



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CAROLINA DEL PILAR CARVALLO PINTO

**COMPORTAMENTO RESIDUAL DO COMPÓSITO DE GESSO COM
FIBRA DE SISAL TRATADOS COM PRODUTO ANTICHAMA EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Salvador
2024

CAROLINA DEL PILAR CARVALLO PINTO

**COMPORTAMENTO RESIDUAL DO COMPÓSITO DE GESSO COM
FIBRA DE SISAL TRATADOS COM PRODUTO ANTICHAMA EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Fábio César.

Agência Financiadora: CAPES

Salvador

2024

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

CARVALLO PINTO, CAROLINA DEL PILAR
COMPORTAMENTO RESIDUAL DO COMPÓSITO DE GESSO COM
FIBRA DE SISAL TRATADOS COM PRODUTO ANTICHAMA EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO / CAROLINA DEL PILAR CARVALLO
PINTO. -- SALVADOR, 2024.
205 f. : il

Orientador: SANDRO FÁBIO CÉSAR.
Tese (Doutorado - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL) -- Universidade Federal da Bahia,
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, 2024.

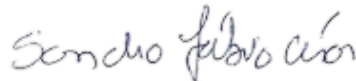
1. Flamabilidade.. 2. Sisal. . 3. Gesso. . 4.
Produtos antichamas.. 5. Incêndio.. I. FÁBIO CÉSAR,
SANDRO. II. Título.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO

CAROLINA DEL PILAR CARVALLO PINTO

APRESENTADA AO DOUTORADO EM ENGENHARIA CIVIL, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, EM 17 DE MAIO DE 2024.

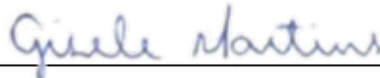
BANCA EXAMINADORA



Prof.(a) Dr.(a) **Sandro Fábio César**

Orientador

PPEC - UFBA



Prof.(a) Dr.(a) **Gisele Cristina Antunes Martins**

PCV – UEM



Documento assinado digitalmente
EDNA MOURA PINTO
Data: 18/05/2024 17:06:50-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof.(a) Dr.(a) **Edna Moura Pinto**

PPGAU - UFRN



Documento assinado digitalmente
MIRTÂNIA ANTUNES LEÃO
Data: 19/05/2024 18:35:59-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof.(a) Dr.(a) : **Mirtânia Antunes Leão**

PPGEM – IFBA



Documento assinado digitalmente
MARCELO STROZI CILLA
Data: 20/05/2024 11:00:56-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof.(a) Dr.(a) : **Marcelo Strozi Cilla**

PPEC - UFBA

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por me mostrarem o caminho da perseverança e pelo amor incondicional nos momentos bons e nas dificuldades. Ao meu pai por sempre encontrar soluções com brilho e alegria. À minha mãe, por ser a fonte de energia positiva infinita e por ser a voz que ouço todos os dias quando o caminho fica difícil. Antonio, Pablo e Pato, obrigada por não permitirem que eu me sinta inferior a ninguém. Nós quatro juntos somos sempre mais fortes.

À minha sobrinha Trinidad, que todos os dias nos mostra o verdadeiro significado da palavra resiliência. Claudia, Monse e Agu, obrigada por não me permitirem esquecer que a força está no coração.

A meus amores aqui de casa, obrigada pelo caminho que temos construído, pela perseverança para colocar as fundações, pilares e vigas, por aprender dos momentos ruins e transformá-los em momentos bons. Nós três somos uma grande família e uma grande equipe. Valentim, obrigada pelos sorrisos diários, pelas danças, pelas músicas e por me permitir aprender com você.

Sra. Lúcia e Sr. Galvão, esse projeto não seria possível sem a ajuda de vocês. Cunhada, sem você e suas palavras adocicadas, eu não teria aprendido a escrever em português. Amore grande e amore pequeno, obrigada pela alegria em cada momento criativo (são muitos).

Gostaria de agradecer ao professor Sandro pela calma quando veio a tempestade, pelas palavras de incentivo nos momentos difíceis e pelos inúmeros conselhos profissionais, pessoais e espirituais, essenciais durante o desenvolvimento deste projeto.

Não posso esquecer da Carol do laboratório Timoshenko, obrigada pela paciência na realização dos ensaios nos momentos mais inusitados, pelo amor e carinho comigo, principalmente após a gravidez

À BASF e Hamilton Rios, pelo apoio e incentivo para a realização do projeto.

À CAPES, pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa.

Ao Departamento de Construção e Materiais por me acolher e apoiar no desenvolvimento deste projeto.

Obrigada a todos que contribuíram direta ou indiretamente com este projeto.

RESUMO

Os materiais de acabamento e revestimento são uma das medidas de proteção passiva mais eficientes para a segurança contra incêndio na construção civil, e se tornam cada vez mais relevantes após diversos sinistros ocasionados pelo fogo. Diversos avanços tecnológicos e científicos permitiram o aprimoramento de materiais tradicionais, como as chapas de gesso acartonado, através do desenvolvimento de materiais compósitos. O objetivo principal desta pesquisa foi desenvolver um compósito de gesso com fibras de sisal tratadas com produtos retardantes de fogo para uso em edificações, avaliando a eficiência dos produtos CKC2020 e SHX 9020 aplicados nas fibras de sisal, a influência do teor de fibra e o número de camadas no comportamento frente ao fogo e na aderência dos compósitos, bem como o desempenho térmico quando comparados com as chapas de gesso acartonado existentes no mercado. Os resultados mostraram que o tratamento por hornificação com 10 ciclos de molhagem e secagem promoveram modificações significativas na microestrutura e na superfície das fibras, reduzindo a absorção d'água e diminuindo a natureza hidrofílica. Entretanto, as amostras tratadas com 10 ciclos de produtos antichamas melhoraram a resposta frente ao fogo e diminuíram a velocidade da queima das fibras. Os resultados também indicaram maior aderência entre a matriz de gesso e o reforço com fibras de sisal tratadas com produto antichama, aumentando a ductilidade quando utilizado o produto CKC2020 e diminuindo a resistência das chapas com o produto SHX9020. O desempenho térmico dos compósitos indicou uma diminuição da aceleração da taxa de liberação de calor das amostras e da altura da área carbonizada pelo fogo. As chapas compósitas, comparadas com as chapas de gesso acartonado ST e RF, não apresentaram a formação de brasas na superfície durante a queima e o tratamento por hornificação das fibras favoreceram a resistência frente ao fogo. As chapas compósitas à base de gesso e fibra de sisal tratadas com produtos antichamas por hornificação contribuíram para melhorar o comportamento frente ao fogo dos compósitos e proporcionam atraso de incineração em situações de incêndio.

Palavras-chave: Flamabilidade. Sisal. Gesso. Produtos antichamas. Incêndio.

ABSTRACT

Finishing and coating materials are one of the most efficient passive protection measures for fire safety in construction, and become increasingly relevant after several accidents caused by fire. Several technological and scientific advances have allowed the improvement of traditional materials, such as plasterboard sheets, through the development of composite materials. The main objective of this research was to develop a plaster composite with sisal fibers treated with fire retardant products for use in buildings, evaluating the efficiency of CKC2020 and SHX 9020 products applied to sisal fibers, the influence of fiber content and the number of layers in the behavior against fire and the adhesion of the compounds, as well as the thermal performance when compared with plasterboard sheets on the market. The results showed that the hornification treatment with 10 cycles of wetting and drying promoted significant changes in the microstructure and surface of the fibers, reducing water absorption and reducing the hydrophilic nature. However, samples treated with 10 cycles of flame retardant products improved the response to fire and reduced the speed of fiber burning. The results also indicated greater adhesion between the plaster matrix and the reinforcement with sisal fibers treated with a flame-retardant product, increasing ductility when using the CKC2020 product and reducing the resistance of the sheets with the SHX9020 product. The thermal performance of the composites indicated a decrease in the acceleration of the heat release rate of the samples and the height of the area charred by the fire. Composite sheets, compared to ST and RF plasterboard sheets, did not show the formation of embers on the surface during burning and the hornification treatment of the fibers favored fire resistance. Composite sheets based on gypsum and sisal fiber treated with flame retardant products through hornification helped to improve the fire behavior of the composites and provide a delay in incineration in fire situations.

Keywords: Fire behavior. Sisal nonwoven. Plaster. Flame retardant. Fire.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Pág.
Figura 1. Esquema para a delimitação da pesquisa.....	31
Figura 2. Fenômenos envolvidos no processo de hidratação do gesso.....	42
Figura 3. Variação de temperatura em função do tempo de pega do gesso	42
Figura 4. Esquema do carregamento recebido pela chapa.....	44
Figura 5. Produção chapa de gesso industrial em pequena indústria.	45
Figura 6. Processo de fabricação das chapas de gesso.	46
Figura 7. Bordas de acabamento.	48
Figura 8. Borda rebaixada em situações de altas temperaturas.	49
Figura 9. Classificação das fibras naturais.....	58
Figura 10. Organização estrutural das fibras vegetais	59
Figura 11. Seção transversal das fibras com e sem tratamento por hornificação.	62
Figura 12. Mantas de sisal. Grupo Hamilton Rios	66
Figura 13. Incêndio nos edifícios Andraus e Joelma.	67
Figura 14. Incêndio na Boate Kiss.....	69
Figura 15. Colapso forro em loja de tecidos.	72
Figura 16. Incêndio em residência em Santo Inácio do Piauí	73
Figura 17. Incêndio em conjunto habitacional, Massachusetts.	74
Figura 18. Curva tempo-temperatura incêndio real.	75
Figura 19. Relação entre as fases de evolução e estágios do incêndio.....	76
Figura 20. Curva de incêndio padrão.	78
Figura 21. DTG e TG para o gesso endurecido.	85
Figura 22. Curva dilatométrica para o gesso β utilizado na construção civil.	87
Figura 23. Chapa de gesso exposta ao fogo.....	89

Figura 24. Microscopia eletrônica de varredura do gesso endurecido submetido a 150°C.	89
Figura 25. Microscopia eletrônica de varredura do gesso endurecido.	90
Figura 26. Evolução da morfologia dos cristais de gesso com aumento da temperatura.	90
Figura 27. TG e DTG da manta de sisal.....	97
Figura 28. DSC para a manta de sisal.	98
Figura 29. Classificação fase matriz e fase reforço nos compósitos.	106
Figura 30. Delineamento da pesquisa.	113
Figura 31. Nomenclatura das amostras	114
Figura 32. Manta de sisal.	119
Figura 33. Equipamento Tescan, modelo: Vega 3 LMU.....	124
Figura 34. Marcações nas fibras de sisal previo ao ensaio.....	125
Figura 35. Câmara de combustão para análise de flamabilidade das amostras.	126
Figura 36. Analisador portátil Oxford Série X-MET7500.	127
Figura 37. Difratorômetro de bancada D2 Phaser (Bruker).....	128
Figura 38. Seção dos compósitos.	131
Figura 39. Montagem dos equipamentos para a execução do teste de Schlyter. ...	133
Figura 40. Ensaio de flexão em 4 pontos.	134
Figura 41. Amostras de manta de sisal após tratamento por hornificação.	139
Figura 42. Aspectos das amostras após finalizado o tratamento por hornificação com 10 ciclos de produtos.	140
Figura 43. Microscopia eletrônica de varredura da fibra de sisal <i>in natura</i>	141
Figura 44. Microscopia eletrônica de varredura da fibra de sisal com tratamento M _(T) SHX9020 ₍₁₀₎	142

Figura 45. Microscopia eletrônica de varredura da fibra de sisal com tratamento $M_{(T)}SHX9020_{(9+1)}$	143
Figura 46. Microscopia eletrônica de varredura da fibra de sisal com tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$	144
Figura 47. Microscopia eletrônica de varredura da fibra de sisal com tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(9+1)}$	145
Figura 48. Seções transversais das fibras de sisal com e sem tratamento.....	146
Figura 49. Percentual de retenção d'água médios (com desvio padrão e coeficiente de varianza) para a manta de sisal com e sem tratamento.....	149
Figura 50. Absorção d'água das amostras para cada ciclo de molhagem e secagem.	150
Figura 51. Comprimento de queima das mantas de sisal com e sem tratamento. ...	151
Figura 52. Mantas de sisal após ensaio de flamabilidade.	152
Figura 53. Difratoograma de raios X do gesso em pó.	159
Figura 54. Chapas reforçadas com manta de sisal sem tratamento depois de serem expostas a chamas no teste de Schylter modificado.	167
Figura 55. Chapas reforçadas com manta de sisal tratadas com produto antichama depois de serem expostas a chamas no teste de Schylter modificado.	168
Figura 56. Chapas de gesso acartonado depois de serem expostas a chamas no teste de Schylter modificado.	169
Figura 57. Resultados das amostras durante o ensaio a flexão em 4 pontos	170
Figura 58. Curva força versus deslocamento para o compósito de gesso reforçado com uma e duas camadas de manta de sisal <i>in natura</i>	171
Figura 59. Curva força versus deslocamento para os compósitos $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ e $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}SHX9020_{(10)}$	173

Figura 60. Curva força versus deslocamento para os compósitos $G_{(\phi)}M_{(\tau)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ e $G_{(\phi)}M_{(\tau)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}SHX9020_{(10)}$	174
Figura 61. Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos de gesso reforçados com manta de sisal sem tratamento antichama.	178
Figura 62. Microscopia eletrônica de varredura do compósito $G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ após ensaio de teste Schlyter.	179
Figura 63. Microscopia eletrônica de varredura do compósito $G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ após ensaio de teste Schlyter.	180
Figura 64. Microscopia eletrônica de varredura do compósito $G_{(\phi)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}$ após ensaio de teste Schlyter.	181
Figura 65. Microscopia eletrônica de varredura do compósito $G_{(\phi)}M_{(\tau)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}$ após ensaio de teste Schlyter.	182
Figura 66. Resultados de absorção de água para os 5 primeiros ciclos	204
Figura 67. Resultados de absorção de água para os 5 últimos ciclos.....	204

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1. Publicações realizadas sobre o tema escolhido na pesquisa.....	36
Tabela 2. Exigências químicas, físicas, mecânicas e classificação do gesso na construção.....	40
Tabela 3. Características geométricas das chapas de gesso acartonado.	49
Tabela 4. Características físicas das chapas de gesso acartonado.....	50
Tabela 5. Características dimensionais das chapas de gesso nacionais.....	50
Tabela 6. Resistencia ao fogo de paredes em chapas de gesso para drywall.	52
Tabela 7. Composição química fosfogesso.....	54
Tabela 8. Propriedades físico-mecânicas das fibras vegetais.....	58
Tabela 9. Composição química fibras vegetais.....	60
Tabela 10. Características da planta <i>Agave Sisalana Perr</i>	64
Tabela 11. Classificação dos materiais exceto para revestimentos de piso.....	83
Tabela 12. Propriedades térmicas das chapas de gesso.....	91
Tabela 13. Composição química e inflamabilidade das fibras vegetais	95
Tabela 14. Degradação térmica para quatro tipos de fibras naturais.....	96
Tabela 15. Produtos antichama para fibras naturais comercializadas no Brasil.....	101
Tabela 16. Resultados para a caracterização física da manta de sisal.....	136
Tabela 17. Resultados ensaio de flamabilidade das mantas de sisal com e sem tratamento.....	154
Tabela 18. Matriz de decisões para a escolha do produto antichama.....	155
Tabela 19. Resultados dos ensaios de caracterização física do gesso em pó.	156
Tabela 20. Resultados do ensaio de FRX do gesso em pó.	157
Tabela 21. Resultados para as concentrações de óxidos do gesso em pó.....	158
Tabela 22. Resultados do ensaio de consistência normal das pastas de gesso.....	160

Tabela 23. Resultados dos ensaios de Minislump e tempo de pega das pastas de gesso.....	161
Tabela 24. Resultados para propagação das chamas (P), o instante em que ocorreu a máxima propagação (I) e a duração das chamas após desligado o queimador (D).	162
Tabela 25. Resultados para a altura da área carbonizada, os tempos de início da propagação das fissuras (t_1) e o tempo em que se atinge a multifissuração das chapas (t_2).	164
Tabela 26. Resultados para a temperatura da face interna (T_i), fase externa (T_e) e o tempo em que se inicia o esfarelamento das chapas (t).	165
Tabela 27. Resultados do ensaio de flexão em 4 pontos nas chapas compósitas..	175

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Levantamento das medidas de segurança contra incêndio passivas.....	22
Quadro 2. Vantagens e limitações do gesso.....	23
Quadro 3. Vantagens e limitações das chapas de gesso em situações de incêndio.	24
Quadro 4. Vantagens e limitações das fibras vegetais comparadas as fibras sintéticas.	25
Quadro 5. Tipos de chapas de gesso acartonado.....	48
Quadro 6. Tratamento de hornificação com água para diversas fibras vegetais.....	63
Quadro 7. Tratamento antichama das fibras vegetais utilizadas em compósitos	100
Quadro 8. Aderência dos compósitos de gesso reforçados com fibras naturais.	109
Quadro 9. Resistência ao fogo de compósitos de gesso reforçados com fibras naturais.	111
Quadro 10. Ensaio etapa 1 da pesquisa.	116
Quadro 11. Ensaio etapa 2 desta pesquisa.....	116
Quadro 12. Ensaio etapa 3 desta pesquisa.....	117
Quadro 13. Ensaio etapa 4 desta pesquisa.....	117
Quadro 14. Ensaio de aderência para a etapa 5 desta pesquisa.	118
Quadro 15. Ensaio do comportamento frente ao fogo. Etapa 5 desta pesquisa. ..	118
Quadro 16. Pastas de gesso avaliadas.....	129
Quadro 17. Produção pasta de gesso.....	130
Quadro 18. Especificação dos compósitos que serão desenvolvidos.	132

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Todos os símbolos, siglas e abreviaturas utilizados ao longo do texto devem ser listados aqui, e, ordem alfabética. Recomenda-se a elaboração de lista própria para cada tipo quando o número destas for significativo. Seguem alguns exemplos:

ASTM	American Society for Testing and Materials Standards
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DTG	Termogravimetria derivada
DRX	Difração de raios x
FRX	Fluorescência de raios x
MEV	Microscopia eletrônica e varredura
NBR	Norma Brasileira
ISO	International Organization for Standardization
IT	Instruções Técnicas
TRRF	Tempo requerido de resistência ao fogo
m_u	Massa da amostra após saturação em água
m_s	Massa da amostra seca em estufa
m_{sat}	Massa da amostra saturada em água após imersão e fervura
%	Percentual
°C	Grau Celsius
ϕ	Fibras de sisal sem tratamento
T	Fibras de sisal com tratamento
S	Enxofre
Ca	Cálcio
Cl	Cloro
P	Fósforo
Al	Alumínio

K	Potássio
Sr	Estrôncio
Fe	Ferro
Si	Silício
Na	Sódio
Mg	Magnésio
Ti	Titânio
F	Flúor
As	Arsênio
Ce	Cério

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	8
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE QUADROS	14
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
SUMÁRIO	17
1 INTRODUÇÃO	21
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO.....	21
1.2 PROPOSTA DO TRABALHO	26
1.2.1 Formulação do problema	26
1.2.2 Hipótese.....	26
1.2.3 Objetivos	27
1.2.4 Justificativa	27
1.2.5 Metodologia da pesquisa	30
1.2.5.1 Classificação do estudo.....	30
1.2.5.2 Delimitação da pesquisa.	31
1.2.5.3 Identificação das variáveis	32
1.2.5.4 Técnicas de coleta de dados.....	33
1.2.6 Estrutura da pesquisa	33
1.2.7 Resultados esperados.....	35
1.2.8 Perspectivas.....	35
1.2.8.1 Originalidade da pesquisa	35
1.2.8.2 Contribuições da pesquisa	37
2 REVISÃO DA LITERATURA	39
2.1 GESSO E FIBRAS NATURAIS	39
2.1.1 Gipsita.....	39
2.1.1.1 Hidratação do gesso.....	40
2.1.2 Chapas de gesso	43
2.1.2.1 Chapas de gesso liso	44
2.1.2.2 Chapas de gesso acartonado.....	45

2.1.2.3	<i>Fosfogesso</i>	52
2.1.3	Características, potencialidades e limitações das chapas de gesso liso e acartonado	54
2.1.4	Fibras naturais	57
2.1.4.1	<i>Fibras vegetais</i>	57
2.1.4.2	<i>Estrutura e composição química das fibras vegetais</i>	59
2.1.4.3	<i>Natureza hidrofílica das fibras vegetais</i>	61
2.1.4.4	<i>Fibras de sisal</i>	64
2.2	SITUAÇÕES DE INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES	66
2.2.1	Evolução do incêndio	74
2.2.2	Incêndio real e incêndio padrão	77
2.2.3	Segurança das estruturas em situações de incêndio	79
2.2.4	Resistência ao fogo dos materiais de acabamento e revestimento	80
2.2.5	Reação ao fogo dos materiais de acabamento e revestimento	81
2.3	COMPORTAMENTO FRENTE AO FOGO DO GESSO E AS FIBRAS NATURAIS	84
2.3.1	Gesso em situações de incêndio	84
2.3.1.1	<i>Variação dimensional e ablação do gesso endurecido</i>	86
2.3.1.2	<i>Propriedades térmicas das chapas gesso acartonado</i>	91
2.3.2	Fibras naturais em situações de incêndio	94
2.3.2.1	<i>Flamabilidade das fibras naturais</i>	94
2.3.2.2	<i>Retardantes de chamas</i>	98
2.3.2.3	<i>Escolha do produto antichama</i>	101
2.3.3	Potencialidades e limitações do gesso endurecido e das fibras de sisal frente ao incêndio	102
2.3.3.1	<i>Gesso endurecido</i>	102
2.3.3.2	<i>Fibras naturais</i>	104
2.3.4	Considerações finais	104
2.4	COMPORTAMENTO FRENTE AO FOGO DOS COMPÓSITOS CERÂMICOS	
	105	
2.4.1	Aderência fibra-matriz	107
2.4.2	Comportamento frente ao fogo	109
3	METODOLOGIA	112
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	113

3.2	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS.....	114
3.3	MATERIAIS	119
3.3.1	Gesso de fundição e aditivo superplastificante.....	119
3.3.2	Mantas de sisal.	119
3.3.3	Produtos antichama.	120
3.4	MÉTODOS	120
3.4.1	Manta de sisal	120
3.4.1.1	<i>Caracterização física.....</i>	120
3.4.1.2	<i>Tratamento da manta de sisal.....</i>	121
3.4.2	Comportamento físico da manta de sisal	122
3.4.2.1	<i>Absorção d'água.....</i>	122
3.4.2.2	<i>Microscopia eletrônica de varredura.....</i>	123
3.4.3	Comportamento frente altas temperaturas da manta de sisal.....	125
3.4.3.1	<i>Teste de flamabilidade.</i>	125
3.4.4	Caracterização do gesso em pó	126
3.4.4.1	<i>Caracterização física.....</i>	126
3.4.4.2	<i>Caracterização química.....</i>	127
3.4.4.3	<i>Caracterização mineralógica.....</i>	128
3.4.5	Desenvolvimento da pasta de gesso	129
3.4.5.1	<i>Ensaio na pasta no estado fresco.....</i>	130
3.4.6	Especificação dos compósitos.....	131
3.4.7	Comportamento dos compósitos frente ao fogo	132
3.4.8	Aderência dos compósitos	134
3.4.8.1	<i>Flexão em 4 pontos.....</i>	134
3.4.8.2	<i>Microscopia eletrônica de varredura.....</i>	135
4	RESULTADOS	136
4.1	MANTA DE SISAL.....	136
4.1.1	Caracterização física da manta de sisal	136
4.1.2	Tratamento da manta de sisal por hornificação.....	137
4.2	COMPORTAMENTO FÍSICO DA MANTA DE SISAL.....	141
4.2.1	Microscopia eletrônica de varredura.	141
4.2.2	Absorção d'água.....	148
4.3	COMPORTAMENTO FRENTE A ALTAS TEMPERATURAS DA MANTA DE SISAL	151

4.3.1	Teste de flamabilidade	151
4.3.2	Escolha do produto antichama.....	154
4.4	CARACTERIZAÇÃO DO GESSO EM PÓ	156
4.4.1	Caracterização física do gesso em pó	156
4.4.2	Caracterização química do gesso em pó.....	157
4.4.3	Caracterização mineralógica do gesso em pó	159
4.5	COMPORTAMENTO DA PASTA DE GESSO NO ESTADO FRESCO.....	160
4.6	COMPORTAMENTO DOS COMPÓSITOS FRENTE AO FOGO	162
4.7	ADERÊNCIA DOS COMPÓSITOS.....	169
4.7.1	Flexão em 4 pontos	169
4.7.2	Microscopia eletrônica de varredura.	177
5	CONCLUSÕES.....	183
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	190
7	REFERÊNCIAS	191
	APÊNDICE A – Detalhamento resultados de absorção de água	204
	ANEXO 1 – Avaliação à flamabilidade hoizontal	205

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

A segurança contra incêndio e o comportamento dos materiais frente ao fogo no mundo são encaradas como uma área de pesquisa, desenvolvimento de normativa, conhecimento e ensino; que se encontram em constante evolução na análise e testagem dos materiais, sistemas construtivos e componentes que conformam a edificação por meio de soluções inovadoras (DEL CARLO, 2019 ; SEITO *et al.*, 2013).

Segundo Negrisolo *et al.* (2019), a área de conhecimento de segurança contra incêndio no Brasil é recente, iniciada no final do século XX, caracterizando-se pela carência de informações de qualidade e a falta de informações estatísticas. Esta realidade também é citada por Del Carlo (2019), que indica a importância das soluções construtivas inovadoras que permitam garantir a construção mais segura e implementar procedimentos e medidas de segurança contra incêndios para evitar a perda de vidas e de bens.

De acordo com IT (2019), Negrisolo *et al.* (2019) e Oguc (2020) colocam que as medidas de segurança contra incêndio podem ser classificadas em medidas ativas e passivas. As medidas ativas são todas aquelas que requerem energia para seu correto funcionamento permitindo apagar o incêndio. Por outro lado, as medidas passivas não apresentam essa necessidade e geralmente servem para evitar que o incêndio aconteça e se propague, sendo incorporadas, portanto, diretamente aos sistemas construtivos da edificação e sendo concebidas na fase de projeto, permitindo isolar a estrutura aos efeitos do incêndio durante um período de tempo (BERTO, 1991).

O Quadro 1 apresenta o levantamento de medidas passivas utilizadas na construção civil e que contribuem com a segurança contra incêndio.

Quadro 1. Levantamento das medidas de segurança contra incêndio passivas.

Soluções passivas	
1. Organização dos espaços do edifício	Acesso a edificação;
	Implantação do edifício;
	Distribuição e geometria dos espaços internos; Circulação vertical e horizontal na edificação;
2. Segurança estrutural	Resistência ao fogo;
	Estabilidade funcional;
	Dimensionamento das estruturas;
	Colapso estrutural;
3. Materiais de acabamento e revestimento contra o fogo	Sistemas construtivos para vedações (estanqueidade, isolamento térmico);
	Amortecedores térmicos que evitam a propagação do fogo;
	Materiais ignífugos. Exemplos: Argamassas e Pinturas intumescentes
	Materiais projetados como fibras, produtos à base cimentícia ou gesso;
	Materiais rígidos e semirrígidos (lã de rocha e gesso acartonado);
	Materiais utilizados para as instalações elétricas. Exemplo: Fiação elétrica.
4. Saídas de emergência	Dimensionamento saídas
	Portas corta fogo
	Antecâmaras
5. Sinalização contra incêndio	Placas de equipamentos e alarmes, orientação e salvamento, proibição e alerta
6. Sistemas de controle de fumaça	Ventilação natural

Fonte. Adaptado de IT (2019); Negrisolo *et al.* (2019); Ono; Galhano; Vargas (2013); Pignatta *et al.* (2013)

No Quadro 1 é possível observar que as soluções passivas apresentadas são utilizadas simultaneamente nas edificações, destacando-se os materiais de acabamento e revestimento, que dificultam o surgimento de um princípio de incêndio e restringindo seu desenvolvimento. No entanto, o comportamento dos materiais de acabamento e revestimento frente ao fogo, são menos exploradas por razões diversas, tais como a maior quantidade de tempo necessária para serem pesquisadas cientificamente, a dificuldade de realizar análises laboratoriais e os respectivos ajustes na sua composição (ONO; GALHANO; VARGAS, 2013).

Nesse contexto, se faz necessário entender o comportamento frente ao fogo dos materiais de acabamento e revestimento. Este tipo de solução passiva sempre esteve presente na construção civil, com maior relevância após diversos incidentes e tragédias ocasionadas pelo fogo. O desempenho dos materiais frente ao fogo dos materiais deve ser considerado por meio da verificação do potencial para contribuir com o crescimento e propagação do fogo, desenvolvimento de fumaça e gases na fase de inflamação generalizada e de extinção do fogo, contribuição para a evacuação das pessoas, capacidade para salvar vidas e evitar desmoronamentos (MITIDIERI, 2013; NEGRISOLO *et al.*, 2019; SEITO *et al.*, 2013).

Entre os materiais tradicionais utilizados para revestimento e acabamento em situações de incêndio encontra-se o gesso. Contudo, a aplicação está condicionada às vantagens e limitações do material (Quadro 2).

Quadro 2. Vantagens e limitações do gesso.

Vantagens	Limitações
Massa específica (2,7 g/cm ³)	Solubilidade em contato com a água
Trabalhabilidade e fácil manuseio	Volume de resíduos na aplicação
Material reciclável e reutilizável	Lixiviação por colação de água constante
Resistência à compressão (23 MPa) e resistência ao impacto de corpo mole (9,8 J)	Dureza e rigidez do material
Contração a altas temperaturas e variações dimensionais não expressivas	Estabilização química e física durante a dissolução do gesso em pó
Resistência à tração normal (3,33 MPa)	Módulo de elasticidade (3823 MPa)
Resistência ao fogo de 30 a 120 minutos, segundo a composição do sistema construtivo	Esfarelamento quando submetido a altas temperaturas
Aderência com outras superfícies e tensão de arrancamento friccional de 0,77 MPa	Aderência com materiais hidrofílicos

Fonte. Adaptado de (BENVINDO DA LUZ; FREITAS, 2008; BRANDÃO, 2015; PADEVĚT; TESÁREK; PLACHÝ, 2011; PINTO, 2018; SOPHIA; SAKTHIESWARAN, 2016).

A partir destas vantagens e limitações, verifica-se que os principais usos do gesso na construção civil, para o desenvolvimento de vedações verticais e forros, ocorrem na forma de blocos e chapas de gesso acartonado industrializadas. As chapas de gesso acartonado estão presentes na arquitetura brasileira desde a década de 70 e seu uso vem crescendo continuamente, com maior frequência desde meados

dos anos 90 na construção de edificações residenciais, comerciais e industriais (LUCA, 2018). No entanto, quando as chapas de gesso acartonado são submetidas a altas temperaturas, apresentam vantagens e limitações, como demonstra o Quadro 3:

Quadro 3. Vantagens e limitações das chapas de gesso acartonado em situações de incêndio.

Vantagens	Limitações
Isolante térmico	Tensões internas
Não inflamável	Perda de rigidez
Natureza hidrofílica	Diminuição da resistência
Porosidade	Menor durabilidade
Densidade	Ablação
Teor de umidade	Solubilidade
Desidratação e contração	Colapso e ruína total

Fonte. Adaptado de Lucolano *et al.* (2018); Payraudeau Le Roux *et al.* (2016); Zhang *et al.* (2019).

Assim, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para melhorar o desempenho das chapas de gesso em altas temperaturas, transformando as limitações em potencialidades, através do desenvolvimento de compósitos com matriz de gesso reforçados em fibras sintéticas e fibras vegetais. Os compósitos reforçados com fibras vegetais combinam as propriedades mais relevantes do gesso e das fibras vegetais, contribuindo com a melhora do desempenho térmico e mecânico do gesso, evitando o colapso da chapa de gesso acartonado em situações de incêndio (JAUHARI; MISHRA; THAKUR, 2015).

No Quadro 4 é possível observar as contribuições e limitações das fibras vegetais, em relação às fibras sintéticas, que determinam a incorporação do material como reforço no desenvolvimento de compósitos.

Quadro 4. Vantagens e limitações das fibras vegetais comparadas as fibras sintéticas.

Vantagens	Limitações
Custo	Propriedades mecânicas inferiores
Leveza	Absorção de água
Flexível	Durabilidade
Renovabilidade	Resistência ao fogo
Biodegradáveis	Variação na qualidade da fibra
Isolamento térmico e acústico	Temperatura de processamento restrita
Não tóxicas	Resistência térmica
Consumo de energia	Resistência microbiana
Não geram resíduos após a queima	Ciclos de cultivo para obter a matéria prima

Fonte. Adaptado de (ALVES *et al.*, 2013; GHOLAMPOUR, 2020)

Na literatura existem diversas fibras vegetais utilizadas para o desenvolvimento de compósitos com matriz de gesso, no entanto, as fibras de coco e as fibras de sisal são as fibras que permitem o desenvolvimento de mantas industrializadas devido a suas características físicas, composição química e as propriedades mecânicas. As fibras de sisal apresentam maior módulo de elasticidade e resistência à tração, assim como menor deformação máxima do que as fibras de coco, o que as torna a fibra mais apropriada para os compósitos (APARECIDA; AGOPYAN, 2007).

As fibras de sisal apresentam vantagens como alta porosidade, baixa massa específica de $1,36 \text{ g/cm}^3$ e baixa condutividade térmica de $0,75 \text{ W/mK}$ (PINTO, 2018); no entanto, é possível identificar algumas limitações como uma baixa resistência térmica de $0,23 \text{ m}^2\text{K/W}$ (PINTO, 2018) e a inflamabilidade do material, o que torna essencial o tratamento antichama das fibras antes da produção do compósito com matriz de gesso, para melhorar o comportamento frente ao fogo das fibras (PHIRI; KHOATHANE; SADIKU, 2013).

Este panorama de desconhecimento do comportamento frente ao fogo indica a necessidade de explorar melhor os materiais tradicionais utilizados na construção civil e, assim, propor soluções inovadoras que tornem limitações – tais como fissuramento, resistência mecânica, durabilidade, ablação, absorção de água - em

potencialidades que contribuam com o desempenho em situações de incêndio do material (CAMPILHO, 2016; IUCOLANO *et al.*, 2018; KEERTHAN; MAHENDRAN, 2013; KERSE *et al.*, 2016; PAYRAUDEAU LE ROUX *et al.*, 2016; RAHMANIAN, 2011; ZHANG *et al.*, 2019). Nesse sentido, o tratamento antichama do reforço com manta de sisal que compõe o compósito é fundamental para otimizar o comportamento frente ao fogo, permitindo contribuir com as medidas de segurança contra incêndio para uso nas edificações.

1.2 PROPOSTA DO TRABALHO

Este subitem é composto pela formulação do problema, hipóteses, objetivo geral e específicos, justificativas, metodologia empregada, estrutura da pesquisa, resultados esperados e perspectivas da pesquisa.

1.2.1 Formulação do problema

Para a formulação do problema desta pesquisa se identifica o assunto, tema e problema da pesquisa:

Assunto: Reação ao fogo do compósito a base de gesso com fibras de sisal após situações de incêndio.

Tema: Chapa de gesso estruturado com fibra vegetal em situação de incêndio.

Problema: A chapa compósita à base de gesso e fibra de sisal tratada com produtos antichamas proporciona atraso de incineração em situações de incêndio?

1.2.2 Hipótese

O tratamento por hornificação das fibras de sisal com produtos retardantes de chamas contribuirá para melhorar o comportamento frente ao fogo do compósito à base de gesso e fibra de sisal para produção de chapas em situação de altas temperaturas.

1.2.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um compósito de gesso com fibra de sisal tratada com produtos retardantes de fogo para uso em edificações.

Para atender ao objetivo geral, tem-se os seguintes objetivos específicos:

1. Avaliar a eficiência do compósito com tratamentos de produtos retardantes de chama nas fibras de sisal, submetidos a altas temperaturas, para escolher os produtos com melhor desempenho térmico na fibra de sisal e no gesso.
2. Propor chapas a partir de um compósito tratado com produto antichama nas fibras de sisal, utilizando diversas camadas de fibras de sisal e gesso para avaliar o comportamento frente ao fogo.
3. Verificar a aderência entre a matriz de gesso e as fibras de sisal após tratamento das fibras de sisal com produto antichama.
4. Avaliar comparativamente o desempenho térmico em relação ao fogo dos compósitos de gesso e fibras de sisal propostos com as chapas de gesso acartonado existentes no mercado (ST e RF).

1.2.4 Justificativa

Uma vez estruturados os objetivos a serem alcançados, ressaltam-se as justificativas desta pesquisa, chamando a atenção para os seguintes pontos:

- O compósito de gesso reforçado com fibras de sisal necessita ser estudado e analisado quanto ao comportamento frente ao fogo para o uso em edificações e, assim, propor novos produtos na área de segurança contra incêndio, contribuindo com a geração de conhecimento para pesquisa, ensino e aplicação na construção civil.

- Os materiais de revestimento são responsáveis pelo aumento da propagação do incêndio, expondo os sistemas estruturais da edificação às altas temperaturas e agravando o comportamento frente ao fogo.
- Os estudos brasileiros e internacionais que trabalham com gesso e chapas de gesso acartonado enfatizam as pesquisas nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Enquanto isso, as pesquisas de fibras de sisal estão focadas apenas nas propriedades mecânicas de acordo com a dosagem, orientação e geometrias das fibras, e deixam a desejar no que se refere ao comportamento destes materiais frente ao fogo.
- O estudo do comportamento dos produtos antichama existentes no mercado para o tratamento das fibras de sisal *in natura* é uma lacuna dentro dos estudos desenvolvidos para as medidas de segurança contra incêndio que visam contribuir com a melhoria do comportamento frente ao fogo de materiais utilizados na construção civil.
- A extração da matéria prima do gesso (gipsita) no Brasil corresponde a 0,6% da produção mundial (13º país com maior produção no mundo), destacando-se o estado de Pernambuco e o polo gesseiro do Araripe, responsável por 79,7% da produção nacional, cuja governança e gestão são exercidas pelo Sindicato da Indústria do Gesso do Estado de Pernambuco (SECRETARIA DE GEOLOGIA, 2020). Esta realidade nacional é um incentivo para o estudo e desenvolvimento de novos produtos de gesso.
- Outro fator que impulsiona a pesquisa são os investimentos em produtos à base de gesso, como por exemplo, as chapas de gesso destinadas a países emergentes e que correspondem a 3459 toneladas em 2018 (LUCA, 2018; SECRETARIA DE GEOLOGIA, 2020).

- Com a introdução de novas tipologias de chapa de gesso acartonado no mercado nacional e internacional, as empresas procuram otimizar seu comportamento frente ao fogo através do aprimoramento das propriedades térmicas do material. No entanto, diferentemente do que ocorre em países como Canadá, Japão, Estados Unidos e Nova Zelândia, no Brasil, as informações referentes as propriedades térmicas da chapa de gesso não são informadas ao consumidor ou aos profissionais da área.
- Pesquisadores como Keerthan e Mahendran (2012); Kontogeorgos; Mandilaras; Founti (2011); Payraudeau Le Roux *et al.* (2016) e Zhang *et al.* (2019), analisaram as propriedades físicas das chapas de gesso expostas a altas temperaturas e identificaram fissuras microscópicas e diminuição da resistência mecânica a partir de 150°C, assim como o colapso do material a partir de 750°C. Esses dados incentivam o estudo sobre a influência do aumento das temperaturas e do tratamento antichamas no micro fissuramento do material.
- A extração das folhas de sisal, por ser um recurso renovável, agride menos ao meio ambiente (contribuindo para a sustentabilidade), não apresenta riscos à saúde dos operários e requer menor quantidade de energia durante a extração e processamento do material, quando comparada com as fibras sintéticas. Isto é um incentivo para o estudo, desenvolvimento e aprimoramento de um material com reforço em fibras de sisal (ALAM *et al.*, 2014; MILANESE *et al.*, 2012).
- As fibras de sisal são utilizadas para a produção de produtos artesanais e produtos para a indústria automobilística, náutica, aeroespacial, agricultura e da construção civil, principalmente com matrizes cerâmicas e poliméricas

(MILANESE *et al.*, 2012). Estas aplicações das fibras de sisal indicam que o mercado das fibras está em expansão por meio do uso de novas tecnologias que possibilitam o desenvolvimento de novos produtos.

- Outro elemento incentivador é a alta produção de fibras de sisal no território brasileiro, superior a países referência como Quênia, Tanzânia e China. O Brasil é o maior produtor de fibras de sisal no mundo, com 40% da produção, concentrando 93,5% da produção no Semiárido da Bahia, no município de Valente (GHOLAMPOUR, 2020). Assim, esta pesquisa pretende valorizar a matéria prima nacional, contribuindo com a geração de emprego e renda de pequenos produtores.
- A construção civil tem a partir do desenvolvimento da pesquisa nacional do compósito de gesso com fibras de sisal uma alternativa para sistemas construtivos integrados e pré-fabricados, diminuindo o tempo de execução da obra.

1.2.5 Metodologia da pesquisa

1.2.5.1 Classificação do estudo

Conforme Da Silva e Muszkat (2001), esta pesquisa se caracteriza por ser de natureza aplicada, pois ela propõe gerar conhecimentos para aplicações práticas com o intuito de resolver um problema específico. Do ponto de vista da abordagem do problema, pode ser classificada como pesquisa quantitativa, visto que requiere o uso de recursos e técnicas estatísticas de análise. Em relação aos objetivos propostos, a pesquisa é considerada uma pesquisa exploratória que permite identificar os fatores que contribuem para a ocorrências de fenômenos visando proporcionar maior familiaridade com o problema. E também a pesquisa pode ser classificada como sendo de tipo experimental, de acordo com os procedimentos técnicos, uma vez que

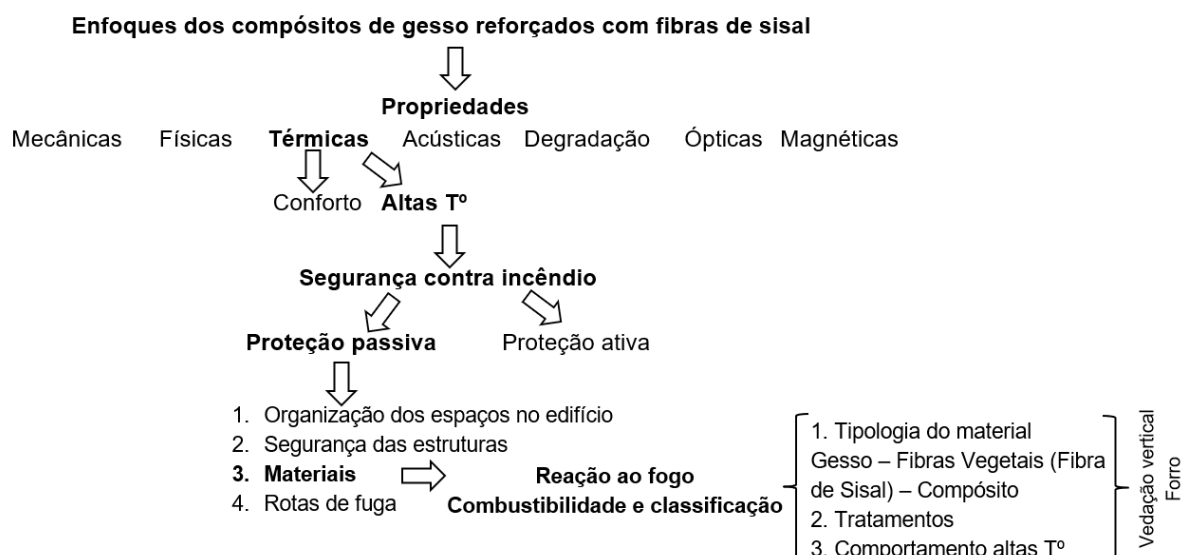
que são determinados um objeto de estudo, as variáveis que o influenciam e as formas de controle e observação.

1.2.5.2 Delimitação da pesquisa.

Muitos enfoques podem ser adotados ao se pesquisar o tema compósitos de gesso reforçados com fibras de sisal. Estes poderão abordar questões relacionadas as propriedades mecânicas, físicas, térmicas, acústicas, de degradação, ópticas e magnéticas. Todas as abordagens são importantes e de grande relevância, no entanto, devido à complexidade destas propriedades, neste trabalho optou-se por pesquisar o aspecto térmico dentro da temática dos compósitos de gesso reforçados com fibras de sisal.

A Figura 1 indica que existe um universo amplo de questões a serem pesquisadas relacionadas às propriedades térmicas dos compósitos de gesso reforçados com fibras de sisal. Essas propriedades podem ser analisadas em diversas temperaturas, seja na temperatura de conforto (entre 20°C e 26°C de acordo com a Resolução N°9:2003 da ANVISA) e em altas temperaturas (a partir de 500°C). Optou-se por pesquisar a reação ao fogo do material composto exposto a altas temperaturas.

Figura 1. Esquema para a delimitação da pesquisa.



Fonte. Autora.

Outro aspecto a ser ressaltado na Figura 1 é a diversidade de soluções utilizadas como medidas de segurança contra incêndio na construção civil, agrupadas pelo tipo de proteção providenciada frente a um incêndio: proteção passiva ou ativa. Aqui, destaca-se que esta pesquisa se concentra na proteção passiva das edificações.

As proteções passivas para a segurança e combate ao incêndio estão determinadas pela organização dos espaços no edifício, segurança das estruturas, materiais de acabamento e revestimento, e rotas de fuga. Foi, então, considerada na escolha do tema a relevância dos materiais de acabamento e revestimento na proteção passiva das edificações por ser uma lacuna para o compósito de gesso com fibras de sisal, a partir da combustibilidade e classificação, o tratamento antichama e o comportamento frente ao fogo.

1.2.5.3 *Identificação das variáveis*

As variáveis intervenientes nesta pesquisa são:

- Tipo de fibra de sisal utilizada para a produção do compósito;
- Teor de umidade da fibra de sisal;
- Tipo de produto antichama e ciclos de molhagem e secagem para o tratamento de hornificação das fibras de sisal;
- Tipo de gesso empregado para a produção da pasta de gesso;
- Relação água/gesso para a produção da pasta de gesso;
- Uso de super plastificante para maior trabalhabilidade da pasta de gesso;
- Número de camadas que conformaram as amostras de compósitos;
- Dimensões das camadas e da chapa de compósito;
- Peso final da chapa de compósito.

1.2.5.4 *Técnicas de coleta de dados*

A coleta de dados desta pesquisa refere-se a revisão bibliográfica sobre os dados existentes sobre os compósitos de gesso reforçados com fibras vegetais ou fibras de sisal utilizados nas edificações para vedações verticais internas e forros, assim como a coleta de dados para as chapas de gesso acartonado. Também é utilizada nesta pesquisa a coleta de dados relativos à observação em laboratório sob condições controladas para responder ao comportamento frente ao fogo dos compósitos de gesso e fibras de sisal.

A coleta de dados existentes foi levantada a partir da pesquisa bibliográfica sobre o comportamento frente ao fogo dos materiais de acabamento e revestimento utilizados como medidas de segurança contra incêndio: o gesso, as fibras de sisal, os compósitos de gesso reforçados com fibras vegetais e as chapas de gesso liso e acartonado. Posterior a esta análise, tem-se a pesquisa dos tratamentos com produtos antichama, o modo de aplicação e a tipologia apropriada para as fibras de sisal.

A coleta de dados relativos à observação em laboratório foi subdividida a partir dos objetivos específicos atingidos, a partir de ensaios sobre a caracterização física dos materiais, o tratamento antichama das fibras de sisal e a caracterização térmica em situação de incêndio.

1.2.6 Estrutura da pesquisa

A estrutura desta pesquisa está dividida em 5 capítulos. O capítulo 1 apresenta a introdução a partir da contextualização do trabalho e a proposta da pesquisa determinada pela formulação do problema, hipótese, os objetivos, justificativa, metodologia e estrutura da pesquisa, os resultados esperados e as perspectivas do trabalho.

O capítulo 2, apresenta a revisão bibliográfica sobre a matéria prima do gesso, as chapas de gesso liso e acartonado, as principais características potencialidades e limitações das chapas de gesso. Aborda também as medidas de segurança contra incêndio para materiais de acabamento e revestimento, através das ações térmicas e resistência ao fogo, o incêndio real, o incêndio padrão e o tempo requerido de resistência ao fogo. Posteriormente, é apresentado o comportamento frente ao fogo do gesso e das fibras naturais por meio das variações dimensionais, ablação e as propriedades térmicas do gesso endurecido, bem como da flamabilidade das fibras naturais e o uso de retardantes antichama. Posteriormente são apresentadas as potencialidades e limitações do gesso endurecido e das fibras naturais frente ao incêndio. Este capítulo também expõe o comportamento frente ao fogo dos compósitos cimentícios e a influência da aderência entre a matriz e o reforço no comportamento frente ao fogo.

O capítulo 3 se refere ao delineamento da pesquisa, através da apresentação detalhada da metodologia do trabalho, o programa experimental, o planejamento dos experimentos, os materiais e os métodos utilizados para cada ensaio que serão realizados durante a pesquisa. Os principais ensaios que serão realizados na manta de sisal são de caracterização física, comportamento frente ao fogo após tratamento antichama, absorção de água e microscopia eletrônica de varredura. Posteriormente, serão realizados ensaios para a caracterização física do gesso em pó e o desenvolvimento da pasta de gesso (estado fresco e endurecido). Uma vez analisada a matriz e o reforço, se iniciará a análise dos compósitos tanto para aderência (absorção de água e microscopia eletrônica de varredura) como para o comportamento frente ao fogo (teste de Schlyter Modificado, bem como a microscopia eletrônica de varredura)

O capítulo 4 diz respeito à análise dos resultados obtidos durante os ensaios propostos na metodologia e no programa experimental da pesquisa, assim como a discussão dos dados analisados a partir dos resultados dos ensaios realizados.

No capítulo 5 serão apresentadas as conclusões da pesquisa e no capítulo 6 as sugestões para trabalhos futuros que darão continuidade a esta pesquisa.

1.2.7 Resultados esperados

O resultado esperado com este trabalho é a comprovação da eficiência do tratamento antichama nas chapas feitas pelo compósito de gesso e fibra de sisal, com vista a sua viabilidade em ambientes internos para as edificações.

Outro resultado esperado é o incentivo para o desenvolvimento de novas pesquisas na área de incêndios, principalmente no que diz respeito ao comportamento frente ao fogo dos materiais de acabamento e revestimento que visem o uso de fibras vegetais, fibras de sisal e gesso.

1.2.8 Perspectivas

1.2.8.1 Originalidade da pesquisa

A Tabela 1 apresenta as publicações realizadas, Scopus e Capes, na área de incêndio para os materiais compósitos com matriz de gesso de diferentes reforços. Destaca-se o afinilamento na busca de publicações sobre o tema para identificar o ineditismo da pesquisa.

Tabela 1. Publicações realizadas sobre o tema escolhido na pesquisa.

TEMA	TEMPO	PESQUISA	TRABALHOS
Materiais em situações de incêndio			
<i>Gypsum or plaster and fire</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	621
	2010-2021	<i>Keywords</i>	333
<i>Gypsum or plaster and flammability</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	644
	2010-2021	<i>Keywords</i>	347
<i>Vegetable fiber and fire</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	2
	2010-2021	<i>Keywords</i>	1
<i>Natural fiber and fire</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	180
	2010-2021	<i>Keywords</i>	141
<i>Sisal fiber and fire</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	9
	2010-2021	<i>Keywords</i>	3
Flamabilidade dos materiais			
<i>Flammability and gypsum</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	81
	2010-2021	<i>Keywords</i>	50
<i>Flammability and plaster</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	9
	2010-2021	<i>Keywords</i>	4
<i>Vegetable fiber and flammability</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	0
<i>Natural fiber and flammability</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	98
	2010-2021	<i>Keywords</i>	78
<i>Sisal fiber and flammability</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	7
	2010-2021	<i>Keywords</i>	4
Tratamento antichama dos materiais que compõem o compósito			
<i>Gypsum or plaster and fire treatment</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	570
	2010-2021	<i>Keywords</i>	303
<i>Vegetable fiber and fire treatment</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	1
<i>Natural fiber and fire treatment</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	18
	2010-2021	<i>Keywords</i>	15
<i>Sisal fiber and fire treatment</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	2
	2010-2021	<i>Keywords</i>	1
Resistencia ao incêndio dos compósitos com matriz de gesso			
<i>Fire resistance and plaster or gypsum and vegetable fiber</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	0
<i>Fire resistance and plaster or gypsum and natural fiber</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	10
	2010-2021	<i>Keywords</i>	7
<i>Fire resistance and plaster or gypsum and sisal fiber</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	0
Tratamento dos compósitos dos compósitos com matriz de gesso			
<i>Fire treatment and plaster or gypsum and natural fiber</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	6
	2010-2021	<i>Keywords</i>	5
<i>Fire treatment and plaster or gypsum and vegetable fiber</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	0
<i>Fire treatment and plaster or gypsum and sisal fiber</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	0

Continua

Continuação

TEMA	TEMPO	PESQUISA	TRABALHOS
Flamabilidade em compósitos com matriz de gesso			
<i>Flammability and plaster or gypsum and vegetable fiber</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	0
<i>Flammability and plaster or gypsum and sisal fiber</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	0
<i>Flammability and plaster or gypsum and natural fiber</i>	1974-2021	<i>Keywords</i>	5
	201-2021	<i>Keywords</i>	4

Fonte. Autora.

