

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

ESTUDO DO USO DE COMPÓSITO DE GESSO E FIBRA DE SISAL COMO
ISOLAMENTO TÉRMICO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.

Carolina del Pilar Carvalho Pinto

Salvador
2018

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

ESTUDO DO USO DO COMPÓSITO DE GESSO E FIBRA DE SISAL COMO
ISOLAMENTO TÉRMICO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.

Carolina del Pilar Carvalho Pinto

Dissertação apresentada ao **PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
CIVIL** como requisito parcial à obtenção do
título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Fernandes Carvalho.

Agência Financiadora: Capes.

Salvador

2018

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

Carvalho Pinto, Carolina del Pilar

Estudo do compósito de gesso e fibra de sisal como
isolamento térmico na construção civil / Carolina del
Pilar Carvalho Pinto. -- Salvador, 2018.

144 f. : il

Orientador: Ricardo Fernandes.

Dissertação (Mestrado - Mestrado - Programa de Pos-
graduação em Engenharia Civil) -- Universidade Federal
da Bahia, Universidade Federal da Bahia, Escola
Politecnica, 2018.

1. Compósitos. 2. Gesso. 3. Sisal. 4. Desempenho
térmico. I. Fernandes, Ricardo. II. Título.

DEDICATÓRIA

“A meus pais
por sempre cultivarem
e regarem a semente
que estava dentro de mim.”

“Hasta el cielo y más 10.”

FORMAÇÃO DO CANDIDATO

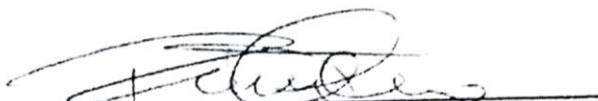
Arquiteta, formada pela Universidad Central de Chile (2010)

“O importante não é atingir o sonho, o importante é o caminho percorrido para atingir o sonho.”

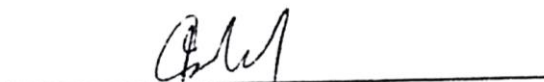
Anônimo.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE
CAROLINA DEL PILAR CARVALLO PINTO
APRESENTADA AO Mestrado EM ENGENHARIA CIVIL, DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DA BAHIA, EM 18 DE DEZEMBRO DE 2018.

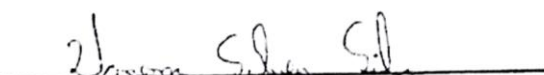
BANCA EXAMINADORA



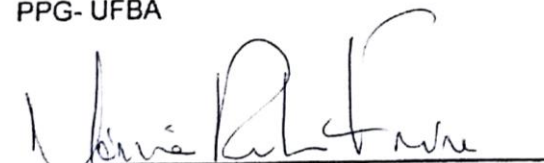
Prof.(a) Dr.(a) **Ricardo Fernandes Carvalho**
Orientador
PPEC - UFBA



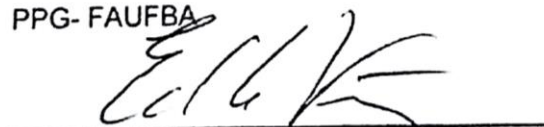
Prof.(a) Dr.(a) **Francisco Gabriel Santos Silva**
PPEC-UFBA



Prof.(a) Dr.(a) **Vanessa Silveira Silva**
PPG- UFBA



Prof.(a) Dr.(a) **Márcia Rebouças Freire**
PPG- FAUFBA



Prof.(a) Dr.(a) **Eduardo Leite Krüger**
PPG- UTFPR

AGRADECIMENTOS

A mi familia chilena que siempre está presente en mi día a día, que me regaló grandes valores, a respetar, una forma de vivir y de disfrutar la vida.

Le agradezco infinitamente a mis padres y hermanos por apoyar mis decisiones incondicionalmente. Sin ustedes nada de esto sería posible, son la fundación más resistente a cualquier terremoto.

Específicamente quiero agradecerle a mis padres por enseñarme lo que es un hogar y su importancia, independiente de lo que hay dentro de él.

También a mis sobrinos, que me recuerdan día a día que el niño que llevamos dentro debemos cuidarlo y mantenerlo.

A mi familia brasileña por crear un lugar seguro para convivir y por acogerme. Caro gracias por la paciencia y constancia.

A los que forman parte del camino Marquitos, Nanda, Rodrigo y Mab.

Al profesor Ricardo, por creer en las ideas, por ayudar a que se conviertan en realidad y por colocarlas en práctica. Y a todas las personas que son parte del grupo de investigación y que ayudaron a que todo sea posible.

A mi ahijado, pequeño, gracias por regalarme un poco de tu felicidad cada vez que nos encontramos.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo analisar um material compósito tipo sanduiche conformado por gesso e manta de sisal para substituir os materiais convencionais utilizados para isolamento térmico na construção civil aplicado em forros para uso em residências de interesse social em Salvador. Os materiais constituintes permitem criar três tipologias de compósitos a partir da combinação em camadas, sendo obtidas as configurações: gesso-manta-gesso, gesso-manta-manta-gesso e gesso-manta-gesso-manta-gesso. As pesquisas indicam que os compósitos com fase matriz de gesso e fase reforço em fibra de sisal têm uma ligação interfacial que providencia boa resistência física e mecânica. No entanto, existe uma lacuna no conhecimento do comportamento térmico dos materiais constituintes segundo os requisitos de transferência de calor das normas vigentes: NBR 15575:2013 e NBR 15220:2005. Nesta pesquisa, a análise dos compósitos se desenvolve a partir do estudo das propriedades térmicas e do comportamento térmico ao serem submetidos a uma fonte de calor. O comportamento térmico está influenciado pelos mecanismos de transferência de calor no interior do material e pelas propriedades térmicas intervientes como a condutividade térmica, calor específico, capacidade térmica, resistência térmica e atraso térmico. A partir da análise das propriedades térmicas foram realizados monitoramentos e simulações computacionais em *test-cells* que permitiram identificar o comportamento térmico do material aplicado como forro. Entre os resultados obtidos, os compósitos aumentam a capacidade térmica, o calor específico e resistência térmica, diminuindo a transmitância térmica do gesso. No entanto, os compósitos gesso-manta-gesso e gesso-manta-manta-gesso apresentam o melhor desempenho térmico das amostras avaliadas. Através do monitoramento *in loco* e as simulações computacionais, o compósito gesso-manta-gesso é o material com melhor comportamento térmico para as *test-cell* avaliadas.

Palavras chaves: Compósito, Gesso, Sisal, Desempenho térmico.

ABSTRACT

The aim of this work is to analyze a composite material made of gypsum and sisal nonwoven to replace conventional materials used for thermal insulation in ceilings at a social housing at civil engineering applied to ceilings for use in residences of social interest in Salvador. The gypsum and sisal nonwoven allow creating layered composites with three types of combination, obtaining the following configurations: gypsum-nonwoven- gypsum, gypsum - nonwoven -nonwoven- gypsum and gypsum - nonwoven - gypsum - nonwoven - gypsum. Several researches indicate that composites with gypsum matrix and sisal fiber as reinforcement have an interfacial bond that provides good physical and mechanical resistance. However, there is a gap in the knowledge of the thermal behavior of the constituent materials according to the heat transfer requirements of the current standards: NBR 15575: 2013 and NBR 15220: 2005. In this research, the analysis of the composites is developed by the study of thermal properties and thermal behavior when they are submitted to a heat source. Thermal behavior is influenced by the heat transfer mechanisms inside the material and by the thermal properties such as thermal conductivity, specific heat, thermal capacity, thermal resistance and thermal delay. From the analysis of the thermal properties, we carried out monitoring and computational simulations of test-cells that allowed identifying the thermal behavior of each material applied as ceiling.

Among the obtained results, the composites increase the thermal capacity, the specific heat and thermal resistance, reducing the thermal transmittance of the gypsum. However, the composite gypsum-manta-gypsum and gypsum-mantle-mantle-gypsum present the best thermal performance of the evaluated beads. Through in situ monitoring and computational simulations, the composite gypsum-mantle-gypsum is the material with the best thermal behavior for the evaluated test-cells.

Keywords: Composite, Gypsum, Sisal, Thermal performance.

SUMÁRIO

	Pág.
BANCA EXAMINADORA	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMENTOS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
SUMÁRIO	x
ÍNDICE DE TABELAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xix
1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Objetivos	22
1.2 Hipótese	23
2 REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1 Comportamento térmico dos materiais.....	24
2.1.1 <i>Conforto térmico</i>	24
2.1.2 <i>Problemas térmicos na construção civil</i>	25
2.1.3 <i>Mecanismos de transferência de calor</i>	26
2.1.4 <i>Análise térmica</i>	31
2.1.5 <i>Comportamento térmico dos materiais cerâmicos</i>	40
2.2 Materiais compósitos.....	42
2.2.1 <i>Fase matriz de gesso</i>	45
2.2.2 <i>Fase reforço em mantas de fibras vegetais</i>	50
2.2.3 <i>Aderência entre a fase matriz e a fase reforço</i>	54
2.2.4 <i>Comportamento térmico dos compósitos reforçados com fibras</i>	55
3 METODOLOGIA	60
3.1 Programa experimental	60
3.2 Planejamento dos experimentos	62
3.3 Materiais.....	64

3.3.1	<i>Manta de sisal</i>	64
3.3.2	<i>Conformação da pasta de gesso</i>	65
3.4	Métodos.....	65
3.4.1	<i>Etapa 1: Desenvolvimento dos compósitos</i>	66
3.4.2	<i>Etapa 2: Avaliação dos compósitos: Transferência de calor e propriedades térmicas</i>	72
3.4.3	<i>Etapa 3: Simulação das test-cells: in loco e software</i>	87
4	RESULTADOS	94
4.1	Caracterização dos materiais constituintes	94
4.2	Análise das propriedades no estado fresco.....	94
4.3	Análise das propriedades no estado endurecido.....	97
4.4	Análise da transferência de calor nos compósitos	102
4.5	Análise das propriedades térmicas dos compósitos.....	105
4.6	Análise das medições <i>in loco</i> e das simulações computacionais das <i>test-cells</i>	119
5	CONCLUSÕES	126
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS E LIMITAÇÕES	128
7	REFERÊNCIAS	129

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1. Avaliação do desempenho térmico para verão.	38
Tabela 2. Avaliação do desempenho térmico para inverno.	39
Tabela 3. Requisitos para vedações externas segundo a NBR 15575.	39
Tabela 4. Propriedades das fibras de Coco e Sisal.	51
Tabela 5. Resumo de trabalhos científicos sobre simulações <i>in loco</i>	58
Tabela 6. Resumo das propriedades analisadas durante a pesquisa.	63
Tabela 7. Condutividade térmica do <i>drywall</i> , forro em PVC e granito.	80
Tabela 8. Resultados de perda de massa na água.	83
Tabela 9. Resultado do gesso endurecido sem aditivo submerso em vaselina líquida e álcool.	84
Tabela 10. Resultados do gesso endurecido sem aditivo submerso em água destilada.	85
Tabela 11. Resultados para gesso endurecido sem aditivo submerso em álcool e álcool gel.	86
Tabela 12. Configurações <i>test-cells</i>	89
Tabela 13. Período de monitoramento do modelo.	92
Tabela 14. Propriedades físicas do gesso em pó.	94
Tabela 15. Propriedades físicas da manta de sisal.	94
Tabela 16. Resultados de consistência normal para pastas de gesso.	95
Tabela 17. Tempo de pega das pastas de gesso.	96
Tabela 18. Espalhamento da pasta de gesso.	97
Tabela 19. Dureza da pasta de gesso.	97

Tabela 20. Resistência à compressão da pasta de gesso.	98
Tabela 21. Comportamento do gesso endurecido na flexão.	100
Tabela 22. Resumo resultados ensaio flexão.	101
Tabela 23. Resultados condutividade térmica a 40°C.	105
Tabela 24. Resultados condutividade térmica a 60°C.	106
Tabela 25. Resultados condutividade térmica a 80°C.	106
Tabela 26. Resultados do calor específico a 40°C.	107
Tabela 27. Resultados do calor específico a 60°C.	108
Tabela 28. Resultados do calor específico a 80°C.	110
Tabela 29. Capacidade calorífica das amostras a 40°C;	115
Tabela 30. Capacidade calorífica das amostras a 60°C.	115
Tabela 31. Capacidade calorífica das amostras a 80°C.	115
Tabela 32. Atraso térmico das amostras a 40°C.	116
Tabela 33. Atraso térmico das amostras a 60°C.	117
Tabela 34. Atraso térmico das amostras a 80°C.	117
Tabela 35. Resumo propriedades térmicas.	119
Tabela 36. Resumo dados medidos in loco e simulados.	125
Tabela 37. Comportamento do gesso endurecido sem aditivo na flexão.	137
Tabela 38. Comportamento do gesso com 1% de aditivo na flexão.	137
Tabela 39. Resultados ensaio flexão compósito GMG	137
Tabela 40. Resultados ensaio flexão compósito GMMG	138
Tabela 41. Resultados ensaio flexão compósito GMGMG.	138
Tabela 42. Resultados condutividade térmica a 40°C do gesso com 1% de aditivo.	139

