

ALINE RIBEIRO

**CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE COMPÓSITO DE
FIBRA DE JUTA EM SISTEMA DE REVESTIMENTO
CERÂMICO EM FACHADA VENTILADA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Elídio Angioletto
Coorientador: Prof. Dr. Agenor De Noni Júnior.

**CRICIÚMA
2018**

Aline Ribeiro

Aplicação de compósito de fibra de juta em sistema de revestimento cerâmico em fachada ventilada.

Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 12 de março de 2018.

Banca Examinadora:



Prof^o Dr^o Kétner Bendo Demétrio

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof^o Dr^o Luciana Maccarini Schabbach

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

Ao professor e coorientador Agenor De Noni Jr., por toda compreensão e disponibilidade de esclarecimentos ao longo do trabalho. Grande parte do meu conhecimento científico foi desenvolvido pelo professor desde o curso técnico em cerâmica. Foi uma satisfação trabalharmos juntos novamente.

Ao professor e orientador Elídio Angioletto, por aceitar a orientação dessa dissertação no último momento.

À PROSUC/CAPES pelo apoio financeiro.

Aos professores e colaboradores do PPGCEM, em especial: Adriano Michael Bernardin, Oscar Rubem Klegues Montedo e a secretária Vivian Souza pelo auxílio prestado.

Ao coordenador de processos da Eliane S/A Revestimentos Cerâmicos, Hermes Mariot, por compreender minhas ausências em horário de trabalho e por todo incentivo.

À equipe da fachada ventilada, que sempre me auxiliaram com prontidão no procedimento experimental, em especial ao supervisor de produção, José Clair Gonçalves do Prado. Agradeço também ao supervisor de produção Denis Goudinho da Eliane Artística que também me auxiliou.

À Eliane S/A Revestimentos Cerâmicos e Castanhal Companhia Têxtil pelos materiais fornecidos.

Ao estagiário do laboratório de ensaios mecânicos do IDT, Gustavo Sebastião Scheffer, que sempre demonstrou prontidão para me auxiliar na caracterização mecânica.

Aos laboratórios LabValora e Ladebima na realização de algumas análises. Aos meus colegas de trabalho Rodrigo Bussolo Mendes e Murilo Martins Silveira que foram “meus braços” quando necessário, meus sinceros agradecimentos.

Aos amigos que fiz durante a trajetória do mestrado, com certeza foram dois anos de muita cumplicidade.

Aos membros da banca avaliadora.

Obrigada.

Estava na praia com o meu pai, e ele me pediu para ver se a temperatura da água estava boa. Ela estava com cinco anos, e ficou contente de poder ajudar; foi até a beira da água e molhou os seus pés. “Coloquei os pés, está fria”, disse para ele. O pai pegou-a no colo, caminhou com ela até a beira do mar, e sem qualquer aviso, atirou-a dentro da água. Ela levou um susto, mas depois ficou contente com a brincadeira. “Como está a água?” perguntou o pai. “Está gostosa”, respondeu. “Então, daqui pra frente, quando você quiser saber alguma coisa, mergulhe nela” (Paulo Coelho, 1990).

RESUMO

A arquitetura e construção civil buscam aumentar o ciclo de vida da fachada de edifícios e a fachada ventilada é uma dessas soluções. Devido às vantagens estéticas e técnicas, a fachada ventilada está ganhando espaço no mercado brasileiro nos últimos anos. Entre os materiais empregados, está a placa cerâmica. Por motivos de segurança, é aderida a face posterior da placa, uma tela bidirecional de fibra de vidro utilizando resina epóxi, formando um conjunto compósito. Durante a última década, houve uma crescente na substituição de compósitos poliméricos de fibras sintéticas por fibras naturais em aplicações industriais, devido às vantagens ambientais e econômicas, motivada pela redução de peso. Entre essas fibras, está a fibra de juta, que é a mais barata e de maior produção da China, Índia e Bangladesh. Apresenta moderada resistência à tração e flexão. Com esta análise de cenário o presente trabalho tem como objetivo comparar o desempenho mecânico entre a fibra de vidro e a fibra de juta em um sistema físico de revestimento cerâmico em fachada ventilada. Para realizar essa análise foram produzidos conjuntos compósitos formados por: placa cerâmica de porcelanato (12 mm), tela de fibra de vidro e tela de fibra de juta. Foram realizados ensaios de caracterização mecânica dos componentes, sistemas (orientação da fibra em telas) e do conjunto compósito final, além de ensaios de desempenho. Foram realizados os ensaios de resistência à tração, flexão, adesão fibra-matriz; resistência ao impacto por Charpy e de corpo duro, e a avaliação da influência da degradação em água do conjunto nestes parâmetros. Também foram avaliadas a absorção de água da fibra e do compósito e a propagação de chama dos conjuntos (ensaios de desempenho). Verificou-se que apesar da fibra de juta apresentar um desempenho mecânico à tração inferior à fibra de vidro, essa apresentou desempenho satisfatório em relação à resistência ao impacto. Porém, quando avaliada a propagação de chama, impacto de corpo duro após a degradação em água e absorção de água do compósito, se torna evidente que a fibra de juta não pode ser aplicada para um sistema físico de fachada ventilada. Suas características tornam o conjunto compósito vulnerável quando exposto à água ou à chama, não apresentando o desempenho mínimo de segurança.

Palavras-chave: Fibra de juta. Compósito. Fachada ventilada.

ABSTRACT

The architecture and civil construction seek to increase the life cycle of the façade of buildings and the ventilated façade is one such solution. Due to the aesthetic and technical advantages, the ventilated façade is gaining space in the Brazilian market in recent years. Among the materials used is the ceramic tile. For security reasons, on the back face of the tile is adhered, a bi-directional screen of fiberglass through the epoxy resin, forming a conjoint composite. During the last decade, there has been an increase in the substitution of polymeric composites of synthetic fibers for natural fibers in industrial applications, due to the environmental and economic advantages, motivated by the reduction of weight. Among these fibers is jute fiber, which is the cheapest and highest production fiber from China, India and Bangladesh. It exhibits moderate tensile and flexural strength. With this scenario analysis the present work has the objective of comparing the mechanical performance between glass fiber and jute fiber in a physical system of ceramic tile in a ventilated façade. In order to carry out this analysis, conjoint composite were produced: porcelain tile (12 mm), fiberglass screen and jute fiber screen. Mechanical characterization of the components, systems (fiber orientation in screens) and the final conjoint composite were performed, as well as performance tests. The tests of tensile strength, flexion, fiber-matrix adhesion were carried out; resistance to impact by Charpy and hard body, and the evaluation of the influence of the degradation in water of the set in these parameters. The water absorption of the fiber and the composite and the flame propagation of the conjoint composites were also evaluated (performance tests). It was verified that whilst the jute fiber presented a lower mechanical tensile performance than the fiberglass, it presented a satisfactory performance in relation to the impact resistance. However, when evaluated the flame propagation, hard body impact after degradation in water and water absorption of the composite, it becomes evident that the jute fiber can not be applied to a physical ventilated façade system. Their characteristics make the conjoint composite vulnerable when exposed to water or flame, not presenting the minimum safety performance.

Keywords: Jute fiber. Composite. Ventilated façade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Consumo de revestimentos no mundo (milhões de m ²).	32
Figura 02 – Produção de revestimentos no mundo (milhões de m ²).	33
Figura 03 – Esquema físico da fachada aderida.	34
Figura 04 – Esquema físico da fachada ventilada.	36
Figura 05 – Conjunto placa cerâmica, resina epóxi e fibra de vidro.	39
Figura 06 – Telas de fibra de vidro. (A) fio de urdidura na vertical e trama na horizontal, (B) fio de urdidura na horizontal e trama na vertical.	42
Figura 07 – Classificação das fibras naturais e sintéticas.	44
Figura 08 – Parcela do consumo de fibras naturais em aplicação de engenharia.	47
Figura 09 – Previsão de consumo de compósitos de fibras naturais.	48
Figura 10 – Dependência das propriedades das fibras naturais e seus constituintes.	49
Figura 11 – Plantação de juta e o corte da planta.	51
Figura 12 – Etapa de secagem dos feixes de juta.	52
Figura 13 – Morfologia da seção transversal da fibra de juta.	54
Figura 14 – Modos de fratura – I, II e III (esquerda para direita).	56
Figura 15 – Evolução do esforço durante o impacto em diferentes alturas.	57
Figura 16 – Danos observados após o impacto em porcelanato.	58
Figura 17 – Planejamento experimental.	61
Figura 18 – Porcelanato esmaltado 59x118,2 cm para fachada ventilada.	62
Figura 19 – Resina epóxi (esquerda) e o agente de cura (direita).	63
Figura 20 – Fibra de vidro tipo E malha 4x4,5 mm.	64
Figura 21 – Tela de juta natural.	65
Figura 22 – Aplicação do plastificante na fibra natural de juta.	67
Figura 23 – Aplicação da resina epóxi na placa cerâmica.	68
Figura 24 – Colocação da tela de juta.	68
Figura 25 – Molde para método <i>hand lay-up</i> (esquerda) e lâminas prontas (direita).	69
Figura 26 – Corpo de prova para o ensaio de tração da fibra com a cerâmica fraturada.	74
Figura 27 – Colocação dos <i>tabs</i> nos corpos de prova.	75
Figura 28 – Corpo ensaiado no ensaio de tração da fibra sem a cerâmica.	75

Figura 29 – Corpos de prova ensaiados no ensaio de adesão.....	76
Figura 30 – Corpos de prova para o ensaio de tração da cerâmica e conjuntos compósitos.....	77
Figura 31 – Esquema do aparato para ensaio de resistência ao impacto por Charpy.	78
Figura 32 – Corpos de prova para resistência ao impacto por Charpy sem entalhe (esquerda) e com entalhe (direita).	79
Figura 33 – Fachada ventilada para o ensaio de impacto de corpo duro (esquerda) e detalhe do sistema de fixação (direita).	80
Figura 34 – Esquema para ensaio de propagação de chama.	81
Figura 35 – Placa com âncora fixada (esquerda) e furo após arrancamento (direita).	82
Figura 36 – Sistema de medição para arrancamento das âncoras.	83
Figura 37 – Microscopia óptica e eletrônica por varredura do conjunto compósito de fibra de vidro. (A), (B) corte transversal do conjunto compósito, (C) corte transversal da fibra de vidro e (D) corte longitudinal da fibra de vidro.....	87
Figura 38 – Microscopia óptica e eletrônica por varredura do conjunto compósito de fibra de juta. (A), (B) corte transversal do conjunto compósito, (C) corte transversal da fibra de juta e (D) corte longitudinal da fibra de juta.	88
Figura 39 – Densidade dos materiais utilizados.....	89
Figura 40 – Análise termogravimétrica e térmica diferencial da resina epóxi.....	90
Figura 41 – Análise termogravimétrica e térmica diferencial da fibra de vidro.	91
Figura 42 – Análise termogravimétrica e térmica diferencial da fibra de juta.	92
Figura 43 – Resistência à tração da fibra (aderida em cerâmica).....	93
Figura 44 – Resistência à tração da fibra (sem cerâmica).....	94
Figura 45 – Comparação dos métodos de medição da tração da fibra (com e sem cerâmica).	95
Figura 46 – Comparação do comportamento mecânico das fibras sob tração.....	96
Figura 47 – Absorção de água das fibras ao longo do tempo.....	97
Figura 48 – Resistência à tração da fibra-matriz adesão da fibra de vidro (FV) nas duas orientações (90° e 0°) e da fibra de juta <i>in natura</i> (S) e com compatibilizante (T).	99
Figura 49 – Comparação entre resistência à tração da fibra (sem cerâmica) versus tração fibra-matriz.....	100
Figura 50 – Resistência à tração do compósito (resina e fibra).....	101

Figura 51 – Corpos dos compósitos ensaiados na tração.	102
Figura 52 – Resistência à tração do conjunto compósito (resina, fibra e cerâmica).	103
Figura 53 – Comparação da resistência à tração do compósito (resina e fibra) e conjunto compósito (resina, fibra e cerâmica).	104
Figura 54 – Resistência à flexão do conjunto compósito (resina, fibra e cerâmica).	105
Figura 55 – Resistência ao impacto por Charpy do compósito (resina e fibra – com entalhe).	106
Figura 56 – Corpos ensaiados para impacto por Charpy (com entalhe).	107
Figura 57 – Resistência ao impacto por Charpy do conjunto compósito (resina, fibra e cerâmica – sem entalhe).	108
Figura 58 – Comparação da resistência ao impacto do compósito (com entalhe) e do conjunto compósito (sem entalhe).	109
Figura 59 – Resistência ao impacto por Charpy do conjunto compósito (resina, fibra e cerâmica – sem entalhe), após degradação em água. ..	110
Figura 60 – Corpos ensaiados para impacto por Charpy após 90 dias de degradação em água (sem entalhe).	111
Figura 61 – Absorção de água da resina epóxi e dos compósitos.	113
Figura 62 – Amostra do compósito de fibra de juta após 40° no ensaio de absorção de água.	114
Figura 63 – Percentual de ocorrências no impacto de corpo duro de 20 J.	115
Figura 64 – Fachada ventilada com tela de fibra de vidro após impacto de segurança (20 J).	116
Figura 65 – Fachada ventilada com tela de fibra de juta após impacto de segurança (20 J).	116
Figura 66 – Rompimento da fibra de juta observada no impacto de corpo duro de 20 J.	117
Figura 67 – Enchimento do tanque com água para ensaio de degradação.	118
Figura 68 – Conjuntos compósitos após 90 dias de degradação em água.	119
Figura 69 – Percentual de ocorrências no impacto de corpo duro de 20 J após degradação de 90 dias em água (D – com degradação).	120
Figura 70 – Fachada ventilada com fibra de vidro após degradação em água de 90 dias – impacto de segurança (20 J).	121
Figura 71 – Fachada ventilada com fibra de juta após degradação em água de 90 dias – impacto de segurança (20 J).	121

Figura 72 – Face posterior do conjunto compósito com fibra de vidro após impactos de segurança (20 J) – após degradação de 90 dias em água.....	122
Figura 73 – Face posterior do conjunto compósito com fibra de juta após impactos de segurança (20 J) – após degradação de 90 dias em água.	123
Figura 74 – Instantes iniciais no ensaio de propagação de chama.	125
Figura 75 – Comparativo dos conjuntos compósitos após o ensaio de propagação de chama.....	126
Figura 76 – Fratura da placa cerâmica durante o ensaio de propagação de chama.	127
Figura 77 – Conjunto compósito de fibra de vidro após os impactos de 20 J (face posterior).	144
Figura 78 – Conjunto compósito de fibra de juta após os impactos de 20 J (face posterior).	144
Figura 79 – Estrutura metálica portante.....	147
Figura 80 – Ruína do sistema após impacto de 20 J: placa cerâmica sem fibra e sem resina epóxi.	148
Figura 81 – Difratoograma de raios-x da carga mineral presente na resina epóxi.....	151
Figura 82 – Placa de Petri contendo meio de cultura PDA com crescimento de colônias fúngicas na Cer+ERFV: A) frente e B) verso, das mesmas placas.	153
Figura 83 – (A) Microscopia de 400 vezes e (B) crescimento de colônia em meio PDA.....	154
Figura 84 – (A) Microscopia de 400 vezes e (B) crescimento de colônia fúngica em meio PDA.....	154
Figura 85 – Placa de Petri contendo meio de cultura PDA com crescimento de colônias fúngicas Cer+ERFJ: A) frente e B) verso, das mesmas placas.....	155
Figura 86 – (A) Microscopia de 400 vezes e (B) crescimento de colônia em meio PDA.....	156
Figura 87 – (A) Microscopia de 400 vezes e (B) crescimento de colônia em meio PDA.....	156
Figura 88 – (A) Microscopia de 400 vezes e (B) crescimento de colônia em meio PDA.....	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Classificação dos revestimentos cerâmicos prensados.	32
Tabela 02 – Propriedades de resinas termorrígidas.	41
Tabela 03 – Composição de fibras de vidro utilizadas em compósitos.	41
Tabela 04 – Comparação entre fibras naturais e de vidro.	45
Tabela 05 – Propriedades das fibras naturais em relação à fibra de vidro tipo E.	50
Tabela 06 – Propriedades químicas e físicas da fibra de juta.	53
Tabela 07 – Características do porcelanato esmaltado.	63
Tabela 08 – Composição química da resina epóxi e do agente de cura.	64
Tabela 09 – Características físicas e mecânicas da fibra de vidro.	65
Tabela 10 – Características do plastificante.	66
Tabela 11 – Ensaio de caracterização para os componentes do compósito.	70
Tabela 12 – Método utilizado para caracterização individual.	71
Tabela 13 – Ensaio de caracterização para os sistemas.	71
Tabela 14 – Método utilizado para caracterização dos sistemas e de desempenho.	72
Tabela 15 – Significado dos acrônimos utilizados.	85
Tabela 16 – Fenômenos observados no ensaio de propagação de chama.	124
Tabela 17 – Parâmetros observados no ensaio de propagação de chama.	124
Tabela 18 – Resultado indicativo do arrancamento das âncoras.	127
Tabela 19 – Valores de massa e volume da matriz, fibras e compósitos.	143
Tabela 20 – Frações mássicas e volumétricas de matriz e fibra dos compósitos.	143
Tabela 21 – Resistência ao impacto de corpo duro de 20 J.	145
Tabela 22 – Resistência ao impacto de corpo duro de 20 J com degradação em água.	146
Tabela 23 – Resultados do teste de arrancamento de âncoras para conjunto compósito com fibra de vidro.	149
Tabela 24 – Resultados do teste de arrancamento de âncoras para conjunto compósito com fibra de juta.	149
Tabela 25 – Comparativo de peso dos conjuntos compósitos em sistema físico de fachada ventilada em kg/m ²	150
Tabela 26 – Comparativo de peso dos conjuntos compósitos em sistema físico de fachada ventilada em percentual.	150

LISTA DE SIGLAS

(D) – degradado;
[D] – delaminação;
ASTM – American Society for Testing and Materials;
ATD – análise térmica diferencial;
Cer – placa cerâmica;
Cer+E – placa cerâmica com aplicação de resina epóxi;
Cer+ERFJ – cerâmica com resina epóxi reforçada com fibra de juta na face posterior (conjunto compósito);
Cer+ERFV – cerâmica com resina epóxi reforçada com fibra de vidro na face posterior (conjunto compósito);
CerTec – Laboratório de cerâmica técnica;
CTE – código técnico de edificações;
CWCT – Centre for window and cladding technology;
E – resina epóxi;
ERFJ – resina epóxi reforçada com fibra de juta;
ERFV – resina epóxi reforçada com fibra de vidro;
FJ – fibra de juta;
FV (0°) – fibra de vidro com fio de maior largura à 0°;
FV (90°) – fibra de vidro com fio de maior largura à 90°;
IDT – Instituto de engenharia e tecnologia;
Iparque – Parque científico e tecnológico;
ISO – International Organization for Standardization;
JCPDS – Joint Committee on Powder Diffraction Standards;
LabValora – laboratório de valoração de resíduos;
Ladebima – laboratório de desenvolvimento de biomateriais e materiais antimicrobianos;
NBR – norma brasileira;
S – fibra de juta sem tratamento (*in natura*);
T – fibra de juta com tratamento (compatibilização);
TG – análise termogravimétrica;
Unesc – Universidade do Extremo Sul Catarinense.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
2 OBJETIVOS	29
2.1 OBJETIVO GERAL	29
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
3.1 CERÂMICA DE REVESTIMENTO	31
3.2 PRODUÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS NO MUNDO	32
3.3 SISTEMA FÍSICO DE FACHADA ADERIDA	33
3.4 SISTEMA FÍSICO DE FACHADA VENTILADA	35
3.5 CONJUNTO COMPÓSITO	38
3.5.1 Porcelanato esmaltado	39
3.5.2 Resina epóxi	40
3.5.3 Fibra de vidro	41
3.5.3.1 Trama e urdume	42
3.6 FIBRAS NATURAIS	43
3.6.1 Desempenho mecânico das fibras naturais	48
3.6.2 Fibra natural de juta	51
3.7 COMPORTAMENTO MECÂNICO SOB IMPACTO	54
3.7.1 Polímeros reforçados com fibra de vidro	54
3.7.2 Cerâmica	56
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	61
4.1 MATERIAIS	62
4.2 MÉTODOS	66
4.2.1 Sistema placa cerâmica + resina (Cer+E) e compósitos finais (Cer+ERFV e Cer+ERFJ)	66
4.2.2 Sistema resina + fibra (ERFV e ERFJ)	69
4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	70
4.3.1 Componentes individuais	70
4.3.2 Características das configurações e de desempenho	71
4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	72
4.4.1 Densidade real	72
4.4.2 Análise térmica	73
4.4.3 Ensaio de tração	73
4.4.3.1 Ensaio de tração da fibra	74
4.4.3.2 Ensaio de adesão fibra-matriz	76
4.4.3.3 Ensaio de tração do compósito	76
4.4.3.4 Ensaio de tração do conjunto compósito	76

4.4.4 Ensaio de resistência à flexão	77
4.4.5 Ensaio de resistência ao impacto por Charpy	77
4.4.6 Ensaio de resistência ao impacto de corpo duro.....	79
4.4.7 Ensaio de impacto com degradação em água	80
4.4.8 Propagação de chama	80
4.4.9 Absorção de água	81
4.4.10 Arrancamento das fixações	82
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
5.1 CARACTERÍSTICAS INDIVIDUAIS	86
5.1.1 Análise microestrutural.....	86
5.1.2 Densidade real	88
5.1.3 Análise térmica.....	90
5.1.3.1 Análise térmica resina epóxi	90
5.1.3.2 Análise térmica fibra de vidro.....	91
5.1.3.3 Análise térmica fibra de juta	92
5.1.4 Resistência à tração da fibra	93
5.1.5 Absorção de água das fibras	96
5.1.6 Comentários sobre as características individuais	97
5.2 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DAS CONFIGURAÇÕES	98
5.2.1 Resistência à adesão por tração fibra-matriz (adesão fibra- matriz).....	98
5.2.2 Resistência à tração do compósito	101
5.2.3 Resistência à tração do conjunto compósito	102
5.2.4 Resistência à flexão do conjunto compósito.....	104
5.2.5 Resistência ao impacto do compósito (com entalhe)	105
5.2.6 Resistência ao impacto do conjunto compósito (sem entalhe)	107
5.2.7 Resistência ao impacto do conjunto compósito (sem entalhe) com degradação em água	109
5.2.8 Comentários sobre as características mecânicas das configurações.....	111
5.3 ENSAIOS DE DESEMPENHO.....	112
5.3.1 Absorção de água do compósito.....	112
5.3.2 Resistência ao impacto de corpo duro.....	114
5.3.3 Resistência ao impacto de corpo duro com degradação em água	118
5.3.4 Propagação de chama	123
5.3.5 Arrancamento das fixações	127
5.3.6 Comentários sobre os ensaios de desempenho.....	128
6 CONCLUSÕES	129
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	131

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
APÊNDICE	142
ANEXOS	151

1 INTRODUÇÃO

A arquitetura e construção civil buscam soluções sustentáveis para a fachada de edifícios com a finalidade de aumentar o ciclo de vida desse sistema. Uma dessas soluções é a fachada ventilada, devido às características estéticas e de eficiência energética (RUÁ, 2010). Os principais componentes funcionais das fachadas ventiladas são: revestimento (cerâmico ou não), subestrutura auxiliar, câmara de ar, isolante térmico e base suporte (MULLER, 2005; CAMPOS, 2011).

A instalação da fachada ventilada apresenta um maior impacto ambiental quando comparado ao de fachada convencional, devido aos materiais empregados, principalmente, pela utilização de perfis de alumínio. O ganho em termos de eficiência energética que se obtém ao longo da vida útil do edifício, compensa amplamente esta diferença. Isso torna a fachada ventilada uma solução vantajosa do ponto de vista ambiental (RUÁ, 2010).

De acordo com Campos (2011), as vantagens da fachada ventilada em relação à fachada aderida são as seguintes: economia de energia; eliminação dos problemas de umidade, eflorescência ou infiltrações nas vedações externas; menor deterioração e redução nos custos de manutenção da fachada; resultados satisfatórios em trabalhos de renovação; melhoria no conforto térmico/acústico e eliminação do risco de destacamento de revestimentos.

O ganho em eficiência energética em fachadas ventiladas na Espanha (país onde esta tecnologia é bastante difundida) é em torno de 25 a 40%. Porém, essas informações são anteriores à implantação do código técnico de edificações (CTE). De acordo com Ruá (2010), após a implantação desse código, pode-se determinar através de simulações, que o ganho em eficiência fica compreendido entre 13,8 a 17,6%. Verificou-se também que quanto maior o gradiente térmico ao longo do dia, maior é a eficiência energética com o uso da fachada ventilada.

O componente revestimento na fachada ventilada, neste caso, trata-se de um compósito constituído pela tela de fibra de vidro e resina polimérica, aderidos a uma placa cerâmica. A finalidade de utilizar esse conjunto compósito é garantir a segurança do material após a instalação, evitando, desta forma, o desprendimento de fragmentos cerâmicos da fachada do edifício, caso ocorra a fratura da placa cerâmica. De acordo com Richardson (2016), o lascamento na face posterior é um fator a ser levado em consideração, na proteção do público contra lesões por estilhaços, que possam ocorrer a partir da fragmentação.

A placa cerâmica geralmente utilizada em fachadas ventiladas é o porcelanato esmaltado. Devido sua baixa porosidade, quando comparado às outras placas cerâmicas, o porcelanato esmaltado apresenta como principais características: baixa absorção de água, alto desempenho mecânico e resistência ao gelo (SÁNCHEZ, 2010; GUSMÁN, 2016; DAL BÓ, 2016).

O reforço é uma tela bidirecional de fibra de vidro, geralmente do tipo E. As fibras de vidro, principalmente as em forma de tecido, apresentam resistência a um objeto durante o processo de impacto. Devido ao baixo custo, esta opção torna-se atrativa para aplicações com finalidade estrutural, em comparação às outras fibras sintéticas (aramida, carbono, entre outras) (WAMBUA, 2003; MEOLA, 2014; SIMEOLI, 2014; MA, 2016). É utilizada em aplicações marítimas, industriais, automotivas e aeroespacial, sendo também encontrada em itens do cotidiano (RAMESH, 2013; SEBAEY, 2016).

Usualmente a resina utilizada é epóxi. Esta apresenta propriedades tais como: dureza; resiliência; resistência à umidade e ao ataque químico; pouco ou nenhum encolhimento após a cura quando comparadas às demais poliméricas (poliéster, vinil éster e fenólica) (MA, 2016). Outra característica relevante é que esse tipo de resina não desprende material volátil durante a aplicação. O processo de cura pode ser efetuado à temperatura ambiente sem aplicação de pressão, utilizando um agente de cura ou uma fonte térmica (MITTAL, 2016).

Durante a última década, com a maior preocupação ambiental, houve um crescente interesse em fibras naturais. Compósitos poliméricos de fibras naturais são cada vez mais usados em aplicações industriais como substitutos dos compósitos de fibras sintéticas, devido às vantagens ambientais e econômicas, motivado pela redução de peso, maior força específica, maior módulo de elasticidade e preço reduzido (DHAKAL, 2012; RAMESH, 2013; MEREDITH, 2012; CAPRINO, 2015; SZOLNOKI, 2015; VIMAL, 2015; JABBAR, 2016; MEOLA, 2016; ABDELLAOUI, 2017; ARPITHA, 2017; DEB, 2017; FIORE, 2017; JABBAR, 2017; KHAN, 2017; VAISANEN, 2017; YU, 2017). As possíveis aplicações como substitutas da fibra de vidro estão sob estudos em áreas como: automotiva, aviação, biocompósitos, construção civil, esportivas e de instrumentos musicais. (WAMBUA, 2003; ZAH, 2007; HO, 2012; PHILLIPS, 2012; FROLLINI, 2015; CLARAMUNT, 2016; ABDELLAOUI, 2017; ARPITHA, 2017; BANSAL, 2017; DEB, 2017). Na indústria automobilística, as fibras naturais constituem quase 40% das matérias-primas (ADEKOMAYA, 2017).

De acordo com Mittal (2016), diversos estudos foram realizados nos últimos anos, utilizando fibras naturais em matriz epóxi avaliando propriedades variadas. Entre essas fibras pode-se citar: bambu, sisal, juta, seda, kenaf, cana-de-açúcar e coco.

Wambua (2003) faz uma comparação entre as fibras naturais e de vidro, onde as características que se destacam: são renováveis, recicláveis e biodegradáveis; menor consumo de energia para fabricação e sem riscos para a saúde quando inaladas. De acordo com Joshi (2004), as fibras naturais são superiores as de vidro no aspecto ambiental devido aos seguintes fatores: produção da fibra com impacto ambiental menor; menor peso do compósito; melhora na eficiência combustível; redução das emissões na fase de utilização e possibilidade de incineração no final da vida útil, resultando em energia e créditos de carbono.

De acordo com Bisaria (2015), dentre as fibras naturais, uma das maiores fontes de fibras lignocelulósicas é a fibra de juta. A fibra de juta é obtida a partir do caule da planta *Corchorus capsularis*, que é derivada da região amazônica. Esta fibra foi introduzida no Brasil entre os anos de 1950 e 1980, nos estados do Amazonas, Pará e São Paulo, sendo esses os principais cultivadores da planta. A planta de juta tem uma haste vertical com folhas que crescem em clima quente e úmido, principalmente em áreas onde existe alta precipitação pluviométrica (SATYANARAYANA, 2007; JAHAN, 2016; MANSOURIAN, 2016).

A fibra de juta tem moderada resistência à tração e à flexão quando comparadas com outras fibras naturais. Os compósitos de polímero reforçados com fibra de juta são adequados para as aplicações estruturais primárias, elementos interiores e aplicações temporárias ao ar livre. A característica de isolamento da juta, torna-se útil em portas e teto automotivos, painéis de separação do motor e compartimentos de passageiros (BISARIA, 2015). Também são utilizadas tradicionalmente na fabricação de sacos, cortinas, fios, têxteis, cordas, entre outros (RAMESH, 2017).

A fachada de um edifício é um ambiente de elevada solicitação mecânica e sujeita às intempéries. Nos últimos anos, na fachada ventilada, optou-se por utilizar grandes formatos de revestimentos com espessuras cada vez mais reduzidas. Entre as propriedades dos materiais cerâmicos, a resistência ao impacto é uma das características mais críticas a ser considerada para garantir a adequação em ambientes dessa natureza (SILVA, 2002; DONDI, 2016).

De acordo com Caprino (2015), os compósitos utilizando fibras naturais têm um potencial largamente aplicável. Esses podem ser uma alternativa em relação aos compósitos de fibra de vidro, em estruturas

que necessitem de absorção da energia de impacto. Compósitos de fibra natural têm sido utilizados para absorção de energia em regime de baixa velocidade e balísticos. Sob condições de impacto de baixa velocidade, as propriedades de algumas fibras naturais são comparáveis à fibra de vidro (MEREDITH, 2012).

De acordo com Menegazzo (2014), a placa cerâmica apresenta baixa resistência à fratura quando submetidas à queda de objetos, podendo causar danos na superfície, e eventualmente, a perda do material. De acordo com Cantavella (2008), durante o processo de impacto contra uma placa cerâmica, se desenvolvem diversos tipos de tensões que variam com o tempo. Estas tensões produzem esforços de cisalhamento, tração e compressão que, no final do processo, podem conduzir a um lascamento no ponto de impacto ou até a fratura da placa.

Este trabalho propõe avaliar a substituição da fibra de vidro por fibra natural de juta através da caracterização do desempenho mecânico do compósito estrutural utilizado em fachada ventilada. Para isso, foi estudado o comportamento de cada constituinte separadamente e do conjunto compósito frente ao impacto. Devido à condição de instalação da fachada ventilada, também foi avaliado o efeito da degradação pela água, principalmente sobre a matriz polimérica e a fibra, e o efeito da exposição à chama.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Comparar o desempenho da tela de fibra de vidro e tela de fibra natural de juta no sistema físico de revestimento cerâmico em fachada ventilada.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar as características químicas e físicas do sistema compósito e seus constituintes individualmente;
- Avaliar o desempenho mecânico por impacto dos compósitos e seus constituintes;
- Avaliar o efeito da degradação em água através do desempenho mecânico por impacto do compósito;
- Avaliar o comportamento dos sistemas compósitos frente a propagação de chama.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, descreve-se a cerâmica de revestimentos nos últimos anos, a capacidade produtiva em nível mundial e a diferença entre fachada convencional (aderida) e fachada ventilada. Também estão descritos os materiais que são objetos de estudo e o comportamento mecânico da placa cerâmica frente ao impacto, principal esforço que as placas são submetidas na fachada de edifícios.

