão última (δ_u), tenacidade (T_{20}) calculada até uma deflexão de 20 mm, e os coeficientes de variação respectivos.

Tabela 4.6: Valores médios das propriedades em flexão dos laminados e os coeficientes de variação (%)

σ_f (MPa)	δ_f (mm)	σ_u (MPa)	δ_u (mm)	T_{20} (kJ/m ²)
3,77 (5,84)	0,17 (6,62)	10,67 (0,81)	22,72 (2,84)	6,78 (1,52)

É possível anotar que na pós fissuração dos compósitos, houve cerca de 180% de incremento da tensão de primeira fissura. Esse incremento ocorrendo com múltipla fissuração é devido ao reforço fornecido pelas fibras longas de sisal. Os resultados obtidos foram de acordo com Melo Filho (2005) cujo laminado foi reforçado também com 6% de fibras longas de sisal repartidas em 3 camadas sem pressão de moldagem. O autor observou um ganho de resistência de 200% depois da primeira fissura.

Varias fissuras essencialmente paralelas e transversais se abriram na região central da face inferior do compósito, como pode se observar na sequência de abertura de fissuras ilustradas na figura 4.16.

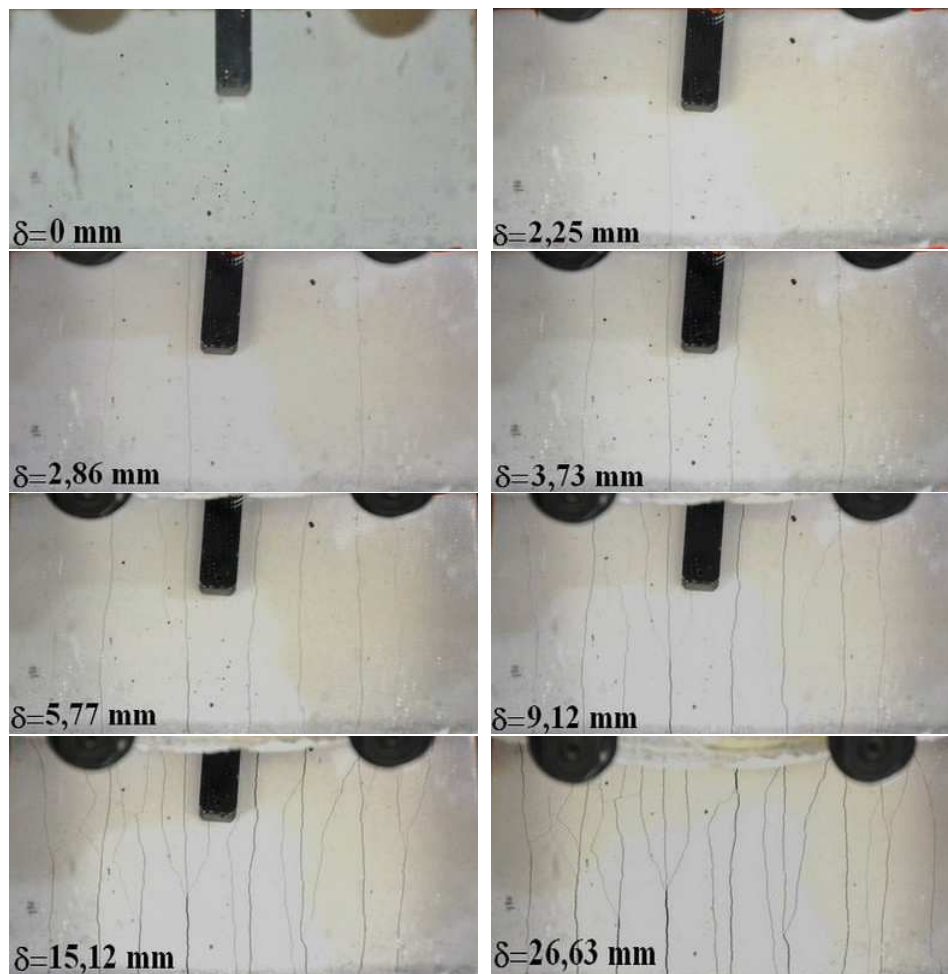


Figura 4.16: Sequência de abertura das fissuras e deflexão correspondente

É possível observar que quanto maior a deflexão central, maior o número de fissuras. A tabela 4.7 apresenta a densidade de fissuras no terço central do corpo de prova ilustrado na figura 4.16, assim como o espaçamento e os valores de abertura das fissuras em função da deflexão central. De acordo com a tabela 4.7, o espaçamento entre as fissuras se reduziu com o aumento das mesmas. Na Figura 4.17, estão apresentados o espaçamento entre as fissuras assim como a tensão equivalente em função da deflexão central do corpo de prova durante o ensaio.

Tabela 4.7: Cálculo de espaçamento e aberturas de fissuras

Deflexão (mm)	Fissuras (f)	Densidade de fissura (f/mm)	Espaçamento (mm)	Abertura (mm)
0	0	0	187	0
2,25	2	10,70	62,66	0,21967
2,86	3	16,04	46,58	0,25422
3,73	5	26,74	30,76	0,31790
5,77	7	37,43	22,92	0,33147
9,12	13	69,52	14,11	0,34038
15,12	14	74,87	12,19	0,36971
26,63	17	90,91	10,57	0,40125

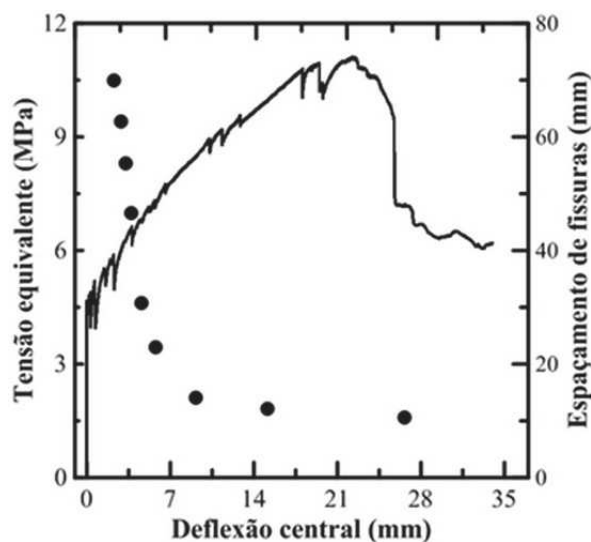


Figura 4.17: Espaçamento entre fissuras do CP submetido aos esforços de flexão

4.2.3 Resistência à tração direta

Na Figura 4.18, está apresentada a curva típica de tensão-deformação na tração direta dos laminados e na tabela 4.8, os resultados médios de tensão de primeira fissura (σ_f), deformação na primeira fissura (ε_f), tensão máxima (σ_u), deformação na tensão máxima (ε_u) e os coeficientes de variação respectivos. Através da curva tensão deflexão, pode se identificar 3 tipos de comportamento. O primeiro foi observado do início do ensaio até a primeira fissura, onde os laminados apresentaram um comportamento linear. O segundo comportamento se localizou entre a primeira

fissura (0,01%) e a deformação de 0,25% onde houve um crescimento de resistência de 50%, com múltipla fissuração. No terceiro trecho, houve três aberturas de fissura com um ganho de resistência de 200%. O ganho de resistência na tração foi maior do que o ganho na flexão, pois na flexão a camada de fibras na região comprimida, não participou aos reforços pós fissuração.

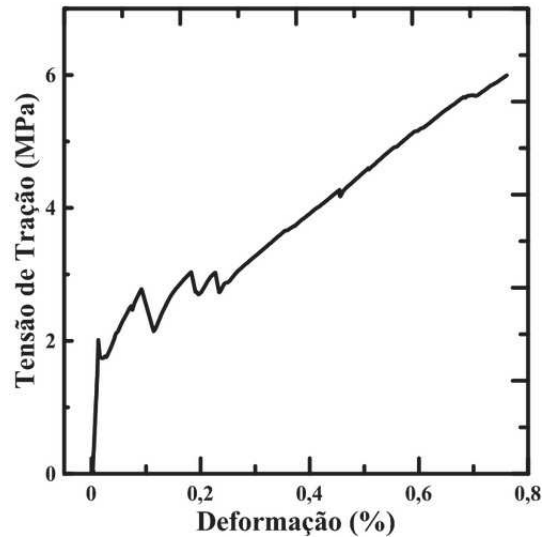


Figura 4.18: Curva típica de tração dos laminados

Tabela 4.8: Valores médios das propriedades em tração direta dos laminados e os coeficientes de variação (%)

σ_f (MPa)	ε_f (%)	σ_u (MPa)	ε_u (%)
1,9 (1,34)	0,03 (3,76)	5,65 (2,65)	0,6 (7,84)

A sequência de fissuração dos laminados ensaiados está apresentada na figura 4.19.