Esta pesquisa traz como ineditismo o estudo dos compósitos de gesso e fibras de sisal tratados com produtos antichamas em situação de incêndio, a partir do desenvolvimento de uma chapa compósito conformada em camadas de gesso e fibras de sisal. Como indicado na Tabela 1, nos últimos 10 anos, não foi encontrado na literatura específica sobre compósitos de gesso e fibras de sisal outro trabalho que aborda o comportamento frente ao fogo do compósito de gesso e fibras de sisal em altas temperaturas. Encontrou-se publicações sobre a análise isolada dos materiais que compõem o compósito proposto nesta pesquisa.

O ineditismo desta pesquisa também está determinado pela influência do tratamento antichamas das fibras de sisal no comportamento frente ao fogo do compósito. Nos últimos 10 anos, só foi encontrada uma publicação sobre o tratamento antichama para um compósito reforçado com fibras de sisal, especificamente de compósitos poliméricos e não com matriz de gesso.

Outro aspecto que atribui ineditismo a esta pesquisa é a influência dos tratamentos antichamas das fibras de sisal na aderência entre a matriz e reforço, assim como na formação de fissuras nos painéis compósitos.

1.2.8.2 Contribuições da pesquisa

Esta pesquisa pretende contribuir para o desenvolvimento da construção civil, especificamente na área de segurança contra incêndios, através da proposta de um

material de acabamento e revestimento como proteção passiva para a segurança contra o fogo.

A proposta da pesquisa busca contribuir com a melhora do desempenho frente ao fogo das chapas de gesso, através da utilização de camadas de gesso e fibras de sisal tratadas com produtos antichama para o desenvolvimento do compósito, uma vez que, propõe reduzir a velocidade de início, crescimento e propagação do fogo.

Sua contribuição também passa pelos tratamentos antichamas das fibras de sisal a serem utilizados na produção do compósito e, com isto, aumentar a durabilidade e resistência térmica da fibra de sisal, bem como aumentar a resistência mecânica do gesso, diminuindo o esfarelamento, colapso e ruína total do material.

Ademais, o estudo do tratamento antichama nas fibras de sisal está voltado à análise e avaliação da aderência entre a matriz e o reforço. Sob esse aspecto, a pesquisa pode contribuir na compreensão da ligação interfacial dos materiais e suas contribuições na transferência e distribuição de tensões, propagação das fissuras e ductilidade do compósito de gesso e fibras de sisal.

Ressalta-se que a pesquisa também considera o cuidado ao meio ambiente e a sustentabilidade, uma vez que, para a produção das chapas compósitos, serão empregadas fibras vegetais renováveis e biodegradáveis substituindo o uso de fibras sintéticas.

Por fim, pontua-se a sua contribuição para o meio científico por meio da análise comparativa de chapas de gesso acartonadas industrializadas existentes no mercado nacional e as chapas de compósito, através da apresentação das vantagens e desvantagens, subsidiando a criação de novas chapas de gesso com reforço em fibras de sisal com fins de proteção contra incêndio.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 GESSO E FIBRAS NATURAIS

2.1.1 Gipsita

O mineral gipsita é a matéria prima para a obtenção do gesso, constituído por um cristal de sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), oriundo de fontes naturais como rochas sedimentares solúveis ou fontes residuais de processos industriais (BENVINDO DA LUZ; FREITAS, 2008; CUNHA; MARINHO; GOMES, 2013).

A gipsita é encontrada na natureza com diferente granulometria, variada coloração e baixa dureza, no entanto a maior peculiaridade do mineral é à facilidade de desidratação e reidratação (BARBOSA; FERRAZ; SANTOS, 2014).

O mineral, gipsita, é um material abundante na natureza com grandes áreas de jazidas no mundo, destacando-se nos últimos 10 anos, a produção nos Estados Unidos, China, Iran e Turquia. A China representa 50% da produção mundial, convertendo-se no maior produtor, no entanto, o Brasil possui a maior reserva no mundo com uma produção de 2.1 megatoneladas (0,8%) tornando-se o maior produtor da América do Sul e 13º produtor mundial, concentrando sua produção no polo gesseiro de Araripe (SECRETARIA DE GEOLOGIA, 2020).

A produção do gesso é realizada através da extração, preparação, calcinação e seleção da gipsita natural. Segundo Pinheiro (2011), na extração é retirado o minério gipso para a obtenção da gipsita, posteriormente, durante a preparação o minério é uniformado por granulometria para posteriormente calcinar a gipsita. No processo de calcinação, o sulfato de cálcio di-hidratado do mineral gipsita desidrata-se parcialmente (perde 75% da água de cristalização) e da origem ao hemi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} + 1\frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), produto conhecido comercialmente como gesso e que reage quimicamente frente as variações de temperaturas.

No processo de calcinação, podem ser obtidos o gesso alfa ou beta. Quando a calcinação é realizada a pressão atmosférica, obtém-se o gesso β que dá origem ao gesso de fundição e revestimento, quando realizada por processo hidrotérmico, obtém-se um gesso mais resistente e menos solúvel denominado gesso α . Na construção civil o gesso β é o mais utilizado devido ao custo e o processo de obtenção do gesso α (BENVINDO DA LUZ; FREITAS, 2008; LIU *et al.*, 2019).

Após a calcinação, o produto é selecionado e classificado a partir das exigências químicas, físicas e mecânicas indicadas pela NBR 13.207 – Gesso para construção civil: Especificação (ABNT, 2017a), bem como a classificação do gesso segundo o tempo de pega e granulometria, de acordo com a NBR 12128 – Gesso para construção civil: Determinação das propriedades físicas da pasta de gesso (ABNT, 2019a), e NBR 12127- Gesso para construção civil: Determinação das propriedades físicas do pó (ABNT, 2019b), respectivamente. A Tabela 2 indica todos os requerimentos para o gesso de acordo com as normas vigentes.

Tabela 2. Exigências químicas, físicas, mecânicas e classificação do gesso na construção.

Exigências químicas		Limites	
Água livre		Máx. 1,3%	
Água de cristalização		4,2-6,2%	
Óxido de cálcio (CaO)		Mín. 38%	
Anidrido sulfúrico (SO ₃)		Mín. 53%	
Exigências físicas e mecânicas		Limites	
Resistência a compressão		> 8,4 Mpa	
Dureza		≥ 20 N/mm ²	
Massa Unitária		≥ 600 Kg/m ³	
Classificação do gesso	Tempo de pega		Granulometria mínima
	Início	Fim	
Fundição	≤ 10	≤ 20	Peneira 0,29 mm ≥ 90%
Revestimento sem aditivos	≤ 10	≥ 35	Peneira 0,21 mm ≥ 90%
Revestimento com aditivos	≥ 4	≥ 50	

Fonte. Adaptado de ABNT (2017a)

2.1.1.1 Hidratação do gesso

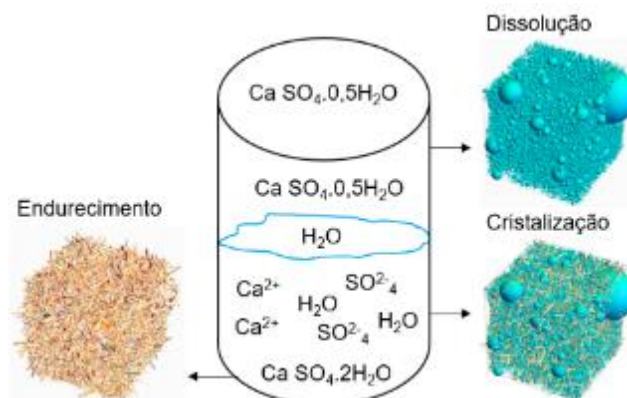
O gesso em pó quando misturado à água forma uma pasta homogênea e consistente que rapidamente perde consistência e ganha viscosidade, iniciando-se o

processo de endurecimento da pasta de gesso. O ganho de viscosidade ou pega inicial da pasta e o incremento de resistência do material como consequência do endurecimento, são fenômenos decorrentes do processo de hidratação do gesso (GARTNER, 2009).

A hidratação do gesso é um processo químico resultante da mistura do sulfato de cálcio hemi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) com água, formando o sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e recuperando a água perdida durante a calcinação do material. Neste processo de reidratação, conhecido como tempo de pega do gesso, existe uma elevação da temperatura (processo exotérmico) durante o crescimento dos cristais de gesso que determinam a coesão do conjunto (GARTNER, 2009; PINHEIRO, 2011).

O processo de hidratação do gesso pode ser explicado pelo modelo de Le Chatelie de dissolução e precipitação conformado por três etapas (Figura 2). Na primeira etapa existe o fenômeno químico de dissolução dos cristais de hemi-hidrato, quando o gesso em pó é misturado com a água, iniciando a pega. Durante a pega do gesso o hemi-hidrato libera uma solução de íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} que se transformará no di-hidrato. Na segunda etapa existe o fenômeno físico de cristalização quando os cristais de di-hidrato crescem se precipitam em forma de agulha. Na terceira etapa acontece o fenômeno mecânico de endurecimento da pasta de gesso como consequência do aumento da concentração dos cristais (BARBOSA; FERRAZ; SANTOS, 2014; BRANDT; BOSBACH, 2001; JOHN; CINCOTTO, 2007; MORGADO *et al.*, 2019)

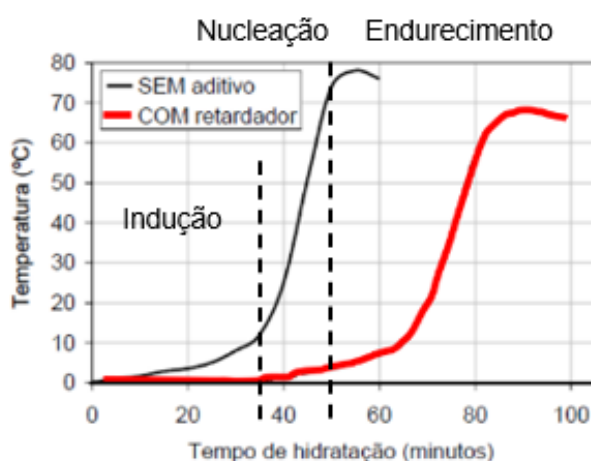
Figura 2. Fenômenos envolvidos no processo de hidratação do gesso.



Fonte. Adaptado de Barbosa; Ferraz; Santos (2014); John e Cincotto (2007); Morgado *et al.* (2019)

De acordo com John e Cincotto (2007), o processo de hidratação também pode ser explicado por meio da variação de temperatura em função do tempo. Conforme a Figura 3, há três períodos de aumento da temperatura: período de indução com início da hidratação do gesso em pó, período de nucleação com rápida elevação de temperatura e início da pega, e o período de endurecimento atingindo a temperatura máxima e finalizando a pega.

Figura 3. Variação de temperatura em função do tempo de pega do gesso



Fonte. Adaptado de John e Cincotto (2007).

Na Figura 3 observa-se a influência dos aditivos retardadores de pega que interferem no processo de hidratação e na microestrutura do gesso através do aumento no tempo de manipulação e fluidez da pasta de gesso (JOHN; CINCOTTO, 2007; LIU *et al.*, 2019).

No processo de hidratação do gesso, o material endurecido se torna um sólido poroso condicionado pelos pontos de contato entre os cristais e suas ligações em forma de placas e agulhas (YU; BROUWERS, 2012). Segundo Barbosa; Ferraz; Santos (2014), a microestrutura porosa está determinada pelo tamanho, forma e macro defeito dos cristais, que conduzem sua velocidade de crescimento após hidratação do gesso em pó. Os cristais grandes se formam quando a velocidade de crescimento dos núcleos de cristalização é lenta, criando uma estrutura organizada, no entanto, os cristais pequenos se formam quando a velocidade de crescimento é rápida, dando origem a cristais bem definidos e numerosos, diminuindo a porosidade do material.

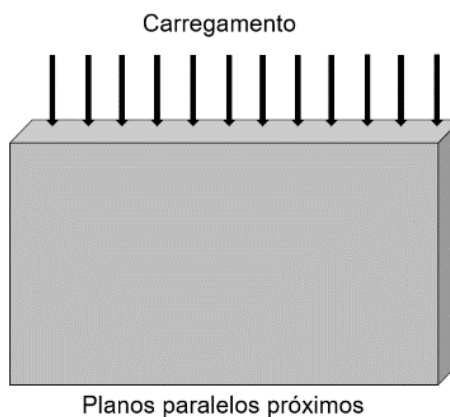
A microestrutura porosa do gesso endurecido afeta as propriedades físicas, mecânicas e térmicas do material. Quanto mais fino seja o gesso em pó, menor será a quantidade de poros na estrutura da pasta endurecida, maior será a resistência mecânica e menor o comportamento térmico do material. No entanto, quanto maior o teor de água de hidratação do gesso em pó, obteremos um material endurecido poroso e com menor resistência mecânica.

2.1.2 Chapas de gesso

Fusco (1976) define as chapas utilizando um critério de classificação mecânico. A partir deste critério, as chapas são elementos de superfícies estruturais ou de vedação formados por dois planos paralelos muito próximos que tem o carregamento contido no plano paralelo ao plano composto pelas maiores dimensões (Figura 4).

Estes elementos de superfícies apresentam uma das dimensões muito menor que as outras duas e com a mesma ordem de grandeza.

Figura 4. Esquema do carregamento recebido pela chapa.



Fonte: Autora.

2.1.2.1 Chapas de gesso liso

As chapas de gesso liso foram as primeiras chapas de gesso finas e lisas utilizadas na construção civil para a execução de bases de acabamento, mas principalmente para forros em residências e escritórios. Apresentam aproximadamente 2 cm de espessura e com acabamentos laterais em macho e fêmea para auxiliar na instalação.

Esta tipologia de chapa tem uma produção artesanal ou em pequenas fábricas, a partir de uma técnica de confecção simples que se inicia pelo polvilhamento do gesso em pó em um recipiente com água para realizar a mistura, muitas vezes realizada com argamassadeira, e produzir a pasta de gesso. Posteriormente a pasta de gesso, é colocada em formas metálicas ou de silicone individualizadas de acordo com o tamanho da chapa, e na sequência se dá início a primeira etapa de secagem. Após aproximadamente 20 minutos de secagem, a chapa de gesso é retirada das formas e colocadas em suportes que permitam pendurar a chapa para iniciar a segunda etapa de secagem em um ambiente ao ar livre, seco e coberto por um período aproximado

de 5 dias. Finalizada a segunda etapa de secagem das chapas de gesso, estas passaram por um controle de defeitos e serão selecionadas, separadas e empilhadas para pronta entrega (FERNANDES; CÂMARA, 2012).

O processo de produção das chapas de gesso liso está condicionado pela umidade relativa do ar, chuva e temperatura, podendo aumentar o período da produção da chapa.

A produção das chapas de gesso liso em pequenas fabricas (Figura 5a e 5b) difere da artesanal pelo uso de uma esteira na qual as formas de placas circulam simulando um carrossel, evitando a movimentação do trabalhador, que deverá realizar o monitoramento. Também, a pasta de gesso é espalhada nas formas através de uma mangueira de projeção que reduz o desperdício do material (PINHEIRO *et al.*, 2017).

Figura 5. Produção chapa de gesso industrial em pequena indústria.



Fonte. (PINHEIRO *et al.*, 2017)

As chapas de gesso liso são muito utilizadas no Brasil, no entanto são cada vez mais substituídas pelas chapas de gesso acartonado.

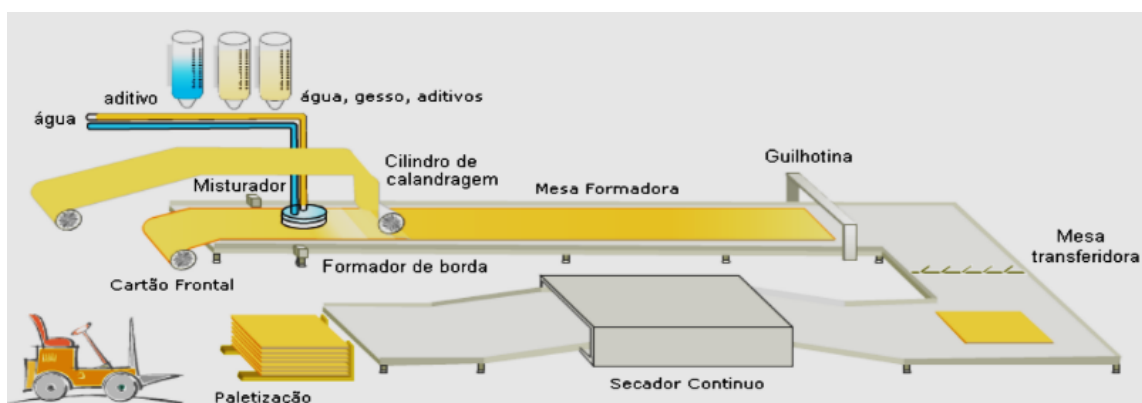
2.1.2.2 Chapas de gesso acartonado

De acordo com a NBR 14.715 (ABNT, 2021a), as chapas de gesso acartonado se caracterizam por serem fabricadas industrialmente mediante um processo de

laminação contínua de uma mistura de gesso, água e aditivos entre duas lâminas de cartão. Diante disso, as propriedades mecânicas das chapas estão determinadas pela resistência à compressão do gesso e pela resistência à tração da lâmina de cartão. Em quanto ao comportamento térmico, a lâmina de cartão cumpre a função de equilibrar a umidade e a transmissão de energia (PLACO, 2020).

O processo de produção das chapas de gesso acartonado, indicado na Figura 6, se inicia quando o gesso em pó utilizado no núcleo das chapas é misturado com água e aditivos, com proporções diferentes de acordo com a tipologia de chapa que será produzida. Posteriormente, a pasta no estado fresco é depositada e espalhada sob uma lâmina de cartão em uma esteira contínua que permitirá retirar o ar contido na pasta. A seguir, é colocada uma lâmina de cartão na face oposta da chapa para posteriormente passar por um sistema de calandras que determinaram as dimensões da chapa após a cura inicial. Em seguida, as chapas em produção serão cortadas e secadas em diversos estágios de temperatura para retirar a água excedente, e assim realizar o controle visual de possíveis defeitos. As chapas com defeitos são encaminhadas para o setor de rejeição e as outras são agrupadas, paletizadas e armazenadas em áreas para despacho (BOUTERF *et al.*, 2015; FREITAS, 2019; JIMÉNEZ RIVERO; SATHRE; GARCÍA NAVARRO, 2016)

Figura 6. Processo de fabricação das chapas de gesso.



Fonte. Adaptado de Freitas (2019)

Segundo Luca (2018), as chapas de gesso acartonado surgiram em 1894, nos Estados Unidos, como resultado dos inúmeros incêndios em vilas, devido as soluções construtivas em madeira utilizadas em residências e edifícios comerciais. Assim, a partir do aperfeiçoamento das chapas de gesso lisas utilizadas como base para acabamentos, Augustine Sackett descobriu que a massa de gesso revestida com lâminas de cartão em ambas as faces, resultava em um material com resistência mecânica, bom acabamento e com resistência ao fogo.

Inicialmente, as chapas de gesso acartonado foram utilizadas em construções de prédios baixos, mas com a evolução arquitetônica no século XX e com o auge das construções em altura, as chapas foram utilizadas como elementos para vedações internas para a construção de divisórias, revestimentos internos das paredes externas a estrutura da edificação e para forros. Com o tempo e após a Segunda Guerra Mundial, o emprego das chapas de gesso acartonado foi disseminado pela necessidade de moradia e reconstrução das cidades, a partir dos sistemas construtivos a seco *drywall* e *woodframe* que se caracterizam por serem sistemas industrializados e pré-fabricados.

Atualmente, países como Estados Unidos, Austrália e Japão são os países com maior consumo de chapas de gesso acartonado para construção com aproximadamente 10m²/hab/ano, 6,4m²/hab/ano e 4,4m²/hab/ano, respectivamente (SECRETARIA DE GEOLOGIA, 2020),

No Brasil, as chapas de gesso acartonado foram implementadas nos anos 70, consolidando-se a partir de 1995 e com um uso crescente na construção civil (LUCA, 2018; SECRETARIA DE GEOLOGIA, 2020), a partir do uso de diversas tipologias de chapas de gesso acartonado existentes no mercado. No entanto, é possível destacar três tipologias devido a sua grande utilização, indicadas no Quadro 5.

Quadro 5. Tipos de chapas de gesso acartonado.

Tipologia	Cód.	Características	Cor	Aplicações
Standard	ST	Não requerem de especificações especiais	Bege	Áreas secas
Resistente à umidade	RU	Chapas com hidrofugantes incorporados na mistura da pasta para diminuir a absorção de água. Não é a prova de água	Verde	Áreas sujeitas à umidade por tempo limitado. Cozinhas, banheiros, lavabos, lavanderias ou áreas de serviço
Resistente ao fogo	RF	Na fabricação da chapa é utilizada fibra de vidro ou vermiculita na mistura da pasta para diminuir a desidratação do gesso frente a altas temperaturas, evitando a retração e formação de fissuras, mantendo a integridade da chapa.	Rosa	Áreas secas. Saídas de emergência, escadas enclausuradas e ambientes que requerem de maior desempenho em relação ao fogo e calor

Fonte. Adaptado de (ABNT, 2021a; DRYWALL, 2013)

As placas ainda podem ser diferenciadas pelo tipo de borda longitudinal de acabamento: borda quadrada e borda rebaixada (Figura 7). Inicialmente, todas as bordas das chapas de gesso acartonado eram de borda quadrada devido a aparência não monolítica, mas atualmente é uma solução para forros e divisórias removíveis. A borda rebaixada surge posteriormente como uma solução para o tratamento de juntas, permitindo que o acabamento nivelado e providenciando uma aparência monolítica necessária para a construção de divisórias e para acabamentos (DRYWALL, 2013).

Figura 7. Bordas de acabamento.

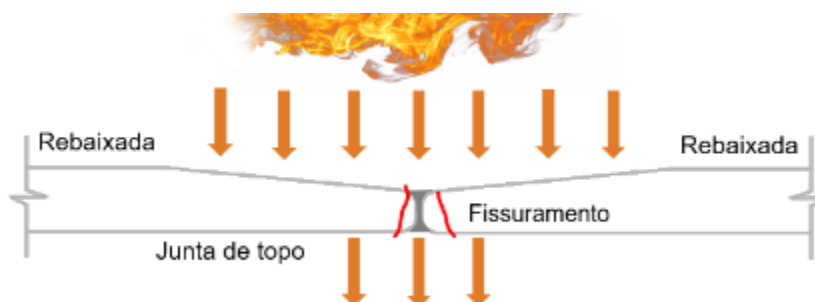


Fonte. Adaptado de (ABNT, 2021a)

Quando comparadas as bordas quadradas e rebaixadas, destaca-se que as bordas rebaixadas diminuem a área de contato da junta de topo entre placa e placa (Figura 8), diminuindo a área útil da chapa o que contribuirá com o aceleração da perda de água em situações de altas temperaturas provocando a deformação do

material e fissuras que permitem a passagem de calor e dependendo da tipologia de chapa e o dano ocorrido, a passagem do fogo (RAHMANIAN, 2011).

Figura 8. Borda rebaixada em situações de altas temperaturas.



Fonte. Autora.

Atualmente, as chapas de gesso acartonado existente no mercado nacional devem atender os requisitos da NBR 14.715-1 – Chapas de gesso para *drywall*: Parte1. Requisitos (ABNT, 2021a) que determina a tolerância para as características geométricas e físicas das chapas de gesso acartonado industrializadas.

As chapas devem atender as características geométricas para tolerância e os limites estabelecidos na Tabela 3.

Tabela 3. Características geométricas das chapas de gesso acartonado.

Característica geométrica		Tolerância	Limite
Espessura	9.5 mm	± 0.5 mm	-
	12.5 mm		-
	15 mm		-
Largura		+0 / -4 mm	Máximo de 1200 mm
Comprimento		+0 / -5 mm	Máximo de 3600 mm
Esquadro		≤ 2.5 mm/m largura	-
Rebaixo	Largura	Mínimo	40 mm
		Máximo	80 mm
	Profundidade	Mínimo	0.6 mm
		Máximo	2.5 mm

Fonte. (ABNT, 2021a)

As chapas devem atender os limites estabelecidos para as características físicas indicadas na Tabela 4.

Tabela 4. Características físicas das chapas de gesso acartonado.

Características		Limites		
		Espessura da chapa (mm)		
		9,5	12,5	15
Densidade superficial de massa (kg/m ²)	Mínima	6,5	8,0	10,0
	Máxima	8,5	12,0	14,0
	Varição máxima	±0,5		
Resistência mínima Ruptura na flexão (N)	Longitudinal	400	550	650
	Transversal	160	210	250
Dureza (mm)		20		
Absorção máxima de água para RU (%)		5		

Fonte. (ABNT, 2021a)

O mercado brasileiro de chapas de gesso acartonado está representado principalmente por três fabricantes de origem europeia como Lafarge (França), Knauf (Alemanha) e Placo (França); e por um fabricante multinacional como Trevo *Drywall* (Juazeiro do Norte).

Estes fabricantes providenciam diversas informações para o consumidor, de acordo com as tipologias de chapas de gesso acartonado e os requerimentos da norma NBR 14.715-1 (ABNT, 2021a), indicadas na Tabela 5.

Tabela 5. Características dimensionais das chapas de gesso nacionais.

Empresa	Descrição	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Peso (kg/m ²)
Lafarge Gypsum	Standard	6,5	1200	2400	4 – 7
		9,5	1200	2400	6,5 – 8,5
		12,5	600 - 1200	1800 a 3000	7 – 12
		15	1200	1800 a 2400	7 – 8
	Resistencia a umidade	12,5	1200	1800 a 3000	8 – 12
		15			10 – 14
	Resistência ao fogo	12,5	1200	1800 a 3000	8 – 12
		15			10 – 14
Knauf	Standard	12,5	600 – 1200	1800 – 2000 – 2400	10 -18 – 24
		15	1200	1800 - 2400	24,5 – 32,5
	Resistencia a umidade	12,5	1200	1800 – 2400	20 – 27
		15			26 – 35
	Resistência ao fogo	12,5	1200	1800 – 2400	20 – 28
		15			25 – 35

Continua

Continuação

Empresa	Descrição	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Peso (kg/m²)
Placo	<i>Standard</i>	6	1200	2000	6
		12,5	600 – 1200	1200 a 3000	8 – 12
		15	1200	2400	10 – 14
	Resistencia a umidade	12,5	1200	1800 a 3000	8 – 12
	Resistência ao fogo	12,5	1200	1800	8 -12
		15			10 – 14
Trevo	<i>Standard</i>	12,5	600	2000	8,5
		12,5	1200	1800 - 1400	8,5
		15	1200	2400	12
	Resistencia a umidade	12,5	1200	1800 - 1400	8,5
		15	1200	1800 - 1400	12
	Resistência ao fogo	12,5	1200	1800 - 1400	8,5
		15	1200	1800 - 1400	12

Fonte. Adaptado de Gypsum *Drywall* (2020); Knaufl (2020); Placo (2020); Trevo (2020)

Atualmente, as chapas de gesso acartonado não só contribuem a diminuição da propagação do incêndio, mas também com a segurança e proteção das estruturas da edificação, retardando o processo de queima e aumentando o tempo de resistência ao fogo.

De acordo com a Instrução Técnica nº8 de segurança estrutural contra incêndio (IT, 2019b) do Corpo de Bombeiros da Polícia Federal de São Paulo e o manual de segurança contra incêndios de paredes drywall (LUCA, 2018) as chapas de gesso acartonado devem cumprir os requisitos de resistência contra o fogo (CF), de acordo com as paredes que serão utilizadas na edificação.

A Tabela 6 apresenta os tipos de paredes em drywall mais utilizadas na construção civil e a respectiva resistência ao fogo.

Tabela 6. Resistencia ao fogo de paredes em chapas de gesso para drywall.

	Designação das paredes	Espessura total (mm)	Largura da estrutura (mm)	Altura máxima da parede		Resistencia ao fogo CF (Corta fogo)	
				Simples	Duplo	ST ou RU	RF
1	73/48/600/1CH 12,5 - 1CH 12,5	73	48	2,5	2,9	CF 30	CF 30
2	73/48/400/1CH 12,5 - 1CH 12,5	73	48	2,7	3,25	CF 30	CF 30
3	98/48/600/2CH 12,5 - 2CH 12,5	98	48	2,9	3,5	CF 60	CF 90
4	98/48/400/2CH 12,5 - 2CH 12,5	98	48	3,2	3,8	CF 60	CF 90
5	108/48/600/2CH 15 - 2CH 15	108	48	3	3,6	CF 90	CF 120
6	108/48/400/2CH 15 - 2CH 15	108	48	3,3	3,9	CF 90	CF 120
7	95/70/600/1CH 12,5 - 1CH 12,5 9	95	70	3	3,6	CF 30	CF 30
8	95/70/400/1CH 12,5 - 1CH 12,5	95	70	3,3	4,05	CF 30	CF 30
9	120/70/600/2CH 12,5 - 2CH 12,5	120	70	3,7	4,4	CF 60	CF 90
10	120/70/400/2CH 12,5 - 2CH 12,5	120	70	4,1	4,8	CF 60	CF 90
11	130/70/600/2CH 15 - 2CH 15	130	70	3,8	4,5	CF 90	CF 120
12	130/70/400/2CH 15 - 2CH 15	130	90	4,2	4,9	CF 90	CF 120
13	115/90/600/1CH 12,5 - 1CH 12,5	115	90	3,5	4,15	CF 30	CF 30
14	115/90/400/1CH 12,5 - 1CH 12,5	115	90	3,85	4,6	CF 30	CF 30
15	140/90/600/2CH 12,5 - 2CH 12,5	140	90	4,2	5	CF 60	CF 90
16	140/90/400/2CH 12,5 - 2CH 12,5	140	90	4,6	5,5	CF 60	CF 90
17	150/90/600/2CH 15 - 2CH 15	150	90	4,3	5,1	CF 90	CF 120
18	150/90/400/2CH 15 - 2CH 15	150	90	4,7	5,6	CF 90	CF 120
19	160/48/600/DEL/2CH 12,5 - 2CH 12,5	160	48	4,9	5,8	CF 60	CF 90
20	160/48/400/DEL/2CH 12,5 - 2CH 12,5	160	48	5,5	6,5	CF 60	CF 90

Fonte. Adaptado de IT (2019b) e de Luca (2018).

2.1.2.3 Fosfogesso.

O fosfogesso é um resíduo sólido poluente resultante da produção de ácido fosfórico, componente de fertilizantes agrícolas fosfatados e detergentes químicos, muitas vezes chamado de gesso sintético. Este material se caracteriza por ser um

subproduto do gesso, muitas vezes considerado um material de descarte e mantido em depósitos em grandes áreas industriais que requerem de manutenção constante, sendo que para cada tonelada de ácido fósforico são geradas 4,3 toneladas de fosfogesso hemi-hidratado (BUMANIS *et al.*, 2018; DRAGOMIR *et al.*, 2017; EL RAFIE *et al.*, 2020).

Os problemas ambientais gerados pela produção do fosfogesso e as grandes áreas de acúmulo do material tem contribuído com o desenvolvimento de diversas pesquisas que visam melhorar o posicionamento do material no mercado nacional e internacional através de usos na agricultura como fonte de nutrientes para a correção de solos férteis e para uso nas cimenteiras. Atualmente o fosfogesso é utilizado para a produção de estuque, cal, clínquer, argamassas, aditivos, entre outros (PLIAKA, M; GAIDAJIS, 2022; TOMAZ, 2011).

Atualmente o mercado nacional tem a venda diferentes marcas de gesso misturado com fosfogesso, o que torna de vital importância a análise do material a partir da composição química do mesmo. O fosfogesso se caracteriza por conter entre 80% e 90% de sulfato de cálcio e o restante na forma de impurezas como flúor, matéria orgânica, metais pesados e elementos radioativos. Estas impurezas contribuem com a perda de resistência a compressão em relação ao gesso, requerendo de tratamentos específicos no processo de moagem para melhorar seu desempenho (BUMANIS *et al.*, 2019; EL RAFIE *et al.*, 2020)

A Tabela 7 apresenta as principais concentrações dos elementos químicos que compõem o fosfogesso, identificadas nas pesquisas realizadas nos últimos 7 anos.

Tabela 7. Composição química fosfogesso.

%	(ZHAO <i>et al.</i> , 2015)	(ENNACIRI; ALAOU- BELGHITI; BETTACH, 2019)	(RAKHIL A <i>et al.</i> , 2018)	(CAI <i>et al.</i> , 2021)	(BUMANI S <i>et al.</i> , 2019)	(CAO <i>et al.</i> , 2021)	(PLYATSU K <i>et al.</i> , 2019)
S	56,92	42,52	45,13	42,62	37,38	52,18	60,9
Ca	33,64	33,83	33,11	30,32	37,16	32,2	34,37
Cl							
P	0,71	0,67	1,64	1,03	0,57	0,94	0,78
Al	0,64	0,21	0,06	0,25	0,71		0,003
K		0,02	0,08	0,03		0,27	
Sr					2,25		1,782
Fe	0,33	0,02		0,19	0,22	0,23	0,257
Si	6,31	0,49	0,23	4,81	1,07	4,69	1,54
Na		0,12	0,13	0,24	0,48	0,21	
Mg		0,05	0,008	0,02	0,21		
Ti		0,01		0,06	0,11		
F		0,2				0,95	0,56
As					0,09		
Ce					0,24		
Outros	1,45	21,86	19,612	20,43	19,51	8,33	

Fonte. Autora.

A partir da Tabela 7 é possível concluir que o fosfogesso, a diferença do gesso, contém entre 0,7 e 1,64% de fósforo e contém diversas quantidades de flúor, no entanto o gesso, não contém flúor na sua composição e valores de fósforo acima de 2%.

2.1.3 Características, potencialidades e limitações das chapas de gesso liso e acartonado.

A principal vantagem das chapas de gesso liso é o processo produtivo econômico, visto que requer mão de obra simples, sem muita técnica e de fácil acesso; bem como o melhor acabamento das edificações. No entanto, entre as limitações estão a maior fragilidade do material, em relação às chapas de gesso acartonado, contribuindo com o aparecimento de fissuras e trincas. Também, durante o processo de produção é necessário muito tempo para a secagem do material, e durante o processo de instalação das chapas, existe um trabalho de acabamento do material que se inicia

com a aplicação de massa de gesso nas juntas, para posterior secagem, lixamento e aplicação da pintura; contribuindo com a geração de resíduos na obra.

Do ponto de vista técnico, as chapas de gesso acartonado apresentam potencialidades quando comparado com as chapas de gesso liso e os sistemas de vedação convencional, que contribuem com o uso do material na construção civil. Estas vantagens vão desde a fabricação até o consumidor final.

O processo de produção é racionalizado e rápido, aumentando a produtividade na execução de vedações internas e forros. Em relação a qualidade do sistema, por este ser pré fabricado, permite atingir com maior facilidade os requerimentos das normas vigentes, com uma melhoria na gestão de qualidade do produto e conseqüentemente na diminuição de problemas patológicos na construção de vedações internas e forros.

O método construtivo industrializado das chapas permite a adaptabilidade a qualquer tipo de estrutura, seja de madeira, aço ou concreto. Bem como, o sistema diminui a geração de resíduos e desperdícios durante a execução da obra, devido ao processo racionalizado de construção que obriga ao operário a seguir uma seqüência lógica construtiva, sendo que uma etapa precisa ser conferida para dar início a seguinte. Portanto, existe uma diminuição de perdas de material por estocagem e retrabalho.

O peso próprio das chapas de gesso acartonado (inferior a 15kg/m^2) permite o fácil manuseio do material e a execução de vedações internas e forros com versatilidade e flexibilidade, possibilitando diversas morfologias (curvas, retas e diagonais) e tipos de acabamentos que podem reduzir as cargas nas estruturas e fundações.

Em relação aos benefícios do consumidor, as chapas de gesso acartonado permitem a execução das instalações elétricas, hidráulicas e sanitárias, sem a necessidade de materiais úmidos (cimento, areia etc.) para finalizar a execução das instalações prediais; inclusive permite realizar modificações futuras com facilidade. Outro benefício para o consumidor é o conforto acústico e térmico da instalação, reduzindo possíveis necessidades energéticas para aquecimento e resfriamento.

Do ponto de vista técnico da segurança contra incêndio as chapas de gesso acartonado garantem a proteção das estruturas em situações de incêndio, retardando o processo de queima e aumentando a temperatura interna da edificação, uma vez que 20% da mistura para a laminação da chapa de gesso acartonada está composta por água, que será liberada por evaporação frente a altas temperaturas. O aumento da temperatura interna da edificação garante maior tempo para a evacuação das pessoas e para a ação do corpo de bombeiros nas edificações, minimizando o risco à vida e reduzindo a perda patrimonial.

No entanto, do ponto de vista técnico da produção, para a execução e uso das chapas de gesso acartonado existem fatores limitantes comparado com os sistemas de vedação convencional.

O processo de produção das chapas requer de uma indústria de produção de meio ou grande porte, sendo que poucas empresas conseguem desenvolver esta tecnologia, geralmente multinacionais que requerem mão de obra especializada e em menor quantidade porque o processo construtivo das chapas de gesso acartonado é racionalizado e rápido.

Durante a produção das chapas de gesso acartonado e após a execução do sistema construtivo escolhido, os resíduos gerados e separados no canteiro de obras nem sempre podem ser reaproveitados; inclusive, a coleta, armazenagem, reciclagem

e descarte dos resíduos das chapas devem seguir a resolução 307:2002, 348:2004, 431:2011 e 448:2012 da CONAMA de acordo com a classificação do material.

A partir destas potencialidades e limitações, a Associação Brasileira de *Drywall* coloca alguns desafios e perspectivas em relação as chapas de gesso acartonado, sendo que o Brasil apresenta perspectivas de aumentar sua participação na produção mundial de gesso e de chapas de gesso acartonado com uma tendência ao crescimento.

2.1.4 Fibras naturais

O uso de fibras na construção civil tem auxiliado na melhora das propriedades térmicas e mecânicas dos materiais convencionais através do desenvolvimento de compósitos. No entanto, a escolha das fibras está condicionada pelo tipo, distribuição, tamanho (comprimento-diâmetro), durabilidade e aderência com a matriz (GHOLAMPOUR, 2020; JAUHARI; MISHRA; THAKUR, 2015).

Existe uma grande variedade de fibras, classificadas com base na origem em fibras naturais, produzidas pela natureza, que permitem o processamento têxtil e são subdivididas em fibras vegetal, animal e mineral; ou fibras sintéticas que são geradas pelo homem de forma orgânica ou inorgânica (SAHU; GUPTA, 2017).

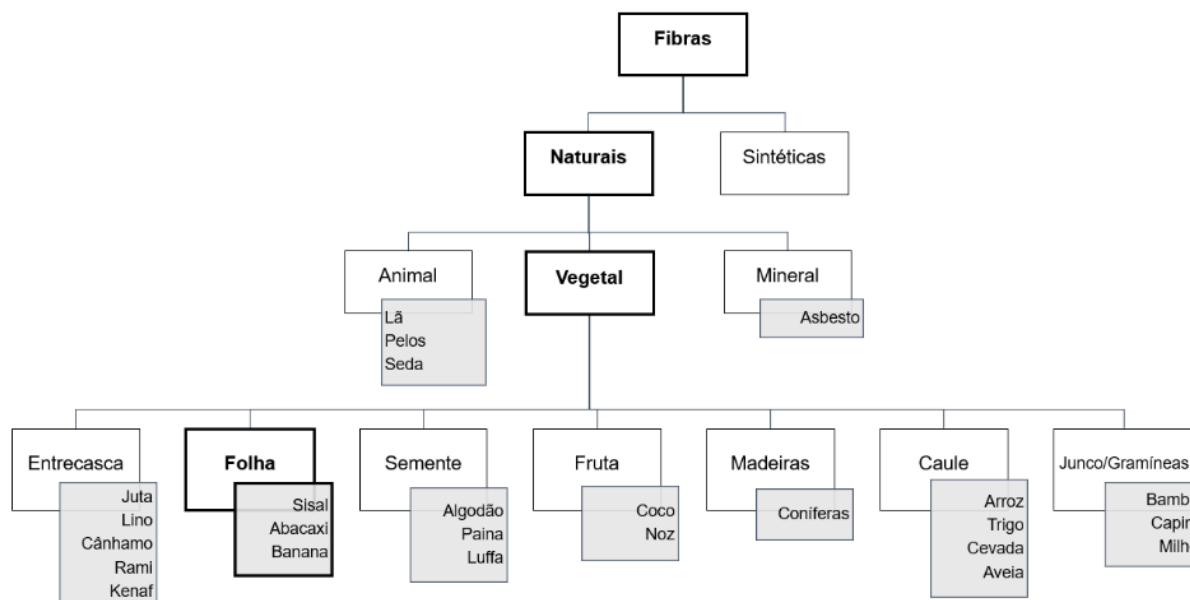
2.1.4.1 Fibras vegetais

As fibras vegetais ou lignocelulósicas são fibras abundantes e oriundas de ciclos biológicos naturais renováveis e biodegradáveis que contribuem com o consumo de materiais que promovem a sustentabilidade e diminuem o impacto ambiental (ALAM *et al.*, 2014; MILANESE *et al.*, 2012).

Dentre as fibras vegetais, são classificadas conforme a origem e formação, podendo ser extraídos das entrecascas, folhas, semente, fruta, madeira, caule ou

junco/gramíneas, como indicado na Figura 9 (BHATTACHARYYA; SUBASINGHE; KIM, 2015; YU, 2015).

Figura 9. Classificação das fibras naturais.



Fonte. Adaptado de Bhattacharyya; Subasinghe; Kim (2015); Yu (2015)

As fibras vegetais apresentam uma estrutura celular comum, mas com uma composição química diferente que determinará as propriedades físico-mecânicas de cada fibra. De acordo com Yu (2015), as fibras indicadas na Tabela 8; o algodão, linho, rami, juta, kenaf, sisal e abacaxi, são as fibras vegetais mais comumente utilizadas; e as propriedades físico-mecânicas determinam a empregabilidade de cada tipologia de fibra.

Tabela 8. Propriedades físico-mecânicas das fibras vegetais.

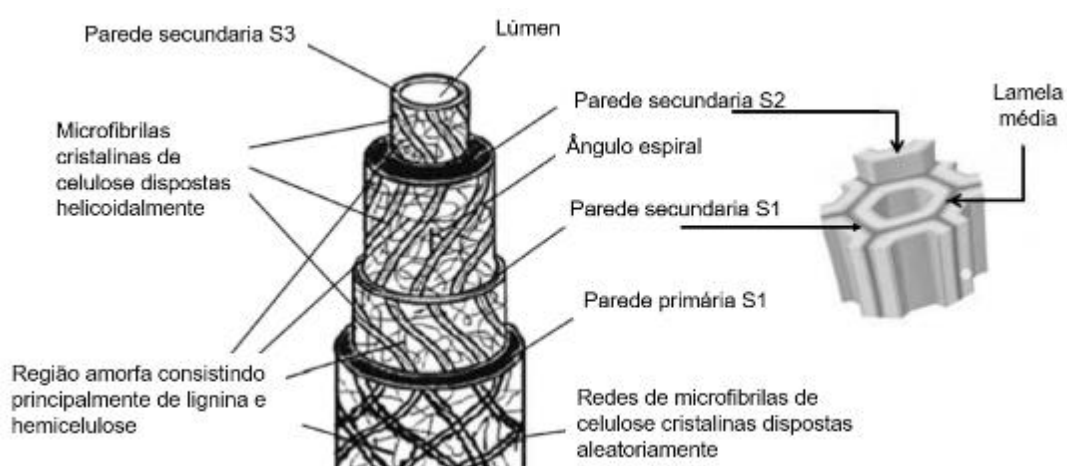
Fibras	Massa específica (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação de ruptura (%)
Algodão	1,51	400	12	3-10
Linho	1,4	800-1500	60-70	1,2-1,6
Rami	1,5	500	44	2
Juta	1,46	400-800	10-30	1,8
Kenaf	1,2	295	-	2,7-6,9
Sisal	1,33	600-700	38	2-3
Abacaxi	1,5	170-1627	82	1-3

Fonte. Adaptado de Jawaid; Abdul Khalil (2011); Silva (2017)

2.1.4.2 Estrutura e composição química das fibras vegetais

A organização estrutural das fibras vegetais apresenta um alto grau de complexidade, porém com uma base similar. Cada fibra é formada por várias microfibrilas unidas por lignina e hemicelulose de forma helicoidal na região da lamela média, e que darão origem as fibrilas compostas por várias paredes celulares (lamela média, parede primaria e secundarias), conforme a Figura 10 (ALVES FIDELIS *et al.*, 2013; THOMAS *et al.*, 2011).

Figura 10. Organização estrutural das fibras vegetais



Fonte. Adaptado de Gholampour (2020) e Thomas *et al.*(2011)

Na estrutura das fibras vegetais, existe uma parede celular primária e várias camadas de paredes celulares secundárias promovem o reforço estrutural da planta. A parede celular primária é fina e circunda as paredes secundárias, que, por sua vez, está composta por três camadas: externa (S1), intermediária (S2) e interna (S3), como indicado na Figura 10 (BOURMAUD *et al.*, 2013; CÉLINO *et al.*, 2014; GHOLAMPOUR, 2020; THOMAS *et al.*, 2011).

Assim, a estrutura das fibras vegetais se diferenciam pelo número de microfibrilas, ângulo microfibrilar, espessura das paredes celulares e principalmente a composição química; fatores essenciais para determinar as propriedades das fibras vegetais (ALVES FIDELIS *et al.*, 2013).

A composição química das fibras vegetais é composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina; e em menor quantidade por pectina, amido, extrativos, proteínas, sais inorgânicos e água de constituição (GHOLAMPOUR, 2020).

A celulose é o principal componente das fibras vegetais, com uma estrutura altamente cristalina, formado pela ligação de glicose que determinará a resistência do arranjo cristalino, que, por sua vez, determinará o comportamento térmico (queima rápida), resistência a tração e modulo de elasticidade da fibra.

A hemicelulose é um constituinte formado por polissacáridos ramificados ligados a celulose e outros elementos da parede celular. A estrutura química da hemicelulose apresenta diversos grupos hidroxilas e baixo grau de cristalinidade que determinam a alta capacidade de absorver água (DJAFARI PETROUDY, 2017; RONG *et al.*, 2001).

A lignina está presente nas paredes celulares das fibras vegetais, e une as paredes celulares, fornecendo rigidez na estrutura e criando uma barreira protetora responsável pela durabilidade da fibra (BOUSFIELD *et al.*, 2018; CARVALHO, 2005).

A Tabela 9 apresenta a composição química das fibras vegetais mais comumente utilizadas, e que determinaram a empregabilidade das mesmas.

Tabela 9. Composição química fibras vegetais

Fibras	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Ceras (%)
Algodão	85-90	5,7	-	0,6
Linho	71	18,6-20,6	2,2	1,5
Rami	68,6-97	5-16,7	0,6-0,7	0,3
Kenaf	72	20,2	9	-
Sisal	65-67	12	9,9	2
Abacaxi	55-68	15-20	8-12	4-7
Juta	64,4	14-22	12-15	0,5

Fonte. Adaptado de Chand; Fahim (2021); French (2014); Karimi *et al.* (2014); Majeed *et al.* (2013); Pandit *et al.* (2020); Saha *et al.* (2010); Sarikanat *et al.* (2014); Ullah *et al.* (2017)

2.1.4.3 Natureza hidrofílica das fibras vegetais

A natureza hidrofílica das fibras vegetais faz referência a presença de água nas fibras lignocelulósicas, principalmente pela absorção de água (característica inerente do material) ou pela vaporização de água confinada na fibra ou quando a fibra é utilizada como reforço em compósitos. Tanto a absorção como a vaporização promovem a mudança dimensional da estrutura das paredes celulares da fibra e o desenvolvimento de tensões internas que afetam as propriedades das fibras, a adesão e compatibilidade entre fibra-matriz; e o comportamento do compósito (CAMPILHO, 2016; SILVA, 2017).

A propriedade hidrofílica das fibras vegetais é viabilizada pela presença de grupos hidroxilas combinadas com macromoléculas da parede celular, provenientes principalmente na celulose, lignina e pectina; como também nos espaçamentos das microfibrilas (HUO *et al.*, 2010; SILVA, 2017).

Assim, diversas pesquisas recentes revelaram que a absorção de umidade pode ser diminuída ou bloqueada pela modificação dos grupos hidroxilas da superfície da fibra, através de tratamentos superficiais classificados em tratamentos químicos e tratamentos físicos.

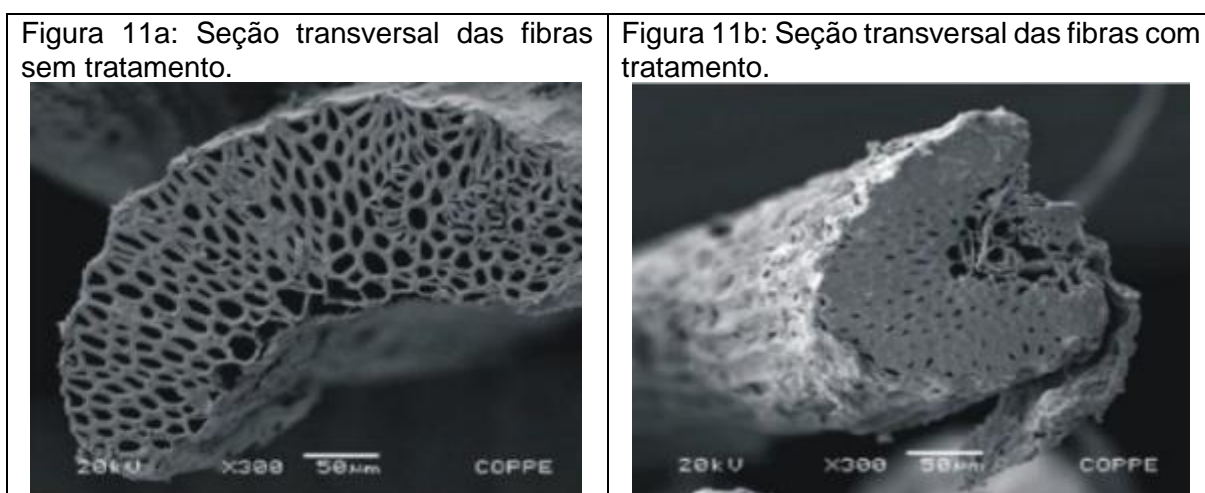
Os tratamentos químicos são baseados em substancias que reagem com os grupos funcionais da estrutura da fibra, alterando sua composição o que pode contribuir com a perda de propriedades físicas e mecânicas da fibra. Entre estas substancias se encontram alcalinização, acetilação e ataques ácidos (HUO *et al.*, 2010; IUCOLANO *et al.*, 2018). Em quanto os tratamentos físicos correspondem a ciclos de molhagem e secagem que através da mudança de temperatura e umidade, são realizadas modificações na superfície e morfologia da fibra que contribuem com a diminuição da taxa de absorção de umidade e mudanças nas propriedades físicas

e mecânicas da fibra (BATISTA, 2021; SAHU; GUPTA, 2017; SINGH; AFRIN; KARIM, 2017).

Entre os tratamentos físicos das fibras vegetais, a hornificação se destaca pelos ciclos de molhagem (até a saturação da fibra vegetal) e secagem com o intuito de diminuir a capacidade de retenção de água das fibras, controlar a absorção de umidade, bem como diminuir a flexibilidade do material e atingir a estabilidade dimensional, por meio do envelhecimento cíclico e acelerado da fibra. Este tratamento enrijece a estrutura, modificando a camada superficial que poderá levar a exposição das fibrilas e saliências do material (FERREIRA *et al.*, 2012; KAMBOJ *et al.*, 2020)

Após os ciclos de molhagem e secagem, as cadeias de celulose são rearranjadas e as microfibrilas se juntam devido ao maior empacotamento (Figuras 11a e 11b) com uma redução do lúmen após a hornificação podendo a estrutura entrar em colapso e desconfigurar a fibrocélula, no entanto, as mudanças na estrutura da parede celular, nos vazios capilares e da porosidade da fibra são irreversíveis (CHEN *et al.*, 2018; FERREIRA *et al.*, 2012).

Figura 11. Seção transversal das fibras com e sem tratamento por hornificação.



Fonte. (FERREIRA *et al.*, 2012)

Para o tratamento por hornificação em fibras vegetais existem na literatura trabalhos que analisam o número de ciclos de molhagem e secagem para posterior

aplicação no desenvolvimento de compósitos visando melhor aderência entre a fibra e a matriz (Quadro 6).

Quadro 6. Tratamento de hornificação com água para diversas fibras vegetais.