3.1 CERÂMICA DE REVESTIMENTO

A inovação no processo produtivo juntamente com ciclos de fabricação mais rápidos, trouxeram mudanças nos produtos cerâmicos. Durante a década de 1980, as argilas de coloração vermelha foram substituídas pelas “*ball clay*”, beneficiando a coloração final dos revestimentos. Dessa forma, desenvolveu-se a faiança branca por uma única etapa de queima com cobertura vítrea. Esse produto foi líder de vendas no início dos anos 1990. Nesse mesmo período, foi lançado um novo tipo de placa cerâmica, destinado para o chão: o porcelanato. Devido ao desempenho técnico superior aos demais revestimentos cerâmicos, esse ganhou rapidamente o mercado, tornando-se um dos produtos de revestimentos mais importantes do mundo (DONDI, 2014).

Devido à grande aceitação do porcelanato no mercado, o processo produtivo implementou melhorias em todas as etapas, especialmente, na decoração. Inicialmente o porcelanato era destinado para o alto tráfego sem grandes atrativos estéticos. Progressivamente, devido a uma gama de técnicas de decoração, criou-se o porcelanato esmaltado e outras variações, como o polido e o superbranco (SÁNCHEZ, 2010; DONDI, 2014).

Os revestimentos cerâmicos são classificados de acordo com a ISO 13006. Essa norma classifica os produtos baseada no processo de fabricação (extrusão, prensagem e colagem) e a absorção de água. Os revestimentos cerâmicos, em sua maioria, são fabricados por prensagem (DONDI, 2014). Na tabela 01 consta a classificação dos revestimentos cerâmicos segundo a norma.

Tabela 01 – Classificação dos revestimentos cerâmicos prensados.

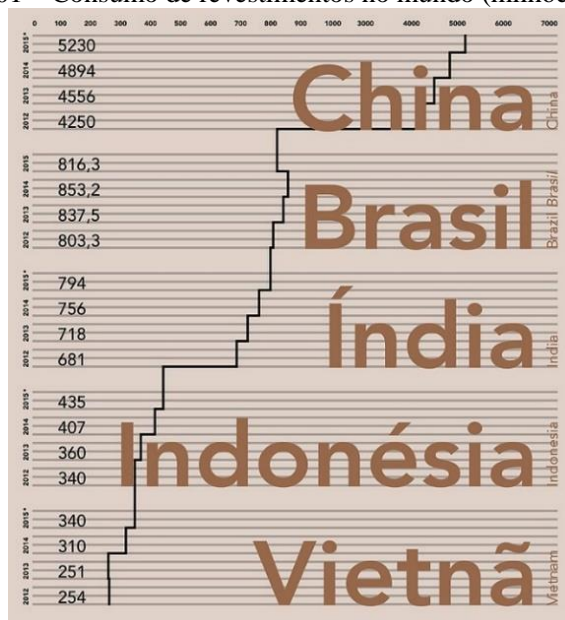
Tipologia	Superfície	Absorção de água (%)	Classificação (ISO 13006)
<i>Poroso</i>	Esmaltado	> 10	BIII
<i>Semiporoso</i>	Esmaltado	6 – 10	BIIIb
<i>Semivitrificado</i>	Esmaltado	3 – 6	BIIa
<i>Vitrificado</i>	Esmaltado	0,5 – 3	BIb
<i>Altamente vitrificado</i>	Esmaltado	< 0,5	BIa
<i>Altamente vitrificado</i>	Não-esmaltado	< 0,10	BIa

Fonte: Dondi (2014, p. 94). Com modificações.

3.2 PRODUÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS NO MUNDO

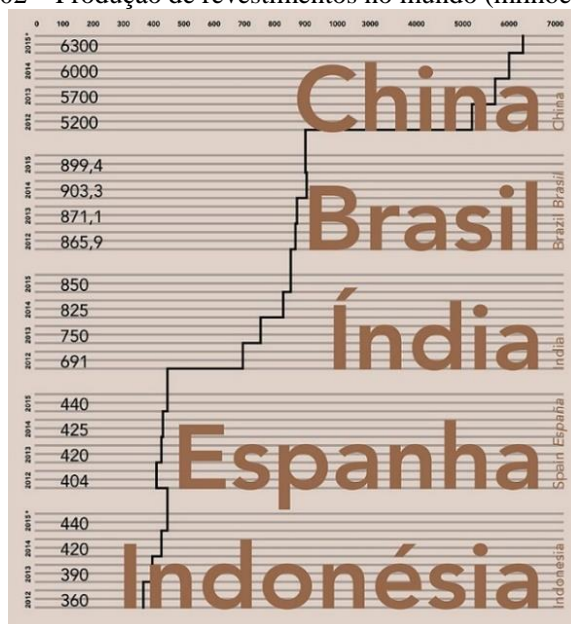
De acordo com Dondi (2014), a taxa de crescimento na produção de revestimentos cerâmicos mundial é de 300 milhões de m²/ano e já ultrapassou os 10 bilhões de m² em 2012.

De acordo com dados da Anfacer (2016) na figura 01 e 02, o maior produtor e consumidor de revestimentos cerâmicos mundial é a China, seguidos por Brasil e Índia.

Figura 01 – Consumo de revestimentos no mundo (milhões de m²).

Fonte: Anfacer (2016).

Figura 02 – Produção de revestimentos no mundo (milhões de m²).



Fonte: Anfacer (2016).

No Brasil, o setor de revestimentos cerâmicos é constituído por 92 empresas, concentradas nas regiões sul e sudeste do país. E nos últimos anos, em expansão para o nordeste. Os processos utilizados ainda se dividem em via úmida e via seca, alcançando uma capacidade produtiva de 1.069 milhões de m² em 2015 (ANFACER, 2016).

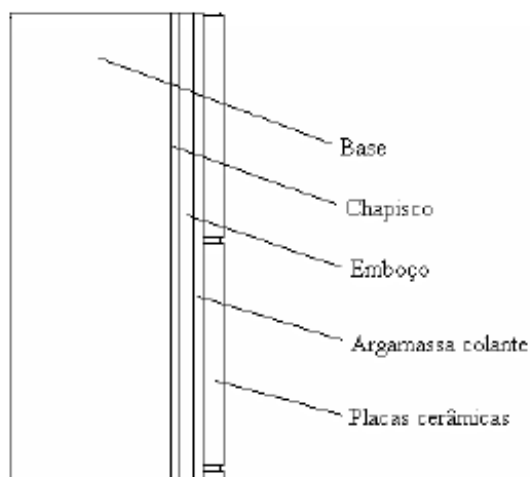
3.3 SISTEMA FÍSICO DE FACHADA ADERIDA

De acordo com NBR 13755 (1996, p.2), a definição de revestimento externo de um edifício é:

“Um conjunto de camadas superpostas e intimamente ligadas, constituído pela estrutura suporte, alvenarias, camadas sucessivas de argamassas e revestimento final, cuja função é proteger a edificação da ação da chuva, umidade, agentes atmosféricos, desgaste mecânico oriundo da ação conjunta do vento e partículas sólidas, bem como dar acabamento estético.”

De acordo com Muller (2005), o sistema de fachada aderida (ou convencional) é formado por camadas de materiais distintos com a utilização de argamassa. Nessa situação, a avaliação do fator aderência entre as camadas é essencial. Como mostra a figura 03, sobre a base, aplicam-se camadas de chapisco e de emboço. Para a regularização da superfície, utiliza-se argamassa à base de cimento Portland.

Figura 03 – Esquema físico da fachada aderida.



Fonte: Muller, 2003.

Os fatores que agem diretamente sobre os revestimentos de fachada são a umidade e temperatura. Esses fatores relacionados a certas propriedades dos materiais cerâmicos como expansão térmica e por umidade determinam a durabilidade da fachada do edifício. Grandes variações nessas propriedades podem resultar em condições de patologias como descolamento da placa, gretagem e fissuras (MULLER, 2003).

No caso de placas cerâmicas de porcelanato, a aplicação da argamassa colante é dificultada. Apesar de haver argamassas especiais, a baixa porosidade do material é um empecilho para a aderência (MULLER, 2003).

3.4 SISTEMA FÍSICO DE FACHADA VENTILADA

De acordo com Muller (2005) e Campos (2012), caracteriza-se o sistema físico de fachada ventilada, pela existência de ventilação em uma câmara de ar. Nessa câmara de ar, origina-se um fluxo de ar ascendente, que sofre aquecimento no interior dessa, devido à troca térmica. A ventilação é contribuída pelas diferenças de pressão na câmara de ar, devido à ação do vento.

A fachada ventilada é formada por duas partes (folhas): uma interna, responsável pelo isolamento térmico e de vedação do edifício. Já a externa forma a câmara de ar em si. A energia da radiação solar é parcialmente absorvida pela parte externa, que é aquecida e transmite energia por convecção no interior da câmara e por radiação para a superfície interior. O calor transmitido para o ar na câmara faz esse ascender, e como resultado, ocorre a dissipação de calor (ESCRIG, 2014).

A norma italiana UNI 11018:2003 comenta que a fachada ventilada é projetada para que o ar presente na câmara possa fluir por efeito chaminé, seja por modo natural ou artificial. Isso dependerá da necessidade de melhorar o desempenho energético da fachada, devido às variações de temperatura do dia ou das estações do ano.

O sistema de revestimento de fachada ventilada é amplamente difundido em países europeus. No Brasil, este sistema ainda é pouco utilizado devido ao preço de instalação elevado. As vantagens deste sistema são: a melhoria do isolamento térmico e acústico da fachada de edificações; utilização de placas cerâmicas de grandes formatos; eliminação dos problemas de umidade; menor deterioração; redução nos custos de manutenção da fachada e eliminação do risco de destacamento de revestimentos (MULLER, 2005; CAMPOS, 2011).

No sistema físico da fachada ventilada, podem ser empregados diferentes materiais de revestimento, tais como placas cerâmicas ou placas de pedra natural, normalmente em grandes formatos (MULLER, 2005).

De acordo com Campos (2011), os elementos principais que constituem a fachada ventilada são:

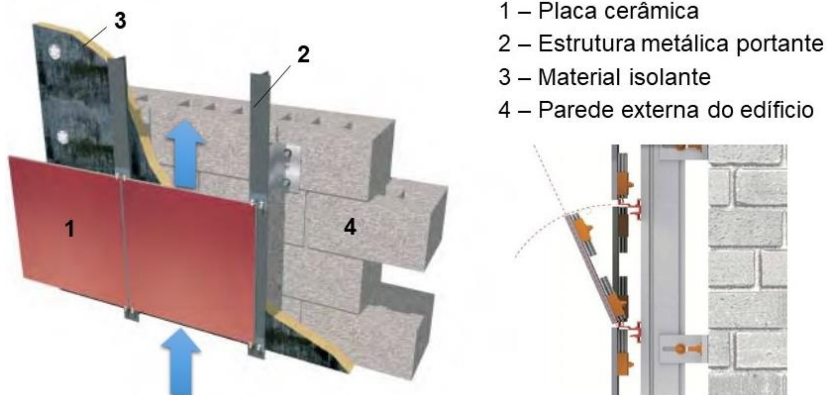
- O revestimento, que tem função estética e de proteção da parede do edifício;
- A câmara de ar, que permite a ventilação natural da parede;
- A subestrutura auxiliar e a base suporte (geralmente de metal), onde é aplicado o revestimento. Esse sistema tem como função

dar estabilidade ao conjunto. Através desta estrutura que se obtém o afastamento necessário para criar a câmara de ar;

- A capa isolante, quando existir, que é colocada na parede do edifício para garantir a estabilidade térmica.

O sistema de fixação dos revestimentos é constituído de componentes metálicos inoxidáveis. Na fixação das placas cerâmicas utiliza-se uma estrutura metálica portante, sendo esta ancorada à parede por parafusos chumbadores. Para a fixação das placas cerâmicas, é necessário um entalhe, ou furos, para inserção de dispositivos que podem ser visíveis ou ocultos. A figura 04 mostra o esquema físico da fachada ventilada com seus componentes.

Figura 04 – Esquema físico da fachada ventilada.



- 1 – Placa cerâmica
- 2 – Estrutura metálica portante
- 3 – Material isolante
- 4 – Parede externa do edifício

Fonte: Mirage, 2016.

No Brasil, um país com um clima predominantemente quente, a ventilação natural é uma das principais estratégias de arrefecimento de um edifício. Assim, a fachada ventilada traz como objetivo aumentar a eficiência térmica dos edifícios (MEDEIROS, 2016).

De acordo com Medeiros (2016), a conclusão do primeiro projeto utilizando este sistema no Brasil, ocorreu em 2009. Até 2015 haviam mais de 80 projetos implantados, ocorrendo um crescimento em relação ao número de projetos e a área construída de fachada.

Os materiais da fachada ventilada apresentam um maior impacto ambiental quando comparados ao de fachada convencional, devido à utilização de perfis de alumínio. O ganho em termos de eficiência

energética que se obtém ao longo da vida útil do edifício, compensa amplamente esta diferença. Isso torna a fachada ventilada uma solução vantajosa do ponto de vista ambiental (RUÁ, 2010).

O ganho em eficiência energética em fachadas ventiladas na Espanha (país onde esta tecnologia é bastante difundida) é em torno de 25 a 40%. Porém, essas informações são anteriores à implantação do código técnico de edificações (CTE) e a literatura não especifica em quais condições foram utilizadas para determinar essa eficiência. De acordo com Ruá (2010), após a implantação deste código, pode-se determinar através de simulações, que esse ganho fica compreendido entre 13,8 a 17,6% quando comparado à fachada convencional com isolamento térmico. Verificou-se também, que quanto maior o gradiente térmico, maior é o ganho com o uso de fachada ventilada. Bannier (2012) afirma em estudos realizados com simulação, que a fachada ventilada é apropriada para zonas quentes e em edifícios que tenham alta demanda de resfriamento. Já Escrig (2014), constatou que o uso da fachada ventilada também é eficaz na redução de demanda de aquecimento (para fachadas com aproveitamento de calor).

De acordo com Campos (2011) e Medeiros (2016), apesar da tecnologia de fachada ventilada apresentar diversas vantagens, é relevante ressaltar algumas considerações para aplicação no mercado brasileiro. Além dos custos superiores quando comparado com o sistema de assentamento convencional, um dos pontos mais críticos é a ausência de normas técnicas específicas para projeto e avaliação do desempenho técnico das fachadas ventiladas. Dessa forma, a otimização do processo de fabricação e instalação dessa tecnologia é dificultada.

Atualmente a norma brasileira que é utilizada, refere-se ao desempenho estrutural de edificações habitacionais de forma genérica (NBR 15575). Entretanto, há uma norma italiana vigente (UNI 11018:2003), aplicada para revestimentos e sistemas de ancoragem para fachadas ventiladas com instalação mecânica. Essa norma trata das instruções para o projeto, execução e manutenção utilizando revestimentos cerâmicos ou pedras naturais. Referente aos ensaios aplicados para placas cerâmicas essa norma cita: resistência à tração por flexão, resistência ao arrancamento das fixações, resistência ao envelhecimento e resistência admissível (parâmetro calculado a partir da resistência à flexão e a resistência ao arrancamento). A resistência ao envelhecimento deve ser analisada quando não houver histórico de outros ensaios. Esse parâmetro pode ser demonstrado através da determinação de algumas características como densidade, porosidade,

dilatação térmica, expansão por umidade, absorção de água, entre outros.

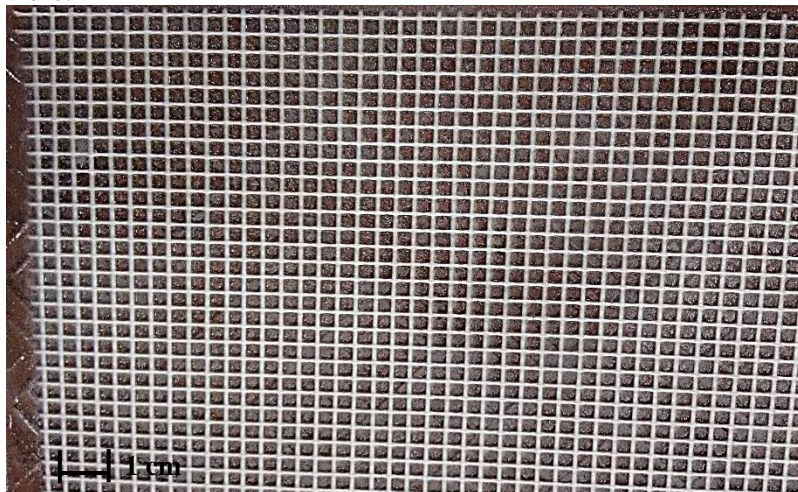
Machado (2012) sugere como diretrizes de um projeto de fachada ventilada, a avaliação dos itens citados na norma UNI 11018:2003 para os revestimentos cerâmicos. Além disso, sugere também a avaliação do impacto de corpo mole e corpo duro conforme norma de desempenho NBR 15575.

3.5 CONJUNTO COMPÓSITO

O componente revestimento na fachada ventilada, neste caso, trata-se de um conjunto compósito constituído por uma placa cerâmica (usualmente porcelanato esmaltado) e uma tela de fibra de vidro. Essa tela é aderida à parte posterior da peça através de uma resina polimérica.

Um compósito é um material estrutural que consiste em dois ou mais constituintes combinados a nível macroscópico. Estes devem ser insolúveis entre si. O componente que é incorporado é denominado reforço, enquanto o componente que incorpora é a matriz. A fase reforço pode ser encontrada em forma de fibras, partículas ou flocos, enquanto a matriz é contínua (ARPITHA, 2017; BANSAL, 2017; KUMRE, 2017). Dessa forma, o compósito é constituído pela resina polimérica e a tela de fibra de vidro. No presente trabalho, como esse sistema está aderido à placa cerâmica (através da resina epóxi), será chamado de conjunto compósito. A figura 05 apresenta o conjunto em estudo.

Figura 05 – Conjunto placa cerâmica, resina epóxi e fibra de vidro.



Fonte: A autora, 2018.

De acordo com Medeiros (2016), do ponto de vista de segurança, o risco de queda de um revestimento de fachada ventilada é menor em relação à fachada aderida. Fatores como os materiais utilizados, tempo, clima e qualidade da instalação, podem comprometer o desempenho do revestimento. Por consequência, a aplicação de um reforço na parte posterior dos painéis cerâmicos (tardoz) tem sido utilizada para proporcionar uma maior segurança para o sistema de fachadas ventiladas, impedindo a queda no caso de fratura. A aplicação da tela também evita o desprendimento de fragmentos cerâmicos da fachada do edifício. De acordo com Richardson (2016), o lascamento na face posterior é um fator a ser levado em consideração, na proteção do público contra lesões por estilhaços, que possam ocorrer a partir da fragmentação.

3.5.1 Porcelanato esmaltado

Atualmente, existem duas tipologias de porcelanato: porcelanato técnico (sem cobertura vítrea) e porcelanato esmaltado (com cobertura vítrea). O porcelanato esmaltado tem sido aplicado tanto como revestimento ou pavimento e nos últimos anos em fachadas ventiladas (DAL BÓ, 2016; GUSMÁN, 2016).

A composição básica de um porcelanato baseia-se em uma mistura triaxial. Tipicamente é composta por um material plástico (geralmente argila), um inerte (geralmente quartzo) e um de fluxo (geralmente feldspato) (SÁNCHEZ, 2010; DAL BÓ, 2016; GUSMÁN, 2016).

De acordo com Sánchez (2010), a fração argilosa fornece plasticidade, resistência mecânica durante o processamento e desenvolve as fases mulita e vítrea durante a queima. Os feldspatos desenvolvem fase vítrea em baixas temperaturas, auxiliando no processo de sinterização, reduzindo a porosidade. E o quartzo promove a estabilidade térmica e dimensional devido ao seu elevado ponto de fusão.

O processamento industrial de porcelanato inclui três principais etapas: preparação do pó, conformação e queima. A moagem acontece por via úmida, ocorrendo a homogeneização das matérias-primas, seguida por secagem por pulverização da suspensão. A conformação do pó é por prensagem uniaxial entre 35 a 50 MPa, com um teor de umidade em torno de 6%. A etapa de queima acontece com um ciclo entre 35 a 60 minutos, em uma temperatura máxima entre 1175 °C a 1220 °C, para alcançar a máxima densificação do material (SÁNCHEZ, 2010).

3.5.2 Resina epóxi

De acordo com Ku (2011) e Vaisanen (2017), os polímeros podem ser classificados em termoplástico ou termorrígido. A matriz polimérica comumente utilizada em fachada ventilada é a resina epóxi, classificada como termorrígida.

Esta apresenta propriedades tais como: dureza; resiliência; resistência à umidade e ao ataque químico; pouco ou nenhum encolhimento após a cura quando comparadas às demais poliméricas (poliéster, vinil éster e fenólica) (MA, 2016).

Outra característica relevante, é que este tipo de resina não desprende material volátil durante aplicação. O processo de cura pode ser efetuado à temperatura ambiente sem aplicação de pressão, utilizando um agente de cura ou uma fonte térmica (MITTAL, 2016). Na tabela 2 estão algumas propriedades de algumas resinas termorrígidas comumente utilizadas com fibras naturais.

Tabela 02 – Propriedades de resinas termorrígidas.

Propriedades	Poliéster	Vinil éster	Epóxi
<i>Densidade (g/cm³)</i>	1,2 – 1,5	1,2 – 1,4	1,1 – 1,4
<i>Módulo Elástico (GPa)</i>	2 – 4,5	3,1 – 3,8	3 – 6
<i>Resistência à tração (MPa)</i>	40 – 90	69 – 83	35 – 100
<i>Resistência à compressão (MPa)</i>	90 – 250	100	100 – 200
<i>Alongamento (%)</i>	2	4 – 7	1 – 6
<i>Retração de cura (%)</i>	4 – 8	-	1 – 2
<i>Absorção de água (%)</i>	0,1 – 0,3	0,1	0,1 – 0,4
<i>Resistência ao impacto Izod (J/m)</i>	0,15 – 3,2	2,5	0,3

Fonte: Ku (2011, p. 858).

Neste caso, a resina epóxi, é a matriz que mantém as fibras unidas, protege de danos e permite o alinhamento e estabilização de toda a estrutura compósita (BENSADOUN, 2017).

3.5.3 Fibra de vidro

Na tabela 03 consta a composição das fibras mais comuns em compósitos de matriz polimérica.

Tabela 03 – Composição de fibras de vidro utilizadas em compósitos.

Constituinte	SiO₂	Al₂O₃	B₂O₃	MgO	CaO	Na₂O
<i>Vidro E</i>	55,2	14,6	7,3	3,3	18,7	-
<i>Vidro C</i>	65	4	5	3	14	8,5
<i>Vidro S</i>	65	25	-	10	-	-

Fonte: Marinucci (2011, p.61).

O reforço utilizado é uma tela bidirecional de fibra de vidro, geralmente do tipo E. As fibras de vidro, principalmente as em forma de tecido, apresentam resistência a um objeto durante o processo de impacto. Devido ao baixo custo, esta opção torna-se atrativa para aplicações com finalidade estrutural, em comparação as outras fibras sintéticas (aramida, carbono entre outras) (WAMBUA, 2003; MEOLA, 2014; SIMEOLI, 2014; MA, 2016).

De acordo com Simeoli (2014), em laminados estruturais a adesão entre fibras e matriz precisa ser devidamente avaliada. Pode-se utilizar tratamentos físicos ou químicos para melhorar o molhamento e interações físicas da matriz polimérica e o reforço. Cada tratamento tem suas vantagens, entretanto, o que apresenta melhor desempenho na

interação matriz e fibra de vidro, é por meio de um agente de compatibilização, geralmente organossilanos.

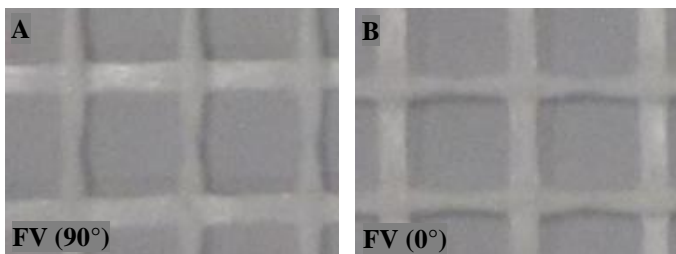
De acordo com Meola (2014), as fibras de vidro são utilizadas como reforço em materiais compósitos em diferentes tipos de aplicações industriais. É utilizada em compósitos para aplicações marítima, automotiva e aeroespacial. Ainda são encontradas em itens do cotidiano como: banheiras de hidromassagem, tanques de água, coberturas, tubos, revestimentos de portas externas e aparelhos elétricos e eletrônicos (RAMESH, 2013; SEBAEY, 2016).

3.5.3.1 Trama e urdume

A tela de fibra de vidro possui dois fios com diferentes larguras, denominados de trama e urdume. O fio do urdume é o fio que está posicionado verticalmente, enquanto o fio da trama entrelaça o fio de urdidura, na horizontal. Neste caso, o fio de maior largura é o fio de urdidura e o fio de menor de largura é o fio da trama.

Devido essa configuração possuir diferentes características mecânicas dependendo da direção avaliada (anisotropia), usualmente se avalia ambas as direções. Para isso foi considerado que quando o fio de urdidura está na vertical, a configuração está a 90° . Já quando o fio de urdidura está na horizontal, a configuração estpa a 0° . Na figura 06 é possível observar essas configurações.

Figura 06 – Telas de fibra de vidro. (A) fio de urdidura na vertical e trama na horizontal, (B) fio de urdidura na horizontal e trama na vertical.



Fonte: A autora, 2018.

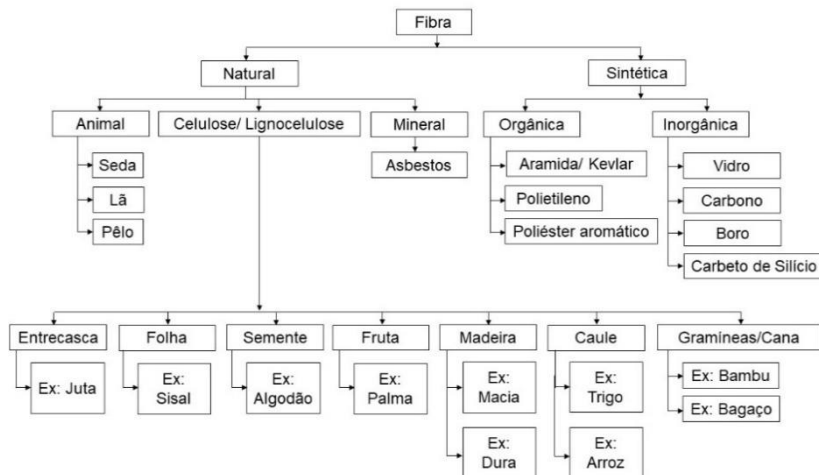
3.6 FIBRAS NATURAIS

Durante a última década, com a maior preocupação ambiental, houve um crescente interesse em fibras naturais. Compósitos poliméricos de fibras naturais são cada vez mais usados em aplicações industriais como substitutos dos compósitos de fibras sintéticas, devido às vantagens ambientais e econômicas, motivado pela redução de peso, maior força específica, maior módulo de elasticidade e preço reduzido (DHAKAL, 2012; RAMESH, 2012; MEREDITH, 2012; CAPRINO, 2015; SZOLNOKI, 2015; VIMAL, 2015; JABBAR, 2016; MEOLA, 2016, ABDELLAOUI, 2017; ARPITHA, 2017; DEB, 2017; FIORE, 2017; JABBAR, 2017; KHAN, 2017; VAISANEN, 2017; YU, 2017). As propriedades desses compósitos podem ser adaptadas para vários tipos de aplicações dependendo de uma seleção adequada de fibras, matrizes, aditivos e métodos de fabricação (RAMESH, 2017).

Estão na classe de fibras naturais as fibras vegetais, animais e minerais. Desde a recente redescoberta, o uso de fibras naturais em compósitos tem sido objeto de estudo em todo o mundo (AGGARWAL, 2017; BANSAL, 2017; DEB, 2017; FIORE, 2017; KHAN, 2017, KUMRE, 2017; RAMESH, 2017; VAISANEN, 2017). Devido à sua ampla disponibilidade, especialmente em países tropicais, essas fibras têm um baixo custo (CAPRINO, 2015; FERREIRA, 2016b; MANSOURIAN, 2016; MITTAL, 2016).

Na figura 07 está a classificação geral das fibras naturais e sintéticas.

Figura 07 – Classificação das fibras naturais e sintéticas.



Fonte: Alkbir, 2016; Rathore, 2017.

De acordo com a figura 06, a fibra de juta em estudo é classificada como uma fibra natural de celulose originada da entrecasca da planta. Na tabela 04, está uma comparação entre as fibras naturais e a de vidro.

Tabela 04 – Comparação entre fibras naturais e de vidro.

	Fibras Naturais	Fibra de vidro
<i>Densidade</i>	Baixo	Duas vezes da fibra natural
<i>Custo</i>	Baixo	Baixo, porém alto em relação a natural
<i>Renovabilidade</i>	Sim	Não
<i>Reciclabilidade</i>	Sim	Não
<i>Consumo de energia</i>	Baixo	Alto
<i>Distribuição</i>	Alta	Alta
<i>CO₂ neutro</i>	Sim	Não
<i>Abrasão das máquinas</i>	Não	Sim
<i>Risco à saúde quando inalado</i>	Não	Sim
<i>Disposição final</i>	Biodegradável	Não biodegradável

Fonte: Wambua (2003, p.1260).

Na tabela 04, é evidente as vantagens do uso de fibras naturais. Destacam-se: a densidade menor, resultando em compósitos mais leves; a reciclabilidade, renovabilidade e disposição, devido à origem da fibra ser de plantas; baixo consumo de energia para fabricação, pois não é necessário tratamento térmico para fabricação; sem abrasão das máquinas e a ausência de risco à saúde quando inalado, devido à composição química da fibra natural (FIDELIS, 2013; ARPITHA, 2017; BANSAL, 2017; VAISANEN, 2017).

A produção de fibras naturais resulta em um menor impacto ambiental quando comparado à fibra de vidro. O cultivo da planta depende exclusivamente da energia solar e a extração e fabricação demandam baixas quantidades de combustível fóssil. Diferentemente da produção de vidro e da fibra, que necessitam grandes quantidades de energia, dependendo de combustíveis fósseis (JOSHI, 2004).

As fibras naturais podem ser incineradas após o término da vida útil do compósito. O processo de incineração das fibras naturais gera emissões atmosféricas, porém, devido a menor massa do compósito, menores quantidades quando comparadas às fibras sintéticas (JOSHI, 2004).

O processo de incineração de fibras naturais resulta em nenhum acréscimo líquido nas emissões de dióxido de carbono (CO₂). Isso se deve às plantas, da qual as fibras são obtidas, pois sequestram o dióxido de carbono atmosférico durante o seu crescimento, liberando-o durante a combustão das fibras. Esse processo resulta em um menor efeito no aquecimento global (JOSHI, 2004).

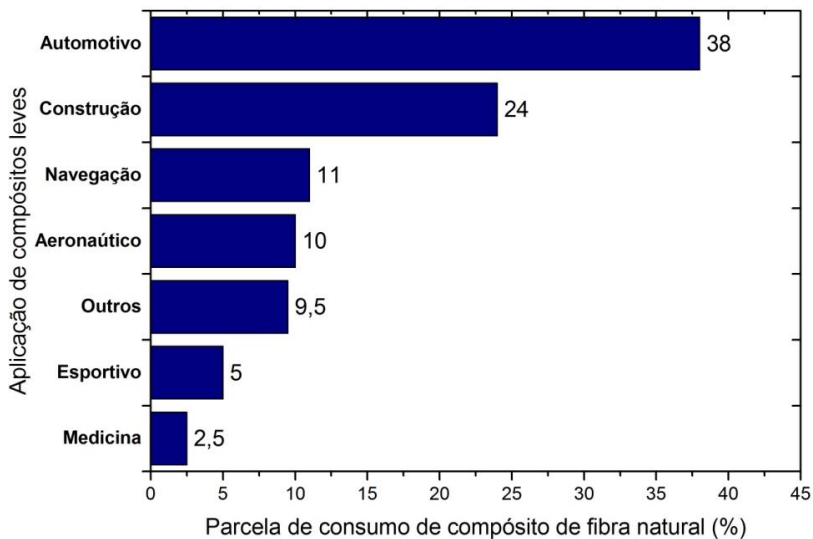
De acordo com Pickering (2016) e Kumre (2017), os compósitos de fibras naturais apresentam desvantagens, tais como: menor durabilidade que os compósitos que utilizam fibras sintéticas (característica que pode ser melhorada com tratamentos); alta absorção de umidade; propriedades térmicas inferiores; baixa resistência, principalmente ao impacto; grande variação das propriedades e baixa temperatura de processamento (no máximo 200 °C), limitando a escolha da matriz polimérica. Ramesh (2017) comenta sobre as desvantagens no processamento, tais como: falta de compatibilidade com polímeros sintéticos e falta de estabilidade dimensional.