Tabela 43. Resultados condutividade térmica a 40°C do GMG.	139
Tabela 44. Resultados condutividade térmica a 40°C do GMMG.	139
Tabela 45. Resultados condutividade térmica a 40°C do GMGMG.	140
Tabela 46. Resultados condutividade térmica a 60°C do gesso com 1% de aditivo.....	140
Tabela 47. Resultados condutividade térmica a 60°C do GMG.	140
Tabela 48. Resultados condutividade térmica a 60°C do GMMG.	141
Tabela 49. Resultados condutividade térmica a 60°C do GMGMG.	141
Tabela 50. Resultados condutividade térmica a 80°C do gesso com 1% de aditivo.....	141
Tabela 51. Resultados condutividade térmica a 80°C do GMG.	142
Tabela 52. Resultados condutividade térmica a 80°C do GMMG.	142
Tabela 53. Resultados condutividade térmica a 80°C do GMGMG.	142
Tabela 54. Resultados do calor específico a 40°C do gesso com 1% de aditivo.	143
Tabela 55. Resultados do calor específico a 40°C para GMG.....	143
Tabela 56. Resultados do calor específico a 40°C para GMMG.....	143
Tabela 57. Resultados do calor específico a 40°C para GMGMG.....	144
Tabela 58. Resultados do calor específico a 60°C do gesso com 1% de aditivo.	144
Tabela 59. Resultados do calor específico a 60°C para GMG.....	144
Tabela 60. Resultados do calor específico a 60°C para GMMG.....	145
Tabela 61. Resultados do calor específico a 60°C para GMGMG.....	145

Tabela 62. Resultados do calor específico a 80°C do gesso com 1% de aditivo.	145
Tabela 63. Resultados do calor específico a 80°C para GMG.....	146
Tabela 64. Resultados do calor específico a 80°C para GMMG.....	146
Tabela 65. Resultados do calor específico a 80°C para GMGMG.....	146

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Radiação térmica.	27
Figura 2. Convecção térmica.	29
Figura 3. Condução térmica.	30
Figura 4. Mecanismos de transferência de calor.....	31
Figura 5. Zoneamento bioclimático do Brasil.	37
Figura 6 e 7. Tensões de compressão e tração superficiais.	40
Figura 8. Classificação fase matriz e fase reforço nos compósitos.....	42
Figura 9. Classificação dos materiais cerâmicos.	43
Figura 10. Composição materias fitogêneos.	44
Figura 11. Classificação das fibras.	44
Figura 12. a) Cristais gesso α . b) Cristais gesso β	45
Figura 13. Ligações de hidrogênio	48
Figura 14. TG e DTG para o gesso endurecido.	49
Figura 15. Mecanismos de transferência de calor no gesso padrão.	50
Figura 16. TG e DTG da manta de sisal.	52
Figura 17. DSC para a manta de sisal.	53
Figura 18. Delineamento das etapas da pesquisa.	60
Figura 19. Nomenclatura das amostras.	62
Figura 20. Manta de sisal.....	65
Figura 21. Esquema das condições de ensaio.....	66
Figura 22. Conformação dos compósitos.....	67
Figura 23. Ensaio de tempo de pega.	69

Figura 24. Ensaio <i>minislump</i>	69
Figura 25. a) Ensaio de compressão, b) Ensaio de dureza.	70
Figura 26. Esquema dos apoios para ensaio para flexão de quatro pontos. ...	71
Figura 27. Mecanismos de transferência de calor no GMG.	72
Figura 28 e 29. Mecanismos de transferência de calor no GMMG e GMGMG.	74
Figura 30. Equipamento de ensaio de MEV.	75
Figura 31. Montagem do conjunto.	76
Figura 32. Planta nível placa fria.	77
Figura 33. Planta nível placa quente.	77
Figura 34. Equipamentos e montagem do equipamento para ensaio.	78
Figura 35. Imagem térmica do compósito.	79
Figura 36. Comparativo dos resultados do ensaio e os dados da norma.	81
Figura 37. Setup ensaio de calor específico.	82
Figura 38. Corpos de prova de gesso padrão.	82
Figura 39. Imagem ilustrativa da <i>test-cells</i>	87
Figura 40. Localização das <i>test-cells</i>	88
Figura 41. <i>Test-cell</i> no terreno.	88
Figura 42. Planta e corte da <i>test cell</i>	90
Figura 43. Fachada leste e norte da <i>test-cell</i>	90
Figura 44. Orientação das <i>test-cells</i>	91
Figura 45. Monitoramento da <i>test cell</i>	92
Figura 46. Tempo de pega das pastas de gesso.	96
Figura 47. Ensaio de compressão.	98
Figura 48. Curva típica do gesso com e sem aditivo.	99

Figura 49. Curvas típicas para os compósitos.	100
Figura 50. Relação do módulo de elasticidade com teor de fibra.....	102
Figura 51 e 52. MEV das mantas de sisal e a matriz de gesso.	103
Figura 53 e 54. Falhas de aderência entre a manta de sisal e a matriz de gesso.	104
Figura 55. Aderência manta de sisal.....	104
Figura 56. Troca de calor das amostras a 40°C.....	108
Figura 57. Troca de calor das amostras de G e GMG a 60°C.....	109
Figura 58. Troca de calor das amostras de GMMG e GMGMG a 60°C.	109
Figura 59. Troca de calor das amostras a 80°C.....	111
Figura 60. Comparativo da resistência térmica das amostras.....	112
Figura 61. Comparativo da transmitância térmica das amostras.	113
Figura 62. Comparativo da capacidade térmica das amostras.	116
Figura 63. Comparativo do atraso térmico das amostras.....	118
Figura 64. Esquema <i>test-cell</i> 1.....	120
Figura 65. Resultados obtidos para vedações da <i>test-cell</i> 1.....	120
Figura 66. Esquema <i>test-cell</i> 2.....	121
Figura 67. Resultados obtidos para o forro da <i>test-cell</i> 2.....	122
Figura 68. Esquema <i>test-cell</i> 3.....	123
Figura 69. Resultados obtidos para o forro da <i>test-cell</i> 3.....	123
Figura 70. Esquema <i>test-cell</i> 4.....	124
Figura 71. Resultados obtidos para o forro da <i>test-cell</i> 4.....	124

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Área de superfície ou do corpo de prova.
ASTM	American Society for Testing and Materials Standards.
C	Calor específico
c_i	Calor específico da camada interna do material.
C_t	Capacidade térmica da camada interna do material.
D	Dureza do material.
Q	Quantidade de energia.
Q_k	Fluxo de calor.
T	Temperatura.
e	Espessura do material.
e_i	Espessura da camada interna do material.
λ	Condutividade térmica.
MF	Módulo de finura.
Mu	Massa unitária.
R_i	Resistência térmica da camada interna do material.
R	Resistência térmica do material.
t	Tempo
TGA	Análise termogravimetria.
W'	Quantidade de energia emitida pelo corpo.
W	Quantidade de energia emitida pelo corpo negro.
φ	Atraso térmico.
ρ	Densidade.
μ	Massa específica do material.
ϕ	Diâmetro da esfera.
P_{rad}	Radiação térmica.
P_{cond}	Condutividade térmica.
P_{conv}	Convecção térmica.
σ	Constante de Stefan - Boltzmann.
ε	Emissividade.

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil enfrenta desafios relativos ao desempenho térmico das construções que se refletem no conforto dos ambientes construídos e na qualidade de vida dos usuários. Uma forma de controlar esta problemática térmica são os novos materiais e soluções construtivas sustentáveis e eficientes que permitem reduzir a geração de resíduos e diminuir o consumo de energia para o resfriamento e calefação (BRAIEK *et al.*, 2017; CHERKI *et al.*, 2014).

Os problemas térmicos têm concentrado a preocupação nos materiais utilizados como isolantes térmicos e nas soluções dos projetos arquitetônicos, os quais precisam atingir requisitos associados à vida útil, adaptabilidade, manutenção, versatilidade arquitetônica e desempenho ambiental (SILVA *et al.*, 2004). No Brasil, o comportamento térmico dos materiais está regulamentado pelas normas NBR 15575:2013 e a NBR 15220:2005 que permitem avaliar a transferência de calor dos materiais e componentes construtivos, assim como as suas propriedades térmicas de acordo com os fatores climáticos do território brasileiro com o intuito de adequar os materiais ao uso de um sistema construtivo destinado a cumprir uma função específica.

Os requisitos necessários aos materiais têm impulsionado pesquisas para novos materiais e aplicações como os compósitos, constituídos por dois ou mais materiais com duas fases distintas e com propriedades físicas, químicas ou mecânicas significativamente diferentes. Diversos trabalhos científicos desenvolveram compósitos conformados por uma matriz cerâmica e reforço com fibras vegetais, com o intuito de aumentar a deformação plástica dos materiais cerâmicos, mas com incertezas no comportamento térmico do material que tem inviabilizado determinadas aplicações na construção civil para o uso como material isolante.

Entre os materiais cerâmicos mais antigos e de maior uso na construção civil é o gesso, descoberto originalmente na Síria em 8.000a.C., sendo utilizado como rebocos para o apoio de afrescos decorativos, na preparação de solo e na fabricação de recipientes. Inclusive, foram

descobertas também escavações em Jericó (Palestina) para a construção de Pirâmides durante a 4ª Dinastia em 2800 a.C., considerado um dos vestígios mais antigos do uso de gesso na construção. O gesso foi difundido como um material para construção com a invasão romana na França e na Península Ibérica, potencializado pelos renascentistas e o barroco. No século XVIII, surgem os primeiros trabalhos científicos de Lavoisier, Van't Hoff e de Le Chatelier que abordam a desidratação da gipsita (DIAS, 2008).

O Brasil possui a maior reserva mundial de gipsita, considerado o 13º maior produtor mundial com 3,4 milhões de toneladas aproximadamente, sendo o maior produtor da América do Sul. No Brasil, a gipsita (matéria prima do gesso) é explorada principalmente em Pernambuco, cuja participação na exploração abrangem 84,3% do total produzido em 2013, seguido pelo Maranhão com 10,4% (MUNIZ e RAMOS, 2015).

O crescente uso do gesso tem sido atribuído às propriedades como a resistência ao fogo, isolamento térmico e acústico, menor retração e baixo custo comparado ao cimento e cal. No entanto, o gesso é um material que apresenta uma fratura frágil que ocorre pela propagação de trincas com muita velocidade e com uma pequena deformação plástica. Uma forma de controlar a propagação das trincas e aumentar a deformação plástica é a adição de fibras no interior do gesso, conformando um material compósito.

No entanto, os materiais compósitos com matriz de gesso reforçados com fibras vegetais têm contribuído com diversas pesquisas através do uso de fibras como sisal, coco, bambu, entre outras. A fibra de sisal, da família botânica *Agave sisalana* Perr, tem uma alta produção no Brasil, representando 56% da produção mundial, concentrando 93,5% desta produção no Semiárido da Bahia. A fibra de sisal tem um papel importante no desenvolvimento sócio-econômico, já que é um material de fácil acesso, oriundo de pequenos produtores rurais locais, maior empregador de mão de obra no território (BRANDÃO, 2015).

No Brasil, as fibras de sisal estão disponíveis como fios, cordões, cordéis, cordas e mantas. As mantas de sisal são não tecidos constituídos pela sobreposição de um ou mais véus orientados ao acaso e não consolidados que

apresentam algumas vantagens como biodegradabilidade, procedência de fontes renováveis, menor densidade, abundância, custo, bom isolante térmico e acústico. No entanto, o gesso também apresenta vantagens que são potencializadas ao conformar o compósito como adaptabilidade a baixas e altas temperaturas, comportamento mecânico, baixo custo e estética (AMICO, 2010; MALKAPURAM *et al.*, 2009; YU e BROUWERS, 2012)

Assim, o compósito está conformado por uma fase matriz de gesso e uma fase reforço em manta de sisal, através da conformação do material em camadas que permitiu explorar o comportamento térmico dos materiais. Portanto, o primeiro passo consiste em abordar a influência da manta de sisal no comportamento térmico dos compósitos de gesso. Considerando a manta como uma barreira de absorção de energia intermediária do material que dificulta a transferência de calor.

Maior ênfase será atribuída para as respostas aos meios de transferência de calor e as propriedades térmicas dos compósitos quando submetidos a diferentes temperaturas, através do entendimento dos requisitos apresentados pelas normas vigentes que influenciam a escolha dos materiais no espaço construído. Paralelamente, será avaliado o comportamento térmico dos compósitos, a partir do monitoramento *in loco* e por simulações computacionais de uma residência de interesse social.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência no comportamento térmico de diferentes configurações do material composto por gesso e manta de sisal, moldados em diferentes sequências de camadas, contribuindo para o conforto térmico de projetos residenciais de interesse social. Para atender o objetivo geral, foram desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver os compósitos através de camadas de gesso e manta de sisal, com diferentes teores de fibras de sisal aplicados em forros para o uso como isolamento térmico em Salvador.