Autores	Nº ciclos	Fibra	Observações
(MENDES <i>et al.</i> , 2021)	5	Sisal	Remoção parcial da lignina e hemicelulose que diminui a absorção de água e modifica a morfologia da parede celular da fibra.
(BATISTA, 2021)	5	Sisal	Não promoveu grandes modificações na retenção de água das fibras
(BATISTA <i>et al.</i> , 2021)	10	Sisal	Existe maior aderência entre a fibra e a matriz de gesso, melhorando o comportamento mecânico do material na flexão e tenacidade.
(KAMBOJ <i>et al.</i> , 2020)	4	Sisal	Perda de 6% de retenção de água, contribuindo com a durabilidade da fibra e diminuindo o aumento de massa em 30%.
(FERREIRA <i>et al.</i> , 2017)	5 e 10	Sisal Curauá Juta	Existe uma redução do diâmetro dos lúmens para todas as fibras, no entanto as fibras de Curauá e juta apresentam uma desconfiguração da fibrocélula e sua delaminação com a lamela média. Redução da área da seção transversal das fibras e do diâmetro médio do lúmen.
(FERREIRA <i>et al.</i> , 2016)	10	Sisal Curauá	Existem mudanças nas propriedades mecânicas da fibra após hornificação devido ao rompimento das ligações de hidrogênio entre as macromoléculas na parede celular, sendo que a fibra de sisal é mais sensível ao maior número de ciclos do que a fibra de curauá.
(FERREIRA <i>et al.</i> , 2015)	10	Sisal	Morfologia e a composição química da fibra alteram a eficiência do tratamento. Após tratamento existe uma redução de hemicelulose e lignina, alterando as ligações químicas da fibra.
(CLARAMUNT <i>et al.</i> , 2011)	4	Polpa Kraft Algodão	Após os ciclos de hornificação, a retenção de água e rigidez das fibras de polpa de kraft foi maior, devido à grande quantidade de hemiceluloses na composição química da fibra.

Fonte. Autora.

A escolha do tratamento de hornificação é vital no desempenho da fibra no desenvolvimento do compósito, principalmente relacionado à capacidade de absorção de umidade, variação dimensional e a formação de vazios entre a fase da fibra e a matriz do compósito.

2.1.4.4 Fibras de sisal

As fibras de sisal são extraídas das folhas da planta *Agave Sisalana Perr*, planta monocotiledônea, originária das áreas desérticas do México e introduzida no Brasil pelo Nordeste, devido à baixa aceitação de chuva. Esta planta é de fácil crescimento e com curto tempo de maturação, obtendo-se aproximadamente mil feixes de fibras para cada folha que serão processados para obter as fibras de sisal (MILANESE *et al.*, 2012). A Tabela 10 indica as principais características das fibras de sisal.

Tabela 10. Características da planta *Agave Sisalana Perr*

Caraterística	Descrição
Largura	10 cm
Comprimento	50 – 150 cm
Espessura	6mm
Diâmetro	100-300 um
Quantidade de fibra	4%
Quantidade de cutícula	0,75%
Quantidade de água	87,25%
Quantidade de matéria seca	8%

Fonte. (GHOLAMPOUR, 2020; OLIVITO; CEVALLOS; CARROZZINI, 2014; YU, 2015)

Quanto a composição química, os valores exatos de celulose, hemicelulose, lignina e pectina variam de acordo com a idade da planta, local de extração da fibra e o clima ao que a planta está submetida (SAHU; GUPTA, 2017; THOMAS *et al.*, 2011).

A produção de fibras de sisal no Brasil é uma atividade rural que se inicia quando a planta atinge a maturidade, aproximadamente aos 3 anos de idade, através do processo de extração da folha, que é cortada em quantidades suficientes para não interromper o futuro crescimento da planta. As folhas são recolhidas e transportada a uma máquina que iniciará desfibramento e a raspagem da fibra para a retirada da mucilagem. Os feixes de sisal obtidos durante o desfibramento são limpos e expostos ao sol para secagem por um período aproximado de quatro dias, para posterior batimento e classificação de acordo com o tamanho e grau de impureza da fibra, para posteriormente serem enfardadas e transportadas para as indústrias para a produção

de produtos derivados que apresentam maior valor agregado (SANTOS; SILVA, 2017).

Entre os produtos derivados utilizados no desenvolvimento de compósitos para o setor da construção civil, estão as fibras curtas, os fios, tecidos e as mantas de sisal; sendo que a escolha destes produtos está condicionada as necessidades do compósito.

As mantas de fibras de sisal são não tecidos, considerados estruturas planas, flexíveis e porosas, constituídos pela sobreposição de um ou mais véus orientados aleatoriamente e não consolidados, contribuindo com pequenos vazios internos que influenciam no comportamento do material (ABNT, 2017b).

O uso da manta de sisal está condicionado a espessura do não tecido determinando a qualidade e custo do mesmo; as propriedades físicas da fibra como o brilho e a cor dados pela sua composição natural ou pelo tratamento da fibra; e as propriedades de área da manta.

De acordo com Misnon *et al.* (2014), as mantas têxteis são tecidos tridimensionais produzidos com fibras descontínuas picadas colocadas aleatoriamente, ligadas pela colagem ou entrelaçamento por meio de processos mecânicos, químicos, térmicos ou pela combinação destes. O grupo Hamilton Rios, fornecedor das mantas de sisal utilizadas na pesquisa, produz as mantas pelo entrelaçamento de fibras picadas ligadas aleatoriamente por meio mecânico, através de máquinas agulhadas que permitem controlar a regularidade do peso e uniformidade com uma estocagem realizada por pacotes, rolos e fardos de mantas. As mantas comercializadas tem gramatura de 800-1500 g/m² com larguras de 0,30m até 2,10m (Figura 12), produto utilizado para a produção de colchões e estofados (RIOS, 2019).

Figura 12. Mantas de sisal. Grupo Hamilton Rios



Fonte. (RIOS, 2019)

As mantas podem ser classificadas de acordo com sua gramatura, conforme a NBR 12.984 – Não tecido: Determinação da massa por unidade de área (ABNT, 2009), em manta leve, médio o pesada; e na espessura, em conformidade com a NBR 13.371 - Materiais têxteis: Determinação da espessura (ABNT, 2019c), em materiais planos ou voluminosos.

As propriedades físicas e o processo produtivo das mantas de sisal desempenham um papel fundamental na manufatura e nas propriedades do compósito, destacando-se que as mantas são um material de fácil manuseio, contribuindo com o desenvolvimento de compósitos com maior homogeneidade.

2.2 SITUAÇÕES DE INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES

Durante uma situação de incêndio, os principais objetivos de garantir a resistência e uma proteção contra incêndio são possibilitar a saída dos ocupantes da edificação em condições de segurança, garantir condições apropriadas para o emprego do socorro público e evitar ou minimizar danos à própria edificação (LUCA, 2018).

O maior incêndio em perda de vidas no Brasil aconteceu no Gran Circo Norte-americano, em 1961, na cidade de Niterói com 250 mortos e 400 feridos, das quais 70% eram crianças. O incêndio se iniciou no toldo de algodão revestido de parafina

(material inflamável) que cobria a estrutura do circo e que em um período de 3 minutos caiu sobre o público e em pouco mais do que 5 minutos foi totalmente consumido pelo fogo, colapsando a estrutura, não permitindo a evacuação das pessoas devido à falta de instalações de combate e prevenção de incêndio e de pessoal treinado para este tipo de emergências (GILL; AGASSI; NEGRISOLO, 2013). Este incêndio é o primeiro sinistro que permite identificar a importância dos revestimentos das estruturas em uma construção, visto que permitirá a evacuação das pessoas e a ação dos profissionais especializados em situações de incêndio.

No entanto, a discussão sobre segurança contra incêndio no Brasil se iniciou na década de 70, motivada principalmente por diversas tragédias como os incêndio do edifício Andraus e Joelma, indicadas nas Figuras 13a e 13b (SEITO *et al.*, 2013).

Figura 13. Incêndio nos edifícios Andraus e Joelma.



Fonte. (NASCIMENTO, 2012)

O primeiro grande incêndio em prédios elevados ocorreu no edifício Andraus, em 1972, na cidade de São Paulo. Edifício comercial e de serviços com 31 andares, estrutura em concreto armado (não permitiu o colapso da edificação) e acabamento externo em vidro (que contribuiu com a propagação vertical das chamas). Acredita-se

que o incêndio teve início nos cartazes de publicidade localizados na marquise do prédio, expandindo-se e consumindo toda a edificação, devido a configuração de vãos livres, a falta de laje inteiriças e os materiais que conformavam os revestimentos e mobiliários no local (tapetes, celuloide, papel, entre outros). Neste incêndio resultaram 16 pessoas mortas e 336 feridas, as quais evacuaram a edificação até um heliponto na cobertura que permitiu o resgate das pessoas feridas (GEREZ, 2017; GILL; AGASSI; NEGRISOLO, 2013; NEGRISOLO *et al.*, 2019).

O incêndio do edifício Joelma ocorreu em 1974, na cidade de São Paulo. Edifício de 23 andares de estacionamentos e escritórios, construído com estrutura de concreto armado e fachada tradicional que evitaram o colapso da edificação e permitiram a ação dos bombeiros. Da mesma forma que no incêndio do edifício Andraus, nesta edificação não existia escada de segurança o que levou aos ocupantes da edificação a se deslocarem até o telhado em busca de escape. Entre os fatores que contribuíram com a propagação do fogo se encontram os sistemas construtivos das divisórias, moveis de madeira, piso acarpetados, cortinas de tecidos e forros em fibra sintética. Durante este incêndio resultaram 179 pessoas mortas e 320 feridas (GEREZ, 2017; GILL; AGASSI; NEGRISOLO, 2013; NEGRISOLO *et al.*, 2019).

Também é importante destacar o incêndio da Boate Kiss que ocorreu em 2013 na cidade Santa Maria (Figura 14). O incêndio teve início pelo acendimento de um artefato pirotécnico que soltou faíscas que atingiram o teto da edificação, revestido com espuma acústica (de colchão), não permitida pela alta flamabilidade do material. Durante o incêndio, a espuma produziu uma fumaça que contribuiu com a inalação de monóxido de carbono e cianeto, causando 100% das mortes nesta tragédia (242 pessoas). Destaca-se que entre as quatro irregularidades pontuadas pelo delegado regional, o uso de material de revestimento inadequado foi considerado um fator

essencial na tragédia, contribuindo com o desenvolvimento das diferentes áreas de incêndio como por exemplo o Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Rio Grande do Sul, o Corpo de Bombeiros, entre outros (ACOSTA; LUNARDI; SILVA, 2016; CREA-RS, 2013).

Figura 14. Incêndio na Boate Kiss.



Fonte. (CREA-RS, 2013)

Assim como o incêndio da Boate Kiss, os incêndios do Gran Circo Norte-americano, do Edifício Andraus e Joelma, causaram grande impacto na área de segurança contra incêndio, contribuindo com a reformulação das medidas de segurança contra incêndio, o aperfeiçoamento do corpo de bombeiros e a atualização das normas nacionais.

A regulamentação nacional para a segurança contra incêndio é recente e tem contribuído com discussões sobre as necessidades das legislações, determinar requisitos únicos eficiente e efetivos, assim como o desenvolvimento de pesquisas sobre novas tecnologias para a segurança contra incêndio (CAMARGO, 2016). Nessa linha de pensamento, destaca-se o Decreto Estadual Nº 63.911:2018 que institui o

regulamento de segurança contra incêndios das edificações e áreas de risco no estado de São Paulo, que se bem este decreto corresponde ao estado de São Paulo, é utilizado em diferentes estados. Este decreto está acompanhado pelas Instruções Técnicas, promulgadas em 2011 e atualizadas em 2019.

Atualmente, novas exigências para a resistência e reação ao fogo de elementos construtivos e materiais em situações de incêndio estão em vigor. Por exemplo, as normas NBR 16965 - Ensaio de resistência ao fogo para elementos construtivos (ABNT, 2021b) e NBR IEC 60695 - Ensaio relativos ao risco de fogo (ABNT, 2020), que apresentam requisitos e métodos de ensaios para avaliar as soluções construtivas prévio ao seu uso.

A reação ao fogo dos materiais incorporados aos sistemas construtivos deve ser verificada através de ensaios laboratoriais para determinar o potencial do material para contribuir com o desenvolvimento do fogo, em função da posição que eles serão instalados (vertical ou horizontalmente). O conjunto de ensaios laboratoriais permitem determinar a reação ao fogo dos materiais, determinando: combustibilidade, calor liberado na combustão, velocidade de propagação das chamas e a quantidade de produtos de combustão. Portanto, os materiais são um dos principais fatores responsáveis pelo crescimento do fogo, propagação das chamas e desenvolvimento de fumaça e gases tóxicos; e conseqüentemente, são responsáveis pela evacuação segura durante um incêndio (NEGRISOLO *et al.*, 2019; SEITO *et al.*, 2013)

O potencial dos materiais para contribuir com o desenvolvimento e proteção contra o fogo permite classificar os materiais em categorias; de acordo com a norma NBR 16.626 (ABNT, 2017c), os materiais incombustíveis são classificados com classe I e os materiais combustíveis são classificados com classe II-III-IV-V-VI, de acordo com o índice de propagação de chama e a densidade ótica de fumaça corrigida. Os

requerimentos técnicos de cada classificação estão determinadas de acordo com o uso do material.

O gesso se caracteriza por ser um material classe II: difícil combustão e baixa emissão de fumaça, tornando-o um material de grande interesse para revestimentos de estruturas, construção de divisórias e de forro. De acordo com Kolaitis; Asimakopoulou e Founti, (2017) e Kolaitis e Founti (2013), às chapas de gesso acartonado apresentam um adequado isolamento térmico e de proteção contra incêndio, visto que quando o gesso é submetido a altas temperaturas, as moléculas de água na sua rede cristalina são liberadas e transferidas através do volume do material, sofrendo o fenômeno de desidratação, absorvendo a energia térmica proveniente do incêndio, reduzindo a temperatura da parede e aumentando sua resistência ao fogo.

Os autores também fazem referência a decomposição química do gesso em que o sulfato de cálcio di-hidratado perde 75% da sua água com o aumento da temperatura, formando o sulfato de cálcio hemi-hidratado e contribuindo com o colapso parcial das chapas de gesso. Posteriormente, com o aumento paulatino da temperatura, inicia-se a transformação do sulfato de cálcio hemi-hidratado em sulfato de cálcio anídrico, com a perda d'água restante do material. Destaca-se que estas reações requerem de grandes quantidades de energia para serem completadas e para que as chapas de gesso apresentem o colapso global, como consequência da degradação progressiva do material até atingir a ruína total.

É conhecido as contribuições à segurança contra incêndio e suas contribuições à segurança da estrutura das edificações, no entanto é fundamental observar os casos de colapso global de chapas de gesso prévio a ignição das estruturas. Em 2011, um incêndio gerado pela iluminação de natal destruiu uma loja de tecidos em Linhares no

Norte do Espírito Santo (Figura 15a). Durante o incêndio as chapas de gesso cumpriram a função de isolamento e estanqueidade, mantendo a resistência mecânica do elemento estrutural da loja permitindo que a temperatura do local aumentasse, evitando a propagação das chamas e do calor a outras lojas vizinhas.

Durante o incêndio as chapas de gesso perderam a resistência térmica e mecânica, levando-as ao colapso com parte do material suspenso e parte no piso em pequenos pedaços. Neste caso, na Figura 15b é possível observar que o tempo de incêndio foi pequeno, uma vez que algumas áreas da parede da loja apresentam fuligem e não sua totalidade.

Figura 15. Colapso forro em loja de tecidos.

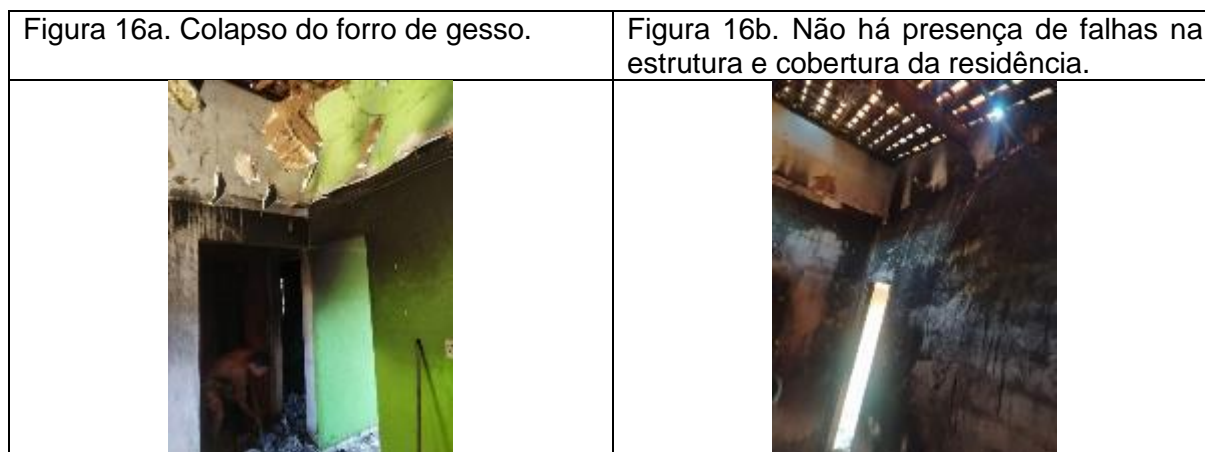


Fonte. (G1, 2011)

Em 2019, um incêndio destruiu uma residência em Santo Inácio do Piauí após curto-circuito na rede elétrica da residência. A Figura 16a mostra como as chapas de gesso protegeram a estrutura da residência, deixando-a intata após o sinistro, sem escurecimento por fumaça na região. No entanto, após o aumento de temperatura, as chapas de gesso sofreram o colapso global devido a desidratação do material, contribuindo com o colapso.

Na Figura 16b, é possível observar, a fuligem e escurecimento por fumaça das vigas do cômodo mais afetado da residência, no entanto não houve colapso da estrutura, permitindo a ação do corpo de bombeiros da cidade.

Figura 16. Incêndio em residência em Santo Inácio do Piauí



Fonte. (PIMENTEL, 2019; VITAL, 2019)

Se bem as principais causas dos acidentes com chapas de gesso acartonado estão associadas a contração do material, ablação e formação de fissuras, como consequência do processo de desidratação, não se deve esquecer o perigo da exposição das estruturas em situações de incêndio, principalmente as construções em *woodframe*.

Atualmente o sistema construtivo *woodframe* é uma técnica construtiva com estrutura em madeira seca e tratada contra agentes degradadores xilofagos para a montagem de paredes interiores e exteriores, e piso com suporte de carga, utilizada principalmente em edifícios de pequeno porte. Este sistema construtivo é usado em diferentes partes no mundo como Estados Unidos, Inglaterra, Portugal e recentemente no Brasil; e se caracteriza pela utilização de isolamento térmico, acústico e de diferentes painéis de revestimento para a estrutura de madeira como as chapas de gesso acartonado (KOLAITIS; ASIMAKOPOULOU; FOUNTI, 2014).

Na Figura 17, é possível observar os escombros de um incêndio massivo que devastou um conjunto residencial conformado por 5 prédios de apartamentos com 260 residências unifamiliares em Massachusetts, ficando intacta a estrutura em concreto do elevador e dos estacionamentos. O incêndio se iniciou durante a construção de 5 edificações com estrutura em madeira e prévio a construção dos revestimentos em chapas de gesso acartonado, contribuindo com a propagação rápida do incêndio devido à natureza combustível da madeira. De acordo com o corpo de bombeiros, devido a carga térmica do incêndio, grandes brasas foram geradas e expelidas para fora da primeira edificação ignizada, contribuindo com a propagação do fogo para as edificações vizinhas.

Figura 17. Incêndio em conjunto habitacional, Massachusetts.



Fonte. (VERZONI, 2018)

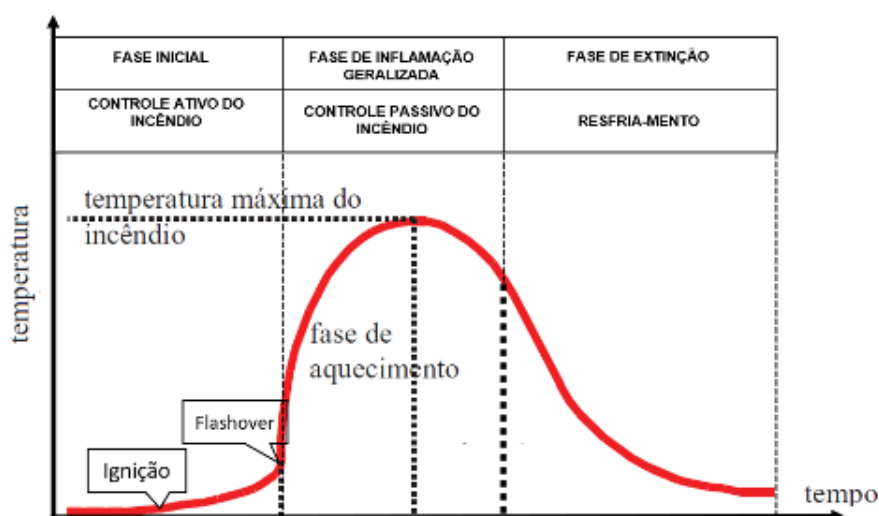
2.2.1 Evolução do incêndio

De acordo com (SEITO, 2008), o crescimento do incêndio dependerá do primeiro item ignizado, comportamento ao fogo dos materiais que compõem o item ignizado e

dos materiais na proximidade deste, bem como da distribuição no ambiente construído.

A evolução do incêndio está determinada pela curva tempo-temperatura (Figura 18), conformada por três fases: a fase inicial, fase de inflamação generalizada e fase de extinção.

Figura 18. Curva tempo-temperatura incêndio real.



Fonte. Adaptado de (MITIDIERI, 2013; NEGRISOLO *et al.*, 2019; PURKISS; LI, 2013)

De acordo com Mitidieri (2013), Negrisoló *et al.* (2019) e Purkiss e Li (2013), a fase inicial apresenta uma região inicial de baixas temperaturas em que o incêndio está restrito a um foco (material ignizado) com um crescimento lento até a ignição.

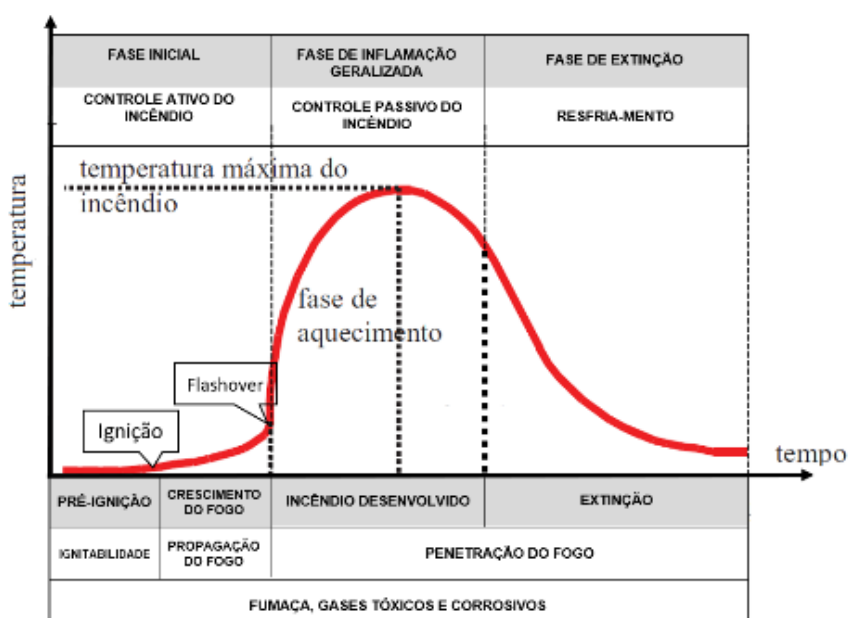
Em relação à fase de inflamação generalizada, os autores determinam que o crescimento das chamas ocorre quando os materiais combustíveis vizinhos ao material ignizado são envolvidos pelo fogo, promovendo a propagação das chamas até atingir o incêndio generalizado ou *flashover*. Quando a temperatura atinge 600°C, considera-se o ambiente completamente exposto a gases e vapores desenvolvidos durante a queima dos materiais, aumentando bruscamente a inclinação da curva (fase de aquecimento) alcançando a temperatura máxima, instante em que o fogo se espalha.

Finalmente, os autores identificam a fase de extinção como a fase em que haverá uma diminuição gradual da temperatura e das chamas devido a que o material combustível existente no ambiente já foi consumido.

A partir da Figura 18, destaca-se que quanto maior for a fase inicial de evolução do incêndio maior será a possibilidade de combatê-lo, por meio do controle ativo do incêndio, enquanto na fase de inflamação generalizada o controle é de forma passiva, atingindo o resfriamento na fase de extinção.

Na Figura 19, observa-se a relação entre os estágios e as fases de evolução do incêndio, dado que na fase inicial ocorrem o primeiro e segundo estágio: pré-ignição e crescimento do fogo (geração de gases tóxicos ou asfixiantes como resultado da combustão, indicando um perigo para o ser humano e requerendo a evacuação das pessoas). Na fase de inflamação generalizada acontece o desenvolvimento do incêndio e na fase de extinção o resfriamento.

Figura 19. Relação entre as fases de evolução e estágios do incêndio.



Fonte. Adaptado de (MITIDIARI, 2013; NEGRISOLO *et al.*, 2019; PURKISS; LI, 2013)

Durante a evolução de um incêndio, surgem diferentes riscos que envolvem os materiais, a vida humana e a propriedade. Entre os riscos aos materiais encontram-

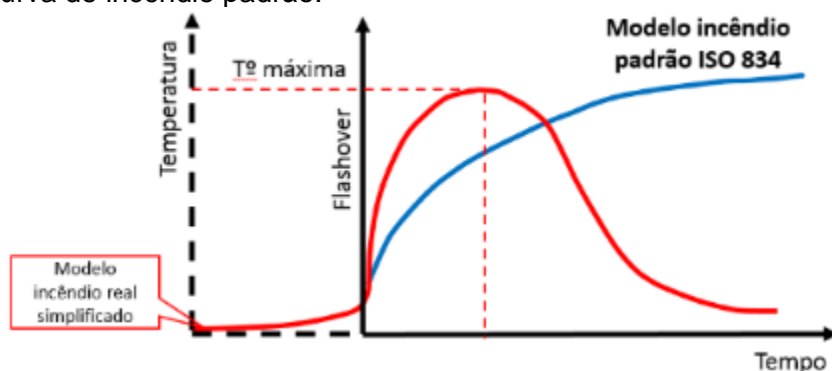
se o risco de incêndio (possibilidade do surgimento de um foco de incêndio determinado pelos materiais combustíveis existentes no ambiente e pelos materiais vizinhos), o risco de crescimento do incêndio (probabilidade de passar da fase inicial para a fase de inflamação generalizada), e o risco de propagação (possibilidade de que o incêndio generalizado se multiplique para ambientes e edifícios vizinhos). Em relação ao risco da vida humana, o calor desenvolvido, a geração de fumaça e gases tóxicos são fatores que afetam a saúde das pessoas impedindo a evacuação do ambiente e o combate ao incêndio. Finalmente, o risco a propriedade está presente durante todas as fases do incêndio, a partir da danificação dos materiais existentes no ambiente ou dos materiais e edificações vizinhas (MITIDIERI, 2013).

2.2.2 Incêndio real e incêndio padrão

As curva tempo-temperatura de um incêndio real simplificado são modeladas para simular uma situação específica de acordo com os parâmetros de cada incêndio: carga de incêndio (determina a quantidade de calor produzido), ventilação (distribui a fumaça e modifica as temperaturas) e propriedades físico térmicas dos materiais ou elementos (contribuem com o desenvolvimento do fogo) (NEGRISOLO *et al.*, 2019).

Estes parâmetros determinam uma curva tempo-temperatura específica para cada incêndio, dificultando a construção de uma curva tempo-temperatura típica; Portanto se faz necessário adotar curvas padronizadas como modelo para a análise experimental dos materiais e soluções construtivas. Estas curvas padronizadas ou curvas de incêndio-padrão ilustram um processo de aquecimento monotônico independentemente do tempo de duração do incêndio e sem a diminuição da temperatura na extinção do incêndio (Figura 20).

Figura 20. Curva de incêndio padrão.



Fonte. Adaptado de Negrisolo *et al.* (2019)

Existem diversas curvas padrão tempo-temperatura em diferentes países (Alemanha, Itália, Suíça, Japão, USA, entre outros) no entanto, o modelo mais utilizado internacionalmente é a curva indicada na Figura 19 e determinada pela ISO 834 - *Fire-resistance tests. Elements of building construction* (ISO, 2021), que permite determinar a temperatura máxima atingida pelo material e conseqüentemente, a resistência ao fogo e aumento de temperatura em função do tempo. Esse tempo é conhecido como tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF).

O TRRF de um elemento construtivo, está determinado pelas características físico-químicas dos materiais constituintes, podendo ou não manter a segurança estrutural (resistência, integridade e capacidade portante; contribuindo com o colapso), comportamento térmico, isolamento e estanqueidade.

O tempo requerido de resistência ao fogo é fornecido pelas Instruções Técnicas dos Corpos de Bombeiros e pela NBR 14432 - Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações. Procedimento (ABNT, 2001), através das exigências de resistência ao fogo, em situações de incêndio, para que seja evitado o colapso por tempo suficiente para permitir a saída das pessoas e inclusive durante a vida útil dos elementos. Portanto, os elementos construtivos devem atingir um tempo igual o superior ao tempo requerido de resistência ao fogo indicado pela norma vigente, podendo ser de 30, 60, 90 e 120 minutos.

2.2.3 Segurança das estruturas em situações de incêndio

A segurança e verificação das estruturas para situações de incêndio é fundamental para diminuir os riscos à vida como consequência de possíveis desabamentos de elementos construtivos, principalmente para as edificações de maior porte em que devem ser atingidos requisitos de estanqueidade e isolamento pelo tempo necessário para a fuga dos ocupantes da edificação em condições de segurança, segurança das equipes de combate ao incêndio e minimização dos danos as edificações vizinhas (ABNT, 2001).

De acordo com Pignatta *et al.* (2013), os materiais dos elementos estruturais perdem resistência devido a alteração das propriedades mecânicas ou da redução da área resistente. Por exemplo: a resistência do concreto está condicionada ao *spalling*, as propriedades do aço estão determinadas pela alta temperatura média do material, a madeira sofre carbonização o que contribui com a realimentação do incêndio, o alumínio apresenta uma resistência e modulo de elasticidade reduzido com o aumento das temperaturas, entre outros materiais.

Os autores também destacam como as propriedades físicas e térmicas são afetadas pelo aumento da temperatura, as quais devem garantir o desempenho e durabilidade dos materiais. Entre as propriedades físicas e térmicas se encontram a condutividade térmica, calor específico, densidade e coeficiente de dilatação térmica.

Estas propriedades interferem no Tempo Requerido de Resistencia ao Fogo (TRRF), que segundo a Instrução Técnica Nº8 (IT, 2019b) corresponde ao tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo quando sujeito a um incêndio padrão, para que, seja evitado o colapso estrutural por tempo suficiente para permitir a evacuação das pessoas.

A partir do TRRF, determina-se a uniformidade ou não uniformidade na distribuição da temperatura dos elementos estruturais, permitindo seu dimensionamento. Uma vez determinado o TRRF, frequentemente são utilizados materiais de revestimento contra o fogo para as estruturas, diminuindo a capacidade de ignição, o aumento excessivo da temperatura das estruturas, através do uso de materiais projetados, materiais rígidos ou semi-rígidos como as chapas de gesso acartonado e tintas intumescentes. Destaca-se que estes materiais de revestimento contra o fogo podem atingir uma resistência contra o fogo de 240 minutos, tempo que pode ser maior quando são utilizadas múltiplas camadas de revestimento (ONO, 2019; PIGNATTA *et al.*, 2013; SEITO *et al.*, 2013).

2.2.4 Resistência ao fogo dos materiais de acabamento e revestimento

Os materiais cumprem uma função importante na evolução do incêndio, dificultando ou contribuindo no crescimento do incêndio, desde a fase inicial e até uma possível inflamação generalizada.

A intensidade de um incêndio está determinada pela quantidade de material combustível existente no ambiente (carga de incêndio) e sua taxa de queima, o que determinará o risco de incêndio daquele ambiente e o sistema de proteção contra o incêndio. O controle da carga de incêndio no ambiente é uma proteção passiva efetiva em situações de incêndio através da análise da resistência ao fogo e o poder calorífico dos materiais, que permitem identificar a contribuição da carga fixa e assim dar preferência aos materiais com baixos índices (ONO, 2019).

Assim, a resistência ao fogo é a capacidade dos materiais e sistemas construtivos de suportar um incêndio sem deixar de exercer as funções de estanqueidade, isolamento térmico e estabilidade ou resistência mecânica (BRENTANO, 2016; SILVA, 2014). No entanto, (BRENTANO, 2016) também comenta a importância da

caracterização dos materiais pela capacidade de conservar suas propriedades funcionais durante a ação do fogo, determinada por: materiais estáveis ao fogo (atende aos requisitos de resistência ao fogo), pára-chamas (atende os requisitos de resistência mecânica e estanqueidade) e corta-fogo (supre as necessidades de resistência mecânica, estanqueidade e isolamento térmico).

A resistência ao fogo e a caracterização dos materiais estará condicionada por variáveis extrínsecas e intrínsecas do elemento. As variáveis extrínsecas são a capacidade de manter a combustão, facilidade de ignição e propagação das chamas pela superfície, quantidade e taxa de desenvolvimento de calor, desprendimento de partículas e produção de gases e fumaça. No entanto, as variáveis intrínsecas que controlam a ignição do material e que também determinam a resistência ao fogo: geometria, produtos desenvolvidos na pirolise e propriedades termodinâmicas (MITIDIERI, 2013).

2.2.5 Reação ao fogo dos materiais de acabamento e revestimento.

De acordo com a NBR 16626 – Classificação da reação ao fogo de produtos de construção (ABNT, 2017c), a reação ao fogo consiste na resposta de um produto, ao contribuir pela sua decomposição, a um fogo ao que está exposto. Portanto, as características de combustão dos materiais de acabamento e revestimento estão fortemente ligadas às variáveis que determinam a resistência ao fogo.

A reação ao fogo dos materiais difere em função de cada fase do incêndio. Na fase inicial a reação ao fogo é fundamental para diminuir a concentração de gases que possam permitir a inflamação e propagação do fogo, sendo que todos os materiais instalados nas vedações verticais e forros são mais susceptíveis ao incêndio do que os materiais instalados no piso. Na fase de inflamação generalizada a resistência ao fogo determina a capacidade de propagar as chamas nos materiais vizinhos com uma

reação em cadeia e resultando em um incêndio generalizado, e na fase de extinção os materiais já produziram todos os efeitos, portanto não cumprem uma função prejudicial (MITIDIERI, 2013; SILVA, 2014).

Na seleção dos materiais de acabamento e revestimento, devem ser privilegiados os materiais com alta reação ao fogo, ou seja, que não se ignizem com facilidade e não sustentem a combustão, diminuindo a possibilidade do incêndio se inicie nestes materiais que formam parte da edificação.

De acordo com Negrisoló *et al.* (2019), entre as variáveis inerentes aos materiais de acabamento e revestimento que influenciam na reação ao fogo estão: combustibilidade, poder calorífico, inflamabilidade, propagação superficial da chama, produção de gases nocivos e de fumaça.

O autor define as variáveis como: a combustibilidade classifica o material a partir da capacidade de manter a combustão, o poder calorífico é a quantidade de calor que o material libera por unidade de peso na combustão completa, a inflamabilidade é a capacidade de uma material se queimar em chamas, a propagação superficial refere-se a velocidade em que as chamas avançam pela superfície do material e está condicionada ao posicionamento da amostra em função da chama (vertical ou horizontal), a fumaça é a concentração visível de partículas em suspensão resultante da combustão, podendo ser tóxica através da produção de gases que causam lesões respiratórias e físicas nas pessoas.

Estas variáveis inerentes aos materiais podem ser analisadas a partir de diferentes métodos de ensaios de acordo com as normas vigentes e os respectivos requerimentos que permitem determinar as características dos materiais em situações de incêndio e sua reação ao fogo.

De acordo com a Instrução Técnica Nº10 (IT, 2019c) que dispõe sobre o controle de materiais de acabamento e revestimento, os materiais podem ser classificados frente a reação ao fogo por três ensaios: incombustibilidade (ISO 1182:2020), propagação superficial de chama (ABNT NBR 9442:2009) e densidade ótica de fumaça (ASTM E 662:2021). Durante a execução destes ensaios é necessário controlar a fonte de ignição, o tempo de aplicação do calor e a ventilação.

A Tabela 11 apresenta a classificação dos materiais exceto para revestimentos de piso, de acordo com cada ensaio e norma vigente.

Tabela 11. Classificação dos materiais exceto para revestimentos de piso.

Classe		Método de ensaio		
		ISO 1182	NBR 9442	ASTM E 662
I	A	Incombustível $\Delta T \leq 30^{\circ}\text{C}$ $\Delta m \leq 50\%$ $t_f \leq 10\text{s}$	-	-
		Combustível	$l_p \leq 25$	$D_m \leq 450$
II	A	Combustível	$l_p \leq 25$	$D_m > 450$
	B	Combustível	$25 \leq l_p \leq 75$	$D_m \leq 450$
III	A	Combustível	$25 \leq l_p \leq 75$	$D_m > 450$
	B	Combustível	$75 \leq l_p \leq 150$	$D_m \leq 450$
IV	A	Combustível	$75 \leq l_p \leq 150$	$D_m > 450$
	B	Combustível	$150 \leq l_p \leq 400$	$D_m \leq 450$
V	A	Combustível	$150 \leq l_p \leq 400$	$D_m > 450$
	B	Combustível	$l_p > 400$	-
VI		Combustível	$l_p > 400$	-

l_p : Índice de propagação superficial de chama; D_m : Densidade ótica específica máxima; ΔT : Variação da temperatura no interior do forno; Δm : Variação da massa do corpo de prova; t_f : Tempo de flamejamento do corpo de prova.

Fonte. Adaptado de (IT, 2019c)

Embora o Corpo de Bombeiros, através da Instrução Técnica Nº10 (IT, 2019c), determine a reação dos materiais através de três ensaios. Atualmente existem ensaios complementares como o ensaio de *Single Burning Test* (EM 13823:2020) e o ensaio de ignitabilidade (ISO 11925-2:2021).

Uma vez classificado o material, é necessário considerar os requerimentos da norma NBR 15575 - Edificações habitacionais. Desempenho (ABNT, 2021c), que

determinará os requisitos dos materiais e sistemas construtivos de acordo com o uso, área, altura e tipo de ocupação da edificação.

2.3 COMPORTAMENTO FRENTE AO FOGO DO GESSO E AS FIBRAS NATURAIS

2.3.1 Gesso em situações de incêndio

A exposição a altas temperaturas do gesso endurecido danifica as características físicas e químicas do material, modificando as propriedades térmicas e mecânicas de forma progressiva.

O gesso endurecido contém uma grande quantidade de água nos cristais, adquirida durante o processo de hidratação da pasta de gesso. Esta água excedente está localizada nos cristais como água confinada (20%) que permite a adesão dos cristais hidratados; e como água livre (3%) situada na superfície dos cristais, permitindo as ligações de hidrogênio entre as moléculas de água (KEERTHAN; MAHENDRAN, 2012; RAHMANIAN, 2011). No entanto, quando o gesso está exposto a altas temperaturas sofre duas reações de decomposição endotérmica na qual inicia-se a perda de água excedente nos cristais por desidratação e posteriormente a decomposição química do gesso (KOLAITIS; ASIMAKOPOULOU; FOUNTI, 2014).

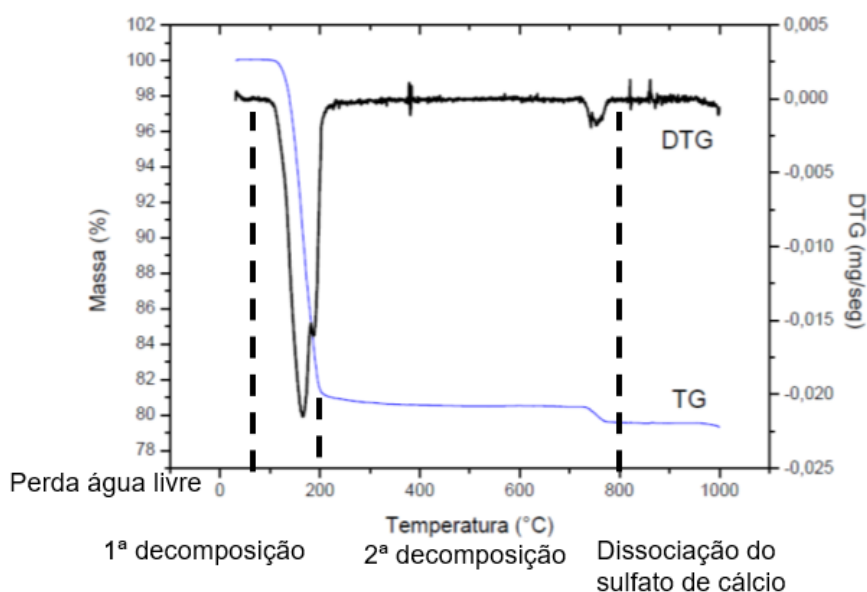
Durante um incêndio, a camada de gesso da chapa inicia um processo de decomposição química provocada pelo aumento progressivo da temperatura na face exposta do material ao fogo até atingir 120°C, aproximadamente. Neste momento, a água livre de hidratação contida nos cristais é evaporada à medida que o material absorve a energia calórica, retardando a transferência de calor e o aumento abrupto da temperatura. Portanto, a evaporação da água livre permite que o gesso atue como barreira frente o fogo, protegendo outros elementos construtivos de serem

superaquecidos (KEERTHAN; MAHENDRAN, 2012; KONTOGEORGOS; FOUNTI, 2012)

À medida que o incêndio e o aquecimento do material progridem, o gesso começa um processo de desidratação denominado calcinação, caracterizado pela evaporação da água confinada dentro dos cristais do material. A calcinação resulta na retração do material provocando o fissuramento, permitindo a transferência do calor e fogo de acordo com os danos ocorridos; contribuindo com a perda de resistência (PAYRAUDEAU LE ROUX *et al.*, 2016; RAHMANIAN, 2011)

Na Figura 21, observa-se uma perda de água livre do gesso endurecido em forma de vapor de água a partir da temperatura de 73°C, seguida por duas reações de decomposição endotérmica induzida por duas mudanças de fase.

Figura 21. DTG e TG para o gesso endurecido.



Fonte. Adaptado de (BRANDÃO, 2015)

De acordo com a Figura 21, a primeira reação de decomposição ocorre a temperaturas entre os 120°C-200°C, quando o sulfato de cálcio di-hidratado é convertido em hemi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ se converte em $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} + \frac{3}{2}\text{H}_2\text{O}$) e aproximadamente 75% da água combinada é liberada com uma perda de massa de

9%; a segunda reação de decomposição do gesso ocorre acima dos 200°C, quando o 25% restante da água quimicamente ligada aos cristais é removida progressivamente do hemi-hidrato, convertendo-se em diferentes formas de anidrita, de acordo com a temperatura de desidratação. Enquanto, acima de 800°C ocorre a dissociação do sulfato de cálcio e a perda de 1% de massa formando anidrita insolúvel (BRANDÃO, 2015; KONTOGEORGOS; FOUNTI, 2012)

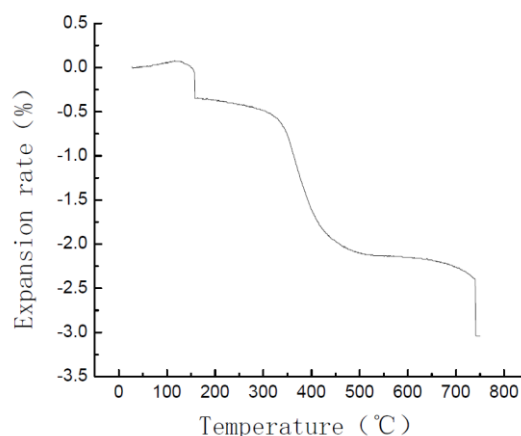
Segundo Weber (2012), durante o processo de desidratação do gesso endurecido, a água de cristalização é liberada como vapor e transportada por pressão e difusão pelos poros do material; podendo iniciar-se um processo de condensação quando o vapor é transportado de zonas quentes a zonas mais frias.

Os poros do gesso endurecido podem ser classificados em macro, meso e micro. Os macro poros surgem no processo de fabricação do gesso endurecido pela formação de bolhas de ar na pasta, apresentando uma forma esférica com dimensões entre 50 µm a 1 mm de diâmetro e fronteiras configuradas com cascas densas de cristais organizados. No caso dos mesoporos, estes surgem pela dissolução de grão de hemi-hidrato e apresentam uma estrutura irregular com dimensões entre 10 a décimos de micrômetros. Finalmente, os microporos são porosidades intersticiais, conetando os cristais de gesso às agulhas (PAYRAUDEAU LE ROUX *et al.*, 2016).

2.3.1.1 Variação dimensional e ablação do gesso endurecido.

Quando o gesso endurecido está submetido a altas temperaturas, efeitos como a variação dimensional podem ocorrer de modo a causar problemas na estrutura do material. Segundo Zhang *et al.* (2019), este fenômeno consiste na expansão ou contração térmica do material que ocorre pela absorção e liberação de energia, bem como das alterações físico-químicas que se desenvolvem em 5 intervalos de temperatura (Figura 22).

Figura 22. Curva dilatométrica para o gesso β utilizado na construção civil.



Fonte. (ZHANG *et al.*, 2019)

A variação dimensional do gesso acontece nos intervalos a seguir:

1. A temperaturas entre 20°C-120°C o gesso inicia um processo de expansão térmica correspondente ao processo de hidratação e crescimento dos cristais, apresentando uma taxa de expansão térmica de +0,03%;
2. Com o aumento das temperaturas de 120°C para 200°C, o gesso perde água combinada dos cristais e a taxa de expansão será negativa, atingindo -0,4%, indicando a contração do material;
3. A temperaturas superiores a 200°C, a taxa de expansão térmica se acentuará negativamente e a contração do material aumentará, devido a perda de 25% da água quimicamente ligada;
4. A partir dos 350°C a contração do material se acentua abruptamente;
5. A 740°C o gesso endurecido se encolhe totalmente (-3.0%) com uma redução significativa da resistência do material devido à perda total de água dos cristais.

A variação dimensional influencia diretamente a densidade do gesso endurecido, sendo que a densidade do material varia à medida que a temperatura aumenta, devido ao crescimento dos cristais, evaporação de água e perda de massa que contribuem

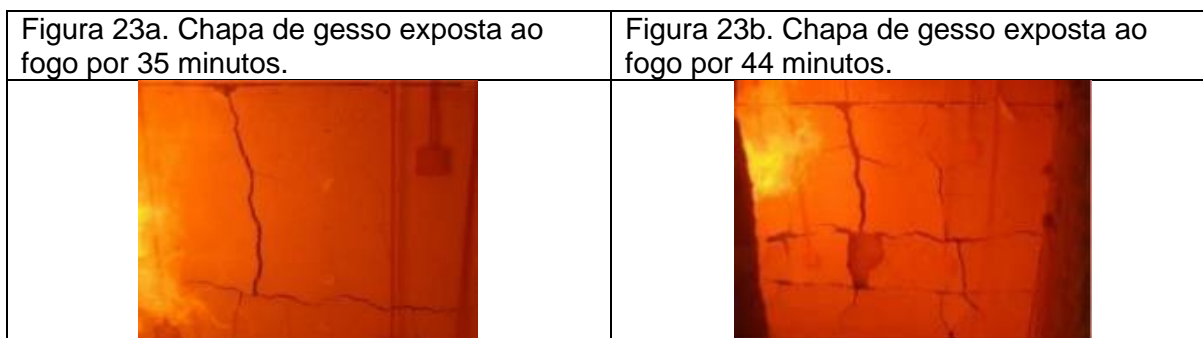
com a contração do material. Quando a variação dimensional é negativa, o material aumenta sua densidade e vice-versa (RAHMANIAN,2011).

Simultaneamente a variação dimensional da camada de gesso das chapas, ocorrerá o fenômeno de ablação que consiste na remoção do material através da vaporização quando a temperatura atinge e supera o limiar crítico, retirando a energia térmica contida na massa do material e reduzindo a temperatura média interna remanescente (KERSE *et al.*, 2016).

Segundo Keerthan; Mahendran (2012), quando a camada de gesso da chapa é submetido a temperaturas de 700°C, inicia-se o processo de ablação que acontece previamente a dissociação do sulfato de cálcio durante a segunda reação endotérmica, que se expressa visualmente através do esfarelamento e fissuramento do gesso endurecido, levando o material até a ruína total.

Em outra pesquisa dos mesmos autores (KEERTHAN; MAHENDRAN, 2013), foi possível determinar que o esfarelamento e fissuramento do gesso endurecido são consequência do estresse térmico (forças de tração) durante a contração do material, promovendo a redução a espessura e a seção transversal do material. Estas mudanças no material (Figuras 22a e 22b) afetam na capacidade da camada de gesso de fornecer resistência térmica e mecânica, dado que as fissuras funcionam como caminhos para a transferência de calor (aumentando a temperatura interna), o que eventualmente danificará catastróficamente o material.

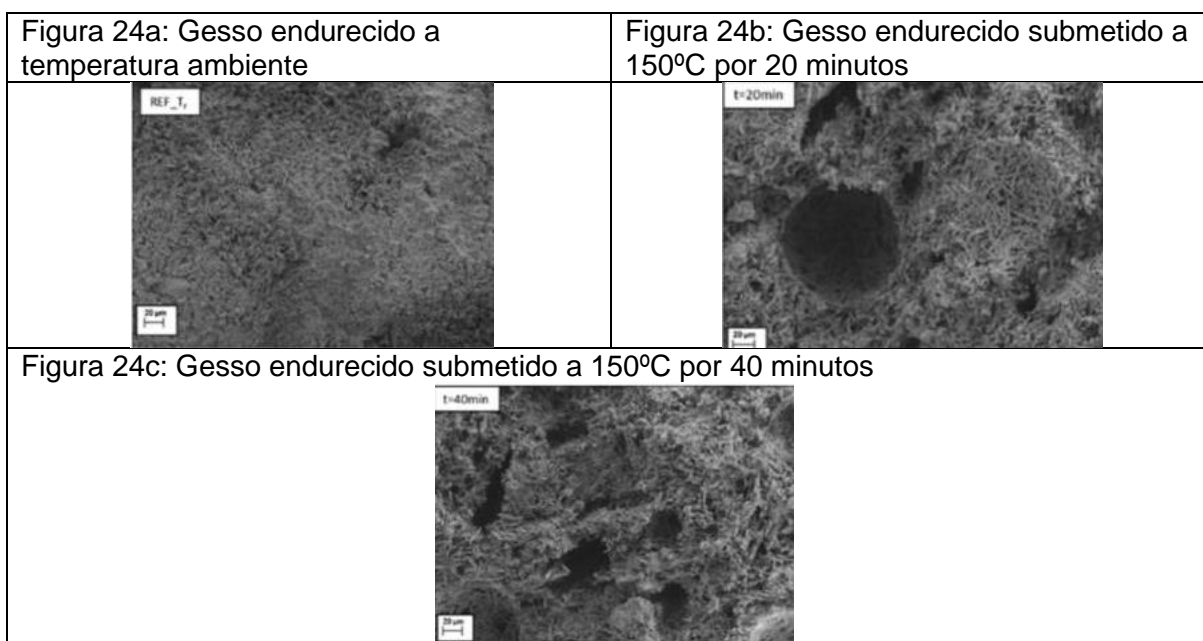
Figura 23. Chapa de gesso exposta ao fogo.



Fonte. (JUST; SCHMID; KÖNIG, 2010).

Segundo Iucolano *et al.* (2018), nas Figuras 24a, 24b e 24c é possível observar as imagens por microscopia eletrônica de varredura do gesso endurecido a temperatura ambiente, a 150°C após 20 minutos e a 150°C após 40 minutos. Observa-se que, prévio ao processo de ablação, o gesso endurecido se conforma como um material homogêneo com pequenas porosidades, no entanto, após exposição durante 20 minutos a 150°C, surgem algumas fissuras e aumenta a porosidade do material. Estas características ficam mais acentuadas quando o gesso atinge 40 minutos sobe a influência da temperatura, convertendo-se em um material heterogêneo.