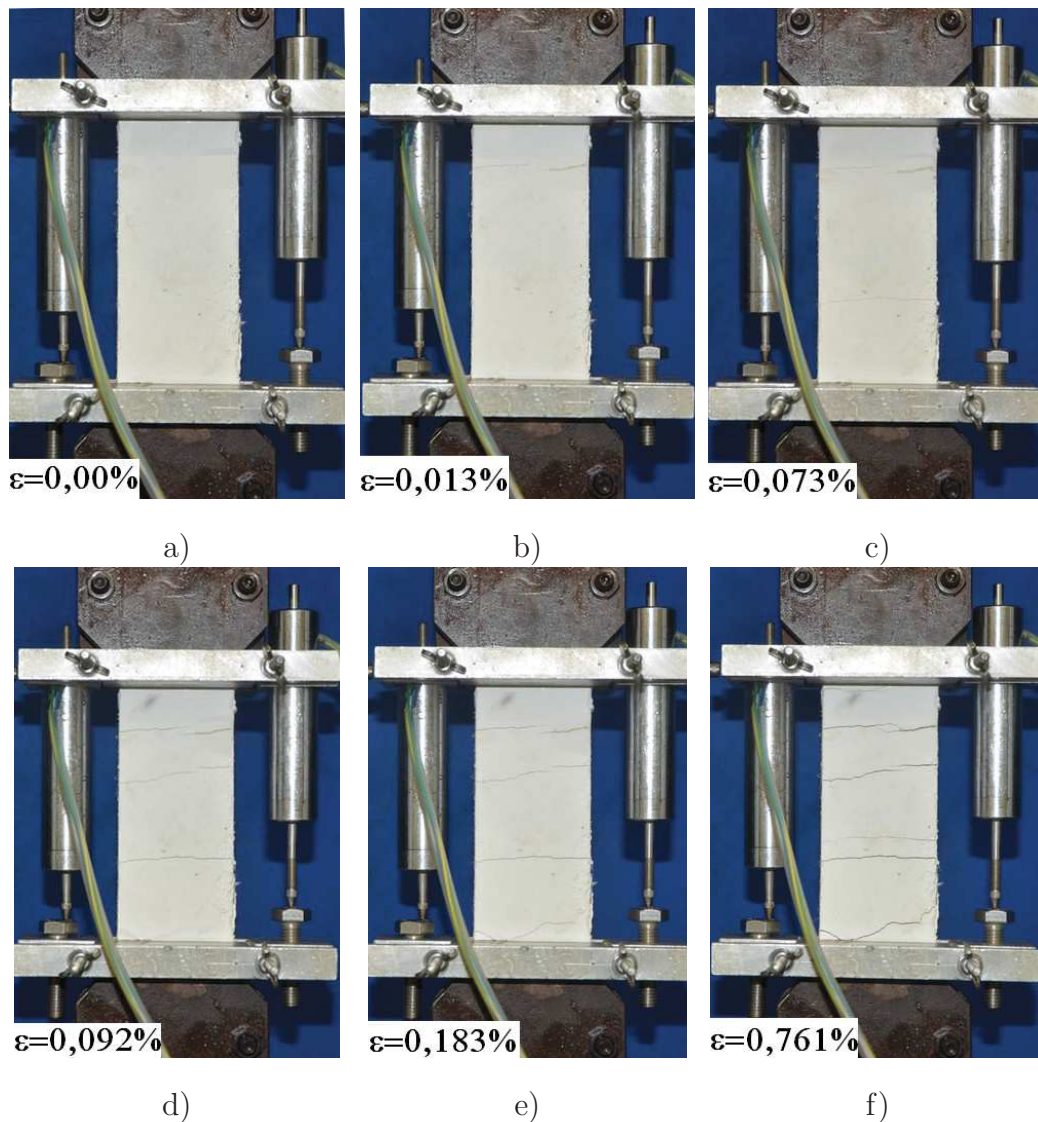


Figura 4.19: Sequência de abertura das fissuras e deformações correspondentes

4.3 Painéis sanduíches

4.3.1 Aspecto visual dos painéis sanduíches

Os painéis sanduíches produzidos tiveram as faces em laminados reforçados com fibras de longas de sisal repartidas em 3 camadas e como núcleo, os CCM 0,5 e CCM 2,5. Na desmoldagem, os dois tipos de painéis PS 0,5 (núcleo CCM 0,5) e PS 2,5 (núcleo CCM 2,5) tiveram superfícies laterais visualmente diferentes. Através da figura 4.20 a, pode-se observar que o PS 2,5 parece exteriormente uniforme. A seção longitudinal (figura 4.20 b) evidenciou o núcleo com cimento e serragem de madeira, assim como as camadas de fibras e de argamassa nas faces.



Figura 4.20: PS 2,5 a)Aspecto externo b) Seção longitudinal

O painel PS 0,5 mostrou mais distintamente as faces e o núcleo (figura 4.21). Pode se observar que seu núcleo foi mais poroso, e não houve defeitos nas interfaces núcleo-faces.



Figura 4.21: PS 0,5 a)Aspecto externo b) Seção longitudinal

4.3.2 Densidade

A tabela 4.9 apresenta os valores médios de densidade dos painéis. O painel tendo o núcleo mais denso apresentou densidade maior. O painel PS 2,5 apresentou um acréscimo de densidade de 28,39% em relação ao PS 0,5, enquanto o seu núcleo CCM 2,5 apresentava uma acréscimo de 36,36% em relação ao CCM 0,5. Esta redução da diferença entre os dois tipos se justifica pelo fato que os dois tiveram o mesmo ganho de peso devido à adição das faces.

Tabela 4.9: Valores médios de densidade dos painéis e coeficientes de variação (% entre parenteses)

Painéis	Densidade (kg/m ³)
PS 0,5	1020 (1,52)
PS 2,5	1450 (4,01)

4.3.3 Absorção capilar

A Tabela 4.10 apresenta os valores médios obtidos para absorção de água por capilaridade dos corpos de provas extraídos dos painéis PS 0,5 e 2,5 após 72 e 170 horas (7 dias) de ensaio, e a figura 4.22 as curvas de absorção.

Tabela 4.10: Valores médios de absorção de água por capilaridade dos painéis

Mistura	Absorção capilar (g/cm ³)	
	72h	170 h
CCM 0,5	4,50 (5,76)	4,63 (5,56)
CCM 2,5	2,09 (2,02)	2,52 (4,85)

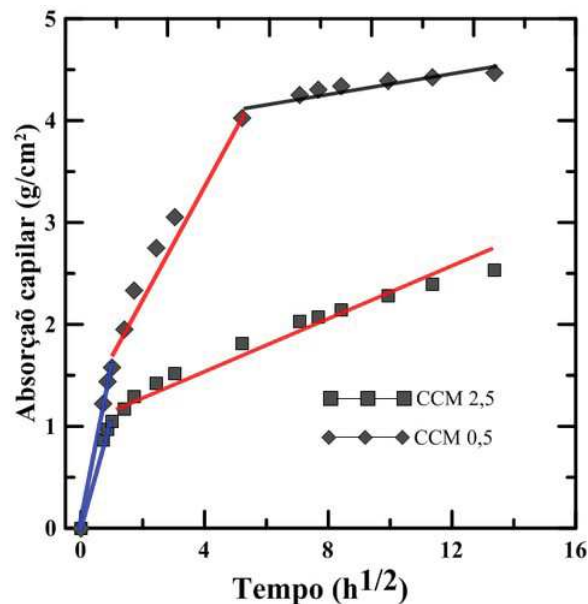


Figura 4.22: Curvas de absorção de água por capilaridade

Os valores de absorção dos PS 0,5 foram os mais elevados nas duas idades, pois eles têm o núcleo contendo mais serragens e mais poros. Podemos observar através

do gráfico da figura 4.22 que a ascensão da água nos painéis PS 0,5 se dividiu em três etapas. A primeira etapa ocorreu entre 0 e $1,25 \text{ h}^{1/2}$ e pode corresponder à travessa da face inferior do painel. Uma vez que a água passou pela interface núcleo-face, e entrou no núcleo, houve uma pequena redução da absorvidade indicando o segundo estágio. A partir de $5,15 \text{ h}^{1/2}$, a absorção diminuiu pois o painel já estava perto do estado saturado. No PS 2,5 que teve só dois estágios, o primeiro ocorreu da mesma maneira do que o PS 0,5 com uma alta absorvidade até $1,25 \text{ h}^{1/2}$, ilustrando a ascensão capilar na face inferior. Na segunda etapa iniciada pela redução da inclinação da curva, a absorção do núcleo PS 2,5 foi menor do que o PS 0,5 como observado no ensaio de absorção dos CCM. Um terceiro estágio não foi observado provavelmente por causa do tempo de ensaio insuficiente para o PS 2,5 chegar no estado perto da saturação.

4.3.4 Compressão uniaxial longitudinal

As curvas carga-deformação dos núcleos e das faces dos painéis PS 0,5 e 2,5 durante a compressão longitudinal estão respectivamente apresentadas nas figuras 4.23a e 4.23b. A tabela 4.11 apresenta os valores de carga máxima F_{max} , resistência à compressão do sanduíche σ_{PS} , deformação das faces e do núcleo no pico (ε_{Fp} e ε_{Np}), deformação das faces e do núcleo no final do ensaio (ε_{Fu} e ε_{Nu}).

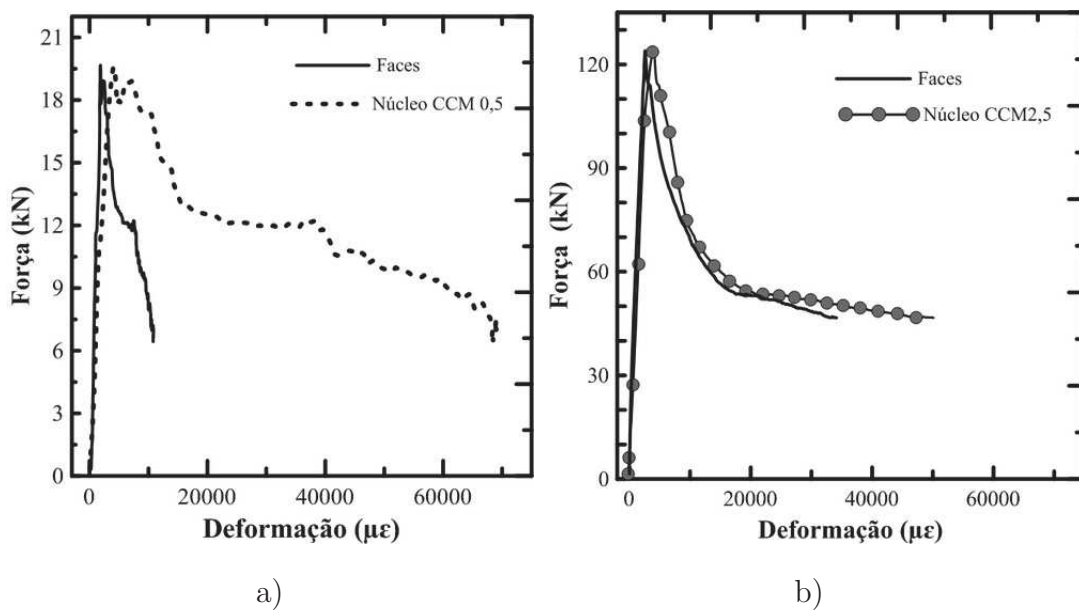


Figura 4.23: Curvas força-deformação das faces e núcleo a) PS 0,5 b) PS 2,5

Tabela 4.11: Valores de cargas e de resistência obtidos na compressão longitudinal

Painel	F_{max} (kN)	σ_{PS} (MPa)	ε_{Fp} ($\mu\varepsilon$)	ε_{Np} ($\mu\varepsilon$)	ε_{Fu} ($\mu\varepsilon$)	ε_{Nu} ($\mu\varepsilon$)
PS 0,5	19,67	2,01	1667	4000	10768	68442
PS 2,5	123,95	12,67	2555	3971	34200	50375

O painel PS 0,5 apresentou um ganho de resistência na ordem de 350% em relação ao CCM 0,5. Esse ganho de resistência pode ser atribuído à contribuição das faces cujas resistências provavelmente foram maiores do que a do núcleo. Quanto ao PS 2,5, ele apresentou um ganho de resistência de 34% em relação ao CCM 2,5. O PS 2,5 se mostrou 6 vezes mais resistente, ilustrando assim o impacto do núcleo na resistência à compressão que de fato, não é o papel exclusivo das faces. As faces do PS 0,5 se deformaram 7 vezes menos do que os núcleos, enquanto as faces do PS 2,5 tiveram uma deformação similar ao núcleo, até 20000 $\mu\varepsilon$. No final do ensaio, elas apresentaram 67% da deformação total dos núcleos.