- Caracterizar os materiais constituintes e analisar as propriedades no estado fresco e endurecido.
- Investigar o comportamento térmico dos compósitos através da análise das propriedades térmicas e da transferência de calor do material.
- Realizar e comparar os resultados monitorados nas *test-cells* em relação às temperaturas simuladas no software Energyplus permitindo avaliar o comportamento térmico dos materiais aplicados como forro em uma residência de interesse social em Salvador.

1.2 Hipótese

A pesquisa se desenvolve a partir da hipótese: o material compósito de gesso com manta de sisal apresenta melhor comportamento térmico que os materiais convencionais, contribuindo ao conforto térmico de edificações.

- As camadas alternadas e o aumento de teor de fibras de sisal irá melhorar o comportamento térmico dos compósitos aplicados como forro.
- Os materiais constituintes apresentam propriedades satisfatórias para a conformação dos compósitos.
- Os compósitos melhoram as propriedades térmicas do gesso e dificultam a transferência de calor.
- Os resultados monitorados nas test-cell são similares às temperaturas simuladas no software Energyplus. O comportamento térmico dos compósitos aplicados como forro melhora o comportamento apresentado pelo gesso em Salvador, atingindo os requisitos térmicos apresentados pela NBR 15575:2013 e ABNT 15220:2005.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O desempenho térmico se caracteriza pelo comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas quando comparados com os requisitos apresentados pelas normas vigentes, com o intuito de atingir o conforto térmico.

Muitos dos processos que envolvem o conforto térmico estão associados as aplicações práticas no desenho de projeto (bioclimatologia, geometria solar e forma do projeto arquitetônico), nas soluções passivas (para paredes, piso, teto e forro, proteções solares, entre outros) e na escolha de materiais.

2.1 Comportamento térmico dos materiais

2.1.1 *Conforto térmico*

A American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers define o conforto térmico como o estado da mente que expressa a satisfação do homem com o ambiente que o circunda (ASHARE, 2017). Portanto, a arquitetura, os materiais e os sistemas construtivos para a execução do projeto arquitetônico devem resultar em condições térmicas que atinjam o conforto térmico.

O conforto térmico depende de diversas condições tanto do indivíduo como ambientais. Entre as variáveis relacionadas com o indivíduo estão: a vestimenta, as atividades realizadas, sexo, idade, biotipo, saúde, entre outras. Já as variáveis do ambiente são determinadas pelo clima como: as variações diárias e anuais de temperatura, radiação solar incidente, velocidade do ar, precipitações atmosféricas e os índices médios de umidade relativa (BARROS e RAMOS, 2005).

Para dar resposta a estas variáveis, existem dois tipos de soluções construtivas: passivas e ativas. As soluções passivas se caracterizam pela utilização de estratégias como: a implantação do projeto arquitetônico, a forma do volume edificado, a distribuição dos espaços, aproveitamento do clima local,

localização e tamanho das esquadrias, proteções, o dimensionamento dos elementos construtivos e a definição dos materiais segundo sua inércia térmica. Quando as estratégias passivas não atingem o conforto térmico, são consideradas as soluções ativas que permitiram climatizar o ambiente construído.

2.1.2 Problemas térmicos na construção civil

A construção civil se caracteriza pelo alto consumo de energia, sendo que o maior consumo por setor no Brasil é do setor residencial com 10% do consumo de energia nacional, do qual 45% da energia utilizada é de origem elétrica (BEN, 2017). O consumo de energia elétrica residencial está distribuído na climatização dos ambientes, aquecimento de água, iluminação e em equipamentos eletrônicos.

O alto consumo de energia na fase de uso deve-se em parte ao uso padronizado dos materiais na construção civil, surgindo respostas construtivas iguais para diferentes variáveis climáticas no território brasileiro, desconsiderando as trocas de calor que impedem alcançar o conforto térmico.

As trocas de calor dentro das edificações acontecem através das vedações, esquadrias, coberturas, pisos e forros. Estas trocas térmicas ocorrem simultaneamente de duas formas: as concepções do projeto arquitetônico, a troca de calor por renovação de ar, a troca de calor por transferência nas superfícies das vedações externas e internas e a especificação dos materiais construtivos. Esta última corresponde às trocas de calor geradas pela especificação inadequada dos materiais utilizados principalmente como isolamento térmico e que afetam na perda de calor por transferência térmica nas superfícies do volume edificado (BARROS e RAMOS, 2005).

O material isolante térmico tem o objetivo de dificultar a transferência de calor entre dois ambientes, devendo providenciar conforto no ambiente construído, mantendo estável a temperatura entre ambientes, retardando as variações térmicas diárias e as trocas de calor. Paralelamente, o material utilizado para isolamento térmico deve diminuir o consumo energético,

reduzindo a potência demandada dos equipamentos encarregados de esfriar o ambiente no verão e esquentar o ambiente no inverno, diminuindo o uso de energia utilizado em aparelhos de aquecimento e refrigeração, assim como eliminar as condensações e as umidades interiores que podem proliferar doenças e agentes como mofo (MASSÓ *et al.*, 2012).

Os materiais utilizados para isolamento térmico são fundamentais na construção de edifícios exigindo soluções projetuais, econômicas e com eficiência energética para cada clima. Portanto, o material deve atender as exigências, requisitos e as propriedades térmicas que determinarão seu comportamento térmico para um clima determinado.

2.1.3 *Mecanismos de transferência de calor*

A energia térmica é transmitida sempre que existe um gradiente de temperatura no interior de um sistema ou quando dois sistemas com diferença de temperatura estão em contato, atendendo ao equilíbrio térmico. Os sistemas apresentam uma tendência ao equilíbrio térmico, já que estão constantemente transferindo calor para atingir a mesma temperatura. A energia térmica consiste na energia cinética e potencial relacionado aos movimentos aleatórios dos átomos e moléculas no interior do sistema. Esta energia transferida é chamada de calor e o processo pelo qual é transmitida entre os sistemas é chamado de transferência de calor (WALKER *et al.*, 2010; KREITH *et al.*, 2014; SARTORI, 2009)

Todos os processos de transferência de calor envolvem a transferência e conversão da energia térmica num período de tempo. Desta forma, devem obedecer à primeira lei de termodinâmica que estabelece que a energia não possa ser criada ou destruída, só muda de uma forma para outra (KREITH *et al.*, 2014; POTTER e SCOTT, 2007). Portanto, o calor é transmitido através de três mecanismos: condução, radiação e convecção. Os mecanismos atuam de forma simultânea, portanto, quando um dos mecanismos domina quantitativamente, os outros mecanismos não poderão ser desprezados.

a) Radiação

Os mecanismos de radiação são todos os fenômenos de transferência de energia através de ondas eletromagnéticas que resultam da diferença de temperatura entre sistemas, ainda que exista vácuo entre eles. Quando as ondas eletromagnéticas encontram um sistema com baixas temperaturas, o sistema absorve uma parte destas ondas na sua superfície (BARROS e RAMOS, 2005, KREITH *et al.*, 2014; WALKER *et al.*, 2010).

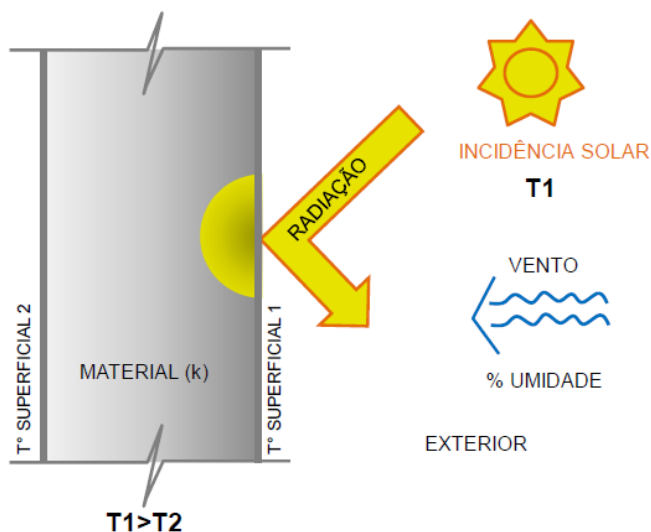
As taxas de radiação térmica absorvida pelos sistemas dependem da área e temperatura, dada por:

$$P_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T^4 \quad (1)$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), ε a emissividade da superfície do objeto, A é a área de transferência e T a temperatura do sistema.

A Figura 1 apresenta o mecanismo de radiação térmica em um sistema de vedação vertical. Quando a radiação solar atinge a face externa da vedação gera duas respostas: a radiação pode ser refletida ou absorvida. A quantidade de energia que será refletida ou absorvida está determinada pela temperatura e a natureza da superfície da vedação vertical.

Figura 1. Radiação térmica.



Fonte. Autor.

Quando a radiação térmica atinge a superfície, a reflexão da radiação pode ser regular ou difusa. A reflexão regular são as ondas refletidas de forma

semelhante ao ângulo de incidência da radiação. A reflexão difusa são as ondas refletidas em diversas direções ao atingir o sistema. Por exemplo, as superfícies polidas e lisas têm uma reflexão regular, no entanto, as superfícies rugosas, com asperezas, têm uma reflexão difusa (KREITH *et al.*, 2014; WALKER *et al.*, 2010).

b) Convecção

O mecanismo de convecção é um processo de transferência de energia pela condução de calor e armazenamento de energia do líquido ou um gás. Quando o líquido ou um gás recebe o fluxo de calor, existirá um aumento da temperatura interna, gerando uma expansão e movimentação as regiões com menor temperatura, as quais se deslocam pela diferença de densidade das partículas (KREITH *et al.*, 2014; WALKER *et al.*, 2010).

O mecanismo de convecção não depende da existência de uma diferença de temperatura, mas do transporte de massa. As taxas de convecção térmica entre uma superfície e um fluido são dadas por:

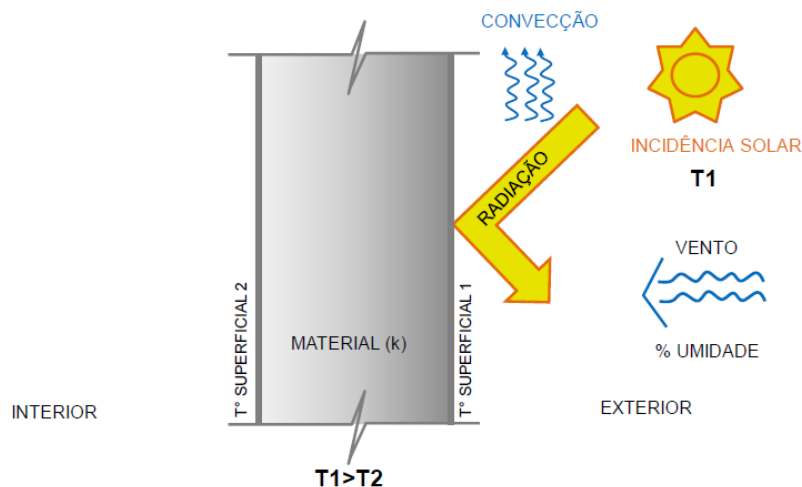
$$P_{conv} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (2)$$

Sendo h o coeficiente de película do meio, A área de transferência e ΔT o gradiente de temperatura entre a superfície do sistema e o fluido.

O coeficiente de película do meio está influenciado pela geometria e velocidade do sistema, propriedades físicas do fluido e o gradiente de temperatura.

A Figura 2 esquematiza o mecanismo de convecção térmica num sistema de vedação vertical. A superfície da vedação absorve a energia proveniente da radiação solar, portanto, quando a superfície entra em contato com o ar circundante, o ar recebe parte desta energia e sua temperatura aumenta, movimentando e afastando seus átomos e moléculas, aumentando seu volume e diminuindo sua densidade. O ar com menor densidade ascende e o ar mais frio e com maior densidade desce criando correntes de convecção com transporte de massa.

Figura 2. Convecção térmica.



Fonte. Autor.

c) Condução

A condução é um processo pelo qual o calor flui de uma região de alta temperatura para outra de temperaturas mais baixas dentro de meios sólidos. Neste processo, o fluxo de calor por condução é transmitido por meio de comunicação e deslocamento molecular, já que nas regiões com altas temperaturas, os elétrons e átomos vibram intensamente e transferem a energia através de colisões entre os átomos. Desta forma, a energia de uma região de altas temperaturas se propaga em direção das regiões de baixas temperaturas (KREIT *et al.*, 2014; WALKER *et al.*, 2010; SARTORI, 2009).