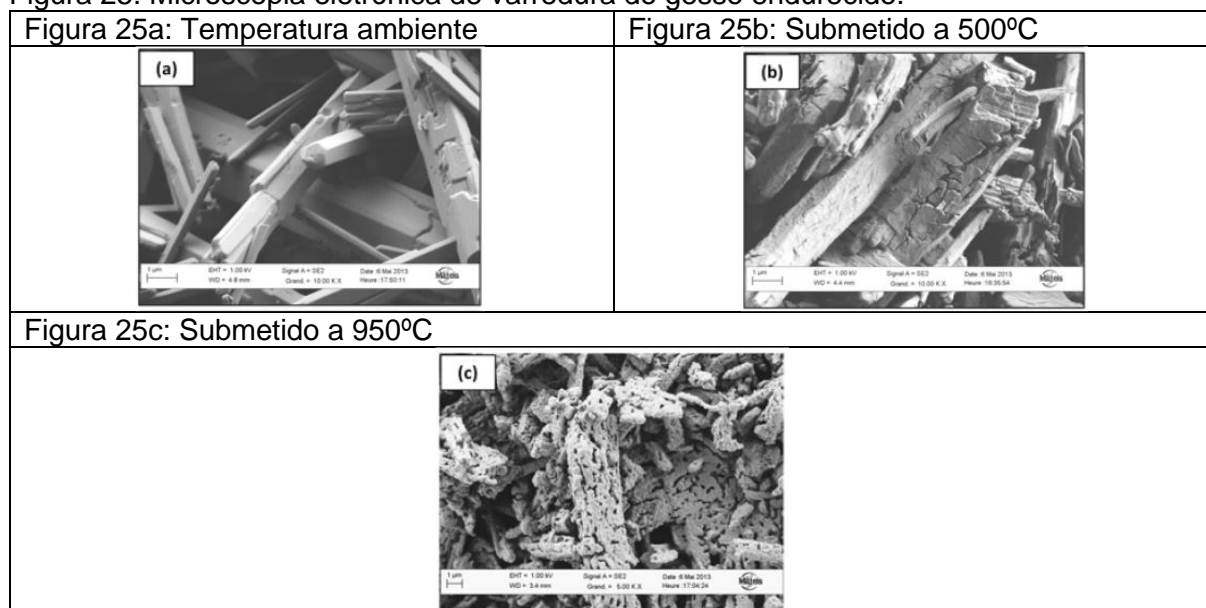
Figura 24. Microscopia eletrônica de varredura do gesso endurecido submetido a 150°C.



Fonte. (IUCOLANO *et al.*, 2018)

Payraudeau Le Roux *et al.* (2016), analisaram amostras de gesso endurecido a temperatura ambiente, a 500°C e a 950°C. As Figuras 25a, 25b e 25c mostram que os cristais a temperatura de 500°C encontram-se fissurados como resultado da perda da água livre e confinada dos cristais.

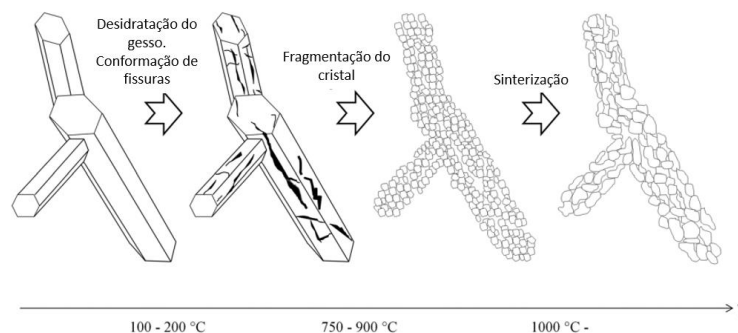
Figura 25. Microscopia eletrônica de varredura do gesso endurecido.



Fonte. (PAYRAUDEAU LE ROUX *et al.*, 2016)

Os autores também acrescentam que a mudança da superfície específica do gesso é consequência das modificações morfológicas dos cristais com o aumento da temperatura (Figura 26). Os cristais tornam-se mais fragmentados e arredondados, não sofrendo uma grande alteração morfológica até 750°C, aproximadamente. No entanto, os cristais se tornam cada vez mais porosos e arredondados até os 1100°C quando existe uma densificação devido ao processo de sinterização do gesso.

Figura 26. Evolução da morfologia dos cristais de gesso com aumento da temperatura.



Fonte. (PAYRAUDEAU LE ROUX *et al.*, 2016)

A fim de reduzir os problemas de variação dimensional, esfarelamento e o fissuramento, com o intuito de otimizar as propriedades mecânicas e físicas do gesso, diversas pesquisas apresentam soluções como: uso de aditivos fibrosos e orgânicos como as fibras naturais, enchimento de silicato e uso de poliestireno expandido ou outros agentes (KHALIL *et al.*, 2013; MÁRMOL *et al.*, 2016; SERHAT BAŞPINAR; KAHRAMAN, 2011).

2.3.1.2 Propriedades térmicas das chapas gesso acartonado

Um fator que contribui com o desempenho das chapas de gesso acartonado durante as situações de incêndio são as propriedades térmicas do material, principalmente o calor específico, condutividade térmica e o poder calorífico.

As propriedades térmicas, a temperatura ambiente, das chapas de gesso publicadas por diferentes fabricantes no mundo e no Brasil, é dada na Tabela 12.

Tabela 12. Propriedades térmicas das chapas de gesso.

Pais	Empresa	Descrição	Espessura (mm)	Peso (kg/m ²)	Calor específico (J/kg.K)	Cond. térmica (W/m.k)
Brasil	Lafarge Gypsum	Standard	6,5	4 – 7	-----	-----
			9,5	6,5 – 8,5	-----	-----
			12,5	7 – 12	-----	-----
			15	7 – 8	-----	-----
		Resistência ao fogo	12,5	8 – 12	-----	-----
			15	10 – 14	-----	-----
Brasil	Knauf	Standard	12,5	10 -18 – 24	1000	0,21
			15	24,5 – 32,5	1000	0,21
		Resistência ao fogo	12,5	20 – 28	1000	0,21
			15	25 – 35	1000	0,21
Brasil	Placo	Standard	6	6	-----	0,25
			12,5	8 – 12	-----	0,25
			15	10 - 14	-----	0,25
		Resistência ao fogo	12,5	8 -12	-----	0,25
			15	10 – 14	-----	0,25
Brasil	Trevo	Standard	12,5	8,5	-----	-----
			12,5	8,5	-----	-----
			15	12	-----	-----
		Resistência ao fogo	12,5	8,5	-----	-----
			15	12	-----	-----

Continua

						Continuação	
Estados Unidos	Gypsum Assoc.	<i>Standard</i>	12,7	9,8	1090	0,16	
			15,9	12	1090	0,18	
	American gypsum	Resistência ao fogo <i>Type X</i>	<i>Standard Type C</i>	12,7	9,6	1017	0,28
				15,9	11,3	1089	0,26
Austrália	Gyprock	<i>Standard Regular</i>	13	9,5	-----	0,26 – 0,18	
		Resistência ao fogo <i>Fyrecheck</i>		13	10,5	-----	0,26 – 0,18
				16	12,5	-----	0,23 – 0,17
Reino Unido	British Gypsum	<i>Standard</i>	15	12,8	-----	0,3	
			20	7	-----	0,3	
			25	21,3	-----	0,3	
			30	25,5	-----	0,3	
		Resistência ao fogo	12,5	9,8	-----	0,24	
			15	11,7	-----	0,24	
Japão	Joshino Gypsum	<i>Standard Type R</i>	9,5	6,2	-----	0,22 ou +	
			12,5	8,1	-----	0,22 ou +	
			15	9,8	-----	0,22 ou +	
		Resistência ao fogo <i>Type F</i>	12,5	9,4	-----	0,24 ou +	
			15	11,3	-----	0,24 ou +	
			16	12	-----	0,24 ou +	
			18	13,5	-----	0,24 ou +	
			21	15,8	-----	0,24 ou +	
			25	18,8	-----	0,24 ou +	

Fonte. Autora.

A partir da Tabela 12, conclui-se que as chapas de gesso *standard* apresentam valores inferiores de condutividade térmica, em relação as chapas desenhadas para proteção contra o fogo, no entanto os fornecedores não necessariamente fornecem os dados de calor específico do material, destacando-se os fabricantes dos Estados Unidos e a Knauf no Brasil, que providenciam de todas as informações técnicas necessárias para a escolha da chapa de gesso.

No caso das chapas de gesso utilizadas no Japão, foi identificado que as novas tecnologias para as chapas de gesso *standard* podem atingir menores valores de condutividade térmica, em relação às chapas de gesso com proteção ao fogo. No entanto, o fornecedor esclarece que os dados de maior relevância são a resistência térmica e a capacidade do material de não fissurar e cair durante uma situação de

incêndio; visto que as chapas de gesso *standard* foram desenhadas com espessuras e densidades menores.

De forma similar, os Estados Unidos se caracterizam por desenvolver diversas chapas de gesso, com grande variedade de produtos, entretanto as chapas de gesso da *Gypsum Association standard* podem atingir o melhor desempenho, devido a que são consideradas como as novas tecnologias ideais para o desenvolvimento das chapas *standard*, atingindo um desempenho melhor do que as chapas de gesso para proteção contra o fogo.

Em relação a quantidade de calor necessário para que exista uma variação de temperatura na massa do material, indicado pelo calor específico, os Estados Unidos apresentam as chapas de gesso com proteção ao fogo com melhor desempenho providenciando uma proteção 10% maior do que as chapas da Knauf Brasil.

Estas empresas fabricam diversas chapas de gesso para espessuras e formulações específicas, atendendo os requisitos do mercado para maior resistência ao fogo. Estas chapas contêm maior quantidade de fibra de vidro e aditivos na mistura do gesso, aumentando a densidade do material. A norma NBR 14715 - Chapas de gesso para *drywall* (ABNT, 2021a) determina os requisitos para as chapas de gesso, no entanto não indica quais aditivos são aceitos para o desenvolvimento das chapas. Esta realidade permite que os fornecedores de chapas tenham uma composição da pasta de gesso específica que não é informada ao consumidor.

Outra propriedade térmica importante para o desempenho das chapas de gesso é o poder calorífico, que corresponde a quantidade de energia que o material armazena em situações de altas temperaturas. No Brasil e de acordo com a Associação Brasileira de *Drywall*, as chapas de gesso acartonado utilizadas como

proteção contra o fogo devem possuir um poder calorífico mínimo de 1100kcl/m² (LUCA, 2018).

O poder calorífico permitirá classificar as chapas de gesso segundo a combustibilidade como classe IIA: material de difícil combustão e baixa emissão de fumaça, permitindo a aplicação em tetos e paredes. Destaca-se que a Associação Brasileira de *Drywall* determina que a película fina de cartão utilizada pelos fornecedores não deve agravar o desempenho da chapa, atingindo a combustão a partir dos 300°C.

2.3.2 Fibras naturais em situações de incêndio

2.3.2.1 Flamabilidade das fibras naturais

As fibras naturais se caracterizam como material instável termicamente e suscetível à ignição e combustão, atuando como uma fonte de combustível. Entre as fibras naturais, as fibras vegetais tem rápida queima e menor resistência ao fogo do que as fibras proteicas, visto que estão compostas por carbono e hidrogênio que atuam como combustível; bem como, por oxigênio que atua como sustentação da combustão (KOZLOWSKI; MUZYCZEK; WALENTOWSKA, 2014).

O comportamento das fibras vegetais frente ao fogo está determinado pelo grau de inflamabilidade, propriedade inerente do material, e pelo processo de degradação do material com o aumento de temperatura.

A degradação frente ao fogo das fibras vegetais envolve várias reações: dessorção da água, reticulação das cadeias de celulose e geração de desidrocelulose até a produção de carvão e voláteis por decomposição, formação e decomposição de levoglucosan (composto formado durante a pirólise), e geração de gases como alcatrão, carvão e monóxido de carbono (BHATTACHARYYA; SUBASINGHE; KIM, 2015).

Em quanto à inflamabilidade das fibras vegetais, está condicionada pelo grau de cristalinidade da fibra, devido aos altos níveis de levoglucosan, orientação fibrilar e pela composição química. Destaca-se que a inflamabilidade das fibras aumenta quando a cristalinidade e os níveis de levoglucosan são maiores, assim como a orientação fibrilar seja unidirecional (BHATTACHARYYA; SUBASINGHE; KIM, 2015).

A Tabela 13 apresenta a relação entre a composição química e a inflamabilidade das fibras vegetais. Quanto maior o conteúdo de celulose na fibra, maior inflamabilidade, no entanto, a hemicelulose contribuirá com a degradação térmica e posteriormente a inflamação, já a lignina contribuirá em maior proporção para a formação de carvão, do que a celulose e hemicelulose (DOREZ *et al.*, 2013; FU; SONG; LIU, 2017).

Tabela 13. Composição química e inflamabilidade das fibras vegetais

Fibra vegetal	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	TTI (s)	PHRR (kW/m ²)	THR (kJ)
Linho	80	13	2	16	112	130
Cânhamo	70-77	17.9-22.4	3.7-5.7	9	114	32
Cana de açúcar	32-34	27-32	19-24	13	143	143
Bambu	26-49	15-27.7	21-31	17	155	205
Sisal	65.8	12	9.9	52	-	101.4

TTI. Tempo de ignição - PHRR. Calor máximo liberado - THR. Calor total liberado

Fonte. Adaptado de Dorez *et al.* (2013); Fu; Song; Liu (2017).

De acordo com Fu; Song; Liu (2017), os constituintes químicos das fibras naturais (principalmente celulose, hemicelulose e lignina) exibem uma estabilidade térmica e um comportamento ao fogo diferente. Os autores determinaram que a celulose inicia a decomposição entre 210-260°C através da desidratação e posterior despolimerização, atingindo a perda de massa máxima entre 310-450°C. A hemicelulose, a 290°C, exibe a maior perda de massa com uma energia de ativação aproximada de 150kJ/mol. A lignina começa a decomposição a 280°C, atingindo o auge a 520°C e com uma energia de ativação de 229kJ/mol.

A diferença destes autores, Bhattacharyya; Subasinghe; Kim (2015) determinaram que durante a degradação das fibras, a lignina se decompõe entre 160-450°C, a hemicelulose a temperaturas entre 200-250°C e a celulose entre 250-350°C. Os autores destacam que durante a decomposição da lignina as ligações químicas fracas se quebram com facilidade a baixas temperaturas, enquanto as ligações fortes nos anéis aromáticos da fibra se decompõem em temperaturas mais altas. Portanto, os autores concluem que quanto maior o teor de lignina da fibra vegetal, maior será a temperatura em que se iniciará a degradação do material frente ao fogo, visto que a lignina é o componente químico da fibra que inicia a decomposição a maiores temperaturas.

Os autores apresentam a degradação térmica de quatro tipos de fibras naturais: juta, sisal, algodão e madeira, indicadas na Tabela 14. Embora todas as fibras apresentem uma degradação térmica similar, a fibra de madeira exibe maiores temperaturas no primeiro estágio devido a perda da água absorvida, visto que a fibra de sisal mostra a menor temperatura. No segundo estágio as fibras decompõem seus componentes químicos, por exemplo, o sisal decompõe a celulose a 275°C, a hemicelulose a 345°C e a lignina a 465°C.

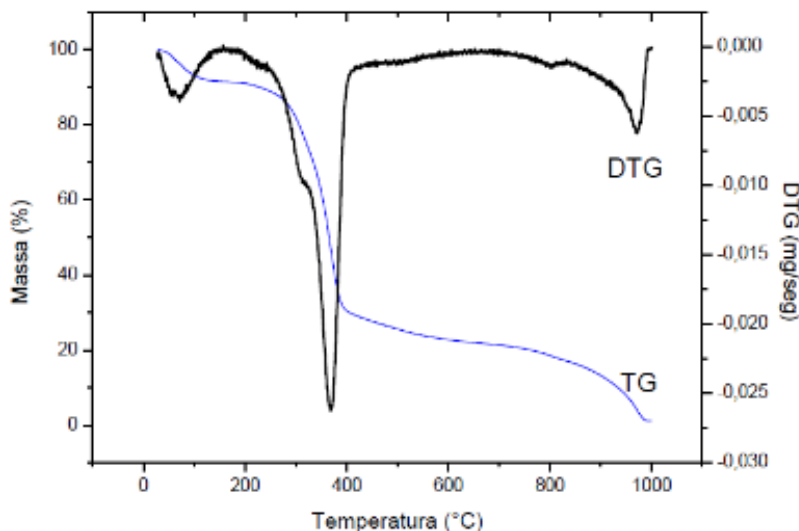
Tabela 14. Degradação térmica para quatro tipos de fibras naturais.

Fibra natural	1er estágio DTG (T°)	2do estágio		
		Celulose (T°)	Hemicelulose (T°)	Lignina (T°)
Juta	60	290	340	470
Sisal	52	275	345	465
Algodão	55	280	330	410
Madeira	107	270	367	400

Fonte. Adaptado de Fu; Song; Liu (2017)

O comportamento térmico da manta de sisal, foi analisada por Brandão (2015) por meio do ensaio de termogravimetria (Figura 27) com o intuito de verificar o comportamento do material.

Figura 27. TG e DTG da manta de sisal.

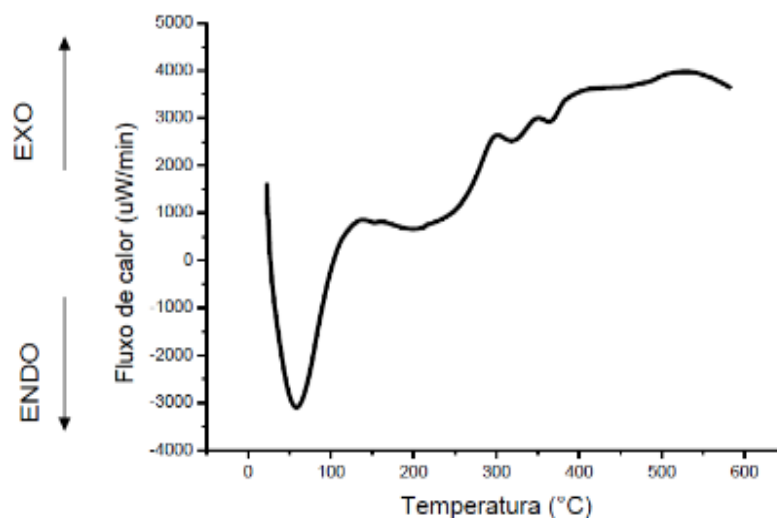


Fonte. (BRANDÃO, 2015)

A autora conclui que a manta de sisal a 80°C perde 10% de umidade, iniciando a degradação polimérica a partir dos 210°C. Entre os 210°C e 340°C a hemicelulose da manta de sisal se decompõe com uma perda de 10% de massa. Posteriormente, entre 340°C e 410°C ocorre a decomposição da celulose com a perda de 50% da massa, atingindo a decomposição total a 1000°C.

Posteriormente, a autora analisou a manta de sisal por calorimetria exploratória diferencial (Figura 28) e encontrou um pico de energia endotérmica inicial que representa a perda de umidade da fibra, a uma temperatura aproximada de 50°C. Entre 250°C e 340°C surge um pico exotérmico que indica a decomposição da hemicelulose, e entre 350°C e 400°C, surge um pico endotérmico que ilustra a desidratação da molécula de celulose, atingindo a decomposição da manta a partir de 250°C.

Figura 28. DSC para a manta de sisal.



Fonte. (BRANDÃO, 2015)

De acordo com Kozlowski; Muzyczek; Walentowska (2014), às fibras vegetais em condições de incêndio precisam de tratamento e prevenção antichama, com o intuito de inibir ou suspender o processo de combustão.

2.3.2.2 Retardantes de chamas

Os retardadores de chamas para as fibras vegetais podem atuar durante o aquecimento, decomposição, ignição, combustão ou na propagação de chamas. Os produtos antichama tem a função de atrasar o tempo de ignição, bem como, reduzir o calor liberado, a propagação da chama superficial, a taxa de perda de massa e propagação do fogo, assim como proteger a vida das pessoas (KOZLOWSKI; MUZYCZEK; WALENTOWSKA, 2014).

Os produtos antichamas podem ser classificados de acordo com o acabamento, determinado pela capacidade de lavagem da fibra após aplicação do produto: acabamento não duráveis, semiduráveis e duráveis. Os acabamentos não duráveis incluem produtos químicos à base de boratos e fosfatos, como fosfato de amônio solúvel em água combinados com brometo de amônio. Outros tratamentos comerciais são o fosfato de guanidina, guanilureia ou dicianodiamida. Os produtos com

acabamento semiduráveis são a base de fósforo (por exemplo, metilfosfonico) e fosfonato de poliamina (pyrovatim). Na área de acabamento durável, tetraquis fosfônio e sistemas a base de fósforo orgânico. Recentemente, novas pesquisas avaliam as modificações químicas através da reação química entre grupos de hidroxila de celulose como retardador de fogo reativo (KOZLOWSKI; MUZYCZEK; WALENTOWSKA, 2014).

Os produtos à base de boratos são produtos com baixa volatilidade, toxicidade e eficiência, portanto precisam ser complementados com outros retardantes. O comportamento frente ao fogo dos boratos é resultado da criação de uma camada na superfície da fibra, diminuindo os processos térmicos que levam a degradação da fibra (BELOUSOVA *et al.*, 2010).

Os retardantes de chama à base de fosfatos são considerados retardantes com baixo impacto ambiental, permitindo a substituição dos retardantes halogenados. O comportamento destes produtos é similar aos boratos, através do desenvolvimento da camada na fibra, bem como a liberação de água e gases não combustíveis (RIDDELL *et al.*, 2017).

Os produtos à base de fosfonatos atuam como retardadores de chama, inibindo a ignição, retardando a propagação do fogo e diminuindo a produção de fumaça. No entanto, os produtos com fosfonatos podem requerer de complementos, geralmente com retardantes de halogênio, gerando maior impacto ambiental (LENS; SUN; KAGUMBA, 2019).

De acordo com Fu; Song; Liu (2017), os retardantes de chama à base de fósforo contribuem com a formação de uma camada de carvão vegetal como proteção e barreira térmica da fibra, limitando a volatilização do combustível e a difusão do oxigênio, no entanto, o produto pode liberar ácido fosfórico e ácido polifosfórico. Os

autores consideram que o fósforo é um mecanismo de captura de radicais na fase gasosa, e os gases inflamáveis podem diluir a concentração de combustível na chama, reduzindo e inclusive extinguindo a chama.

Diversos estudos que analisam o comportamento dos produtos antichamas nas fibras vegetais e no desenvolvimento de compósitos (Quadro 7). Cabe destacar que a maioria destes artigos analisam compósitos com matriz poliméricas.

Quadro 7. Tratamento antichama das fibras vegetais utilizadas em compósitos

Autores	Fibra	Produto antichama	Considerações
(GIEPARDA <i>et al.</i> , 2021)	Linho	Polifosfato de amônio, carbonato de guanidina, pentaeritritol e polifosfato de melamina	Polifosfato de amônio apresenta os melhores resultados
(KHALILI <i>et al.</i> , 2020)	Rami	Trihidrato de alumina	O tratamento diminui a taxa de calor liberado pelo material e a quantidade de fumaça gerada
(BACHTIAR <i>et al.</i> , 2019)	Linho	Polifosfato de amônio e hidróxido de alumínio	As fibras tratadas com polifosfato de amônio conseguem se auto extinguir
(GUO <i>et al.</i> , 2019)	Bamboo	Ácido bórico e hidróxido de sódio	Melhoria da inflamabilidade de 63%
(ELSABBAGH <i>et al.</i> , 2018)	Linho, juta, cânhamo e sisal	Mineral, halogenado e intumescente sem halogênio.	Para as fibras de sisal, o retardante de polifosfato de amônio apresentou melhor comportamento frente ao fogo
(KIM; LIN; BHATTACHARYYA, 2017)	Linho e lã	Polifosfato de amônio	Diminui o calor liberado
(KHALILI <i>et al.</i> , 2017)	Fibra de palmeira	Polifosfato de amônio e trihidrato de alumina	10% Polifosfato de amônio e 5% trihidrato de alumina atingem os requerimentos para a queima vertical
(BOCCARUSSO <i>et al.</i> , 2016)	Cânhamo	Polifosfato de amônio	Diminui em 60% a taxa de calor liberado e o calor total liberado, e 38% a fumaça gerada
(ZHANG <i>et al.</i> , 2016)	Linho	Fosfonato de ferro	Alta resistência a pequenas fontes de ignição

Fonte. Autora.

Outros fatores importantes que devem ser considerados na escolha do retardante de chama são: a toxicidade afetará o comportamento e resgate das pessoas em situações de incêndio, bem como o impacto ambiental do produto antes, durante e após o incêndio.

2.3.2.3 Escolha do produto antichama

Como mencionado previamente, existem diversos trabalhos que utilizam retardantes de chamas para o desenvolvimento de compósitos, principalmente em polímeros. A partir do Quadro 8, é possível identificar diversos produtos como: polifosfato amônio, carbonato de guanidina, pentaeritritol, polifosfato de melamina, trihidrato de alumina, hidróxido de alumínio, ácido bórico, hidróxido de sódio e fosfonato de ferro.

A partir da análise dos componentes destes produtos é possível identificar dois agentes, fosfato e fósforo, mais utilizados nas pesquisas. Paralelamente, foram analisados os agentes que compõem os produtos comercializados no Brasil com o intuito de classificar cada retardante.

Atualmente, no Brasil são comercializados cinco produtos antichamas: CKC2020, Osmoguard FR100, SHX9020, Broad Maxx e Ignifugante Enova química. A Tabela 15 apresenta as principais características de cada produto.

Tabela 15. Produtos antichama para fibras naturais comercializadas no Brasil.

Produto	Composição	Índice de propagação de chama	Ph	Densidade óptica	Aplicação
CKC2020	Sais, fósforos e água	10 -18	6.5 (± 0.5)	72 – 94 (<450)	Pincel ou spray
Osmoguard FR100	Sais amoniacais, boratos, compostos nitrogenados e glicoses	-	6.5	-	Pincel
SHX-920	Fosforados	<25	3.5-5.5	72 – 94 (<450)	Imersão

Continua

					Continuação
Broad Maxx	Polifosfatos	-	3.5-5.5	-	Imersão
Ignifugante Enova química	Nitrogênio, surfactantes. Fósforo, água e sais.	18-23	-	-	Pulverizador

Fonte. Autora.

Tendo em vista estes produtos, uma das questões do presente trabalho seria qual o retardante de chama que se adequaria melhor para o tratamento da fibra e o futuro desenvolvimento do compósito.

Assim, os produtos antichamas utilizados neste trabalho serão aqueles que permitam o tratamento da fibra por imersão e que apresentam o menor índice de propagação de chamas, permitindo realizar o tratamento durante o processo de hornificação da fibra. Configurando-se duas formas de aplicação: a primeira é através de 9 ciclos de molhagem e secagem com água mais um ciclo de molhagem e secagem com retardante antichama, e o segundo tratamento será através de 10 ciclos de hornificação com o produto antichama. O tratamento por hornificação com 10 ciclos de molhagem e secagem foi previamente analisado por Batista (2021), atingindo resultados satisfatórios para a redução da hidrofília das fibras e mantendo a reistencia mecanica das mesmas.

Assim, os produtos escolhidos para esta pesquisa são CKC2020 e SHX-920.

2.3.3 Potencialidades e limitações do gesso endurecido e das fibras de sisal frente ao incêndio.

2.3.3.1 Gesso endurecido.

Quando o gesso endurecido é exposto a aumento abrupto de temperatura libera a água adquirida no processo de hidratação do hemi-hidrato, através da evaporação da água contida nos cristais, que retardará a transferência de calor e o aumento abrupto da temperatura.

Outro fator positivo apresentado pelo gesso endurecido frente ao fogo durante a evaporação da água livre presente nos cristais, é o aumento da densidade do material, dificultando a transferência da energia incidente proveniente do incêndio.

As propriedades térmicas também contribuem com o desempenho do material a altas temperaturas, visto que o gesso endurecido apresenta melhor desempenho térmico que os materiais convencionais utilizados na construção civil (tijolo cerâmico, concreto, aço, entre outros), principalmente nas propriedades de condutividade térmica, calor específico e poder calorífico. Estas propriedades precisam ser otimizadas para situações de incêndio, visto que a contração do material e o processo de fissuramento devido às altas temperaturas diminuem do desempenho térmico do material.

As limitações do gesso endurecido frente ao fogo se iniciam durante o processo de calcinação do gesso, visto que o material perde a água confinada dentro dos cristais, o que resulta na contração térmica do material e no fissuramento microscópicas. Estas fissuras microscópicas colaboram com o aumento da porosidade, permitindo a transmissão da energia através do material.

As fissuras também limitam o comportamento térmico do material, dado que com o aumento da temperatura o material sofre estresse térmico que contribuirá com o desenvolvimento, o tamanho e profundidade das fissuras. Este fissuramento também colabora com o processo de ablação e esfarelamento do gesso endurecido que poderá levar ao material a ruína total e conseqüentemente ao colapso da estrutura, impedindo o resgate de pessoas em situações de incêndio.

2.3.3.2 *Fibras naturais.*

A principal limitação das fibras naturais é a susceptibilidade a ignição e combustão tornando-o um material instável. Uma vez iniciado o incêndio a queima das fibras será rápido permitindo que o fogo se espalhe no ambiente.

Outro fator limitante é a composição química das fibras naturais, quantidade de celulose, hemicelulose e lignina, que determinará o processo de degradação do material. Esta degradação está determinada pelo tipo de fibra natural que conforma o compósito, uma vez que cada fibra apresenta uma composição química diferenciada.

De acordo com Dorez *et al.* (2013) e Fu; Song; Liu (2017), as fibras de sisal estão compostas quimicamente por 65,8% de celulose, 12% de hemicelulose e 9,9% de lignina, que determinam a inflamabilidade, a degradação térmica e formação de carvão na superfície do material.

2.3.4 Considerações finais

Nesta subseção específica fez-se o levantamento dos efeitos das altas temperaturas do gesso endurecido, destacando-se a importância da variação dimensional e da ablação no comportamento térmico do material. Através deste estudo pode-se constatar que a expansão e contração térmica, estão condicionadas a absorção e liberação de energia que conseqüentemente determinará as variações de densidade e superfície específica do material à medida que a temperatura aumenta durante um incêndio.

Outra constatação foi que o processo de ablação se inicia com o estresse térmico do material e a variação de densidade; provocando o esfrelamento e a formação de fissuras. Estas fissuras se iniciam no nível microscópico, portanto em muitas situações elas não são observadas, identificando-se a falha do material tardiamente.

A análise das propriedades térmicas das chapas de gesso acartonado do mercado nacional e internacional permitiu identificar a importância da condutividade térmica e da resistência térmica frente ao fogo, com intuito de evitar falhas e a queda do material em situações de incêndio. Observou-se que os fornecedores apresentam principalmente os valores de condutividade térmica e não de calor específico ou poder calorífico, sendo a condutividade que determina o grau de isolamento e não necessariamente o comportamento frente ao fogo. No entanto, os fornecedores providenciam a classificação das chapas frente a combustibilidade, o que está diretamente relacionado com o poder calorífico do material.

Dentro deste estudo, pode-se constatar que não existe uma chapa que atenda ao mesmo tempo a todos os requisitos apresentados: problemas de ablação, formação de fissuras causadas pela variação dimensional e as propriedades térmicas.

2.4 COMPORTAMENTO FRENTE AO FOGO DOS COMPÓSITOS CERÂMICOS

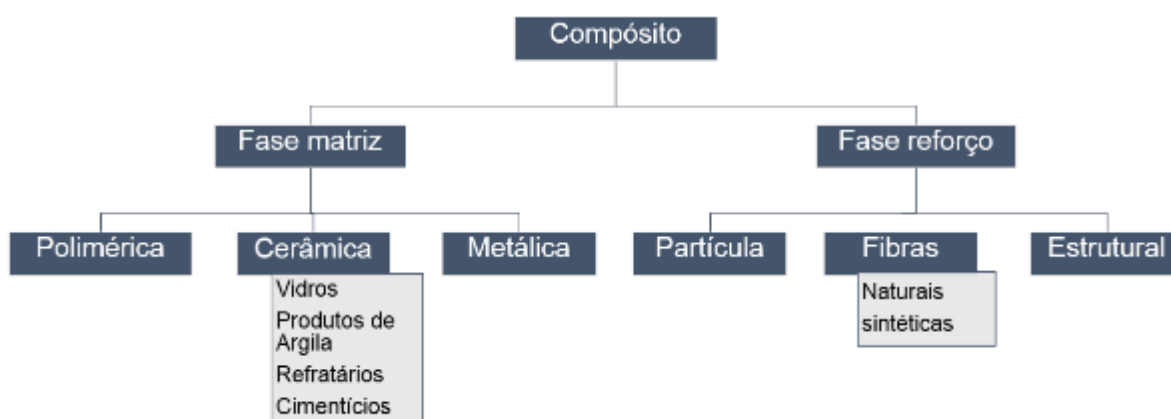
As limitações frente ao fogo dos compósitos cerâmicos precisam ser estudadas para garantir maior resistência e proteção contra incêndio, possibilitando principalmente a saída dos ocupantes da edificação em condições de segurança, garantir condições apropriadas para o emprego do socorro público e evitar ou minimizar danos à própria edificação.

Para atender estas exigências físicas, mecânicas e térmicas do gesso endurecido, diferentes soluções foram propostas como: a adição de fibras orgânicas, realizar enchimentos de silicato e a utilização de poliestireno. Estas soluções visam o desenvolvimento de novas tecnologias construtivas, a partir de compósitos que permitem combinar dois ou mais elementos insolúveis e que caracterizam uma primeira fase contínua chamada de fase matriz e uma segunda fase descontínua chamada de fase reforço (IUCOLANO *et al.*, 2018).

O estudo dos compósitos permitiu o desenvolvimento de materiais que permitem utilizar a tecnologia para atingir maior versatilidade na combinação das diversas propriedades dos materiais constituintes da fase matriz e do reforço; condicionadas a fração de volume, distribuição e interação entre eles.

Como se apresenta na Figura 29, os compósitos se classificam quanto à fase matriz constituinte: em matriz polimérica, matriz cerâmica (vidros, produtos de argilas, refratários e cimentícios) ou matriz metálica. Quanto à fase reforço os compósitos se classificam em: partículas, fibras (naturais ou sintéticas) e estrutural (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2012). A seleção das fases está condicionada às necessidades construtivas do compósito.

Figura 29. Classificação fase matriz e fase reforço nos compósitos.



Fonte. Adaptado do Callister Jr; Rethwisch (2012)

O gesso é considerado uma matriz cerâmica que cumpre a função de unir, envolver e proteger a fase reforço; transferindo e distribuindo as tensões recebidas por uma carga externa aplicada. A matriz de gesso apresenta uma fratura frágil com resistência ao impacto reduzida, baixa tenacidade, fadiga estática e bom isolamento térmico até 750°C. Estas características contribuem com o comportamento do material em situações de incêndio e o colapso abrupto, sendo possível otimizá-las de acordo com a microestrutura do gesso; possíveis discontinuidades, porosidade excessiva,

trincas ou erros na dosagem durante o processo de fabricação (AGARWALL; BROUTMAN; CHANDRASHENKHARA, 2006; BRANDÃO, 2015; JAUHARI; MISHRA; THAKUR, 2015).

Durante o desenvolvimento do compósito, a fase reforço cumpre a função de absorver a energia transmitida pela matriz de gesso após seu fissuramento, transportando a carga aplicada, diminuindo a propagação das fissuras e aumentando a ductilidade da matriz (AGARWALL; BROUTMAN; CHANDRASHENKHARA, 2006; JAUHARI; MISHRA; THAKUR, 2015)

O uso de fibras vegetais como fase reforço está condicionada a diversas variáveis que determinam a eficiência do material, como: tipo de fibra utilizada, geometria das fibras (diâmetro e comprimento), teor de fibra incorporado, propriedades físicas, químicas e mecânicas; bem como a orientação (anisotropia do material) e disposição dos tecidos (uniformidade do sistema), ambientes higrotérmicos e principalmente tratamentos das fibras e possíveis interferências na adesão interfacial e (AGARWALL; BROUTMAN; CHANDRASHENKHARA, 2006; JAUHARI; MISHRA; THAKUR, 2015) .

2.4.1 Aderência fibra-matriz

A aderência entre a fibra e a matriz está determinada pela interface ou região em que os componentes do compósito interagem e que determinará a concentração e transferência de energia em situações de incêndio, sendo que o material sempre estará em busca do equilíbrio térmico. Assim, a aderência entre as fases (fibra-matriz) é de grande relevância no comportamento frente ao fogo, pois, afetará na resistência e concentração das temperaturas, fissuramento e processo de ablação da matriz, inflamabilidade das fases e na degradação do compósito (KREITH *et al.*, 2014; AGARWAL *et al.*, 2006).

A aderência entre as fases está condicionada por diversos fatores entregues pelo reforço e pela matriz, como: distribuição, irregularidades, protuberâncias superficiais, diâmetro e orientação da fibra, geometria, comprimento de embebição, e as características superficiais da fibra (impurezas, ceras ou gorduras), podem contribuir ou impedir a aderência com a matriz, e por consequência, no comportamento frente ao fogo do compósito (ALVES FIDELIS *et al.*, 2013).

Outro fator importante é a variação dimensional das fibras vegetais em razão o aumento das dimensões com a absorção de umidade e após a secagem com a diminuição das dimensões; criando tensões e microfissuras na interface e inicia sua degradação, debilitando a adesão entre os materiais, e consequentemente prejudica a transferência de energia (CASTOLDI; SOUZA; DE ANDRADE SILVA, 2019; SINGH; AFRIN; KARIM, 2017).

Quanto a fase matriz, esta influenciará a aderência através da porosidade e quantidade de água necessária para o desenvolvimento da pasta de gesso, podendo enfraquecer a zona intersticial, devido a que a fibra absorverá a água excedente na matriz. Esta umidade excedente cria seres microscópicos (fungos) que começam a reagir com a fibra, deteriorando sua estrutura (AGARWALL; BROUTMAN; CHANDRASHENKHARA, 2006)(KAW, 2006; KLOPROGGE e FROST, 2000).

De acordo com Chung (2010), quando a aderência entre a fase matriz e a fase reforço não é apropriada, os compósitos podem apresentar uma degradação acelerada causada pela instabilidade térmica dos compósitos a temperaturas superiores a 25°C, podendo gerar uma degradação química condicionada pelo tempo de exposição à temperatura. Se a exposição a temperaturas elevadas é durante muito tempo ou com uma variação de temperatura muito rápida, ocorre uma degradação substancial, limitando à temperatura de trabalho. Esta degradação tem origem no

craqueamento térmico, deslizamento das moléculas e átomos causados pela mudança de temperatura, relaxamento do estresse térmico, alteração microestrutural, derretimento, reações químicas, decomposição e sublimação de um componente.

O Quadro 8 apresenta um resumo das pesquisas que analisam a aderência entre o gesso e as fibras naturais.

Quadro 8. Aderência dos compósitos de gesso reforçados com fibras naturais.

Autores	Fibra	Considerações
(AWANG NGAH <i>et al.</i> , 2020)	Tecidos de juta e vidro	Os compósitos com reforço em vidro aleatório apresentam maior ligação interfacial e maior resistência ao fissuramento da matriz, em comparação aos compósitos reforçados com juta não tratada.
(GALLALA <i>et al.</i> , 2020)	Resíduos de tamareira	Tratamento químico com hipoclorito de sódio e recobrimento com resina diminui a tensão superficial e melhora a adesão dos resíduos de fibras com o gesso.
(CHIKHI, 2016)	Tamareira	A superfície das fibras de tamareira não tratadas afeta a adesão interfacial entre a matriz e o reforço. Quanto maior a quantidade da fibra, menor a adesão das fases, devido ao aumento da porosidade do gesso e a quantidade de vazios intersticial na produção do compósito.
(IUCOLANO <i>et al.</i> , 2015)	Abacá	As fibras foram tratadas com água destilada, solução NaOH e solução EDTA com o intuito de melhorar a adesão com o gesso. As amostras tratadas com solução NaOH e solução EDTA não contribuem tanto na adesão das fases, quanto no tratamento com água destilada.
(OLIVER; BAEZ, 2012)	Material de mudança de fase	A superfície lisa das fibras dificulta a adesão e o agarre mecânico com a matriz. As fibras com superfícies escamosas facilitam a adesão mecânica. As forças eletrostáticas modificam o processo de cristalização do gesso, modificando o espaço disponível para o crescimento do cristal, contribuindo com a adesão dos materiais.

Fonte. Autora.

2.4.2 Comportamento frente ao fogo

Os trabalhos dedicados ao estudo do comportamento frente ao fogo dos compósitos com matriz de gesso reforçado com fibras naturais e vegetais analisam suas propriedades através de ensaios de flamabilidade, propagação superficial de

chamas, incombustibilidade, determinação da densidade óptica de fumaça gerada por materiais sólidos, *single burning item* e ignitabilidade.

Os principais parâmetros que permitem caracterizar a flamabilidade (IEC 60695-11-10, ASTM D635 e UL94) são: velocidade superficial das chamas, o comportamento da superfície do material, tempo de ignição, perda de massa e mudanças físicas como coloração e formação de fissuras (MARTINS, 2016).

De acordo com Negrisolo *et al.* (2019) o ensaio para determinar o índice de propagação superficial de fumaça (ABNT NBR 9442:2009) avalia a sustentação da ignição, rapidez de propagação das chamas e a quantidade de calor desenvolvido. O ensaio de incombustibilidade (ISO 1182:2020) analisa a contribuição do material ao incêndio, o ensaio para a determinação da densidade óptica de fumaça (ASTM E 662:2021) avalia a opacidade da fumaça no processo de pirólises ou combustão, o ensaio de *single burning item* (EM 13823:2020) avalia a contribuição de uma elemento ao incêndio, e o ensaio de ignitabilidade (ISO 11925-2:2021) identifica a capacidade do material de ignizar, manter e propagar a chama.

Entre as publicações científicas que analisam o comportamento frente ao fogo de compósitos com matriz cerâmica, Teslík; Hošťálková; Vavřínová (2019) desenvolveram dois compósitos de gesso reforçados com fibras de palha ou madeira que foram analisados por flamabilidade com o intuito de classificar o material de acordo com a reação frente ao fogo. Após iniciado o ensaio, nenhum compósito sofreu inflamação, nem atingiram a marca de flamabilidade de 150 mm indicada pelo ensaio.

Na pesquisa de Kolarkar e Mahendran (2012) foi realizado um teste de queima única para chapas de gesso acartonado e diferentes compósitos. O compósito de gesso com fibras de celulose apresentou descoloração não uniforme após de 100

minutos exposto à chama, com queima parcial da celulose por exposição lateral, permitindo a penetração do fogo e a comprometendo a integridade da chapa.

Azieyanti; Hakim; Hasini (2017) analisaram o compósito de gesso reforçado com fibra sumaúma na composição de uma porta corta fogo, através do ensaio de combustibilidade por forno de teste de resistência ao fogo. Os autores identificaram que os compósitos com maior espessura e maior teor de fibra registram maior resistência contra o fogo, atingindo a degradação em um período maior, no entanto, assim que a falha ocorre, fissuras são encontradas nas amostras.

O Quadro 9 apresenta um resumo dos artigos que analisam a resistência ao fogo de compósitos com matriz de gesso reforçados com fibras naturais.

Quadro 9. Resistência ao fogo de compósitos de gesso reforçados com fibras naturais.

Autores	Fibra	Considerações
(MUNTONGKAW ; PIANKLANG; TANGBORIBOON, 2021)	Typha angustifolia (1 a 3%) Orientação 1D, 2D e 3D. Composto látex de borracha natural.	As amostras com 1% de fibra e distribuição 3d apresentam alta resistência ao choque térmico e baixa condutividade térmica. As amostras não apresentam rachaduras e fraturas. Podem ser aplicados como isolamento térmico e material decorativo.
(IUCOLANO <i>et al.</i> , 2018)	Fibra de cânhamo (1%)	Os resultados indicam que as fibras cumprem um papel de enrijecimento da matriz a 150°C e 250°C evitando o colapso quebradiço do gesso.
(BELAYACHI; HOXHA; ISMAIL, 2017)	Palha	A resistência ao fogo foi analisada para amostras com e sem tratamento antichama com água fervente ou óleo de linhaça. Todas as amostras com fibras pré-tratadas por imersão em óleo de linhaça reduzem com maior resistência ao fogo e efetividade a propagação das chamas.
(CHINDAPRASIR T <i>et al.</i> , 2011)	Serragem, fibras de coco e fibras de resíduo de tabaco	As fibras de coco e os resíduos de tabaco oferecem maior resistência ao fogo e menor comprimento de rachadura gerada durante o incêndio.

Fonte. Autora.

3 METODOLOGIA

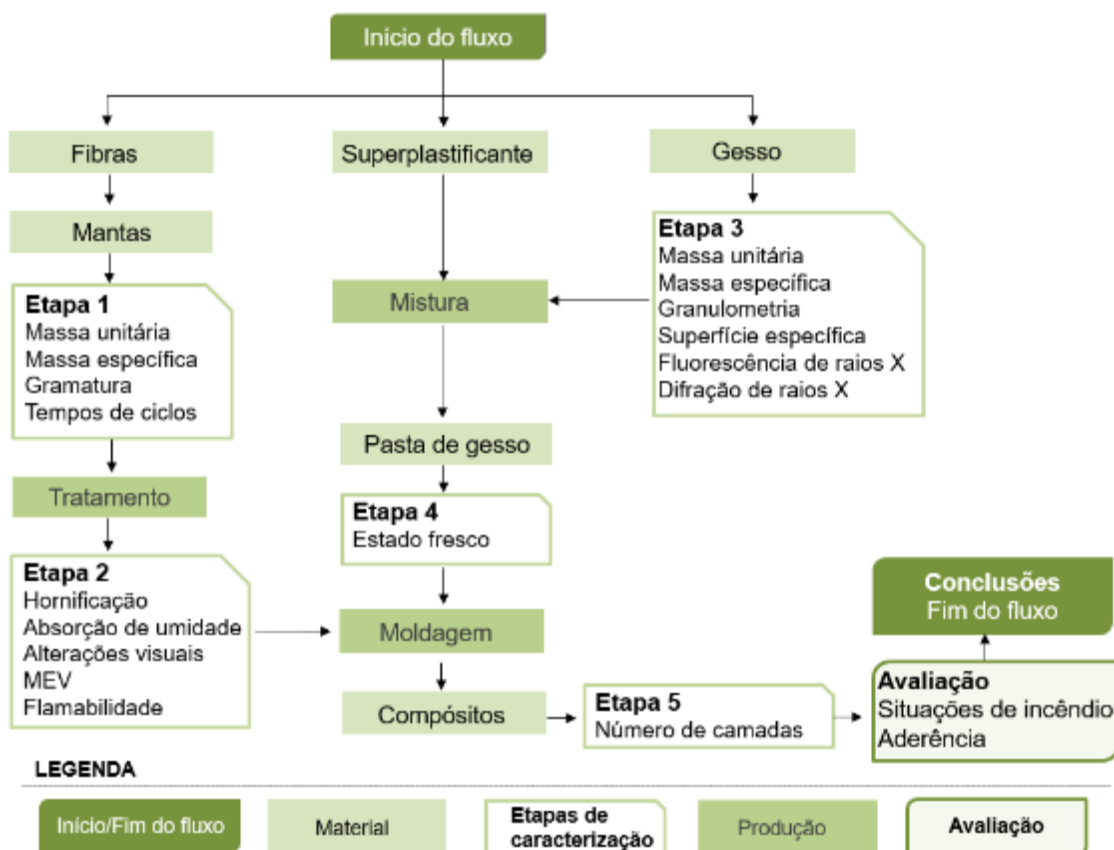
A metodologia desta pesquisa englobou preliminarmente um levantamento bibliográfico sobre a matéria prima do gesso (as chapas de gesso liso e acartonado, as principais características potencialidades e limitações das chapas de gesso, e o fosfogesso) e das fibras de naturais (fibras vegetais, estrutura e composição química, natureza hidrofílica e as características da fibra de sisal). Em seguida, abordam-se as medidas de segurança contra incêndio em edificações e a importância dos materiais de acabamento e revestimento, através das ações térmicas e resistência ao fogo, segurança das estruturas em situações de incêndio, incêndio real, incêndio padrão e tempo requerido de resistência ao fogo. Posteriormente é apresentado o comportamento frente ao fogo do gesso e das fibras naturais através das variações dimensionais, ablação e as propriedades térmicas do gesso endurecido, bem como da flamabilidade das fibras naturais e o uso de retardantes antichamas. Na sequência, são apresentadas as potencialidades e limitações do gesso endurecido e das fibras naturais frente ao incêndio. O levantamento bibliográfico também expõe o comportamento frente ao fogo dos compósitos cerâmicos e a influência da aderência entre a matriz e o reforço no comportamento frente ao fogo.

Estas considerações constituem os parâmetros para o desenvolvimento do material compósito em conjunto com outros requisitos apresentados pelas normas vigentes. Com este material pode-se analisar e determinar o comportamento dos compósitos de gesso com fibras de sisal tratados com produtos antichama em situações de incêndio, através de diversos ensaios laboratoriais.

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desta pesquisa foi delineado através de 5 etapas distintas e complementares para o alcance dos objetivos da pesquisa, conforme apresentado no fluxograma da Figura 30.

Figura 30. Delineamento da pesquisa.



Fonte. Autora.

Na primeira etapa deste trabalho foi caracterizada a manta de sisal e posteriormente foi realizado o tratamento de hornificação por meio da aplicação de ciclos de molhagem e secagem com produtos antichamas para tecidos de origem natural.

Na segunda etapa tem-se a análise do comportamento físico, morfológico e térmico da manta de sisal antes e após o tratamento com produto antichama, através do ensaio de microscopia eletrônico de varredura, absorção d'água e teste de

flamabilidade que permitiram determinar o produto antichama mais adequado para a manta de sisal e os problemas superficiais que interferem na aderência entre a fibra de sisal e a matriz de gesso.

Na terceira etapa, realizou-se a caracterização física, química e mineralógica do gesso em pó. A caracterização física foi verificada através da análise da massa específica, massa unitária, superfície específica e granulometria; a análise dos constituintes químicos por fluorescência de raios X e o estudo mineralógico mediante do estudo qualitativo e quantitativo das fases cristalinas do material através da técnica de difração de raios X.

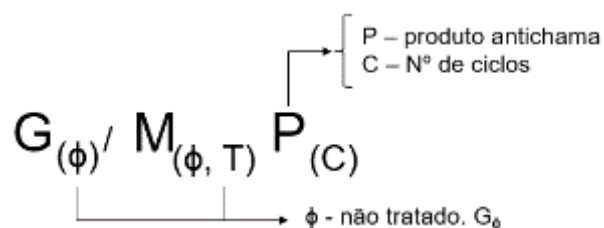
A quarta etapa permitiu desenvolver a pasta de gesso através da análise do tempo de pega, consistência normal e *minu slump* para determinar o comportamento da pasta em estado fresco, permitindo o desenvolvimento do compósito.

Na quinta etapa foram conformadas as chapas de gesso reforçadas com manta de sisal, *in natura* e hornificadas com produtos antichamas. Nesta etapa será analisada a aderência entre o gesso e a manta de sisal através do ensaio de flexão de 4 pontos, microscopia eletrônica de varredura, bem como, analisar o comportamento frente ao fogo dos compósitos através dos ensaios para teste Schlyter modificado.

3.2 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Para melhor entendimento das amostras ensaiadas e as condições adotadas ao longo do trabalho, foram estabelecidas as nomenclaturas indicadas na Figura 31.

Figura 31. Nomenclatura das amostras



Fonte. Autora.

De acordo com a Figura 31, as amostras que foram utilizadas nos ensaios têm as seguintes legendas:

- $G_{(\phi)}$. Gesso endurecido com aditivo superplastificante sem tratamento antichama.
- $M_{(\phi,T)}$. Manta de sisal com ou sem tratamento antichama
- $G_{(\phi)} M_{(\phi,T)} G_{(\phi)}$. Compósito com duas camadas externas de gesso com aditivo superplastificante e sem tratamento antichama e uma camada interna com manta de sisal com ou sem tratamento antichama.
- $G_{(\phi)} M_{(\phi,T)} M_{(\phi,T)} G_{(\phi)}$. Compósito com duas camadas externas de gesso com aditivo superplastificante e sem tratamento antichama e duas camadas interna com manta de sisal com ou sem tratamento antichama.
- P. Produto antichama utilizado para o tratamento de hornificação (SHX 902 ou CKC2020)
- C. Número de ciclos de molhagem e secagem durante o tratamento de hornificação (1 ou 10 ciclos com produto antichama e 9 ciclos com água)

Para melhor entendimento dos experimentos desta pesquisa, será apresentada a sequência de ensaios e discussão dos mesmos, de acordo com os objetivos específicos do trabalho, o componente a ser analisado, assim como os métodos e as normas para cada ensaio.

O Quadro 10 engloba a sequência de ensaios da primeira etapa desta pesquisa, correspondente a caracterização das mantas de sisal e o tratamento de hornificação.

Quadro 10. Ensaio etapa 1 da pesquisa.

Objetivo 1. Avaliar a eficiência do compósito com tratamentos de produtos retardantes de chama nas fibras de sisal, submetidos a altas temperaturas, para escolher os produtos com melhor desempenho térmico na fibra de sisal e no gesso.			
Ensaio	Componente	Repetições	Referência
Massa unitária	Manta de sisal	3	ABNT NBR 12.984:2009
	Manta de sisal tratada	3	
Massa específica	Manta de sisal	3	ABNT NBR 7.190:2002
	Manta de sisal tratada	3	
Gramatura	Manta de sisal	2	ABNT NBR 12.984:2009
	Manta de sisal tratada		
Hornificação	Manta de sisal	5	Ferreira (2012) e Batista (2021)

Fonte. Autora.

A segunda etapa desta pesquisa está conformada pelos ensaios indicados no Quadro 11 que permitiram analisar o comportamento físico, morfológico e térmico da manta de sisal e assim determinar o melhor produto para o tratamento antichama.

Quadro 11. Ensaio etapa 2 desta pesquisa.