De acordo com Vaisanen (2017), para melhorar as propriedades térmicas, é comum a aplicação de diferentes tipos de retardantes de fogo durante o processamento ou no estágio final. Outros métodos incluem a utilização de polímeros não inflamáveis e a adição de nanopartículas. No entanto, documentou-se que a adição de retardantes de fogo compromete a resistência mecânica desses compósitos (VAISANEN, 2017).

As possíveis aplicações como substitutas da fibra de vidro estão sob estudos em áreas como: automotiva, aviação, biocompósitos, construção civil, esportivas e de instrumentos musicais. (WAMBUA, 2003; ZAH, 2007; HO, 2012; PHILLIPS, 2012; FROLLINI, 2015; CLARAMUNT, 2016; ABDELLAOUI, 2017; ARPITHA, 2017; BANSAL, 2017; DEB, 2017). Na indústria automobilística, as fibras naturais constituem quase 40% das matérias-primas (ADEKOMAYA, 2017). É previsto que até 2020, as fibras derivadas de fontes biológicas representem até 28% do mercado total de materiais de reforço (RAMESH, 2017).

A figura 08 mostra a parcela de consumo de fibras naturais em diferentes ramos de aplicação. Destaca-se a indústria automobilística e a construção.

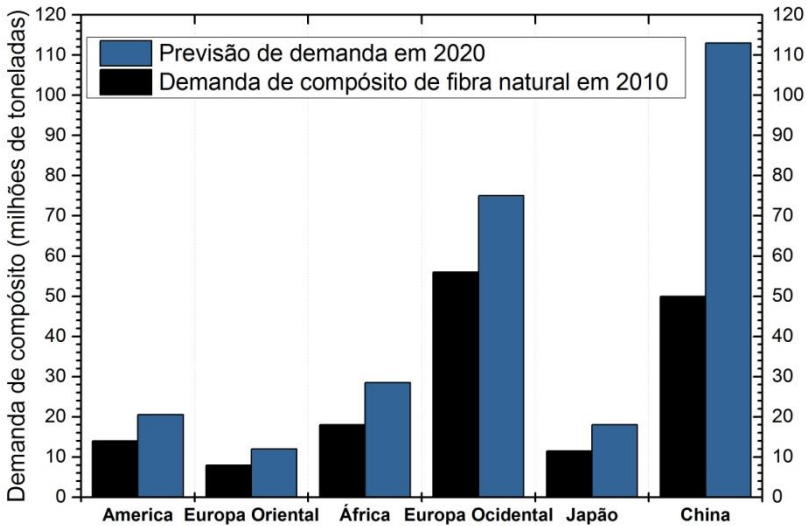
Figura 08 – Parcela do consumo de fibras naturais em aplicação de engenharia.



Fonte: Adaptado de Adekomaya, 2017.

A demanda de fibras naturais está pulverizada por todos os continentes. Somente a China tem previsão de dobrar a demanda de fibras naturais até 2020 (mais de 110 milhões de toneladas) como mostra a figura 09. Enquanto a Europa Ocidental tem previsão de demanda alcançando os 80 milhões de toneladas, principalmente destinadas a peças automotivas (ADEKOMAYA, 2017).

Figura 09 – Previsão de consumo de compósitos de fibras naturais.



Fonte: Adaptado de Adekomaya, 2017.

3.6.1 Desempenho mecânico das fibras naturais

O desempenho de uma fibra natural depende de alguns fatores, como: composição química; dimensões e estrutura (razão de aspecto e orientação); defeitos de superfície; propriedades físicas e mecânicas da fibra; transferência de carga na interface (MITTAL, 2016; RAMESH, 2017).

De acordo com Zhou (2016) e Arpitha (2017), os principais componentes das fibras vegetais são: a celulose, hemicelulose, lignina, pectina, ceras e outras substâncias de baixo peso molecular. As concentrações desses componentes dependem de fatores como o tipo de fibra, condição de crescimento, dimensão, idade, localização na planta, método de extração e processamento (RAMESH, 2017).

Vaisanen (2017) afirma que a quantidade de lignina, hemicelulose e celulose, interferem diretamente nas propriedades das fibras. Geralmente quanto maior a quantidade de lignina, pior será o desempenho mecânico e térmico. Já a fração de celulose é hidrofílica, e não desenvolve a melhor interação fibra-matriz com matrizes poliméricas hidrofóbicas. (VIMAL, 2015). Na figura 10 está a dependência das propriedades das fibras naturais e sua composição.

Figura 10 – Dependência das propriedades das fibras naturais e seus constituintes.



Fonte: Adaptado de Vaisanen, 2017.

Os reforços naturais têm pontos a serem avaliados como: baixa molhabilidade; incompatibilidade com algumas matrizes poliméricas e alta absorção de umidade (WAMBUA, 2003).

O ponto mais relevante a ser avaliado, é a adesão da fibra na matriz (ZHOU, 2016; ARPITHA, 2017). A interface fibra e matriz é uma zona de interação em que duas fases são física, mecânica e/ou quimicamente combinadas. A adesão interfacial entre a fibra e a matriz, é um fator determinante para as características mecânicas do compósito. Os fatores que afetam esta adesão são: o bloqueio mecânico, as forças de atração molecular e as ligações químicas (ZHOU, 2016).

As fibras naturais de origem vegetal são hidrofílicas e incompatíveis com os polímeros hidrofóbicos. Além disso, as substâncias pectina e cera, encontradas na fibra vegetal, agem como uma barreira na interligação fibra-matriz (ZHOU, 2016; ABDELLAOUI, 2017). As fibras naturais apresentam grupos hidroxila (OH^-) devido à presença de celulose e lignina. Esses grupos hidroxila podem estar envolvidos em ligações fracas de pontes de hidrogênio, dentro das moléculas de celulose. Dessa forma, reduzindo a interação com a matriz polimérica (FERREIRA, 2016b). Além disso, essa natureza hidrofílica afeta no comportamento de absorção de água do compósito de fibra natural, aumentando a quantidade de água absorvida (RAMESH, 2017; VAISANEN, 2017).

A função da matriz em um compósito, é transferir a carga para as fibras rígidas através de tensões de cisalhamento na interface. Este processo necessita de uma boa ligação entre a matriz polimérica e as fibras. A baixa interação entre reforço e matriz reduz a vida útil, comprometendo a capacidade total do compósito, tornando-o vulnerável

a ataques externos (WAMBUA, 2003; ZHOU, 2016; SASSONI, 2017, VAISANEN, 2017).

A baixa adesão da matriz na fibra natural pode ser melhorada através de alguns tratamentos para remover a lignina, pectina e impurezas (ABDELLAOUI, 2017). Estes tratamentos podem ser físicos (tratamento de plasma frio ou tratamento corona) ou químicos (anidrido maléico, organossilanos, isocianatos, hidróxido de sódio, permanganato ou de peróxido). Além disso, tratamentos térmicos podem ser utilizados para melhorar as propriedades das fibras naturais (WAMBUA, 2003; FERREIRA, 2016b; ARPITHA, 2017; DEEPAK, 2017; VAISANEN, 2017).

Apesar dos efeitos positivos em relação à adesão da fibra na matriz, os métodos de modificação, podem aumentar o risco de degradação da fibra além de aumentar o custo de produção (VAISANEN, 2017).

O segundo ponto a ser avaliado, são as propriedades das fibras naturais, pois interferem diretamente nas propriedades do compósito. As propriedades das fibras naturais são variáveis devido às condições de crescimento das plantas. As propriedades mecânicas são inferiores quando comparadas com as fibras sintéticas. Porém, em termos de propriedades específicas, especialmente rigidez, são comparáveis com as fibras de vidro. Além disso, fibras naturais são cerca de 50% mais leves do que as fibras de vidro, e de forma geral, apresentam custo inferior (WAMBUA, 2003; VIMAL, 2015). Na tabela 05, está uma comparação entre as propriedades de algumas fibras naturais e a fibra de vidro tipo E.

Tabela 05 – Propriedades das fibras naturais em relação à fibra de vidro tipo E.

Propriedades	Fibras			
	vidro E	juta	sisal	linho
<i>Densidade (g/cm³)</i>	2,55	1,48	1,33	1,40
<i>Resistência à tração (MPa)</i>	2400	400 – 800	600 – 700	800 – 1500
<i>Módulo de Young (GPa)</i>	73	10 – 30	38	60 – 80
<i>Alongamento (%)</i>	3	1,8	2 – 3	1,2 – 1,6
<i>Absorção de umidade (%)</i>	-	12	11	7

Fonte: Wambua (2003, p. 1261). Com modificações.

3.6.2 Fibra natural de juta

As fibras de juta foram utilizadas como reforço. Entre as fibras naturais, a fibra de juta é a que apresenta no mercado brasileiro, a configuração necessária para o presente trabalho (de trama e espessura). Esta é uma das maiores fontes de fibras lignocelulósicas. Esta fibra foi introduzida no Brasil entre os anos de 1950 e 1980, nos estados do Amazonas, Pará e São Paulo, sendo esses atualmente os principais cultivadores da planta. A planta de juta tem uma haste vertical com folhas, e cresce em clima quente e úmido, principalmente em áreas onde existe alta precipitação pluviométrica (SATYANARAYANA, 2007; JAHAN, 2016; MANSOURIAN, 2016). É uma das fibras naturais mais baratas e de maior produção da China, Índia e Bangladesh sendo conhecida como a fibra dourada (RAMESH, 2017; RATHORE, 2017).

A planta juta pertence ao gênero *Corchorus*, família *Tiliaceae*, sendo obtida a partir do caule da planta, que é derivada da região amazônica. Essas plantas levam quase 3 meses para crescer e podem alcançar cerca de 2,5 a 3,5 metros de altura (BISARIA, 2015; RAMESH, 2017). A fibra de juta apresenta rendimento de 2 toneladas de fibra por hectare, sendo uma das fibras mais acessíveis (FIORE, 2017). Na figura 11 está a fotografia de uma plantação de juta e a primeira etapa do processamento.

Figura 11 – Plantação de juta e o corte da planta.



Fonte: Toledo, 2010.

De acordo com Ferreira (2016a), a extração da fibra ocorre a partir da planta *Corchorus capsularis*, através das seguintes etapas: corte, maceração, trituração, secagem, classificação e embalagem. A maceração biológica é o processo utilizado para a remoção das fibras da planta (BISARIA, 2015; FERREIRA, 2016a; JAHAN, 2016, RAMESH, 2017). A figura 12 mostra a etapa de secagem do processamento da fibra de juta.

Figura 12 – Etapa de secagem dos feixes de juta.



Fonte: Toledo, 2010.

O processo de maceração consiste em imergir os feixes de juta em água. Este processo requer de 14 a 28 dias para degradar a pectina, hemicelulose e lignina. O processo de maceração afeta diretamente a qualidade e o custo da fibra produzida (JAHAN, 2016).

Ramesh (2017) comenta que muitos defeitos estão presentes na superfície e no volume da fibra, enquanto outros são produzidos durante o crescimento da planta. O processo de corte, por exemplo, também pode causar defeitos interferindo na resistência mecânica da fibra.

A fibra de juta é longa e macia, podendo ser trançada em linhas fortes e geralmente apresentam cor branca a marrom (BANSAL, 2017). A fibra de juta tem moderada resistência à tração e à flexão quando comparadas com outras fibras naturais. Os compósitos de polímero reforçados com fibra de juta são adequados para as aplicações

estruturais primárias, elementos interiores e aplicações temporárias ao ar livre. A característica de isolamento da juta, torna-se útil em portas e tetos automotivos, painéis de separação do motor e compartimentos de passageiros (BISARIA, 2015). Também são utilizados tradicionalmente na fabricação de sacos, cortinas, fios, cordas, entre outros (RAMESH, 2017). A tabela 06 apresenta algumas propriedades da fibra natural de juta.

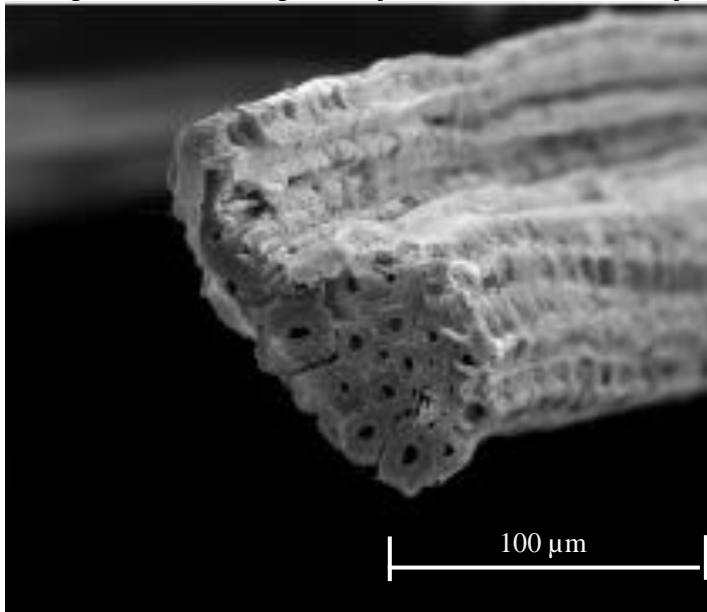
Tabela 06 – Propriedades químicas e físicas da fibra de juta.

Propriedades	Fibra de juta
<i>Celulose (%)</i>	64,4
<i>Hemicelulose (%)</i>	12
<i>Lignina (%)</i>	11,8
<i>Teor de umidade (%)</i>	1,1
<i>Densidade (g/cm³)</i>	1,46
<i>Comprimento da fibra (mm)</i>	0,8 – 6
<i>Diâmetro da fibra (μm)</i>	5 – 25

Fonte: Bisaria (2015, p.1195). Com modificações.

A celulose é o componente principal, encontrado na forma de hastes finas alinhadas ao longo do comprimento de fibra. É um polissacarídeo, constituído por uma cadeia linear semicristalina com centenas de β-(1-4)-glucosídicas ligadas com D-glucopirranose na presença de grupos hidroxila (OH⁻). Já a hemicelulose é um polissacarídeo de peso molecular menor, que tem como função ser uma matriz para a celulose nas paredes do vegetal. Embora a celulose seja cristalina, a hemicelulose tem uma estrutura aleatória, sendo assim, amorfa. A lignina é uma classe de complexos polímeros de hidrocarbonetos, que dá rigidez à planta, sendo relativamente hidrofóbica (ZHOU, 2016). A figura 13 apresenta a morfologia da fibra de juta.

Figura 13 – Morfologia da seção transversal da fibra de juta.



Fonte: Ferreira, (2016b).

3.7 COMPORTAMENTO MECÂNICO SOB IMPACTO

Nos próximos subcapítulos do comportamento mecânico sob impacto, está descrita a forma que os materiais empregados nesta dissertação se comportam quando submetidos a esse tipo de esforço.

3.7.1 Polímeros reforçados com fibra de vidro

O dano ao impacto de baixa velocidade, é uma das ameaças mais severas aos compósitos estruturais (BENSADOUN, 2017). Se um polímero reforçado com fibra de vidro (compósito) é atingido por um objeto perpendicularmente à sua superfície, este impacto pode degradar propriedades como resistência à carga estática e à fadiga. Esses impactos de baixa velocidade produzem uma perfuração e delaminação (MEOLA, 2014).

Danos dessa natureza são difíceis de detectar, porém é necessária a identificação para evitar uma falha prematura da estrutura. Impactos

de alta velocidade são facilmente identificados, entretanto, causando danos graves ao desempenho estrutural (MEOLA, 2014; SEBAEY, 2016).

De acordo com Meola (2014), durante o processo de impacto, a energia cinética é transmitida do objeto para a superfície do compósito. Qualquer tipo de dano (delaminação e/ou ruptura das fibras) gera uma dissipação de calor, ocasionando o aparecimento de focos de calor na superfície do material (MEOLA, 2014).

O comportamento elástico e de fratura dos compostos poliméricos dependem de alguns fatores. Além das propriedades mecânicas das fibras e da matriz, estão inclusas: a sequência de empilhamento das camadas de reforço, a direção de orientação das fibras, a qualidade da interface fibra-matriz e a espessura do laminado. Anisotropia e incompatibilidade das propriedades dos materiais na interface interlaminar, são a origem de falhas (KHOMENKO, 2016; BENSADOUN, 2017).

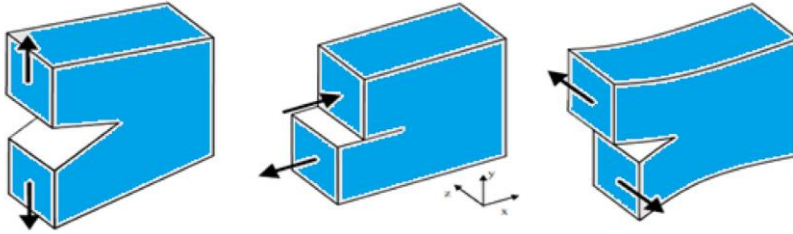
Porém, quando um compósito é submetido a um impacto de baixa velocidade que leva à perfuração total da amostra, o dano na matriz, será o primeiro a ocorrer. Fissuras na matriz, na região onde as fibras são orientadas paralelamente, ocorrem por causa de uma falta de correspondência entre a fibra e a matriz. Isso leva a concentrações de estresse na interface fibra-matriz. A forma que as fissuras irão se desenvolver na matriz dependem da espessura da amostra e da arquitetura da fibra. Quando uma determinada energia crítica é alcançada, o dano da matriz pode causar delaminações (BENSADOUN, 2017).

O principal ponto a ser analisado em compostos poliméricos termorrígidos monolíticos, é a sua baixa resistência interlaminar frente ao impacto. Esses materiais são suscetíveis à delaminação nessa situação (MEOLA, 2014; MEOLA, 2016).

No caso de estruturas compostas poliméricas, o mecanismo de dano do impacto é ainda uma preocupação, pois o comportamento ocorre de forma bastante complexa e ainda não é completamente elucidado. Principalmente devido à multiplicidade de estudos que podem ser gerados alterando seus constituintes (matriz e reforço) ou variáveis (sequência de empilhamento, processo de cura, entre outros) (MEOLA, 2016).

De acordo com Mansourian (2016) a fratura pode ocorrer de três modos: I (aberta ou tração), II (cisalhamento no plano com deslizamento) ou III (cisalhamento “rasgando” o plano). Na figura 14 é possível observar as formas que podem ocorrer a fratura.

Figura 14 – Modos de fratura – I, II e III (esquerda para direita).



Fonte: Mansourian, 2016.

A fratura ainda pode ocorrer, de acordo com a orientação do reforço. Ou seja, de forma intralaminar, interlaminar ou translaminar. De acordo com Marinucci (2011) falha intralaminar ocorre internamente nas camadas. Já a falha interlaminar ocorre nos planos paralelos, resultando na fratura da matriz e separação da fibra da matriz. Este é o tipo de falha comumente encontrado nos materiais compósitos, chamada de delaminação. A falha translaminar ocorre transversalmente ao plano da lâmina. Geralmente são observadas no esforço de tração, apresentando uma topografia desigual e com presença de fibras quebradas.

3.7.2 Cerâmica

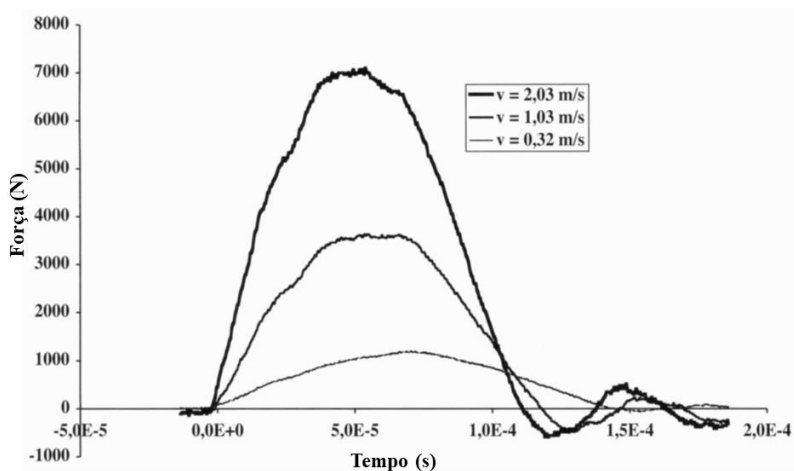
De acordo com Dondi (2016), a resistência ao impacto das placas cerâmicas é uma característica técnica importante a ser avaliada, para grandes formatos e baixas espessuras. Esses apresentam baixa resistência à fratura quando submetidos à queda de objetos, podendo causar danos na superfície, e eventualmente, a perda do material (MENEZZO, 2014).

Quando objetos colidem sobre a superfície, o esforço aplicado provoca uma deformação que pode ser elástica ou plástica. Esta deformação depende das características do material. Muitos materiais apresentam ambas as deformações de acordo com a intensidade da força aplicada. Para baixos valores de tensão aplicada, a deformação é elástica, onde a tensão é proporcional à deformação obtida (módulo de Young). Porém, ao ultrapassar um determinado valor limite, se perde esta relação linear. Ao continuar o aumento da tensão, a deformação se estabiliza, alcançando um valor máximo, e após isso, ocorre a fratura (SILVA, 2002).

Os materiais cerâmicos homogêneos se caracterizam por apresentarem uma rápida transição entre o comportamento elástico e a fratura. Por isso, são denominados frágeis. Esse comportamento ocorre devido à velocidade baixa que as tensões aplicadas se reorganizam, não apresentando deformação plástica apreciável que possa absorver essas tensões (SILVA, 2002; CANTAVELLA, 2008).

Para a situação de queda de objetos de uso doméstico sobre a placa cerâmica, a absorção de energia por flexão geralmente é impedida. Os danos causados ficam limitados à superfície da placa sem produzir a fratura. Aumentar a velocidade do objeto no instante do impacto aumenta proporcionalmente a tensão máxima aplicada, porém, mantendo-se o mesmo tempo de contato entre o objeto e a superfície da placa cerâmica (SILVA, 2002). Na figura 15 pode ser observado esse comportamento.

Figura 15 – Evolução do esforço durante o impacto em diferentes alturas.



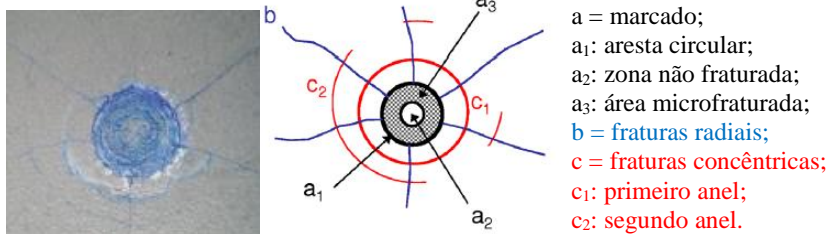
Fonte: Silva, 2002.

De acordo com Silva (2002), a fratura em materiais cerâmicos é classificada em frágil (ou fratura Hertziana) ou *quasi*-plástica. Quando um objeto esférico exerce uma força crescente sobre a superfície plana de uma placa cerâmica homogênea, se produz uma deformação e por consequência, uma força de tração exercida na área de contato de ambos os objetos. Quando se alcança um valor limite, se inicia uma fissura de

forma anelar somente na superfície, podendo formar fissuras menores, resultando em uma fratura cônica.

No caso de placas cerâmicas heterogêneas, o tipo de fratura é denominado *quasi-plástica*. Para condições similares de aplicação de carga, se produz uma zona de deformação devido à tensão de cisalhamento. Neste caso, a deformação consiste em múltiplas microfissuras de comprimento reduzido, distribuídas de forma difusa, apresentando formato semicircular. Aumentando a carga progressivamente, podem-se gerar esforços de tração que se propagam em fissuras secundárias. O crescimento dos danos gerados pode permitir a coalescência das fissuras, causando o afundamento da parte posterior da placa (tardoz). Assim, produzindo gretas abaixo da superfície, podendo provocar o desprendimento de fragmentos (SILVA, 2002). De acordo com Dondi (2016), o nível de danos gerados aumenta com a energia de impacto de um objeto. A figura 16 apresenta os danos observados após o impacto de um corpo esférico em uma placa de porcelanato.

Figura 16 – Danos observados após o impacto em porcelanato.



Fonte: Dondi, 2016.

No caso de múltiplas camadas (suporte cerâmico heterogêneo e a camada vítrea relativamente homogênea), o sistema possui diferentes naturezas e comportamentos (SILVA, 2002). Dessa forma, se observa uma transição entre ambos os mecanismos de fraturas, podendo coexistirem (SILVA, 2002; DONDI, 2016).

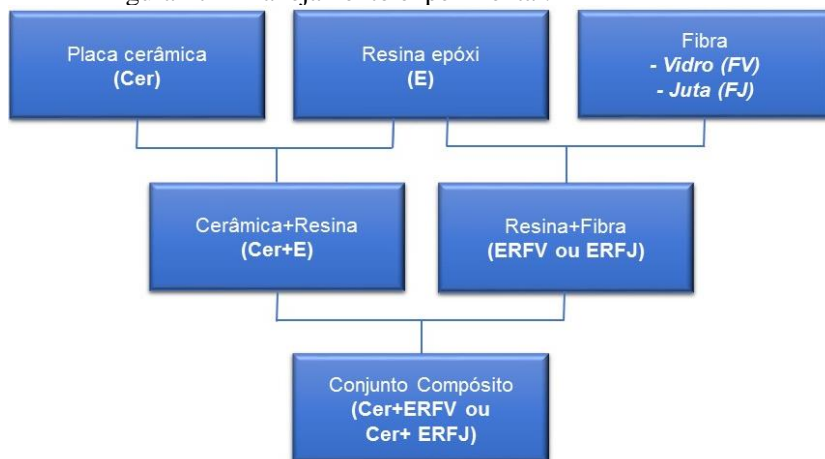
De acordo com Cantavella (2008), no caso de múltiplas camadas, o suporte cerâmico tem função determinante frente ao impacto. De forma geral, suportes com módulo de elasticidade maior apresentam melhor comportamento frente ao impacto. Isso ocorre, pois, ao aumentar o módulo de elasticidade, se diminui a deformação da camada vítrea, reduzindo as tensões de cisalhamento e tração.

De acordo com Dondi (2016), o grau de dano causado pelo impacto em placas de porcelanato tem influência do tamanho da placa. Grandes formatos apresentam danos mais severos. A intensidade da força aplicada e a forma do corpo que colide na superfície da placa determinam se o dano se limitará à superfície do revestimento cerâmico ou ocasionará a fratura. Esse último tipo de dano foi o objeto de estudo neste trabalho.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste estudo, foram avaliados os seguintes componentes: placa cerâmica, resina epóxi, fibra de vidro e a fibra natural de juta e seus devidos sistemas. A figura 17 apresenta a forma que os sistemas foram montados.

Figura 17 – Planejamento experimental.



Fonte: A autora, 2018.

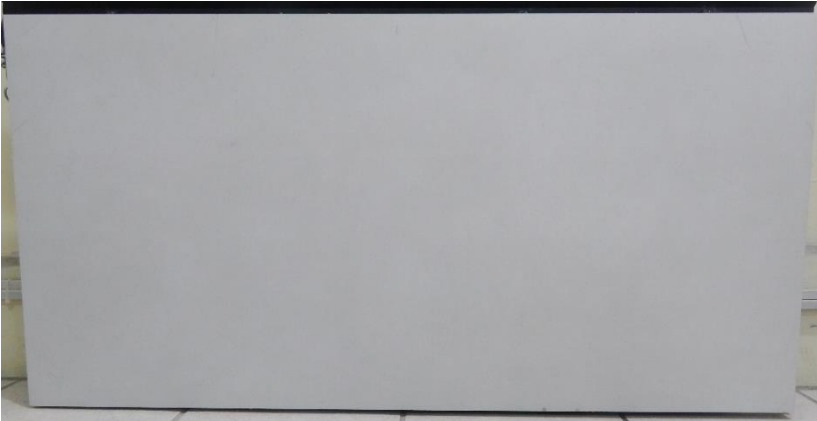
A primeira análise foi realizada com a placa cerâmica, resina epóxi e fibra de vidro e natural separadamente (Cer, E, FV e FJ). Nesta etapa foram analisadas propriedades químicas, físicas e mecânicas, que sejam relevantes para cada componente. A segunda análise consistiu em avaliar conjuntos binários (Cer+E, ERFV e ERFJ). Neste caso, foi avaliado o comportamento físico e mecânico da cerâmica juntamente com resina epóxi e a resina epóxi e as fibras. Na última etapa foi realizada a avaliação da interação entre os três componentes (Cer+ERFV e Cer+ERFJ), na forma de compósito estrutural. Nessa etapa, as análises foram direcionadas para uma avaliação do compósito como produto final de uma fachada ventilada.

4.1 MATERIAIS

Os materiais que foram utilizados na confecção dos sistemas e dos compósitos finais são:

- Placa cerâmica: foi utilizado o porcelanato esmaltado, fornecido pela Eliane S/A Revestimentos Cerâmicos, no formato de 59x118,2 cm com espessura de 12 mm. A figura 18 mostra o porcelanato esmaltado utilizado.

Figura 18 – Porcelanato esmaltado 59x118,2 cm para fachada ventilada.



Fonte: A autora, 2018.

Na tabela 07, constam as características do porcelanato em relação à composição química e as propriedades físicas.

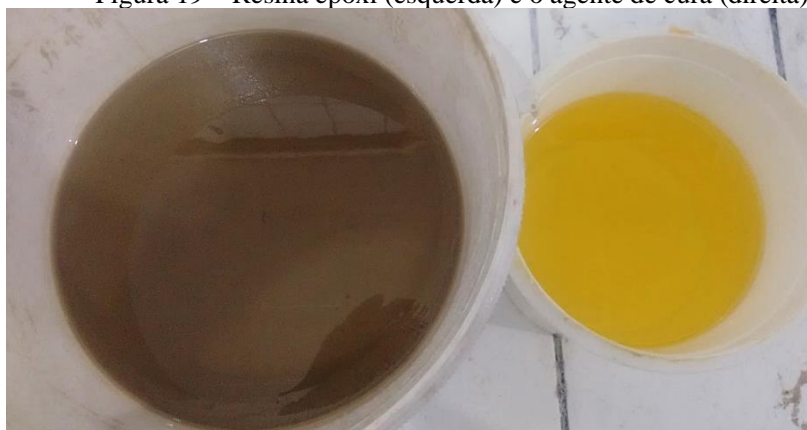
Tabela 07 – Características do porcelanato esmaltado.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	
Componente	Teor (%)
<i>SiO₂</i>	70,4
<i>Al₂O₃</i>	18,3
<i>TiO₂</i>	0,4
<i>Fe₂O₃</i>	2,4
<i>CaO</i>	2,0
<i>MgO</i>	1,9
<i>Na₂O</i>	2,0
<i>K₂O</i>	2,6
PROPRIEDADES FÍSICAS	
Propriedade	Valor
<i>Absorção de Água (%)</i>	0,17
<i>Resistência Mecânica (MPa)</i>	48
<i>Carga de Ruptura (N)</i>	3160
<i>Densidade aparente a queimado (g/cm³)</i>	2,28

Fonte: Eliane S/A Revestimentos Cerâmicos, 2017.

- Resina epóxi: a resina utilizada foi fornecida pela empresa Shackerley (Reino Unido). Esta é a resina utilizada nos primeiros projetos de fachada ventilada pela Eliane S/A Revestimentos Cerâmicos, quando houve a transferência de tecnologia. A figura 19 mostra a resina epóxi e o agente de cura utilizados.

Figura 19 – Resina epóxi (esquerda) e o agente de cura (direita).



Fonte: A autora, 2018.

A tabela 08 apresenta a composição química da resina epóxi e do agente de cura de acordo com o fornecedor.