As imagens dos corpos de provas depois do ensaios são apresentadas na figuras 4.24. Se baseando na norma ABNT NBR 5739:2007, pode se afirmar que os núcleos do PS 2,5 tiveram uma ruptura de tipo cônica e cisalhada (figura 4.24 a), enquanto as faces tiveram uma ruptura de tipo colunar (figura 4.24 b). Quanto aos núcleos do PS 0,5 ensaiados, alguns apresentaram uma ruptura de tipo cônica e cisalhada, enquanto outros uma ruptura colunar (figura 4.24 c). As faces se deformaram pouco e não houve um modo de ruptura que possa ser atribuído (figura 24 d), apesar do fato que das faces do CP2 (4.24 c) flambaram e sofreram de delaminação.



a)



b)



c)



d)

Figura 4.24: Ruptura em compressão a)PS 2,5 Núcleo b)PS 2,5 Faces c) PS 0,5 Núcleo d)PS 0,5 Faces

4.3.5 Compressão uniaxial transversal

As curvas carga-deflexão dos painéis PS 0,5 e PS 2,5 submetidos ao ensaio de compressão transversal estão apresentadas na figura 4.25. A tabela 4.11 apresenta os valores de resistência à compressão transversal dos painéis σ_{tr} , deformação na carga máxima ε_{σ} .

Tabela 4.12: Valores de resistência e deformação obtidos na compressão transversal

Painel	σ_{tr} (MPa)	Deformação ($\mu\varepsilon$)
PS 0,5	0,96	52311,47
PS 2,5	6,53	10969,46

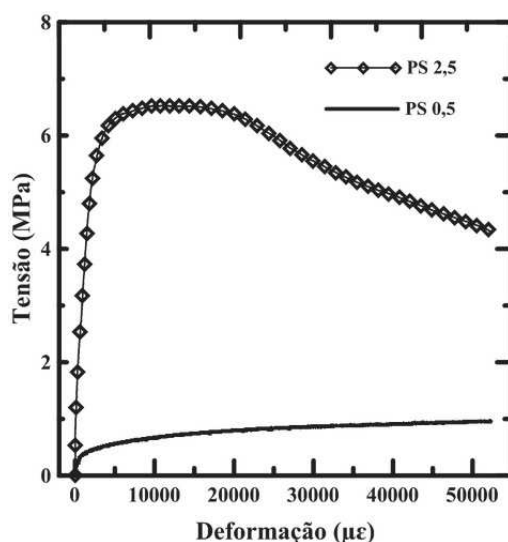


Figura 4.25: Curvas dos PS 0,5 e 2,5 submetidos à compressão transversal

Comparando-se as resistências à compressão transversal do painéis PS 0,5 e uniaxial do CCM 0.5, pode se observar que houve um aumento de resistência de 0,52 MPa equivalente a 120%. Esse aumento pode se explicar pelo fato que as faces, apesar de ser dispostas no sentido transversal durante o ensaio, contribuíram no ganho de resistência do PS 0.5 sem mudar o modo de ruptura. Em relação à compressão longitudinal, o PS 0,5 sofreu de uma redução de 52,5%, explicável pelo fato que a contribuição das faces dispostas longitudinalmente foi mais eficiente. De acordo com os modos de ruptura mostrados na figura 4.26a, pode se ver o núcleo rompeu por cisalhamento, enquanto as faces apresentaram fissuras desprezíveis entre a interface núcleo-face e a primeira camada de fibras de sisal (figura 4.26b).



Figura 4.26: a)Corpos de prova CP PS 0,5 rompidos b) Interface face núcleos

Quanto aos painéis PS 2.5, uma vez submetidos às cargas aplicadas transversalmente, sofreram de uma redução de 30% quando comparados aos CCM 2,5. Isto pode ser devido à presença das camadas de fibras nas faces. Essas camadas sendo perpendiculares ao sentido de aplicação das cargas nas faces, provavelmente reduziram sua resistência. Pode se observar também através da figura 4.25 que quando o PS 2,5 atingiu a tensão máxima, não houve depois uma diminuição brusca da tensão que foi mais suave. Comparando-se os valores da resistência transversal e longitudinal, pode-se anotar que houve uma redução de 48%. Analogamente ao PS 0.5, as faces se mostraram menos eficientes quando solicitadas na direção transversal. Quanto ao modo de ruptura, na figura 4.27 pode se observar que tanto o núcleo como as faces, ambos romperam. Os núcleos e os núcleos tiveram respetivamente uma ruptura cisalhada e colunar.



Figura 4.27: a)Corpos de prova CP PS 2,5 rompidos b) Interface face núcleos

4.3.6 Tração direta

As curvas típicas de carga deformação das faces e dos núcleos, estão apresentadas nas figuras 4.28. Como pode se ver nas figuras 4.28 a e b, as regiões onde foram posicionados os LVDTs dos núcleos não se deformaram. Isto se pode se explicar pelo fato que como a força foi aplicada apenas nas faces, a transferência de esforços pelo núcleo por cisalhamento não foi efetiva tanto para o PS 0,5 como o PS 2,5.

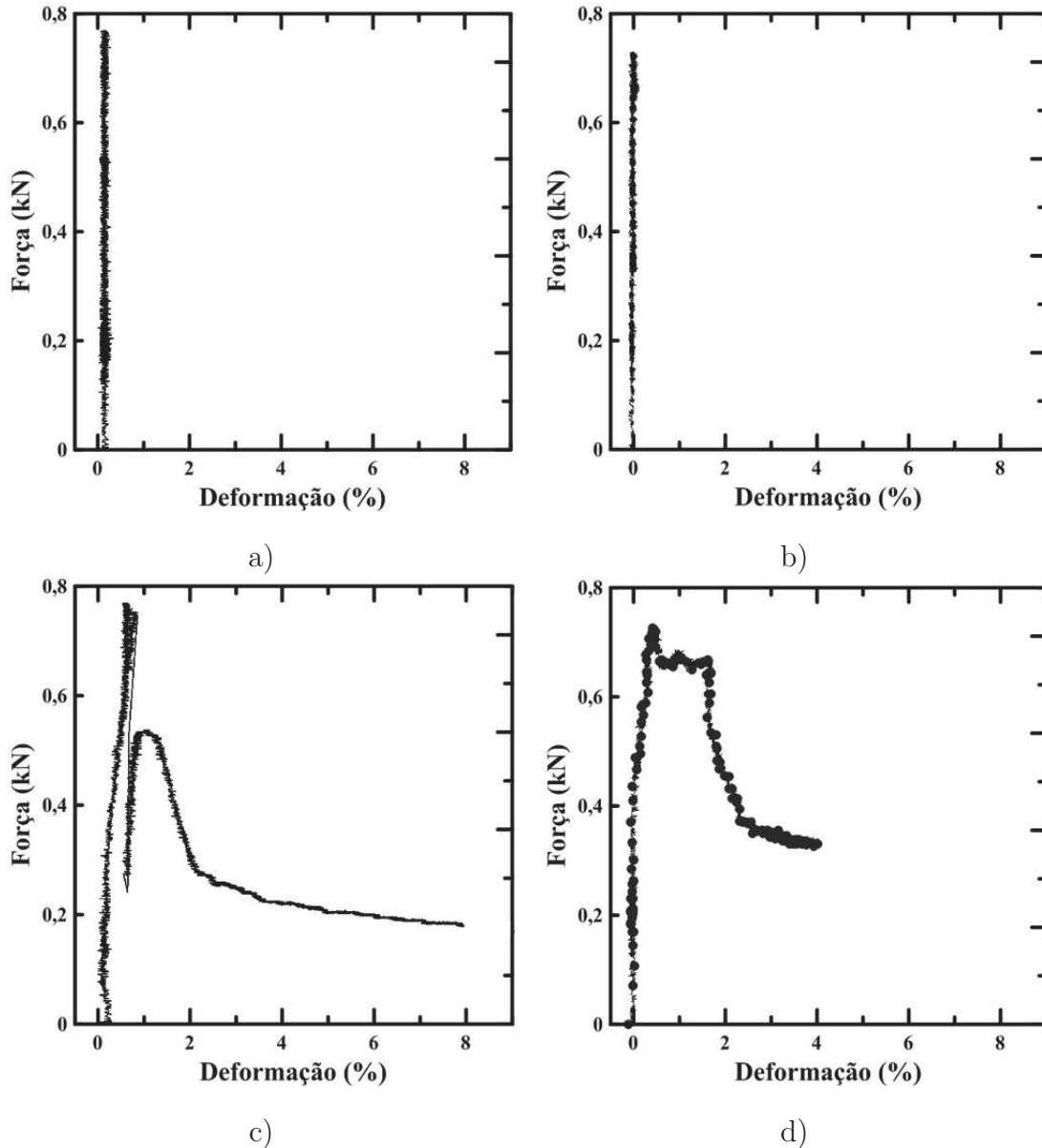


Figura 4.28: Curvas típicas força deformação a) Núcleo PS 2,5 b) Núcleo PS 0,5 c) Faces 2,5 d) Faces 0,5

No caso do painel PS 0,5, quando a tensão de cisalhamento na interface face-núcleo superou a resistência ao cisalhamento do núcleo, ele rompeu por cisalhamento

nas regiões perto das interfaces, até a separação completa das faces e do núcleo. A figura 4.39 ilustra o processo de deformação de dois painéis PS 0.5 durante o ensaio.