Objetivo 1. Avaliar a eficiência do compósito com tratamentos de produtos retardantes de chama nas fibras de sisal, submetidos a altas temperaturas, para escolher os produtos com melhor desempenho térmico na fibra de sisal e no gesso.			
Ensaio	Componente	Repetições	Referência
MEV	Manta de sisal	2	Metalizador Quorum Q150R ES Tescan. Canhão Oxford Instruments X-ACT Filamento de Tungstênio
	Manta de sisal tratada	2	
Absorção d'água	Manta de sisal	3	TAPPI UM 256:2015
	Manta de sisal tratada	3	
Teste flamabilidade	Manta de sisal	5	ABNT NBR 14.892:2018
	Manta de sisal tratada	5	

Fonte. Autora.

O Quadro 12 apresenta os ensaios da etapa 3 desta pesquisa, que correspondem a caracterização física, química e mineralógica do gesso em pó.

Quadro 12. Ensaio etapa 3 desta pesquisa

Objetivo 2. Propor chapas a partir de um compósito tratado com produto antichama nas fibras de sisal, utilizando diversas camadas de fibras de sisal e gesso para avaliar o comportamento frente ao fogo.			
Ensaio	Componente	Repetições	Referência
Granulometria	Gesso em pó	3	ABNT NBR 12.127:2019
Massa unitária	Gesso em pó	3	ABNT NBR 12.127:2019
Massa específica	Gesso em pó	3	ABNT NBR 16.605:2017
Superfície específica	Gesso em pó	3	B.E.T
Fluorescência de raios X	Gesso em pó	2	Metalizador Quorum Q150R ES Tescan. Canhão Oxford Instruments X-ACT Filamento de Tungstênio
Difração de raios X	Gesso em pó	1	Canevarolo Jr. (2017)

Fonte. Autora.

O Quadro 13 indica os ensaios da etapa 4 desta pesquisa que permitiram definir a pasta de gesso que foi utilizada na produção do compósito.

Quadro 13. Ensaio etapa 4 desta pesquisa

Objetivo 2. Propor chapas a partir de um compósito tratado com produto antichama nas fibras de sisal, utilizando diversas camadas de fibras de sisal e gesso para avaliar o comportamento frente ao fogo.			
Ensaio	Componente	Repetições	Referência
Tempo de pega	Pasta no estado fresco	2	ABNT NBR 12.128:2019
Consistência normal	Pasta no estado fresco	2	ABNT NBR 12.128:2019
<i>Minislump</i>	Pasta no estado fresco	2	Pinheiro (2011)

Fonte. Autora.

Na quinta etapa desta pesquisa analisou-se a aderência entre a matriz de gesso e o reforço em mantas de sisal, bem como, o comportamento do compósito frente ao fogo.

O Quadro 14 apresenta os ensaios realizados para analisar a aderência entre a matriz de gesso e o reforço em mantas de sisal.

Quadro 14. Ensaios de aderência para a etapa 5 desta pesquisa.

Objetivo 3. Verificar a aderência entre a matriz de gesso e as fibras de sisal após tratamento das fibras de sisal com produto antichama.			
Ensaio	Componente	Repetições	Referência
Massa específica	Compósito não tratado	3	ABNT NBR 13.278:2005 ABNT NBR 12.775:2018
	Compósito tratado	3	
Flexão em 4 pontos	Compósito tratado	6	ASTM C 947:2016
MEV	Compósito não tratado	2	Metalizador Quorum Q150R ES Tescan. Canhão Oxford Instruments X-ACT Filamento de Tungstênio Equipamento
MEV (após queima)	Compósito não tratado	2	
	Compósito tratado	2	

Fonte. Autora.

O Quadro 15 indica os ensaios que permitiram avaliar o comportamento frente ao fogo dos compósitos propostos e a chapa de gesso padrão.

Quadro 15. Ensaios do comportamento frente ao fogo. Etapa 5 desta pesquisa.

Objetivo 4. Avaliar comparativamente o desempenho térmico em relação ao fogo dos compósitos de gesso e fibras de sisal propostos com as chapas de gesso acartonado existentes no mercado.			
Ensaio	Componente	Repetições	Referência
Teste de Schlyter modificado	Gesso padrão	4	Antunes (2016) Aguillar Filho (1986)
	Compósito não tratado	4	
	Compósito tratado	4	
	ST - RF	4	
MEV (após queima)	Compósito não tratado	2	Metalizador Quorum Q150R ES Tescan. Canhão Oxford Instruments X-ACT Filamento de Tungstênio
	Compósito tratado	2	

Fonte. Autora.

Estas análises foram realizadas para caracterizar os materiais constituintes do compósito e compreender o comportamento frente ao fogo das chapas tratadas com produtos antichamas.

3.3 MATERIAIS

Os materiais de estudo deste trabalho são: água, gesso para fundição, aditivo superplastificante, manta de sisal e produtos antichamas.

3.3.1 Gesso de fundição e aditivo superplastificante.

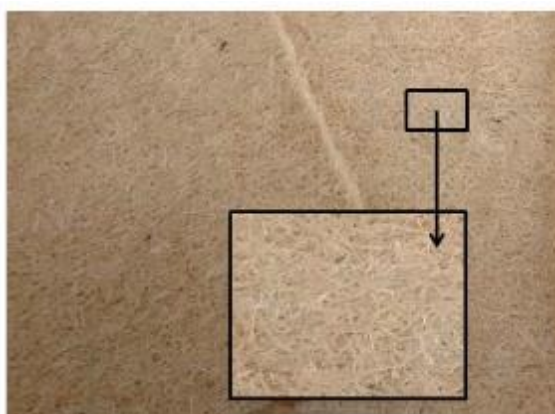
Como material para a matriz do compósito é utilizado gesso comercial de fundição fornecido pela empresa Gesso Emmanuel, na cidade de Ipubi (PE) no Sertão do Araripe.

Para o desenvolvimento da pasta de gesso, utilizou-se o aditivo líquido superplastificante, Glenium 51, fornecido pela empresa BASF – Master Building Solutions, localizada na cidade de São Paulo. O aditivo é pronto para o uso e livre de cloretos, proporcionando uma redução de água na mistura, providenciando maior trabalhabilidade à pasta de gesso e retardando a pega.

3.3.2 Mantas de sisal.

Como material de reforço foram utilizadas mantas de sisal produzidas em rolos com comprimento máximo de 2,1m, largura de 1.0m e com gramatura de 800g/m² a 1500 g/m². As mantas foram fornecidas pela empresa Hamilton Rios Ltda, situada na cidade de Conceição do Coité – BA, em formatos de 61x50cm (Figura 32).

Figura 32. Manta de sisal.



Fonte. Autora.

As mantas de sisal se caracterizam por estar conformadas com fibras dispersas aleatórias agrupadas e comprimidas para conformar o rolo de fibra.

3.3.3 Produtos antichama.

Os produtos antichamas utilizados para o tratamento da manta de sisal são CKC2020 e SHX9020, ambos adquiridos comercialmente e desenvolvidos exclusivamente para fibras naturais.

A solução retardante de chamas CKC2020 é um produto aquoso incolor e inodoro, apresenta um PH: 6,5 ($\pm 0,5$), índice de propagação da chama 10-18 e índice de densidade óptica Dm 72-94 (< 450). A composição desta solução é de sais, fósforo e água (CKC, 2021), podendo ser aplicado com pulverizador manual ou compressor a ar, ou rolo (2 de mãos aplicadas uniformemente com intervalos de 3 horas).

O produto SHX9020 é uma solução aquosa ignifugante, incolor e inodora com um PH 3,5-5,5; índice de propagação de chamas menor de que 25 e um índice de Densidade Ótica de Fumaça: Dm < 450 . A composição desta solução é de uma mistura de polímeros e compostos fosfatados; podendo ser aplicado com borrifador manual, pistola de pintura ou imersão total (HELENA; 2021a, HELENA; 2021b).

3.4 MÉTODOS

3.4.1 Manta de sisal

3.4.1.1 Caracterização física.

A caracterização física da manta de sisal com e sem tratamento antichama foi realizada por meio dos ensaios de gramatura, massa unitária e massa específica, realizados no Laboratório de Estruturas Timoshenko em conjunto com o Laboratório do Centro Tecnológico de Argamassa (CETA) da Universidade Federal da Bahia (UFBA).

A massa unitária e a gramatura da manta de sisal com e sem tratamento antichamas foi determinada de acordo com a norma NBR 12.984 – Não tecido: Determinação da massa por unidade de área (ABNT, 2009). Para realizar este ensaio, foram conformados dois corpos de prova de 80x80 mm e foram medidas a espessura da manta em quatro lados com paquímetro, assim como a massa de cada corpo de prova com uma balança de resolução de 0,1g. Este ensaio foi realizado com duas repetições para cada amostra.

A massa específica da manta de sisal com e sem tratamento antichama foi obtida pela adaptação do método para madeiras indicado na NBR 7190 – Cálculo e execução de estruturas de madeira (ABNT, 2022), através da relação entre a massa seca da manta de sisal e o volume saturado das amostras.

Neste ensaio, determinou-se a massa inicial das amostras para posteriormente iniciar o processo de secagem do material na estufa com temperatura máxima de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e com medições a cada 6h da massa até estabilização das amostras, obtendo-se assim a massa seca. O volume saturado foi determinado pelas dimensões das amostras submersas em água até atingir massa constante.

Este ensaio permitiu determinar a variação da massa específica da manta de sisal como resultado da higroscopia do material (umidade da amostra), portanto, foi necessário identificar as variações na densidade geradas pelo tratamento antichamas no material. Este ensaio foi realizado com 3 repetições para cada amostra no Laboratório de Madeira da Universidade Federal da Bahia (UFBA).

3.4.1.2 *Tratamento da manta de sisal.*

Inicialmente, analisou-se o tempo dos ciclos de molhagem e secagem adequados para as mantas de sisal, tomando como referência o trabalho de Batista *et al.* (2021) que analisou amostras de 10x10cm (com 5 repetições) e determinou o

tempo de ciclo de molhagem de hora em hora através da imersão das fibras de sisal em água a temperatura ambiente (23°C) para posteriormente serem pesadas até apresentarem massa constante (após 3 horas de imersão na água), atingindo a saturação. Em seguida, o tecido foi retirado da água para remoção do excesso de líquido por 2 horas.

Após a retirada do excesso de água das fibras, as amostras foram colocadas na estufa a 80°C (FERREIRA *et al.*, 2012), por um período de 16 horas para remover a umidade, controlando o peso do material a cada hora até apresentarem constância de massa (verificou-se que o tecido apresentou constância de massa após 3 horas). Este procedimento corresponde a um ciclo de molhagem e secagem de 24 horas. Destaca-se que após o desligamento da estufa é necessário aguardar a estufa atingir 23°C (aproximadamente 1 hora) para a retirada do material, evitando o choque térmico.

Uma vez definidos os ciclos de molhagem e secagem, Batista *et al.* (2021) determinou que a hornificação das fibras de sisal deve ser realizada durante 10 ciclos de molhagem e secagem. Este ensaio foi efetuado no Laboratório de Estruturas Timoshenko e no Laboratório de Madeira da Universidade Federal da Bahia (UFBA).

O tratamento antichama da manta de sisal foi realizado de duas formas:

- Nove ciclos de molhagem e secagem com água e um ciclo com produto antichama.
- Dez ciclos de molhagem e secagem com produto antichama.

3.4.2 Comportamento físico da manta de sisal

3.4.2.1 Absorção d'água

O ensaio de absorção d'água foi realizado seguindo os procedimentos da norma TAPPI UM 256 – *Water Retention Valeu*. Para este ensaio, analisam-se as

amostras de mantas de sisal com e sem tratamento, com dimensões de 30x30 mm e três repetições para cada amostra. As mantas de sisal foram colocadas à temperatura de 80°C durante 3 horas (BATISTA *et al.*, 2021; FERREIRA *et al.*, 2012) para remoção da umidade para posteriormente pesar as amostras e obter a massa seca.

Para a obtenção da massa úmida saturada, as amostras foram imersas em água até saturação para posteriormente serem pesadas após remoção da água superficial.

O cálculo do índice de absorção de água está determinado pela equação 1 (TAPPI, 2015).

$$WRV(\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde m_u é a massa da amostra após saturação em água e m_s é a massa da amostra seca em estufa.

O ensaio de absorção de água foi realizado para verificar a capacidade hidrofílica das fibras de sisal durante cada ciclo de molhagem e secagem para os diferentes tratamentos antichamass, com o intuito de identificar que produto antichama diminui a retenção d'água das fibra de sisal após a hornificação, contribuindo com a aderência entre as fibras e a matriz de gesso.

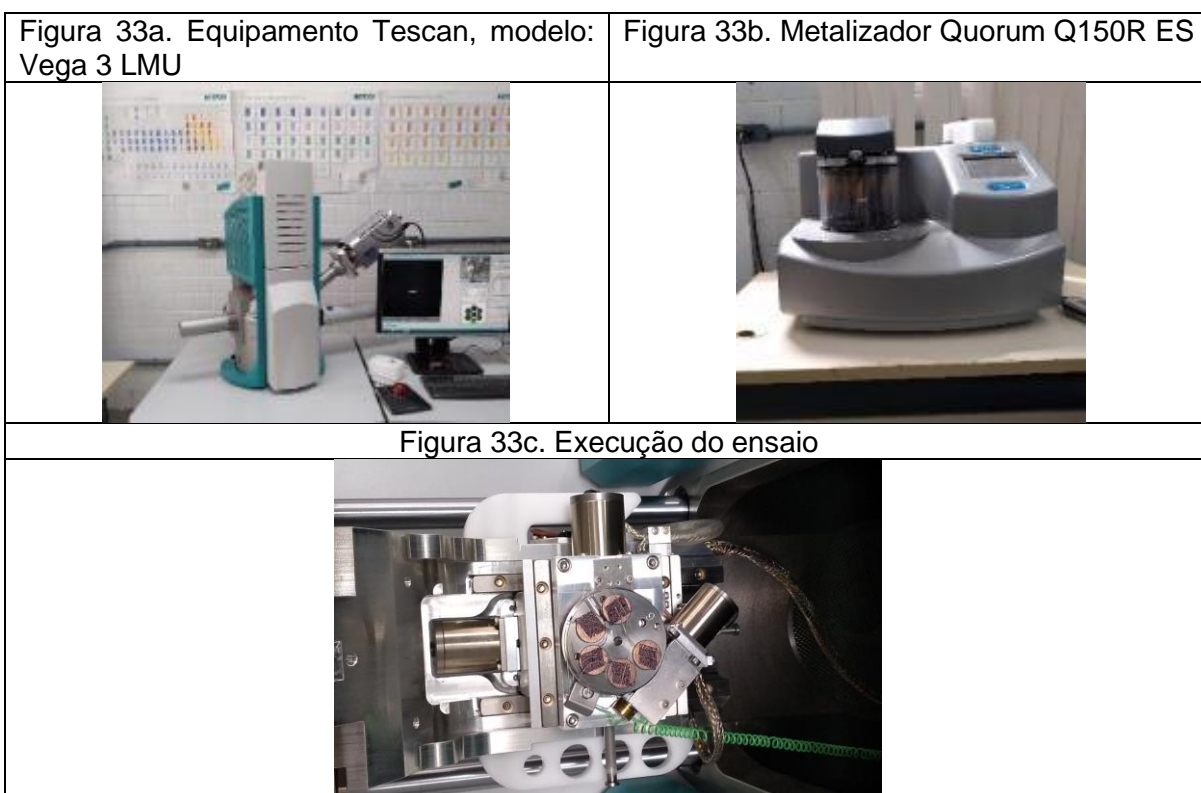
Os ensaios foram executados no Laboratório de Estruturas Timoshenko e no Laboratório de Madeira da Universidade Federal da Bahia (UFBA).

3.4.2.2 *Microscopia eletrônica de varredura*

Para a determinação das características morfológicas das mantas de sisal com e sem tratamento foi utilizada a técnica por microscopia eletrônica de varredura com o intuito de analisar o padrão de superfície, degradação superficial, defeitos, seção transversal e a contração das células que afetaram a aderência entre as fibras de sisal e a matriz de gesso.

Para este ensaio, utilizaram-se duas amostras para cada tipologia de tratamento das mantas de sisal (10 ciclos com produto SHX9020, 10 ciclos com produto CKC2020, 9 ciclos com água e um ciclo com produto de SHX9020 e 9 ciclos com água e um com produto CKC2020) e duas amostras de manta de sisal *in natura*. Prévio à realização do ensaio as amostras foram colocadas na estufa para a retirada de umidade e posteriormente, foram metalizadas com ouro no equipamento Quorum Q150R ES para impedir o acúmulo de contaminação na superfície e melhorando os níveis de emissão de elétrons secundários. As micrografias foram obtidas por meio do equipamento Tescan, modelo: Vega 3 LMU, canhão *Oxford Instruments X-ACT (Nordlys nano)* com filamento de Tungstênio, localizado no Instituto Federal da Bahia (Figura 35).

Figura 33. Equipamento Tescan, modelo: Vega 3 LMU.



Fonte. Autora.

O ensaio MEV foi realizado para obter imagens morfológicas com sistema de detecção de sinais por elétrons secundários de alta resolução da manta de sisal.

Destaca-se que as amostras correspondem a um fio retirado das mantas de sisal *in natura* ou com tratamento com produto antichama.

3.4.3 Comportamento frente altas temperaturas da manta de sisal

3.4.3.1 Teste de flamabilidade.

O teste de flamabilidade foi o primeiro ensaio realizado nas amostras de manta de sisal após a hornificação para determinar o produto antichama com melhor comportamento frente ao fogo. Este ensaio foi realizado pelos procedimentos indicados na norma NBR 14892 – Não tecido: Avaliação à flamabilidade horizontal, a partir de uma câmara de combustão. Cinco amostras, para cada tipologia de manta, de 100x360 mm com marcações a 38 mm e 64 mm de cada borda foram produzidas para cada tipologia de manta de sisal com e sem tratamento para determinar o grau de flamabilidade (Figura 36).

Figura 34. Marcações nas fibras de sisal previo ao ensaio



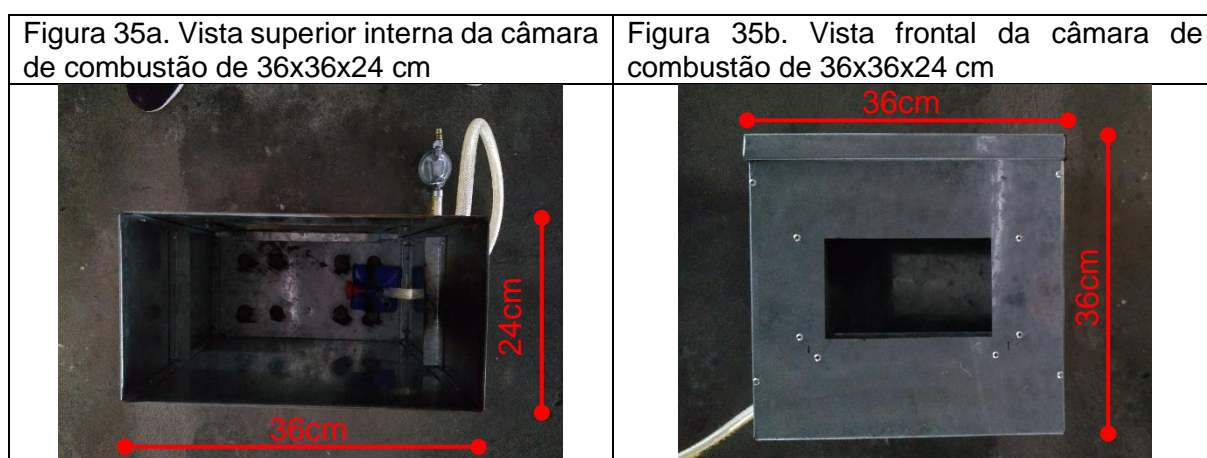
Fonte. Autora.

A partir do desenvolvimento da chama e da queima das amostras, a norma NBR 14892 (ABNT, 2018) permitiu classificar o material em Tipo A, B, C, D ou E (ver anexo); bem como, determinar o produto antichama apropriado para a manta de sisal utilizada na produção do compósito.

Para a realização do ensaio foi necessário construir uma câmara de combustão de 36x36x24 cm em zinco com a parte frontal da câmara contendo uma janela de

observação com fechamento em vidro temperado de 8 mm (Figura 35). A face inferior contém 10 orifícios de ventilação e a face superior contém uma abertura circular de aeração de 12,7 mm. Nas faces laterais da câmara foram posicionados suportes que em conjunto com uma grelha permitiram posicionar o corpo de prova para a realização do ensaio, assim como foi criada uma abertura para a passagem da mangueira de gás que conecta o botijão com o bico de Bunsen.

Figura 35. Câmara de combustão para análise de flamabilidade das amostras.



Fonte. Autora.

3.4.4 Caracterização do gesso em pó

A caracterização do gesso em pó foi avaliada por meio da análise física, química e mineralógica.

3.4.4.1 Caracterização física.

A caracterização física do gesso em pó realizou-se por meio dos ensaios de granulometria, massa unitária e massa específica para duas amostras.

Os ensaios de granulometria e massa unitária foram executados segundo os procedimentos da norma NBR 12127 – Gesso para construção: Determinação das propriedades físicas do pó (ABNT, 2019b). O ensaio de massa específica foi realizado seguindo os requerimentos da norma NBR 16605 – Cimento Portland e outros materiais em pó: Determinação da massa específica (ABNT, 2017d) e posteriormente

foi analisada a superfície específica pelo método B.E.T (Brunauer, Emmett e Teller), por meio do equipamento Gemini VII da Micromeritics.

Os ensaios foram efetuados no Laboratório de Ensaio em Durabilidade dos Materiais (LedMa) em conjunto com o Laboratório de Estruturas Timoshenko e o Laboratório do Centro Tecnológico de Argamassa (CETA) da Universidade Federal da Bahia (UFBA).

3.4.4.2 Caracterização química.

A caracterização química do gesso em pó foi estudada por fluorescência de raios X (FRX) com aplicação de uma técnica não destrutiva que permitiu identificar qualitativamente os elementos químicos presentes na amostra e estabelecer quantitativamente a concentração dos mesmos.

Os ensaios de FRX foram efetuados por meio do equipamento portátil Oxford Série X-MET7500 por dispersão de energia (Figura 36), com capacidade para detectar elementos químicos com peso molecular entre Cloro e Urânio, de acordo com o fabricante.

Figura 36. Analisador portátil Oxford Série X-MET7500.



Fonte. (OXFORD, 2013)

Durante a execução do ensaio foi necessário homogeneizar as amostras e posicionar o material diretamente no porta amostra do equipamento portátil sem

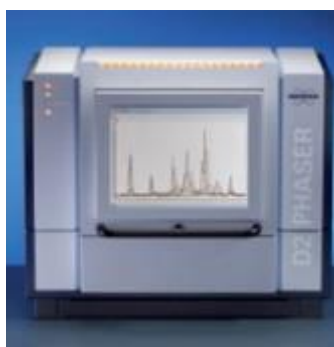
nenhum tipo de interferências e com uma distância máxima de 15 mm do equipamento portátil.

Este ensaio foi executado para duas amostras de gesso em pó no Laboratório de Geotecnia Ambiental da Universidade Federal da Bahia.

3.4.4.3 *Caracterização mineralógica.*

Para a determinação da composição mineralógica do material foi utilizada a técnica de Difração de Raios-X com o intuito de analisar as fases cristalinas da amostra, tanto qualitativa como quantitativamente. Para a execução do ensaio foi usado um difratômetro de bancada D2 Phaser (Bruker) com um tubo de alvo de cobre de 30 kV e 10 mA e comprimento de onda (λ) = 0,15406 nm, sem sistema de filtragem com monocromador secundário. Os espectros de difração foram na faixa de 2θ de 5° a 90° , no modo contínuo a 0,01°/s (Figura 37).

Figura 37. Difratômetro de bancada D2 Phaser (Bruker)



Fonte. Autora.

As fases presentes nas amostras foram identificadas com o auxílio do programa computacional DIFFRAC plus – EVA, com base de dados no sistema Crystallography Open Database (COD) e a quantificação de fases no software TOPAS que utiliza o método de Rietveld e sistema Crystallography Information File (CIF).

Prévio à realização do ensaio, foi necessário homogeneizar a amostra para posteriormente ser peneirada ($75\ \mu\text{m}$) e assim atingir a granulometria apropriada para

posterior análise. Após o peneiramento da amostra, foi preenchido a porta amostra do difratômetro, com ajuda de uma lâmina de vidro que permita movimentar o material dentro da porta amostra, obtendo-se uma amostra lisa e aleatória.

Este ensaio foi efetuado no Laboratório de Ensaio de Durabilidade dos Materiais (LEDMA) da Universidade Federal da Bahia (UFBA).

3.4.5 Desenvolvimento da pasta de gesso

A consistência, o tempo de pega e a relação água/gesso da pasta de gesso são fatores fundamentais para o correto desenvolvimento da matriz que conformará o compósito. Assim sendo, analisaram-se as pastas de gesso com diferentes teores água/gesso que permitiram identificar o teor adequado para o gesso em pó. Uma vez definido o teor água/gesso, foram verificadas diversas misturas de pastas de gesso com aditivo superplastificante com o intuito de tornar a pasta de gesso mais fluida e autoadensável e assim obter a pasta adequada para o compósito.

Nesta pesquisa, analisaram-se o tempo de pega e consistência normal para os teores de água/gesso e aditivo superplastificante indicados no Quadro 16 e com condições de ensaio controladas, com temperaturas de $24^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de aproximadamente 60%.

Quadro 16. Pastas de gesso avaliadas.

Teor aditivo%	0	0,9	1	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	0,5
Relação a/g	0,5	0,6	0,35	0,4						0,5

Fonte. Autor

A pasta de gesso foi preparada manualmente de acordo com os requerimentos da NBR 12128 – Gesso para construção civil: Determinação das propriedades físicas da pasta de gesso (ABNT, 2019a). As etapas, tempo e o processo de preparo da pasta de gesso foram as indicadas no Quadro 17.

Quadro 17. Produção pasta de gesso

Etapa	Tempo	Processo
1	-	Mistura aditivo superplastificante na água
2	1 minuto	Polvilhar o gesso na mistura de água com superplastificante
3	2 minutos	Descanso da mistura
4	1 minuto	Mistura dos materiais manualmente
5	30 segundos	Descanso da mistura

Fonte. Adaptado da ABNT (2019a).

3.4.5.1 Ensaios na pasta no estado fresco

As propriedades reológicas da pasta de gesso foram analisadas por meio dos ensaios de espalhamento, consistência normal e tempo de pega, que medem as condições de fluidez da pasta.

Para a determinação do *minuslump* ou espalhamento da pasta de gesso utilizou-se a metodologia de Gao; Fourie, 2015; Kantro (1980). Os equipamentos necessários para este ensaio foram um molde de tronco cônico de acrílico com aberturas nas extremidades, uma lâmina de vidro, paquímetro digital e papel milimetrado. No ensaio, o molde de tronco cônico foi posicionado no centro da lâmina de vidro e embaixo da lâmina foi colocado o papel milimetrado, auxiliando na medição do espalhamento. Uma vez locado o molde cônico, preencheu-se com a pasta de gesso, retirando o excesso de pasta e posteriormente retirou-se o molde verticalmente, permitindo o espalhamento da pasta no vidro. Finalmente, foram tomadas medições ortogonais da pasta com o auxílio do paquímetro.

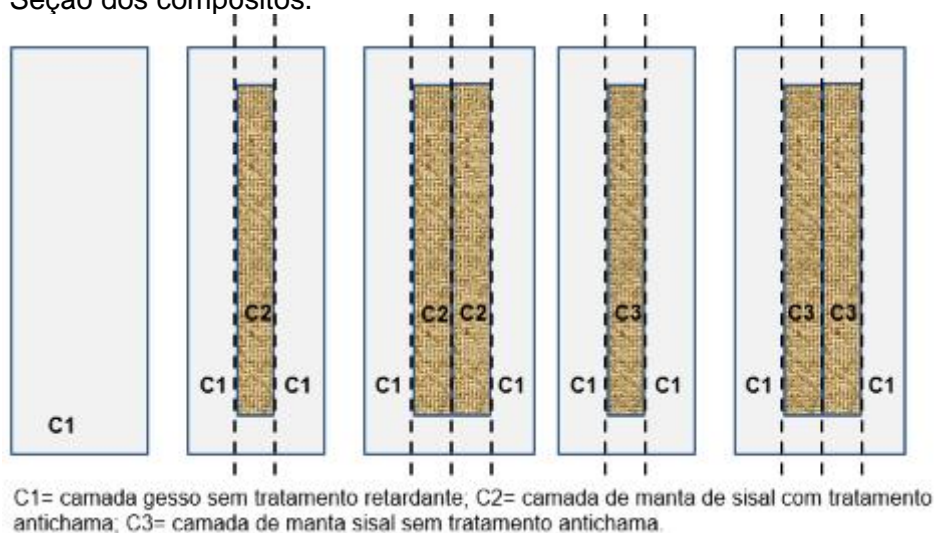
Na sequência foram realizados os ensaios de consistência normal e tempo de pega segundo as prescrições da norma NBR 12.128 – Gesso para construção: Determinação das propriedades físicas da pasta (ABNT, 2019a), com a utilização do aparelho Vicat e Vicat modificado. Os ensaios foram executados no Laboratório de Estruturas Timoshenko em conjunto com o Laboratório do Centro Tecnológico de Argamassa (CETA) da Universidade Federal da Bahia (UFBA).

Os ensaios de espalhamento, consistência normal e tempo de pega foram realizados com duas repetições para cada amostra.

3.4.6 Especificação dos compósitos

Nesta pesquisa foram confeccionadas duas tipologias de chapas de compósitos (Figura 38). A primeira chapa de compósito apresentará uma camada de reforço interna de manta de sisal tratada com produto antichama e com matriz de gesso, a segunda chapa de compósito também estará confeccionada com uma camada de reforço sem tratamento retardante e com a matriz de gesso. A terceira chapa de compósito estará conformada com duas camadas de reforço com mantas de sisal com tratamento antichama no interior e com matriz de gesso, porém a quarta tipologia de chapa também terá duas camadas de manta de sisal sem tratamento retardante e com matriz de gesso.

Figura 38. Seção dos compósitos.



Fonte. Autora.

A proposta do número de camadas de manta de sisal foi adotada para identificar a influência do material e do tratamento antichama no comportamento frente ao fogo. O Quadro 18 especifica os compósitos que serão desenvolvidos.

Quadro 18. Especificação dos compósitos que serão desenvolvidos.

Chapa compósito Referência	Tratamento do reforço	Tratamento da matriz	Número de camadas de reforço
$G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$	<i>In natura</i>	Não	1
$G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}$	Tratada	Não	1
$G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$	<i>In natura</i>	Não	2
$G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}$	Tratada	Não	2

Fonte. Autora.

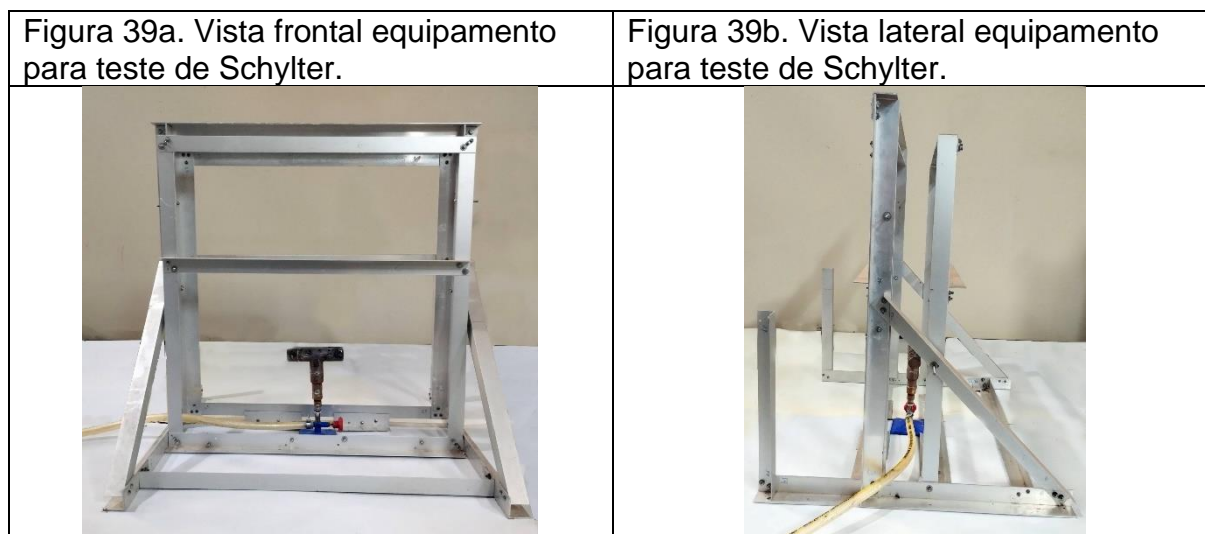
As chapas compósitas foram construídas com uma forma preenchida em camadas de pasta de gesso e a manta de sisal intercaladas, de acordo com a amostra a ser produzida. O controle da quantidade de material por camada foi realizado em peso, configurando camadas de gesso e manta de sisal com as mesmas características no interior de cada compósito.

Os compósitos que apresentam uma camada de manta de sisal contém em média 26% de fibras, já os compósitos que contém duas camadas de manta de sisal contém em média 53%.

3.4.7 Comportamento dos compósitos frente ao fogo

O comportamento dos compósitos frente ao fogo foi analisado por meio do teste de Schlyter modificado com amostras de 61cmx30cm, maximizando o uso dos rolos de manta de sisal doada pela empresa Hamilton Rios Ltda. Para a realização do ensaio foi necessário construir uma armação de alumínio que sustenta duas amostras das chapas de material compósito, com um bico de gás tipo Meker nº4 e um T de cobre (com extremidades fechadas) que funciona como queimador. Os orifícios do queimador foram regulados para produzir chamas azuis para um fluxo de gás de 0,5 m³/hora. Também foi necessária uma escala para medir a altura das chamas durante a situação de incêndio (Figura 39a e 39b).

Figura 39. Montagem dos equipamentos para a execução do teste de Schlyter.



Fonte. Autora.

Para a realização do ensaio, os corpos de prova foram ajustados a estrutura de alumínio, ficando um corpo de prova paralelo ao outro, com um afastamento entre eles de 5 cm e um afastamento da base de 10 cm.

Este ensaio, realizou-se com o objetivo de analisar a resistência a propagação da chama e determinar as mudanças superficiais nas chapas em material compósito com e sem tratamento antichama ($G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$, $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}$, $G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$, $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}$), assim como das chapas de gesso acartonado ST e RF. Para a realização do ensaio foram utilizadas duas amostras para cada tipologia de chapa analisada.

Entre os resultados esperados para este ensaio se encontram: altura das chamas quando o queimador é removido; instante em que as chamas ultrapassam o topo da armação; altura máxima atingida pelas chamas; instante em que toda chama cessar; instante em que toda a incandescência cessar; duração da fumaça após desligar o queimador; mudança de coloração nas chapas e surgimento de fissuras.

Este ensaio foi executado no Laboratório de Estruturas Timoshenko da Universidade Federal da Bahia (UFBA), em um lugar ventilado e com extintores que permitiram apagar o fogo em situações de emergência.

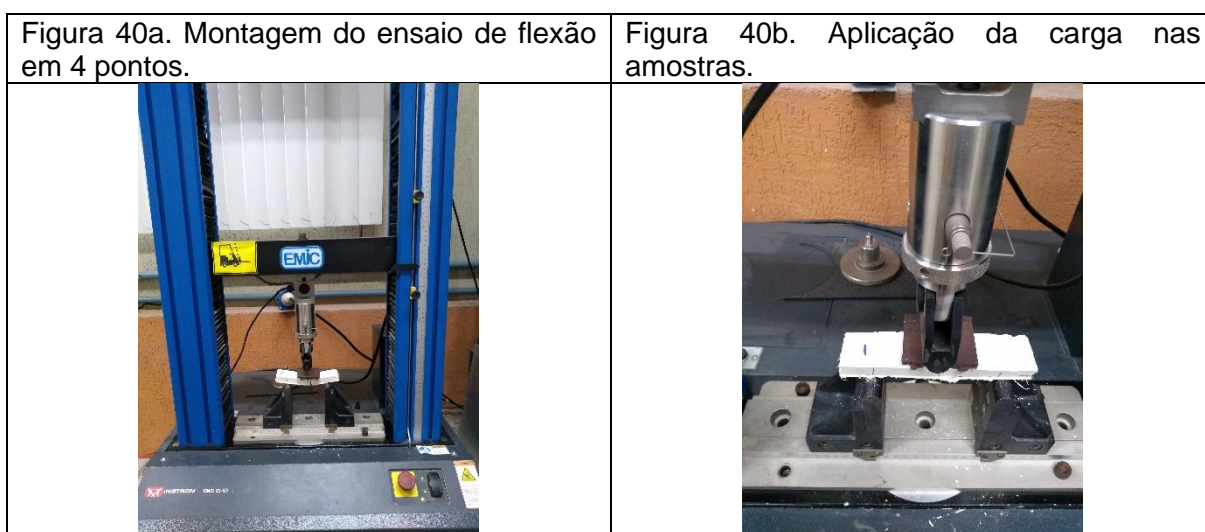
3.4.8 Aderência dos compósitos

3.4.8.1 Flexão em 4 pontos

Com o intuito de analisar a aderência e o comportamento mecânico dos compósitos reforçados com fibras de sisal com e sem tratamento antichama ($G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$, $G_{(\phi)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}$, $G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$, $G_{(\phi)}M_{(\tau)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}$), nas dimensões de 160x40x14 mm³, foram submetidos ao ensaio de flexão em quatro pontos. Este ensaio segue os parâmetros estabelecidos pela norma ASTM C947:03 – *Standard Test Method for Flexural Properties of Thin-Section Glass-Fiber-Reinforced Concrete (Using Simple Beam With Third-Point Loading)*(ASTM, 2016)

O ensaio foi realizado em uma máquina universal EMIC 23-5D (Figura 40), localizada no Laboratório do Centro Tecnológico de Argamassa (CETA) da Universidade Federal da Bahia (UFBA). Este equipamento tem uma capacidade máxima de carga de 20 kN, velocidade de deslocamento da ponte da máquina de 1,0 mm/min, espaçamento entre os pontos de carga de 100 mm e dos pontos de apoio de apoio de 300 mm. O ensaio à flexão foi realizado com seis repetições para cada amostra com o intuito de determinar a força máxima e de flecha de ruptura.

Figura 40. Ensaio de flexão em 4 pontos.



Fonte. Autora.

3.4.8.2 *Microscopia eletrônica de varredura*

Para a determinação da aderência dos compósitos de gesso reforçados com fibra de sisal antes e após situações de incêndio foi utilizada a técnica por microscopia eletrônica de varredura com o intuito de analisar a presença de vazios entre a matriz e o reforço, assim como a mudanças do padrão de superfície e degradação superficial do gesso e da fibra.

Para este ensaio, utilizou-se duas amostras para cada tipologia de compósito, considerando amostras com e sem tratamento antichama ($G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$, $G_{(\phi)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}$, $G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$, $G_{(\phi)}M_{(\tau)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}$). Prévio à realização do ensaio as amostras foram colocadas na estufa para a retirada de umidade e posteriormente, metalizadas com ouro para impedir o acúmulo de contaminação na superfície e melhorando os níveis de emissão de elétrons secundários. As micrografias foram obtidas com o equipamento Tescan, modelo: Vega 3 LMU, canhão oxford instruments x-act (Nordlys nano) com filamento de Tungstênio, localizado no Instituto Federal da Bahia.

4 RESULTADOS

4.1 MANTA DE SISAL

4.1.1 Caracterização física da manta de sisal

A caracterização física da manta de sisal com e sem tratamento antichama foi realizada através dos ensaios de gramatura, massa unitária e massa específica. Os resultados médios, desvio padrão e o coeficiente de variação obtidos podem ser verificados na Tabela 16.

Tabela 16. Resultados para a caracterização física da manta de sisal.

		<i>In natura</i>	$M_{(T)}$ SHX9020 _{(9+1)*}	$M_{(T)}$ CKC2020 _{(9+1)*}	$M_{(T)}$ SHX9020 _{(10)**}	$M_{(T)}$ CKC2020 _{(10)**}
Massa unitária (g/cm ³)	Média	0,132	0,136	0,165	0,151	0,219
	D.P	0,03	0,02	0,01	0,01	0,06
	C.V (%)	1,52	2,63	0,86	1,97	5,95
Gramatura (g/m ²)	Média	722,2	751,85	911,11	829,63	1211,11
	D.P	0,04	0,03	0,018	0,015	0,03
	C.V (%)	1,66	2,78	1,01	2,12	4,05
Massa específica (g/cm ³)	Média	1,35	1,40	1,71	1,55	2,25
	D.P	0,02	0,04	0,025	0,012	0,05
	C.V (%)	1,22	2,09	1,88	2,03	5,20

* (9 +1) hornificação 9 ciclos de água e 1 de produto antichama.

** (10) hornificação 10 ciclos de produto antichama.

Fonte. Autora.

A caracterização física da manta de sisal indicou uma massa unitária para a manta *in natura* de 0,132 g/cm³, valor equivalente aos dados apresentados por Brandão (2015), que utilizou a mesma manta de sisal fornecida pela empresa Hamilton Rios Ltda. Em relação aos resultados obtidos para as mantas de sisal após tratamento com produto antichama, observou-se um aumento da massa unitária em 3,82%, 25,95%, 15,2% e 67,17% para os tratamentos $M_{(T)}$ SHX9020₍₉₊₁₎, $M_{(T)}$ CKC2020₍₉₊₁₎, $M_{(T)}$ SHX9020₍₁₀₎ e $M_{(T)}$ CKC2020₍₁₀₎, respectivamente.

A manta de sisal *in natura* em estudo apresentou uma gramatura de 722,2 g/m² e está em conformidade com os valores obtidos por Pinto (2018) de 724,4 g/m². Após

o tratamento de hornificação, verificou-se o aumento na gramatura das mantas de sisal em um 3,78% para o tratamento $M_{(T)}SHX9020_{(9+1)}$, 25,77% para $M_{(T)}CKC2020_{(9+1)}$, 14,52% para $M_{(T)}SHX9020_{(10)}$ e 67,18% para $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$.

Em relação a massa específica, verificou-se que o valor encontrado para a fibra *in natura* de 1,345 g/cm³ está em conformidade com os valores apresentados pela literatura, próximo ao reportado por Brandão (2015) de 1,36 g/cm³ e por Aparecida e Agopyan (2007) de 1,51 g/cm³. O tratamento de hornificação evidenciou um aumento da massa específica das amostras em 3,70%, 26,6%, 14,81% e 66,66% para os tratamentos $M_{(T)}SHX9020_{(9+1)}$, $M_{(T)}CKC2020_{(9+1)}$, $M_{(T)}SHX9020_{(10)}$ e $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$, respectivamente.

O aumento da massa unitária, gramatura e massa específica era esperado, uma vez que a hornificação com 10 ciclos de molhagem e secagem promovem modificações físicas nas fibras de sisal como a redução da seção transversal da fibra hornificada em comparação com a fibra *in natura*. Destaca-se que ambos tratamentos com produto antichama CKC2020 atingiram o maior incremento na caracterização física das mantas de sisal.

4.1.2 Tratamento da manta de sisal por hornificação

O tratamento por hornificação foi realizado a partir de três etapas: a manta de sisal foi imersa em água ou produto antichama por 3 horas, em seguida retirou-se o tecido para remoção do excesso de água ou produto antichama por 2 horas e, finalmente, colocaram-se as amostras em estufa a uma temperatura de 80°C por 3 horas.

Durante a etapa de imersão da manta de sisal com 9 ciclos de molhagem em água e 1 ciclo de molhagem com produto antichama, observou-se que os tratamentos com água contribuíram com a remoção de impurezas e ceras após 2 ciclos de

molhagem e secagem, o que só aconteceu com 5 ciclos nas amostras tratadas só com produto antichama. A remoção das impurezas e ceras foi verificada a partir da presença de partículas e nas mudanças da cor do líquido utilizado para a hornificação.

Na etapa da remoção do excesso de água ou do produto antichama, as amostras foram colocadas em recipientes. Durante este procedimento, verificou-se um acúmulo de líquido nos recipientes, sendo necessário que a secagem das amostras fosse realizada com uma pequena inclinação ou por penduramento, evitando que as amostras entrassem em contato com o líquido.

Na última etapa, após colocar as amostras em estufa foi possível observar mudanças na cor e texturas das mantas de sisal após cada tratamento de hornificação, como indicado nas Figuras 41a, 41b, 41c e 41d. Nas amostras hornificadas com produto antichama SHX9020, constatou-se uma perda de cor das fibras e um aumento da rigidez, o que diminui a maleabilidade do material, dificultando o manuseio durante o desenvolvimento dos compósitos. Entretanto, as amostras tratadas com produto CKC2020 apresentaram uma cor mais escura e com uma distribuição homogênea do produto antichama.

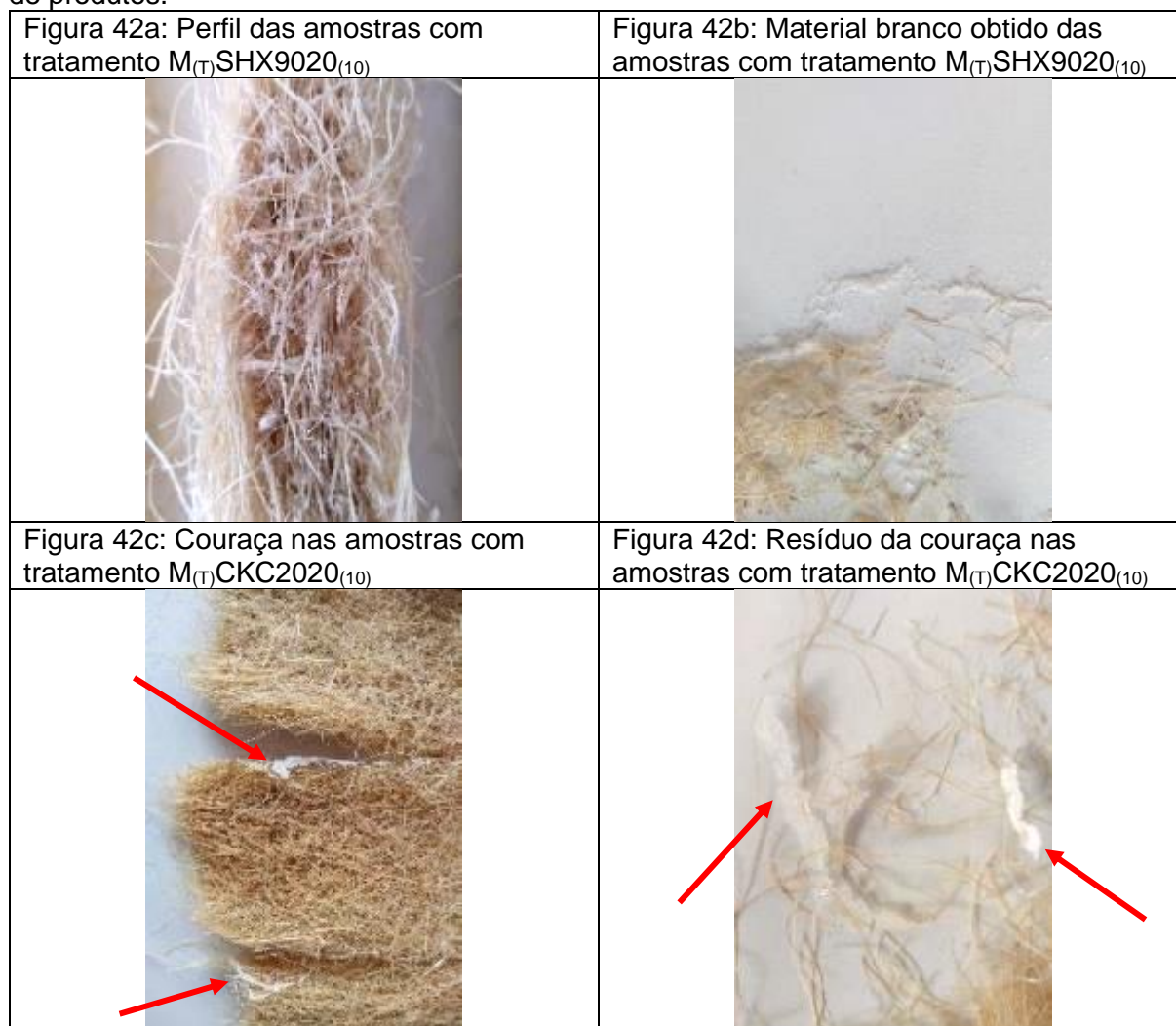
Figura 41. Amostras de manta de sisal após tratamento por hornificação.



Fonte. Autora.

As amostras hornificadas com 10 ciclos de molhagem e secagem com produto antichama evidenciaram defeitos na borda do corpo de prova, como indicado na Figura 42a, 42b, 42c e 42d. Nas amostras tratadas com o produto antichama SHX9020, identificou-se uma aglomeração do produto com mudanças na superfície da amostra, criando um material branco na forma de pó. Este aspecto na manta de sisal pode ser explicado pela mistura de polímeros e compostos fosfatado próprios da composição do produto.

Figura 42. Aspectos das amostras após finalizado o tratamento por hornificação com 10 ciclos de produtos.



Fonte. Autora.

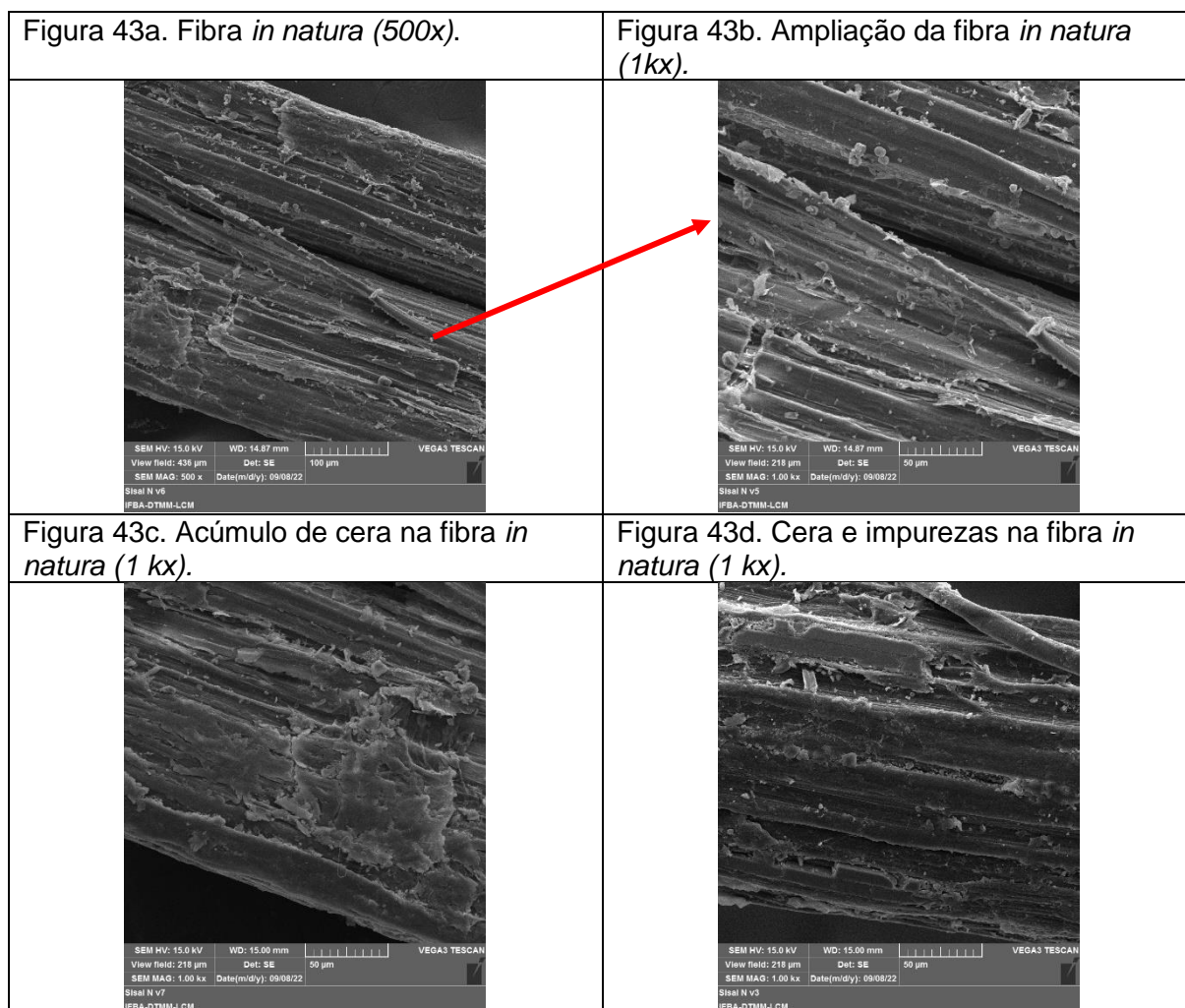
As mantas de sisal hornificadas com 10 ciclos de molhagem e secagem com produto antichama CKC2020 também apresentaram acúmulo de produtos em alguns pontos das amostras após a hornificação, através de uma couraça criada nos fios que delimitam as amostras (Figura 42c e 42d). A composição do produto CKC2020 justifica a presença dos acúmulos de produto e a coloração das amostras, através da presença de sais, fósforos e água na composição do produto antichama; eliminando as ceras e impurezas da superfície da manta de sisal após cada ciclo de molhagem e secagem.