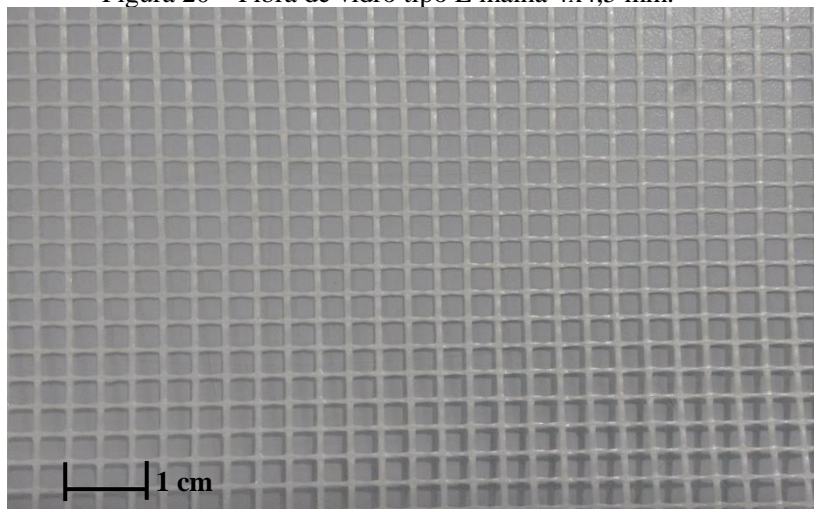
Tabela 08 – Composição química da resina epóxi e do agente de cura.

Resina Epóxi	
<i>Bisfenol A – Epicloridrina</i>	60 – 80%
<i>Ester do ácido glicidil decanóico</i>	<3%
Agente de cura	
<i>Álcool benzílico</i>	> 35%
<i>Ciclo hexalamina</i>	20 – 40%

Fonte: Shackerley, 2016.

- Tela de fibra de vidro: a fibra de vidro utilizada foi uma tela bidirecional do tipo E. Essa fibra é comumente utilizada em fachada ventilada. Esta foi fornecida pela empresa Gavazzi (Itália). A figura 20 mostra a tela de fibra de vidro utilizada na configuração de 4x4,5x0,3 mm.

Figura 20 – Fibra de vidro tipo E malha 4x4,5 mm.



Fonte: A autora, 2018.

A tabela 09 apresenta as características físicas e mecânicas da fibra de acordo com o fabricante.

Tabela 09 – Características físicas e mecânicas da fibra de vidro.

Características	
<i>Malha</i>	4 x 4,5 mm
<i>Gramatura</i>	160 g/cm ²
<i>Alongamento (ISO 4606)</i>	4,5%
Composição	
<i>Fibra de vidro do tipo E</i>	82%
<i>Acabamento alcalino</i>	18%

Fonte: Gavazzi, 2016.

- Tela de fibra natural: foi utilizada uma tela bidirecional de configuração semelhante à trama da tela de vidro. Porém a menor espessura encontrada no mercado foi de em torno de 0,8 mm (enquanto a fibra de vidro possui em torno de 0,3 mm). Essa fibra é 20% mais leve que a fibra de vidro do presente estudo. Essa foi uma cortesia da empresa Companhia Têxtil Castanhal do estado do Pará, Brasil. A figura 21 mostra a configuração da fibra.

Figura 21 – Tela de juta natural.



Fonte: A autora, 2018.

- Agente de compatibilização: foi utilizado um plastificante à base de ésteres do ácido acrílico e estireno (Mowilith LDM 6138 BR), para realizar a compatibilização entre matriz polimérica e a fibra natural. Esse produto é um ligante para revestimentos elastoméricos utilizados em fachadas. Após a compatibilização, a fibra de juta se tornou 66% mais pesada em relação à fibra de vidro. Este foi concedido pela empresa Claritex. A tabela 10 mostra algumas características do plastificante.

Tabela 10 – Características do plastificante.

Propriedade	Valor
<i>Teor de Sólidos (%)</i>	50±1
<i>Viscosidade (mPa.s)</i>	3000 – 8000
<i>pH</i>	8,5±0,5
<i>Tamanho médio de partícula (µm)</i>	~ 0,25
<i>Temperatura mínima de formação de filme (°C)</i>	0
<i>Temperatura de transição vítrea (°C)</i>	-15

Fonte: Claritex, 2017.

4.2 MÉTODOS

Na sequência, neste subcapítulo, consta a descrição do procedimento de confecção dos sistemas em avaliação e do compósito final.

4.2.1 Sistema placa cerâmica + resina (Cer+E) e compósitos finais (Cer+ERFV e Cer+ERFJ)

Para a montagem do sistema placa cerâmica e resina e os compósitos finais foram seguidas as etapas abaixo:

- a) Corte da placa cerâmica: a placa cerâmica utilizada em fachada ventilada possui o formato de 59x118,2 cm. Para o melhor controle da camada de resina aplicada, as placas foram cortadas em formatos menores de acordo com os ensaios. Essas foram cortadas na unidade fachada ventilada da Eliane S/A Revestimentos Cerâmicos, com a máquina de corte habitualmente utilizada no processo;
- b) Corte das telas: os rolos fornecidos possuem 0,6x100 m para a fibra de vidro e 1x100 m para a fibra de juta. Dessa forma, o corte das telas (vidro e natural) seguiu o tamanho das placas

cerâmicas cortadas. As telas foram cortadas com auxílio de um objeto cortante;

- c) Compatibilização: o plastificante foi aplicado somente na tela de fibra natural com auxílio de um rolo de lã de carneiro. A camada de plastificante depositada na fibra correspondeu a 280 g/m². A secagem ocorreu em ambiente arejado à temperatura ambiente durante 24 horas para posterior aplicação no sistema. A figura 22 mostra a aplicação do agente de compatibilização;

Figura 22 – Aplicação do plastificante na fibra natural de juta.



Fonte: A autora, 2018.

- d) Aplicação da resina epóxi: foi efetuada com um pincel de 5 cm de largura e espátula metálica. A mistura de resina e o agente de cura foram realizados conforme procedimento do fornecedor (82% resina e 18% agente de cura sob agitação). A camada de resina foi de aproximadamente de 500 g/m². A figura 23 mostra a aplicação na resina em uma placa cerâmica de 59x118,2 cm;

Figura 23 – Aplicação da resina epóxi na placa cerâmica.



Fonte: A autora, 2018.

- e) Colocação da tela: no caso dos compósitos finais, a tela é inserida na matriz polimérica durante a aplicação da resina epóxi. A figura 24 mostra a colocação da tela de juta durante a aplicação da resina epóxi;

Figura 24 – Colocação da tela de juta.



Fonte: A autora, 2018.

- f) Cura: ocorreu em ambiente arejado à temperatura ambiente durante 72 horas;

- g) Corte dos corpos de prova: após a cura total (72 horas), foi efetuado o corte dos corpos de prova nas dimensões necessárias para cada ensaio seguindo a norma vigente. Novamente o corte ocorreu na unidade fachada ventilada da empresa Eliane;
- h) Secagem e armazenamento dos corpos de prova: após o corte, os corpos de prova foram secos em estufa em uma temperatura de 40°C até peso constante. Após secagem, os corpos de prova foram armazenados em local protegido da luz e sem umidade.

4.2.2 Sistema resina + fibra (ERFV e ERFJ)

Para a montagem do sistema resina e fibra foi utilizado o método *hand lay-up* (moldagem aberta), obedecendo a camada proporcional de 4 kg/m², para obter lâminas na espessura necessária para os ensaios. Após a fabricação da lâmina, esta foi cortada nas dimensões necessárias. Na figura 25 está o molde utilizado para fazer as lâminas do compósito (porcelanato polido e faixas de acrílico) e as lâminas prontas.

Figura 25 – Molde para método *hand lay-up* (esquerda) e lâminas prontas (direita).



Fonte: A autora, 2018.

4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A caracterização dos sistemas e dos compósitos consistiu em análises físicas e mecânicas. Nos subcapítulos seguintes estão descritos os ensaios realizados e em qual sistema. Todos os ensaios seguiram as normas nacionais ou internacionais vigentes. As técnicas utilizadas, foram executadas nas dependências dos laboratórios CerTec, LabValora, IDT da Unesc e Departamento Técnico da Eliane S/A Revestimentos Cerâmicos.

4.3.1 Componentes individuais

A tabela 11 constam os ensaios que foram aplicados para determinar características individuais dos materiais.

Tabela 11 – Ensaio de caracterização para os componentes do compósito.

Caracterização	Placa cerâmica	Resina epóxi	Fibra
<i>Absorção de água</i>	X		X
<i>Análise microestrutural</i>			X
<i>Análise térmica</i>		X	X
<i>Composição química</i>	X		
<i>Densidade aparente</i>	X		
<i>Densidade real</i>	X	X	X
<i>Resistência ao impacto</i>	X	X	
<i>Resistência mecânica à flexão</i>	X		
<i>Resistência mecânica à tração</i>	X	X	X

Fonte: A autora, 2018.

A tabela 12 constam os métodos que foram utilizados nos ensaios descritos na tabela 11.

Tabela 12 – Método utilizado para caracterização individual.

Caracterização	Método
<i>Absorção de água (cerâmica)</i>	Por fervura
<i>Absorção de água (fibra)</i>	Imersão em água em temperatura ambiente
<i>Análise microestrutural</i>	Microscopia eletrônica por varredura
<i>Análise térmica</i>	TG/ATD
<i>Composição química</i>	Espectrometria de fluorescência de raios-x
<i>Densidade aparente</i>	Densidade por imersão em água
<i>Densidade real</i>	Picnometria de hélio
<i>Resistência ao impacto</i>	Resistência ao impacto por Charpy
<i>Resistência mecânica à flexão</i>	Módulo de resistência à flexão de 3 pontos
<i>Resistência mecânica à tração</i>	Módulo de resistência à tração

Fonte: A autora, 2018.

4.3.2 Características das configurações e de desempenho

A tabela 13 apresenta os ensaios que foram aplicados e em qual sistema. Os ensaios consistem em análises físicas e mecânicas.

Tabela 13 – Ensaios de caracterização para os sistemas.

Caracterização	Cerâmica + resina	Resina + fibra	Compósito final
<i>Absorção de água</i>		X	
<i>Adesão fibra-matriz</i>		X	
<i>Arrancamento das fixações</i>			X
<i>Impacto de corpo duro</i>			X
<i>Impacto de corpo duro com degradação</i>			X
<i>Propagação de chama</i>			X
<i>Resistência ao impacto</i>	X	X	X
<i>Resistência ao impacto com degradação</i>	X		X
<i>Resistência mecânica à flexão</i>	X		X
<i>Resistência mecânica à tração</i>	X	X	X

Fonte: A autora, 2018.

A tabela 14 apresenta o método que foi utilizado nos ensaios descritos na tabela 13.

Tabela 14 – Método utilizado para caracterização dos sistemas e de desempenho.

Caracterização	Método
<i>Absorção de água</i>	Imersão em água em temperatura ambiente
<i>Adesão fibra-matriz</i>	Módulo de resistência à tração
<i>Arrancamento das fixações</i>	Baseado na BS 7883: 2005
<i>Impacto de corpo duro</i>	Baseado na NBR 15.575-4
<i>Impacto de corpo duro com degradação</i>	NBR 15.575-4 com degradação em água
<i>Propagação de chama</i>	Baseado na NBR 9442 e ASTM E 84
<i>Resistência ao impacto</i>	Por Charpy
<i>Resistência ao impacto com degradação</i>	Por Charpy com degradação em água
<i>Resistência mecânica à flexão</i>	Módulo de resistência à flexão de 3 pontos
<i>Resistência mecânica à tração</i>	Módulo de resistência à tração

Fonte: A autora, 2018.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Nos subcapítulos seguintes, estão os detalhes sobre os ensaios realizados, equipamentos utilizados e as dimensões dos corpos ensaiados.

4.4.1 Densidade real

O ensaio de densidade real foi realizado no laboratório CerTec/Iparque. Foi determinado através da picnometria de gás hélio. O equipamento utilizado era da marca Quantachrome, modelo Ultrapyc 1200e.

Para a determinação da densidade real da cerâmica, transformou-se a placa em pó passante em malha 200 mesh. Para isso, utilizou-se um britador de mandíbulas, um moinho de martelos e moinho excêntrico revestido de alta alumina com bolas de alta alumina.

Para a fibra de vidro foi necessário retirar a camada polimérica existente na mesma. Para isso, ateou-se fogo na amostra, que rapidamente consumiu a camada polimérica.

Para a fibra de juta não foram necessários preparos especiais para este ensaio. Já a resina epóxi, devido à dificuldade de torna-la um pó passante em malha 200 mesh, determinou-se a densidade através de empuxo com água. Foi utilizado esse método, considerando que corpos-de-prova de resina, tem porosidade praticamente nula.

4.4.2 Análise térmica

A análise térmica foi realizada na resina epóxi, fibra de vidro e fibra de juta separadamente. A análise térmica consistiu no ensaio de termogravimetria juntamente com análise térmica diferencial, com o objetivo de verificar a perda de massa e os picos endotérmicos e exotérmicos durante a queima dos materiais. A preparação das amostras consistiu na retirada de uma fração dos materiais (fibra de vidro, fibra de juta e epóxi após a cura). O equipamento utilizado é da marca Netzch modelo STA 449F3. O gás utilizado foi o ar sintético com uma taxa de aquecimento de 10°C/min, transcorrendo o ensaio até 1100°C. O cadinho para colocação da amostra era de alumina (Al₂O₃). Optou-se pelo ar sintético, com o objetivo de simular o comportamento dos constituintes do compósito em solitação de exposição ao fogo.

4.4.3 Ensaio de tração

Os ensaios referentes à tração foram conduzidos no laboratório de ensaios mecânicos do IDT/Iparque. Utilizou-se uma máquina universal de ensaios (EMIC) do modelo DL10000, com célula de carga de 100 kN. Devido às dimensões dos corpos de prova, foi necessária a utilização das garras para polímero com capacidade de 500 kgf. Para este ensaio utilizou-se a velocidade de 2 mm/min. A resistência à tração foi calculada de acordo com a fórmula 01.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Onde:

σ = resistência à tração (MPa);

F = força máxima (N);

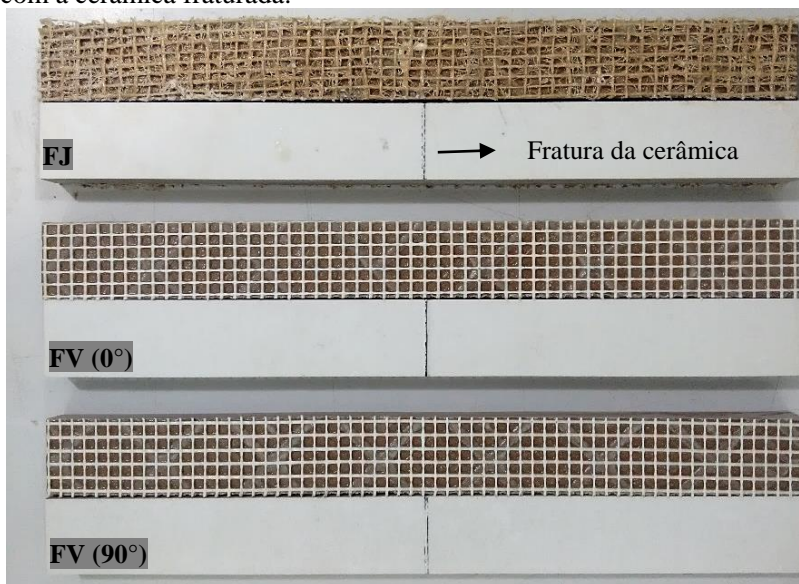
A = área da seção transversal (mm^2).

4.4.3.1 Ensaio de tração da fibra

a) Com peça cerâmica

Para o ensaio de tração da fibra utilizou-se duas metodologias distintas. Baseado no uso da fibra em fachada ventilada foi realizada a tração da fibra aderida à placa cerâmica conforme mostra a figura 26. Para isso foi fraturada a peça cerâmica com auxílio de um cortador de cerâmica manual. Os corpos de prova apresentavam as dimensões de 2,5x25 cm.

Figura 26 – Corpo de prova para o ensaio de tração da fibra com a cerâmica fraturada.



Fonte: A autora, 2018.

Devido ao formato dos corpos de prova e por se tratar de uma cerâmica, foi necessária a colocação de *tabs*, nas extremidades dos corpos (2 cm). Isso foi necessário para evitar o deslizamento da garra durante a execução do ensaio. Para a colocação dos *tabs* utilizou-se a

mesma resina da confecção dos corpos de prova. Entretanto para a fibra de vidro utilizou-se em forma de tecido para melhor aderência. A figura 27 mostra a colocação dos *tabs*.

Figura 27 – Colocação dos *tabs* nos corpos de prova.

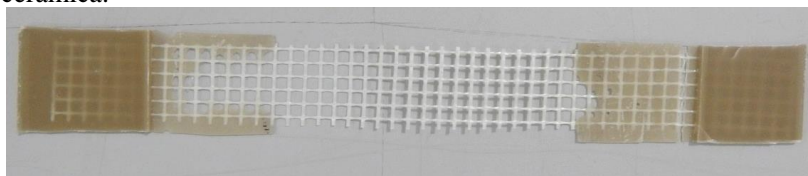


Fonte: A autora, 2018.

b) Sem peça cerâmica

Para o ensaio de tração da fibra sem a peça cerâmica, utilizou-se somente a fibra com *tabs* de resina epóxi. As fibras foram cortadas com as mesmas dimensões e o mesmo número de fios para ambas (2,5x25 cm com 6 fios na direção longitudinal). A figura 28 mostra o corpo já ensaiado.

Figura 28 – Corpo ensaiado no ensaio de tração da fibra sem a cerâmica.



Fonte: A autora, 2018.

4.4.3.2 Ensaio de adesão fibra-matriz

Para este ensaio, a metodologia de confecção dos corpos de prova foi semelhante ao ensaio de tração da fibra com cerâmica, descrita no item 4.4.2.1. As dimensões utilizadas foram de 2,5x25 cm, com a utilização de *tabs* e a cerâmica fraturada. Entretanto, neste caso as fibras que estavam na transversal foram cortadas e os *tabs* foram aplicados sobre a peça cerâmica. Ou seja, as garras da máquina universal de ensaios, não seguravam as fibras. Na figura 29 estão os corpos de prova ensaiados no ensaio de adesão fibra-matriz.

Figura 29 – Corpos de prova ensaiados no ensaio de adesão.



Fonte: A autora, 2018.

4.4.3.3 Ensaio de tração do compósito

Para o ensaio de tração do compósito (resina e fibra), apenas cortou-se a seco, as placas de compósitos fabricadas por *hand lay-up*. Utilizou-se um disco especial para metais. Para esse ensaio, as dimensões dos corpos de prova foram baseadas na norma ASTM D3039/ D3039 M (*Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*) com dimensões de 2,5x25x0,25 cm. Para efeito de cálculo, a área da seção transversal considerou-se somente a espessura do epóxi ensaiado, devido à diferença de espessuras entre as fibras.

4.4.3.4 Ensaio de tração do conjunto compósito

Como descrito no item 4.2.1, os cortes dos conjuntos compósitos foram realizados conforme a necessidade de cada ensaio. Para o ensaio de tração utilizou-se as dimensões de 1,2x25x1,2 cm. A figura 30

mostra os corpos de prova para o ensaio de tração dos conjuntos compósitos.

Figura 30 – Corpos de prova para o ensaio de tração da cerâmica e conjuntos compósitos.



Fonte: A autora, 2018.

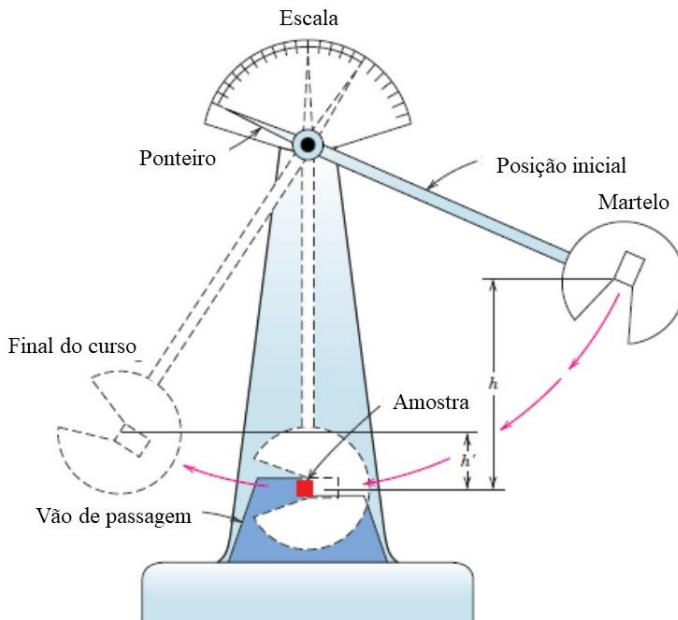
4.4.4 Ensaio de resistência à flexão

Este ensaio foi baseado na norma ISO 10545-4:2014 (*Determination of modulus of rupture and breaking strength*). As dimensões utilizadas foram de 2,5x25 cm. A velocidade de ensaio foi de 1 mm/min.

4.4.5 Ensaio de resistência ao impacto por Charpy

Neste ensaio utilizou-se um martelo de 75 J, porém com algumas ressalvas durante o ensaio. A altura para liberar o martelo foi alterada para que o impacto fosse de 1 J. Devido à espessura do corpo de prova, a distância no vão de passagem do martelo também foi alterada, para evitar que o martelo fosse travado pelo próprio corpo de prova. Com isso, as dimensões dos corpos de prova utilizados foram de 1,2x6,5 cm e o vão fixado em 5,5 cm. Na figura 31 está o esquema do aparato utilizado na resistência ao impacto por Charpy.

Figura 31 – Esquema do aparato para ensaio de resistência ao impacto por Charpy.



Fonte: Callister, 2014.

Para avaliação da energia absorvida somente do compósito, foi realizado um entalhe com disco de corte, para minimizar a contribuição da cerâmica no resultado. O entalhe utilizado tinha profundidade de 10 mm na espessura total da peça de 12 mm. Na figura 32 estão os corpos de prova para a resistência ao impacto por Charpy com e sem entalhe.

Figura 32 – Corpos de prova para resistência ao impacto por Charpy sem entalhe (esquerda) e com entalhe (direita).



Fonte: A autora, 2018.

4.4.6 Ensaio de resistência ao impacto de corpo duro

Este ensaio foi baseado na norma de desempenho vigente no Brasil NBR 15.575-4:2013 (Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE). Entretanto como se quer avaliar somente o comportamento da ruptura da placa cerâmica com diferentes tipos de fibras, não foi analisado o deslocamento ou movimentações do sistema completo da fachada ventilada. Somente analisadas as falhas, fissuras, afundamentos, transpassamentos, delaminações e ruína do sistema (fenômenos ocorridos). Vale salientar que devido à fachada ser ventilada, as ocorrências observadas são mais severas que a aderida. Assim, considerou-se que o desempenho mínimo de segurança é não ocorrer a ruína do sistema nem transpassamento do corpo percussor. A NBR 15.575-4:2013 comenta que não deve haver nem a ruptura da placa cerâmica.

Foram utilizadas as duas esferas previstas na norma (0,5 kg e 1,0 kg), sendo realizados 10 de impactos de cada esfera. Foram analisados os impactos de utilização (3,75 J) e de segurança para fachada (20 J).

O sistema de fixação das placas cerâmicas na fachada ventilada seguiu o projeto padrão de sistema de fixação Shackerley. Na figura 33 está o sistema de fachada ventilada para o ensaio.

Figura 33 – Fachada ventilada para o ensaio de impacto de corpo duro (esquerda) e detalhe do sistema de fixação (direita).



Fonte: A autora, 2018.

4.4.7 Ensaio de impacto com degradação em água

De acordo com Silva (2014), o ensaio de intemperismo acelerado consiste em submeter às amostras em condições de uso de uma fachada. Dessa forma, simulando a ação das intempéries como temperatura e umidade, provocando o envelhecimento da amostra.

Dentre os componentes do conjunto compósito sabe-se que a resina epóxi e a fibra natural, podem apresentar problemas quando expostos a ambientes úmidos. Para a simulação da degradação da resina epóxi, foram submersas amostras em água, para posteriormente, realizar o ensaio de impacto por Charpy ao longo de 90 dias. Com isso foram coletadas amostras após 18, 36, 54, 72 e 90 dias. Também foram submersas amostras para o ensaio de impacto de corpo duro, porém somente foi avaliado ao final dos 90 dias. Vale ressaltar que o tanque com as peças submersas foi colocado em local para evitar gradiente térmico. A água permaneceu em 20 ± 3 °C.

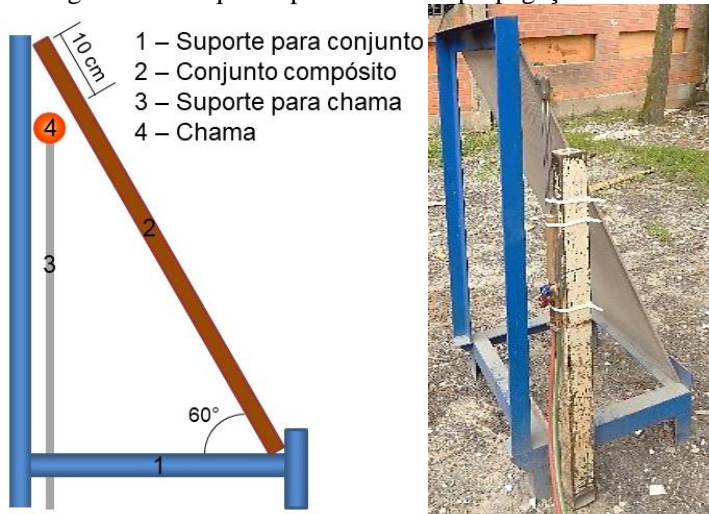
4.4.8 Propagação de chama

O ensaio de propagação de chama foi executado baseado nas normas NBR 9442 (determinação do índice de propagação superficial de

chamas pelo método do painel radiante) e a ASTM E 84 (*Standard test method for surface burning characteristics of building materials*).

O conjunto compósito foi colocado sob uma inclinação de 60° através de um suporte metálico. A chama foi posicionada de forma paralela, a 10 centímetros da borda da placa e 2 centímetros de distância da amostra. Para fazer a chama, utilizou-se um maçarico na proporção de 50% de gás oxigênio e 50% de gás acetileno. Na figura 34 está uma representação do esquema utilizado no ensaio de propagação de chama.

Figura 34 – Esquema para ensaio de propagação de chama.



Fonte: A autora, 2018.

Durante a execução foi observada a presença ou não de alguns fenômenos como: gotejamento do material em chamas, desprendimento do material, flacidez, delaminação, contração, fratura e formação de cinzas. Também foi determinado o tempo para ignição, a temperatura máxima alcançada, avanço da chama e a coloração da fumaça desenvolvida. Para a medição de temperatura foi utilizado um pirômetro óptico marca Minipa modelo MT-350.

4.4.9 Absorção de água

O ensaio de absorção de água consistiu em colocar amostras de compósito e das telas de fibra imersas em água em temperatura

ambiente. Foi avaliada a evolução de absorção de água ao longo do tempo. As amostras foram previamente secas em estufa à temperatura de 40°C até peso constante.

4.4.10 Arrancamento das fixações

Este ensaio consiste em medir a força de arrancamento das âncoras utilizadas para a fixação da placa cerâmica, baseado na norma BS 7883: 2005. Para efetuar a fixação das placas cerâmicas na fachada ventilada, dependendo do sistema, há a necessidade de efetuar furações nas placas. Nesses furos são acopladas âncoras expansíveis, que auxiliam na fixação na estrutura metálica portante. A figura 35 mostra a âncora inserida na placa após furação e o dano causado à placa, após o ensaio de arrancamento.

Figura 35 – Placa com âncora fixada (esquerda) e furo após arrancamento (direita).



Fonte: A autora, 2018.

Para medir a força máxima para efetuar o arrancamento da âncora, foi utilizado o equipamento *pull out* da marca Hydrajaws modelo M2000. Com peça auxiliar para efetuar o acoplamento ao equipamento, utilizou-se a peça M6. A figura 36 mostra o equipamento pronto para realizar o ensaio.

Figura 36 – Sistema de medição para arrancamento das âncoras.



Fonte: A autora, 2018.

Para calcular a força de arrancamento é utilizada a fórmula 02, baseada na recomendação da CWCT (*Centre for window and cladding technology*).

$$\text{Resultado Indicativo (kN)} = e^{\ln(\bar{x}) - \ln(\sigma) \times F} \quad (2)$$

Onde:

\bar{x} = logaritmo natural da média da amostra;
 σ = logaritmo natural do desvio padrão da amostra;
 F = fator de Fracktile.

Para conhecer a força mínima de segurança de arrancamento, é utilizada a fórmula 03. Este valor é baseado em dados do Reino Unido e da CWCT.

$$\text{Força Mínima (kN)} = \frac{C \times S \times A}{n} \quad (3)$$

Onde:

C (kN/m²) = carga máxima de vento no Reino Unido (2,40);

S = fator de segurança de acordo com a CWCT (3);



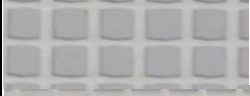






A (m²) = área máxima de uma placa cerâmica (0,697);


n = número de âncoras na placa (4).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo constam os resultados dos ensaios mencionados no item 4.4 do procedimento experimental. Juntamente estão às explanações sobre os resultados, baseados quando possível, na literatura científica. Para melhor compreensão dos gráficos, foram utilizados acrônimos para representar cada tipologia de amostra. Na tabela 15 constam os acrônimos utilizados, os significados e uma ilustração do significado.

Tabela 15 – Significado dos acrônimos utilizados.

Acrônimo	Significado	Forma
Cer	Placa cerâmica	
E	Resina epóxi	
FV (90°)	Tela de fibra de vidro com fio de maior largura a 90°	
FV (0°)	Tela de fibra de vidro com fio de maior largura a 0°	
FJ	Tela de fibra de juta	
Cer+E	Placa cerâmica com aplicação de resina epóxi na face posterior	
ERFV	Resina epóxi reforçada com fibra de vidro (compósito)	
ERFJ	Resina epóxi reforçada com fibra de juta (compósito)	
Cer+ERFV	Cerâmica com aplicação de resina epóxi e fibra de vidro na face posterior (conjunto compósito)	

Acrônimo	Significado	Forma
Cer+ERFJ	Cerâmica com aplicação de resina epóxi e fibra de juta na face posterior (conjunto compósito)	

Fonte: A autora, 2018.

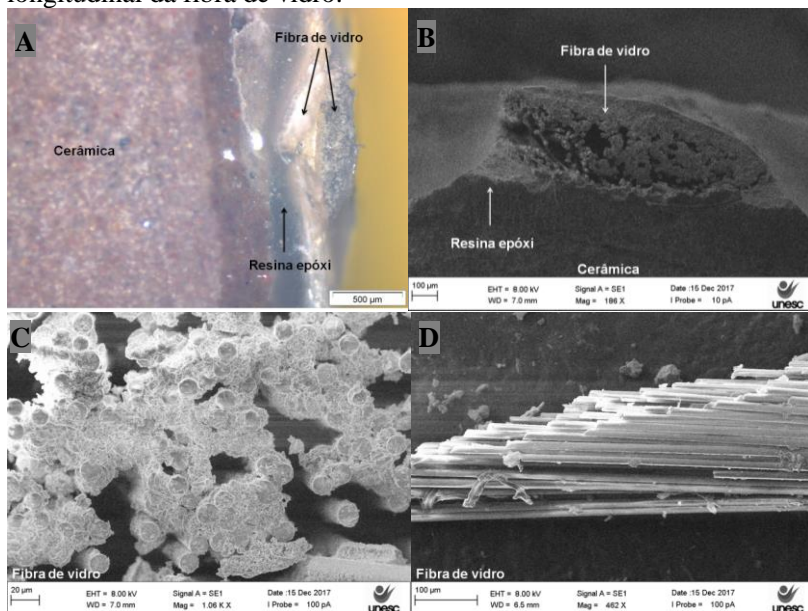
5.1 CARACTERÍSTICAS INDIVIDUAIS

Nos subcapítulos seguintes (5.1.1, 5.1.2, 5.1.3, 5.1.4 e 5.1.5) constam os resultados individuais referentes aos componentes do conjunto compósito. O subcapítulo 5.1.6 refere-se a comentários gerais da caracterização individual.

5.1.1 Análise microestrutural

A figura 37 mostra detalhes da microestrutura do conjunto compósito de fibra de vidro, especialmente a estrutura da fibra de vidro. É possível observar na figura A e B, a fina camada de epóxi (em torno de 400 μm) que é influenciada pela espessura da fibra. Nas figuras C e D mostram o corte transversal e longitudinal da fibra de vidro respectivamente, sendo possível verificar a homogeneidade no diâmetro dos fios que compõem a fibra.