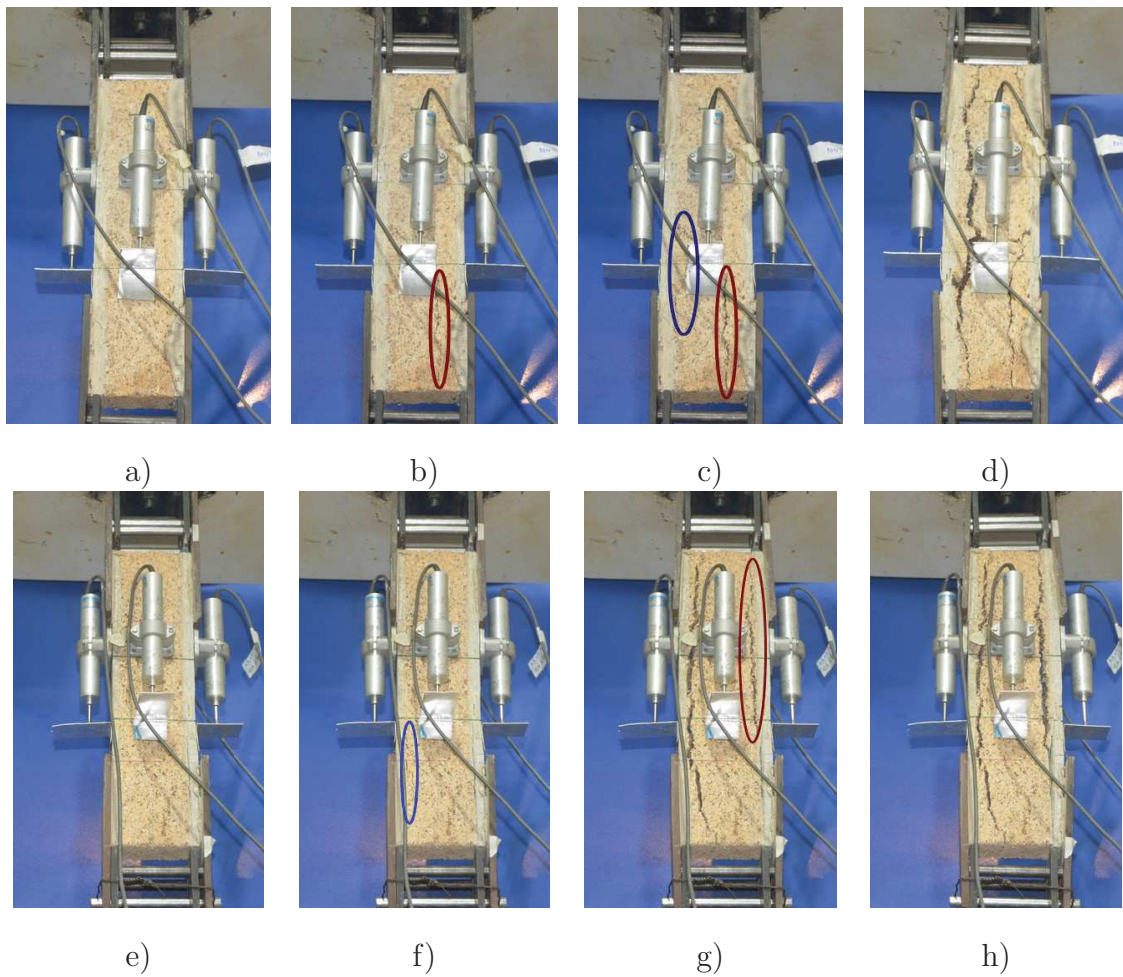


Figura 4.29: Ruptura dos núcleos de dois PS 0,5: (a,e) Início do ensaio de tração direta, (b,f) Surgimento da 1ª fissura, (c,g) 2ª fissuração (d,h) Final do ensaio

A figura 4.30 mostra os corpos de provas do PS 0,5 após o ensaio.



a)



b)



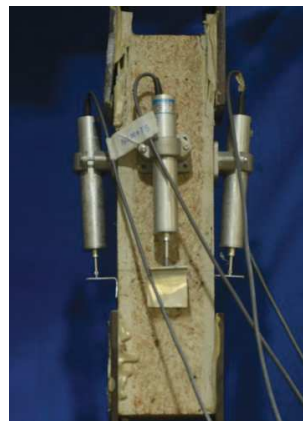
c)

Figura 4.30: CP PS 0,5 após o ensaio de tração direta a) CP1 (c,d) CP2

Quanto ao PS 2.5, seu núcleo teve uma resistência ao cisalhamento muito maior do que a tensão de cisalhamento na interface, então não houve transferência de esforços para o núcleo que não se deformou (4.31 c). Após o ensaio foram observadas fissuras nas faces na região central do CP (figura 4.31d) e uma delaminação das faces na superfície de contato com a placa metálica que transferia os esforços pelas faces (figura 4.31e).



a)



b)

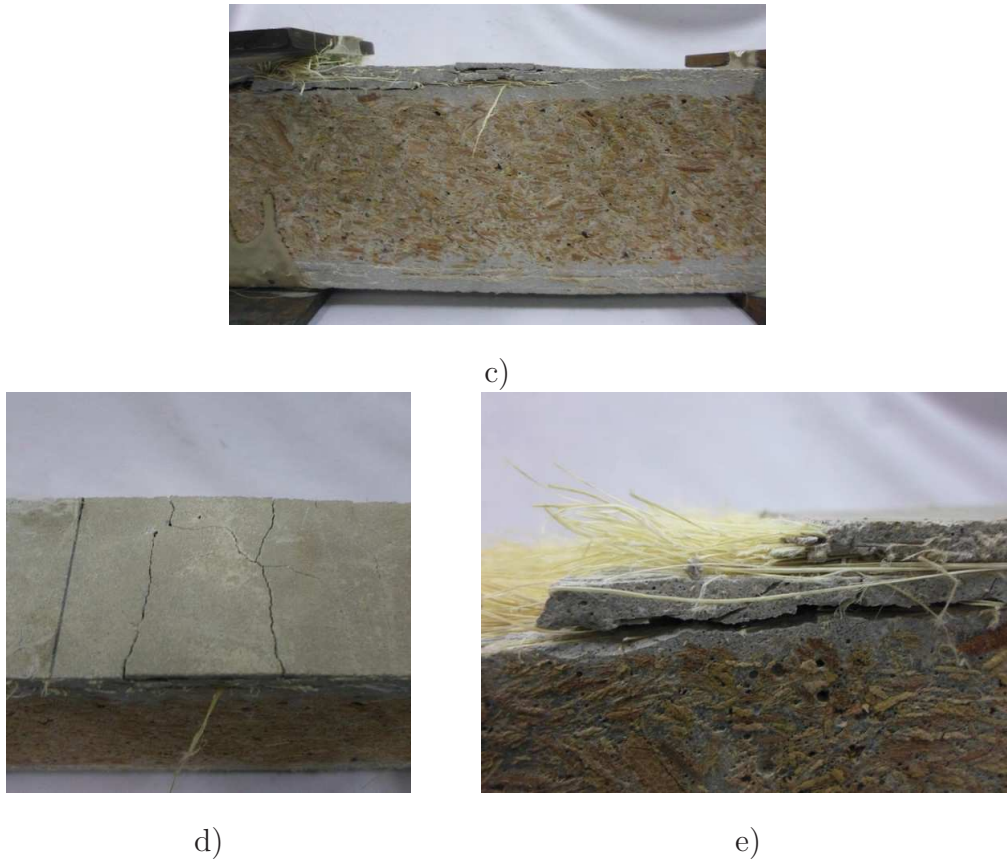


Figura 4.31: CP PS 2,5 a) Início do ensaio de tração direta b) Final do ensaio c) Núcleo sem fissura d) Fissuras numa face e) Delaminação das faces

Como pode se observar na figura 4.32, os painéis PS 0,5 e 2,5 tiveram cargas máximas próximas, e se diferenciaram depois da fissuração.

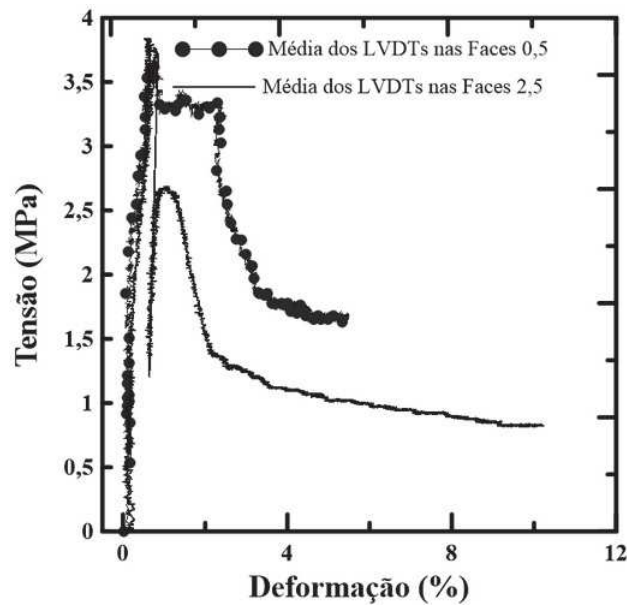


Figura 4.32: Curvas das faces dos PS 0,5 e 2,5 submetidas à tração direta

Depois da primeira fissura, houve uma queda maior de tensão nas faces do PS 2.5, seguido por uma subida da tensão até uma segunda queda. Não houve essa subida para o PS 0.5, que também não sofreu de delaminação pois suas faces ficaram integras e proporcionaram assim uma resistência melhor.

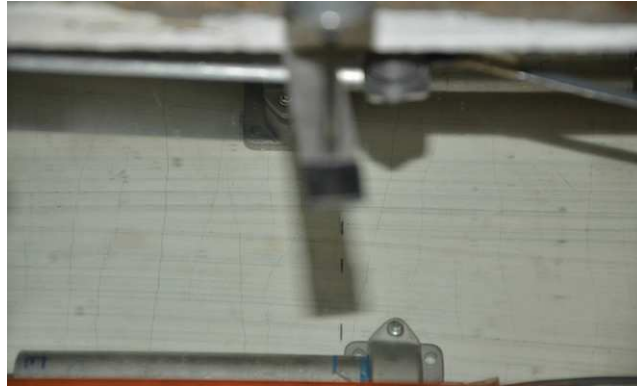
O comportamento pós pico dos painéis não foi similar ao comportamento dos laminados em que houve um incremento até 200% da tensão de primeira fissura. Isto pode se explicar pelo fato que todas camadas de fibras nas faces não foram solicitadas da mesma forma. A camada perto da região externa da face foi mais solicitada enquanto as outras foram menos. Então, houve menos de 6% de fibras reforçando as faces do painel e conseqüentemente um comportamento pós fissuração diferente do laminado.

4.3.7 Flexão em 4 pontos

Durante o ensaio de flexão de uma estrutura sanduíche, a face superior trabalha em compressão, a inferior em tração, enquanto o núcleo é submetido ao cisalhamento.

Painel sanduíche PS 0,5

O painel PS 0,5 cujo núcleo tem uma densidade de 700 kg/m^3 , rompeu por cisalhamento do núcleo. Durante o ensaio, houve abertura de fissuras finas na região central da face inferior do painel (figura 4.33 a) enquanto na parte lateral, maiores fissuras de cisalhamento do núcleo se abriram (figura 4.33 b). Pode se observar também na figura 4.33 b que entre os dois apoios, a face inferior não apresentou uma curvatura central, mas uma deflexão uniforme. Isto explica a coincidência das curvas Força-deflexão obtidas a partir dos diferentes LVDTs utilizados como ilustrado na figura 4.34 a.



a)



b)

Figura 4.33: a) Fissuras finas na face inferior b) Painel depois o ensaio de flexão

A abertura de fissura lida pelos dois LVDTs posicionados na face inferior é ilustrada na figura 4.34b.