4.2 COMPORTAMENTO FÍSICO DA MANTA DE SISAL

4.2.1 Microscopia eletrônica de varredura.

Na Figura 43, estão apresentadas as imagens por microscopia eletrônica de varredura de uma fibra de sisal *in natura* utilizadas nesta pesquisa. As amostras da Figura 43a indicaram um padrão de superfície estriado e com sinais de abrasão, indicativo do processo de preparação da fibra de sisal para o desenvolvimento da manta, informação também reportada por Veigas; Najimi; Shafei (2022). Com a ampliação das Figuras 43b, 43c e 43d foi possível capturar os locais com impurezas e ceras ao longo da superfície da fibra, não apresentando degradação superficial. Estes resultados são similares aos apresentados por Neto *et al.* (2019).

Figura 43. Microscopia eletrônica de varredura da fibra de sisal *in natura*.

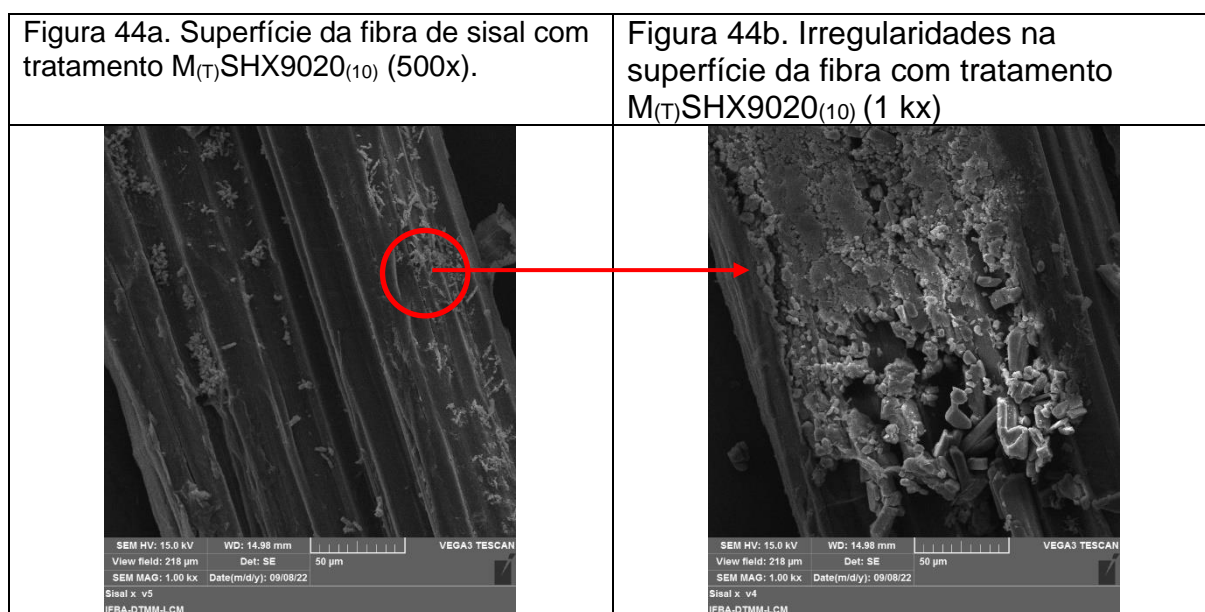


Fonte. Autora.

A fibra de sisal procedente da manta de sisal com tratamento $M_{(T)}SHX9020_{(10)}$ mostrou um padrão de superfície estriado livre de ceras e impurezas (Figura 44a), sendo que a fadiga causada pelo tratamento por hornificação contribuiu com o aumento da rugosidade em pontos específicos da superfície dos fios da fibra.

Também foi possível observar que o produto antichama não cobriu a superfície da fibra na sua totalidade, contrariamente, na ampliação evidenciou-se os pontos de concentração do produto (Figura 44b). Esta concentração do produto corresponde a irregularidades das amostras após finalizado o tratamento por hornificação.

Figura 44. Microscopia eletrônica de varredura da fibra de sisal com tratamento $M_{(T)}SHX9020_{(10)}$.

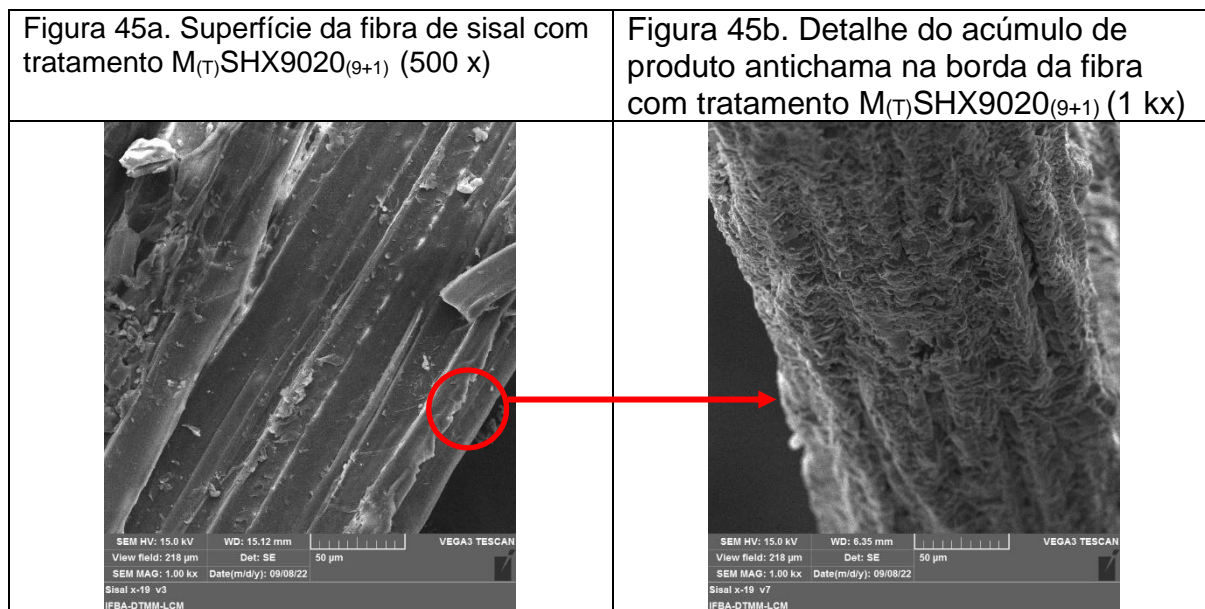


Fonte. Autora.

As fibras de sisal com tratamento e $M_{(T)}SHX9020_{(9+1)}$, apresentaram um padrão de superfície estriado, livre de ceras e impurezas, contudo identificaram-se pontos de concentração do produto antichama ao longo da superfície e na borda da fibra (Figura 45a e 45b), assim como pontos em que o produto antichama não cobriu a superfície da fibra na sua totalidade, caracterizando o tratamento como heterogêneo. Estes

resultados são similares aos apresentados por Neto *et al.* (2019) e Veigas; Najimi; Shafei (2022).

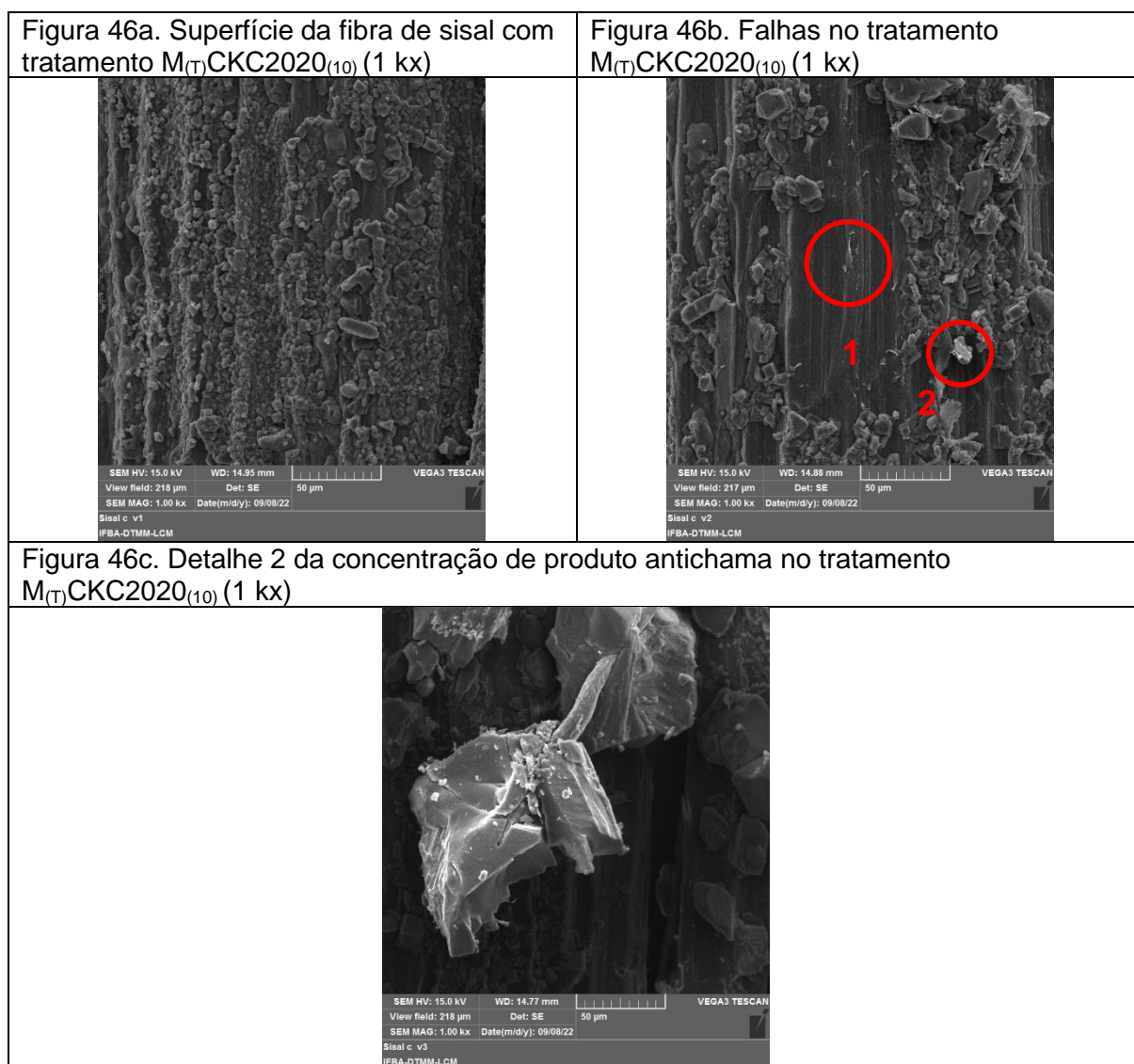
Figura 45. Microscopia eletrônica de varredura da fibra de sisal com tratamento $M_{(T)}SHX9020_{(9+1)}$.



Fonte. Autora.

O tratamento das fibras de sisal $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$ modificou a superfície das fibras após o tratamento, eliminando ceras e impurezas, o que foi observado de forma pontual no tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(9+1)}$, superfície que se caracterizou por apresentar pontos limpos e pontos com superfície rugosa. O tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$, indicado na Figura 46a apresentou um tratamento mais homogêneo da fibra de sisal, aumentando a rugosidade da superfície da fibra, em relação ao tratamento $M_{(T)}SHX9020_{(10)}$ e $M_{(T)}SHX9020_{(9+1)}$. De acordo com Kamboj *et al.* (2020) o tratamento contribui com a melhor aderência com a matriz na produção do compósito.

Figura 46. Microscopia eletrônica de varredura da fibra de sisal com tratamento $M_{(T)CKC2020(10)}$.



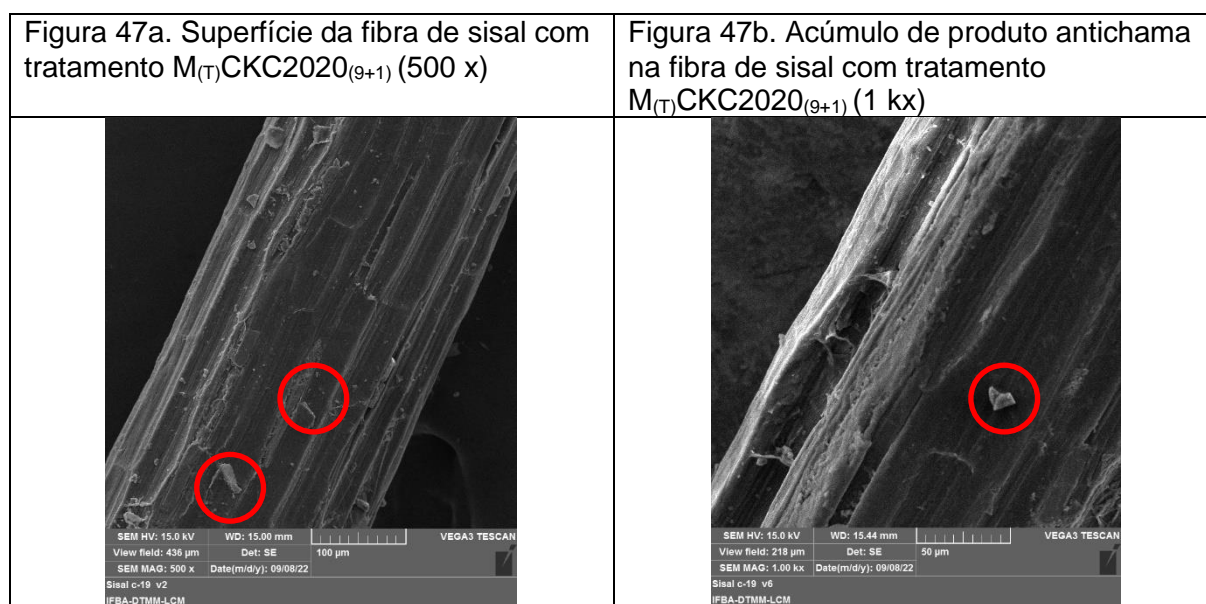
Fonte. Autora.

Nas Figuras 46b, observou-se o detalhe 1 no tratamento com o produto antichama CKC2020, que corresponde a não formação de vazios na fibra, podendo indicar a não remoção da hemicelulose e pectina. Também foi possível observar o detalhe 2, identificado como pequenos pontos de concentração do produto antichama, ampliado na Figura 46c.

As fibras de sisal com tratamento $M_{(T)CKC2020(9+1)}$ apresentaram uma superfície áspera criada pela remoção das ceras, entre outras impurezas (Figura 47a)

e uma proteção antichama pontual com uma superfície clara referente ao acúmulo de produto antichama no tratamento de hornificação, expondo a fibrilação da fibra (Figura 47b)

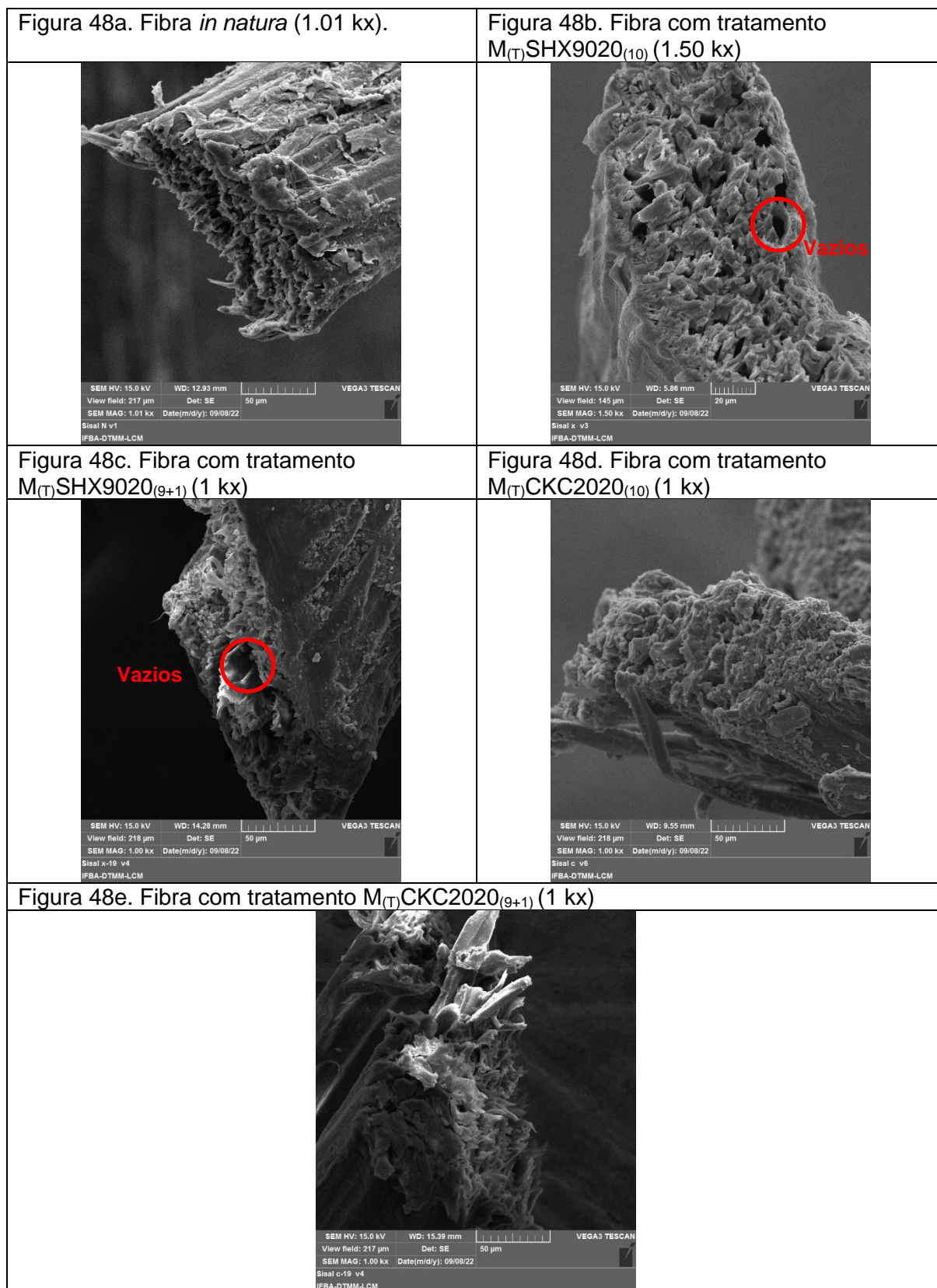
Figura 47. Microscopia eletrônica de varredura da fibra de sisal com tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(9+1)}$.



Fonte. Autora.

Em relação às seções transversais das fibras de sisal com e sem tratamento, a fibra procedente do tratamento $M_{(T)}SHX9020_{(10)}$ e $M_{(T)}SHX9020_{(9+1)}$, indicadas na Figura 48b e na Figura 48c, comparado com a fibra *in natura* (Figura 48a), apresentaram uma contração das células da fibra após hornificação por causa da fadiga excessiva nas paredes das células da fibra devido aos ciclos alternados de molhagem e secagem. De acordo com Kamboj *et al.* (2020), a contração contribui com o surgimento de vazios que indicam a remoção de hemicelulose e celulose e que podem resultar em microfissuras e diminuição da resistência.

Figura 48. Seções transversais das fibras de sisal com e sem tratamento



Fonte. Autora.

Nas fibras de sisal procedentes do tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$ e $M_{(T)}CKC2020_{(9+1)}$, indicadas na Figura 48d e na Figura 48e, também foi observado uma contração das células da fibra após hornificação por causa da fadiga excessiva nas paredes das células da fibra. Entretanto, nas fibras com tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(9+1)}$ existe uma contração reduzido em relação às fibras com tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$, nas quais a contração não contribui a formação de vazios como foi observado com as fibras com tratamento $M_{(T)}SHX9020_{(10)}$ e $M_{(T)}SHX9020_{(9+1)}$. Portanto o tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$ não causou danos na microestrutura da fibra de sisal.

Após a análise dos tratamentos com produto antichama é fundamental destacar que a escolha do produto considera algumas variáveis como:

- O tratamento mais apropriado para a proteção contra o fogo é aquele que apresenta maior rugosidade da superfície da fibra, não expondo ou modificando sua microestrutura, sendo que estas modificações na estrutura indicam uma maior fragilidade e uma diminuição da resistência da fibra de sisal após o tratamento, interferindo no comportamento e resistência do compósito.
- Analisar a influência do tratamento com produto antichama na aderência do compósito, determinada pela rugosidade da superfície da fibra, lembrando que o padrão de superfície das fibras com tratamento de 10 ciclos de molhagem e secagem com produto antichama apresentam maior rugosidade que as fibras com 9 ciclos de molhagem e secagem com água e um ciclo de molhagem e secagem com produto antichama, contribuindo com a aderência entre as fibras de sisal e a matriz de gesso. No caso das fibras com tratamento $M_{(T)}SHX9020_{(10)}$ apresentam menor rugosidade que as fibras com tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$, o que diminuirá a aderência entre as fibras e a matriz do compósito.

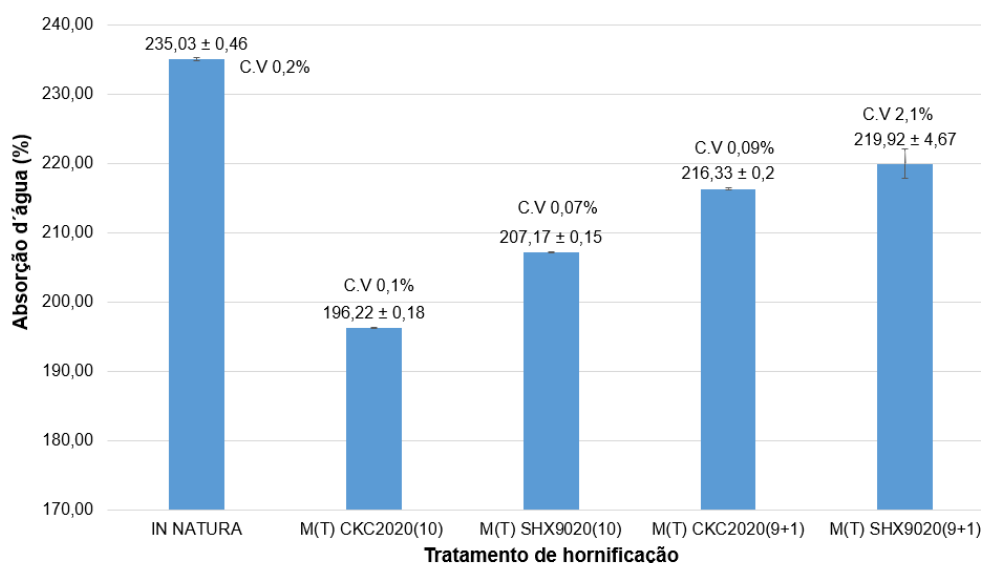
- Na escolha do produto antichama deve ser considerado que o tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$ é mais efetivo que o tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(9+1)}$, $M_{(T)}SHX9020_{(10)}$ e $M_{(T)}SHX9020_{(9+1)}$ devido a: homogeneidade da proteção da superfície das fibras, não existem modificações na microestrutura das fibras e existe um aumento da rugosidade da superfície das fibras. Portanto, o tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$ é o mais apropriado para a proteção frente ao fogo.

4.2.2 Absorção d'água

Todos os ciclos de molhagem e secagem realizados nas mantas de sisal resultaram em uma diminuição de absorção d'água das amostras. Foi possível observar, na Figura 51, que a manta de sisal sem tratamento apresentou um valor de absorção d'água de 235,03%, por causa da estrutura interna porosa e a natureza hidrofílica das fibras de sisal.

Na Figura 49, verificou-se que após 10 ciclos de tratamento, a manta de sisal hornificada com $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$ diminuiu a absorção d'água em 16,5%, seguido pelo tratamento $M_{(T)}SHX9020_{(10)}$ com uma redução de 11,8%, o tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(9+1)}$ com 7,9% e o tratamento $M_{(T)}SHX9020_{(9+1)}$ com 6,4%. Por tanto, para esta pesquisa, o tratamento de hornificação $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$ promoveu a maior modificação quanto a absorção d'água. Este comportamento é similar ao apresentado por Ferreira *et al.* (2015) que atingiu uma diminuição de 15% na absorção d'água em fibras de sisal hornificadas com água.

Figura 49. Percentual de retenção d'água médios (com desvio padrão e coeficiente de variância) para a manta de sisal com e sem tratamento.



Fonte. Autora.

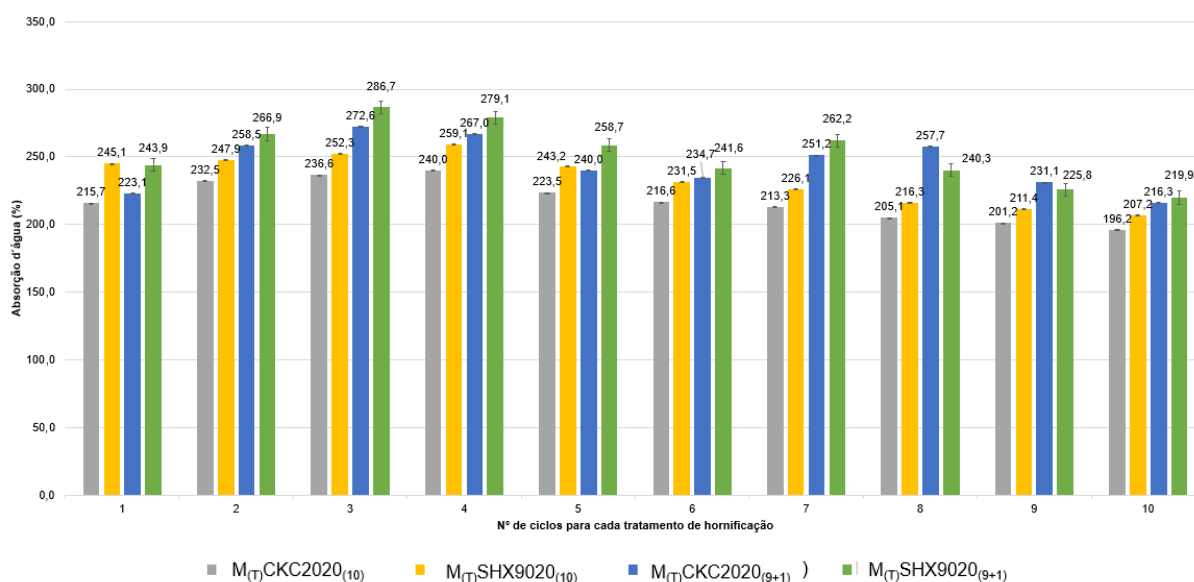
De acordo com Ferreira *et al.* (2012) e Lopes *et al.* (2010), a diminuição da absorção de água após o tratamento de hornificação das mantas de sisal, pode ser explicado pelo enrijecimento da estrutura das fibrocélulas da fibra, devido a que as cadeias de polissacáridos da celulose apresentam um novo arranjo e consequentemente um maior empacotamento.

É importante destacar que todos os tratamentos utilizados nesta pesquisa e que apresentaram menor capacidade de absorção d'água são aqueles que apresentam maiores modificações na capacidade hidrofílica das fibras de sisal, portanto, são aqueles tratamentos que terão maior aderência entre as fibras de sisal e a matriz de gesso.

A absorção d'água da manta de sisal também foi analisada após cada ciclo de molhagem e secagem durante o processo de hornificação, como indicado na Figura 50. Todos os tratamentos tiveram um aumento inicial na absorção d'água das mantas, no entanto o tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$ e $M_{(T)}SHX9020_{(10)}$ apresentaram uma

diminuição na absorção a partir do quinto ciclo de molhagem e secagem. Em relação aos tratamentos $M_{(T)CKC2020(9+1)}$ e $M_{(T)SHX9020(9+1)}$, todos apresentaram uma oscilação na absorção d'água até o oitavo ciclo de molhagem e secagem. Esta oscilação pode ser explicada pelo tratamento de hornificação com 9 ciclos de molhagem em água que contribuem com o inchamento da fibra e o aumento do peso no estado seco, a diferença do tratamento com produto antichama em que o aumento do peso é no estado úmido.

Fgura 50. Absorção d'água das amostras para cada ciclo de molhagem e secagem.



*Ver Apêndice A para observar o gráfico de forma aproximada e com dados estadísticos.

Fonte. Autora.

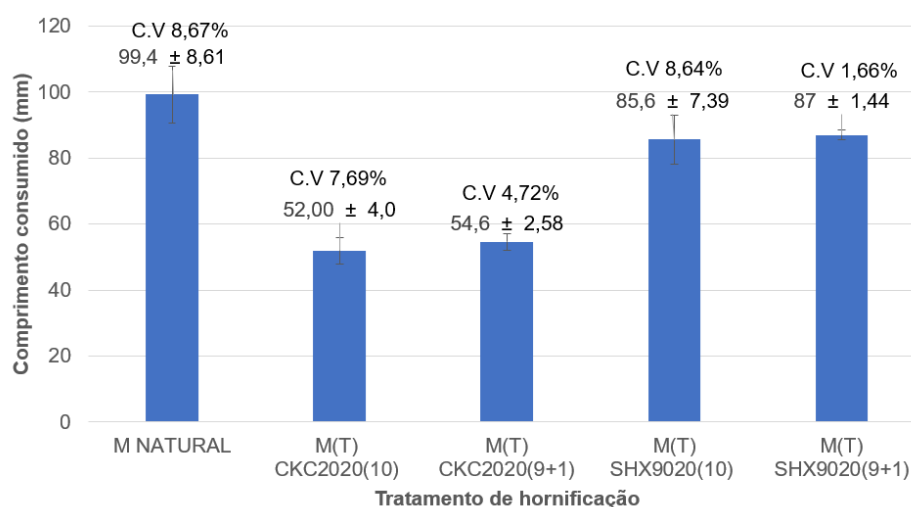
De acordo com Santos (2015), a queda nos valores de absorção d'água dos tratamentos com 9 ciclos de água e 1 ciclo com produto antichama se deve a pouca aderência entre a fibra e o produto antichama no ciclo de molhagem e secagem, o que será analisado nesta pesquisa por meio do ensaio de microscopia eletrônica de varredura.

4.3 COMPORTAMENTO FRENTE A ALTAS TEMPERATURAS DA MANTA DE SISAL

4.3.1 Teste de flamabilidade

Na Figura 51, verificou-se o comprimento de queimada da face exposta ao fogo (face exterior) das mantas de sisal com e sem tratamento. Para a manta *in natura* observou-se uma distância de queima de 99,4 mm, o que corresponde a maior distância de queima de todas as amostras. Entre as amostras com tratamento de hornificação, o tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$ diminuiu o comprimento de queima em 47,68%, o tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(9+1)}$ em 45,07%, o tratamento $M_{(T)}SHX9020_{(10)}$ em 13,88% e o tratamento $M_{(T)}SHX9020_{(9+1)}$ em 12,47%.

Figura 51. Comprimento de queima das mantas de sisal com e sem tratamento.



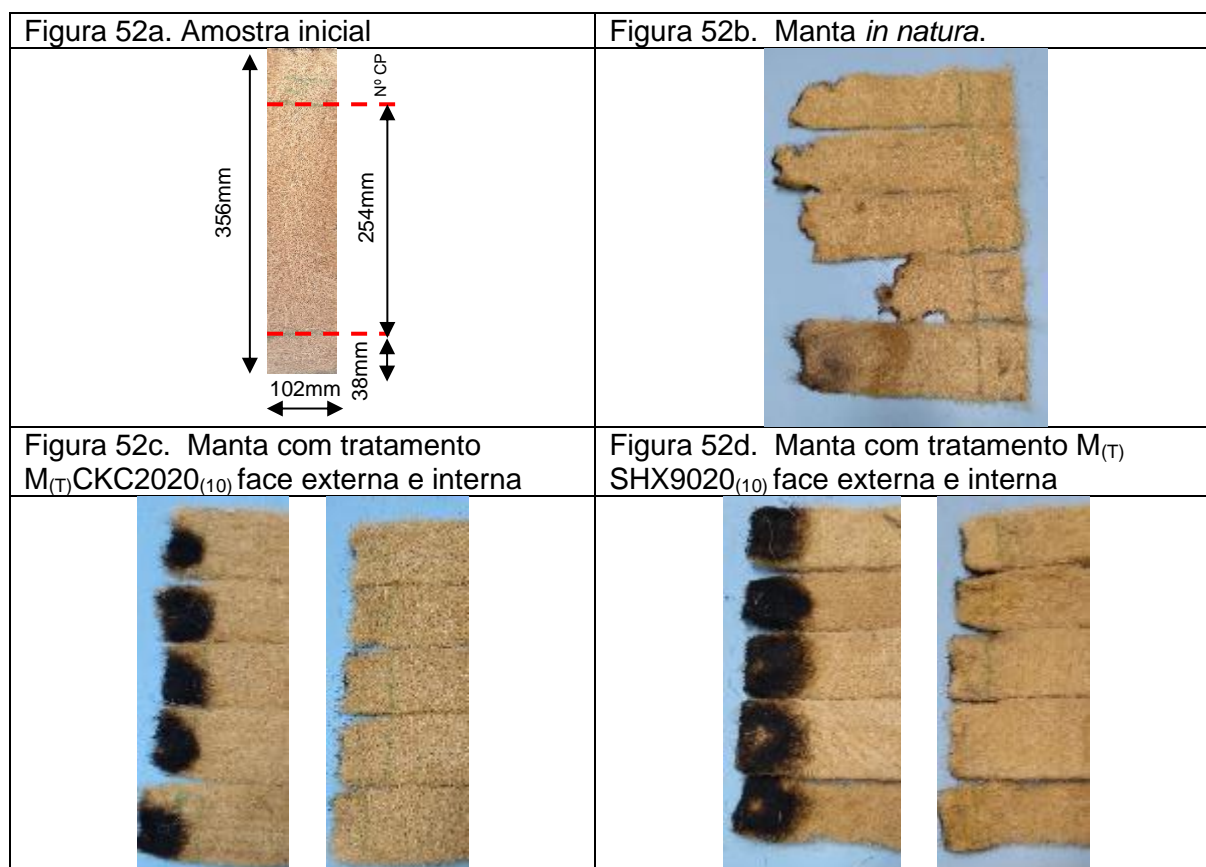
Fonte. Autora.

Em relação a queima da face não exposta ao fogo (face interna), na Figura 52b identificou-se que a manta *in natura* sofre uma queima rápida a partir de faíscas que contribuem com a queima homogênea do material na face interna e externa (comparado a Figura 52a); assim como o desprendimento de partículas em forma de lã, entretanto as mantas com tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$ e $M_{(T)}SHX9020_{(10)}$ sofrem a

queima exclusivamente na face externa ou exposta ao fogo e sem desprendimento de partículas (Figura 52c e 52d).

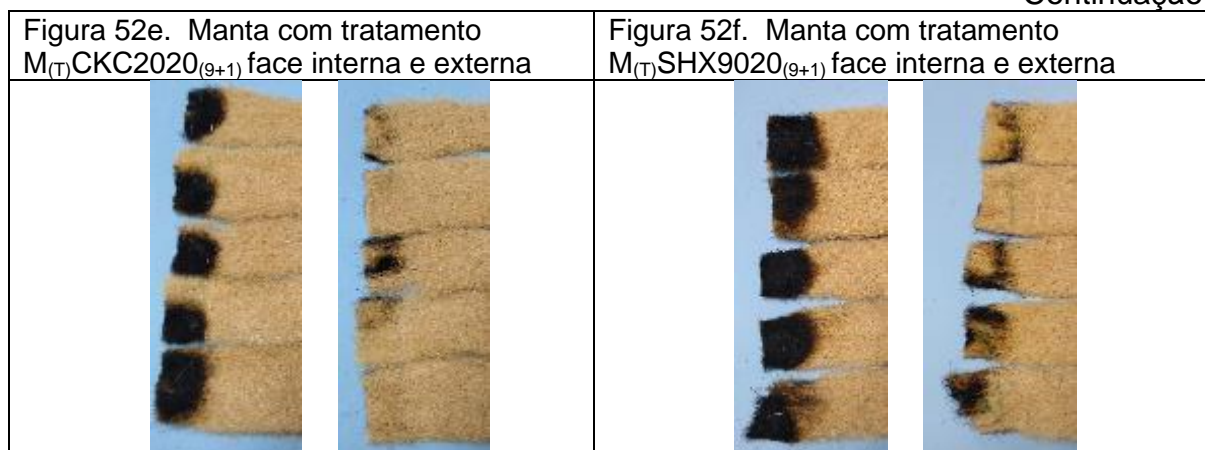
As mantas com tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(9+1)}$ e $M_{(T)}SHX9020_{(9+1)}$ foram queimadas na face externa deixando uma impressão de queima na face interna das amostras (Figura 52e e 52f), não apresentando desprendimento de partículas. Destaca-se que a impressão da queima das amostras tratadas com o produto SHX9020 foi maior que as amostras tratadas com o produto CKC2020, o que contribuiu com a escolha do produto antichama que será utilizado na produção do compósito.

Figura 52. Mantas de sisal após ensaio de flamabilidade.



Continua

Continuação



Fonte. Autora.

O ensaio de flamabilidade também permitiu analisar a velocidade de combustão das amostras. Na Tabela 17, nota-se que a velocidade de combustão (após desligamento do bico de bunsen) da manta de sisal *in natura* é de 17,9 mm/min, seguido pelas mantas com tratamento $M_{(T)CKC2020_{(9+1)}}$ e $M_{(T)SHX9020_{(9+1)}}$ com um aumento da velocidade para 1058,86 mm/min e 1946,11 mm/min, respectivamente. Quando a velocidade de combustão é zero, nos tratamentos $M_{(T)CKC2020_{(10)}}$ e $M_{(T)SHX9020_{(10)}}$, corresponde ao cese da queima das amostras após o desligamento do bico de Bunsen, não espalhando a chama pela amostra.

Em relação a fumaça gerada durante a queima das mantas de sisal, as amostras com tratamento $M_{(T)SHX9020_{(10)}}$ apresentaram uma fumaça com coloração cinza, densa e com cheiro forte, no entanto as amostras com tratamento $M_{(T)CKC2020_{(10)}}$ produziram uma fumaça com coloração branca, densa e com cheiro mais forte que as amostras com tratamento $M_{(T)SHX9020_{(10)}}$. Se bem, as amostras com tratamento $M_{(T)CKC2020_{(9+1)}}$ e $M_{(T)SHX9020_{(9+1)}}$ seguem os padrões de coloração das fumaças, foi possível observar que o cheiro da fumaça era pouco perceptível.

Tabela 17. Resultados ensaio de flamabilidade das mantas de sisal com e sem tratamento.

		Comprimento consumido (mm)	Velocidade de combustão (mm/min)	Classificação NBR 14892
<i>In natura</i>	Média	99,4	17,90	Tipo D. Autoextinção
	D.P	8,61	2,44	
	C.V (%)	8,67	12,1	
M_(T)CKC2020₍₁₀₎	Média	52	0,00	Tipo A. Não combustível
	D.P	4	0,00	
	C.V (%)	7,59	0,00	
M_(T)CKC2020₍₉₊₁₎	Média	54,6	1058,86	Tipo D. Autoextinção
	D.P	2,58	8,35	
	C.V (%)	4,72	0,79	
M_(T)SHX9020₍₁₀₎	Média	85,6	0,00	Tipo A. Não combustível
	D.P	7,39	0,00	
	C.V (%)	8,64	0,00	
M_(T)SHX9020₍₉₊₁₎	Média	87	1946,11	Tipo D. Autoextinção
	D.P	0,44	8,98	
	C.V (%)	0,51	0,34	

Fonte. Autora.

Na Tabela 17, identificou-se a classificação das mantas de sisal a partir do grau de flamabilidade para cada amostra. As mantas de sisal *in natura*, com tratamento M_(T)CKC2020₍₉₊₁₎ e M_(T)SHX9020₍₉₊₁₎ apresentaram uma classificação tipo D: autoextinção. No caso das amostras com tratamento M_(T)CKC2020₍₁₀₎ e M_(T)SHX9020₍₁₀₎ exibem uma classificação tipo A: não combustível.

4.3.2 Escolha do produto antichama

Para a escolha do produto antichama das fibras de sisal, desenvolveu-se uma matriz de decisões que permitiu comparar os resultados obtidos para o tratamento de hornificação, microscopia eletrônica de varredura, absorção d'água e flamabilidade das amostras M_(T)CKC2020₍₉₊₁₎, M_(T)SHX9020₍₉₊₁₎, M_(T)CKC2020₍₁₀₎ e M_(T)SHX9020₍₁₀₎.

A tabela 18 apresenta as amostras analisadas e os resultados mais relevantes para cada ensaio que foram pontuados para cada amostra. A escala de pontuação considerou 1 insuficiente, 2 regular, 3 bom, 4 muito bom e 5 excelente.

Tabela 18. Matriz de decisões para a escolha do produto antichama

Ensaio		CKC2020 ₍₁₀₎	SHX9020 ₍₁₀₎	CKC2020 ₍₉₊₁₎	SHX9020 ₍₉₊₁₎
Hornificação	Remoção de impurezas	3	3	4	4
	Mudança cor e textura	2	1	4	3
	Defeitos	3	1	4	2
	Mudança superficial	4	1	3	2
MEV	Rugosidade da superfície	4	3	2	1
	Homogeneidade	4	3	1	1
	Modificação microestrutura	5	4	1	1
Absorção d'água		5	4	1	2
Flamabilidade	< % Queima	5	3	4	2
	< Velocidade combustão	5	5	2	1
	Fumaça	1	1	3	3
Total		41	29	29	22
Total da matriz		55	55	55	55

Fonte. Autora.

Na Tabela 18 é possível observar que o tratamento CKC2020₍₁₀₎ apresentou uma pontuação mais alta, com excelentes resultados na conservação da microestrutura da fibra após o tratamento por hornificação, maior homogeneidade do tratamento e rugosidade superficial, e menor percentual de queima e velocidade de combustão; os quais contribuem com o desempenho frente a altas temperaturas e aderência com a matriz de gesso.

A partir desta análise, foi possível identificar que o tratamento CKC2020₍₉₊₁₎ e SHX9020₍₁₀₎ tem pontuações similares, indicando deficiências na textura, presença de defeitos e mudanças superficiais das amostras com tratamento CKC2020₍₉₊₁₎. As

amostras com tratamento SHX9020₍₁₀₎ apresentaram deficiências na homogeneidade do tratamento com produto antichama, alterações na microestrutura da fibra e aumento da absorção de água, seguido pela rápida velocidade de combustão.

O tratamento SHX9020₍₉₊₁₎ apresentou menor pontuação e maior deterioro das fibras de sisal após hornificação, com modificações na rugosidade e microestrutura da fibra, assim como um tratamento heterogêneo e a rápida combustão do material.

Esta análise permitiu determinar que o tratamento apropriado das fibras de sisal é com o produto CKC2020 e com 10 ciclos de molhagem e secagem.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DO GESSO EM PÓ

4.4.1 Caracterização física do gesso em pó

Na Tabela 19, estão dispostos os resultados obtidos dos ensaios de caracterização física do em pó.

Tabela 19. Resultados dos ensaios de caracterização física do gesso em pó.

Ensaio	Média	D.P	C.V (%)	Requisito	Norma/Método
Granulometria (%)	95,08	0,09	0,005	≥90% 0,29 mm	NBR 12127:2019 NBR 13207:2017
Massa unitária (kg/m ³)	704,82	1,03	0,5	≥600 kg/m ³	NBR 12127:2019 NBR 13207:2017
Massa específica (g/cm ³)	2,655	0,1	3,6	-	NBR 16605:2017 (Frasco Volumétrico Le Chatelier)
Área superficial (m ² /g)	2,469	0,11	4,6	m ² /g	B.E.T (Brunauer, Emmett, Teller)

Fonte. Autora.

O estudo da granulometria permitiu verificar que 95,08% dos grãos de gesso passaram pela peneira de abertura de 0,29mm, atendendo os requisitos da NBR 13207:2017 (ABNT, 2017a) com granulometria mínima para gesso de fundição de 90% passante. Esta norma indica os requerimentos para massa unitária do gesso em pó, devendo-se atingir valores iguais ou superiores a 600 kg/m³. Destaca-se que o gesso de fundição desta pesquisa apresentou uma massa unitária de 704,82 kg/m³.

A massa específica determinada para os grãos de gesso mostrou um valor de 2,655 g/cm³, em conformidade com valores apresentados na literatura, como por exemplo o de Batista (2021) com valores de 2,7 g/cm³ e Brandão (2015) com 2,3 g/cm³.

Com relação a área superficial, o gesso mostrou uma área superficial de 2,469 m²/g, valor similar aos apresentados por Brandão (2015) com 2,53 m²/g. De acordo com Ye *et al.* (2011), a área superficial representa a finura das partículas do gesso em pó determinadas pela forma dos cristais e compostos, determinando o comportamento do gesso em pó no estado fresco e principalmente na relação água/gesso.

4.4.2 Caracterização química do gesso em pó

A caracterização química do gesso em pó foi realizada por fluorescência de raios x e permitiu analisar se o gesso em pó utilizado na pesquisa era efetivamente gesso ou fosfogesso. Na Tabela 20, notou-se que o material ensaiado apresentou concentração de 54,01% de enxofre e 38,93% de cálcio, assim como pequenas quantidades de fósforo e alumina com 4,38% e 1,45%, respectivamente.

Tabela 20. Resultados do ensaio de FRX do gesso em pó.

Elemento		PPM	Média	±	%
Enxofre	S	364407	403984	54533	54,01
Cálcio	Ca	292328	291195	39256	38,93
Cloro	Cl	47362	81466	23785	
Fósforo	P	30659	32740	6363	4,38
Alumínio	Al	48412	10845	21846	1,45
Prata	Ag	2822	5030	1905	0,67
Potássio	K	0	1765	3582	0,24
Selênio	Se	492	902	246	0,12
Báro	Ba	8318	832	2495	0,11
Tântalo	Ta	0	427	857	0,06
Rubídio	Rb	314	104	228	0,01
Molibdênio	Mo	0	90	271	0,01
Zinco	Zn	0	39	116	0,01

Fonte. Autora.

De acordo com Cao *et al.* (2021); Ennaciri; Alaoui-Belghiti e Bettach (2019); Plyatsuk *et al.* (2019), o fosfogesso se caracteriza por apresentar flúor na sua composição química assim como fósforo com quantidades entre 0,7 e 1,2%. Entretanto, o gesso não contém flúor e uma quantidade de fósforo maior que 2%. A partir da análise química, o gesso utilizado na pesquisa apresentou 4,38% de fósforo e não existe a presença de flúor na composição, portanto é possível descartar que o gesso utilizado na pesquisa seja fosfogesso.

A partir da composição elementar obtida por FRX, foram analisadas as concentrações de óxidos em %, a partir da massa molar do elemento e a massa molar do oxigênio (Tabela 19). O material ensaiado apresentou uma concentração de 40,93% de óxido de cálcio e 91,10% de anidrido sulfúrico, atendendo os requisitos químicos para o gesso em pó informados na NBR 13207:2017 (ABNT, 2017a): 38% de concentração mínima para o óxido de cálcio e 53% de concentração mínima para o anidrido sulfúrico

Na Tabela 21, também foram identificadas pequenas quantidades de: 9,14% de óxido de alumínio, 7,02% de pentóxido de fósforo e 1,06% de óxido de bário, entre outros óxidos detectados em limite inferior a 1%.

Tabela 21. Resultados para as concentrações de óxidos do gesso em pó.

Concentração Óxido (%)		Concentração Elementar (ppm)	
Óxido	Valor Convertido	Elemento	Valor Lido
Al ₂ O ₃	9,14	Al	48412
P ₂ O ₅	7,02	P	30659
CaO	40,93	Ca	292328
SO ₃	91,10	S	364407
Ag ₂ O	0,37	Ag	2822
SeO	0,07	Se	492
BaO	1,06	Ba	8318
Rb ₂ O	0,05	Rb	314

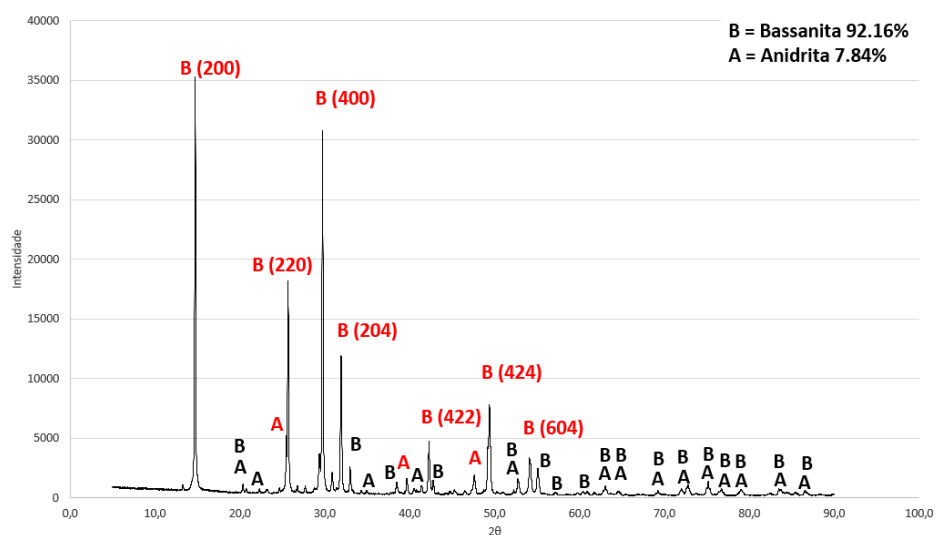
Fonte. Autora.

4.4.3 Caracterização mineralógica do gesso em pó

De acordo com o difratograma do gesso em pó utilizado na pesquisa (Figura 53), é possível observar fases cristalinas predominantes com picos bem definidos em $2\theta = 14,65^\circ; 25,20^\circ; 29,80^\circ; 31,75^\circ; 42,22^\circ; 48,9^\circ$ e $55,10^\circ$ característicos da bassanita (hemi-hidrato) e relacionado aos planos (200), (220), (400), (204), (422), (424) e (604), respectivamente. Estes valores são similares aos encontrados na literatura, especificamente em Batista (2021), Brandão (2015), Ferreira *et al.* (2017) e Barbosa; Ferraz e Santos (2014).

Também é possível observar a ausência de gipsita e a presença de picos de diferentes intensidades correspondentes a anidrita, destacándose os picos $2\theta = 25,35^\circ, 39,66^\circ$ e $47,58^\circ$. A anidrita é um subproduto da calcinação da gipsita e depende da faixa de temperatura empregada na calcinação. Estes dados também são similares aos apresentados por Barbosa; Ferraz e Santos (2014) e Pinheiro (2011).

Figura 53. Difratograma de raios X do gesso em pó.



Fonte. Autora.

A caracterização mineralógica apresentou uma convergência entre os resultados obtidos para os elementos químicos por FRX, com uma predominância de

cálcio e enxofre. Após a análise mineralógica, foi considerado que os valores de Rwp (12,40) e GOF (3,36) são adequados para o ensaio realizado.

4.5 COMPORTAMENTO DA PASTA DE GESSO NO ESTADO FRESCO

O comportamento da pasta de gesso no estado fresco foi analisado através dos ensaios de consistência normal, *minuslump* e tempo de pega. Inicialmente, foi testada a consistência normal das pastas sem aditivo com diferentes relações de água/gesso (0,5 e 0,6). Para a pasta de referência, a consistência normal apropriada foi a de relação água/gesso de 0,6.

Esta pasta de referência (a/g 0,6) permitiu investigar diferentes pastas de gesso com diferentes percentuais de aditivo superplastificante para aumentar a trabalhabilidade da pasta de referência. A Tabela 22 mostra os resultados de consistência normal encontrados para as pastas ensaiadas.

Tabela 22. Resultados do ensaio de consistência normal das pastas de gesso.

Relação a/g	Teor de aditivo (%)	Consistência (mm)		
		Média	D.P	C.V (%)
0,35	0,9	31	0,75	2,42
	1	32	1,65	5,16
0,4	0,5	26	0,65	2,50
	0,6	28	1,10	3,93
	0,7	32	0,95	2,97
	0,9	34	0,60	1,76
	0,8	35	0,95	2,71
	1	37	0,85	2,30
0,5	0	27	1,15	4,26
	0,5	37	1	2,70
0,6	0	30	0,85	2,83

Fonte. Autora.

Na Tabela 22, é possível observar que apenas as pastas de gesso com relação água/gesso 0,35 (teor de aditivo de 0,9% e 1%) e 0,4 (teor de aditivo de 0,6% e 0,7%) atingiram a consistência normal requerida pela norma NBR 12.128 (ABNT, 2019a) de 30 ± 2 mm de penetração. Este requerimento determina a fluidez apropriada para trabalhar a pasta. A partir destes resultados foi possível verificar que o aditivo

superplastificante permite desenvolver pastas com uma relação água/gesso menor, entretanto, quanto menor a relação água/gesso maior será a quantidade de aditivo superplastificante necessário para atingir a consistência normal.

Para as pastas que apresentam consistência normal adequada, de acordo com a NBR 12.128 (ABNT, 2019a), foram verificados o espalhamento (ensaio *minuslump*) e posteriormente, o tempo de pega (ensaio de Vicat). Na Tabela 23 são apresentados os resultados obtidos para estes ensaios.