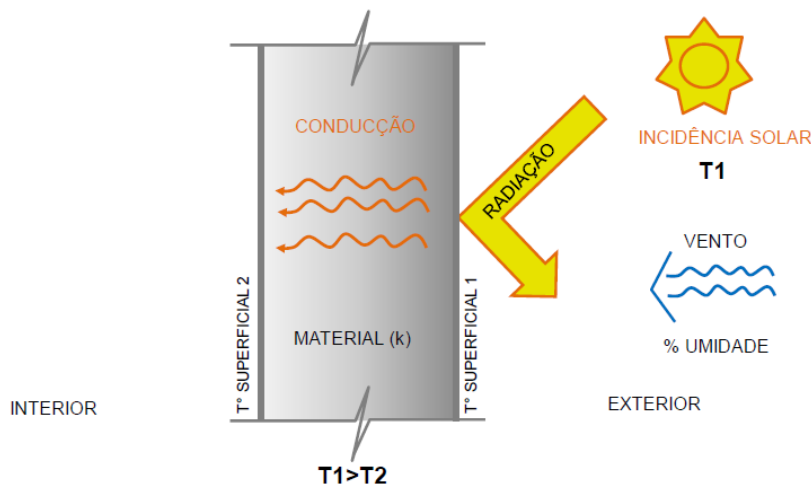
As taxas de condução térmica, a energia transferida num período de tempo, é dada por:

$$P_{cond} = Q \cdot t^{-1} \quad (3)$$

Onde Q é o fluxo de calor e t o período de tempo.

Na Figura 3, apresenta-se o mecanismo de condução térmica num sistema de vedação vertical. Quando a face externa da vedação absorve a radiação solar, ela conduz e distribui esta energia através do interior da vedação. A quantidade de energia que será conduzida pela vedação é determinada pela condutividade, resistência e transmitância térmica do material constituinte da vedação.

Figura 3. Condução térmica.



Fonte. Autor.

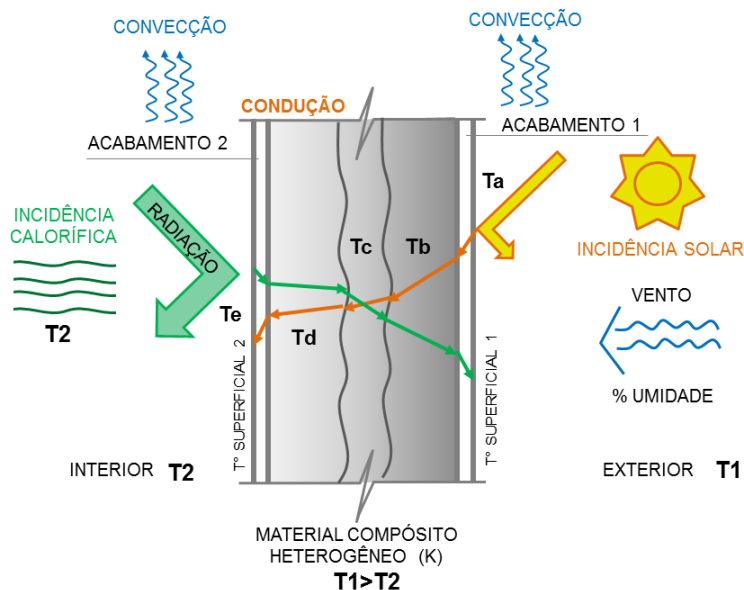
d) Combinação dos mecanismos de transferência de calor

Nos sistemas construtivos, o calor é transferido por camadas conectadas em série dentro de um sistema, ocorrendo a transferência de calor através de dois ou mais mecanismos paralelamente para cada camada.

Para simplificar a análise dos mecanismos de transferência de calor nos materiais é considerado que o ambiente se encontra em regime permanente com uma transferência unidimensional para sistemas homogêneos e heterogêneos. Portanto, se admite que o sistema esteja exposto a um fluxo de calor com temperatura constante conhecida que permite identificar as diversas temperaturas dos sistemas (KREIT *et al.*, 2014).

Na Figura 4, apresenta-se uma vedação vertical com uma camada externa exposta à radiação solar, seguida por três camadas intermediárias e uma outra camada externa exposta a uma fonte de calor artificial no interior do espaço construído. A temperatura externa ou da vizinhança $T2$ é maior que a temperatura do ambiente interno $T1$. Nestas condições, haverá dois fluxos de calor, sendo o primeiro proveniente da camada interna para o exterior e, o segundo proveniente da camada externa para o ambiente interior.

Figura 4. Mecanismos de transferência de calor.



Fonte. Autor.

A quantidade e direção do fluxo de calor que será transmitido pelas camadas são determinadas pelas propriedades térmicas e físicas dos materiais constituintes, assim como pelas condições climáticas como temperatura, ventos e umidade do ar.

2.1.4 Análise térmica

2.1.4.1 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas são a resposta de um material a troca de calor com o meio. Na atualidade, os materiais isolantes térmicos são utilizados como uma barreira à transferência de calor, seja como vedação vertical, piso, forro, entre outros. O uso dos materiais como isolante térmico permite criar uma barreira a partir de soluções construtivas que devem atingir níveis de conforto ambiental para o espaço construído.

Novas soluções construtivas requerem uma análise do comportamento térmico para os materiais isolantes, a partir de suas propriedades térmicas e os requerimentos apresentados pela NBR 15575:2013 e a NBR15220:2005, os quais dependem da taxa de fluxo de calor que atravessa uma superfície durante um intervalo de tempo (ABNT, 2003).

a) Condutividade térmica

De acordo com a NBR 15220:2005 a condutividade térmica é a propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1 watt por metro quadrado, quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro.

É uma propriedade que depende diretamente da transferência de calor por condução, analisada através da lei de Fourier, dada por (ARAUJO, 2017):

$$Q_k = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dt}{dx} \quad (4)$$

Sendo que Q_k é o fluxo de calor, λ a condutividade térmica da camada, A é a área de superfície transversal ao fluxo de calor, dt o gradiente de temperatura e dx o gradiente de espessura.

Segundo Callister (2002) os valores de condutividade térmica da maioria dos materiais cerâmicos diminuem com o aumento de temperatura, em relação a temperaturas inferiores a 1000°C aproximadamente, para posteriormente aumentar sua condutividade térmica a temperaturas elevadas. A diminuição da condutividade térmica inicial dos materiais cerâmicos se deve a porosidade dos materiais, conformados por ar estagnado que transferem o calor de forma lenta e ineficiente, portanto quanto mais poroso o material, menor sua condutividade térmica.

Quanto maior a condutividade térmica do material, maior será a transferência de calor pelo mecanismo de condução.

b) Calor específico.

O calor específico é o quociente da capacidade térmica pela massa. É calculado para camadas homogêneas e componentes heterogêneos a partir dos requisitos apresentados pela NBR 15220:2005, através da equação 5:

$$C = \frac{Ct}{m} \quad (5)$$

Sendo que C é o calor específico da camada, Ct a capacidade térmica da camada e m a massa específica da camada.

Quanto maior o valor para o calor específico do material, maior é a quantidade de calor que o material absorverá para incrementar a temperatura.

c) Resistência térmica.

A resistência térmica é a propriedade dos materiais e componentes em resistir à passagem de calor. De acordo com a NBR 15220:2005, esta propriedade é o quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário. Portanto, esta propriedade é derivada da condutividade térmica, podendo ser calculada a partir da caracterização de uma camada homogênea ou componentes heterogêneos

Para camadas homogêneas, a resistência térmica é dada por:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (6)$$

Sendo que e é a espessura da camada e λ a condutividade térmica da camada.

No caso de componentes heterogêneos conformados, é dada por:

$$R_t = \frac{Aa + Ab + \dots + An}{\frac{Aa}{Ra} + \frac{Ab}{Rb} + \dots + \frac{An}{Rn}} \quad (7)$$

Sendo que $R_a + R_b + \dots + R_n$ são as resistências térmicas da superfície de cada camada e $Aa + Ab + \dots + An$ são as áreas de cada camada.

Quanto maior a condutividade térmica da camada ou dos componentes, menor será sua resistência térmica e maior a transferência de calor. Os melhores isolantes térmicos se caracterizam por ter altos valores de resistência térmica.

d) Capacidade térmica.

A NBR 15575:2013 define a capacidade térmica como a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema.

É uma propriedade térmica derivada da condutividade térmica e do calor específico, podendo ser calculada para camadas homogêneas e componentes heterogêneos a través da equação 8 indicada pela NBR 15220:2005.

$$Ct = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot R_i \cdot c_i \cdot \rho_i = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad (8)$$

Sendo que λ é a condutividade térmica da camada, R_i a resistência térmica da camada, e_i a espessura da camada, c_i o calor específico da camada e ρ_i densidade de massa aparente da camada.

e) Transmitância térmica.

A NBR 15575:2013 define a transmitância térmica ou coeficiente global de transferência de calor como a transferência de calor num período de tempo numa área unitária de um material ou componente construtivo. A transmitância térmica é definida como o inverso da resistência térmica total, portanto, é uma propriedade derivada da condutividade térmica.

De acordo com a NBR 15220:2005, Esta propriedade é calculada para camadas homogêneas e componentes heterogêneos através do método de caixa quente protegida ou pela equação 9:

$$U = \frac{1}{R} \quad (9)$$

Sendo que R é a resistência térmica.

f) Inercia térmica.

A inercia térmica é a capacidade de reter parte do fluxo de calor no interior do material e após de um período de tempo liberar o calor absorvido preferencialmente para o exterior do recinto e não no interior. A inercia térmica está associada às propriedades de amortecimento e atraso da onda de calor durante o resfriamento ou aquecimento. Estas duas propriedades são função da densidade, espessura, condutividade e capacidade calorífica do material (BARROS, RAMOS, 2005).

g) Atraso térmico.

O atraso térmico é o tempo transcorrido entre uma variação térmica de um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transferência de calor. É uma propriedade derivada da condutividade térmica e do calor específico.

O atraso térmico para camadas homogêneas está determinado pela NBR 15220:2005 e é definida por:

$$\varphi = 1,382 \cdot e \sqrt{\frac{p \cdot c}{3,6 \cdot \lambda}} = 0,7284 \sqrt{R_t \cdot C_t} \quad (10)$$

Para componentes heterogêneos, o atraso térmico está dado por:

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \sqrt{B_1 + B_2} \quad (11)$$

Onde:

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_0}{R} \quad (12)$$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{R} \right) \left(Re_{xt} - \frac{R - Re_{xt}}{10} \right) \quad (13)$$

$$B_0 = C_t - C_{t_{ext}} \quad (14)$$

Sendo que R é a resistência térmica, φ o atraso térmico, e a espessura, λ a condutividade térmica da camada, ρ a densidade de massa aparente da camada, c o calor específico da camada, R_t a resistência térmica de superfície a superfície da camada, C_t a capacidade térmica da camada e $C_{t_{ext}}$ a capacidade térmica do elemento exterior.

O atraso térmico esta condicionado a inercia térmica dos materiais construtivos de cada camada que absorvem o fluxo de calor por um período de tempo de acordo com a massa térmica da sua composição.

É possível estabelecer uma relação preliminar entre as propriedades térmicas, quanto maior a massa especifica da camada, maior será sua condutividade térmica e sua transmitância térmica. No entanto, menor será o calor especifico a resistência térmica, capacidade térmica e o atraso térmico da camada.

2.1.4.2 Normas técnicas de desempenho

Para o desenvolvimento de novas tecnologias construtivas é necessário fiscalizar e avaliar seu desempenho. No Brasil, o desempenho térmico destas tecnologias e as necessidades de habitabilidade do espaço construído foram normatizados a partir da NBR 15220:2005 e a NBR 15575:2013.

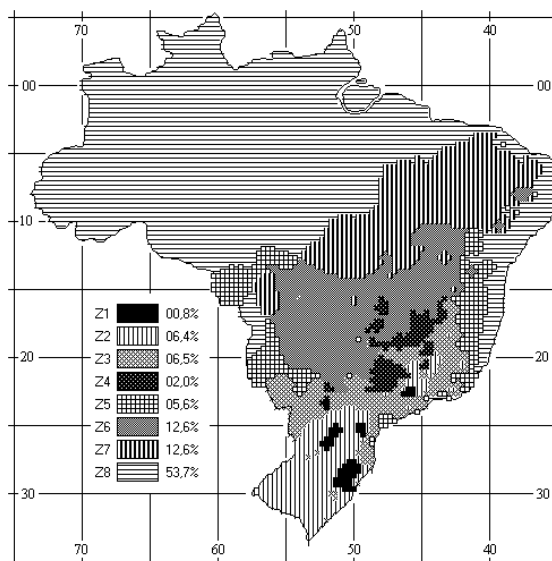
a) NBR 15220:2005

A ABNT NBR 15220:2005 – Desempenho Térmico de Edificações está conformado por cinco partes que determinam as recomendações técnico-construtivas para atingir o desempenho térmico das construções.

Esta norma, para atingir o desempenho térmico de edificações, determina recomendações técnicas construtivas de condicionamento térmico passivo e métodos de avaliação de desempenho para os materiais e tecnologias utilizadas na construção civil (2ª Parte), regidas pela divisão do território brasileiro em Zonas Bioclimáticas (3ª Parte).