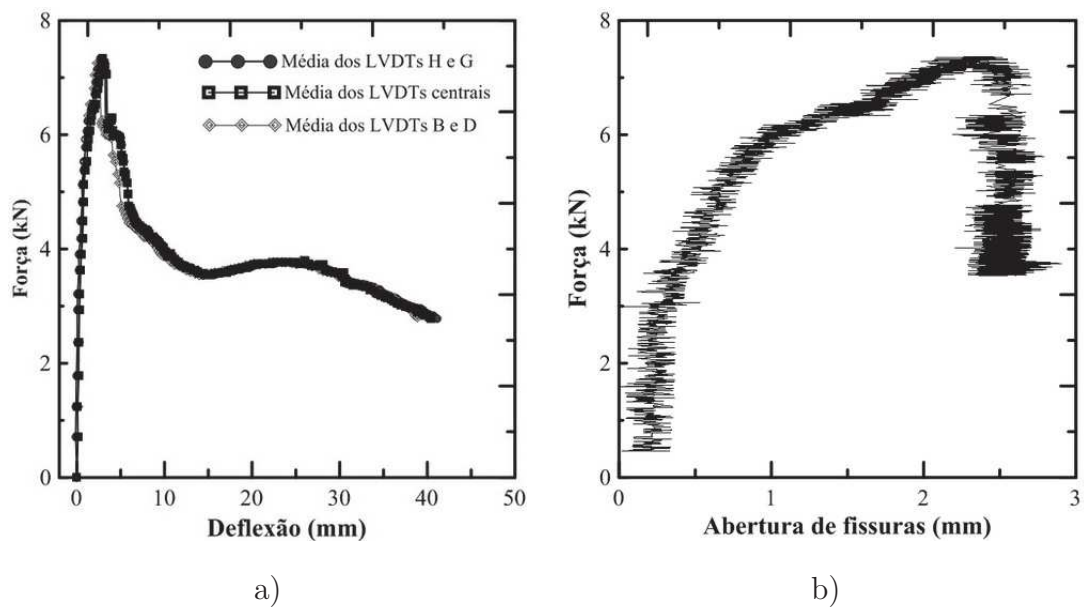


Figura 4.34: PS 0,5 a) Curvas Força-Deflexão b) Curvas Força - Abertura de fissuras

O painel apresentou um comportamento linear até 60% do pico. Após a fissuração, ele teve uma ampla deformação com redução de carga. Se baseando na figura 4.34b, pode se observar que até 3 kN, o abertura de fissura estava quase nula. Ela aumentou de 2 mm entre 3 e 7,36 kN (pico de força) e após 7,36 kN, a faixa de abertura diminuiu (apenas 0,5 mm entre 7,36 e 4 kN).

A figuras 4.35 mostra o painel PS 0,5 depois do ensaio de flexão em 4 pontos.



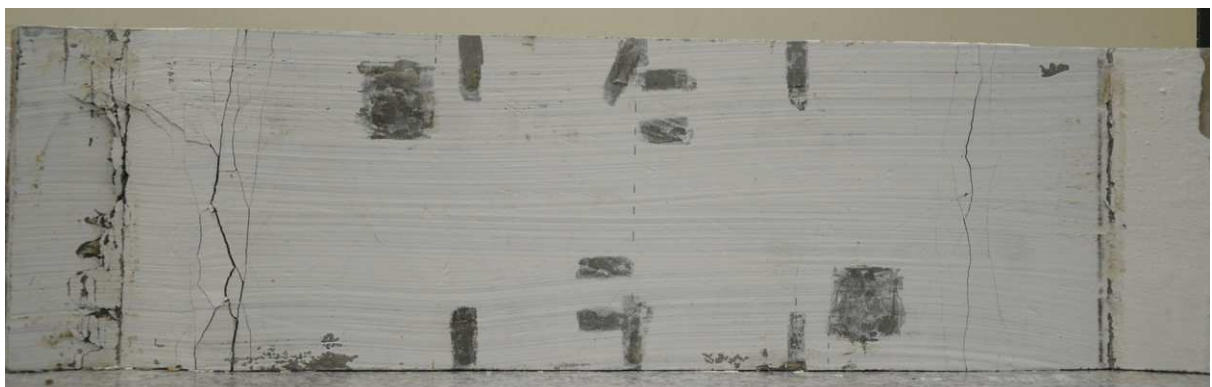
a)



b)



c)



d)

Figura 4.35: a) Vista lateral do Painel PS 0,5 b) Parte central c)Extremidade d)Face inferior do Painel PS 0,5 após o ensaio

Painel sanduíche PS 2,5

O painel PS 2,5 cujo núcleo tem uma densidade de 1100 kg/m^3 , rompeu por flexão. Na face inferior, varias fissuras visíveis (figura 4.36 a) se abriram durante o ensaio na região central, enquanto o núcleo rompeu por abertura de uma única fissura (figura 4.36 b).

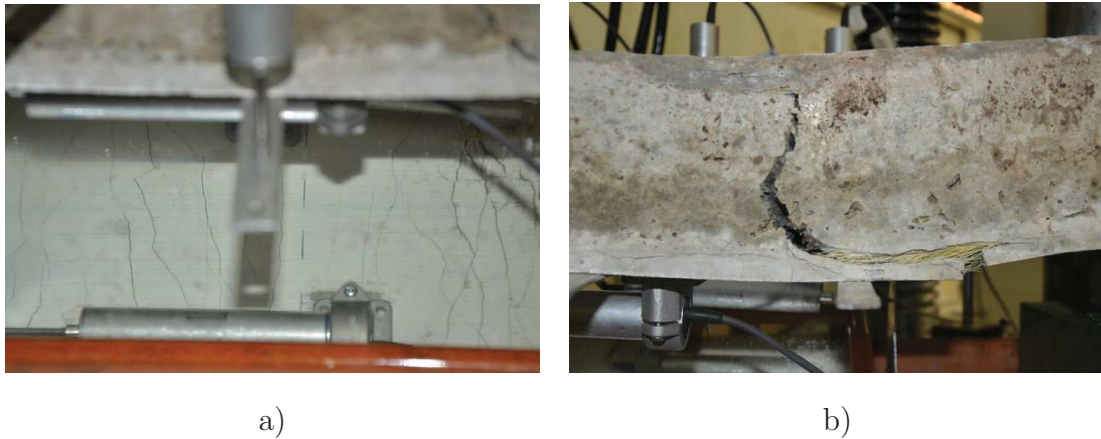


Figura 4.36: a) Fissuras na face inferior durante o ensaio b) Fissuração principal do núcleo

As curvas Força-deflexão são apresentadas na figura 4.37.

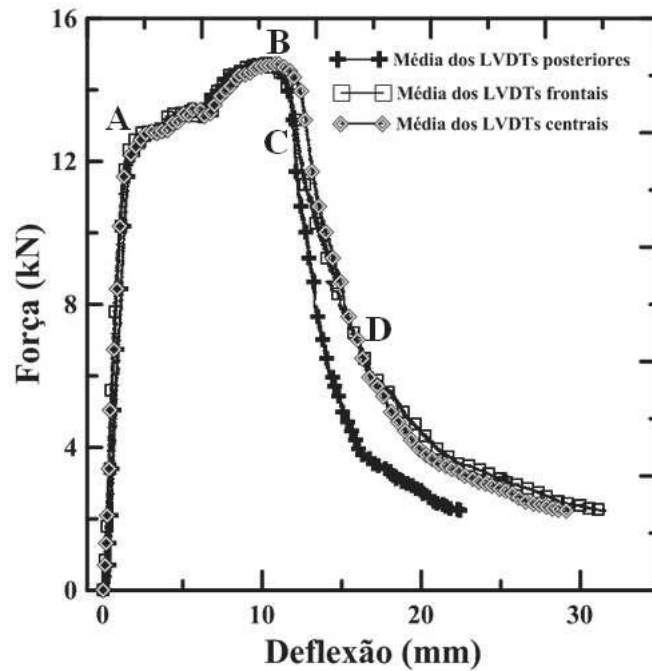


Figura 4.37: Curvas Força-Deflexão PS 2,5

Pode-se observar na figura 4.37 que as médias dos LVDTs coincidiram até o surgimento da primeira fissura (A). Depois, houve um ganho de resistência de 17,52%, e uma deflexão mais ampla até a diminuição da força (B). Nesta etapa, a curva dos LVDTs centrais se distinguiu das outras e apresentou uma deflexão maior. Na etapa C, a curva dos LVDTs frontais começou a se afastar da curva dos LVDTs posteriores, até superar na etapa D a curva dos LVDTs centrais. O aumento da deflexão dos LVDTs frontais pode se explicar pela inclinação que ocorreu depois da abertura da fissura maior, que estava perto da região de aplicação de carga do apoio frontal.

Na face inferior do painel, as aberturas de fissura foram lidas pelos LVDTs 1 e 2 (figura 4.38). A curva Força - Abertura de fissura é apresentada na figura 4.39, sendo o LVDT 2 aquele que leu a abertura da maior fissura conforme mostrado na figura 4.38a. Chamando de região 1 e 2 as regiões onde foram posicionados respectivamente os LVDTs 1 e 2, pode se dizer que do início do ensaio até o ponto B, as taxas de deformação foram similares. A partir do ponto B, uma fissura da região 2 começou a se abrir mais e causou a redução de abertura das outras fissuras, inclusive da região 1 como mostrado nas curvas da figura 4.39.