Figura 37 – Microscopia óptica e eletrônica por varredura do conjunto compósito de fibra de vidro. (A), (B) corte transversal do conjunto compósito, (C) corte transversal da fibra de vidro e (D) corte longitudinal da fibra de vidro.

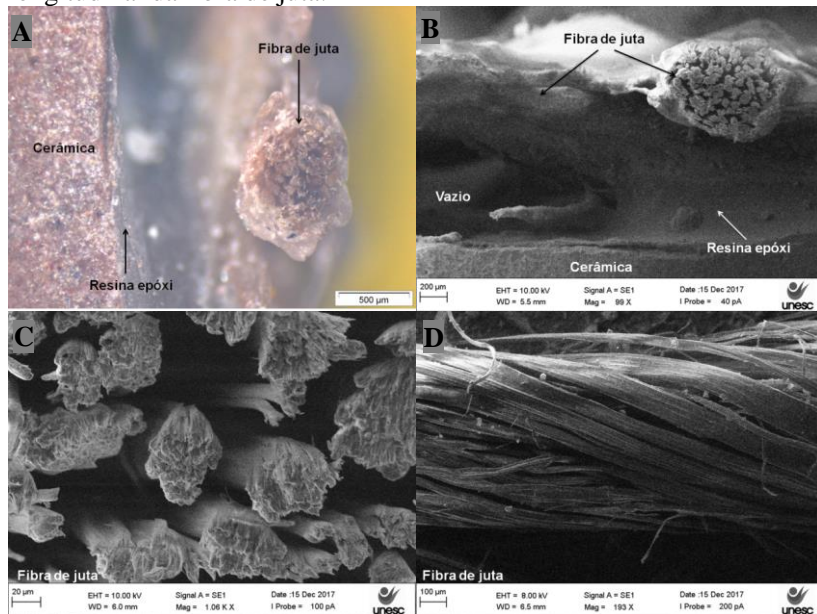


Fonte: A autora, 2018 e Certec, 2017.

A figura 38 mostra detalhes da microestrutura do conjunto compósito de fibra de juta. É possível observar na figura A e B, a camada de epóxi (em torno de 800 μm) que neste caso é maior que o conjunto de fibra de vidro. Vale salientar que a resina epóxi contorna a fibra, não havendo o preenchimento total da trama. Devido a maior espessura da fibra de juta, a espessura do conjunto compósito consequentemente foi maior. Na figura B é possível observar um vazio formado no conjunto devido à irregularidade da fibra natural.

Na figura C e D mostra o corte transversal e longitudinal da fibra de juta. Apesar da fibra de juta ser natural, esta apresenta homogeneidade no diâmetro dos fios que compõem a fibra. Entretanto em comprimentos maiores existe variação da espessura da fibra, pois o fio de juta não é contínuo (como ocorre na fibra de vidro).

Figura 38 – Microscopia óptica e eletrônica por varredura do conjunto compósito de fibra de juta. (A), (B) corte transversal do conjunto compósito, (C) corte transversal da fibra de juta e (D) corte longitudinal da fibra de juta.



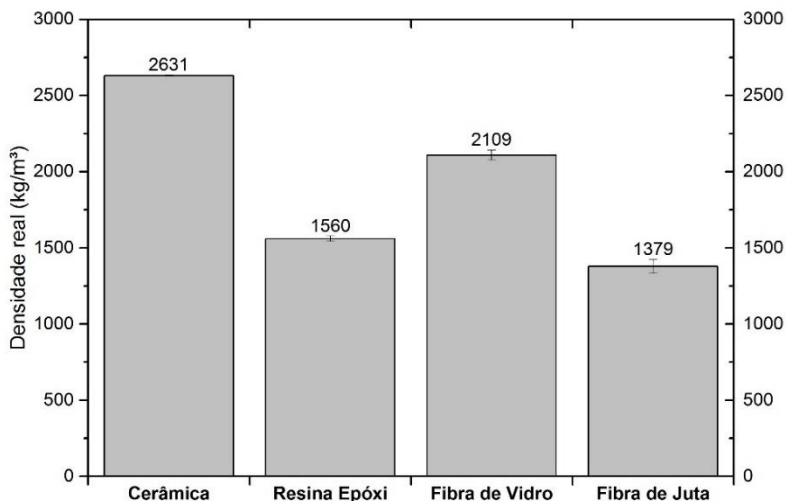
Fonte: A autora, 2018 e Certec, 2017.

5.1.2 Densidade real

A figura 39 apresenta a densidade real dos materiais utilizados neste trabalho, através da picnometria de gás hélio.

Para a fibra de vidro, a densidade relatada pela literatura é de em torno de 2500 kg/m^3 (WAMBUA, 2003; KU, 2011; PICKERING, 2016). O resultado encontrado da tela de fibra de vidro foi de 2109 kg/m^3 (sem a camada polimérica).

Figura 39 – Densidade dos materiais utilizados.



Fonte: A autora, 2018.

A densidade obtida para a fibra de juta foi de 1379 kg/m³, valor próximo relatado pela literatura que é em torno de 1300 – 1450 kg/m³ (WAMBUA, 2003; ZAH, 2004; SATYANARAYANA, 2007; KU, 2011; HO, 2012; RAMESH, 2013; PICKERING, 2016; VAISANEN, 2017).

A densidade real da cerâmica obtida foi de 2631 kg/m³. Valor superior à densidade aparente encontrada que foi de 2280 kg/m³. Apesar da cerâmica utilizada neste estudo se tratar de um porcelanato esmaltado, esse ainda contém porosidade aberta (devido absorção de água <0,50%) e fechada (porosidade total de 13,19%).

O valor de densidade para a resina epóxi varia conforme a quantidade e o tipo de carga mineral que pode ser utilizada. No presente trabalho, a resina epóxi empregada continha carga mineral. De acordo com a análise termogravimétrica, descrita no capítulo a seguir (5.1.3.1), o percentual de carga mineral é de 46,04% e pela difração de raios-x que consta no anexo A, a carga mineral é composta de quartzo e sanderita.

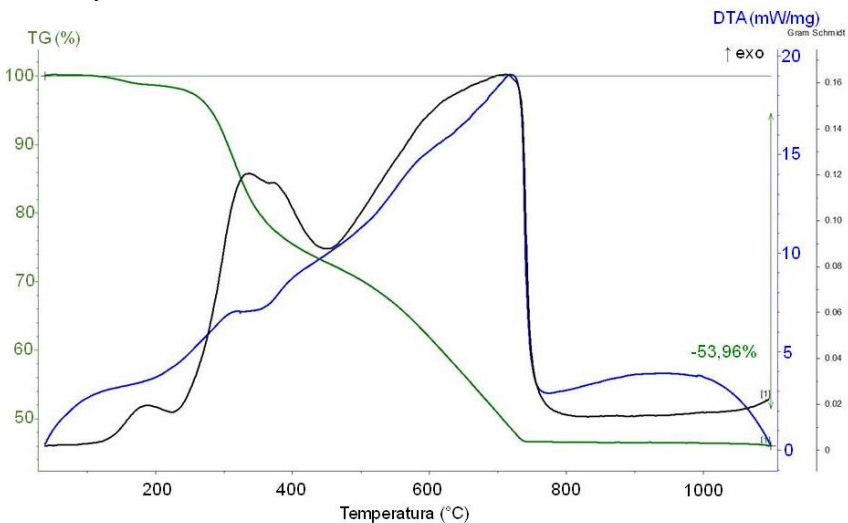
5.1.3 Análise térmica

Nos subcapítulos a seguir (5.1.3.1, 5.1.3.2 e 5.1.3.3) estão os resultados referentes à análise térmica realizada nos constituintes individualmente que consiste na análise termogravimétrica e térmica diferencial.

5.1.3.1 Análise térmica da resina epóxi

Na figura 40 consta a análise termogravimétrica e térmica diferencial da resina epóxi. É possível verificar que a perda de massa total da resina epóxi é de 53,96% ocorrendo entre 240°C até 736°C. Há três eventos exotérmicos localizados a 188°C, 334°C e 714°C.

Figura 40 – Análise termogravimétrica e térmica diferencial da resina epóxi.



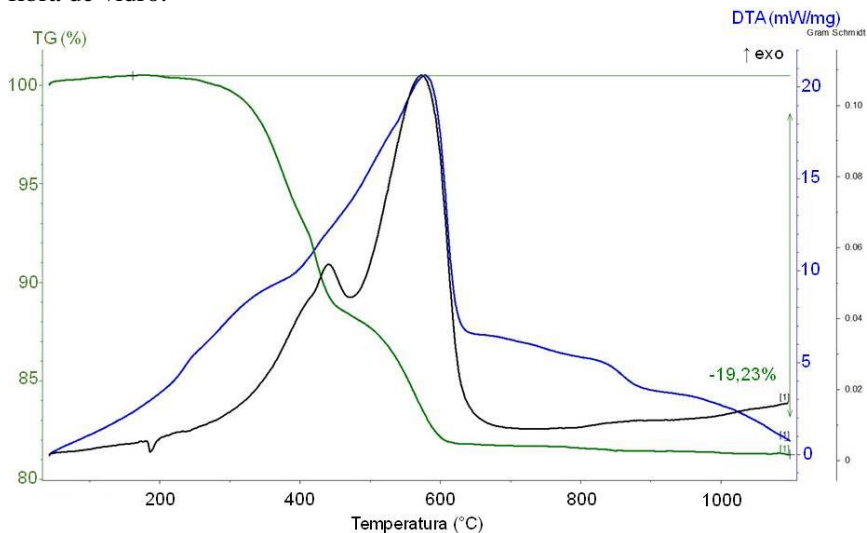
Fonte: LabValora, 2017.

De acordo com Abdellaoui (2017), matrizes termorrígidas podem conter cargas minerais, com o objetivo de redução de custo podendo melhorar propriedades térmicas e mecânicas do compósito final. A resina epóxi deste estudo foi fornecida com carga mineral. Assim, a massa residual da análise termogravimétrica é referente, principalmente, de carga.

5.1.3.2 Análise térmica da fibra de vidro

Na figura 41 consta a análise termogravimétrica e térmica diferencial da fibra de vidro. A perda de massa total da fibra é de 19,23%, ocorrendo de 327 °C até 590 °C. Há três eventos, sendo um endotérmico e dois exotérmicos. O evento endotérmico ocorre a 173 °C e os exotérmicos a 441 °C e 590 °C.

Figura 41 – Análise termogravimétrica e térmica diferencial da fibra de vidro.



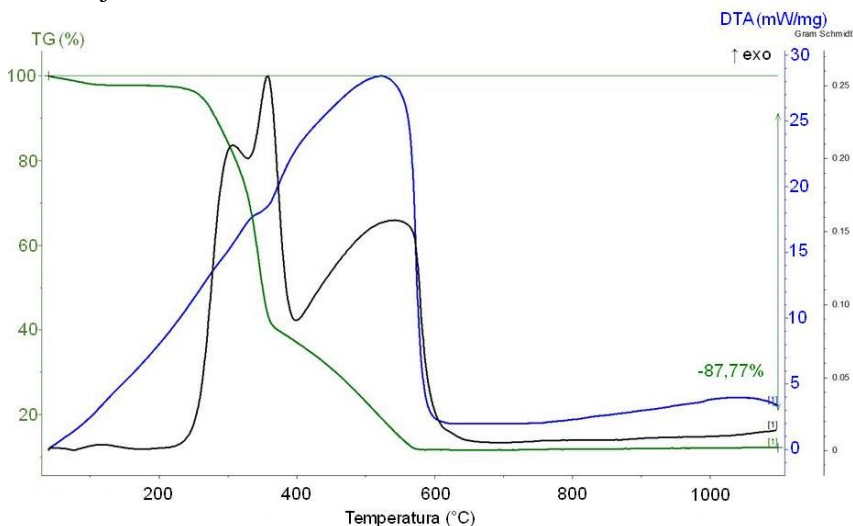
Fonte: LabValora, 2017.

De acordo com Neto (2006), após o processo de fiação das fibras de vidro, estas são recobertas com um material de encimagem. Geralmente são organossilanos que tem como objetivo promover adesão química entre a matriz polimérica e a superfície da fibra. Entretanto a fibra utilizada apresenta um tratamento alcalino (em torno de 18%), indicado para ambientes que necessitam resistência à corrosão proveniente de alcalinidade, como por exemplo, o cimento. Este tipo de recobrimento contém ZrO_2 e Na_2O . Dessa forma, a perda de massa resultante da análise termogravimétrica, corresponde principalmente, à saída do recobrimento da fibra.

5.1.3.3 Análise térmica da fibra de juta

De acordo com Vaisanen (2017), as propriedades térmicas de um compósito de fibra natural, dependem principalmente das características das fibras naturais. Porém também sofrem interferência do polímero da matriz e das interações entre esses. Na figura 42 consta a análise termogravimétrica e térmica diferencial da fibra de juta *in natura*.

Figura 42 – Análise termogravimétrica e térmica diferencial da fibra de juta.



Fonte: LabValora, 2017.

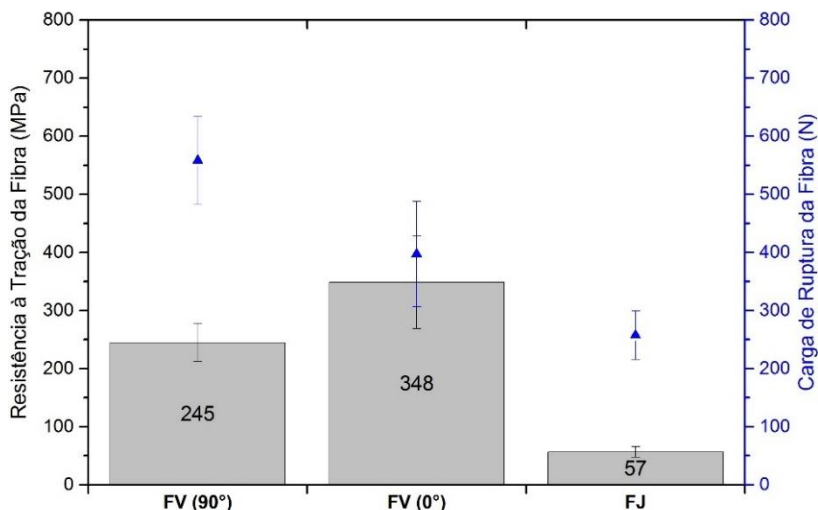
De acordo com a figura 42, a perda de massa total da fibra de juta é de 87,77%, ocorrendo de 274°C até 580°C. Há três eventos exotérmicos que ocorrem a 309 °C, 361 °C e 574 °C, respectivamente. De acordo com Vaisanen (2017), a degradação térmica das fibras naturais começa aproximadamente a 200 °C, valor próximo encontrado na análise termogravimétrica da fibra de juta.

Por se tratar de uma fibra natural, a massa residual foi muito menor em que comparação à resina epóxi e à fibra de vidro, devido à própria natureza da fibra.

5.1.4 Resistência à tração da fibra

A figura 43 mostra a resistência à tração da fibra de acordo com a metodologia 4.4.3.1 descrita no procedimento experimental. Neste procedimento a fibra estava aderida à peça cerâmica através da resina epóxi.

Figura 43 – Resistência à tração da fibra (aderida em cerâmica).



Fonte: A autora, 2018.

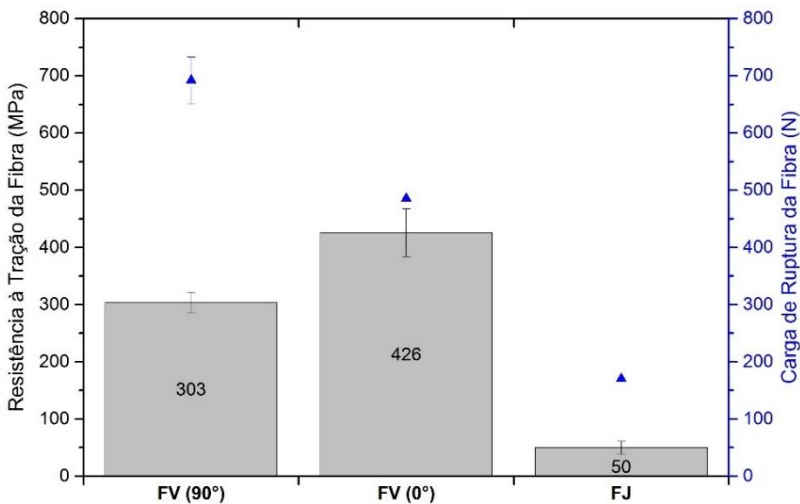
De acordo com a figura 43 verifica-se que a maior resistência à tração encontrada é com a fibra de vidro na orientação a 0° (posição do fio de maior largura). Este fenômeno é inerente à trama da fibra que possui dois fios diferentes. Nessa configuração a 0°, o fio que está a 90° é entrelaçado ao fio de maior largura que está a 0°. Essa configuração oferece maior resistência à tração devido ao travamento da fibra. Já a fibra de juta apresentou uma resistência 83% menor que a configuração da fibra de vidro a 0°.

Em relação à carga de ruptura, o maior valor obtido foi com a configuração de 90°. Neste caso, os fios de maior largura estão alinhados a 90° e assim obtendo maiores valores de carga na tração. A fibra de juta apresentou a carga de ruptura 54% menor que a configuração da fibra de vidro a 90°.

O ensaio de tração da fibra utilizando a cerâmica apresentou uma grande variabilidade dos resultados. Isso ocorreu, pois há interferência da matriz epóxi e da peça cerâmica. Com isso, encontrou-se outra forma de avaliar a resistência da fibra, excluindo as variáveis citadas.

A figura 44 mostra os resultados obtidos da resistência à tração da fibra de acordo com a metodologia descrita no item 4.4.3.1 parte b do procedimento experimental. Neste ensaio, a fibra ensaiada estava presa às garras do equipamento de ensaio através de *tabs* de resina epóxi.

Figura 44 – Resistência à tração da fibra (sem cerâmica).



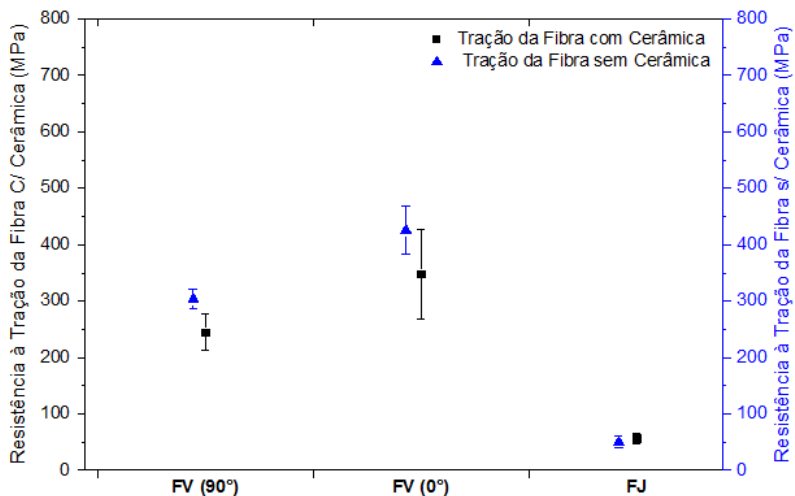
Fonte: A autora, 2018.

De acordo com a figura 44, o comportamento de resistência encontrado utilizando esta metodologia foi semelhante com a anterior. Entretanto verifica-se que a variabilidade dos resultados diminuiu consideravelmente. Novamente a configuração da fibra a 0° é a que apresenta maior resistência à tração. A fibra de juta apresentou resistência à tração 88% menor que a fibra de vidro a 0°. E em relação à carga de ruptura da fibra, a fibra de juta apresentou o resultado 75% menor que a configuração da fibra de vidro a 90°.

A figura 45 apresenta a comparação entre as metodologias avaliadas para mensurar a resistência à tração da fibra. Verifica-se que o melhor método a ser utilizado é a avaliação somente da fibra, excluindo

a peça cerâmica desse ensaio, apesar da aplicação final da fibra ser sobre uma placa cerâmica. Assim, é possível encontrar valores com menor variabilidade.

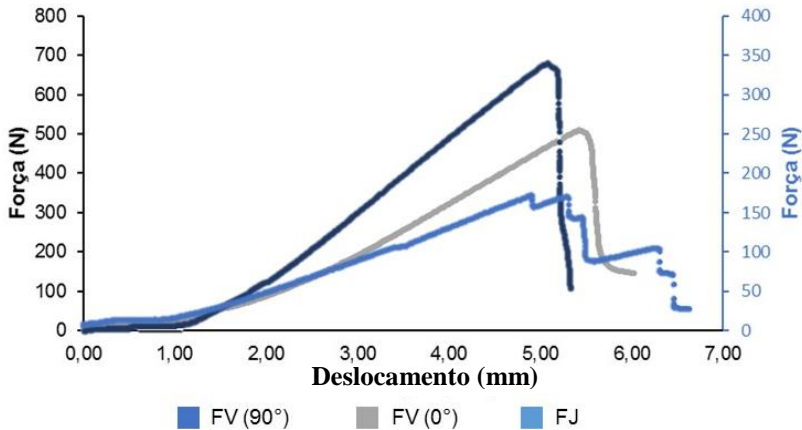
Figura 45 – Comparação dos métodos de medição da tração da fibra (com e sem cerâmica).



Fonte: A autora, 2018.

Apesar da fibra de juta apresentar a resistência à tração muito menor que a fibra de vidro, o comportamento durante o ensaio de tração é peculiar. Na figura 46 está a comparação do comportamento das fibras durante o ensaio.

Figura 46 – Comparação do comportamento mecânico das fibras sob tração.



Fonte: A autora, 2018.

De acordo com a figura 46, é possível observar que o rompimento da fibra de vidro, independente da orientação, é abrupto. Enquanto o rompimento da fibra de juta ocorre gradualmente, até o rompimento total. Esse comportamento, pode ser avaliado como ponto positivo para aplicação em compósitos. Assim, a fibra de juta apresenta sinais do início do rompimento, podendo ser realizadas intervenções ou a troca da placa cerâmica. Também é possível observar que até ocorrer a força máxima, a deformação ocorrida é muito semelhante entre a fibra de vidro e a fibra de juta.

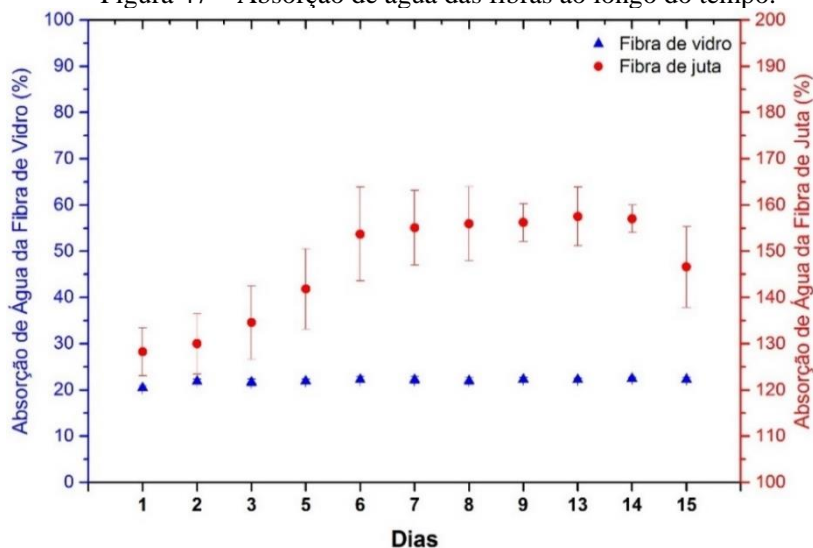
Bensadoun (2017) e Ramesh (2017) afirmam que os defeitos criados no crescimento e processamento da fibra natural são heterogeneamente distribuídos ao longo do comprimento, podendo interferir na resistência mecânica e resistência à ruptura, explicando o comportamento observado.

5.1.5 Absorção de água das fibras

Na figura 47 está o resultado de absorção de água das fibras ao longo de 15 dias (360 horas). A tela de fibra de juta apresenta absorção de água de 128% enquanto a tela de fibra de vidro apresenta 20,4% de absorção (6 vezes menor) após 24 horas. Ramesh (2017) afirma que as fibras naturais apresentam absorção de água maior que as fibras sintéticas, devido ao alto teor de celulose, que é hidrofílica.

A fibra de juta alcança o equilíbrio da absorção de água no 6º dia, enquanto a fibra de vidro apresenta valores constantes de absorção de água ao longo do tempo. Ferreira (2016b) observou valores superiores a 250% de absorção de água para a fibra de juta. A partir do 14º observou-se uma ligeira diminuição da absorção de água da fibra de juta.

Figura 47 – Absorção de água das fibras ao longo do tempo.



Fonte: A autora, 2018.

5.1.6 Comentários sobre as características individuais

Para as características individuais dos componentes, vale ressaltar os seguintes aspectos:

- A massa residual da resina epóxi, resultante da análise termogravimétrica é referente à carga mineral utilizada;
- A perda de massa da fibra de vidro nesta mesma análise é referente principalmente à camada polimérica aplicada sobre a fibra;
- Dos materiais ensaiados na análise termogravimétrica, a fibra de juta apresentou a maior perda de massa, devido à origem da fibra. Essa característica pode comprometer a solicitação do conjunto compósito em uma solicitação ao fogo;

- Apesar da aplicação das fibras serem em um conjunto compósito, a melhor forma de avaliar a resistência à tração dessas, é ensaiando somente a fibra com *tabs* de resina epóxi. Assim excluindo qualquer interferência da placa cerâmica;
- A fibra de vidro apresenta maior carga de ruptura na orientação de 90° (onde o fio de maior largura está na direção longitudinal). Porém a maior resistência à tração é obtida na orientação de 0° ;
- Apesar da fibra de juta apresentar a resistência à tração 88% menor que a fibra de vidro, o comportamento durante o ensaio, mostra que a fibra de juta tem o rompimento das fibras de forma gradual. Essa é uma característica importante para aplicação em compósitos;
- A absorção de água da tela de fibra de juta é 6 vezes maior em relação à tela de fibra de vidro. Essa é uma característica que pode comprometer o desempenho mecânico da fibra quando inserida em uma matriz polimérica, devido ao inchamento da fibra.

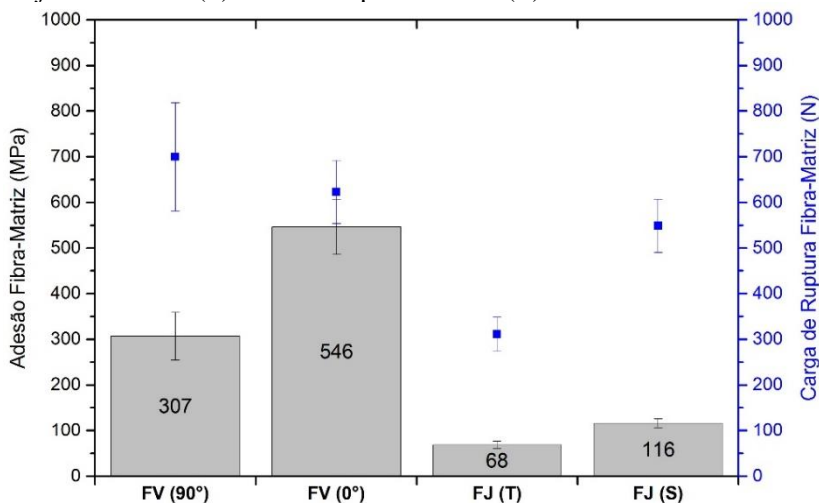
5.2 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DAS CONFIGURAÇÕES

Nos subcapítulos seguintes consta toda a caracterização mecânica (tração, flexão, adesão e impacto por Charpy), dos sistemas binários e dos conjuntos compósitos. Ao final desta seção estão os comentários gerais.

5.2.1 Resistência à adesão por tração fibra-matriz (adesão fibra-matriz)

A figura 48 apresenta a adesão da fibra na matriz polimérica. Este ensaio, também foi realizado com a fibra de juta sem a camada de compatibilizante (S) para comparar com a adesão da fibra de juta utilizada nesse estudo (T).

Figura 48 – Resistência à tração da fibra-matriz para verificar a adesão da fibra de vidro (FV) nas duas orientações (90° e 0°) e da fibra de juta *in natura* (S) e com compatibilizante (T).



Fonte: A autora, 2018.

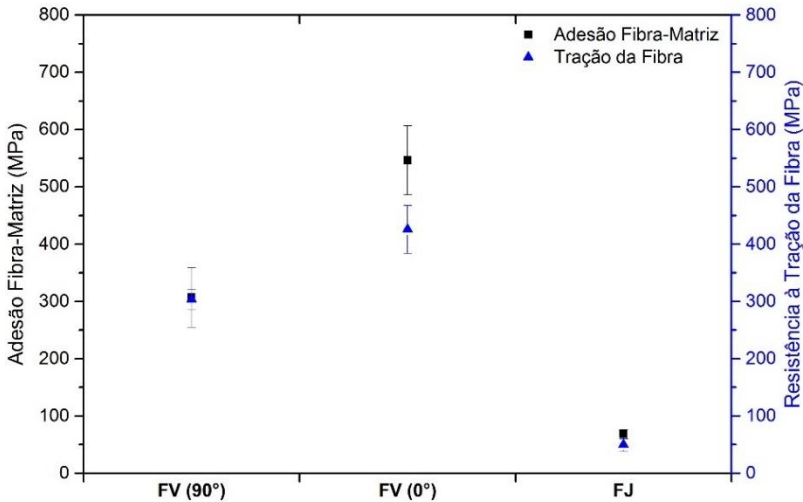
Os resultados obtidos de adesão fibra-matriz apresentam um comportamento muito semelhante ao de resistência à tração da fibra. Em todos os corpos ensaiados, durante o ensaio de resistência à tração fibra-matriz, não houve o desprendimento da fibra da matriz polimérica, mas o rompimento da fibra na região onde a cerâmica estava fraturada. Dessa forma, a adesão da fibra na matriz é maior que a própria resistência das fibras analisadas. De acordo com Neto (2006), para o caso da fibra de vidro, a adesão ocorre por interdifusão e por formação de ligações químicas interpenetrantes na região da interface.

A fibra de juta foi compatibilizada com um plastificante antes do processamento do conjunto compósito. Essa compatibilização ocorreu para melhorar a adesão da fibra natural com a matriz polimérica. Entretanto, pode-se observar na figura 48 que a compatibilização reduziu a adesão entre fibra-matriz. A camada polimérica utilizada se tornou um bloqueio mecânico para a formação da interface. No caso da fibra *in natura*, a adesão fibra-matriz, é explicada pela adesão mecânica, devido à rugosidade superficial da fibra.

Porém, como não houve o desprendimento da fibra da matriz, considera-se que a compatibilização ocorreu de forma satisfatória, já que a adesão é maior que a resistência da própria fibra. Na figura 49 está

a comparação dos resultados obtidos da resistência à tração da fibra (sem a cerâmica aderida) e da adesão fibra-matriz.

Figura 49 – Comparação entre a resistência à tração da fibra (sem cerâmica) versus tração fibra-matriz.



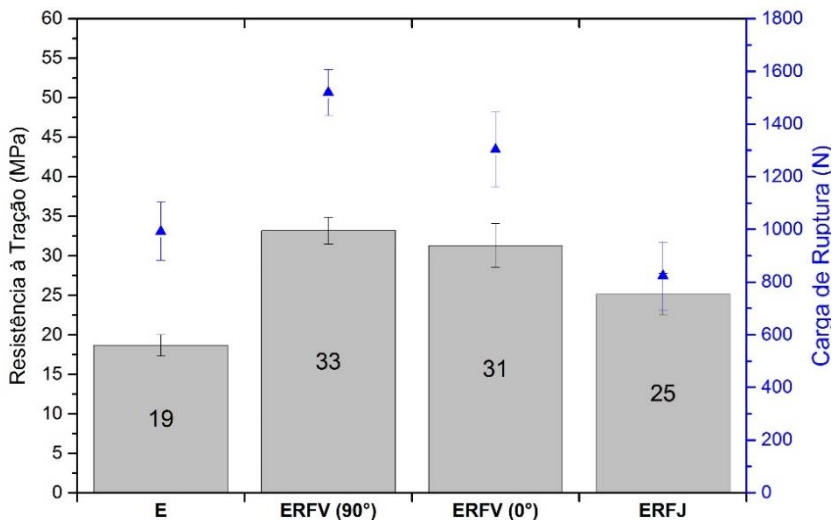
Fonte: A autora, 2018.