A NBR 15220-1 define uma Zona Bioclimática como: *“a região geográfica homogênea Quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre ambiente construído e conforto humano”*. Portanto, o território brasileiro ficou dividido em oito zonas bioclimáticas, para 330 cidades, que apresentam um conjunto de recomendações que otimizam o desempenho térmico das edificações. Estas zonas bioclimáticas foram estipuladas a partir da adaptação da carta bioclimática em função da sugerida pelo Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines, ilustrada na Figura 17.

Figura 5. Zoneamento bioclimático do Brasil.



Fonte. NBR 15220-3:2005.

Para a determinação das zonas bioclimáticas foram consideradas diversas condições climáticas como temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar incidente, temperaturas médias, entre outras. Estas condições e os parâmetros de contorno como as aberturas de ventilação, proteção das aberturas, vedações externas e estratégias térmicas passivas, permitiram determinar as estratégias de condicionamento térmico passivo para cada zona.

b) NBR 15575:2013.

A ABNT NBR 15575:2013, norma de Edificações Habitacionais – Desempenho está composta por seis partes que indicam as exigências dos usuários e seus sistemas para ao desempenho das edificações habitacionais de até cinco pavimentos, Quanto à seu comportamento em uso. O desempenho térmico está determinado pelos requisitos qualitativos e critérios quantitativos, assim como os métodos de avaliação que permitem identificar o cumprimento dos requisitos.

Esta norma apresenta requisitos e exigências do usuário para os elementos e sistemas construtivos a partir de três variáveis fundamentais. Primeiramente se faz referência às exigências do usuário quanto à segurança estrutural, contra o fogo, no uso e na operação. A segunda variável é a

habitabilidade que apresenta as exigências de estanqueidade, desempenho térmico, acústico, luminico, saúde, higiene e qualidade do ar, funcionalidade e acessibilidade, conforto tátil e antropodinâmico. Finalmente, existem exigências de sustentabilidade, relacionadas à durabilidade, manutenibilidade e impacto ambiental.

A partir destas três variáveis e as condicionantes econômicas dos elementos e sistemas construtivos, foram estabelecidos níveis de desempenho: mínimo, intermediário e superior. Destaca-se que o nível mínimo de desempenho deve ser sempre atingido para as diversas zonas bioclimáticas estabelecidas para o território nacional. As Tabelas 8 e 9 apresenta o detalhamento do desempenho térmico para as zonas bioclimáticas indicadas na NBR 15575:2003, tanto para inverno como para verão.

Tabela 1. Avaliação do desempenho térmico para verão.

Nível de desempenho	Zonas 1 a 7	Zona 8
M	$T_{i, \max} \leq T_{e, \max}$	$T_{i, \max} \leq T_{e, \max}$
I	$T_{i, \max} \leq (T_{e, \max} - 2^{\circ}\text{C})$	$T_{i, \max} \leq (T_{e, \max} - 1^{\circ}\text{C})$
S	$T_{i, \max} \leq (T_{e, \max} - 4^{\circ}\text{C})$	$T_{i, \max} \leq (T_{e, \max} - 2^{\circ}\text{C})$ $T_{i, \min} \leq (T_{e, \min} + 1^{\circ}\text{C})$

Fonte. Adaptado da NBR 15575 (ABNT,2013).

Para as zonas bioclimáticas entre 1 e 7, no verão, o nível de desempenho mínimo é atingido quando a temperatura interna máxima e menor ou igual que a temperatura externa máxima do espaço em análise, já o nível intermediário obteve-se quando a temperatura interna máxima do espaço construído é igual ou diminui em 2°C a temperatura externa máxima. No entanto, quando a temperatura interna máxima é igual ou diminui 4°C a temperatura externa máxima, é atingido um nível de desempenho superior.

A zona bioclimática 8, no verão, apresenta um nível de desempenho mínimo quando a temperatura externa máxima e menor ou igual que a temperatura interna máxima do espaço em análise, já o nível intermediário obteve-se quando a temperatura interna máxima do espaço construído e igual ou diminui em 2°C a temperatura externa máxima. No entanto, quando a temperatura interna mínima é menor o igual que a temperatura externa mínima mais 1°C, é atingido um nível de desempenho superior.

Tabela 2. Avaliação do desempenho térmico para inverno.

Nível de desempenho	Zonas 1 a 5	Zona 6 a 8
M	$T_i, \text{mim} \geq (T_i, \text{min} + 3^\circ\text{C})$	Não precisa ser verificado.
I	$T_i, \text{mim} \geq (T_i, \text{min} + 5^\circ\text{C})$	
S	$T_i, \text{mim} \geq (T_i, \text{min} + 7^\circ\text{C})$	

Fonte. Adaptado da NBR 15575 (ABNT,2013).

A avaliação do desempenho térmico busca analisar a adequação ao uso de um elemento ou sistema construtivo para cumprir uma função. Portanto, a norma indica métodos e procedimentos de avaliação do desempenho. Entre os métodos de avaliação estão os ensaios laboratoriais, de tipo, de campo, inspeções de protótipos, simulações e análise de projetos.

Paralelamente, existem os procedimentos de avaliação do desempenho: procedimento simplificado (normativo) e o procedimento com medições (informativo). O procedimento simplificado (normativo) verifica o atendimento dos requisitos de transmitância térmica e capacidade térmica dos sistemas de vedação e cobertura. No caso de não se atingir o nível de desempenho mínimo, a norma indica dar continuidade ao análise de novos sistemas construtivos através de simulações computacionais que permitam atingir o desempenho requerido. Estas simulações devem ser realizadas no programa Energyplus para as exigências de desempenho em verão e inverno.

O procedimento com medições (informativo) consiste na realização de medições em edificações ou protótipos que permitam avaliar fidedignamente os elementos e sistemas construtivos. Este procedimento se caracteriza por ser informativo, não se superpondo ao procedimento simplificado.

Para a avaliação das vedações externas com o método simplificado, a norma determina a transmitância e capacidade térmica necessária para atingir o desempenho térmico, indicadas na Tabela 10.

Tabela 3. Requisitos para vedações externas segundo a NBR 15575.

	Transmitância térmica $\text{W/m}^2\text{K}$		Capacidade térmica $\text{Kj/m}^2\text{K}$
Zona 1 e 2	$U \leq 2,5$		≥ 130
Zona 3 a 7	$\alpha \leq 0,6$	$U \leq 3,7$ $A > 0,6$ $U \leq 2,5$	≥ 130
Zona 8	$\alpha \leq 0,6$	$U \leq 3,7$ $A > 0,6$ $U \leq 2,5$	Sem exigência

Fonte. Adaptado da NBR 15575 (ABNT, 2013).

2.1.5 Comportamento térmico dos materiais cerâmicos

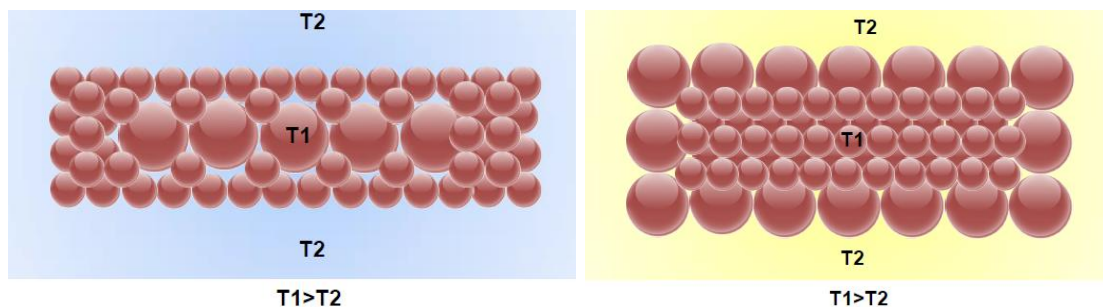
Os materiais cerâmicos se caracterizam pela estabilidade térmica e suas capacidades como isolantes térmicos, podendo ser aplicados em uma ampla faixa de temperaturas. No entanto, sua degradação resulta quando são submetidos a altas temperaturas por um período de tempo longo, corrosões pela água e elementos orgânicos ou inorgânicos (CARUTA, 2006)

O comportamento térmico dos materiais cerâmicos está condicionado a três fatores: as tensões térmicas no interior do material, a transpiração e a evaporação como consequência da mudança de temperaturas.

a) Tensões térmicas

Quando os materiais cerâmicos são expostos a uma mudança de temperatura repentina ou choque térmico, a partir de gradientes de temperatura não lineares, o material reage criando tensões térmicas geradas pela expansão de átomos e moléculas a diferentes temperaturas em função do local em que o fluxo de calor atinge o material, gerando dilatação térmica. Quando os materiais entram em contato com um meio a temperaturas mais baixas que no seu interior, as superfícies externas do material se esfriam e contraem, enquanto a superfície interna do material está a uma temperatura mais alta e gerando tensões superficiais internas de compressão e tensões superficiais externas de tração (Figura 5). A relação inversa acontece quando os materiais cerâmicos entram em contato com um meio a temperaturas mais baixas como indicado na Figura 6 (CALLISTER, 2002).

Figura 6 e 7. Tensões de compressão e tração superficiais.



Fonte. Autor.

As tensões de compressão como resultado da exposição a mudanças de temperaturas sempre terão valores máximos na superfície interior do material cerâmico, no entanto, as tensões de tração serão nas superfícies externas.

Estas tensões térmicas criam fissuras e a propagação de trincas. A iniciação das fissuras acontece quando a tensão térmica é igual à resistência do material. No entanto, a propagação das trincas tem origem na energia elástica armazenada e liberada pelo material no momento que a trinca acontece (LOW, 2006).

Uma forma de controlar a iniciação e a propagação de trincas é através do uso de um material cerâmico poroso, rígido e com baixos coeficientes de expansão térmica e de condutividade térmica, como o gesso.

b) Transpiração e evaporação

Os materiais cerâmicos conformados à base de água, como o gesso, respondem à mudança de temperatura através do fenômeno de transpiração, processo de dispensação de água na forma de vapor, cedida ao meio ambiente mediante à ascensão hídrica desde os poros do material.

A evaporação surge como consequência da transpiração dos materiais cerâmicos quando são submetidos a uma troca de temperatura. Barros e Ramos (2005) definem a evaporação como a troca térmica proveniente da mudança do estado líquido para o estado gasoso, determinando que a velocidade do fenômeno é função do estado higrotérmico do ar (peso de vapor de água contido no ar a uma certa temperatura) e de sua velocidade. Portanto, a evaporação dos materiais cerâmicos está condicionada ao clima em que são utilizados.

Por exemplo, para o gesso, a transpiração e evaporação da água livre contida nos cristais acontece a partir dos 73°C, deixando uma camada de água visível na superfície do material. Esta perda de água na forma de vapor não parece ser prejudicial, já que a perda de massa é de só 2% (BRANDÃO, 2015), mas se o material for sujeito a temperaturas mais extremas, é possível atingir sua decomposição.

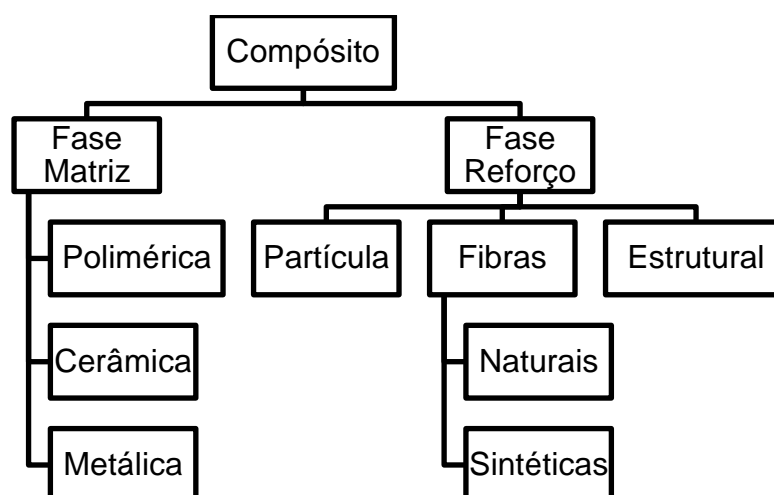
2.2 Materiais compósitos

Os compósitos são materiais estruturais multifásicos conformados por uma fase contínua que articula uma ou mais fases descontínuas incorporadas. A fase contínua, denominada de fase matriz, tem a função de envolver e proteger a fase descontínua, assim como transferir e distribuir as tensões recebidas por uma carga externa aplicada, atuando como barreira para a propagação de trincas. A fase descontínua ou fase reforço, tem a função de transportar a carga aplicada (AGARWAL *et al.*, 2006; JAUHARI *et al.*, 2015).

As propriedades dos compósitos são influenciadas pelas propriedades dos materiais que conformam a fase matriz e a fase reforço a partir da fração de volume, sua distribuição e interação entre eles, com o objetivo de atingir melhor comportamento que os materiais das fases que o conformam.