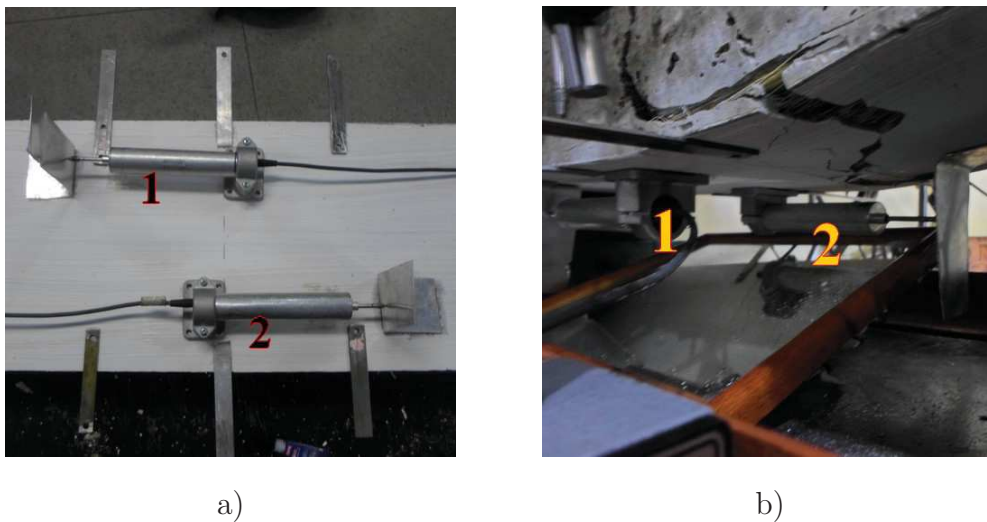


Figura 4.38: a) Fixação dos LVDTs b) LVDTs medindo as fissuras da face inferior

Para os dois painéis PS 0,5 e PS 2,5, a Tabela 4.12 apresenta a carga de primeira fissura F_f , a deflexão central na primeira fissura δ_f , a carga máxima F_{max} , a deflexão central na carga máxima δ_{max} (mm), a tensão máxima no laminado inferior σ_{max} (MPa), e a tensão máxima de cisalhamento τ_{max} do núcleo (MPa).

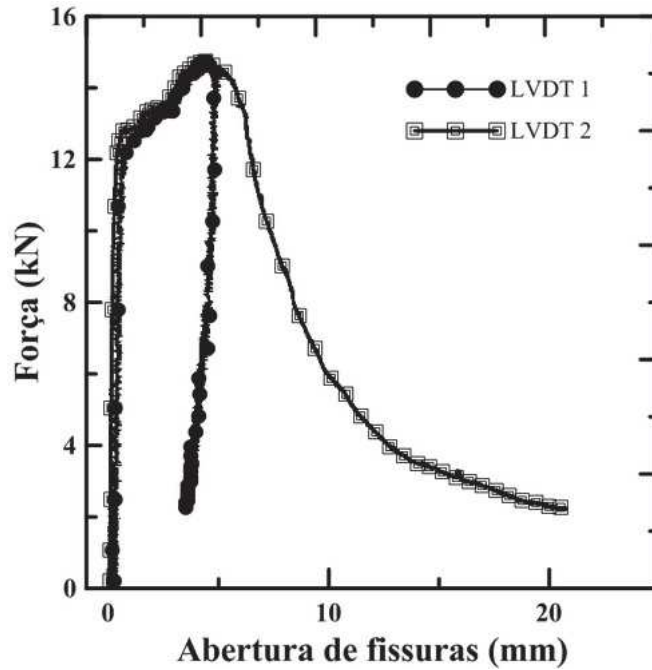


Figura 4.39: Curvas Força - Abertura de fissura

Tabela 4.13: Propriedades dos painéis depois do ensaio de flexão

Painéis	F_f (kN)	δ_f (mm)	F_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	σ_{max} (MPa)	τ_{max} (MPa)
PS 0,5	6,53	1,91	7,369	2,91	4,09	0,16376
PS 2,5	11,018	1,246	14,747	11,08	8,19	0,32772

Pode se anotar que a tensão de cisalhamento do núcleo do PS 0,5 é próxima da tensão de cisalhamento do CCM 0,5 (0,1637 MPa e 0,166 MPa), confirmando que o núcleo rompeu por cisalhamento. No entanto a tensão de cisalhamento do núcleo PS 2,5 é 6 vezes menor do que sua resistência, devido ao fato que como o PS 2,5 rompeu por flexão, a tensão máxima de cisalhamento não foi atingida.

A figura 4.40 mostra o painel PS 2,5 depois do ensaio.



a)



b)



c)

Figura 4.40: PS 2,5 após o ensaio de flexão a) Vista lateral b) Face inferior c) Parte central da face

4.4 Cisalhamento por flexão em 4 pontos

4.4.1 Paineis PS 0,5

As amostras PS 0,5 ensaiados no cisalhamento por flexão tiveram comportamentos similares. A ruptura ocorreu por cisalhamento do núcleo observável através de dois tipos de fissuras no mesmo. O primeiro tipo de fissuras ocorreu nos planos de cisalhamento entre os pontos de aplicação de cargas e os apoios (figure 4.41a). As segundas fissuras se localizaram nas extremidades dos corpos de prova como ilustrado na figura 4.41b. Quanto às faces, tanto superiores como inferiores se fissuraram ao redor dos apoios (figuras 4.41 c,d).

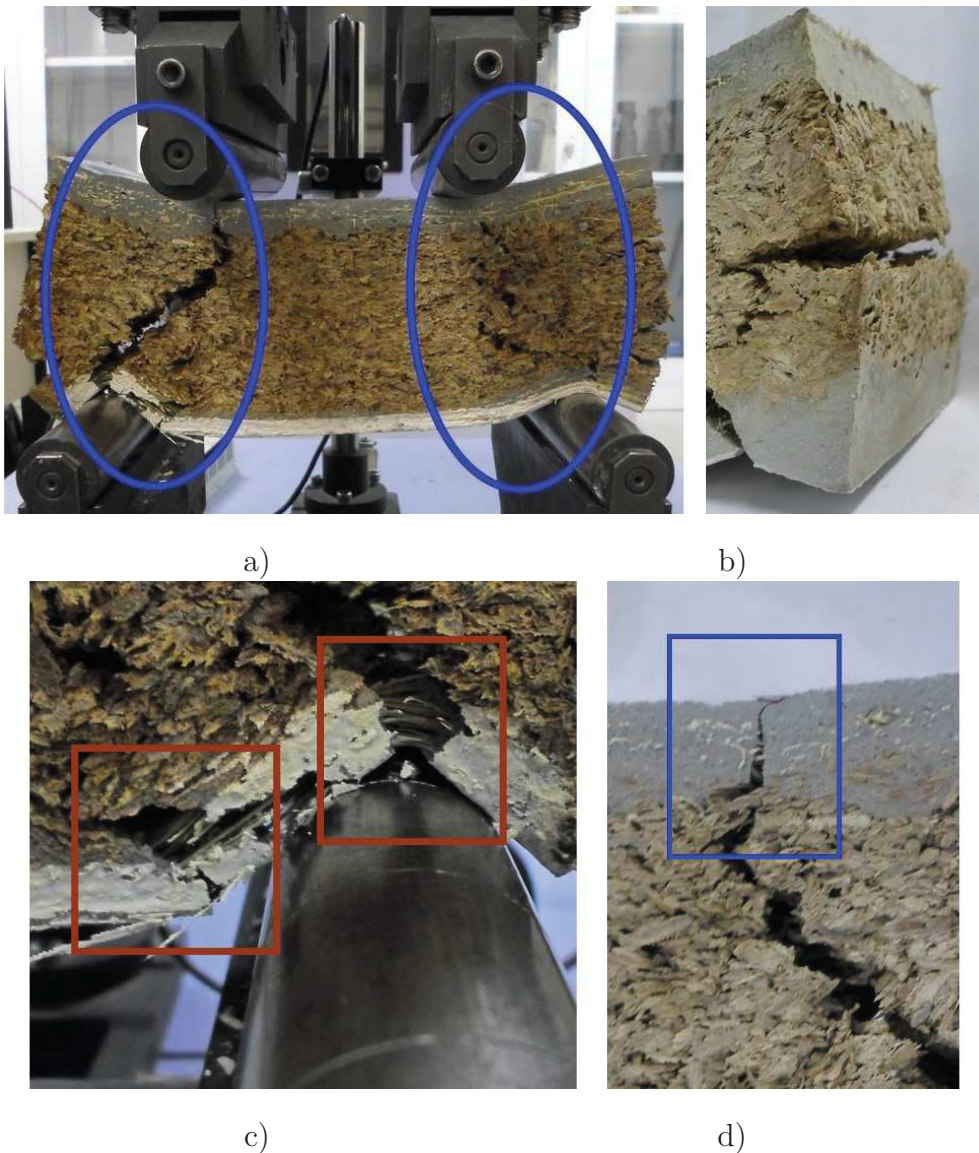


Figura 4.41: Localizações de fissuras no PS 0,5 a,b) núcleo c,d)faces

A curva típica Força-deflexão está ilustrada na figura 4.42. Pode se observar que o corpo de prova teve um comportamento linear até a força de 2,65 kN onde houve a primeira fissura. Depois dessa fissuração, houve um aumento de carga até 2,78 kN onde houve a segunda fissura, seguida por um acréscimo (11%) até a carga de pico de 2,95 kN. Após a carga de pico houve várias fissurações sem queda brusca de carga. Entre 0,5 mm (deflexão na carga de pico) e 9 mm (deflexão no final do ensaio), houve apenas 16% de redução de carga.

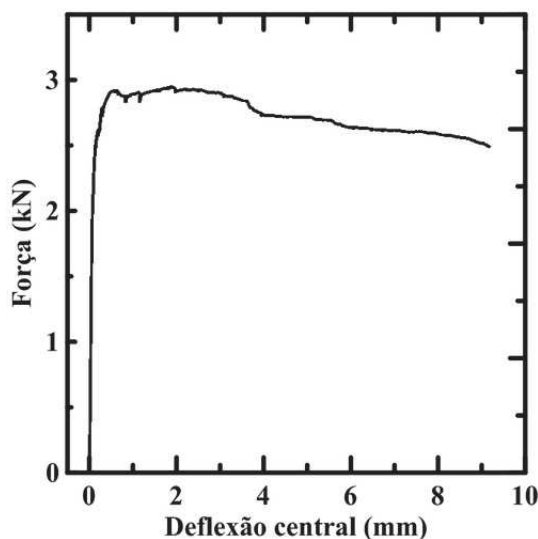


Figura 4.42: Curva típica dos PS 0,5

A Tabela 4.14 apresenta a carga de primeira fissura F_f , a deflexão central na primeira fissura δ_f , a carga máxima F_{max} e a deflexão correspondente δ_{max} (mm), a tensão máxima de tração nas faces inferiores σ_{max} (MPa), e a tensão máxima de cisalhamento τ_{max} dos núcleos (MPa) dos PS 0,5.

Tabela 4.14: Propriedades dos PS 0,5 depois do ensaio de cisalhamento por flexão e coeficientes de variação (% entre parenteses)

F_f (kN)	δ_f (mm)	F_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	σ_{max} (MPa)	τ_{max} (MPa)
2,65 (8,22)	0,23 (5,38)	2,93 (10,35)	9,59 (15,25)	1,36 (10,35)	0,33 (10,35)

A figura 4.43 mostra os corpos de prova após o ensaio.