Nesta comparação é possível observar os resultados muito similares entre a adesão fibra-matriz e a resistência à tração da fibra. A direção 0° da fibra de vidro apresentou um acréscimo de 22% de resistência à adesão em relação à tração da fibra. Esse acréscimo pode estar associado às diferenças de execução entre os ensaios. O ensaio de tração da fibra foi executado com a fibra bidirecional (apenas com a mudança na orientação) enquanto no ensaio de adesão fibra-matriz, as fibras que estavam na transversal foram cortadas. Dessa forma, no ensaio de tração da fibra, as fibras que estavam na transversal podem ter interferido no resultado final, já que a tela de fibra de vidro bidirecional é entrelaçada.

5.2.2 Resistência à tração do compósito

A figura 50 apresenta a resistência à tração do compósito (resina e fibra), conforme metodologia descrita no item 4.4.3.3 do procedimento experimental.

Figura 50 – Resistência à tração do compósito (resina e fibra).



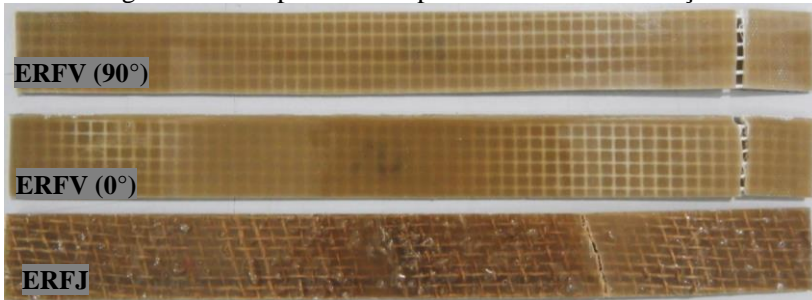
Fonte: A autora, 2018.

De acordo com a figura 50, a resistência à tração da resina epóxi é incrementada com a inserção das fibras. Esta é aumentada em até 77% no caso das fibras de vidro. Já a inserção da fibra de juta na matriz epóxi, resulta em um incremento na resistência à tração de 35%. Dessa forma, em todos os casos houve a transferência de carga da matriz para a fibra, devido a uma boa interface fibra-matriz. Esses resultados corroboram com a adesão fibra-matriz, já que a adesão encontrada é maior que a própria resistência da fibra.

Em relação à carga de ruptura dos compósitos, verifica-se que a maior carga encontrada é na configuração de 90° para a fibra de vidro, coincidindo com a maior resistência à tração. Entretanto, a menor carga é encontrada para o epóxi reforçado com fibra de juta (ERFJ). Devido à espessura da fibra de juta ser muito diferente em relação à fibra de vidro (duas vezes maior), a espessura do epóxi ensaiado nesses corpos se

torna menor, resultando em uma menor carga de ruptura. Na figura 51 estão os corpos ensaiados no ensaio de tração.

Figura 51 – Corpos dos compósitos ensaiados na tração.



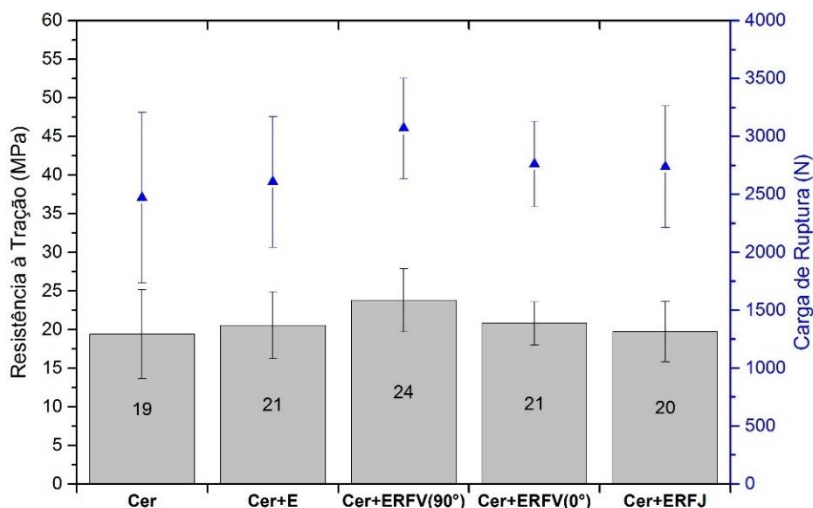
Fonte: A autora, 2018.

Na figura 51 pode-se verificar a forma que ocorreu a ruptura da matriz epóxi e dos compósitos. A matriz epóxi rompe de forma aleatória (sem padrão de local da ruptura), apresentando os corpos curvados após o ensaio, como possível forma de alívio de tensão residual. Já os materiais compósitos, romperam de forma paralela à fibra. Bensadoun (2017) afirma que este tipo de ruptura também é encontrado em impacto de baixa velocidade, onde ocorre a perfuração total da amostra. De acordo com a figura 51, pode-se observar que a fratura que ocorreu no ensaio de tração do compósito é do tipo translaminar do modo I, ocorrendo de forma frágil com arrancamento dos filamentos.

5.2.3 Resistência à tração do conjunto compósito

Na figura 52 constam os resultados obtidos da resistência à tração do conjunto compósito (resina, fibra e cerâmica).

Figura 52 – Resistência à tração do conjunto composto (resina, fibra e cerâmica).

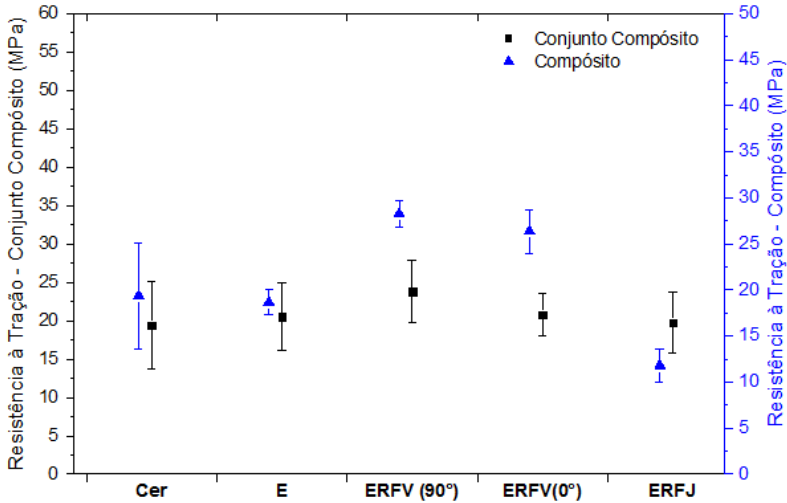


Fonte: A autora, 2018.

Através da figura 52 pode-se observar que não há incremento na resistência à tração do conjunto composto. As variabilidades dos resultados obtidos são devido à fratura da cerâmica. Callister (2014) comenta que devido à fratura frágil da cerâmica, há uma variabilidade dos resultados. Isso é explicado devido à probabilidade da existência de uma falha que seja capaz de iniciar uma fissura.

Na figura 53 está a comparação da resistência à tração do compósito (resina e fibra) e do conjunto composto (resina, fibra e cerâmica).

Figura 53 – Comparação da resistência à tração do compósito (resina e fibra) e conjunto compósito (resina, fibra e cerâmica).



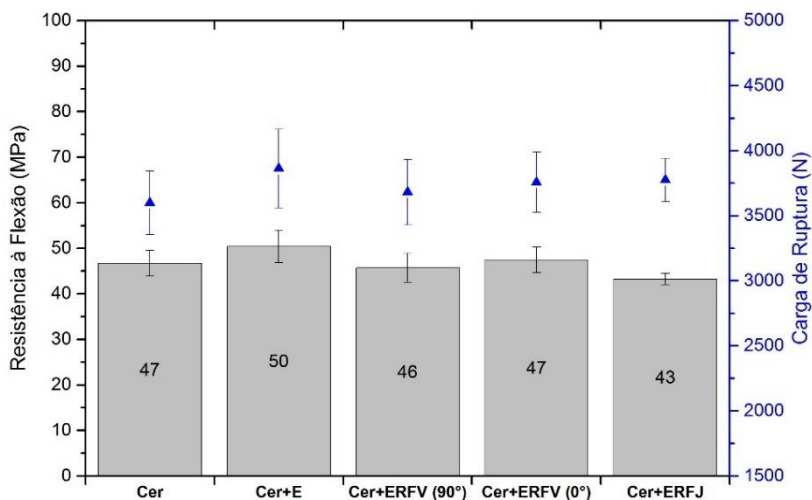
Fonte: A autora, 2018.

Na figura 53 fica evidenciado que analisar a tração do conjunto compósito mascara o desempenho do compósito (resina e fibra). Dessa forma, para analisar a fibra e resina em sistemas de fachada ventilada, deve-se analisar somente o compósito.

5.2.4 Resistência à flexão do conjunto compósito

A figura 54 apresenta a resistência à flexão e a carga de ruptura do conjunto compósito. Neste ensaio, nota-se que não houve incremento da resistência mecânica à flexão nem da carga de ruptura, mesmo com a fibra de vidro aderida à cerâmica através da resina epóxi.

Figura 54 – Resistência à flexão do conjunto composto (resina, fibra e cerâmica).



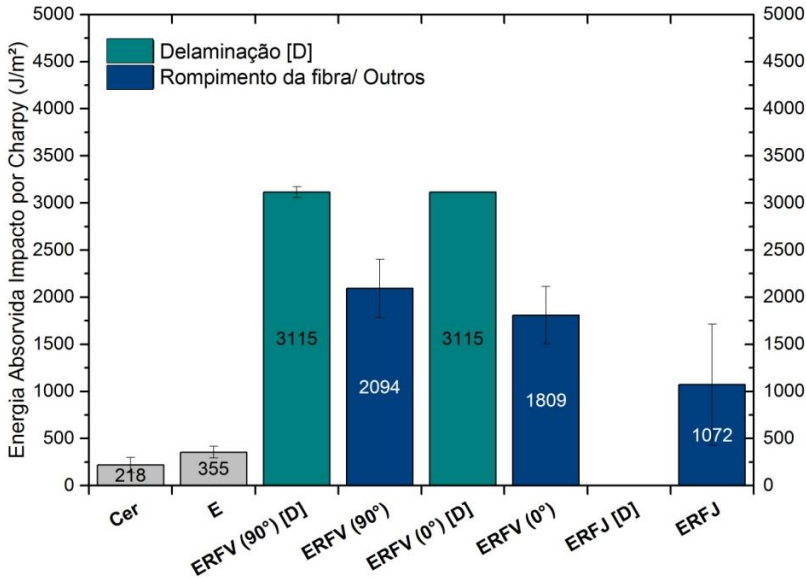
Fonte: A autora, 2018.

Apesar da norma UNI 11018:2003 recomendar a avaliação da resistência à flexão da placa cerâmica, este ensaio não apresenta interferência da fibra. Vale ressaltar que isso, ocorre devido a alta espessura da placa cerâmica utilizada (12 mm), que é muito maior em comparação a espessura da fibra de vidro (0,30 mm), fibra de juta (0,8 mm) e a espessura do epóxi. Entretanto, quando se utiliza porcelanatos de baixa espessura (3 mm), a fibra possui interferência nesse resultado.

5.2.5 Resistência ao impacto do composto (com entalhe)

A figura 55 apresenta a energia absorvida no ensaio de impacto por Charpy do composto. A metodologia para a confecção dos corpos ensaiados está descrita no item 4.4.5 no procedimento experimental.

Figura 55 – Resistência ao impacto por Charpy do compósito (resina e fibra – com entalhe).



Fonte: A autora, 2018.

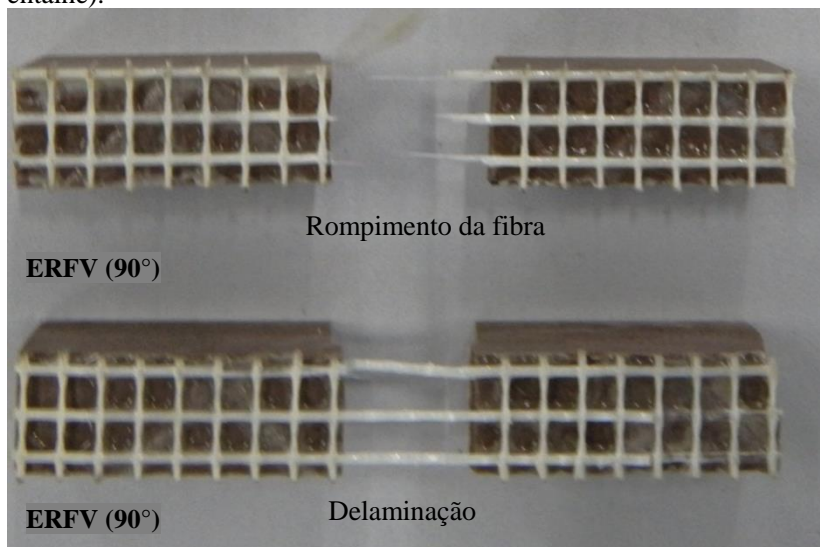
Observa-se que a cerâmica e a resina epóxi, absorvem pouca energia durante o impacto, devido à natureza frágil desses materiais. O epóxi reforçado com fibra de vidro (ERFV 90°) apresenta a maior absorção de energia.

A variabilidade dos dados apresentados para a fibra de vidro depende da delaminação ocorrida no material. A energia absorvida é maior, quando há delaminação do sistema. Quando ocorre a ruptura da fibra tem-se uma menor absorção de energia. Isso ocorre devido à própria dinâmica do ensaio. À medida que o martelo realiza o percurso, quando a fibra não rompe (delamina), o corpo ensaiado ainda está freando o avanço do martelo, resultando em uma maior absorção de energia durante o impacto. Quando a fibra rompe, o martelo desacelera no momento do impacto, porém, não há mais nenhuma barreira para freá-lo, absorvendo menos energia.

Bensadoun (2017) afirma que compósitos de matriz epóxi quando submetidos ao impacto, tendem a falhar através de uma delaminação extensa devido à sua baixa resistência ao crescimento da fenda interlaminar. Este fenômeno foi observado na resistência ao impacto.

Já para a fibra de juta, não foi observada a ocorrência de delaminações. Em todas as situações, a fibra rompe. A variabilidade dos dados, neste caso, pode ser inerente à própria origem natural da fibra. A figura 56 mostra os corpos de prova fraturados nesse ensaio.

Figura 56 – Corpos ensaiados para impacto por Charpy (com entalhe).



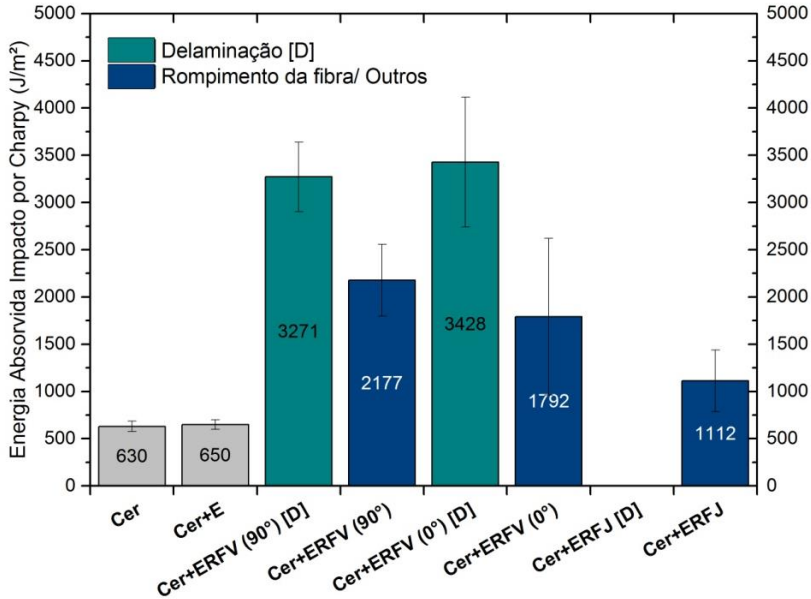
Fonte: A autora, 2018.

De acordo a figura 56, pode-se observar que a fratura no ensaio de Charpy do conjunto compósito, ocorre de forma interlaminar de modo II.

5.2.6 Resistência ao impacto do conjunto compósito (sem entalhe)

A figura 57 apresenta a energia absorvida no ensaio de impacto por Charpy do conjunto compósito (resina, fibra e cerâmica).

Figura 57 – Resistência ao impacto por Charpy do conjunto compósito (resina, fibra e cerâmica – sem entalhe).



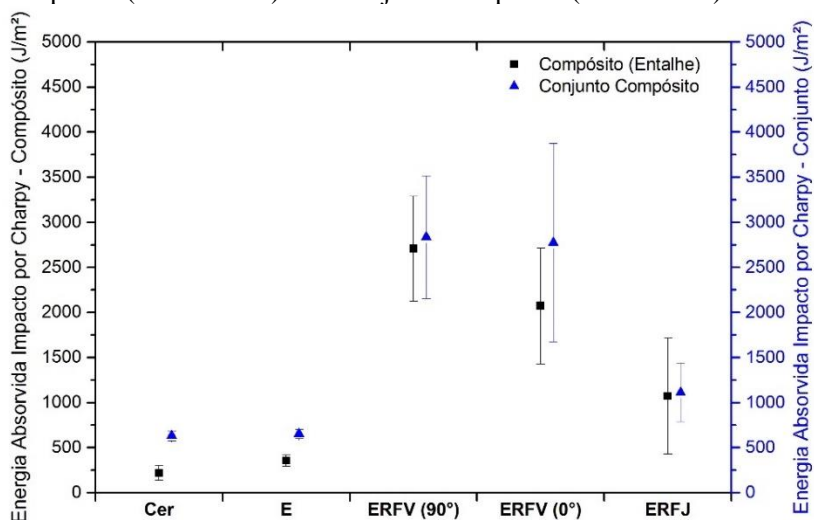
Fonte: A autora, 2018.

Na figura 57 observa-se que o comportamento dos resultados foi semelhante ao anterior. A cerâmica possui baixa resistência ao impacto, ou seja, absorve pouca energia. Quando analisado o conjunto cerâmica e matriz epóxi percebe-se que não há mudança significativa de resultados.

No conjunto compósito, a orientação da fibra não interfere na energia absorvida. Entretanto, devido à configuração da trama, quando analisado o sistema Cer+ERFV (90°), a delaminação da fibra é facilitada. Enquanto o sistema Cer+ERFV (0°), é mais propício à ruptura da fibra, devido ao entrelaçamento dos fios. A variabilidade dos dados para a fibra de vidro, novamente dependeu da delaminação. Quando ocorreu a delaminação, maior a energia que foi absorvida. Já no sistema Cer+ERFJ não é observada a delaminação da fibra, somente a ruptura desta. Novamente a fratura observada no conjunto compósito, ocorreu de forma interlaminar de modo II.

Na figura 58 está a comparação da resistência ao impacto do compósito (com entalhe) e do conjunto compósito (sem entalhe).

Figura 58 – Comparação da resistência ao impacto do compósito (com entalhe) e do conjunto compósito (sem entalhe).



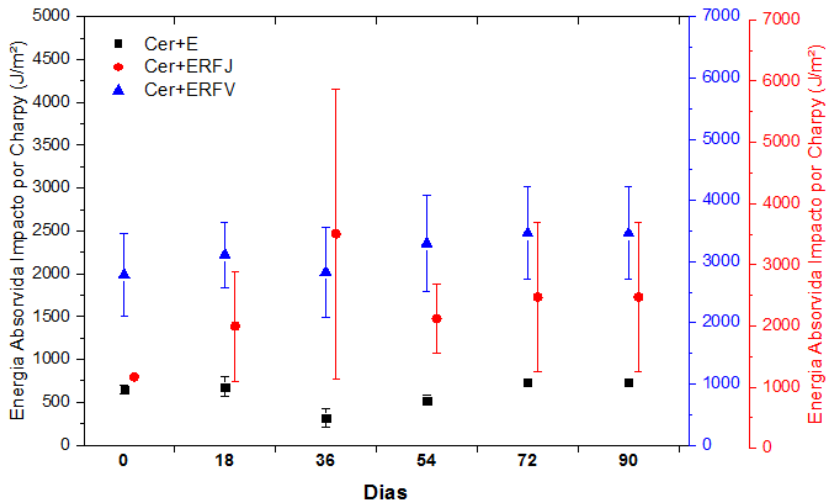
Fonte: A autora, 2018.

Como pode ser analisado na figura 58, quando se efetua o entalhe na parte cerâmica, a variabilidade dos resultados diminui, em todas as situações. Como explanado no ensaio de tração, as cerâmicas apresentam fratura frágil e sem deformação, com isso, ocorre a dispersão dos dados devido à probabilidade de se encontrar uma falha capaz de iniciar uma fissura. Assim, a avaliação de energia absorvida durante o impacto, deve ser analisada com entalhe no conjunto compósito.

5.2.7 Resistência ao impacto do conjunto compósito (sem entalhe) com degradação em água

Na figura 59 constam os resultados para a resistência ao impacto do conjunto compósito, quando estes foram expostos à água.

Figura 59 – Resistência ao impacto por Charpy do conjunto compósito (resina, fibra e cerâmica – sem entalhe), após degradação em água.



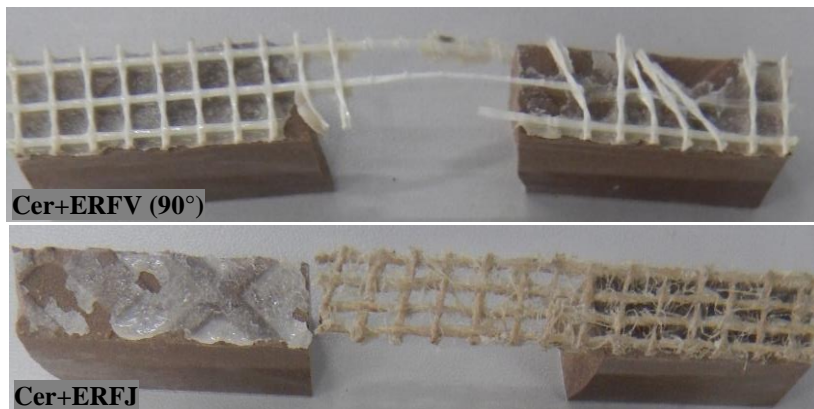
Fonte: A autora, 2018.

Para as fibras naturais, existe um teor ótimo de umidade, em que o desempenho mecânico das fibras é maximizado. Porém este fenômeno não foi elucidado, podendo estar associado às condições de ensaios ou da variabilidade da fibra (VAISANEN, 2017).

Pickering (2016) afirma que com absorção de água, os compósitos de fibras naturais diminuem as propriedades mecânicas, devido ao inchaço. Entretanto, a resistência ao impacto, usualmente aumenta quando o compósito é exposto à água.

De acordo com a figura 59 não houve mudança na energia absorvida no impacto por Charpy ao longo dos dias de degradação. Entretanto é possível observar o aumento da variabilidade dos resultados com a degradação. Isso pode estar associado à degradação na resina epóxi perante água e o inchaço da fibra de juta. A partir de 72 dias de ensaio foi possível observar o desprendimento da resina epóxi da parte cerâmica, nos corpos ensaiados no impacto por Charpy. A figura 60 mostra um corpo de Cer+ERFV e outro de Cer+ERFJ, ambos com desprendimento da resina epóxi após 90 dias em degradação em água.

Figura 60 – Corpos ensaiados para impacto por Charpy após 90 dias de degradação em água (sem entalhe).



Fonte: A autora, 2018.

Sousa (2018) afirma que a umidade e temperatura são os fatores ambientais que interferem na aplicação do epóxi como adesivo estrutural. De acordo com Sousa (2018), a difusão da água está relacionada à estrutura polimérica, podendo ser influenciada pela composição química, polaridade e movimentos moleculares. A água após ser absorvida pela resina epóxi, pode alterar as propriedades através da plastificação (processo reversível), hidrólise, rachaduras ou fissuras (processo irreversível). As transformações físicas e químicas sofridas pelo epóxi na presença de água causam efeitos negativos, como reduções da transição vítrea (T_g) e da resistência mecânica.

5.2.8 Comentários sobre as características mecânicas das configurações

Para as características mecânicas das configurações, vale ressaltar os seguintes pontos:

- A adesão fibra-matriz medida é maior que a própria resistência à tração da fibra independente da orientação. Dessa forma, pode-se dizer que houve uma boa interface fibra-matriz, fator determinante para a formação de compósito;
- Os ensaios de resistência à tração e flexão do conjunto compósito, não são apropriados para avaliação da resina ou da

fibra. A parte cerâmica é o fator determinante dessas características;

- O ensaio de resistência à tração somente do compósito é o mais apropriado para avaliação da resina e/ou fibra, apesar da aplicação do compósito ser juntamente com a cerâmica (em comparação com a resistência à tração do conjunto);
- De acordo com o ensaio de resistência à tração, a inserção da fibra de vidro e fibra de juta na matriz polimérica, aumentou a resistência à tração, caracterizando a transferência de carga da matriz para fibra;
- Para a sollicitação mecânica de impacto por Charpy, para obter uma maior energia absorvida é necessário que ocorra a delaminação da fibra da matriz polimérica. Característica observada principalmente para o conjunto Cer+ERFV (90°);
- Para a sollicitação mecânica de impacto por Charpy após a degradação em água, não foram observadas mudanças na energia absorvida, entretanto, notou-se o desprendimento da resina epóxi degradada interferindo na variabilidade dos resultados;
- Apesar dos resultados inferiores em termos de resistência à tração do compósito e de energia absorvida no impacto por Charpy, a fibra de juta apresenta resultados satisfatórios em termos de características mecânicas, já que a comparação é entre uma fibra de origem natural e outra sintética.

5.3 ENSAIOS DE DESEMPENHO

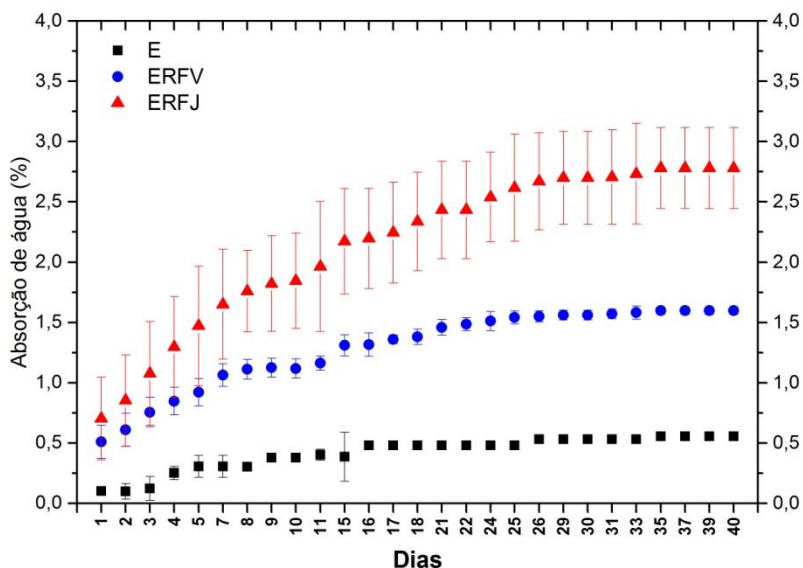
Nos subcapítulos seguintes (5.3.1, 5.3.2, 5.3.3, 5.3.4 e 5.3.5) constam os resultados dos ensaios que se referem ao desempenho do compósito e do conjunto compósito frente a sua aplicação. No subcapítulo 5.3.6 estão os comentários gerais sobre os ensaios de desempenho.

5.3.1 Absorção de água do compósito

De acordo com Vaisanen (2017), os compósitos de fibras naturais podem demorar meses para alcançar o equilíbrio de umidade. Ramesh (2017) afirma que a porcentagem de absorção de água nos compósitos depende de dois parâmetros: o teor de fibra e a temperatura ambiente. Resultados mostraram que a absorção de água aumentou com o aumento

de teor de fibra e da temperatura circundante. A figura 61 mostra a absorção de água dos compósitos de fibra de juta, fibra de vidro e somente da resina epóxi (compósitos sem a parte cerâmica).

Figura 61 – Absorção de água da resina epóxi e dos compósitos.



Fonte: A autora, 2018.

Como mostra a figura 61, a menor absorção de água encontrada foi para resina epóxi com 0,55%. O compósito de fibra de vidro apresenta absorção de água média de 1,60% e o compósito de fibra natural 2,81%. O equilíbrio de umidade para a resina epóxi foi obtido no 26º dia, para o compósito de fibra de vidro no 29º dia e para a fibra natural somente no 35º dia. Vale ressaltar que a partir do 18º dia de ensaio, observou-se a solubilização do agente de compatibilização utilizado na fibra natural na água. Na figura 62 é possível verificar a solubilização do plastificante na amostra ensaiada (região onde a fibra está esbranquiçada).

Figura 62 – Amostra do compósito de fibra de juta após 40° no ensaio de absorção de água.



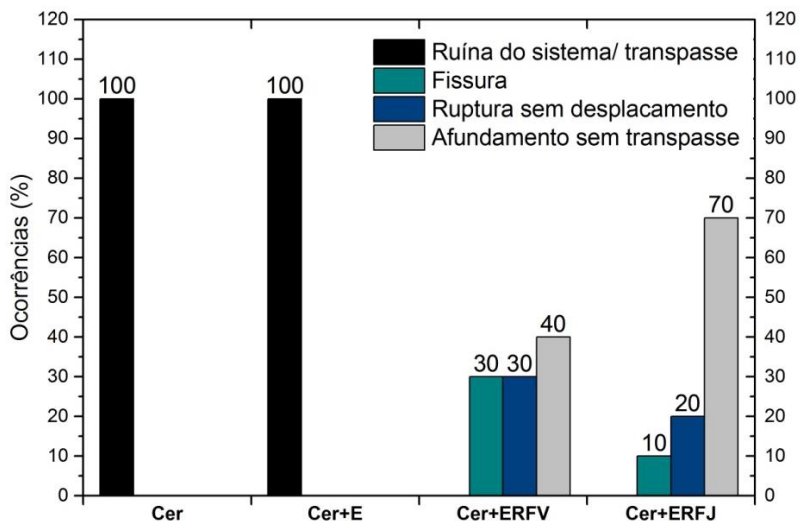
Fonte: A autora, 2018.

De acordo com Vaisanen (2017) o processo de absorção de água de um compósito, é complexo devido ao envolvimento de dois sistemas distintos: a matriz polimérica que é hidrofóbica e as fibras naturais que são hidrofílicas. Há três mecanismos em que materiais compósitos absorvem a umidade. O primeiro é a difusão de moléculas de água no interior das micro-aberturas entre as cadeias de polímero. O segundo é referente ao transporte capilar de moléculas de água nas lacunas e nas falhas da interface fibra-matriz. E o último mecanismo, diz respeito ao transporte de água através da matriz de micro-fissuras formada durante o processamento do compósito.

5.3.2 Resistência ao impacto de corpo duro

Este ensaio é o que mais se aproxima, em termos de desempenho, de uma situação real de uso. Na figura 63 estão os fenômenos observados durante o ensaio. Para os impactos de 3,75 J (impacto de utilização) não foram registradas nenhum tipo de avaria no sistema (trincas, fissuras ou afundamentos).

Figura 63 – Percentual de ocorrências no impacto de corpo duro de 20 J.



Fonte: A autora, 2018.

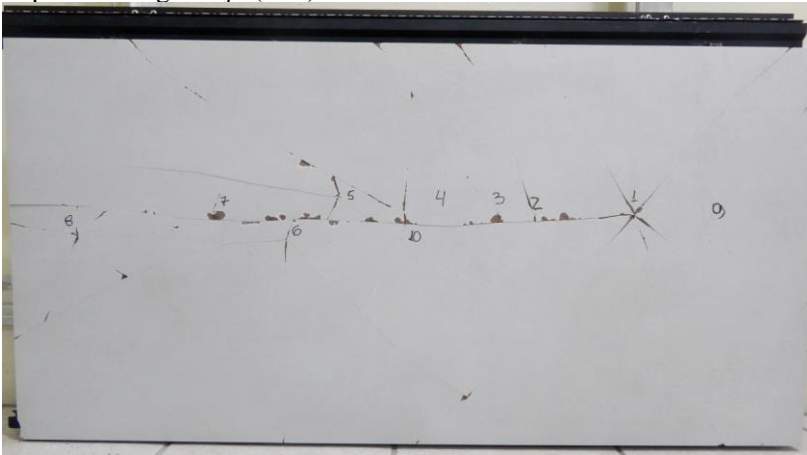
Como mostra a figura 63, após os 10 impactos de segurança, o sistema apresentou trincas, fissuras e afundamentos, porém sem ocorrer o transpasse da esfera ou ruína do sistema. Assim, os dois sistemas estão aptos para a utilização em fachada, apresentando o desempenho mínimo para impacto de segurança. Na figura 64 e 65 estão as placas cerâmicas após os 10 impactos de 20 J.