Como se apresenta na Figura 8, os compósitos se classificam quanto à fase matriz constituinte: em matriz polimérica, matriz cerâmica ou matriz metálica. Quanto à fase reforço os compósitos se classificam em: partículas, fibras (naturais ou sintéticas) e estrutural (CALLISTER, 2002). A seleção das fases está condicionada às necessidades construtivas do material compósito.

Figura 8. Classificação fase matriz e fase reforço nos compósitos.

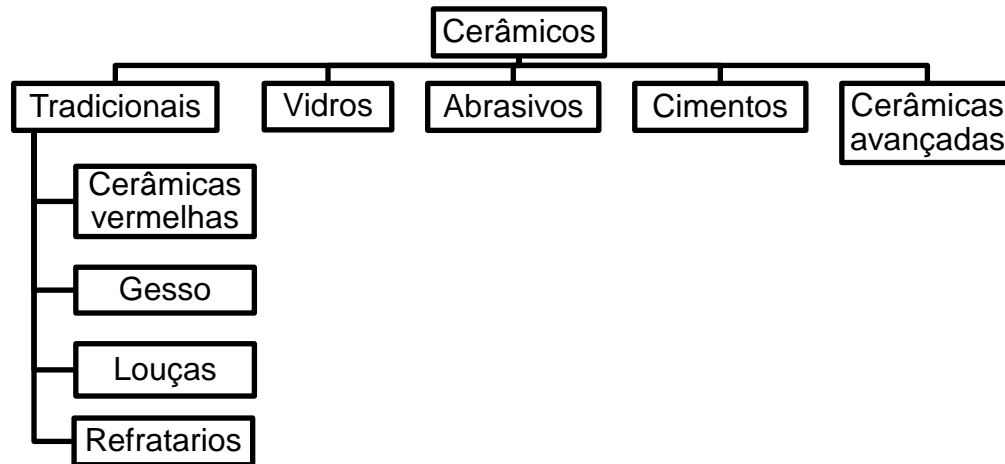


Fonte. Adaptado do Callister (2002)

Os materiais compósitos com matriz cerâmica abrangem materiais constituídos por elementos metálicos e não metálicos unidos por ligações mistas iônica e covalente, que frequentemente são processados à alta temperatura. Os materiais compósitos podem ser classificados como materiais

cerâmicos tradicionais (estruturais, louças e refratários provenientes de matérias primas argilosas), vidros, abrasivos, cimentos e cerâmicas de alto desempenho (óxidos, nitretos e carbonetos de silício, alumínio, titânio e zircônio), como ilustra a Figura 9 (CHAWLA, 1993; CALLISTER, 2002)

Figura 9. Classificação dos materiais cerâmicos.



Fonte. Adaptado de Chawla (1993)

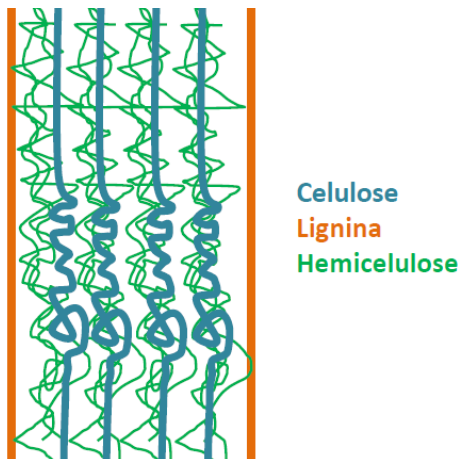
A matriz cerâmica se caracteriza por apresentar uma fratura frágil com uma deformação plástica apreciável, uma resistência ao impacto reduzida, uma baixa tenacidade e uma fadiga estática, influenciadas pelo processo de fabricação, microestrutura e o desempenho em serviço. O comportamento dos materiais cerâmicos resulta em colapsos abruptos, portanto o reforço com fibras permite controlar as fissuras geradas pelo comportamento do material em serviço, aumentando a tenacidade do material cerâmico (BRANDÃO, 2015).

Dependendo da matriz cerâmica a ser utilizada, o processo de confecção do material pode interferir no comportamento mecânico e térmico do compósito, a partir de possíveis discontinuidades, porosidade excessiva, trincas, erros na dosagem e rugosidade superficial.

A fase reforço em fibras pode ser classificada em fibras naturais (vegetal, animal e mineral) ou sintéticas. As fibras vegetais são materiais fitogêneos com tecidos biológicos, compostos principalmente por celulose, hemiceluloses (polioses) e lignina. A lignina está presente nas paredes celulares das fibras vegetais (Figura 10), e tem a finalidade de unir as fibrilas

de celulose naturalmente (a exceção do algodão), caracterizando as fibras vegetais como materiais lignocelulósicos (CARVALHO, 2005).

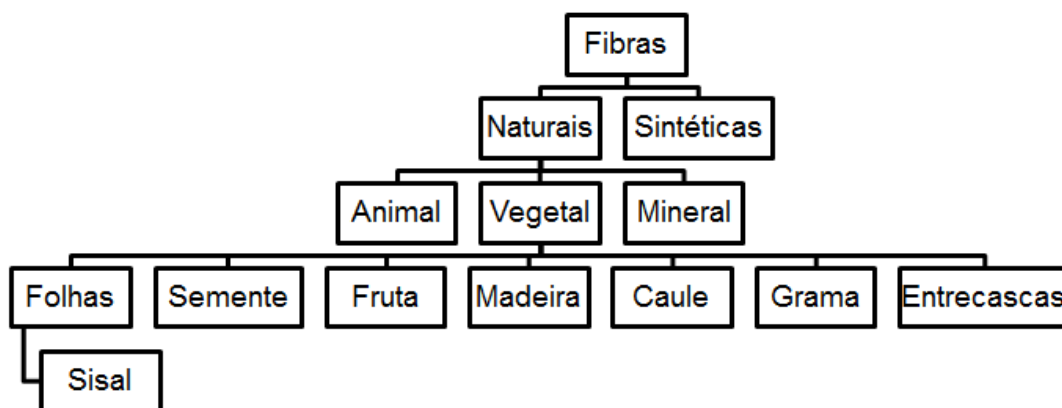
Figura 10. Composição materias fitogêneos.



Fonte. A autora.

Os materiais lignocelulósicos se classificam conforme a sua origem e formação, podendo ser extraídos das folhas, semente, fruta, madeira, caule, grama ou entrecasca (Figura 11).

Figura 11. Classificação das fibras.



Fonte. Adaptado de Alexander *et al.* (2005), Lilholt e Lawter (2002).

A composição das fibras está determinada pelo espaçamento entre a fibra-celula, espessura da parede e concentração de celulose, determinando suas propriedades mecânicas. Quanto maior a quantidade de celulose, menores o coeficiente de flexibilidade, elasticidade e torção da fibra (RICL, 2010).

As fibras vegetais caracterizam os compósitos pela sua geometria, concentração e orientação. A geometria das fibras está determinada pela

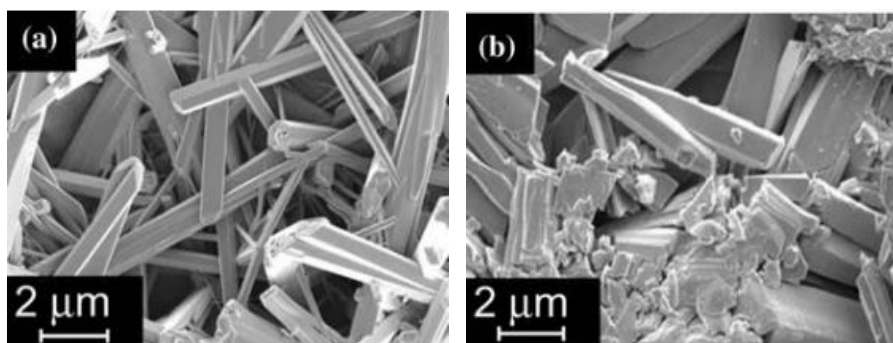
forma, o tamanho e a distribuição das fibras no interior da matriz, influenciando a fração de volume, a área interfacial e a interação entre o reforço e a matriz. A concentração é medida em termos de volume ou fração de peso condicionada pela sua distribuição, indicando a uniformidade do sistema (homogêneo com espaçamentos regulares ou heterogêneos com espaçamentos dispersos) influenciando diretamente nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas do compósito. Além disso, as fibras podem ser inseridas na matriz como partículas orientadas ou não orientadas que determinarão a isotropia ou anisotropia do material (AGARWAL *et al.*, 2006; JAUHARI *et al.*, 2015)

2.2.1 Fase matriz de gesso

A matéria prima básica para a obtenção do gesso é o mineral gipsita, que é constituído por sulfato de cálcio no estado di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). A gipsita possui uma estrutura cristalina prismática monoclinica, composta quimicamente por 32,5% de CaO, 46,6% de SO_3 e 20,9% de H_2O , com um peso específico de $2,32 \text{ g/cm}^3$, um índice de refração de 1,53, uma dureza de 2 Mohs, uma densidade entre 2350 kg/m^3 e uma coloração branca ou semi transparente no estado puro (KARNI e KARNI, 1995; MINERALOGY, 2009; BALTAR *et al.*, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2012)

Na estrutura cristalina da gipsita, os cristais crescem a partir de núcleos de cristalização que influenciam a taxa de crescimento da microestrutura e o tamanho dos cristais, determinando a tipologia e qualidade do gesso (ANTUNES, 1999). Existem duas tipologias de crescimento do cristal que dão origem ao gesso α e o gesso β , como se ilustra na Figura 12.

Figura 12. a) Cristais gesso α . b) Cristais gesso β .



Fonte. Adaptado de Song (2009)

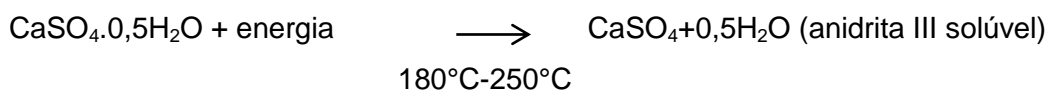
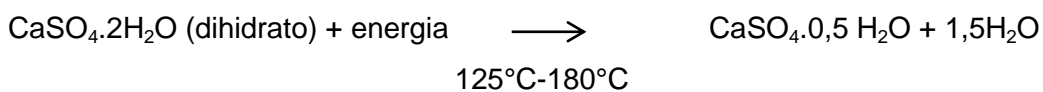
A Figura 12 a) ilustra os cristais de gesso α que se caracterizam por serem grossos e grandes, devido à velocidade lenta de crescimento dos cristais, conformando uma estrutura cristalina organizada com baixa área superficial específica. No caso da Figura 12 b) observam-se os cristais do gesso β que se caracterizam por serem pequenos e numerosos, mal formados, porosos e heterogêneos, devido à velocidade rápida de crescimento dos cristais (YU; BROUWERS, 2012; SOBRINHO *et al.*, 2001; FOLLNER *et al.*, 2002; BALTAR *et al.*, 2005).

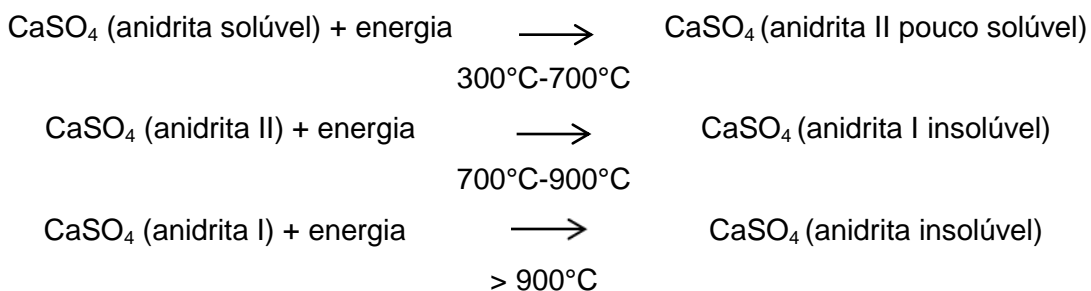
a) Obtenção do gesso

O processo de obtenção do gesso ocorre a partir das etapas de extração, trituração, calcinação e moagem da gipsita. Na etapa da extração, se retira o minério gipso conformado por anidrita, impurezas e gipsita, obtendo-se uma granulação do mineral diversa. A segunda etapa consiste na trituração do minério por britagens, moagens e peneiramento, para ser uniformada a partir da sua granulometria e posteriormente estocada (PINHEIRO, 2011)

A terceira etapa do processo é a calcinação que consiste na desidratação da gipsita para obter diversos produtos de acordo com a temperatura de calcinação. Durante a desidratação parcial do sulfato de cálcio dihidratado, entre 125°C a 180°C, são retiradas $\frac{3}{4}$ partes da água de hidratação, dando origem ao sulfato de cálcio hemihidratado. Nesta faixa de temperaturas se obtém o gesso α e β , sendo que o gesso tipo α é obtido por calcinação sob pressão dentro de autoclaves e gesso β é obtido por calcinação em pressões atmosféricas, apresentando um menor custo de produção e facilidade de obtenção, utilizado na construção civil com um grau de pureza superior a 75% (DOMÍNGUEZ e SANTOS, 2001)

Os produtos obtidos durante o processo de calcinação em função das temperaturas são: (BALTAR *et al.*, 2005; MAGALHÃES *et al.*, 2008)





Durante a calcinação, o minério gipsita perde e recupera água, a temperaturas entre 180°C e 250°C e forma a anidrita ativa ou anidrita III solúvel ávida por água, podendo absorver umidade atmosférica e passar para hemidrato. Entre os 300°C e 700°C se obtém a anidrita II, um produto 100% desidratado e pouco solúvel. Ao atingir entre 700°C e 900°C forma-se um produto inerte, para finalmente ocorrer à dissociação do sulfato de cálcio a partir de 900°C (MAGALHÃES *et al.*, 2008).