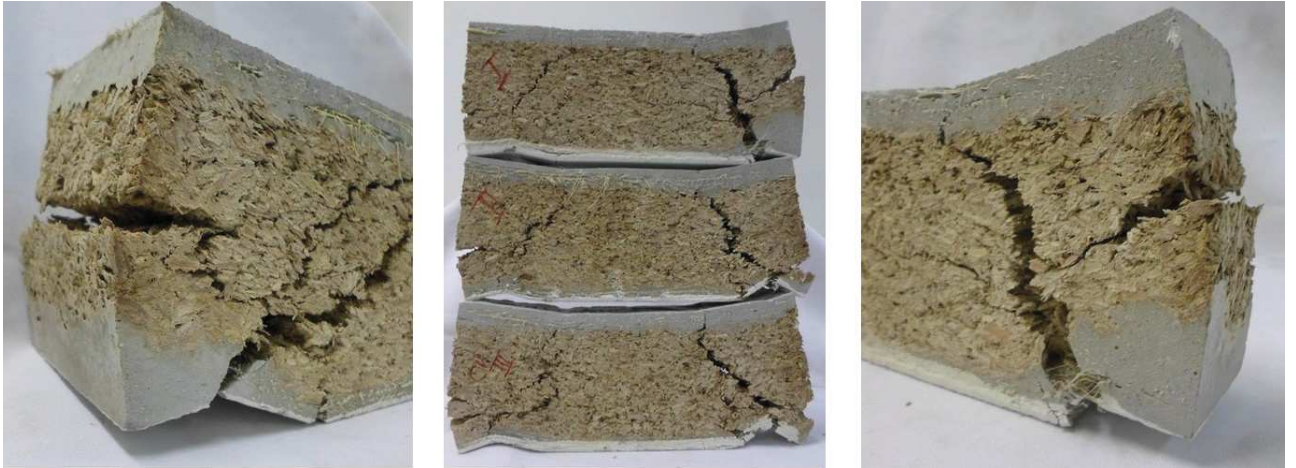
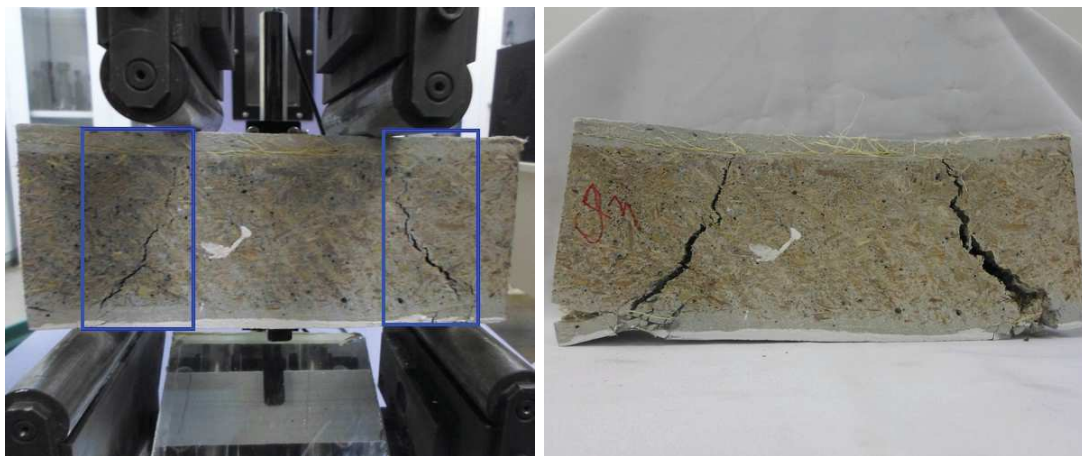


Figura 4.43: PS 0,5 após o ensaio

4.4.2 Paineis PS 2,5

Os PS 2,5 romperam de maneira similar por cisalhamento do núcleo. Diferentemente dos PS 0,5, a ruptura do núcleo ocorreu apenas nos planos de cisalhamento entre os pontos de aplicação de carga e os apoios (figura 4.44).



a)

b)

Figura 4.44: Planos de fissuras do núcleo de fissuras no PS 2,5 a,b) núcleo c,d)faces

Quanto às faces inferiores, elas romperam por esmagamento (figura 4.45 a) no apoio. Esse esmagamento causou o um rompimento visível das duas camadas inferiores de fibras. Elas sofreram também de delaminação, na primeira camada de fibras logo após da interface núcleo-face como ilustrado na figura 4.45 b.



Figura 4.45: Localizações de fissuras na face inferior do PS 2,5

A figura 4.46 apresenta a curva típica dos PS 2,5 durante o ensaio de cisalhamento por flexão. Pode se observar que o comportamento pode se dividir em duas etapas. Na primeira, a evolução da carga é linear à deformação até atingir o pico (14,236 kN). Esta etapa é seguida pelo amolecimento da curva com uma diminuição até 50% da carga de pico.

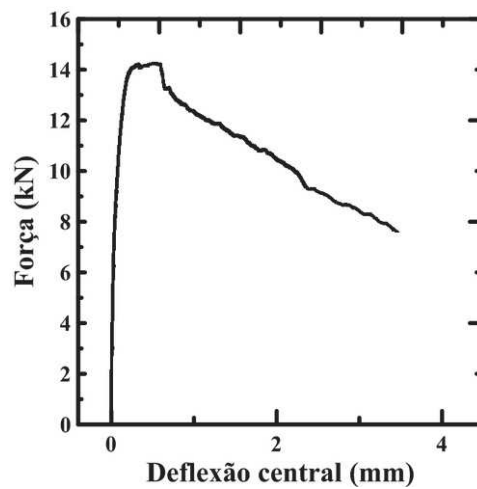


Figura 4.46: Curva típicas dos PS 2,5

A tabela 4.15 apresenta os diferentes resultados obtidos durante o ensaio ou sejam, a carga de primeira fissura ou carga máxima σ_{max} e a deformação correspondente, as tensões de cisalhamento nos núcleos e de tração nas faces inferiores.

Tabela 4.15: Propriedades dos PS 2,5 depois do ensaio de cisalhamento por flexão e coeficientes de variação (% entre parenteses)

F_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	σ_{max} (MPa)	τ_{max} (MPa)
14,30 (0,58)	0,54 (2,77)	7,94 (0,58)	1,59 (0,58)

Um recapitulativo dos valores de carga máxima, e resistências máximas das faces e núcleos dos PS 0,5 e PS 2,5 é apresentado na tabela 4.16.

Tabela 4.16: Recapitulativo dos resultados obtidos dos PS 0,5 e PS 2,5

Painel	F_{max} (kN)	σ_{max} (MPa)	τ_{max} (MPa)
PS 0,5	2,93	1,36	0,33
PS 2,5	14,30	7,94	1,59

Comparando os valores de resistências das faces e núcleos dos PS 0,5 e PS 2,5, pode se observar o PS 2,5 apresentou valores diferentes. Isto ilustra em primeiro o fato que as propriedades mecânicas do núcleo tem uma influência tanto na carga máxima que pode aguentar o painel, como na solicitação das faces. Quanto mais resistente o núcleo, maior a resistência do painel e maior a solicitação nas faces. Comparando-se as curvas força deflexão, pode se anotar, que o PS na pós fissuração apresentou apenas 16 % de diminuição continua de carga até 9 mm de deflexão, enquanto o PS 2,5 apresentou 61% de redução no mesmo intervalo. Esta pequena diminuição de carga do PS 0,5 pode se explicar pelo fato que as faces sendo pouco solicitadas (apenas 1,36 MPa), conseguiram manter o carregamento.

Capítulo 5

Considerações finais

5.1 Conclusões

Neste trabalho foram desenvolvidos 3 tipos de materiais sustentáveis. Os primeiros foram os compósitos cimento madeira de baixa densidade, baixa condutividade térmica e resistências mecânicas aceitáveis. Em segundo lugar, teve o laminado de argamassa reforçada com 6% de fibras longas de sisal unidirecionalmente alinhadas, que apresentou uma boa resistência e um comportamento dúctil na tração e flexão. Em terceiro foram desenvolvidos painéis tipo sanduíches colocando os compósitos cimento madeira entre dois laminados reforçados com fibras de sisal.

Se baseando nas recomendações da literatura, foram empregados lavagem em água quente e uso cloreto de cálcio com o intuito de reduzir os extrativos da madeira e acelerar a hidratação do cimento. Este tratamento se mostrou vantajoso pois todos compósitos produzidos tiveram uma boa consistência após a desmoldagem. Através dos ensaios de resistência à compressão uniaxial, foi mostrado que a variação do teor de cimento nos compósitos proporcionou variações de resistências mecânicas. Efetivamente, alterando a relação mássica cimento/serragem entre 0.5 e 3, foram obtidas resistências à compressão entre 0,44 e 16 MPa. Quanto às densidades, variaram entre 700 e 1250 kg/m³, mostrando que os compósitos se inscrevem na classe dos materiais leves. As condutividades térmicas determinadas também foram baixas, na faixa de 0,06 até 0,55 W/mK, possibilitando o uso dos compósitos como elementos de isolamento térmico.

A substituição de 70% do cimento por metacaulinita e cinza volante permitiu obter uma matriz livre de hidróxido de cálcio e de 26 MPa de resistência à compressão simples. Com os 6% de fibras longas e unidirecionais de sisal repartidas em 3 camadas, o laminado chegou a apresentar resistência à flexão máxima de 10,67 MPa e tração de 5 MPa. Depois da primeira fissura, ocorreu um processo de fratura com múltiplas fissuras tanto na flexão como na tração, indicando que a transferência de tensão para as fibras foi efetiva, com um ganho de resistência até 200% (strain hardening). Esses resultados mostram o potencial promissor no uso desse compósito reforçado com fibras de sisal.

Quanto aos painéis sanduíches desenvolvidos, eles reuniram a leveza e a baixa condutividade térmica dos compósitos cimento madeira, assim como a resistência e a ductilidade dos laminados fibrosos. Eles apresentaram boa aparência externa, baixa densidade (1020 e 1240 kg/m³), e mostraram propriedades mecânicas maiores do que os núcleos e os laminados separados. Os dois sanduíches produzidos apresentaram resistências à compressão de 2 e 12 MPa, com núcleos de resistências iniciais de 0,44 e 9,5 MPa. Essas propriedades comprovaram vantagens do sistema sanduíche em geral, e particularmente do tipo estudado nesta pesquisa, abrindo caminho para seu uso como material portante ou não, uma vez a durabilidade garantida.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para as futuras pesquisas da linha dos painéis sanduíches contendo compósitos cimento serragem, as sugestões são:

- estudar o comportamento físico-mecânico de compósitos cimento serragem com varias espécies de madeira e varias granulometrias, para poder projetar as resistências em função dos tipos de madeira;
- Investigar em matriz de baixa alcalinidade para os compósitos cimento serragem afim de melhorar sua durabilidade;
- Avaliar a durabilidade dos compósitos cimento serragem em condições de envelhecimento natural e envelhecimento acelerado;

- Fazer mais ensaios físicos como mecânicos como o ensaio de impacto no painel;
- Fazer ensaios mecânicos com painéis de tamanho maior;
- Análise numérica dos painéis para investigar sobre a otimização dos painéis em função das dimensões e propriedades dos elementos constituintes;
- Estudar os processos de montagem e junção dos painéis;
- Aprofundar as análises de conforto térmico.