Tabela 23. Resultados dos ensaios de Minislump e tempo de pega das pastas de gesso.

Relação a/g	Teor de aditivo (%)	Minislump (mm)			Início do tempo de pega (min)	Fim do tempo de pega (min)
		Média	D.P	C.V (%)		
0,35	0,9	46,67	4,11	8,81	13'12"	16'36"
	1	55,33	3,68	6,65	20'29"	25'31"
0,4	0,6	100,67	2,05	2,04	13'02"	20'10"
	0,7	137,67	7,59	5,51	39'27"	49'19"
0,6	0	38,33	1,43	3,74	6'40"	15'45"

Fonte. Autora.

Conforme a Tabela 23, a pasta de gesso padrão (sem aditivo) atingiu os requerimento da norma NBR 12.128 (ABNT, 2019a) para gesso de fundição com início de pega ≤ 10 (6 minutos e 40 segundos) e fim da pega ≤ 20 (15 minutos e 45 segundos). No entanto, apresentou uma menor trabalhabilidade do que as pastas de gesso com adição de aditivo.

As pastas de gesso com aditivo mostraram um tempo de início e fim de pega superior ao da pasta padrão, permitindo aumentar o tempo de trabalhabilidade e manipulação dos materiais durante a moldagem do compósito. Além disso, notou-se que quanto maior a quantidade de aditivo superplastificante utilizado, para a mesma relação água/gesso, maior será o tempo de início e fim de pega, assim como o espalhamento da pasta de gesso no ensaio *minuslump*; atingindo-se os resultados

mais apropriados para a pasta com relação água/gesso de 0,4 e 0,7% de teor de aditivo superplastificante. Estes resultados podem ser verificados a partir de autores como Brandão (2015), Pinheiro (2011) e Pinto (2018) que perceberam o aumento na fluidez e tempo de pega da pasta de gesso padrão com o uso de aditivo superplastificante, reduzindo a relação água/gesso.

4.6 COMPORTAMENTO DOS COMPÓSITOS FRENTE AO FOGO

Os resultados para o teste de Schlyter modificado consistem na determinação da propagação das chamas (P), o instante em que ocorreu a máxima propagação (I) e a duração das chamas após desligado o queimador (D) nas chapas compostas com e sem tratamento antichamas (produto CKC2020) e das chapas de gesso acartonado ST e RF (Figura 24).

Tabela 24. Resultados para propagação das chamas (P), o instante em que ocorreu a máxima propagação (I) e a duração das chamas após desligado o queimador (D).

Chapa	P (mm)			I (min.)			D (seg.)		
	Média	D.P	C.V (%)	Média	D.P	C.V (%)	Média	D.P	C.V (%)
$G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$	28,5	0,5	1,75	12,5	0,5	4	0	-	-
$G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$	31,5	0,5	1,59	7,75	0,25	3,23	0	-	-
$G_{(\phi)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}$ CKC2020 ₍₁₀₎	19,25	0,75	3,9	4,5	0,20	4,43	0	-	-
$G_{(\phi)}M_{(\tau)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}$ CKC2020 ₍₁₀₎	23,5	1	4,26	2,12	0,08	3,53	0	-	-
ST	29,25	0,75	2,56	1,25	0,51	8,02	3 (brasa que fica acessa)	0,14	4,58
RF	24	0,5	2,08	1,75	0,05	2,86	0 (brasa que fica acessa)	-	-

Fonte. Autora.

De acordo com a Tabela 24, as chapas com manta de sisal tratadas apresentaram uma propagação das chamas menor do que as chapas não tratadas. As chapas compósitas $G_{(\phi)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}$ CKC2020₍₁₀₎ exibiram uma propagação da chama 18,08% menor do que as chapas $G_{(\phi)}M_{(\tau)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}$ CKC2020₍₁₀₎ e 32,4% menor do que

as chapas compósitas $G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$. As chapas de gesso acartonado ST exibiram um comportamento similar aos das chapas compósitas $G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$, e com uma propagação das chamas 7,14% menor do que as chapas $G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$. As chapas de gesso acartonado RF se comportaram de forma similar as chapas compósitas $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$.

Destaca-se que para as chapas tratadas, a altura da chama se manteve constante durante o ensaio, no entanto as chapas compósitas com mantas de sisal sem tratamento apresentaram uma variação na altura da chama na medida que o gesso se queima, desfarela e permite a queima da manta *in natura*.

O instante da máxima propagação das chamas nas chapas compósitas $G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ e $G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$, acontece após a primeira fissura da chapa, já que a fissura permite a queima da manta de sisal e a propagação do fogo. Para as chapas compósitas $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ e $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$, o instante de máxima propagação é no início do ensaio, a partir da queima da matriz de gesso. Isto se deve a proteção antichama das mantas de sisal que extingue a chama quando o fogo atinge a manta de sisal. Já as chapas de gesso acartonado ST e RF apresentam a máxima propagação também no início do ensaio após 1,25 min e 1,75 min, respectivamente.

Em relação a duração das chamas após desligado o queimador, constatou-se que a chapa de gesso acartonado ST, foi a única chapa que manteve a chama acesa durante um período de 3 segundos. No que se refere ao instante de cese da incandescência, as chapas de gesso acartonado ST e RF foram as únicas chapas que mantiveram a incandescência após desligamento do bico de Bunsen, por um período de 2 minutos aproximadamente, devido a que as amostras criaram brasas que ficaram acessas.

O ensaio também permitiu avaliar a carbonização e o fissuramento das chapas. Na Tabela 25 são apresentados os valores obtidos para a altura da área carbonizada (h), sendo a média das medidas registradas para as duas amostras de cada tipologia de chapa analisada, o tempo em que se inicia a propagação das fissuras (t_1) e o tempo em que se atinge a multifissuração das chapas (t_2).

Tabela 25. Resultados para a altura da área carbonizada, os tempos de início da propagação das fissuras (t_1) e o tempo em que se atinge a multifissuração das chapas (t_2).

Chapa	h (cm)			t ₁ (min.)			t ₂ (min.)		
	Média	D.P	C.V (%)	Média	D.P	C.V (%)	Média	D.P	C.V (%)
G _(φ) M _(φ) G _(φ)	25,25	0,75	2,97	12,5	0,7	5,6	37,75	0,75	1,99
G _(φ) M _(φ) M _(φ) G _(φ)	30,25	0,4	1,32	7,75	0,25	3,23	29,5	0,5	1,69
G _(φ) M _(T) G _(φ) CKC2020 ₍₁₀₎	18,75	0,7	3,80	28,25	0,75	2,65	44,5	1,7	3,80
G _(φ) M _(T) M _(T) G _(φ) CKC2020 ₍₁₀₎	23,5	0,5	2,13	12,25	0,75	6,12	49,75	0,25	0,5
ST	28,25	0,75	2,65	4,5	0,3	6,67	14,75	0,35	2,37
RF	23,75	0,55	2,32	5	0,2	4,0	23,75	1,25	5,26

Fonte. Autora.

Conforme a Tabela 25, as chapas compósitas G_(φ)M_(T)G_(φ)CKC2020₍₁₀₎ foram as que apresentaram menores alturas da área carbonizada, seguida pelas chapas de gesso acartonado RF e as chapas compósitas G_(φ)M_(T)M_(T)G_(φ)CKC2020₍₁₀₎, com um aumento de 25,33% e 26,6% respectivamente. De acordo com Hohenwarter *et al.* (2020) e Lamb e Ali (2003), o comportamento se justifica pela menor aceleração da taxa de liberação de calor dos materiais que compõem a chapa e que consequentemente contribuíram com o aumento do tempo em que se inicia a propagação das fissuras e se atinge a multifissuração das chapas.

As chapas compósitas G_(φ)M_(φ)G_(φ), apresentou um comportamento similar a chapa de gesso acartonado ST e RF, situando-se como uma solução construtiva intermediária, em relação à altura da área carbonizada e aumentando o tempo da

primeira fissura e da multifissuração de 150% e 58,9%, respectivamente; em relação a chapa de gesso acartonado RF.

Em relação a chapa de gesso acartonado RF, as chapas compósitas $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ indicaram uma diminuição na altura da área carbonizada de 21,07%, um aumento em 5,6 vezes o tempo em que se inicia o fissuramento das amostras e aumentando em um 87,36% o tempo em que se atinge a multifissuração.

As chapas de gesso acartonado ST e RF exibiram a primeira fissura rapidamente, no entanto, a chapa ST atinge a multifissuração mais rápido que a chapa RF devido a formação de brasas na superfície da chapa que contribuem com a ignição e a área carbonizada.

Na sequência foi analisada a temperatura da face interna e externa das amostras, assim como o tempo em que se inicia o esfarelamento das chapas (Tabela 26). As chapas compósitas $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ e $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ diminuíram em 40,4% e 45%, respectivamente, a temperatura da face interna das; em relação as chapas de gesso acartonado RF. Para as temperaturas externas a chapa compósita, as chapas $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ e $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ diminuíram em 40,3% e 44,8%, respectivamente.

Tabela 26. Resultados para a temperatura da face interna (T_i), face externa (T_e) e o tempo em que se inicia o esfarelamento das chapas (t).

Chapa	T_i (°C)			T_e (°C)			t (min.)		
	Média	D.P	C.V (%)	Média	D.P	C.V (%)	Média	D.P	C.V (%)
$G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$	89,6	0,42	0,47	93,1	0,40	0,43	37,5	0,4	1,07
$G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$	86,9	0,90	1,04	101,7	0,90	0,88	25	0,55	2,2
$G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}$ $CKC2020_{(10)}$	54,75	0,25	0,46	56,95	0,25	0,44	48,5	0,98	2,01
$G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}$ $CKC2020_{(10)}$	50,6	0,61	1,21	52,60	0,61	1,16	34	0,83	2,42
ST	100	0,53	0,53	104,00	0,53	0,51	16	0,50	3,13
RF	92	0,18	0,20	95,4	0,21	0,21	33,5	1,10	3,28

Fonte. Autora.

Destaca-se que as chapas compósitas $G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ e $G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ apresentam temperaturas da face interna e externa menores que as chapas de gesso acartonado ST e RF, no entanto a chapa $G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ exibiu um tempo de início do esfarelamento menor que as chapas do mercado.

As chapas compósitas que contém duas camadas de manta de sisal ($G_{(\phi)}M_{(\tau)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}$ CKC2020₍₁₀₎ e $G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$) indicaram um tempo menor em que se inicia o esfarelamento das chapas, em relação as chapas com uma camada de manta de sisal, devido a espessura da camada de gesso das amostras.

As chapas compósitas $G_{(\phi)}M_{(\tau)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}$ CKC2020₍₁₀₎, exibiram as menores temperaturas das faces interna e externa de todas as amostras ensaiadas. Isto pode ser explicado pela baixa transferência de calor das mantas de sisal, atuando como um isolante no interior da chapa. No entanto, a chapa $G_{(\phi)}M_{(\tau)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}$ CKC2020₍₁₀₎ inicia o esfarelamento da amostra com 34 minutos, de forma similar a chapa de gesso acartonado RF.

As chapas de gesso acartonado ST são as que apresentam o menor desempenho, devido a auto combustão pelas brasas do cartão que compõem a chapa, atingindo temperaturas similares tanto na face interna e externa da chapa, contribuindo com o rápido esfarelamento das amostras.

As chapas compósitas $G_{(\phi)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}$ CKC2020₍₁₀₎, foram as que apresentaram o melhor comportamento térmico das amostras, com pequenas variações nas temperaturas da face interna e externa das amostras e o maior tempo para o início do esfarelamento do material.

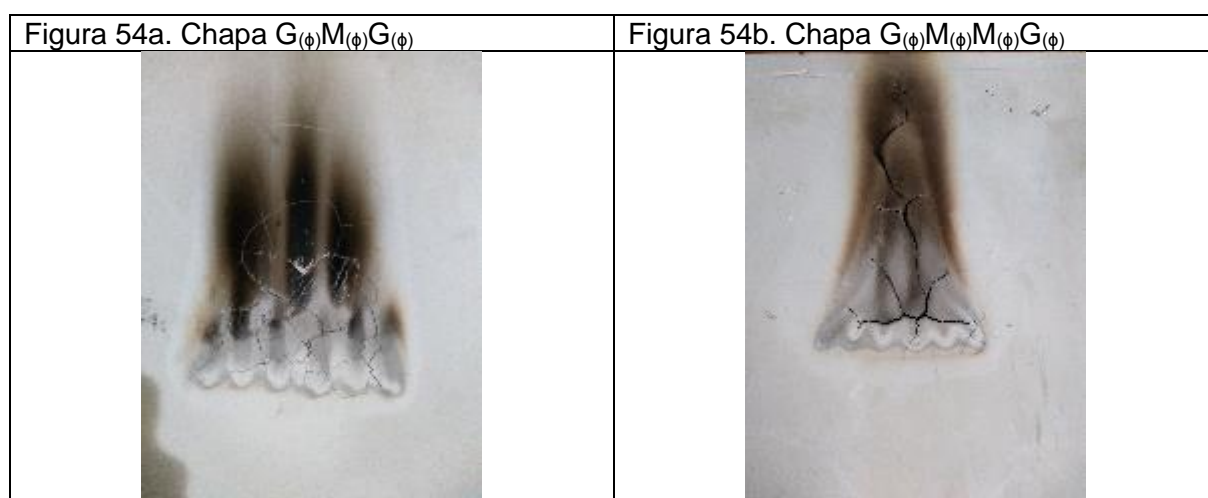
Após a realização do teste de Schlyter modificado, foi possível observar a região carbonizada, surgimento de fissuras e o aspecto da fumaça gerada durante a queima das chapas de gesso acartonado ST, RF e dos compósitos.

Na Figura 54 apresenta-se o aspecto final das chapas reforçadas com manta de sisal sem tratamento depois de realizado o ensaio de Schlyter Modificado. A região escura indica a parte carbonizada do gesso e a região branca indica o local em que surgiram as fissuras após a situação de incêndio.

A área em destaque nas Figuras 54a e 54b para as chapas compósitas $G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ e $G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ indicaram o início de carbonatação das amostras com o surgimento de diversas fissuras que atuaram como sendeiros para a propagação da chama através da queima da manta de sisal exposta após o comportamento frágil do gesso. Na Figura 56b observa-se que as fissuras para a chapa $G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ são extensas e com maior profundidade do que nas chapas $G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$, já que durante o ensaio o fogo se apodera da placa.

Durante o ensaio as chapas $G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ e $G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ denotam uma área de carbonização na cor marrom claro na face da chapa na exposta ao fogo, não deixando sinais de manchas na face da chapa não exposta ao fogo.

Figura 54. Chapas reforçadas com manta de sisal sem tratamento depois de serem expostas a chamas no teste de Schlyter modificado.

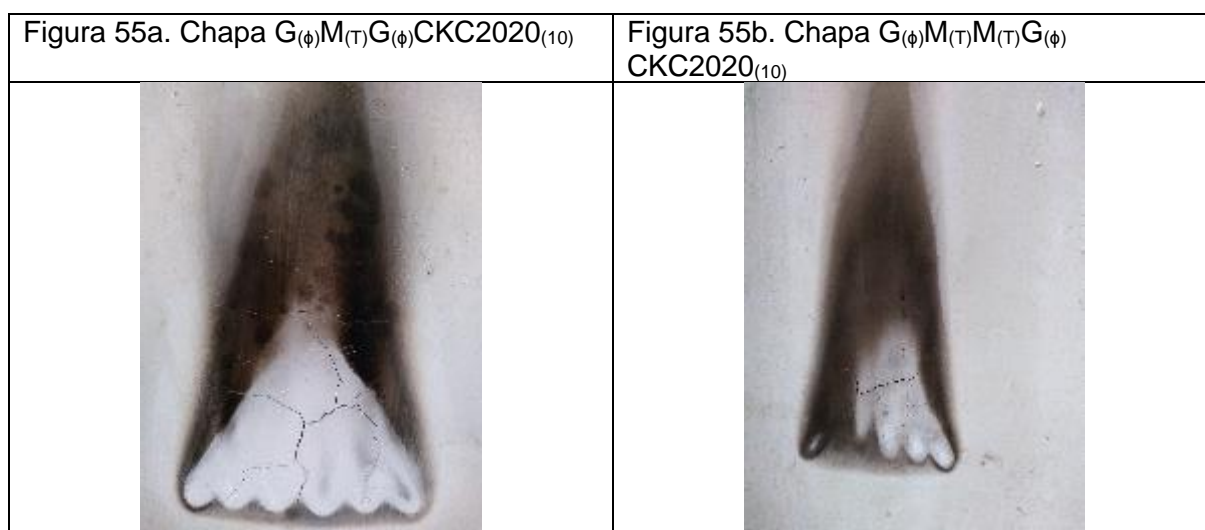


Fonte. Autora.

As Figuras 55a e 55b para as chapas $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ e $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ apresentaram menor quantidade de fissuras do que as

chapas reforçadas com manta de sisal sem tratamento, visto que a manta de sisal exposta após fissuramento da chapa não contribui com a propagação das chamas e a carbonização do compósito. Quando as chapas $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ e $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ são submetidas a altas temperaturas, criam uma mancha marrom clara na face da chapa não exposta ao fogo, uma mancha marrom escura na face da chapa exposta ao fogo e emitem um cheiro forte que se torna intolerável após 27 minutos de realizado o ensaio, o que não foi observado nas chapas compósitas $G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ e $G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$.

Figura 55. Chapas reforçadas com manta de sisal tratadas com produto antichama depois de serem expostas a chamas no teste de Schylter modificado.



Fonte. Autora.

As Figuras 56a e 56b para as chapas de gesso acartonado ST e RF, exibem uma área de carbonização em volta de uma região branca que surge pela queima do cartão que conforma a chapa de gesso. A queima deste cartão nas chapas contribui com o desprendimento de brasas que nas chapas ST se desprende da chapa e contribui com a propagação do fogo. Nas chapas RF, parte das brasas ficam aderidas a chapa não contribuindo com a propagação do fogo.

Destaca-se que as chapas de gesso acartonado ST e RF apontaram uma multifissuração rápida, um cheiro forte de papel queimado e uma fumaça branca durante o ensaio. Ambas chapas retratam carbonização marrom na face da chapa não exposta ao fogo e preta na face exposta ao fogo.

Figura 56. Chapas de gesso acartonado depois de serem expostas a chamas no teste de Schylter modificado.



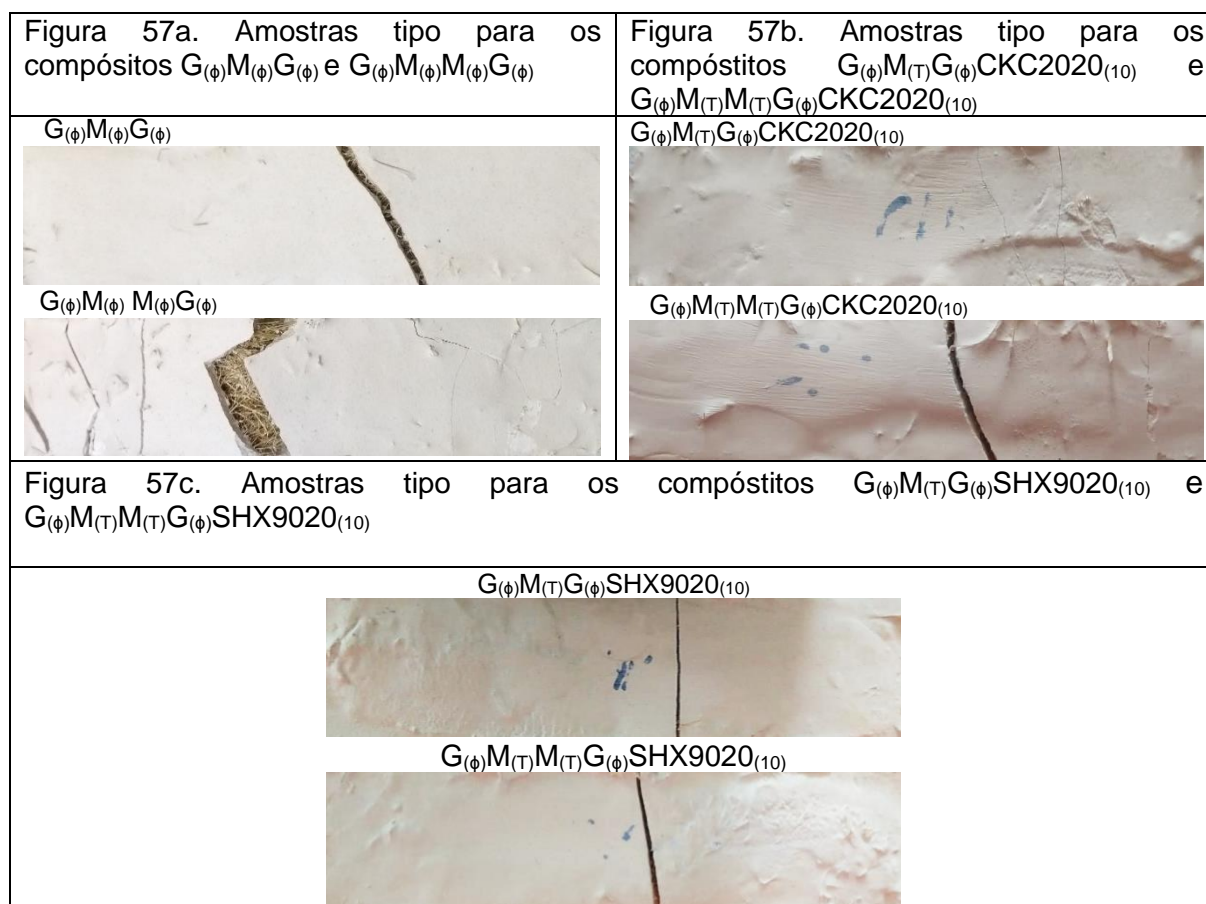
Fonte. Autora.

4.7 ADERÊNCIA DOS COMPÓSITOS

4.7.1 Flexão em 4 pontos

A partir dos resultados obtidos pela análise do tratamento antichama das fibras de sisal pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura e de absorção de água das fibras de sisal com e sem tratamento (SHX9020 e CKC2020), que indicaram modificações físicas e morfológicas na fibra e que interferem na aderência com a matriz, foi necessário identificar a influência dos tratamentos antichamas mais eficientes, de acordo com o ensaio de flamabilidade, na resistência mecânica do compósito de gesso com fibras de sisal (Figura 57. As figuras exemplificam o comportamento dos corpos de prova durante o ensaio de flexão em 4 pontos).

Figura 57. Resultados das amostras durante o ensaio a flexão em 4 pontos



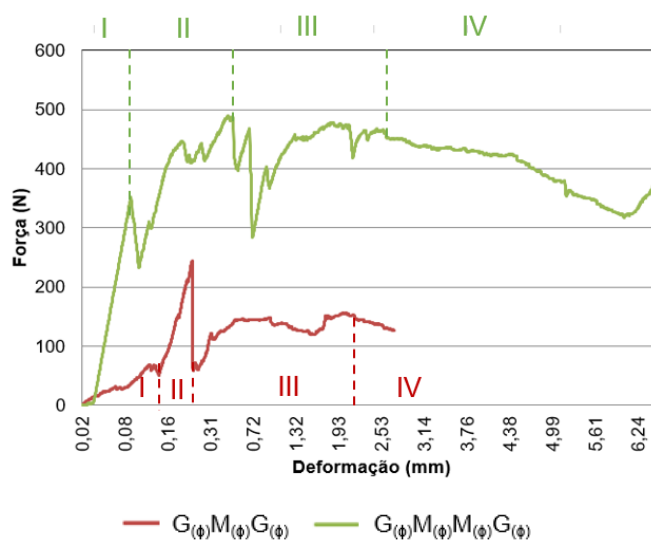
Fonte. Autor

A Figura 58 apresenta o comportamento da curva força versus deslocamento para o compósito de gesso reforçado com uma e duas camadas de manta de sisal *in natura* (média das 6 amostras analisadas no ensaio de flexão), na qual é possível observar quatro fases que determinam o comportamento da chapa de compósito durante o ensaio, como analisado por Alves Fidelis *et al.* (2013), Arruda Filho (2015), Brandão (2015), Filho; Silva e Toledo Filho (2013) e Pinto (2018).

Na curva força versus deslocamento para o compósito $G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ (Figura 60), a primeira fase está determinada pelo trabalho no regime elástico do material até o aparecimento das primeiras fissuras na amostra; na segunda fase a matriz atinge a força máxima, surgindo a fissura que representa o comportamento frágil da matriz e contribuindo com a queda na carga tolerada. Na terceira fase surgem pequenas

quantidades de novas fissuras e o aumento da espessura das fissuras existentes que não impedem a aplicação de carga no compósito devido a aderência entre a matriz e o reforço. Na quarta fase foi atingida a ruptura da amostra e a perda de resistência.

Figura 58. Curva força versus deslocamento para o compósito de gesso reforçado com uma e duas camadas de manta de sisal *in natura*.



Fonte. Autora.

Para o compósito $G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ (Figura 60), a matriz atinge a força máxima na primeira fase de análise, aparecendo uma primeira fissura que representa o comportamento frágil da camada de gesso para posteriormente, na segunda fase, surgir o comportamento elástico do compósito com aparecimento de diversas fissuras até atingir a força máxima. Na terceira fase surge uma segunda fissura indicando novamente o comportamento frágil da segunda camada de gesso do compósito e o aumento de pequenas novas fissuras; enquanto, na quarta fase observou-se a queda na carga tolerada pela amostra.

Na sequência foram analisados os compósitos $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}$ com tratamento em produtos antichamas CKC2020 e SHX9020 (Figura 59). A curva força versus deslocamento apresenta os resultados da média das seis amostras para o compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ e $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}SHX9020_{(10)}$, os quais também apresentam 4

fases que determinam o comportamento das chapas. Na primeira fase, os compósitos também trabalham no regime elástico, da mesma forma que o compósito com manta de sisal *in natura*. Entretanto, com aumento da força aplicada, não surgem novas fissuras visíveis devido a maior aderência entre a fibra de sisal tratada e a matriz, a diferença da manta de sisal *in natura*. Nesta fase é possível visualizar que os compósitos $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}SHX9020_{(10)}$ atingem uma força máxima de ruptura maior que o compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ para a primeira fissura, indicando novamente o comportamento frágil da matriz e contribuindo com a queda na carga tolerada, sendo 56% maior a perda de carga em referência ao compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$.

Na segunda fase, após o comportamento frágil da matriz, o reforço em fibra de sisal tratada com produto antichama recebe as cargas representadas pelo aumento na força incidente na amostra, evitando a propagação das fissuras e aumentando parcialmente sua resistência. Portanto, a aderência entre os materiais constituintes do compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}SHX9020_{(10)}$ é menor que a do compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$.

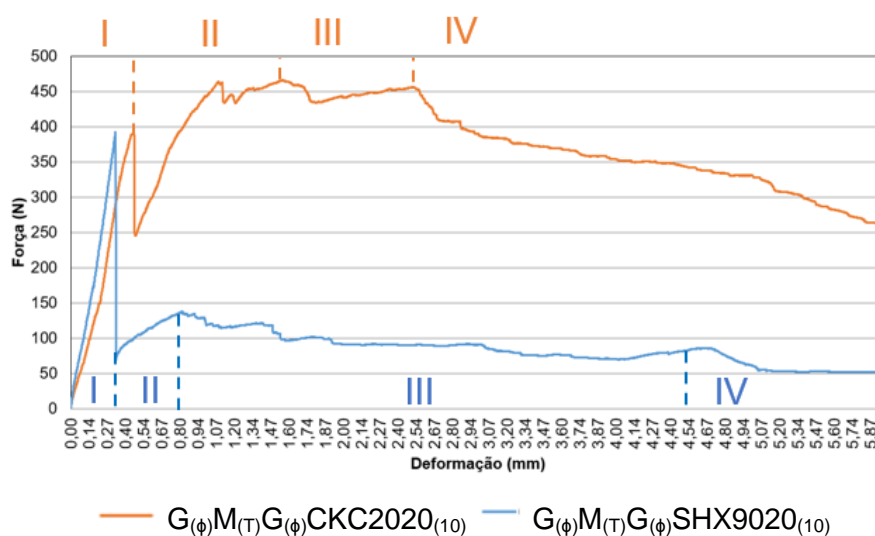
Nesta fase também são constatados diferentes pontos de fragilidade da matriz com a presença de novas fissuras e pequenas quedas da força, contribuindo com o processo de multifissuração e perda de rigidez progressiva das amostras.

Na terceira fase, no compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$, surgem pequenas quantidades de novas fissuras e o aumento da espessura das fissuras existentes, até que o compósito atinge a força máxima, aumentando sua resistência. Entretanto, no compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}SHX9020_{(10)}$ foi visualizado um novo ponto de fragilidade da matriz com a presença de uma nova fissura que representa a ruptura do compósito como consequência de uma carga aplicada 70% menor que a do compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$, indicando uma menor aderência entre os materiais que

compõem o compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}SHX9020_{(10)}$. Nesta etapa também é possível identificar que a nova fissura contribuiu com o processo de multifissuração e perda de rigidez progressiva do compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}SHX9020_{(10)}$.

E finalmente, na quarta fase, o aumento da espessura das fissuras e progressivo, até a ruptura dos compósitos e a perda da resistência dos mesmos.

Figura 59. Curva força versus deslocamento para os compósitos $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ e $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}SHX9020_{(10)}$.



Fonte. Autora.

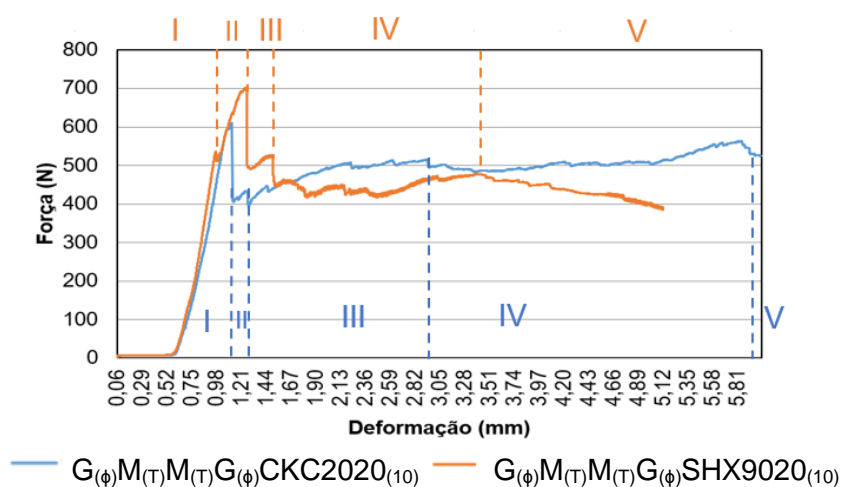
Posteriormente foram analisados os compósitos $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}$ com tratamento em produtos antichamas CKC2020 e SHX9020, que apresentaram 5 fases para o comportamento da curva força versus deslocamento.

Na Figura 60 observa-se na primeira fase para o compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$, da mesma forma que o compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$, um comportamento no regime elástico sem surgimento de novas fissuras entre a matriz e o reforço, entretanto, quando foi atingida a força máxima e surge a primeira fissura da matriz, as amostras exibem em média uma queda na carga tolerada 37,5% menor que a do compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$. Na segunda fase, o compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ exibe uma segunda fissura com um pequeno aumento da deformação,

indicando um novo ponto de fragilidade da matriz de gesso e a propagação das fissuras com distancias de deformação menores quando a força incidente aumenta.

Na terceira fase surgem pequenas quantidades de novas fissuras e o aumento da espessura das mesmas, contribuindo com a ruptura parcial do compósito com deformações 50% menores do que as do compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$. Posteriormente se inicia a quarta fase do compósito e que corresponde novamente a capacidade de absorver a força incidente atingindo deformações 16,6% maiores, comparado com o compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$. Na quinta fase notou-se a ruptura do compósito.

Figura 60. Curva força versus deslocamento para os compósitos $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ e $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}SHX9020_{(10)}$.



Fonte. Autora.

Para o compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}SHX9020_{(10)}$, a primeira fase também representa o comportamento elástico do material com o surgimento de uma primeira fissura e uma queda na força máxima tolerada de 57% comparado com o compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}SHX9020_{(10)}$. Na segunda e terceira fase, o compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}SHX9020_{(10)}$ apresenta uma segunda e terceira fissura rapidamente

(com intervalos de deformação pequenos), indicando novos pontos de fragilidade da matriz de gesso devido a menor espessura de camada de gesso do compósito.

Na quarta fase surgem pequenas quantidade de novas fissuras e o aumento da espessura das mesmas, deteriorando as amostras de forma progressiva até o início da quinta fase do compósito, na qual as amostras apresentam a ruptura total.

A Figura 60 indica que o compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}SHX9020_{(10)}$ atinge valores de força máxima 14,4% maiores do que o compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$, no entanto o comportamento pós fissuramento permite a absorção de forças inferiores a do $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$, e com deformações que são 13,9% menores.

Na Tabela 27 constam os resultados médios e desvios padrões da tensão de ruptura, modulo de ruptura para a força máxima e o modulo de elasticidade para a chapa de gesso e os compósitos.

Tabela 27. Resultados do ensaio de flexão em 4 pontos nas chapas compósitas.

Amostra	Força de ruptura (N)			Deslocamento de ruptura (mm)			MOR (Mpa)			MOE (Mpa)
	Média	D.P	C.V (%)	Média	D.P	C.V (%)	Média	D.P	C.V (%)	Média
Gesso	356,12	3,6	1,0	0,24	0,01	5,48	5,52	0,06	1,04	3393,15
$G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$	247,67	6,1	2,4	0,29	0,03	13,02	3,98	0,09	2,46	1886,47
$G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}$ $CKC2020_{(10)}$	355,81	9,2	2,6	0,54	0,06	11,1	10,07	0,9	8,9	4418,99
$G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}$ $SHX9020_{(10)}$	403,31	6,8	1,7	0,57	0,06	10,9	12,35	0,18	1,4	3713,9
$G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$	320,09	3,9	1,2	0,23	0,03	16,18	2,16	0,02	1,06	665,04
$G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}$ $CKC2020_{(10)}$	605,51	7,2	1,18	1,1	0,04	3,63	9,08	0,15	1,65	1251,02
$G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}$ $SHX9020_{(10)}$	525,72	5,1	0,97	0,92	0,05	5,43	10,60	0,16	1,50	1217,16

Fonte. Autora.

A partir dos dados da Tabela 27, demonstra-se que todos compósitos reforçados com mantas de sisal tratadas com produto antichama exibem um modulo de ruptura

superior a chapa de gesso sem reforço e um módulo de elasticidade inferior quando o compósito está composto por duas camadas de manta de sisal hornificadas. No entanto, os compósitos reforçados com mantas de sisal sem tratamento apresentam um módulo de ruptura e de elasticidade inferior comparado a chapa de gesso. Isto indica uma contribuição significativa do reforço após tratamento de hornificação no desempenho do compósito, tornando-se um material com maior resistência.

Em relação aos compósitos $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}$, as amostras com tratamento de hornificação SHX9020 aumentam em 23,33% o módulo de ruptura e diminui em 15,95% o módulo de elasticidade das amostras com tratamento CKC2020. Para os compósitos $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}$, o tratamento com produto antichama SHX9020 contribui com o aumento em 16,74% do módulo de ruptura e diminui em 2,70% o módulo de elasticidade, comparado com o tratamento com CKC2020, o que pode ser explicado pelas modificações na morfologia da manta de sisal após a hornificação e as irregularidades do tratamento indicadas na microscopia eletrônica de varredura que modificam a resistência das mantas de sisal.

Os resultados também indicam que houve uma redução da força de ruptura nos compósitos $G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ e $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$, comparado com a chapa de gesso, o que pode ser explicado pela transferência irregular dos esforços nos compósitos devido aos diferentes materiais que compõe a amostra. Para as amostras $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}SHX9020_{(10)}$, $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ e $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}SHX9020_{(10)}$; existe um aumento na força de ruptura de 13,25%, 70,02% e 47,6%, respectivamente. Destaca-se que a camada de gesso, contribui como uma barreira à força aplicada nas amostras para posteriormente distribuí-la pelas camadas de manta de sisal, que absorvem a força e distribuem lentamente pelas fibras. Portanto, a camada de reforço

pode ser considerada a camada que mais influencia no desempenho mecânico do compósito.

O ensaio mostrou que para a força de ruptura e para o deslocamento na força de ruptura, a chapa de compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ apresentou melhor desempenho em comparação as demais chapas devido a influência da espessura das camadas de manta de sisal no compósito e o produto antichama utilizado no processo de hornificação que mantem as propriedades físicas e morfológicas da manta de sisal, contribuindo com a distribuição da força.

Ao analisar o modulo de ruptura constatou-se que o compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}CKC2020_{(10)}$ demonstra um desempenho superior devido ao teor de fibra e a espessura das camadas de gesso na composição da amostra que colabora com a transferência de esforços pelas camadas, o que não acontece nos compósitos com duas camadas de manta de sisal devido a composição de duas camadas finas de gesso e duas camadas de reforço com alta capacidade de absorção de água (hidrofília das fibras de sisal) que contribuem com uma baixa aderência entre as mesmas.

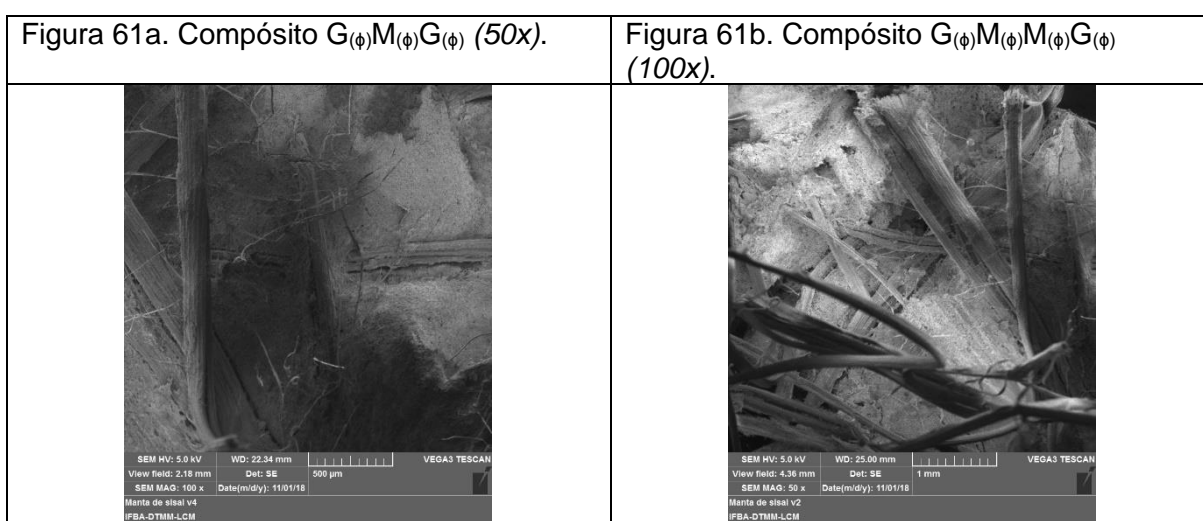
Em relação ao deslocamento das amostras, os compósitos apontam um maior deslocamento nos compósitos com duas camadas de manta de sisal, devido a maior capacidade do material de absorver energia e criar fissuras que contribuem com a transferência da força aplicada.

4.7.2 Microscopia eletrônica de varredura.

Na Figura 61, estão apresentadas as imagens por microscopia eletrônica de varredura do compósito de gesso reforçado com manta de sisal *in natura*. As amostras da Figura 61a e 61b exibem uma distribuição heterogênea manta de sisal na matriz do compósito com aglomerações de fibras e contribuindo com a formação de vazios intersticiais.

A figura 61b retrata a superfície das fibras de sisal *in natura*, com a presença de ceras, impurezas e sinais de abrasão que contribuem a absorção de água das fibras durante o desenvolvimento do compósito, dificultando a aderência entre fibra-matriz e a formação de vazios na interface. Resultados similares foram obtidos por Alvarenga *et al.* (2022); Pinto (2018).

Figura 61. Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos de gesso reforçados com manta de sisal sem tratamento antichama.

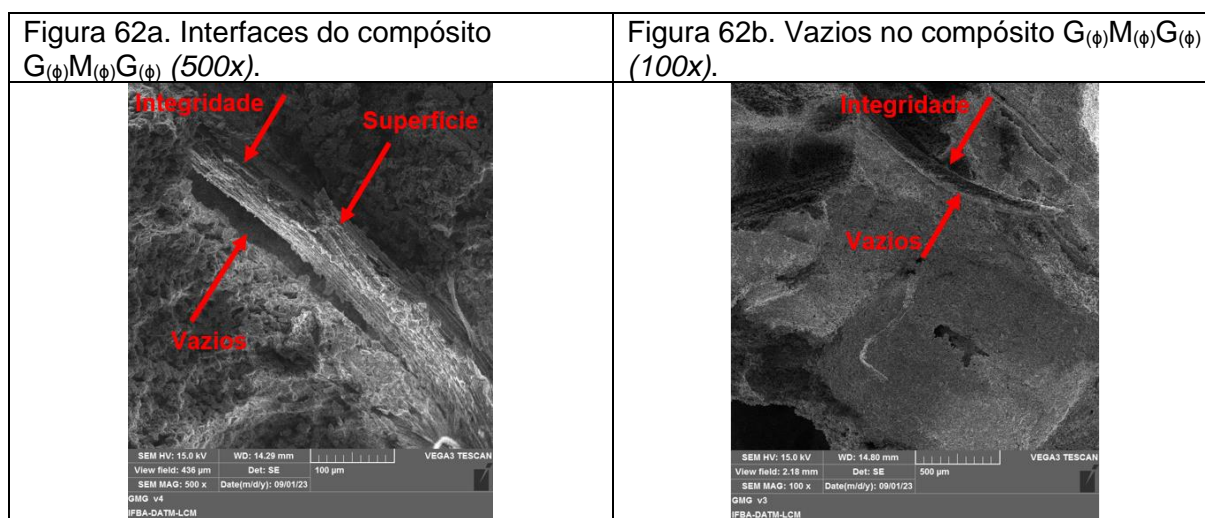


Fonte. Autora.

Na Figura 62, estão apresentadas as imagens por microscopia eletrônica de varredura do compósito $G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ após *ensaio de teste Schlyter*. A amostra da Figura 64a indica as interfaces do compósito quando as fibras não foram consumidas pelo fogo. Destaca-se a integridade da manta de sisal na matriz de gesso decorrente da fraca interação da fibra com a matriz, também observado por Ferrais (2017).

Quando as fibras de sisal são consumidas pelo fogo, a matriz de gesso apresenta uma impressão da superfície estriada da manta de sisal surgindo vazios na matriz correspondente ao local em que se encontrava a fibra prévio a queima (Figura 64b).

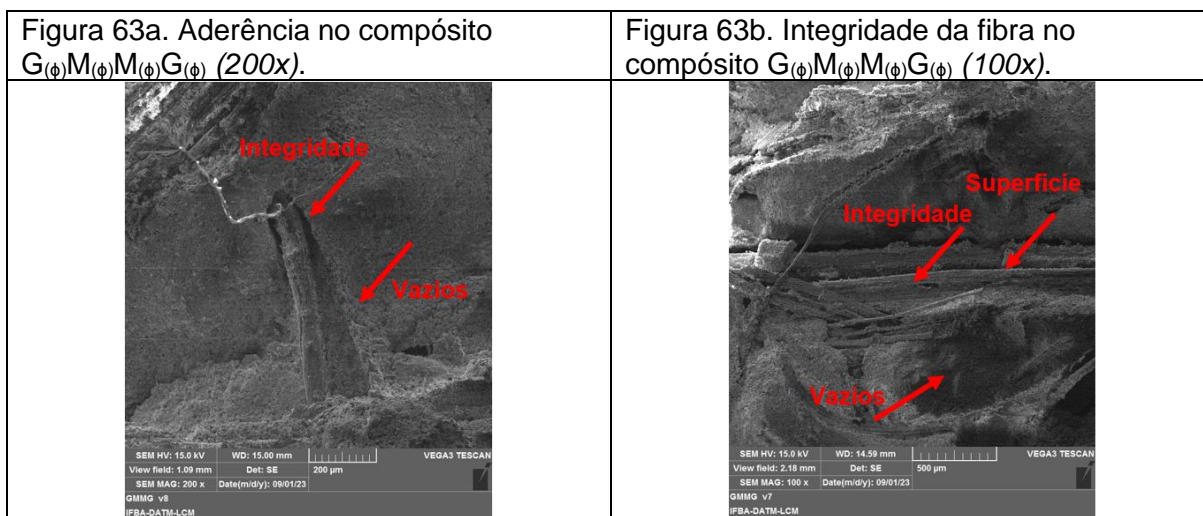
Figura 62. Microscopia eletrônica de varredura do compósito $G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ após *ensaio de teste Schlyter*.



Fonte. Autora.

As imagens por microscopia eletrônica de varredura do compósito $G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ após *ensaio de teste Schlyter*, apresentaram um comportamento similar as imagens do compósito $G_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$, no entanto, a Figura 63a e 63b permitem observar que a interação entre fibra com a matriz é mais fraca, devido a maior quantidade de fibra e menor quantidade de gesso na produção do compósito. Portanto, existe uma maior quantidade de vazios gerados pela queima da manta de sisal após o teste de Schlyter (Figura 63b) e conseqüentemente uma menor aderência fibra-matriz.

Figura 63. Microscopia eletrônica de varredura do compósito $G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ após ensaio de teste Schlyter.



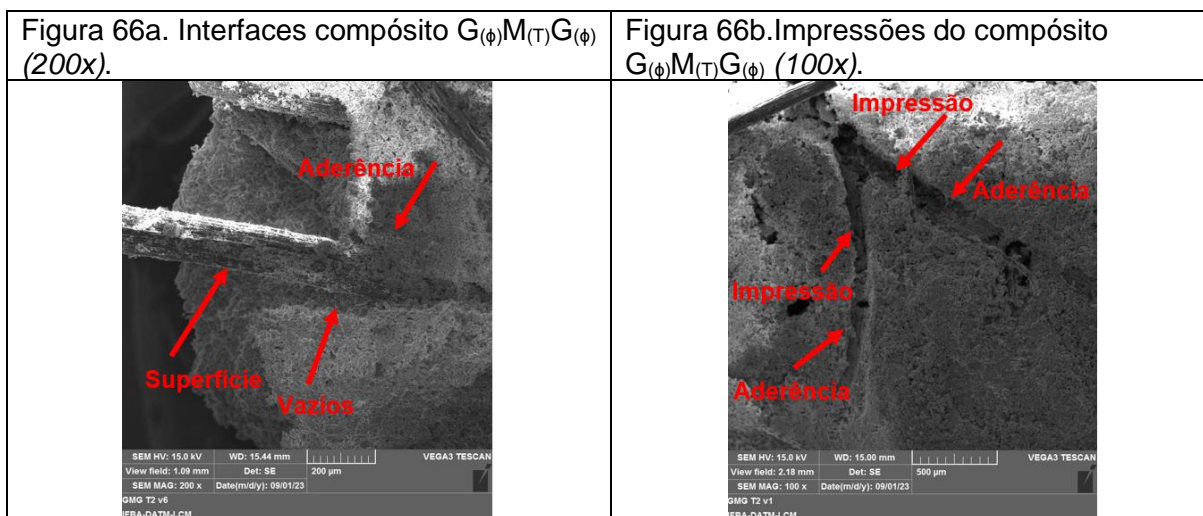
Fonte. Autora.

Na Figura 63a e 63b também indicam os locais com maior integridade da fibra de sisal, destacados pelas impurezas e ceras ao longo da superfície da fibra, que foram previamente observadas durante o ensaio MEV para as fibras de sisal *in natura*.

Na Figura 64, estão apresentadas as imagens por microscopia eletrônica de varredura do compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}$ após ensaio de teste Schlyter. As amostras da Figura 64a e 64b apresentam as modificações promovidas na estrutura da fibra de sisal devido ao tratamento de hornificação que resultaram na melhor adesão entre a matriz e o reforço.

A Figura 64a apresenta a superfície da fibra de sisal, caracterizada pela quantidade de produto antichama aderida à superfície da fibra, contribuindo com maior aderência das interfaces. Entretanto, na Figura 64b observa-se as impressões deixadas pela fibra de sisal hornificada na matriz de gesso após a queima, indicando a ausência de grandes vazios na região interfacial decorrente da secagem das fibras, também observado por Ferreira (2012) e Toledo Filho (1997).

Figura 64. Microscopia eletrônica de varredura do compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}G_{(\phi)}$ após ensaio de teste Schlyter.

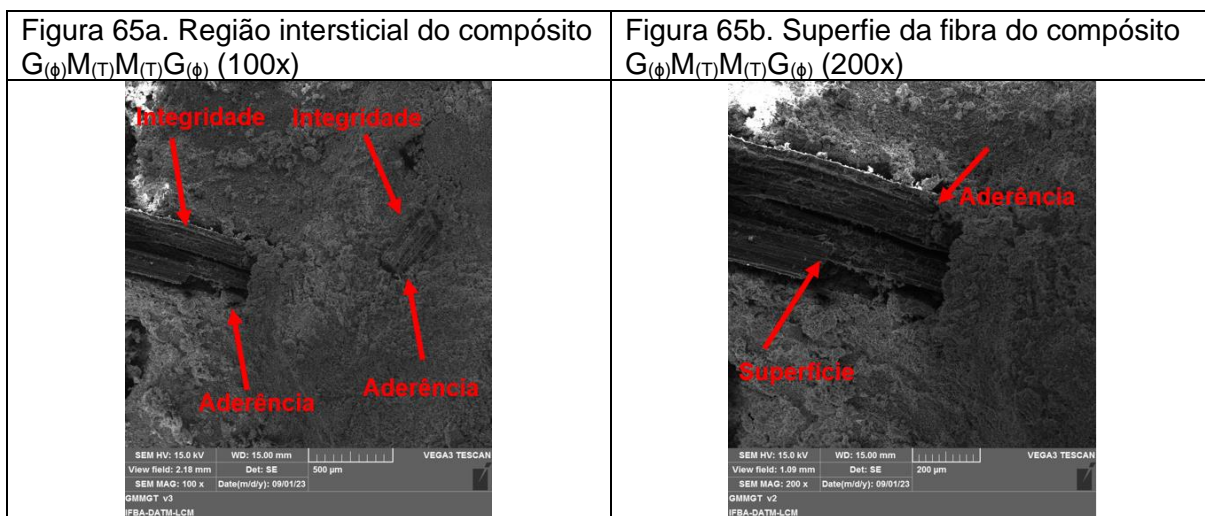


Fonte. Autora.

Na Figura 65, estão apresentadas as imagens por microscopia eletrônica de varredura do compósito $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}$ após ensaio de teste Schlyter. As amostras da Figura 65a e 65b exibem a ausência de grandes vazios na região interticial decorrente da secagem das fibras de sisal durante a queima, indicando a importância do tratamento por hornificação das mantas de sisal para atingir um melhor desempenho térmico e adesão entre a matriz e o reforço.

A eficácia do tratamento por hornificação pode ser observada na Figura 65b através da superfície da fibra (maior rugosidade) e as modificações promovidas na estrutura da mesma, que podem ser observadas após a queima da fibra e que denotam uma maior aderência fibra-matriz. Estes resultados são similares aos apresentados por Ferrais (2017) e Nascimento (2017).

Figura 65. Microscopia eletrônica de varredura do composto $G_{(\phi)}M_{(T)}M_{(T)}G_{(\phi)}$ após ensaio de teste Schlyter.



Fonte. Autora.

Para as amostras de chapas de gesso acartonado ST e RF, não foi possível realizar o ensaio devido a decomposição das chapas devido a perda da água do gesso, tornando-se um pó.

5 CONCLUSÕES

Em relação ao primeiro objetivo desta pesquisa concluiu-se:

- Os ensaios de massa unitária, massa específica e gramatura permitiram identificar a qualidade da manta de sisal a partir da espessura da mesma, contribuindo com a trabalhabilidade do material durante o desenvolvimento do compósito.
- A técnica de hornificação com 10 ciclos de molhagem e secagem das mantas de sisal, independentemente dos produtos ou água utilizada em cada ciclo, promoveu modificações significativas nas fibras analisadas por microscopia eletrônica de varredura. No entanto, em conjunto com os ensaios de flexão e absorção d'água concluiu-se que o tratamento com 10 ciclos de molhagem e secagem com produto antichama CKC2020 obteve os melhores resultados para o desenvolvimento do compósito para as situações de incêndio.
- A hornificação das fibras de sisal permitiu concluir que os produtos antichama não são sempre adequados para a aplicação no formato de mantas, devido ao acúmulo de produto e a presença de defeitos em alguns pontos das amostras. Portanto foi essencial identificar o produto antichama que permitiu a aplicação homogênea nas amostras de manta de sisal, contribuindo com a proteção para situações de incêndio e a conservação da microestrutura do material.
- Para o ensaio de microscopia eletrônica de varredura das fibras de sisal com e sem tratamento, é possível concluir que o tratamento mais eficiente apresentou maior rugosidade da superfície da fibra, não expondo ou modificando a microestrutura o que possibilita uma maior aderência das fibras de sisal tratadas com a matriz de gesso. Entre os tratamentos analisados na pesquisa, o

tratamento com 10 ciclos de produto antichama CKC2020 é o mais eficiente para a proteção frente ao fogo.