A quarta etapa do processo de obtenção do gesso é a moagem do minério gipsita para posterior ensilagem, estabilização do pó e ensacamento.

b) Hidratação

A hidratação consiste em devolver a água na anidrita através de três etapas. Primeramente, na dissolução do hemidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) na água se forma uma solução saturada de ions de Ca^{2+} e SO_4^{2-} (ANTUNES, 1999), determinada pela estrutura cristalina do hemidrato, indicando a quantidade de água necessária para à hidratação, obtendo-se a pasta de gesso e a argamassa. No caso do gesso β , requiere-se água em excesso para sua conformação, duilindo-se rapidamente e diminuindo sua resistência mecânica. No entanto, o gesso α requer menor quantidade de água para sua dissolução, melhorando sua prestação mecânica (JOHN e CINCOTTO, 1997; SOBRINHO *et al.*, 2001; FOLLNER *et al.*, 2002; BALTAR *et al.*, 2005).

Numa segunda etapa, os cristais de dihidrato supersaturados crescem, se organizam e se precipitam em forma de agulhas, formando grupos de cristalização. Finalmente, na terceira etapa da hidratação, com o aumento da concentração dos cristais acontece o início de pega ao aumentar a temperatura pela velocidade da reação, que com o transcurso do tempo diminui

até o endurecimento da pasta. O período de tempo entre a hidratação do hemidrato, a conformação dos cristais hidratados, a redução do volume de água durante a secagem, e sua solidificação progressiva com porosidade e resistência específica é conhecida como o tempo de pega (JOHN e CINCOTTO, 2007; ANTUNES, 1999; SOPHIA *et al.*, 2016).

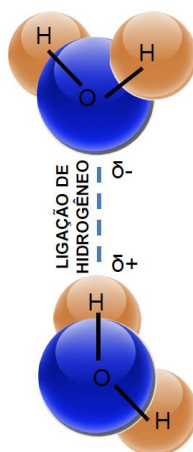
Os fatores que influenciam a hidratação do gesso são as características físicas da estrutura cristalina do hemidrato, a relação água/gesso, a presença de impurezas e aditivos, a quantidade de energia na mistura e a temperatura da água de amassamento (SONG *et al.*, 2010; LANZON e GARCIA-RUIZ, 2012; ANTUNES, 1999).

A relação estequiométrica recomendada é para cada 100g de hemidrato são necessários para 18,6g de água, obtendo uma relação igual a 0,186. Para obter-se uma massa trabalhável, tradicionalmente é utilizada uma relação entre 0,6 e 1,0. A velocidade de hidratação é reduzida conforme o aumento de água, a presença de aditivos e de impurezas na gipsita (YU e BROUWERS, 2011; JOHN e CINCOTTO, 2007).

Durante o processo de hidratação, a água permanece na estrutura do cristal até depois da hidratação. Esta água se apresenta no cristal como água livre e água confinada.

A água livre se situa na superfície dos cristais que permitem as ligações intercristalinas de hidrogênio entre as moléculas de água, indicadas na Figura 13 (FOLLNER *et al.*, 2002; MANDAL e MANDAL, 2002).

Figura 13. Ligações de hidrogênio



Fonte. Autor.

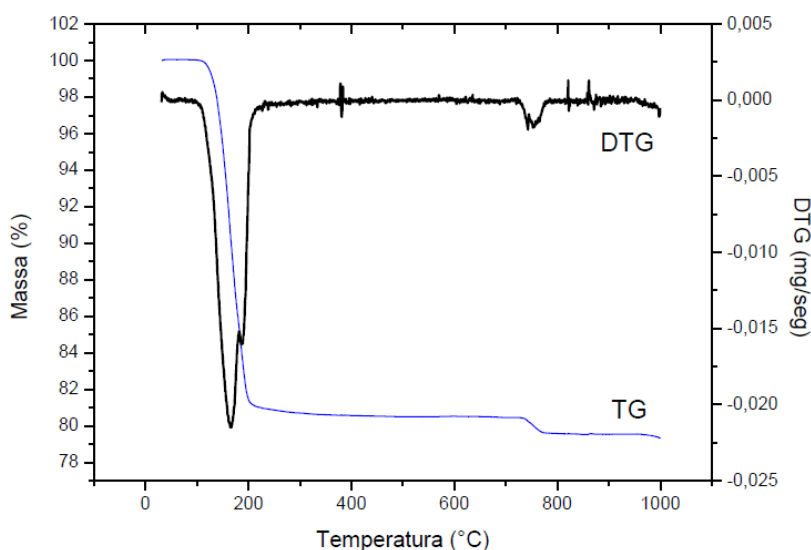
Estas ligações de hidrogênio mantêm sua concentração a temperatura e pressão constante, no entanto, com o aumento das temperaturas até os 160°C o dihidrato perde água livre.

No caso da água confinada, ela é responsável pela adesão entre os cristais dihidratados e se apresenta como camadas situadas nas superfícies dos cristais que estão em contato. São os líquidos enclausurados em superfícies cristalinas hidrofílicas próximas que se alinham mantendo uma periodicidade da rede cristalina. Nas superfícies planas dos cristais do gesso existem películas de água confinada portanto, não existe água confinada dentro dos poros (DEBENEDETTI, 2003; STARR *et al.*, 1999).

A água confinada mantém sua concentração a temperatura e pressão contante, no entanto, com o aumento das temperaturas entre 160°C a 250 °C, o dihidrato perderá sua água confinada.

As respostas do gesso endurecido frente à mudança de temperatura foram analisadas por Brandão (2015), indicando a relação da perda de água e perda de massa. A Figura 14 ilustra que o material libera umidade a 73°C e a formação do hemidrato ocorre entre 150°C e 200°C com a perda de 9% de massa referente a água na estrutura do dihidrato. Entre 700°C e 800°C o gesso perde 1% da massa pela decomposição do material.

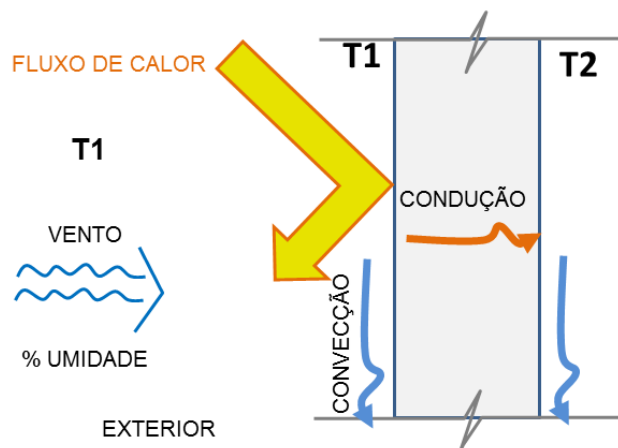
Figura 14. TG e DTG para o gesso endurecido.



Fonte. Adaptado de Brandão (2015).

O gesso endurecido é considerado um material homogêneo, que frente à mudança de temperatura, transmite o calor como ilustrado na Figura 15. O material está conformado por uma camada única exposta à radiação solar com uma temperatura externa ou da vizinhança T_1 maior que a temperatura T_2 do ambiente interior.

Figura 15. Mecanismos de transferência de calor no gesso padrão.



Fonte. Autor.

Nestas condições há uma transferência de calor contínua proveniente pelo mecanismo da radiação solar no exterior do compósito gerando dois processos convectivos. Um processo convectivo quando a radiação entra em contato com o ar externo para atingir o material e outro processo convectivo surge quando o fluxo de calor restante que atravessa o material entra em contato com ar no ambiente interno (BARROS e RAMOS, 2005).

Portanto, o circuito térmico do gesso endurecido é determinado pela radiação total absorvida e a soma das parcelas da convecção externa ao material, a condutividade do gesso e a convecção da face interna do material.

2.2.2 Fase reforço em mantas de fibras vegetais

As mantas de fibras vegetais são classificadas como não tecidos constituídos pela sobreposição de um ou mais véus orientados ao acaso e não consolidados gerando vazios internos que influenciam no seu comportamento mecânico e térmico. Sua aplicação está condicionada a espessura, propriedades físicas da fibra constituinte e suas propriedades de área. A espessura da manta determinará sua qualidade e seu custo, podendo tais

mantas ser classificadas em manta grossa (rígidas, ásperas e resistentes) ou fina (suaves e flexíveis).

As propriedades físicas das mantas são o brilho e cor dados pela sua composição natural ou pelo tratamento da fibra em sua conformação, determinando a fricção do material.

Dentre as fibras vegetais que permitem a confecção de mantas através de uma produção industrial, as mais utilizadas são: a fibra de sisal e a fibra de coco. Como se indica na Tabela 4, as propriedades das fibras de sisal em relação ao módulo de elasticidade, resistência à tração, deformação máxima e massa específica são superiores às fibras de coco. A fibra de sisal apresenta maior resistência mecânica já que a fibra tem um ângulo espiral menor e um maior comprimento da fibro-célula, e uma maior resistência à tração pela maior quantidade de celulose e menor quantidade de lignina na sua composição.

Tabela 4. Propriedades das fibras de Coco e Sisal.

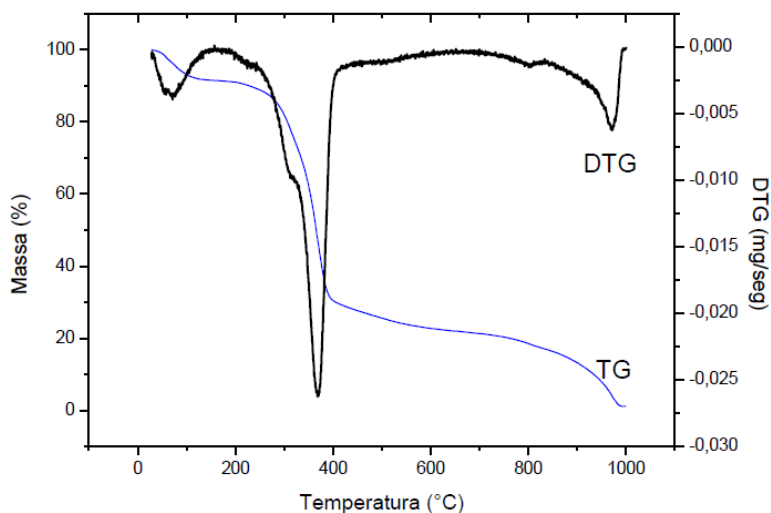
Fibra	Coco	Sisal
Celulose (%)	49,9	67,2
Lignina (%)	67,2	5,0
Módulo de elasticidade (GPa)	1,9	13,4
Resistência tração (MPa)	105,97	467
Deformação máxima (%)	32	04
Massa Específica (g/cm³)	1,289	1,511
Diâmetro (um)	333,2	174,2

Fonte. Aparecida e Agopyan (2007), Ricl (2010)

A celulose é o maior componente da fibra de sisal, dando-lhe uma excelente resistência à ruptura, tração e alongamento, além de uma boa resistência a ação da água salgada (SILVA *et al.*, 2004; RICL, 2010) convertendo-se num material apropriado para conformar o reforço.

Brandão (2015) analisou o comportamento térmico da manta de sisal que será utilizada nesta pesquisa, através do ensaio de TG (Figura 16) com o intuito de verificar a resistência do material.

Figura 16. TG e DTG da manta de sisal.

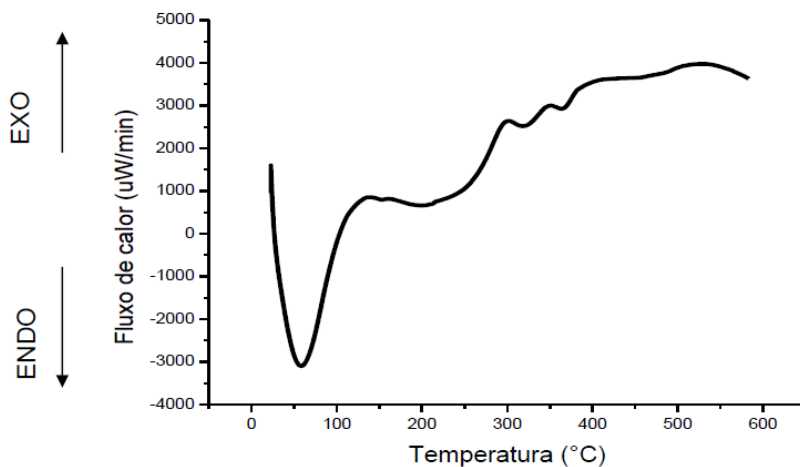


Fonte. Adaptado de Brandão (2015).