Referências Bibliográficas

- ALAVEZ-RAMIREZ, R., Chiñas-Castillo, F., Morales-Dominguez, V.J., and Ortiz-Guzma, M. Thermal conductivity of coconut fibre filled ferrocement sandwich panels. *Construction and Building Materials*, 37:425–431, 2002.
- ALLEN, Howard G. *Analysis and design of structural sandwich panels*. Oxford, 1969.
- AMZIANE, Soufiane and ARNAUD, Laurent. *Les bétons de granulats d'origine végétale (application au béton de chanvre)*. Hermes Science Publication, 2013.
- ARBAOUI, AMAL EDDINE. *Etude comparative et caractérisations mécaniques des structures sandwichs multicouches*. PhD thesis, Université Paul Verlaine Metz, Metz, 2009.
- BAIOTO, William. Estudo comparativo de materiais utilizados em navalhas para picador florestal. Master's thesis, Universidade de Passo Fundo, 2009.
- BERALDO, Antonio Ludovico. *Généralisation dt optimisation de la fabrication d'un composite biomasse végétale=ciment à variations dimensionnelles limitées vis à vis des variations de l'humidité*. PhD thesis, Université de Nancy I, 1994.
- BERTINI, Alexandre Araújo. *Estruturas tipo sanduíche com placas de argamassa projetada*. PhD thesis, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2002.
- BIBLIS, E.J. and LO, C. F. Effect on the setting of southern pine-cement mixture. *Forest Product Journal*,, 18(8):28–34, 1968.
- BORDINI, Michelle C. Pegorini, MENDOZA, Zaíra Hurtado, Zenezio, FINGER, and LOGSDON, Norman Barros. Caracterização dendrológica, física e química

- da madeira de carvão vermelho, *diptychandra aurantiaca* (mart.) tul. *Madeira: arquitetura e engenharia*, 10(6), 2004.
- BOTOSSO, Paulo Cesar. *Identificação macroscópica de madeiras: guia prático e noções básicas para o seu reconhecimento*. Embrapa Florestas, Colombo : Embrapa Florestas, 2009.
- BUDZIAK, Cristiane R., Claudia, M. Maia, and Antonio, S. Mangrich. Transformações químicas da matéria orgânica durante a compostagem de resíduos da indústria madeireira. *Química Nova*, 27(3):399–403, 2004.
- CASEY, J. *Pulp and paper chemistry and chemical technology*, volume I. Wiley Interscience, New York, 1980.
- CASTRO, Heizer F. *Apostila de aula do curso de Processos Químicos Industriais II*. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- COLOMBO, Isabella Giorgia, COLOMBO, Matteo, and Di PRISCO, Marco. Multilayer precast facade panel: structural optimization for the energy retrofitting and for sustainable constructions. In *10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*, Université Laval, Québec, Canada, July 2014.
- DEY, V., ZANI, G., COLOMBO, M., and MOBASHER, B. Flexural impact response of textile-reinforced aerated concrete sandwich panels. *Materials and Design*, 86:187–197, 2015.
- DOMMERGUE, S.Y. and MANGENOT, F. *Ecologie microbienne du sol*. Masson & Cie, 1970.
- FERREIRA, Saulo Rocha. Influência da hornificação na aderência fibra-matriz e no comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal. Master's thesis, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2012.
- FIDELIS, Maria Ernestina Alves. *Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

- GRAM, Han.-Erik. Durability of natural fibres in concrete. *Blackie, Glasgow*, 68: 143–172, 1988.
- HARRINGTON, J.J. *MicroFibril Angle in Wood*. Ed B.G Butterfield. IAWA/IUFRO, New Zealand, 1998.
- HOCINE, Tayeb. Acetate de cellulose, synthese, proprietes et applications. Master's thesis, Université Abou-bakr belkaid tlemcen, 2013.
- IWAKIRI, Setsuo, SILVA, Leandro Soares, Rosilani, Trianoski, Ghislaine, Miranda Bonduelle, and Vinicius, Yurk da Rocha. Avaliação do potencial de utilização da madeira de schizolobium amazonicum 'paricá' e cecropia hololeuca 'embaúba' para produção de painéis cimento-madeira. *Cerne, Lavras*, 18(2):303–308, 2012.
- J.P, JOSELEAU. *les hémicelluloses, les polymères végétaux*. Edition Monties Bordas, 1980.
- KAARIK, Aino A. *Decomposition of wood, Biology of plant litter decomposition*, volume I. C.H. Dickinson and G.J.F., Edition Pugh, Academic Press,, 1974.
- Laboratory, Forest Products. *Wood handbook Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190*. Forest Products Laboratory, Madison WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 2010.
- LACHGUER, Abdelkarim. *Les matériaux sandwich et les risques d'instabilités géométriques locales*. Ecole Mines de Douai, 2013.
- LATORRACA, João Vicente. *Eucalyptus spp. na produção de painéis de cimento-madeira*. PhD thesis, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.
- LEPAGE, E. S. Manual de preservação de madeiras. *IPT*, pages 69–97, 1986.
- LIM, Tae Song, Lee, Chang Sup, and Gil, Dai. Failure modes of foam core sandwich beams under static and impact loads. *Journal of Composite Materials*, 38:1639–1662, 2004.

- LIMA, Paulo Roberto Lopes. *Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- MAGNIONT, Camille. *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources*. PhD thesis, Université de Toulouse III, 2010.
- MARANGON, Ederli. *Desenvolvimento e Caracterização de Concretos Auto-Adensáveis Reforçados com Fibras de Aço*. Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- MAROUENE, AYMEN. *Comportement sous choc des composites sandwichs et influence des paramètres des matériaux et du test*. Master's thesis, École Polytechnique de Montréal, Montréal, 2010.
- MARTINS, Adriana de Souza Paiva. *Desenvolvimento, caracterização mecânica e durabilidade de compósitos solo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- MAZZA, Mathieu. *Modification chimique de la cellulose en milieu liquide ionique et CO₂ supercritique*. Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, Université de Toulouse, 2009.
- MELO FILHO, João. *Desenvolvimento e caracterização de laminados cimentícios reforçados com fibras longas de sisal*. Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- MOCHNACZ, Sandro. *Preparação e caracterização de fibras de sisal (agave sisalana) para utilização em compósitos poliméricos*. Master's thesis, Universidade Federal do Paraná, 2013.
- MORAIS, S., NASCIMENTO, E., and MELO, D. *Análise da madeira de pinus oocarpa parte i: estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis*. *Árvore*, 29(3):461–470, 2005.

- NATTERER, J., SANDOZ, J.L., and REY, M. Construction en bois matériau, technologie et dimensionnement. *Presses polytechniques et Universitaires Romandes*, 13, 2000.
- NEIS, Angela Maria. Estudo da sustentabilidade ambiental na obtenção de fibras e mantas de sisal e curauá. Master's thesis, Universidade Paulista, 2008.
- NOOR, Ahmed K., BURTON, W. Scott, and BERT, Charles W. Computational models for sandwich panels and shells. *Appl Mech*, 49:155–199, 1996.
- OPLINGER, D.W. and J.M., SLEPETZ. *Impact damage tolerance of graphite-epoxy sandwich panels*. ASTM STP, 1975.
- RAJ, Smriti, KUMAR, V. Ramesh, KUMAR, Bharath, Smitha, GOPINATH, and Nagesh, IYER. Flexural studies on basalt fiber reinforced composite sandwich panel with profile sheet as core. *Construction and Building Materials*, pages 931–400, 2015.
- ROUX Marie-Lise, ANQUETIL Frédéric. *Finition des ouvrages en bois dans le bâtiment*. CTBA, 1994.
- ROWELL, Roger M. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites 1st ed*. CRC Press, Madison, 2005.
- SANTOS, Daniele Oliveira Justo Dos. Utilização de matriz com areia reciclada para produção de compósitos reforçados com fibras de sisal. Master's thesis, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2014.
- SANTOS, Rosimeire Cavalcante Dos. Aproveitamento de resíduos da madeira de candela para a produção de chapa de partículas. Master's thesis, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.
- SARIMENTO, Cecilia Ramirez. Argamassa de cimento reforçada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar e sua utilização como material de construção. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas SPLavras, 1996.
- SCHEFFER, T. C. and COWLING, E.B. Natural resistance of wood to microbial deterioration. *Annual Review of Phytopathology*, 4:147–170, 1966.

- SHIN, Kwang Bok, Lee, Jae Youl, and CHO, Se Hyun. An experimental study of low-velocity impact responses of sandwich panels for korean low floor bus. *Composites Structures*, 84:228–240, 2008.
- SILVA, F.A., CHAWLA, N., and TOLEDO FILHO, R.D. Tensile behavior of high performance (sisal) fibers. *Composites Science and Technology*, 68:3438–3443, 2008.
- SILVA, Flávio de Andrade. *Durabilidade e Propriedades Mecânicas de Compósitos Cimentícios Reforçados por Fibras de Sisal*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- SPOSTO, Rosa Maria. *Painéis de argamassa armada compostos com isolantes térmicos para vedos de habitação de baixo custo em São Paulo*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- TOLEDO FILHO, R. D., ENGLAND, G.L, and GHAVAMI, K. Comportamento em compressão de argamassas reforçadas com fibras naturais - parte a: Relação tensão-deformação experimental e processo de fratura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande*, 01:79–88, 1997.
- TOLEDO FILHO, R. D., SCRIVENER, S., ENGLAND, G. L., and GHAVAMI, K. Durability of alkali-sensitive sisal and conconut fibres in cement mortar composites. *Cement & Concrete Composites*, 22:127–143, 2000.
- WEATHERWAX, R.C.and TARKOW H. Effect of wood on setting cement portland: decayed wood as an inhibitor. *Forest Product Journal*,, 17(7):30–32, 1967.
- WILLIAMSON, JE. and LAGACE, PA. Response mechanism in the impact of graphite/epoxy honeycomb sandwich panels. *Eighth ASC Technical Conference Cleveland, OH*, pages 287–297, 1993.