- Para a escolha do produto antichama deve ser analisada a influência do tratamento na aderência do compósito, determinada pela rugosidade da superfície da fibra, lembrando que o padrão de superfície das fibras com tratamento de 10 ciclos de molhagem e secagem apresentam maior rugosidade, contribuindo com a aderência entre as fibras de sisal e a matriz de gesso. No caso das fibras analisadas nesta pesquisa com tratamento $M_{(T)}SHX9020_{(10)}$ exibem menor rugosidade que as fibras com tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$, o que diminuirá a aderência entre as fibras e a matriz e o comportamento mecânico do compósito.
- Para a escolha entre os produtos antichama utilizados nesta pesquisa, o tratamento $M_{(T)}CKC2020_{(10)}$ é mais efetivo que o tratamento $M_{(T)}SHX9020_{(10)}$ devido a homogeneidade da proteção da superfície das fibras, conservando a microestrutura das fibras e aumentando a rugosidade da superfície das fibras.
- Diante dos resultados de absorção d'água, as fibras tratadas com 10 ciclos de produto antichama CKC2020 apresentaram a maior redução de absorção d'água após os 10 ciclos de molhagem e secagem, diminuindo a natureza hidrofílica das fibras de sisal e aumentando capacidade da fibra de se aderir a matriz de gesso, como confirmado no ensaio de flexão de 4 pontos.
- Após o estudo da absorção d'água das amostras pode-se concluir que as mantas de sisal tratadas com 10 ciclos de molhagem e secagem indicaram uma diminuição na capacidade de absorver água a partir do quarto ciclo de molhagem e secagem. O tratamento com produto antichama CKC2020 apresentou melhor desempenho do que o produto SHX9020.

- O tratamento com produtos antichama foi importante para diminuir a flamabilidade e a homogeneidade da queima nas duas fases das amostras apresentadas pelas mantas de sisal *in natura*. O produto antichama influenciou na queima da fase exposta ao fogo, o comprimento de queima, velocidade de combustão e a classificação das amostras de mantas de sisal de acordo com o tipo de produto antichama utilizado e o número de ciclos de secagem e molhagem realizados com o mesmo.
- O teste de flamabilidade indicou que as mantas de sisal com tratamento por hornificação com 10 ciclos de molhagem e secagem com produto antichama apresentaram uma melhor resposta frente ao fogo, diminuindo a velocidade de queima e aumento o tempo em que se inicia o esfarelamento da camada de gesso exposta ao fogo.

A partir do segundo objetivo desta pesquisa concluiu-se:

- O ensaio de granulometria, massa unitária, massa específica e superfície específica permitiram analisar o tamanho das partículas de gesso, quantificar o material e identificar a relação água/gesso para o desenvolvimento da pasta de gesso no estado fresco. Destaca-se, que as dimensões do agregado interferiram na trabalhabilidade e porosidade da pasta de gesso, assim como a resistência a flexão do compósito.
- A caracterização química e mineralógica do gesso em pó apresentaram convergência nos resultados e foi possível concluir que o gesso utilizado na pesquisa atinge os requisitos da ABNT NBR 13.207 (ABNT, 2017a), descartando a possibilidade do material ser fosfogesso, a partir da concentração de fósforo, flúor e de óxidos nas amostras, assim como a fases cristalinas correspondentes a bassanita e anidrita.

- Em relação a pasta de gesso no estado fresco desenvolvida pode-se concluir que a variação da relação água/gesso e a quantidade de aditivo superplastificante utilizado na mistura influencia na fluidez da pasta e nas propriedades reológicas e físicas da matriz de gesso utilizada na produção do compósito.
- A pasta de gesso com 0,7% de aditivo e 0,4 de relação de água/gesso apresentaram um comportamento reológico que indicou a alta fluidez e um tempo de pega adequado para o desenvolvimento do compósito manualmente. As conclusões obtidas a partir do terceiro objetivo desta pesquisa são:
 - O ensaio a flexão permitiu concluir que com a utilização de manta de sisal com tratamento com produto antichama CKC2020 na produção do compósito favorece o comportamento pós fissuração das amostras, aumentando a ductilidade com o aumento da carga, no entanto, o compósito com manta de sisal tratada com 10 ciclos de produto antichama SHX9020 só contribuíram com o aumento de carga até a primeira fissura, em relação ao compósito com mantas de sisal sem tratamento e com tratamento com 10 ciclos de produto antichama CKC2020, não contribuindo com a resistência do compósito.
 - A diminuição da resistência, no ensaio de flexão de 4 pontos, apresentada pelo compósito com tratamento da manta de sisal com 10 ciclos de produto antichama SHX9020 está relacionada a baixa aderência com a matriz de gesso, como consequência da falta de homogeneidade do tratamento de hornificação observado no ensaio MEV e o aumento da absorção d'água das amostras. Portanto, por meio do ensaio à flexão foi possível concluir a convergência dos resultados do MEV e de absorção de água.

- No ensaio à flexão, o teor de fibra e o tratamento de hornificação contribuíram com o aumento da força máxima para primeira fissura das amostras, e no deslocamento na flexão, possibilitando a propagação das fissuras através do regime elástico das amostras.
- O tratamento de hornificação SHX9020 evidenciou um aumento na carga tolerada na primeira fissura e no deslocamento na flexão em 4 pontos, comparado com o tratamento CKC2020, devido as modificações na superfície da fibra de sisal durante os ciclos de molhagem e secagem. No entanto, as amostras tratadas indicaram um crescimento de suporte de carga e tenacidade, em relação as amostras *in natura*.
- O ensaio de microscopia eletrônica de varredura das amostras após o test de Schlyter Modificado permitiu concluir que o tratamento por hornificação com produto antichama da manta de sisal contribuiu com o desempenho térmico das chapas compósitas e a aderência entre a fibra-matriz.
- Com o ensaio MEV observou-se que as mantas de sisal *in natura* deixaram impressões na matriz de gesso após a queima do material, resultando em vazios que prejudicam a aderência fibra-matriz.
- As amostras $G_{(\phi)}M_{(\phi)}M_{(\phi)}G_{(\phi)}$ e $G_{(\phi)}M_{(\tau)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}$ apresentaram uma interação com a matriz mais fraca devido a maior quantidade de fibra e menor quantidade de gesso na produção do compósito. No entanto, a chapa compósita $G_{(\phi)}M_{(\tau)}M_{(\tau)}G_{(\phi)}$ apresentou maior aderência entre a matriz e o reforço em fibra de sisal após os tratamento das fibras com 10 ciclos de molhagem e secagem. As conclusões obtidas a partir do quarto objetivo desta pesquisa são:

- As chapas compósitas conformadas com manta de sisal sem tratamento contribuíram com a propagação das chamas das chapas devido a flamabilidade das mantas de sisal, diminuindo o tempo em que ocorre a máxima propagação.
- Nas chapas compósitas, a duração da chama após desligado o queimador está determinado pela barreira de proteção criada pela camada de gesso, dificultando a propagação das chamas até o momento em que surge a primeira fissura na chapa. Após fissuramento da chapa, a manta de sisal sem tratamento contribui com a duração da chama e a maior taxa de liberação de calor, justificando a importância do uso de produtos antichama nas mantas de sisal.
- O desempenho térmico dos compósitos ficou determinado pela diminuição da aceleração da taxa de liberação de calor das amostras, diminuindo a altura da área carbonizada, e da temperatura da face interna e externa das amostras, amortecendo o crescimento do fogo.
- A traves do teste de Schlyter modificado conclui-se que o uso de produtos retardantes de chama nas chapas compósitas contribuem a extinção do fogo após o esfarelamento da camada de gesso exposta ao fogo.
- O desempenho térmico das chapas de gesso acartonado ST e RF, existentes no mercado, está limitado pela formação de brasas na superfície das amostras durante a queima, contribuindo com a ignição das chapas, a altura das chamas, área carbonizada, o tempo para a primeira fissura e multifissuração.
- Quanto maior o teor de fibra nas chapas compósitas, menor será a temperatura das faces da chapa compósitas durante o ensaio de propagação das chamas, até a primeira fissura. Por tanto, a manta de sisal atua como um isolante térmico entre o ambiente externo e interno.

- Durante o ensaio de teste de Schlyter No entanto, o aumento do teor de fibra na produção do compósito diminui a aderência entre a matriz de gesso e o reforço, o que contribuiu com a diminuição da resistência ao fogo das chapas compósitas, influenciando o tempo em que se inicia o esfarelamento da camada de gesso nas amostras.
- O tratamento de hornificação com produtos antichamas favorece o amortecimento do fogo e conseqüentemente o aumento da temperatura das faces da chapa compósita.
- Faz-se necessário o estudo das propriedades térmicas complementares das chapas de gesso reforçadas com fibras de sisal tratadas com produtos antichama para a aplicação na construção civil, especificamente em forros.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, são feitas as seguintes sugestões para novas pesquisas:

- Estudar a toxicidade dos gases emitidos pelos produtos antichamas SHX9020 e CKCK2020 durante uma situação de incêndio.
- Analisar a compatibilidade do tratamento com produto fungicida e produto retardante de chama em situação de incêndio e assim determinar qual é o produto fungicida e retardante ao fogo que permitem melhorar o comportamento das chapas de gesso reforçadas com fibras de sisal em situações de altas temperaturas.
- Desenvolver protótipos das chapas de gesso reforçadas com fibras de sisal com e sem tratamento com produto antichama em escala real para análise do comportamento frente ao fogo em conjunto com iniciativa privada.
- Analisar as propriedades térmicas complementares das chapas de gesso reforçadas com fibras de sisal tratadas com produtos antichama para a aplicação como forros em edificações.
- Realizar um comparativo do comportamento de diferentes compostos com matriz de gesso reforçados com fibras de sisal contínuas e descontínuas (alinhadas e aleatórias).

7 REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 14432. Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento**Rio Janeiro, 2001.
- ABNT. **NBR 12984: Não tecido - determinação da massa por unidade de área.**Rio Janeiro, 2009.
- ABNT. **NBR 13207: Gesso para construção civil**Rio Janeiro, 2017a.
- ABNT. **NBR 13370: Não tecido - terminologia.**Rio Janeiro, 2017b.
- ABNT. **NBR 16626. Classificação da reação ao fogo de produtos de construção**Associação Brasileira do Normas Técnicas. Rio Janeiro, , 2017c.
- ABNT. **NBR 16605. Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.**Rio Janeiro, 2017d.
- ABNT. **NBR 14892. Não tecido - Avaliação à flamabilidade horizontal**Rio Janeiro, 2018.
- ABNT. **NBR 12128. Gesso para construção civil - Determinação das propriedades físicas da pasta de gesso,** 2019a.
- ABNT. **NBR 12127. Gesso para construção civil: Determinação das propriedades físicas do pó**Rio Janeiro, 2019b.
- ABNT. **NBR 13371: Materiais têxteis - Determinação da espessura.**Rio Janeiro, 2019c.
- ABNT. **NBR IEC 60695. Ensaio relativos ao risco de fogo**Rio Janeiro, 2020.
- ABNT. **NBR 14715 - Chapas de gesso acartonado - Requisitos**Rio Janeiro, 2021a.
- ABNT. **NBR 16965. Ensaio de resistência ao fogo de elementos construtivos - Diretrizes gerais**Rio Janeiro, 2021b.
- ABNT. **NBR 15575. Edificações habitacionais -Desempenho**Rio Janeiro, 2021c.
- ABNT. **NBR 7190. Projeto de estruturas de madeira**Rio Janeiro, 2022.
- ACOSTA, E. S.; LUNARDI, G. M.; SILVA, S. M. DA. Tecnologias para Prevenção de Incêndios: A Trajetória da Boate Kiss. In: SENASP (Ed.). . **Tecnologias da Informação e Comunicação na Segurança Pública e Direitos Humanos.** São Paulo: Blucher, 2016. p. 77–92. doi:10.5151/9788580391763-05
- AGARWALL, B.; BROUTMAN, L.; CHANDRASHENKHARA, K. **Analysis and performance of fibre composites.** Terceira ed. Nova Deli: Wiley Publications, 2006.
- ALAM, T. et al. Thermal Characterization and Fracture Toughness of Sisal Fiber Reinforced Polymer Composite. v. 1073, n. 3, p. 1071–1073, 2014.
- ALVARENGA, B. L. et al. Physical and mechanical evaluation of plaster composites Bambusa tuldoides fiber-reinforced plaster composites. **Revista Materia**, v. 27, n. 2, 2022. doi:10.1590/S1517-707620220002.1387
- ALVES FIDELIS, M. E. et al. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 2, n. 2, p. 149–157, 2013. doi:10.1016/j.jmrt.2013.02.003
- ALVES, M. E. et al. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural

fibers. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 2, n. 2, p. 149–157, 2013. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.003>.

APARECIDA, L. M.; AGOPYAN, V. **Caracterização de Fibras Curtas Empregadas na Construção Civil**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil., 2007.

ARRUDA FILHO, A. **Placas cimentícias reforçadas com tecidos estruturais de sisal**. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2015.

ASTM. **ASTM C947 – Standard Test Method for Flexural Properties of Thin-Section Glass-Fiber-Reinforced Concrete (Using Simple Beam With Third-Point Loading)**, 2016.

AWANG NGAH, S. et al. Structural performance of fibrous plaster. Part 1: Physical and mechanical properties of hessian and glass fibre reinforced gypsum composites. **Construction and Building Materials**, v. 259, p. 120396, 2020. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2020.120396](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120396)

AZIEYANTI, N. A.; HAKIM, A.; HASINI, H. Mixture of natural fiber with gypsum to improve the fire resistance rating of a fire door: The effect of kapok fiber. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 914, n. 1, 2017. doi:[10.1088/1742-6596/914/1/012019](https://doi.org/10.1088/1742-6596/914/1/012019)

BACHTIAR, E. V. et al. Thermal stability, fire performance, and mechanical properties of natural fibre fabric-reinforced polymer composites with different fire retardants. **Polymers**, v. 11, n. 4, 2019. doi:[10.3390/polym11040699](https://doi.org/10.3390/polym11040699)

BARBOSA, A. A.; FERRAZ, A. V.; SANTOS, G. A. Chemical, mechanical and morphological characterization of gypsum obtained at Araripe, PE, Brazil. **Ceramica**, v. 60, n. 356, p. 501–508, 2014. doi:[10.1590/s0366-69132014000400007](https://doi.org/10.1590/s0366-69132014000400007)

BATISTA, SANDE DOS SANTOS et al. Influence of hornification on plaster plates. **5th Brazilian Conference on Composite Materials – BCCM 5 Sao Carlos School of Engineering – University of Sao Paulo**, p. 1–8, 2021.

BATISTA, S. D. S. **Compósitos de gesso reforçados com tecidos hornificados de fibras de sisal**. Salvador: Dissertação de mestrado, 2021.

BELAYACHI, N.; HOXHA, D.; ISMAIL, B. Impact of fiber treatment on the fire reaction and thermal degradation of building insulation straw composite. **Energy Procedia**, v. 139, p. 544–549, 2017. doi:[10.1016/j.egypro.2017.11.251](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.251)

BELOUSOVA, R. G. et al. Low-toxicity boron-containing fire-retardant additives for polymeric coatings. **Russian Journal of Applied Chemistry**, v. 83, n. 2, p. 328–331, 2010. doi:[10.1134/S1070427210020278](https://doi.org/10.1134/S1070427210020278)

BENVINDO DA LUZ, A.; FREITAS, F. A. Gipsita. In: **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. 2da. ed. Rio Janeiro: CETEM-MCT Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia, 2008. p. 974.

BERTO, A. F. **Medidas de proteção contra incêndio: aspectos fundamentais a serem considerados no projeto arquitetônico dos edifícios**. São Paulo: FAUSP, 1991.

BHATTACHARYYA, D.; SUBASINGHE, A.; KIM, N. K. **Chapter 4. Natural fibers_ Their composites and flammability characterizations**. Auckland: Elsevier Inc., 2015. doi:[10.1016/B978-0-323-26434-1.00004-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-26434-1.00004-0)

- BOCCARUSSO, L. et al. Hemp fabric/epoxy composites manufactured by infusion process: Improvement of fire properties promoted by ammonium polyphosphate. **Composites Part B: Engineering**, v. 89, p. 117–126, 2016. doi:10.1016/j.compositesb.2015.10.045
- BOURMAUD, A. et al. Relationships between micro-fibrillar angle, mechanical properties and biochemical composition of flax fibers. **Industrial Crops & Products**, v. 44, p. 343–351, 2013. doi:10.1016/j.indcrop.2012.11.031
- BOUSFIELD, G. et al. Extraction and refinement of agricultural plant fibers for composites manufacturing. **Comptes Rendus Chimie**, v. 21, n. 9, p. 897–906, 2018. doi:10.1016/j.crci.2018.07.001
- BOUTERF, A. et al. Damage law identification from full field displacement measurement: Application to four-point bending test for plasterboard. **European Journal of Mechanics, A/Solids**, v. 49, p. 60–66, 2015. doi:10.1016/j.euromechsol.2014.06.001
- BRANDÃO, C. P. **Compósito com matriz de gesso e reforço de manta de sisal**. Salvador: Dissertação de mestrado, 2015.
- BRANDT, F.; BOSBACH, D. Bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) dissolution and gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) precipitation in the presence of cellulose ethers. **Journal of Crystal Growth**, v. 233, n. 4, p. 837–845, 2001. doi:10.1016/S0022-0248(01)01637-2
- BRENTANO, T. **A Proteção Contra Incêndios no Projeto de Edificações**. 3ra. ed. Porto Alegre: T-Edições, 2016.
- BUMANIS, G. et al. Technological properties of phosphogypsum binder obtained from fertilizer production waste. **Energy Procedia**, v. 147, p. 301–308, 2018. doi:10.1016/j.egypro.2018.07.096
- BUMANIS, G. et al. Effect of water-binder ratio on properties of phosphogypsum binder. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 660, n. 1, 2019. doi:10.1088/1757-899X/660/1/012071
- CAI, Q. et al. Efficient removal of phosphate impurities in waste phosphogypsum for the production of cement. **Science of the Total Environment**, v. 780, p. 146600, 2021. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.146600
- CALLISTER JR, W.; RETHWISCH, D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais**. 8. ed. [s.l.] LTC, 2012.
- CAMARGO, E. **Sistema de Gestão da Segurança contra Incêndio e Pânico nas Edificações : Fundamentação para uma Regulamentação Nacional**. Porto Alegre: Tese de doutorado, 2016.
- CAMPILHO, R. D. Introduction to Natural Fiber Composites. In: **Natural fiber composites**. 1ª ed. Florida: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2016. p. 133. doi:10.1201/9781351050944-1
- CANEVAROLO JR., S. V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. 3ra Edição ed. São Paulo: [s.n.].
- CAO, W. et al. A facile approach for large-scale recovery of phosphogypsum: An insight from its performance. **Construction and Building Materials**, v. 309, n. October, p. 125190, 2021. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125190
- CARVALHO, R. . **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas**

de madeira. São Carlos: Tese de doutorado, 2005.

CASTOLDI, R. DE S.; SOUZA, L. M. S. DE; DE ANDRADE SILVA, F. Comparative study on the mechanical behavior and durability of polypropylene and sisal fiber reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 617–628, 2019. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.282

CÉLINO, A. et al. The hygroscopic behavior of plant fibers : a review. v. 1, n. January, p. 1–12, 2014. doi:10.3389/fchem.2013.00043

CHAND, N.; FAHIM, M. Capítulo 1 - Natural fibers and their composites. In: **Tribology of Natural Fiber Polymer Composites**. 2^a ed. [s.l.: s.n.]. p. 59. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818983-2.00001-3

CHEN, Y. et al. Effects of wet-pressing induced fiber hornification on hydrogen bonds of cellulose and on properties of eucalyptus paper sheets. **Holzforschung**, v. 72, n. 10, p. 829–837, 2018. doi:10.1515/hf-2017-0214

CHIKHI, M. Young's modulus and thermophysical performances of bio-sourced materials based on date palm fibers. **Energy and Buildings**, v. 129, p. 589–597, 2016. doi:10.1016/j.enbuild.2016.08.034

CHINDAPRASIRT, P. et al. Plaster materials from waste calcium sulfate containing chemicals, organic fibers and inorganic additives. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3193–3203, 2011. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.03.004

CKC. **Retardante de chamas para fibras naturais. CKC - 2020.** São Paulo: CKC Proteção passiva contra o fogo, 2021.

CLARAMUNT, J. et al. The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 5, p. 586–595, 2011. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.03.003

CREA-RS. **Apresentação do relatório técnico do incêndio da Boate Kiss.** Santa Maria, RS.: CREA-RS, 2013.

CUNHA, P. W. S.; MARINHO, G. S.; GOMES, U. U. Propriedades Termofísicas De Compósito De Matriz De Gesso E Fibra Vegetal. **Holos**, v. 1, p. 127, 2013. doi:10.15628/holos.2013.1203

DA SILVA, L.; MUSZKAT, E. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 3. ed. Florianópolis: UFSC e Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

DEL CARLO, U. A segurança contra incêndio. In: **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Palo: [s.n.]. p. 848.

DJAFARI PETROUDY, S. R. **Physical and mechanical properties of natural fibers**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2017. doi:10.1016/B978-0-08-100411-1.00003-0

DOREZ, G. et al. Thermal and fire behavior of natural fibers/PBS biocomposites. **Polymer Degradation and Stability**, v. 98, n. 1, p. 87–95, 2013. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2012.10.026

DRAGOMIR, A.-M. et al. Study on synthetic gypsum obtained from wet flue gas desulphurisation in thermal power plants. **Revista Romana de Materiale/ Romanian Journal of Materials**, v. 47, n. 4, 2017.

DRYWALL, S. **Manual de Projeto de Sistemas Drywall – paredes , forros e**

revestimentos. 6a. ed. São Paulo: Pini, 2013.

EL RAFIE, S. et al. Treatment and purification of phosphogypsum. **Egyptian Journal of Chemistry**, v. 62, n. Part 1, p. 243–250, 2020. doi:10.21608/ejchem.2019.13267.1934

ELSABBAGH, A. et al. Towards selection chart of flame retardants for natural fibre reinforced polypropylene composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 141, n. June 2017, p. 1–8, 2018. doi:10.1016/j.compositesb.2017.12.020

ENNACIRI, Y.; ALAOUI-BELGHITI, H. EL; BETTACH, M. Comparative study of K₂SO₄ production by wet conversion from phosphogypsum and synthetic gypsum. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 3, p. 2586–2596, 2019. doi:10.1016/j.jmrt.2019.02.013

FERNANDES, C. A. .; CÂMARA, E. **Gerenciamento de resíduos provenientes da aplicação de forro de gesso em obra da construção civil**. Florianópolis, PPGEC - UFSC, , 2012.

FERRAIS, P. F. **Síntese de um compósito de gesso com fibra obtida da Calotropis Procera para o uso como biomaterial**. Juazeiro: Dissertação de mestrado, 2017.

FERREIRA, S. R. et al. Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland. **Revista Materia**, v. 17, n. 2, p. 1024–1034, 2012. doi:10.1590/S1517-70762012000200008

FERREIRA, S. R. **Influência da hornificação na aderência fibra-matriz e no comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal**. Feira de Santana: Dissertação de mestrado, 2012.

FERREIRA, S. R. et al. Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber-matrix bond in cement based systems. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 730–740, 2015. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.120

FERREIRA, S. R. et al. Effect of natural fiber hornification on the fiber matrix interface in cement based composite systems. **Key Engineering Materials**, v. 668, p. 118–125, 2016. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.668.118

FERREIRA, S. R. et al. Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 551–561, 2017. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.10.004

FILHO, J. D. A. M.; SILVA, F. D. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. **Cement and Concrete Composites**, v. 40, p. 30–39, 2013. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.04.003

FLORES, B. et al. **Fundamentos de combate a incêndio**. 1ª ed. Goiânia - GO: Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás., 2016. v. 1

FREITAS, J. D. A. **Material de Construção. Aglomerantes**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia. Departamento de Construção Civil, 2019.

FRENCH, A. D. Idealized powder diffraction patterns for cellulose polymorphs. **Cellulose**, v. 21, n. 2, p. 885–896, 2014. doi:10.1007/s10570-013-0030-4

FU, S.; SONG, P.; LIU, X. Thermal and flame retardancy properties of thermoplastics/natural fiber biocomposites. **Advanced High Strength Natural Fibre**

Composites in Construction, p. 479–508, 2017. doi:10.1016/B978-0-08-100411-1.00019-4

FUSCO, P. B. **Estruturas de concreto, Fundamentos do projeto estrutural**. São Paulo: [s.n.].

G1. **Luzes de Natal podem ter causado incêndio no ES, dizem bombeiros**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/espírito-santo/noticia/2011/12/luzes-de-natal-podem-ter-causado-incendio-no-es-dizem-bombeiros.html>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

GALLALA, W. et al. Production of low-cost biocomposite made of palm fibers waste and gypsum plaster. **Revista Internacional de Contaminacion Ambiental**, v. 36, n. 2, p. 475–483, 2020. doi:10.20937/RICA.53541

GAO, J.; FOURIE, A. Spread is better: An investigation of the mini-slump test. **Minerals Engineering**, v. 71, p. 120–132, 2015. doi:10.1016/j.mineng.2014.11.001

GARTNER, E. M. Cohesion and expansion in polycrystalline solids formed by hydration reactions - The case of gypsum plasters. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 4, p. 289–295, 2009. doi:10.1016/j.cemconres.2009.01.008

GEREZ, M. P. **Influência dos materiais construtivos na propagação de um incêndio**. Brasília: Centro Universitário de Brasília Instituto CEUB de Pesquisa e Desenvolvimento - ICPD, 2017.

GHOLAMPOUR, A. **Review A review of natural fiber composites : properties , modification and processing techniques , characterization , applications**. [s.l.] Springer US, 2020. v. 55doi:10.1007/s10853-019-03990-y

GIEPARDA, W. et al. Chemical modification of natural fibres to epoxy laminate for lightweight constructions. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 140, p. 106171, 2021. doi:10.1016/j.compositesa.2020.106171

GILL, A. A.; AGASSI, S.; NEGRISOLO, W. Aprendendo com os grandes incêndio. In: **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2013. v. 53p. 19 a 35.

GUO, W. et al. Processing bulk natural bamboo into a strong and flame-retardant composite material. **Industrial Crops and Products**, v. 138, n. December 2018, p. 111478, 2019. doi:10.1016/j.indcrop.2019.111478

GYPSUM DRYWALL. **Catálogo técnico. Fichas**. São Paulo: Gypsum Drywall e Etex, 2020.

HELENA, S. **SHX-9020**. São Palo: Comercail Antichama - CAC, 2021a.

HELENA, S. **Ficha de informações de segurança de produtos químicos. SHX - 9020**. São Paulo: [s.n.].

HOHENWARTER, D. et al. Analysis of the fire behavior of polymers (Pp, pa 6 and pe-l) and their improvement using various flame retardants. **Materials**, v. 13, n. 24, p. 1–22, 2020. doi:10.3390/ma13245756

HUO, S. et al. Effects of natural fiber surface treatments and matrix modification on mechanical properties of their composites. **SAE Technical Papers**, n. 2, 2010. doi:10.4271/2010-01-0426

ISO. **Fire protection — Vocabulary — Part 1: General terms and phenomena of**

fire, 1987.

ISO. **ISO 834. Fire-resistance tests. Elements of building construction.**Switzerland, 2021.

IT. **Instrução Técnica N°02. Conceitos básicos de segurança contra incêndio.**São Paulo.Policia Militar do Estado de São Paulo, , 2019a. Disponível em: <<https://bombeiros.com.br/instrucoes-tecnicas/>>

IT. **Instrução Técnica N°08. Segurança estrutural contra incêndio.**São Paulo.Policia Militar do Estado de São Paulo, , 2019b. Disponível em: <<https://bombeiros.com.br/instrucoes-tecnicas/>>

IT. **Instrução Técnica N°10. Controle de materiais de acabamento e de revestimento.**São PauloPolicia Militar do Estado de São Paulo, , 2019c. Disponível em: <<https://bombeiros.com.br/instrucoes-tecnicas/>>

IUCOLANO, F. et al. Mechanical behavior of plaster reinforced with abaca fibers. **Construction and Building Materials**, v. 99, p. 184–191, 2015. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.09.020

IUCOLANO, F. et al. Thermo-mechanical behaviour of hemp fibers-reinforced gypsum plasters. **Construction and Building Materials**, v. 185, p. 256–263, 2018. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.036

JAUHARI, N.; MISHRA, R.; THAKUR, H. Natural Fibre Reinforced Composite Laminates – A Review. **Materials Today: Proceedings**, v. 2, n. 4–5, p. 2868–2877, 2015. doi:10.1016/j.matpr.2015.07.304

JAWAID, M.; ABDUL KHALIL, H. P. S. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 86, n. 1, p. 1–18, 2011. doi:10.1016/j.carbpol.2011.04.043

JIMÉNEZ RIVERO, A.; SATHRE, R.; GARCÍA NAVARRO, J. Life cycle energy and material flow implications of gypsum plasterboard recycling in the European Union. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 108, n. January 2013, p. 171–181, 2016. doi:10.1016/j.resconrec.2016.01.014

JOHN, V. .; CINCOTTO, M. . **Gesso de Construção Civil.** (IBRACON, Ed.)Geraldo C Isaia. (Org.). Maateriais de construção civil e principios de ciência e engenharia de materiais. **Anais...**São Paulo: 2007.

JUST, A.; SCHMID, J.; KÖNIG, J. **Gypsum plasterboards used as fire protection - Analysis of a database.** Stockolm: SP Technical Research Institute of Sweden, 2010.

KAMBOJ, I. et al. Effect of Fiber Pre-treatment Methods on Hygrothermal Aging Behavior of Agave Fiber Reinforced Polymer Composites. **Journal of Natural Fibers**, v. 00, n. 00, p. 1–14, 2020. doi:10.1080/15440478.2020.1838398

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste: a miniature slump test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, p. 8, 1980. doi:10.1520/CCA10190J

KARIMI, S. et al. Kenaf bast cellulosic fibers hierarchy: A comprehensive approach from micro to nano. **Carbohydrate Polymers**, v. 101, n. 1, p. 878–885, 2014. doi:10.1016/j.carbpol.2013.09.106

KEERTHAN, P.; MAHENDRAN, M. Numerical studies of gypsum plasterboard panels under standard fire conditions. **Fire Safety Journal**, v. 53, p. 105–119, 2012.

doi:10.1016/j.firesaf.2012.06.007

KEERTHAN, P.; MAHENDRAN, M. Thermal performance of composite panels under fire conditions using numerical studies: Plasterboards, rockwool, glass fibre and cellulose insulations. **Fire Technology**, v. 49, p. 329–356, 2013. doi:https://doi.org/10.1007/s10694-012-0269-6

KERSE, C. et al. Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses. **Nature**, v. 537, n. 7618, p. 84–88, 2016. doi:10.1038/nature18619

KHALIL, A. A. et al. Influencia de distintas fuentes de sílice en las propiedades físicas y mecánicas de materiales derivados del yeso. **Materiales de Construcción**, v. 63, n. 312, p. 529–537, 2013. doi:10.3989/mc.2013.04312

KHALILI, P. et al. Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy composite. **Composites Part B: Engineering**, v. 114, p. 101–110, 2017. doi:10.1016/j.compositesb.2017.01.049

KHALILI, P. et al. Ramie fabric Elium® composites with flame retardant coating: Flammability, smoke, viscoelastic and mechanical properties. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 137, n. May, p. 105986, 2020. doi:10.1016/j.compositesa.2020.105986

KIM, N. K.; LIN, R. J. T.; BHATTACHARYYA, D. Flammability and mechanical behaviour of polypropylene composites filled with cellulose and protein based fibres: A comparative study. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 100, p. 215–226, 2017. doi:10.1016/j.compositesa.2017.05.017

KNAUF. **Ficha técnica**. Rio Janeiro: Knauf Brasil, 2020.

KOLAITIS, D. I.; ASIMAKOPOULOU, E. K.; FOUNTI, M. A. Fire protection of light and massive timber elements using gypsum plasterboards and wood based panels: A large-scale compartment fire test. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 163–170, 2014. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.027

KOLAITIS, D. I.; ASIMAKOPOULOU, E. K.; FOUNTI, M. A. Fire behaviour of gypsum plasterboard wall assemblies: CFD simulation of a full-scale residential building. **Case Studies in Fire Safety**, v. 7, p. 23–35, 2017. doi:10.1016/j.csfs.2016.11.001

KOLAITIS, D. I.; FOUNTI, M. A. Development of a solid reaction kinetics gypsum dehydration model appropriate for CFD simulation of gypsum plasterboard wall assemblies exposed to fire. **Fire Safety Journal**, v. 58, p. 151–159, 2013. doi:10.1016/j.firesaf.2013.01.029

KOLARKAR, P.; MAHENDRAN, M. Experimental studies of gypsum plasterboards and composite panels under fire conditions. **Fire and Materials**, v. 39, p. 13–35, 2012. doi:10.1002/fam.2155

KONTOGEORGOS, D. A.; FOUNTI, M. A. Gypsum board reaction kinetics at elevated temperatures. **Thermochemica Acta**, v. 529, p. 6–13, 2012. doi:10.1016/j.tca.2011.11.014

KONTOGEORGOS, D.; MANDILARAS, I.; FOUNTI, M. Scrutinizing Gypsum Board Thermal Performance at Dehydration Temperatures. v. 29, 2011. doi:10.1177/0734904110381731

KOZLOWSKI, R. M.; MUZYCZEK, M.; WALENTOWSKA, J. **Flame Retardancy and Protection against Biodeterioration of Natural Fibers: State-of-Art and Future**

- Prospects.** [s.l.] Elsevier B.V., 2014. doi:10.1016/B978-0-444-53808-6.00023-8
- LAMB, F. J.; ALLI, S. Fire and materials. **Anaesthesia**, v. 58, n. 5, p. 493, 2013. doi:10.1046/j.1365-2044.2003.03154_16.x
- LENS, J. P.; SUN, X.; KAGUMBA, L. Polymeric flame retardants for reinforced thermoplastic and thermoset resins. **Reinforced Plastics**, v. 63, n. 1, p. 36–39, 2019. doi:10.1016/j.repl.2017.11.016
- LIU, C. et al. Early hydration and microstructure of gypsum plaster revealed by environment scanning electron microscope. **Materials Letters**, v. 234, p. 49–52, 2019. doi:10.1016/j.matlet.2018.09.071
- LOPES, F. F. M. et al. Study of the effects of acetylation treatments on sisal fiber. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 7, p. 783–788, 2010. doi:10.1590/s1415-43662010000700015
- LUCA, C. R. DE. **Segurança contra incêndio de paredes drywall**. São Paulo: Associação Brasileira do Drywall, 2018.
- MAJEED, K. et al. Potential materials for food packaging from nanoclay/natural fibres filled hybrid composites. **Materials and Design**, v. 46, p. 391–410, 2013. doi:10.1016/j.matdes.2012.10.044
- MÁRMOL, G. et al. Portland cement, gypsum and fly ash binder systems characterization for lignocellulosic fiber-cement. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 208–218, 2016. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.083
- MARTINS, G. C. . **Análise Numérica e Experimental de vigas de Madeira Laminada Colada em Situação de Incêndio**São CarlosTese de doutorado. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia de Estruturas, , 2016.
- MENDES, S. et al. Influence of Water Amount and Immersion Time on the Sisal Fibers Hornification Process. **Journal of Natural Fibers**, v. 18, n. 11, p. 1712–1721, 2021. doi:10.1080/15440478.2019.1697990
- MILANESE, A. C. et al. Composites : Part B Thermal and mechanical behaviour of sisal / phenolic composites. v. 43, p. 2843–2850, 2012. doi:10.1016/j.compositesb.2012.04.048
- MISNON, M. I. et al. Potentiality of utilising natural textile materials for engineering composites applications. **Materials and Design**, v. 59, p. 359–368, 2014. doi:10.1016/j.matdes.2014.03.022
- MITIDIARI, M. O comportamento dos materiais e componentes construtivos diante do fogo - Reação ao fogo. In: **A segurança contra incêndio no Brasil**. 53. ed. São Palo: Projeto Editora, 2013. p. 55–75.
- MORGADO, G. et al. Kinetics of plaster hydration and structure of gypsum: Experiments and kinetic Monte Carlo simulations with added gypsum seeds. **Journal of Crystal Growth**, v. 507, n. November 2018, p. 124–133, 2019. doi:10.1016/j.jcrysgr.2018.11.006
- MUNTONGKAW, S.; PIANKLANG, S.; TANGBORIBOON, N. Modifications to improve properties of gypsum ceiling composites as multifunctional construction by embedding Typha angustifolia fiber and natural rubber latex compound. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, n. July, p. e00658, 2021.

doi:10.1016/j.cscm.2021.e00658

NASCIMENTO, C. M. **Compósito de gesso reforçado com fibra de coco e cortiça triturada**. Natal: Tese de doutorado, 2017.

NASCIMENTO, DO. **O incêndio do edifício Andraus e Joelma**. Disponível em: <<https://saopauloantiga.com.br/>>. Acesso em: 10 abr. 2021.

NEGRISOLO, W. et al. **Fundamentos de segurança contra incêndio em edificações: proteção passiva e ativa**. FSCIE-PPA. São Paulo: FUNDABOM, 2019.

NETO, J. S. S. et al. Effect of chemical treatment on the thermal properties of hybrid natural fiber-reinforced composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 136, n. 10, p. 1–13, 2019. doi:10.1002/app.47154

OGUC. **Ordenanza general de urbanismo y construcciones** Santiago, Chile Ministerio de vivienda e urbanismo, 2020. Disponível em: <<https://www.minvu.gob.cl/elementos-tecnicos/decretos/>>

OLIVER, A.; BAEZ, M. I. Morphological Study of Gypsum Boards with PCM through Scanning Electron Microscopy. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 4, p. 401–408, 2012. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000402

OLIVITO, R. S.; CEVALLOS, O. A.; CARROZZINI, A. Development of durable cementitious composites using sisal and flax fabrics for reinforcement of masonry structures. **Materials and Design**, v. 57, p. 258–268, 2014. doi:10.1016/j.matdes.2013.11.023

ONO, R. Organização do espaço dos edifícios. In: SP:FUNDABOM, F. E. (Ed.). **Fundamentos de segurança contra incêndio em edificações: proteção passiva e ativa**. FSCIE-PPA. São Paulo: FUNDABOM, 2019. p. 25–40.

ONO, R.; GALHANO, A.; VARGAS, M. Arquitetura e Urbanismo. In: **A segurança contra incêndio no Brasil**. 53. ed. São Paulo: Projeto Editora, 2013. p. 123–134.

OXFORD. **X-MET 7000 Series. Handheld XRF analysers to suit your analysis requirements**. Reino Unido: [s.n.].

PADEVĚT, P.; TESÁREK, P.; PLACHÝ, T. Evolution of mechanical properties of gypsum in time. **International Journal of Mechanics**, v. 5, n. 1, p. 1–9, 2011.

PANDIT, P. et al. Pineapple Leaf Fibre: Cultivation and Production. In: **Pineapple leaf fibers. Processing, properties and applications**. [s.l.] Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2020, 2020. p. 326. doi:<https://doi.org/10.1007/978-981-15-1416-6>

PAYRAUDEAU LE ROUX, N. et al. In situ observation of plaster microstructure evolution during thermal loading. **Fire and Materials**, v. 40, n. Fire Mater, p. 973–984, 2016. doi:10.1002/fam.2357

PHIRI, G.; KHOATHANE, M.; SADIKU, E. Effect of fibre loading on mechanical and thermal properties of sisal and kenaf fibre-reinforced injection moulded composites. **Journal of reinforced plastics and composites**, v. 33, p. 283–293, 2013. doi:<https://doi.org/10.1177/0731684413511548>

PIGNATTA, V. et al. Segurança das estruturas em situação de incêndio. In: **A segurança contra incêndio no Brasil**. 53. ed. São Paulo: Projeto Editora, 2013. p. 135–167.

PIMENTEL, I. **Curto-circuito em ventilador causa incêndio e destrói casa de**

conselheira tutelar. Disponível em: <<https://cidadeverde.com/noticias/311143/curto-circuito-em-ventilador-causa-incendio-e-destroi-casa-de-conselheira-tutelar>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

PINHEIRO, S. M. M. **Gesso reciclado: Avaliação de propriedades para uso em componentes.** São Paulo: Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, São Paulo, 2011.

PINHEIRO, S. M. M. et al. **Utilização do resíduo de gesso de construção na produção de componentes.** V Encontro nacional sobre aproveitamento de resíduos na construção. **Anais...**Fortaleza: 2017.

PINTO, C. **Estudo do uso de compósito de gesso e fibras de sisal como isolamento térmico na construção civil.** Salvador: Dissertação de mestrado, 2018.

PLACO. **Ficha de produtos. Placa ST, RU, RF.** São Paulo: Placo Saint Gobain, 2020.

PLIAKA, M; GAIDAJIS, G. Potential uses of phosphogypsum: A review. **Journal of Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng.**, v. 57, n. 9, p. 17, 2022. doi:10.1080/10934529.2022.2105632. Epub 2022 Jul 29.

PLYATSUK, L. et al. Influence of phosphogypsum dump on the soil ecosystem in the sumy region (Ukraine). **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 24, 2019. doi:10.3390/app9245559

PURKISS, J. A.; LI, L. Y. **Fire safety engineering design of structures, third edition.** 3ra. ed. Florida: Taylor & Francis Group, 2013. doi:10.1201/b16059

RAHMANIAN, I. **Thermal and Mechanical Properties of Gypsum Boards and Their Influences on Fire Resistance of Gypsum Board Based Systems.** Manchester: Tese de doutorado, 2011.

RAKHILA, Y. et al. Elaboration and Characterization of New. v. 11, n. 4, p. 1552–1563, 2018.

RIDDELL, N. et al. Examination of technical mixtures of halogen-free phosphorus based flame retardants using multiple analytical techniques. **Chemosphere**, v. 176, p. 333–341, 2017. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.02.129

RIOS, G. H. Processo produtivo. Fibra de sisal Grupo Hamilton Rios, , 2019. Disponível em: <<https://pt.hamiltonriosgroup.com/>>

RONG, M. Z. et al. The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. **Composites Science and Technology**, v. 61, n. 10, p. 1437–1447, 2001. doi:10.1016/S0266-3538(01)00046-X

SAHA, P. et al. Enhancement of tensile strength of lignocellulosic jute fibers by alkali-steam treatment. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 9, p. 3182–3187, 2010. doi:10.1016/j.biortech.2009.12.010

SAHU, P.; GUPTA, M. K. Sisal (Agave sisalana) fibre and its polymer-based composites: A review on current developments. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 36, n. 24, p. 1759–1780, 2017. doi:10.1177/0731684417725584

SANTOS, E. M. C.; SILVA, O. A. Sisal na Bahia - Brasil. **Mercator**, v. 16, p. 1–13, 2017.

SANTOS, H. **Tratamento da fibra de sisal com polímeros de fontes renováveis para uso em compósitos à base de cimento.** Feira de Santana: Dissertação de

mestrado, 2015.

SARIKANAT, M. et al. Determination of properties of *Althaea officinalis* L. (Marshmallow) fibres as a potential plant fibre in polymeric composite materials. **Composites Part B: Engineering**, v. 57, p. 180–186, 2014. doi:10.1016/j.compositesb.2013.09.041

SECRETARIA DE GEOLOGIA, M. E T. M.-S. **Anuário estatístico do setor da Transformação de não metálicos**. Brasília: Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral, Brasília, 2020.

SEITO, A. I. Fundamentos de fogo e incêndio. In: **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 35–54.

SEITO, A. I. et al. A segurança contra incêndio no Brasil. In: **Journal of Chemical Information and Modeling**. São Paulo: Projeto Editora, 2013. v. 53p. 1689–1699.

SERHAT BAŞPINAR, M.; KAHRAMAN, E. Modifications in the properties of gypsum construction element via addition of expanded macroporous silica granules. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3327–3333, 2011. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.03.022

SILVA, M. F. **Sorção de água em compósitos de poliéster reforçados com fibras de sisal tratadas com líquidos iônicos**. Salvador: Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

SILVA, V. P. **Segurança contra incêndio em edifícios. Considerações para o projeto de arquitetura**. 1ª ed. [s.l.] Blucher, 2014.

SINGH, A. .; AFRIN, S.; KARIM, Z. Green Composites: Versatile Material for Future. In: **Green Energy and Technology**. [s.l.] Springer Nature Switzerland AG. 2020, 2017. p. 15. doi:10.1007/978-3-319-49382-4

SOPHIA, M.; SAKTHIESWARAN, N. Gypsum as a Construction Material- A Review of Recent Developments. **International Journal for Innovative Research in Science & Technology**, v. 2, n. 12, p. 315–323, 2016.

TAPPI. **TAPPI UM 256. Water Retention Valeu** Peachtree Corners, 2015.

TESLÍK, J.; HOŠŤÁLKOVÁ, M.; VAVŘÍNOVÁ, N. Ignitability small attack flame fire test of gypsum composite reinforced with natural fibres. **International Review of Applied Sciences and Engineering**, v. 10, n. 1, p. 57–61, 2019. doi:10.1556/1848.2019.0009

THOMAS, S. et al. Natural Fibres: Structure, Properties and Applications. In: **Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites Green Chemistry and Technology**. 1º ed. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011, 2011. p. 742. doi:10.1007/978-3-642-17370-7

TOLEDO FILHO, R. D. **Natural fibre reinforced mortar composites: experimental characterisation**. Rio Janeiro: Tesis de doutorado, 1997.

TOMAZ, C. Usos e aplicações para o fosfogesso da Vale Fertilizantes. p. 14, 2011.

TREVO. **Manual técnico**. Juazeiro do Norte: Trevo Drywall, 2020.

ULLAH, S. et al. Effects of ammonium polyphosphate and boric acid on the thermal degradation of an intumescent fire retardant coating. **Progress in Organic Coatings**, v. 109, n. August 2016, p. 70–82, 2017. doi:10.1016/j.porgcoat.2017.04.017

VEIGAS, M. G.; NAJIMI, M.; SHAFEI, B. Cementitious composites made with natural

fibers: Investigation of uncoated and coated sisal fibers. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, n. September 2021, p. e00788, 2022. doi:10.1016/j.cscm.2021.e00788

VERZONI, A. Perigo: construção. **NFPA. Jornal Latinoamericano. A revista da national fire protection association**, n. 241, 2018.

VITAL, E. **Curto-circuito provoca incêndio e destrói casa de Conselheira Tutelar em Santo Inácio do Piauí**. Disponível em: <<https://www.folhadeoairas.com/noticia/4190/Curto-circuito-provoca-incendio-e-destrui-casa-de-Conselheira-Tutelar-em-Santo-Inacio-do-Piaui>>. Acesso em: 3 mar. 2022.

WEBER, B. Heat transfer mechanisms and models for a gypsum board exposed to fire. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, n. 5–6, p. 1661–1678, 2012. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.11.022

YE, Q. et al. Effect of particle size distribution on the hydration and compressive strength development of α -calcium sulfate hemihydrate paste. **Powder Technology**, v. 207, n. 1–3, p. 208–214, 2011. doi:10.1016/j.powtec.2010.11.001

YU, C. Natural Textile Fibres: Vegetable Fibres. **Textiles and Fashion: Materials, Design and Technology**, p. 29–56, 2015. doi:10.1016/B978-1-84569-931-4.00002-7

YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. Thermal properties and microstructure of gypsum board and its dehydration products : A theoretical and experimental investigation List of symbols. n. September 2011, p. 575–589, 2012. doi:10.1002/fam

ZHANG, K. K. et al. Improve the flame retardancy of cellulose fibers by grafting zinc ion. **Carbohydrate Polymers**, v. 136, p. 121–127, 2016. doi:10.1016/j.carbpol.2015.09.026

ZHANG, Y. et al. Study on the Thermal Expansion Performance of Gypsum in the Application of Precision Casting. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 330, n. 4, 2019. doi:10.1088/1755-1315/330/4/042003

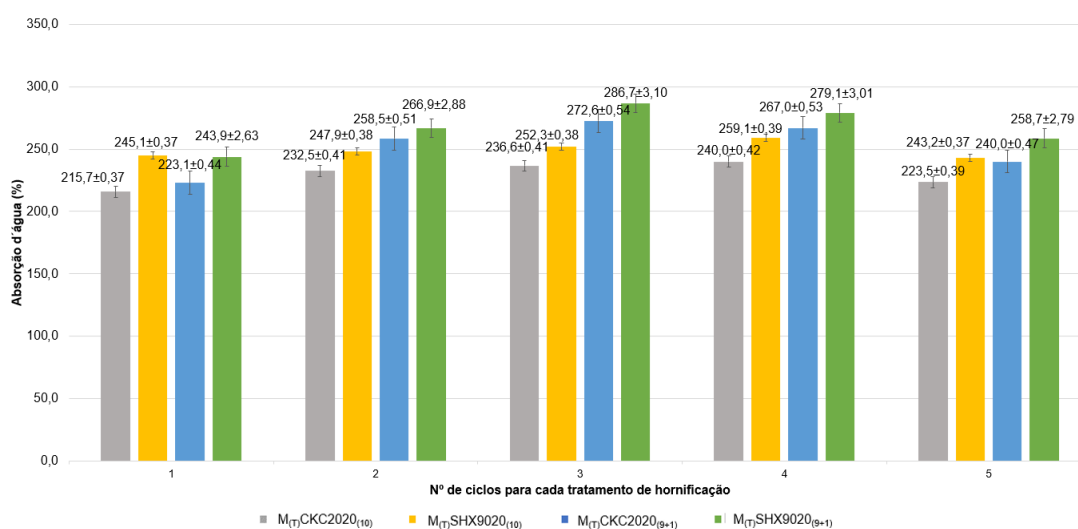
ZHAO, H. et al. Experimental study of enhanced phosphogypsum carbonation with ammonia under increased CO₂ pressure. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 11, p. 10–19, 2015. doi:10.1016/j.jcou.2014.11.004

APÊNDICE A – Detalhamento resultados de absorção de água

A fim de melhorar a visualização dos resultados das amostras de compósitos para cada ciclo de molhagem e secagem foi necessário ampliar o gráfico apresentado durante o trabalho escrito.

A Figura 66 apresenta os resultados para os cinco primeiros ciclos de molhagem e secagem das amostras.

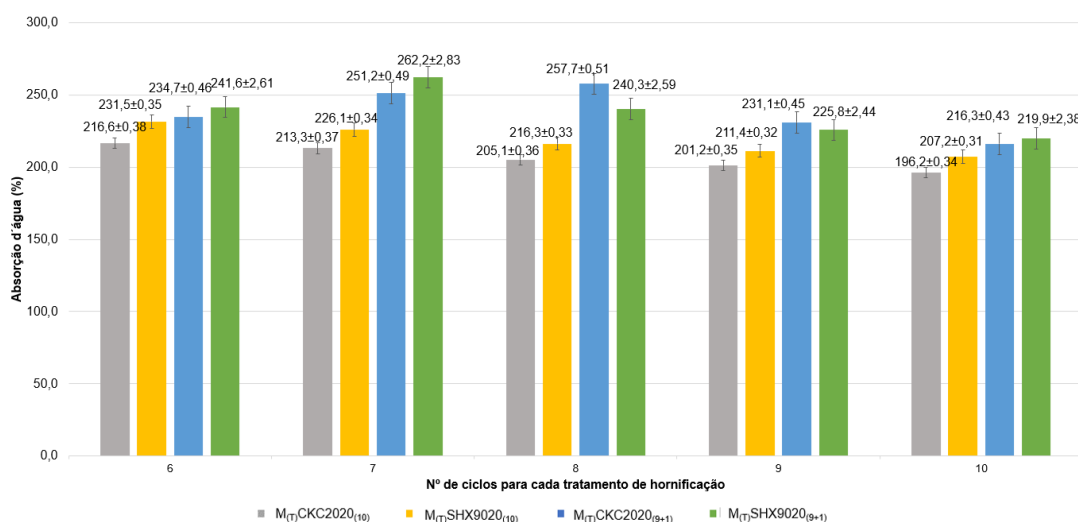
Figura 66. Resultados de absorção de água para os 5 primeiros ciclos



Fonte. Autora.

A Figura 67 apresenta os resultados para os cinco últimos ciclos de molhagem e secagem das amostras.

Figura 67. Resultados de absorção de água para os 5 últimos ciclos



Fonte. Autora.

ANEXO 1 – Avaliação à flamabilidade horizontal

A norma NBR 14.892:2018 determina a classificação dos materiais a partir do grau de flamabilidade para cada corpo de prova, usando os seguintes termos:

a) Não combustível:

Tipo A: material não queima ou apaga-se quando a chama não está em contato com o bico de Bunsen;

b) Autoextinção:

Tipo B: o material queima e a combustão para antes que a chama atinja o primeiro traço-referência;

Tipo C: o material queima e para de queimar menos de 60 segundos após o início da cronometragem, e não queima mais de 50 mm do primeiro traço-referência;

Tipo D: o material queima e a chama apaga entre os dois traços-referência, exceto o caso anterior;

c) Combustível:

Tipo E: a combustão continua até o segundo traço-referência.