Figura 64 – Fachada ventilada com tela de fibra de vidro após impacto de segurança (20 J).



Fonte: A autora, 2018.

Figura 65 – Fachada ventilada com tela de fibra de juta após impacto de segurança (20 J).



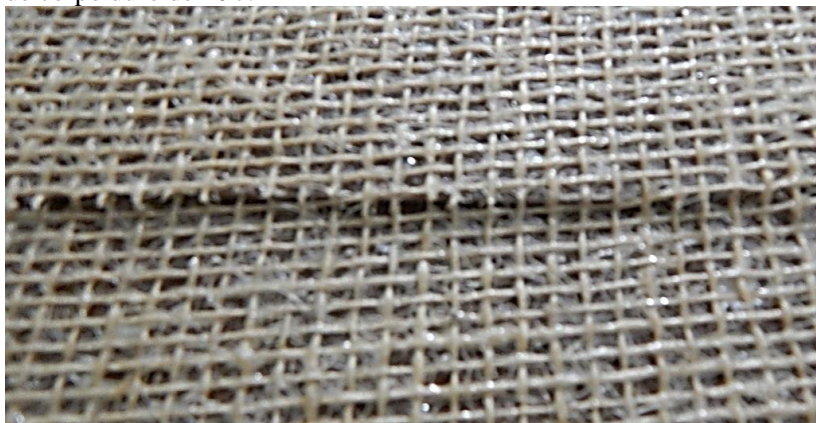
Fonte: A autora, 2018.

O fenômeno que mais ocorreu durante o ensaio, é o afundamento sem transpasse. O conjunto compósito com fibra de juta apresentou maior ocorrência desse evento.

No caso do conjunto compósito de fibra de juta, observou-se que na região onde apresentavam os afundamentos, parte da fibra havia se rompido com os impactos. Este fenômeno de rompimento parcial das fibras, também foi observado no ensaio de tração da fibra (figura 46). Apesar do rompimento parcial das fibras de juta, o desempenho observado entre o conjunto compósito de fibra de vidro e de juta, foi semelhante. Este fato pode ser atribuído ao deslocamento obtido no ensaio de tração da fibra. Apesar da diferença técnica entre as fibras, o deslocamento observado foi semelhante, o que contribuiu para que a fibra de juta desempenhasse a sua função dentro do conjunto compósito.

Na figura 66 é possível observar o afundamento da placa com parte das fibras rompidas.

Figura 66 – Rompimento da fibra de juta observada no impacto de corpo duro de 20 J.



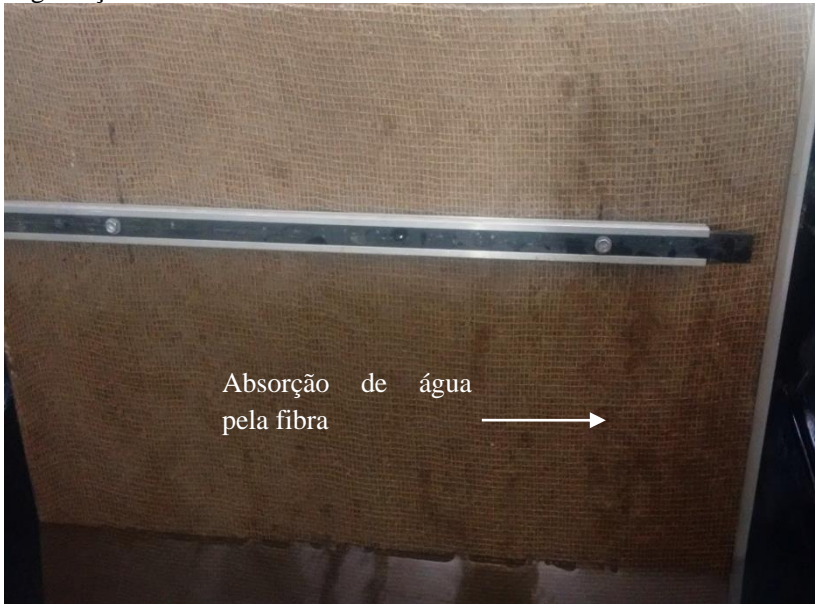
Fonte: A autora, 2018.

Apesar do conjunto compósito com fibra de vidro também apresentar afundamentos, a fibra de vidro não se rompeu. Esse comportamento pode estar associado a quatro fatores: maior resistência à tração da fibra e do compósito como foi observado nos resultados anteriores (figura 44 e 50); ao comportamento da fibra durante a execução do ensaio de tração (figura 46) e o deslocamento da máquina durante o ensaio de tração da fibra.

5.3.3 Resistência ao impacto de corpo duro com degradação em água

Durante o enchimento do tanque com água, verificou-se que a fibra de juta já estava absorvendo água. Na figura 67 é possível observar as manchas mais escuras na fibra, onde a água já tinha sido absorvida, antes mesmo da peça estar totalmente submersa.

Figura 67 – Enchimento do tanque com água para ensaio de degradação.



Fonte: A autora, 2018.

No decorrer dos 90 dias, observou-se a formação de fungos nos conjuntos compósitos. Devido ao tamanho das placas (59x118,2 cm), cerca de 10 cm não ficaram submersas na água. Nessa região observou-se a formação de fungos a partir de 30 dias para o conjunto com fibra de juta (Cer+ERFJ) e ao final dos 90 dias para o outro conjunto (Cer+ERFV).

Para o conjunto Cer+ERFJ foi possível observar que a formação de fungos ocorreu a partir da fibra. Enquanto para o conjunto Cer+ERFV esta formação ocorreu na superfície da resina epóxi. Na

figura 68 está a parte posterior dos conjuntos compósitos após 90 dias de degradação em água. Na parte superior é possível observar os fungos formados. De acordo com o anexo B, para o conjunto compósito Cer+ERFV o crescimento fúngico é de leveduras e *Aspergillus* sp. Já para o conjunto Cer+ERFJ o crescimento fúngico encontrado foi de *Penicillium* sp., *Cladosporium* sp. e *Aspergillus* sp.

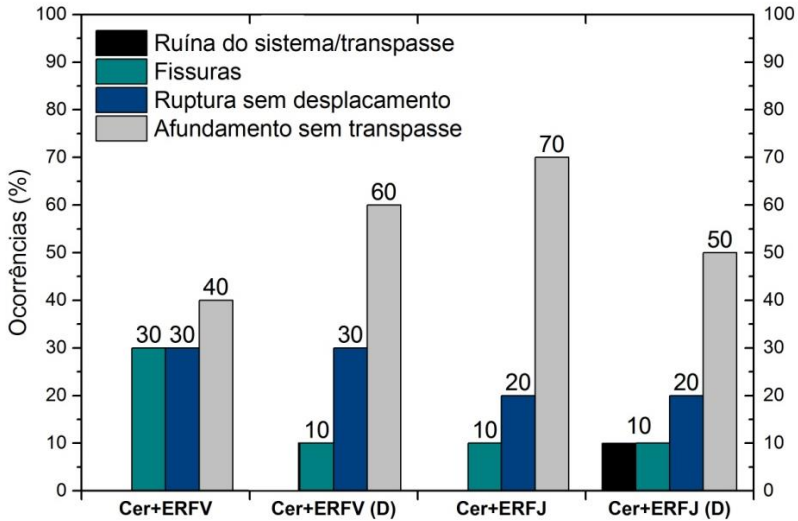
Figura 68 – Conjuntos compósitos após 90 dias de degradação em água.



Fonte: A autora, 2018.

Na figura 69 está a comparação das ocorrências observadas no ensaio de impacto de corpo duro (impacto de segurança – 20 J) antes e após a degradação em água durante 90 dias.

Figura 69 – Percentual de ocorrências no impacto de corpo duro de 20 J após degradação de 90 dias em água (D – com degradação).



Fonte: A autora, 2018.

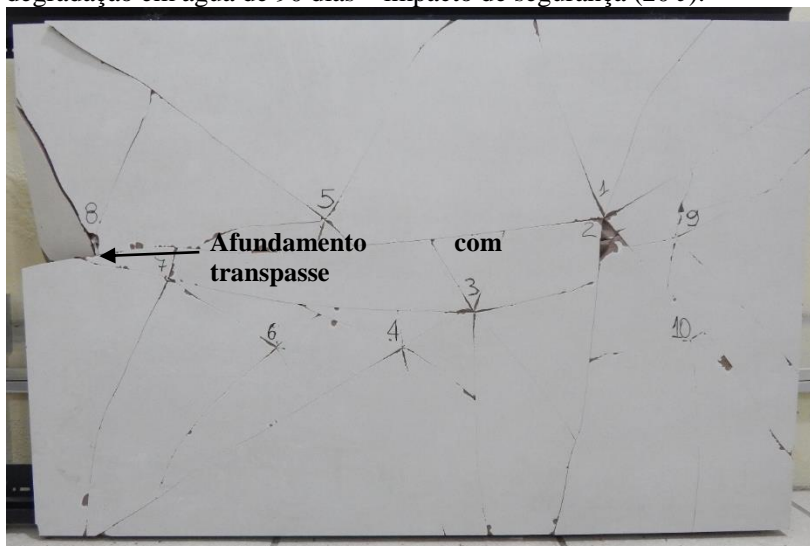
De acordo com a figura 69, é possível observar o aumento de afundamentos sem transpasse para o conjunto com fibra de vidro (Cer+ERFV) e um decréscimo de fissuras. Enquanto para o conjunto com fibra de juta (Cer+ERFJ) houve a diminuição de afundamentos. Porém, os afundamentos observados não apresentavam transpasse do corpo percussor, e após a degradação houve o afundamento com transpasse (10%). Com a observação dessas ocorrências, o sistema com fibra de vidro (Cer+ERFV) não apresentou a ruína do sistema, caracterizando o desempenho mínimo de segurança. Enquanto o sistema com fibra de juta (Cer+ERFJ) apresentou a ocorrência de transpasse do corpo percussor, não alcançado o desempenho mínimo exigido. Na figura 70 e 71 estão os conjuntos compósitos degradados após o ensaio de impacto de corpo duro.

Figura 70 – Fachada ventilada com fibra de vidro após degradação em água de 90 dias – impacto de segurança (20 J).



Fonte: A autora, 2018.

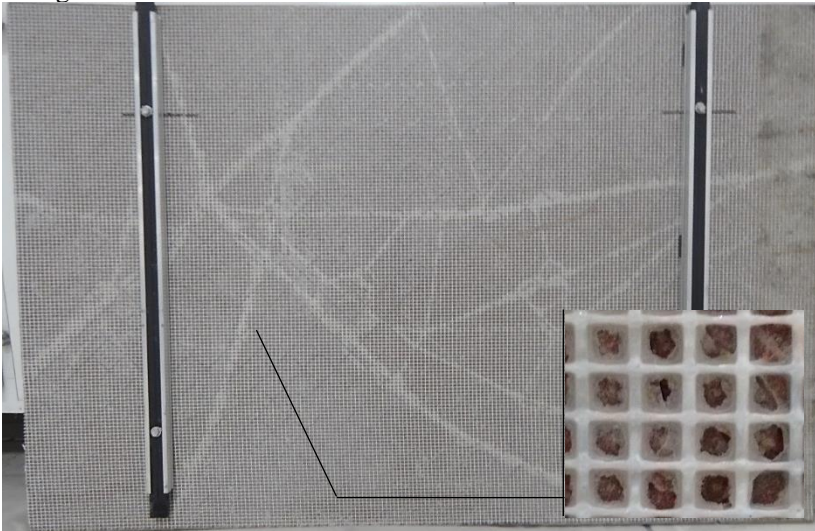
Figura 71 – Fachada ventilada com fibra de juta após degradação em água de 90 dias – impacto de segurança (20 J).



Fonte: A autora, 2018.

Na figura 72 e 73 estão as faces posteriores dos conjuntos compósitos. Na figura 72 é possível observar a degradação da resina epóxi causada pela água. Nos locais onde ocorreu a fratura da placa cerâmica devido ao impacto, ocorreu o desprendimento da resina degradada da placa, justificando o aumento de afundamentos sem transpasse. Esse fenômeno já foi observado nos resultados do item 5.2.7 de impacto por Charpy. Neste ensaio sem a degradação da água, não foi identificado, esse desprendimento da resina e descolamento da fibra.

Figura 72 – Face posterior do conjunto compósito com fibra de vidro após impactos de segurança (20 J) – após degradação de 90 dias em água.



Fonte: A autora, 2018.

Na figura 73 é possível observar que a ocorrência de transpasse do corpo percussor ocorreu na região onde houve a formação de fungos na fibra de juta. Dessa forma, a formação dos fungos interferiu no desempenho mecânico do conjunto com fibra de juta (Cer+ERFV). Nesse conjunto, não foi observado o desprendimento da resina epóxi nas regiões dos impactos com ou sem degradação.

Figura 73 – Face posterior do conjunto compósito com fibra de juta após impactos de segurança (20 J) – após degradação de 90 dias em água.



Fonte: A autora, 2018.

5.3.4 Propagação de chama

Vaisanen (2017) afirma que os estágios de combustão para um compósito de fibra natural são: ignição, formação de fumaça, desenvolvimento do fogo, propagação do fogo, desenvolvimento completo do fogo e decréscimo. Entretanto, no ensaio de propagação de chama executado, não houve a propagação de chama em toda extensão da amostra, somente a carbonização da resina epóxi, consumo da camada polimérica da fibra de vidro e consumo parcial da fibra de juta, na região de exposição à chama. Na tabela 16 constam os fenômenos observados durante o ensaio de propagação de chama.

Tabela 16 – Fenômenos observados no ensaio de propagação de chama.

Fenômeno observado	Cer+ERFV	Cer+ERFJ
<i>Gotejamento do material em chamas</i>	Não	Não
<i>Desprendimento do material em chamas</i>	Não	Não
<i>Flacidez do material</i>	Não	Não
<i>Delaminação observada</i>	Sim	Sim
<i>Contração observada</i>	Não	Não
<i>Fratura observada</i>	Sim	Sim
<i>Cinzas observadas</i>	Não	Sim
<i>Coloração da fumaça desenvolvida</i>	Sem formação	Sem formação

Fonte: A autora, 2018.

De acordo com a tabela 16, o único fenômeno observado que obteve resultado diferente entre as amostras, foi em relação a cinzas observadas. Apesar de não haver formação de fumaça, o conjunto compósito com fibra de juta apresentou a formação e desprendimento de cinzas durante o ensaio. Na tabela 17 constam outros parâmetros observados durante o ensaio que foram mensurados.

Tabela 17 – Parâmetros observados no ensaio de propagação de chama.

Parâmetro observado	Cer+ERFV	Cer+ERFJ
<i>Tempo de ignição (min)</i>	Imediato	Imediato
<i>Temperatura máxima alcançada (°C)</i>	528	529
<i>Tempo para a fratura da placa (min e seg)</i>	4'17"	4'29"
<i>Avanço da chama (cm)</i>	13x44	17x53
<i>Tempo total de ensaio (min)</i>	5	5

Fonte: A autora, 2018.

Para ambas as amostras o tempo de ignição foi imediato, entretanto, logo a chama sobre a superfície do material se extinguiu. A temperatura máxima observada e o tempo até a ocorrência da fratura da placa foram muito semelhantes independentes da natureza das fibras. Apesar de Szolnoki (2015) afirmar que os reforços de fibra natural são inflamáveis e a liberação de calor desses compósitos é maior que os que utilizam fibras sintéticas, essa característica não foi observada durante este ensaio.

A área danificada pela chama foi maior para a fibra de juta. Na figura 74 estão os instantes iniciais no ensaio, onde é possível observar a formação de chama na superfície do material.

Figura 74 – Instantes iniciais no ensaio de propagação de chama.



Fonte: A autora, 2018.

Na figura 75 é possível observar a diferença de dano causado pela chama nos conjuntos compósitos. Como foi mostrado na tabela 17, o avanço da chama foi maior no conjunto com fibra de juta, sendo possível observar na figura 75, que em certas regiões, ocorreu o consumo quase total da fibra de juta. Apesar de a fibra de juta estar envolta pela resina epóxi, isso não é o suficiente para proteger a fibra natural ao fogo.

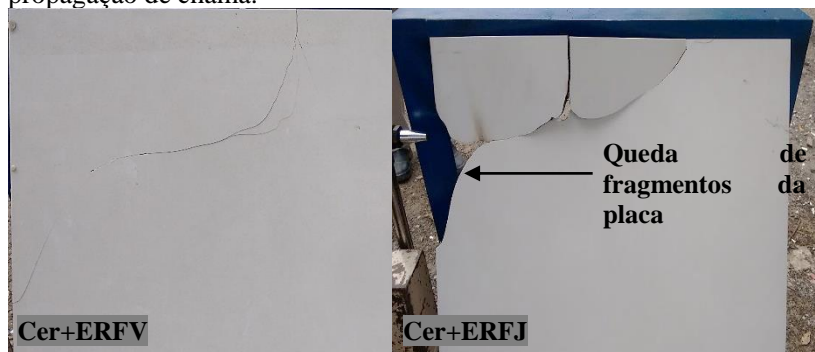
Figura 75 – Comparativo dos conjuntos compósitos após o ensaio de propagação de chama.



Fonte: A autora, 2018.

Durante o ensaio, ocorreu a fratura nas placas na região onde estava posicionada a chama. Apesar de ter ocorrido o consumo da resina epóxi e da camada polimérica, no caso da fibra de vidro, esta ainda desempenhou sua função, evitando o desprendimento de fragmentos. Entretanto, para o conjunto compósito de fibra de juta, grande parte da fibra foi consumida pela chama (resultado que corrobora com a análise termogravimétrica), não efetuando sua função, assim, ocorrendo desprendimento de fragmentos cerâmicos durante o ensaio. A figura 76 mostra a fratura observada durante o ensaio de propagação de chama.

Figura 76 – Fratura da placa cerâmica durante o ensaio de propagação de chama.



Fonte: A autora, 2018.

5.3.5 Arrancamento das fixações

Na tabela 18 estão os resultados de arrancamento das âncoras de fixação das placas cerâmicas.

Tabela 18 – Resultado indicativo do arrancamento das âncoras.

Parâmetro	Cer+ERFV	Cer+ERFJ
<i>Média (kN)</i>	2,91	1,81
<i>Coefficiente de variação (%)</i>	8,22	13,21
<i>Resultado indicativo (kN)</i>	2,32	1,28
<i>Força mínima necessária para arrancamento (kN)</i>	1,26	1,26

Fonte: A autora, 2018.

Como pode ser observada na tabela 18, a força de arrancamento das fixações é maior no conjunto compósito de fibra de vidro (Cer+ERFV). Esse resultado pode ser associado à própria natureza das fibras. O coeficiente de variação foi maior no conjunto compósito de fibra de juta, corroborando com o resultado indicativo. Embora o resultado indicativo para o conjunto compósito de fibra de juta foi menor (45% menor), ambos os resultados estão acima da força mínima de segurança necessária para o arrancamento de cada âncora.

5.3.6 Comentários sobre os ensaios de desempenho

Apesar dos resultados satisfatórios observados na caracterização mecânica das configurações, o conjunto compósito com fibra de juta (Cer+ERFJ), quando exposto a condições de aplicação de fachada ventilada, não apresenta comportamento mínimo de segurança. Devido aos seguintes fatores:

- O compósito de fibra de juta (resina epóxi e fibra de juta) apresenta absorção de água 75% maior que o compósito de fibra de vidro. Essa maior absorção provoca o inchaço da fibra de juta, podendo comprometer o desempenho mecânico da fibra, além do aumento de peso do sistema;
- Para a sollicitação mecânica de impacto de corpo duro, ambos os conjuntos compostos apresentaram o desempenho superior de utilização e mínimo de segurança. O conjunto compósito de fibra de juta (Cer+ERFJ) apresentou mais afundamentos sem transpasse do corpo percussor. Característica associada ao rompimento parcial das fibras, inerente à origem e processamento da fibra;
- Para a sollicitação mecânica de impacto de corpo duro após degradação em água, o conjunto compósito de fibra de juta, apresentou problemas referentes à capacidade de absorção de água da fibra. Houve a formação de fungos o que comprometeu o desempenho mecânico, além de ser uma patologia. Ambos os sistemas apresentaram o desempenho superior de utilização. Entretanto, para o impacto de segurança, o conjunto compósito de fibra de vidro apresentou desempenho mínimo enquanto o conjunto compósito de fibra de juta apresentou o transpasse do corpo percussor;
- Para a sollicitação ao fogo, o conjunto compósito de fibra de juta (Cer+ERFJ) apresentou o pior desempenho neste estudo. Devido à origem e composição da fibra, esta é consumida pelas chamas, não exercendo sua principal função no conjunto após a fratura da placa cerâmica;
- Em relação ao arrancamento das fixações, ambos os conjuntos apresentaram o resultado indicativo maior que a força mínima requerida.

6 CONCLUSÕES

Avaliou-se a aplicação de um compósito de fibra de juta em um sistema físico de fachada ventilada em comparação ao sistema atual de fibra de vidro, em termos de caracterização dos constituintes, caracterização mecânicas dos sistemas, o desempenho mecânico após degradação em água e o comportamento do sistema compósito quando exposto a uma fonte térmica.

Em relação à caracterização física do sistema compósito e seus constituintes, os ensaios que mostraram informações importantes foram: análise termogravimétrica, a resistência à tração da fibra sem a cerâmica e absorção de água da fibra. A análise termogravimétrica mostra que a massa residual da resina epóxi é referente à carga mineral, enquanto a perda de massa da fibra de vidro é referente à camada polimérica. Já a fibra de juta apresenta a maior perda de massa devido à origem da fibra. Os ensaios de tração da fibra indicaram que a fibra de vidro apresenta maior carga de ruptura na orientação de 90° e a maior resistência à tração a 0°. A fibra de juta apresenta resistência à tração muito inferior a fibra de vidro (88% menor), entretanto, o comportamento durante o ensaio, mostra que a fibra de juta apresenta o rompimento das fibras de forma gradual. Já em relação à absorção de água a fibra de juta tem absorção 6 vezes maior em relação à fibra de vidro, podendo comprometer o desempenho mecânico da fibra quando inserida em uma matriz polimérica.

Os ensaios de caracterização mecânica das configurações indicaram que a adesão fibra-matriz medida é maior que a própria resistência à tração da fibra independente da orientação. Já os ensaios de resistência à tração e flexão do conjunto compósito, não se mostraram relevantes para avaliação da resina ou da fibra, sendo mais apropriado o ensaio de resistência à tração do compósito. De acordo com o ensaio de resistência à tração, a inserção da fibra de vidro e fibra de juta na matriz polimérica, aumentou a resistência à tração, caracterizando a transferência de carga da matriz para fibra, ou seja, a formação de um compósito. Para a sollicitação mecânica de impacto por Charpy, a fratura mais interessante para obter uma maior energia absorvida é a delaminação. Característica observada principalmente para o conjunto Cer+ERFV (90°). Para a sollicitação mecânica de impacto de corpo duro, ambos os conjuntos compósitos apresentaram o desempenho superior de utilização e mínimo de segurança. O conjunto compósito de fibra de juta (Cer+ERFJ) apresentou mais aprofundamentos sem transpasse do corpo

percussor. Característica associada ao rompimento parcial das fibras, inerente à origem e processamento da fibra.

Em relação ao desempenho mecânico após degradação em água, para a sollicitação mecânica de impacto por Charpy, não foi observado mudanças na energia absorvida, apenas o desprendimento da resina epóxi degradada interferindo na variabilidade dos resultados. Entretanto para a sollicitação mecânica de impacto de corpo duro, o conjunto compósito de fibra de juta, apresentou a formação de fungos o que comprometeu o desempenho mecânico. O conjunto com fibra de vidro obteve desempenho mínimo de segurança enquanto o conjunto com fibra de juta apresentou o transpasse do corpo percussor, inutilizando o sistema.

Para a sollicitação ao fogo, o conjunto compósito de fibra de juta (Cer+ERFJ) apresentou o pior desempenho neste estudo. Devido à origem e composição da fibra, esta é consumida pelas chamas, não exercendo sua principal função no conjunto após a fratura da placa cerâmica;

Apesar da fibra de juta apresentar desempenho mecânico inferior, o conjunto compósito com fibra de juta apresenta o requisito mínimo normativo. Entretanto os ensaios de desempenho de propagação de chama, degradação e absorção de água do compósito, mostram que a fibra de juta não pode ser aplicada em sistema físico de fachada ventilada, pois a fibra de juta torna o conjunto vulnerável. Em relação ao custo da fibra, ambos apresentam valores similares no mercado (fibra natural nacional e fibra de vidro importada). Entretanto comparando os valores entre fibra de juta e de vidro nacional, há uma redução de 5% com a utilização de fibra natural de juta no compósito.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a análise dos resultados do presente trabalho, elencou-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar a utilização do porcelanato técnico no uso de fachada ventilada referente à solicitação de impacto;
- Avaliar a interferência de outros sistemas de fixação (clipe aparente, clipe oculto, entre outros) de fachada ventilada no ensaio de impacto de corpo duro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELLAOUI, H. et al. Laminated Epoxy Biocomposites Based on Clay and Jute Fibers. **Journal of Bionic Engineering**, v. 14, p.379 – 389, 2017.

ADEKOMAYA, O. et al. Negative impact from the application of natural fibers. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 843 – 846, 2017.

AGGARWAL, L. et al. Mixer design optimization with fractured surface topography of mechanical properties of polymer biocomposites. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 74, p. 272 – 280, 2017.

ALKBIR, M. F. M. et al. Fibre properties and crashworthiness parameters of natural fibre-reinforced composite structure: A literature review. **Composite Structures**, v. 148, p. 59 – 73, 2016.

ARPITHA, G. R.; YOGESHA, B. An Overview on Mechanical Property Evaluation of Natural Fiber Reinforced Polymers. **Materials Today: proceedings**, v. 4, p. 2755 – 2760, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13755**: Revestimentos de paredes externas e fachadas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante – procedimento. São Paulo, 1996.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES. **Sector**. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br/mundial>>. Acesso em: 06 de dez. 2016.

BANNIER, E. et al. Contribution of the ventilated façade to building energy demand. In: CONGRESSO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÂMICO, 2012, Castellón (Espana). **Pôsteres**. Castellón: Ed. Qualicer, 2012.

BANSAL, S.; RAMACHANDRAN, M.; RAICHURKARA, P. Comparative analysis of bamboo using jute and coir fiber reinforced

polymeric composites. **Materials Today: proceedings**, v. 4, p. 3182 – 3187, 2017.

BENSADOUN, F. et al. Low velocity impact properties of flax composites. **Composite Structures**, v. 176, p. 933 – 944, 2017.

BISARIA, H. et al. Effect of fibre length on mechanical properties of randomly oriented short jute fibre reinforced epoxy composite. **Materials Today: proceedings**, v. 2, p.1193 – 1199, 2015.

CALLISTER, Willian D; RETHWISCH, David G. **Materials Science and Engineering**. 9 ed. United States of America: Waley, 2014. 990 p.

CAMPOS, K. F. **Desenvolvimento de sistema de fixação de fachada ventilada com porcelanato de fina espessura**. 2011. 187 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

CAMPOS, K. F.; ROMAN, H. R. Development of a fixing system for ventilated façades with low-thickness porcelain tile. In: CONGRESSO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÂMICO, 2012, Castellón (España). **Pôsteres**. Castellón: Ed. Qualicer, 2012.

CANTAVELLA, V. et al. Análisis del impacto mecânico sobre baldosas cerâmicas. Factores que influyen. In: CONGRESSO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÂMICO, 2008, Castellón (España). **Apresentações**. Castellón: Ed. Qualicer, 2008. p. 225 – 240.

CAPRINO, G. et al. Low impact behaviour of hemp fibre reinforced epoxy composites. **Composite Structures**, v. 133, p. 892 – 901, 2015.

CLARAMUNT, J. et al. Natural fiber nonwoven reinforced cement composites as sustainable materials for building envelopes. **Construction and Building Materials**, v. 2016, p. 230 – 239, 2016.

DAL BÓ, M. D. et al. Chemical tempering of porcelain tiles. **Ceramics Internacional**, v. 42, p. 15199 – 15202, 2016.

DEB, A. et al. A study on the mechanical behaviors of jute-polyester composites. **Procedia Engineering**, v.173, p. 631 – 638, 2017.

DEEPAK, P. et al. Effects of polyamide and/or phenalkamine curing agents on the jute fibre reinforcement with epoxy resin matrix. **Materials Today: proceedings**, v. 4, p. 2841 – 2850, 2017.

DHAKAL, H. N. et al. Low-velocity impact response of non-woven hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites: influence of impactor geometry and impact velocity. **Composite Structures**, v. 94, p. 2656 – 2763, 2012.

DONDI, M. et al. Clays and bodies for ceramic tiles: Reappraisal and technological classification. **Applied Clay Science**, v. 96, p. 91 – 109, 2014.

DONDI, M. et al. Resistance to impact of porcelain stoneware tiles. **Ceramics International**, v. 42, p. 5731 – 5736, 2016.

ESCRIG, A. et al. Cuantificación de la mejora de la eficiencia energética de edificios con sistemas innovadores basados en fachadas ventiladas. In: CONGRESSO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÂMICO, 2014, Castellón (España). **Pôsteres**. Castellón: Ed. Qualicer, 2014.

FERREIRA, S.R. et al. Inverse identification of the bond behavior for jute fibers in cementitious matrix. **Composites Part B: engineering**, v.95, p. 440 – 452, 2016a.

_____. Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. **Construction e Building Materials**, 2016b. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.004>>. Acesso em 06 de Nov de 2016.

FIDELIS, M. E. A. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. **Journal of Materials Research and Technology**, v.2, p. 149 – 157, 2013.

FIORE, V. et al. Salt-fog spray aging of jute-basalt reinforced hybrid structures: Flexural and low velocity impact response. **Composites Part B: engineering**, v. 116, p. 99 – 112, 2017.

FROLLINI, E. et al. Biocomposites based on poly(butylene succinate) and curaua: mechanical and morphological properties. **Polymer Testing**, v. 15, p. 168 – 173, 2015.

GUSMÁN, A. A. et al. Optimization of the technological properties of porcelain tile bodies containing rice straw ash using the design of experiments methodology. **Ceramics Internacional**, v. 42, p. 15383 – 15396, 2016.

HO, M. et al. Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. **Composites Part B: engineering**, v. 43, p. 3549 – 3562, 2012.

JABBAR, A. et al. Modeling and analysis of the creep behavior of jute/green epoxy composites incorporated with chemically treated pulverized nano/micro jute fibers. **Industrial Crops and Products**, v.84, p. 230 – 240, 2016.

JABBAR, A. et al. Nanocellulose coated woven jute/green epoxy composites: characterization of mechanical and dynamic mechanical behavior. **Composite Structures**, v. 161, p. 340 – 349, 2017.

JAHAN, M.S. et al. Chemical characteristics of ribbon retted jute and its effect on pulping and papermaking properties. **Industrial Crops and Products**, v. 84, p. 116 – 120, 2016.

JOSHI, S.V. et al. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 35, p. 371 – 376, 2004.

KHAN, Z.; YOUSIF, B.F.; ISLAM, M. Fracture behaviour of bamboo fiber reinforced epoxy composites. **Composites Part B: engineering**, v. 116, p. 186 – 199, 2017.

KHOMENKO, A. et al. Theory and validation of optical transmission scanning for quantitative NDE of impact damage in GFRP composites. **Composites Part B: engineering**, v. 107, p. 182 – 191, 2016.

KU, H. et al. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. **Composites Part B: engineering**, v.42, p. 856 – 873, 2011.

KUMRE, A.; RANA, R.S.; PUROHIT, R. A review on mechanical property of sisal glass fiber reinforced polymer composites. **Materials Today: proceedings**, v. 4, p. 3466 – 3476, 2017.

MA, H. et al. Impact properties of glass fiber/epoxy composites at cryogenic environment. **Composites Part B: engineering**, v. 92, p. 210 – 217, 2016.

MACHADO, A. L. A. **Diretrizes de projeto para revestimentos não aderidos de fachada constituídos de placas cerâmicas extrudadas**. 2012. 206 f. Dissertação (Mestrado em habitação: planejamento e tecnologia – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, São Paulo, 2013.

MANSOURIAN, A; RAZMI, A; RAZAVI, M. Evaluation of fracture resistance of warm mix asphalt containing jute fibers. **Construction e Building Materials**, v. 117, p. 37 – 46, 2016.

MARINUCCI, Gerson. **Materiais Compósitos Poliméricos: fundamentos e tecnologia**. São Paulo: Artliber, 2011.

MEDEIROS, J. S. et al. Ingeniería arquitectónica de lãs fachadas cerâmicas ventiladas: diseño, comportamiento y mercado en Brasil. In: CONGRESSO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÂMICO, 2016, Castellón (España). **Pôsteres**. Castellón: Ed. Qualicer, 2016.

MENEGAZZO, A. P. M. et al. Resistencia a los impactos de pavimentos cerâmicos: causas, simulación en uso y prevención de la aparición de daños. In: CONGRESSO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÂMICO, 2014, Castellón (España). **Pôsteres**. Castellón: Ed. Qualicer, 2014.

MEOLA, C; CARLOMAGNO; G. M. Infrared thermography to evaluate impact damage in glass/epoxy with manufacturing defects. **International Journal of Impact Engineering**, v. 67, p. 1 – 11, 2014.

MEOLA, C. et al. Nondestructive evaluation of carbon fibre reinforced composites with infrared thermography and ultrasonics. **Composite Structures**, v. 134, p. 845 – 853, 2015.

_____. New perspectives on impact damaging of thermoset – and thermoplastic-matrix composites from thermographic images. **Composite Structures**, v. 152, p. 746 – 754, 2016.

_____. Impact damaging of composites through online monitoring and non-destructive evaluation with infrared thermography. **NDT&E Internacional**, v. 85, p. 34 – 42, 2017.

MEREDITH, J. et al. Natural fibre composite energy absorption structures. **Composites Science and Technology**. v. 72, p. 211 – 217, 2012.

MIRAGE. **Fachadas**. Disponível em:
<<http://engineering.mirage.it/es/fachadas/fachadas-ventiladas/overview/>>. Acesso em: 18 de dez. 2016.

MITTAL, V.; SAINI, R.; SINHA, S. Natural fiber-mediated epoxy composites – A review. **Composites Part B: engineering**, v. 99, p. 425 – 435, 2016.

MULLER, A. **Desenvolvimento de um protótipo e análise de comportamento térmico de fachada ventilada com placas cerâmicas de grês porcelanato**. 2003. 173 f. Tese (Doutorado em ciência e engenharia de materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

MULLER, A; ALARCON, E. Desenvolvimento de um sistema de fachada ventilada com placas cerâmicas de grês porcelanato voltado para a construção civil do Brasil. **Cerâmica**, v. 51, p. 354 – 360, 2005.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

PHILLIPS, S.; LESSARD, L. Application of natural fiber composites to musical instrument top plates. **Journal of Composites Materials**, v. 46, p. 145 – 154, 2012.

PICKERING, K.L.; ARUAN EFENDY, M.G.; LE, T.M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 83, p. 98 – 112, 2016.

PITT, J. I.; HOCKING, A. D. **Fungi and Food Spoilage**. 3. ed. New York: Springer, 2009. p. 524.

RAMESH, M.; PALANIKUMAR, K.; REDDY, K. H. Mechanical property evaluation of sisal-jute-glass fiber reinforced polyester composites. **Composites Part B: engineering**, v. 48, p. 1 – 9, 2013.

RAMESH, M.; PALANIKUMAR, K.; REDDY, K. H. Plant fibre based bio-composites: Sustainable and renewable green materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 558 – 584, 2017.

RATHORE, A.; PRADHAN, M.K. hybrid cellulose bionanocomposites from banana and jute fibre: a review of preparation, properties and applications. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, p. 3942 – 3951, 2017.

RICHARDSON, A. et al. The addition of synthetic fibres to concrete to improve impact/ballistic toughness. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 612 – 612, 2016.

RODRIGUES, A. **Análise estatística na avaliação de teste de degradação acelerada de conjuntos cerâmicos em fachadas**. 2015. 115 f. Dissertação (Mestrado em ciência e engenharia de materiais) – Universidade do Extremo Sul de Santa Catarina, 2015.

RUÁ, M. J. et al. Aproximación al cálculo de la eficiencia energética de fachadas ventiladas y su impacto ambiental. In: CONGRESSO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÂMICO, 2010, Castellón (España). **Apresentações**. Castellón: Ed. Qualicer, 2010. p. 1 – 14.

SÁNCHEZ, E. et al. Porcelain tile: Almost 30 years of steady scientific-technological evolution. **Ceramics Internacional**, v. 36, p. 831 – 845, 2010.

SASSONI, E. et al. Influence of mechanical properties, anisotropy, surface roughness and porosity of brick on FRP debonding force. **Composites Part B: engineering**, v. 108, p. 257 – 269, 2017.

SATYANARAYANA, K.G.; GUIMARÃES, J.L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v.38, p. 1694 – 1709, 2007.

SEBAEY, T.A.; MAHDI, E. Crashworthiness of pre-impacted glass/epoxy composite tubes. **International Journal of Impact Engineering**, v.92, p. 18 – 25, 2016.

SILVA, G. et al. Comportamento mecânico frente al impacto de baldosas cerâmicas. In: CONGRESSO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÂMICO, 2002, Castellón (España). **Apresentações**. Castellón: Ed. Qualicer, 2002. p. 385 – 399.

SILVA, N. et al. **Manual de métodos de análise microbiológica**. 4th ed. São Paulo: Varela; 2010.p. 624.

SILVA, S. C. B. **Estudo da degradação acelerada da argamassa em um sistema de revestimento cerâmico de fachadas**. 2014. 129 f. Dissertação (Mestrado em ciências e engenharia de materiais) – Universidade do Extremo Sul de Santa Catarina, 2014.

SIMEOLI, G. et al. The role of interface strength on the low velocity impact behaviour of PP/glass fibre laminates. **Composites Part B: engineering**, v. 62, p. 88 – 96, 2014.

SOUSA, J. M.; CORREIA, J. R.; CABRAL-FONSECA, S. Durability of an epoxy adhesive used in civil structural applications. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 618 – 633, 2018.

SZOLNOKI, B. et al. Development of natural fibre reinforced flame retarded epoxy resin composites. **Polymer Degradation and Stability**, v.119, p. 68 – 76, 2015.

TOLEDO, L. R.; SOUZA, E. Gente de fibra. **Revista Globo Rural**, Rio de Janeiro, 20 de out. 2010. Disponível em: <

<http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,EMI183007-18283,00-GENTE+DE+FIBRA.html>>. Acessado em: 22 de out. 2017.

VAISANEN, T.; DAS, O.; TOMPPONEN, L. A review on new bio-based constituents for natural fiber-polymer composites. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 582 – 596, 2017.

VIMAL, R. et al. Comparisional Study of Succinylation and Phthalicylation of Jute Fibres: Study of Mechanical Properties of Modified Fibre Reinforced Epoxy Composites. **Materials Today: proceedings**, v. 2, p. 2918 – 2927, 2015.

WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?. **Composites Science and Technology**. v. 63, p. 1259 – 1264, 2003.

YU, T. et al. Phosphorus-containing diacid and its application in jute/poly (lactic acid) composites: Mechanical, thermal and flammability properties. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 97, p. 60 – 66, 2017.

ZAH, R. et al. Curauá fibers in the automobile industry – a sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, p. 1032 – 1040, 2007.

ZHOU, Y; FAN; M; CHEN, L. Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview. **Composites Part B: engineering**, v. 101, p. 31 – 45, 2016.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Frações mássicas e volumétricas de fibra e matriz

a) Frações mássicas

$$M_c = M_f + M_m \quad (4)$$

$$m_f = \frac{M_f}{M_c} \quad (5)$$

$$m_m = \frac{M_m}{M_c} \quad (6)$$

Onde:

M_c = massa do compósito;

M_f = massa de fibra;

M_m = massa da matriz;

m_f = fração mássica de fibra;

m_m = fração mássica da matriz.

b) Frações volumétricas

$$V_c = V_f + V_m \quad (7)$$

$$V_f = \frac{M_f}{\rho_f} \quad (8)$$

$$V_m = \frac{M_m}{\rho_m} \quad (9)$$

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad (10)$$

$$v_m = \frac{V_m}{V_c} \quad (11)$$

Onde:

V_c = volume do compósito;

V_f = volume de fibra;

V_m = volume da matriz;

ρ_f = densidade da fibra;

ρ_m = densidade da matriz;
 v_f = fração volumétrica de fibra;
 v_m = fração volumétrica da matriz.

Tabela 19 – Valores de massa e volume da matriz, fibras e compósitos.

Compósito	M_m (g)	M_f (g)	M_c (g)	V_m (m³)	V_f (m³)	V_c (m³)
ERFV	500	316	816	3,21	1,50	4,70
ERFJ (S)	500	252	752	3,21	1,83	5,03
ERFJ (T)	500	525	1025	-	-	-

Fonte: A autora, 2018.

Tabela 20 – Frações mássicas e volumétricas de matriz e fibra dos compósitos.

Compósito	Fração Mássica		Fração Volumétrica	
	m_m (%)	m_f (%)	v_m (%)	v_f (%)
ERFV	61,27	38,73	68,14	31,86
ERFJ (S)	66,49	33,51	63,69	36,31
ERFJ (T)	48,78	51,22	-	-

Fonte: A autora, 2018.

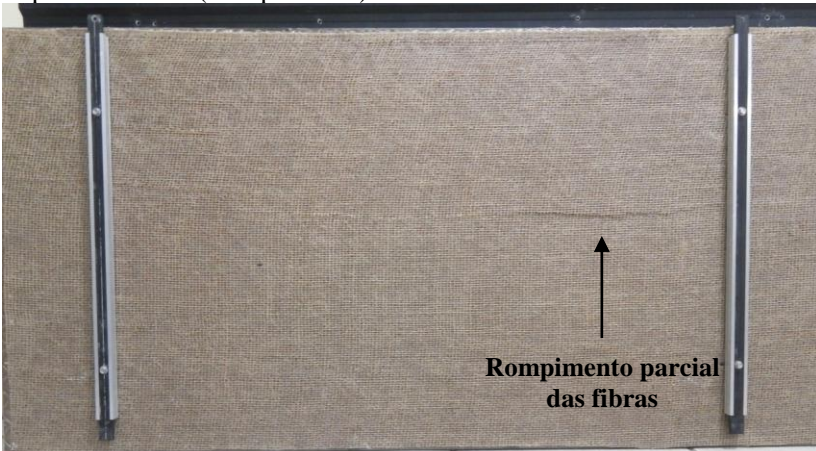
APÊNDICE B – Placas cerâmicas após o ensaio de impacto de corpo duro

Figura 77 – Conjunto compósito de fibra de vidro após os impactos de 20 J (face posterior).



Fonte: A autora, 2018.

Figura 78 – Conjunto compósito de fibra de juta após os impactos de 20 J (face posterior).



Fonte: A autora, 2018.

APÊNDICE C – Descrição dos impactos de corpo duro

Tabela 21 – Resistência ao impacto de corpo duro de 20 J.

Impacto externo – Esfera de 1,0 kg (2,0 m)		
Impac.	Conjunto compósito com fibra de vidro	Conjunto compósito com fibra de juta
1°	Ruptura sem deslocamento	Ruptura sem deslocamento
2°	Fissura da placa	Fissura da placa
3°	Ruptura sem deslocamento	Afundamento sem transpasse (0,13 mm)
4°	Fissura da placa	Afundamento sem transpasse (0,37 mm)
5°	Ruptura sem deslocamento	Afundamento sem transpasse (1,02 mm)
6°	Afundamento sem transpasse (0,71mm)	Ruptura sem deslocamento
7°	Fissura da placa	Afundamento sem transpasse (2,01 mm)
8°	Afundamento sem transpasse (1,04 mm)	Afundamento sem transpasse (1,58 mm)
9°	Afundamento sem transpasse (0,80 mm)	Afundamento sem transpasse (0,59 mm)
10°	Afundamento sem transpasse (0,53 mm)	Afundamento sem transpasse (0,72 mm)

Fonte: A autora, 2018.

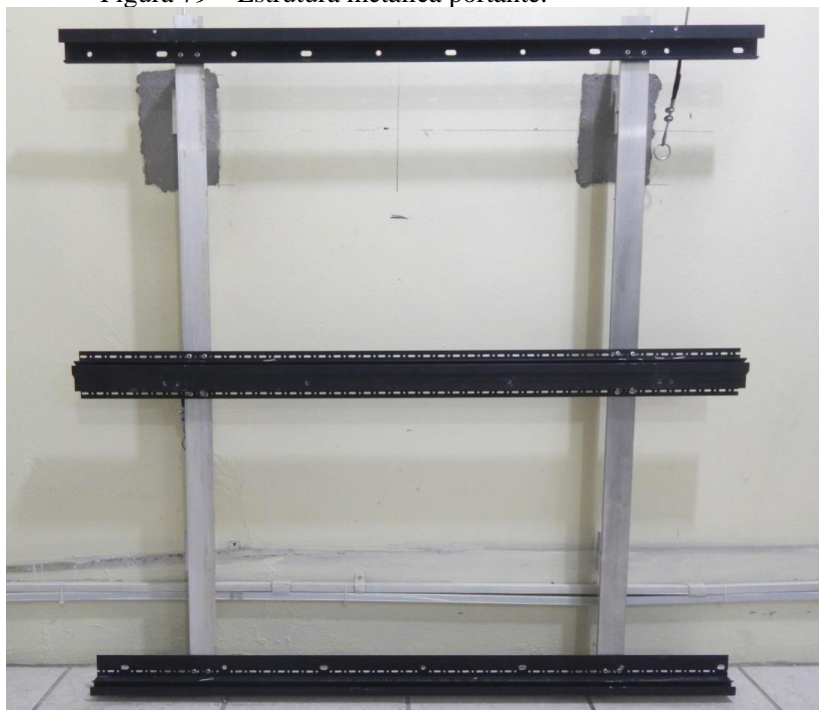
Tabela 22 – Resistência ao impacto de corpo duro de 20 J com degradação em água.

Impacto externo – Esfera de 1,0 kg (2,0 m)		
Impac.	Conjunto compósito com fibra de vidro	Conjunto compósito com fibra de juta
1°	Ruptura sem deslocamento	Ruptura sem deslocamento
2°	Afundamento sem transpasse (0,79 mm)	Fissura da placa
3°	Fissura da placa	Afundamento sem transpasse (0,19 mm)
4°	Fissura da placa	Afundamento sem transpasse (0,43 mm)
5°	Afundamento sem transpasse (0,23 mm)	Fissura da placa
6°	Fissura da placa	Afundamento sem transpasse (1,00 mm)
7°	Afundamento sem transpasse (0,65 mm)	Afundamento sem transpasse (0,35 mm)
8°	Afundamento sem transpasse (0,65 mm)	Afundamento sem transpasse (42,73 mm)
9°	Afundamento sem transpasse (2,55 mm)	Afundamento sem transpasse (0,53 mm)
10°	Afundamento sem transpasse (0,38 mm)	Fissura da placa

Fonte: A autora, 2018.

APÊNDICE D – Detalhes do ensaio de impacto de corpo duro

Figura 79 – Estrutura metálica portante.



Fonte: A autora, 2018.

Figura 80 – Ruína do sistema após impacto de 20 J: placa cerâmica sem fibra e sem resina epóxi.



Fonte: A autora, 2018.

APÊNDICE E – Descrição dos resultados do teste de arrancamento das âncoras

Tabela 23 – Resultados do teste de arrancamento de âncoras para conjunto compósito com fibra de vidro.

Profundida de do furo (mm)	Verificação da geometria do furo	∅ Escavação do cone (mm)	Quebra da amostra	Carga de fratura (kN)
7,0	Sim	33,04	Não	3,10
7,0	Sim	35,97	Não	2,60
7,0	Sim	40,70	Não	2,85
7,0	Sim	39,12	Não	3,10

Fonte: A autora, 2018.

Tabela 24 – Resultados do teste de arrancamento de âncoras para conjunto compósito com fibra de juta.

Profundida de do furo (mm)	Verificação da geometria do furo	∅ Escavação do cone (mm)	Quebra da amostra	Carga de fratura (kN)
7,0	Sim	34,21	Não	1,60
7,0	Sim	35,12	Não	1,80
7,0	Sim	30,73	Não	1,70
7,0	Sim	33,14	Não	2,15

Fonte: A autora, 2018.

ANEXO F – Comparação de peso entre os conjuntos compósitos em sistema físico de fachada ventilada

Tabela 25 – Comparativo de peso dos conjuntos compósitos em sistema físico de fachada ventilada em kg/m².

ITEM	Unid.	Fachada ventilada com fibra de vidro	Fachada ventilada com fibra de juta (S)	Fachada ventilada com fibra de juta (T)
Placa cerâmica	kg/m ²	25,42	25,42	25,42
Estrutura metálica portante	kg/m ²	2,93	2,93	2,93
Resina epóxi	kg/m ²	0,50	0,50	0,50
Tela de fibra de vidro	kg/m ²	0,14	-	-
Tela de fibra de juta (S)	kg/m ²	-	0,11	-
Tela de fibra de juta (T)	kg/m ²	-	-	0,24
TOTAL	kg/m²	29,00	28,97	29,09

Fonte: A autora, 2018.

Tabela 26 – Comparativo de peso dos conjuntos compósitos em sistema físico de fachada ventilada em percentual.

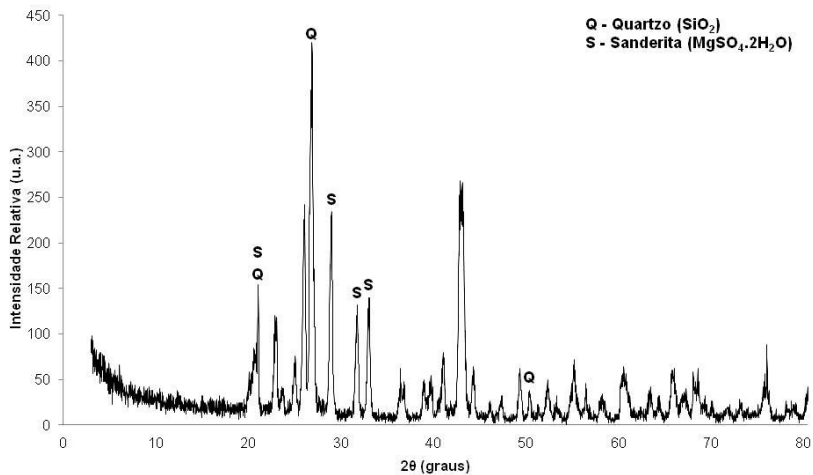
ITEM	Unid.	Fachada ventilada com fibra de vidro	Fachada ventilada com fibra de juta (S)	Fachada ventilada com fibra de juta (T)
Placa cerâmica	(%)	87,67	87,75	87,38
Estrutura metálica portante	(%)	10,11	10,12	10,08
Resina epóxi	(%)	1,72	1,73	1,72
Tela de fibra de vidro	(%)	0,49	-	-
Tela de fibra de juta (S)	(%)	-	0,40	-
Tela de fibra de juta (T)	(%)	-	-	0,82
TOTAL	(%)	100	100	100

Fonte: A autora, 2018.

ANEXOS

ANEXO A – Difração de raios-x da resina epóxi

Figura 81 – Difratoograma de raios-x da carga mineral presente na resina epóxi.



Fonte: CECAM – IDT, 2017.

As fases encontradas foram o quartzo (SiO_2 , JCPDS: 46 – 1045) e sanderita ($\text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, JCPDS: 20 – 0689).

ANEXO B – Análise dos fungos observados na degradação

B.1 Metodologia

As análises micológicas foram realizadas usando a técnica de enumeração por unidade formadora de colônias por mL (UFC/mL). O meio de diluição (água peptonada 0,1%) foi adicionado para cada material e agitado por dois minutos. Em seguida, diluições até 10^{-5} foram realizadas. Para cada diluição, foi removida uma alíquota e espalhada em duplicata na superfície do meio de cultura *Potato Dextrose Agar* (PDA) contendo cloranfenicol (100 mg) e incubado por cinco dias, a $27^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ (SILVA, 2010).

As colônias crescidas foram replicadas para meios de cultura seletivos para diferentes gêneros fúngicos e incubadas novamente por cinco dias. Os meios de cultura utilizados foram: Ágar extrato de malte (MEA) e extrato de levedura Czapek (CYA) para identificação prévia dos gêneros fúngicos. Para confirmação dos gêneros, foi realizado microcultivo.

A técnica de microcultivo foi realizada em placa de Petri estéril, onde foi adicionado suporte de vidro contendo uma lâmina com meio de cultura sólido Czapek-doc. Neste meio, cada colônia crescida foi adicionada juntamente com uma lamínula sobre as colônias. No interior da placa, foi acrescentado um pedaço de algodão com água destilada estéril, para manter a umidade. As placas foram fechadas e incubadas por cinco dias a $27^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Após este período, a lamínula contendo o crescimento das colônias fúngicas foi removida e transferida para uma lâmina contendo uma gota de corante lactofenol azul de algodão. As lâminas coradas foram visualizadas em microscópio óptico em aumento de 100 e 400 vezes. A partir da observação das características macroscópicas e microscópicas, as identificações dos gêneros fúngicos foram realizadas de acordo com as chaves taxonômicas de identificação disponíveis (PITT, HOCKING, 2009).

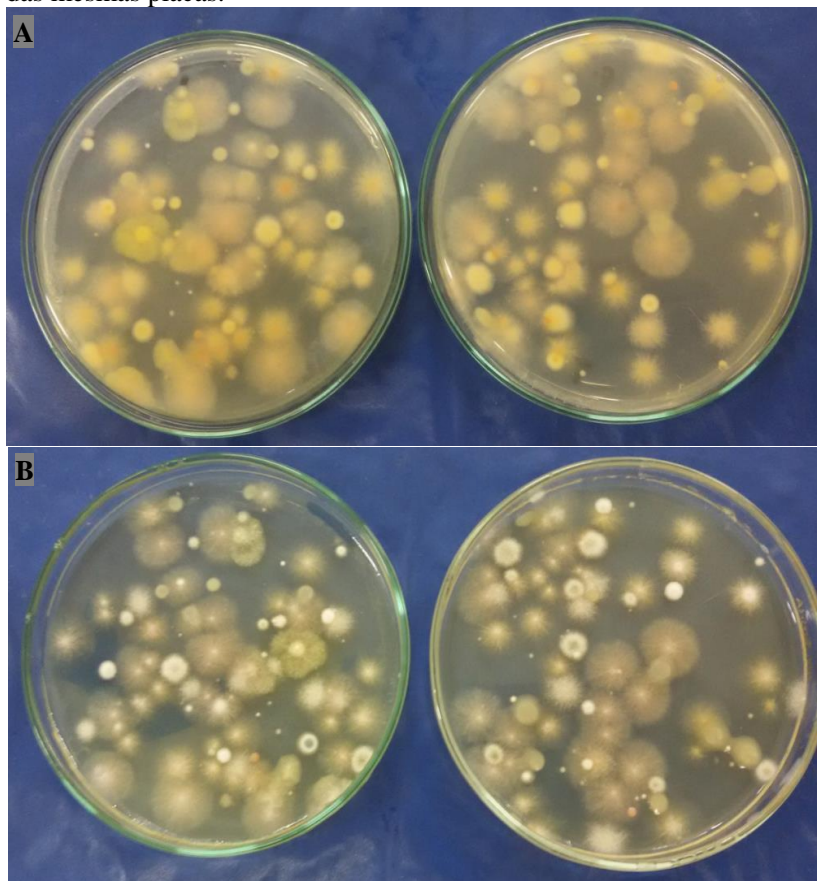
B.2 Resultados

Houve crescimento de fungos filamentosos em ambas as placas cerâmicas. No entanto, como esperado, a placa que visualmente apresentou a maior contaminação (formação de uma crosta filamentosa visível – Cer+ERFJ) foi a que obteve maior crescimento de colônias fúngicas.

B.2.1 Cer+ ERFV

Placa menos contaminada visualmente, o resultado foi de $8,3 \times 10^4$ UFC/mL. A figura 82 mostra a placa de Petri com o meio de cultura e as colônias fúngicas.

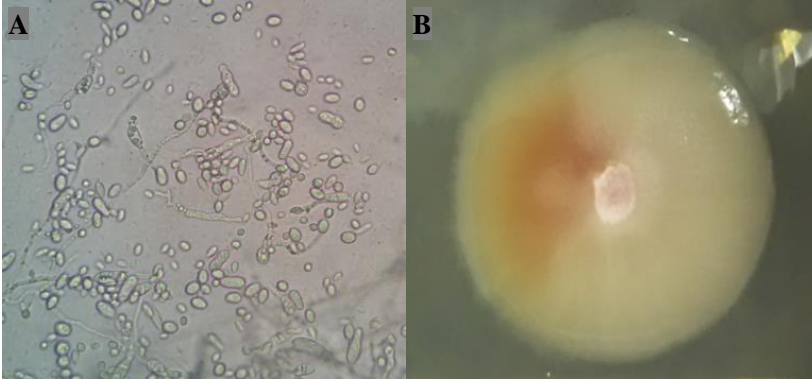
Figura 82 – Placa de Petri contendo meio de cultura PDA com crescimento de colônias fúngicas na Cer+ERFV: A) frente e B) verso, das mesmas placas.



Fonte: Ladebima, 2017.

Micro-organismo encontrado em 81% do crescimento fúngico “Leveduras” (figura 83).

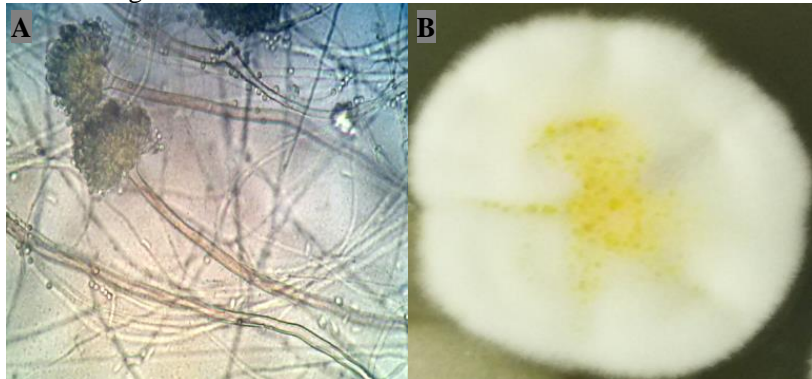
Figura 83 – (A) Microscopia de 400 vezes e (B) crescimento de colônia em meio PDA.



Fonte: Ladebima, 2017.

Micro-organismo encontrado em 17% do crescimento fúngico de “*Aspergillus* sp.” (figura 84).

Figura 84 – (A) Microscopia de 400 vezes e (B) crescimento de colônia fúngica em meio PDA.



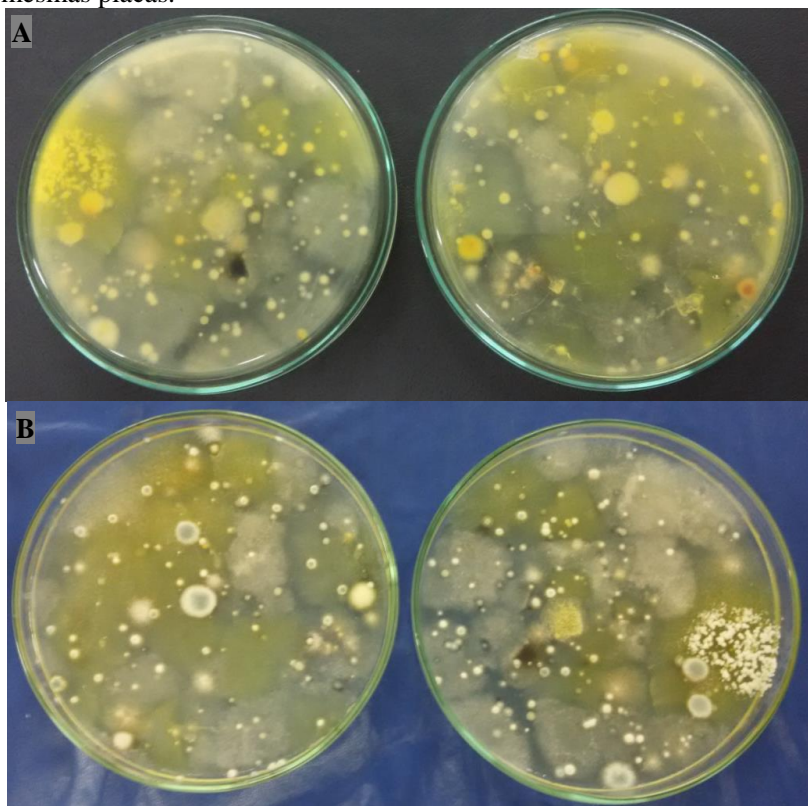
Fonte: Ladebima, 2017.

Em 2%, dos micro-organismos presentes, não foi possível a identificação.

B.2.2 Cer+ ERFJ

Placa mais contaminada visualmente, o resultado foi de $1,3 \times 10^5$ UFC/mL. A figura 85 mostra a placa de Petri com o meio de cultura e as colônias fúngicas.

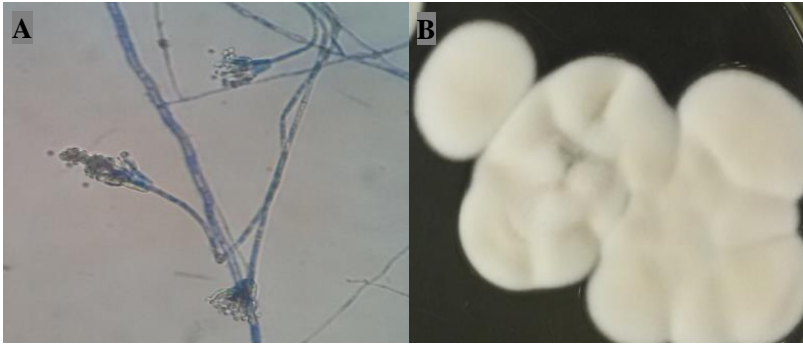
Figura 85 – Placa de Petri contendo meio de cultura PDA com crescimento de colônias fúngicas Cer+ERFJ: A) frente e B) verso, das mesmas placas.



Fonte: Ladebima, 2017.

Micro-organismo encontrado em 75% do crescimento fúngico “*Penicillium* sp.” (figura 86).

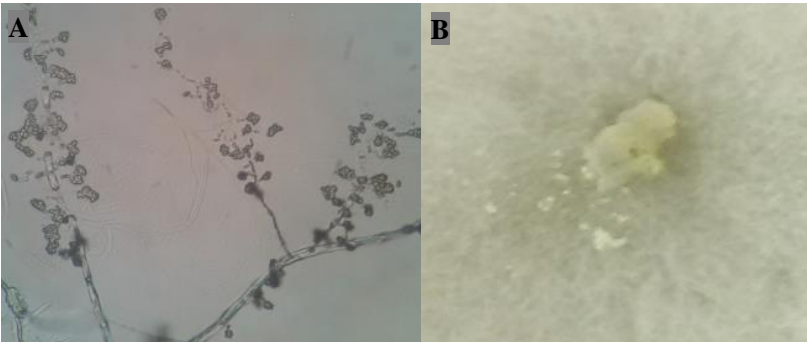
Figura 86 – (A) Microscopia de 400 vezes e (B) crescimento de colônia em meio PDA.



Fonte: Ladebima, 2017.

Micro-organismo encontrado em 18% do crescimento fúngico “*Cladosporium* sp.” (figura 87).

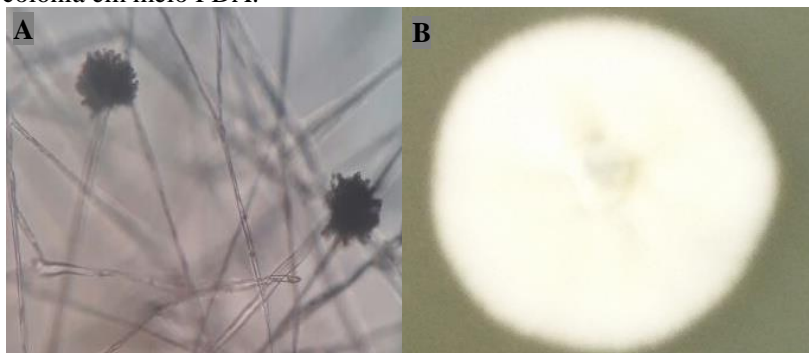
Figura 87 – (A) Microscopia de 400 vezes e (B) crescimento de colônia em meio PDA.



Fonte: Ladebima, 2017.

Micro-organismo encontrado em 5% do crescimento fúngico “*Aspergillus* sp.” (figura 88).

Figura 88 – (A) Microscopia de 400 vezes e (B) crescimento de colônia em meio PDA.



Fonte: Ladebima, 2017.

Em 2%, dos micro-organismos presentes, não foi possível a identificação.