Brandão (2015) 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, Brandão (2015) analisou a manta de sisal por DSC (Figura 17) e determina a existência de um pico de energia endotérmica inicial que representa a perda de umidade da fibra, a uma temperatura aproximada de 50°C. Considera que entre 250°C e 340°C surge um pico exotérmico que indica a decomposição da hemicelulose. Já 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 17. DSC para a manta de sisal.



Fonte. Adaptado de Brandão (2015)

A fibra de sisal tem procedência na planta *Agave Sisala* Perr, planta monocotiledônea caracterizada por ser uma planta dura com duas espécies: de gênero (*Agave*) e econômica (*A. Sisalana*). Esta última é a espécie mais encontrada no estado da Bahia.

As plantas de sisal se caracterizam por produzir 250 folhas aproximadamente, compostas por 4% de fibra, 0,75% de cutícula, 87,25% de água e 8% de matéria seca. Estas folhas contêm aproximadamente 1200 fibras conformadas por uma estrutura de celulose, lignina, pectina e hemicelulose, atingindo um comprimento entre 1,0 e 1,5mm e um diâmetro entre 100-300 um (LI et al., 2000)

O processo de produção da fibra de sisal só se inicia quando a planta atinge 3 anos de idade, a partir da extração da folha, recolhida e transportadas a um motor que desfibrila as folhas, para uma posterior limpeza e exposição ao sol para secagem, permitindo classifica-las e armazenar. As fibras que contêm um alto teor de celulose que providenciam a fibra de boas propriedades de resistência a ruptura e alongamento assim como a ação da água salgada (SILVA, 2003)

2.2.3 Aderência entre a fase matriz e a fase reforço

O comportamento térmico dos compósitos reforçados com fibras vegetais é influenciado pela aderência entre a fase matriz e a fase reforço. Já que o compósito quando exposto à mudança de temperatura, concentra e distribui o fluxo de calor através de sua estrutura interna, em função do local em que o fluxo de calor atinge o compósito (fase matriz ou o reforço), assim como o tempo que leva para distribuir o fluxo de calor até atingir o equilíbrio térmico. Se o compósito não apresenta boa aderência, a concentração de temperaturas gerará uma degradação do compósito (KREITH *et al.*, 2014; AGARWAL *et al.*, 2006).

A fase matriz influencia a aderência através da porosidade e quantidade de água necessária para a conformação da matriz, podendo enfraquecer a zona intersticial entre a matriz e o reforço. Outra variável que afeta a aderência é a capacidade da matriz de absorver água, gerando uma variação dimensional da fibra, aumentando a zona intersticial ou inclusive criando um vazio interno (KAW, 2006; KLOPROGGE e FROST, 2000).

Quanto à fase reforço, a aderência com a matriz está determinada pelas irregularidades, protuberâncias superficiais, variação dimensional e orientação da fibra, que podem contribuir com a aderência ou impedir a mesma, podendo amplificar a resposta do material gerando fissuras (KAW, 2006). A aderência também é influenciada pelas características superficiais da fibra como impurezas, ceras ou gorduras que possam reagir com a matriz de forma negativa, requerindo tratamentos nas fibras para melhorar a aderência.

Outro fator importante é a presença de umidade na conformação do compósito que gera uma perda de resistência da fibra e conseqüentemente uma degradação mecânica e térmica gerada pela absorção de água excedente na matriz e a liberação da mesma. Esta umidade excedente cria seres microscópicos (fungos) que começam a reagir com a fibra, deteriorando sua estrutura (AGARWAL *et al.*, 2006).

Quando a aderência entre a fase matriz e a fase reforço não é apropriada, os compósitos podem apresentar uma degradação acelerada causada pela estabilidade dos compósitos a temperaturas elevadas (>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 a temperatura de trabalho. Esta degradação tem origem no craqueamento térmico, deslizamento das moléculas e átomos causadas pela mudança de temperatura, relaxamento do estresse térmico, crescimento de grãos, derretimento, reações químicas, decomposição e sublimação de um componente (CHUNG, 2010).

2.2.4 Comportamento térmico dos compósitos reforçados com fibras

Trabalhos envolvendo compósitos reforçados com fibras vegetais têm atraído o interesse da comunidade científica, destacando a importância das condições físicas nas propriedades térmicas e na análise *in loco* das propostas construtivas.

Existem diversos trabalhos que avaliam as temperaturas de análise, condicionantes físico-térmicas, as propriedades térmicas analisadas e os efeitos da fibra nas propriedades. Ashour, Wieland, Georg, Bockisch e Wu (2010) analisaram a condutividade térmica de três tipologias de materiais compostos, conformados por uma matriz de gesso com areia e uma fase reforço a base de fibras naturais de palha de trigo ou madeira. Nestes compósitos foram analisadas a umidade interna das fibras e a condutividade térmica. A avaliação dos compósitos foi realizada a 10°C, 25°C e 40°C com corpos de prova de conformados com 25%, 50% e 75% de teor de fibras, configurando uma amostra de 500x500x10cm³ e 500x500x20cm³, com espessuras de 2cm (palha e madeira) e 5cm (trigo).

A partir dos ensaios realizados conclui-se que a absorção de umidade diminui com o aumento de teor de fibras e areia na composição do compósito. Em relação à condutividade térmica, esta diminuiu com o aumento de fibras utilizadas no reforço, sendo que as amostras de gesso reforçadas com palha de trigo apresentaram melhor desempenho térmico que as amostras de gesso com madeira. Além disso a condutividade térmica também diminuiu quando a

quantidade de areia é acrescentada na composição do material, só que o desempenho térmico não é tão efetivo.

Chikhi, Agoudjil, Boudense e Gherabli (2013) posteriormente desenvolveram um material com matriz de gesso e reforço com fibra de palmeira (*Phoenix Dactylifera L.*). Nestes compósitos foram analisadas a absorção de água, flexão, compressão e condutividade térmica. A avaliação dos compósitos foi realizada a uma temperatura de 20°C e 30°C com corpos de prova conformados com um teor de fibra de 0%, 1%, 2%, 3%, 5%, 7%, 8% e 10% (diâmetro fibra: 3-6mm), configurando corpos de prova de 150x50x50cm³

Os resultados dos ensaios amostram que a condutividade térmica e flexão dos compósitos diminui com o aumento do teor de fibra, no entanto o módulo elástico das amostras aumenta com o incremento de fibra. O ensaio de condutividade térmica apresentou uma diminuição da condutividade tanto nos compósitos com fibras de 3 e 6mm de diâmetro, com um comportamento similar dos compósitos conformados com 5%, 7% e 10% de fibras. No entanto, a absorção de água das amostras aumenta quando o teor de fibra é acrescentado, sendo que os compósitos com fibras de 6mm de diâmetro absorvem uma menor quantidade de água.

Chikhi (2016) desenvolveu um novo compósito com matriz de gesso com reforço em fibras de palmeira, como isolantes térmicos para diversos usos na construção civil. Este compósito foi analisado nos níveis de porosidade, elasticidade e sua relação com a resistência térmica e atraso térmico do material. A avaliação dos compósitos foi realizada a 20°C e 30°C para corpos de prova de 50x50x50mm conformados com teores de fibra de 1%, 2%, 3%, 5%, 7%, 8% e 10% com 3 e 6mm de diâmetro das fibras.

Entre os resultados obtidos, o tamanho das fibras de palmeira é determinante para a espessura final do compósito e a quantidade de gesso a ser utilizado, acrescentando a elasticidade e porosidade do material. Quanto maior o teor de fibra nos compósitos, maior a resistência e atraso térmico das amostras, diminuindo a condutividade térmica do material.

Braiek, Karkri, Adili, Ibos, Narrallah (2017) desenvolveram um compósito com o intuito de melhorar as propriedades termo físicas e a leveza

das placas de gesso convencionais, podendo ser utilizado como placa de revestimento ou forro. Este compósito foi conformado com uma matriz de gesso reforçada com fibras de palmeira com o intuito de analisar a microestrutura, condutividade e difusividade térmica e capacidade térmica. As amostras foram analisadas a 20°C e 30°C, para corpos de prova de 45x45x8mm com teores de fibra de 5%, 10%, 15% e 20%.

Entre os resultados obtidos, os compósitos apresentam um melhor desempenho térmico que o gesso, em seus cinco teores de fibra utilizados, considerando que a condutividade térmica e a densidade do material diminuem com o aumento do teor de fibras, atingindo valores de condutividade térmica de 0,17 Wm-1K-1 que é similar a alguns materiais convencionais utilizados para condutividade térmica, podendo ser utilizado na indústria da construção civil. Sendo que quando o teor de fibra aumenta até 20%, a condutividade térmica diminui 61,5%, a difusividade térmica diminui 39,58% e calor específico 36,22%.

A partir da análise destes artigos, percebe-se que as principais propriedades avaliadas nos trabalhos científicos são as propriedades mecânicas de compressão e flexão. Entre as propriedades térmicas mais representativas estão a condutividade térmica, resistência térmica e atraso térmico.

Paralelamente, são considerados outros trabalhos científicos com o intuito de avaliar os parâmetros das simulações (tempo de análise, erro estimado, tamanho das *test-cells*) e o monitoramento das propriedades térmicas *in loco*, indicadas na Tabela 5.

Tabela 5. Resumo de trabalhos científicos sobre simulações *in loco*.

Autor	Ano	Elemento construtivo	Período de tempo erro estimado
Krüger e Michaloski	2002	Madeira industrializada. Blocos de concreto. Panéis de madeira com revestimento em chapa HardBlock e impermeabilização epóxi	A faixa de erro das medições é calculada através do coeficiente de correlação, R^2 e conforto em horas. Leitura de temperaturas com Data-loggers HOBO. Análise de residência real. Período de tempo. Inverno e verão (1 mes cada) Comparação dos dados monitorados no local com os resultados obtidos em simulações para determinar o conforto térmico.
Baker	2004	Painel homogêneo opaco de compensado.	Erro estimado. 3 a 16% Leitura do <i>test-cell</i> . Sensores. Período de 8 dias. O tamanho é de pequena escala. É analisada a transmitância térmica do material através de uma <i>test-cell</i> que permite avaliar a influência do tipo de material na temperatura interna monitorada.
Sposto <i>et al.</i>	2007	Bloco de concreto preenchido com entulho.	A faixa de erro das medições é calculada através do coeficiente de correlação e conforto em graus hora. Leitura das temperaturas com termo higrógrafos. Período de análise de 15 dias para cada <i>test-cell</i> .
Sposto <i>et al.</i>	2007	Bloco de concreto preenchido com entulho.	<i>Test-cell</i> em tamanho reduzido. É analisada a temperatura interna e externa de diferentes <i>test-cells</i> a partir da modificação da inércia térmica das vedações. Posteriormente, são realizadas simulações para calibrar dados <i>test-cell</i> e avaliar residência.
Tiberio e Vecchia	2014	Comparativo entre uma cobertura verde estruturada e uma cobertura em telha cerâmica.	Erro estimado. 0,2°C Período de tempo. 35 horas. Temperaturas de análise foram obtidas em uma base automática meteorológica. Leitura do <i>test-cell</i> . 102 sensores. Tamanho real.

Tabela 5. Resumo de trabalhos científicos sobre simulações *in loco*.

Tiberio e Vecchia	2014	Comparativo entre uma cobertura verde estruturada e uma cobertura em telha cerâmica.	A test-cell avalia a variação de temperatura interna e externa, a uniformidade da distribuição das temperaturas e o desempenho térmico do sistema de cobertura.
Bianco <i>et al.</i>	2015	Painel de vidro termotrópico.	Erro estimado. 0,5°C Temperaturas internas controladas. Leitura do <i>test-cell</i> . Termopares. Tamanho real. Período de análise: 24 horas. Determina-se a transmitância térmica do material em laboratório para determinar a diferença de temperatura entre o interior e exterior no <i>test-cell</i> .
Guichard <i>et al.</i>	2016	Uso de PCM em não ventiladas	Erro estimado. 1,0°C Temperaturas de análise interna e externa. Período de análise. 120 horas Leitura. 60 Sensores. Tamanho real. É realizada uma comparação entre os valores obtidos entre a análise com simulação computacional e com o monitoramento <i>in loco</i> .
Alonso <i>et al.</i>	2017	Tres tipologias de fachadas. Alvenaria massisa, alvenaria com cavidades, alvenaria com cavidades e isolamento térmico, e em concreto.	Erro estimado. 0,5°C Periodo de 3 dias para cada <i>test-cell</i> Temperaturas externas da base automática meteorológica. Leitura do <i>test-cell</i> . 6 sensores. Tamanho real. É analisada a gradiente de temperatura entre a temperatura interna e externa, a flutuação dos valores e o consumo de energia

Fonte. Autor.

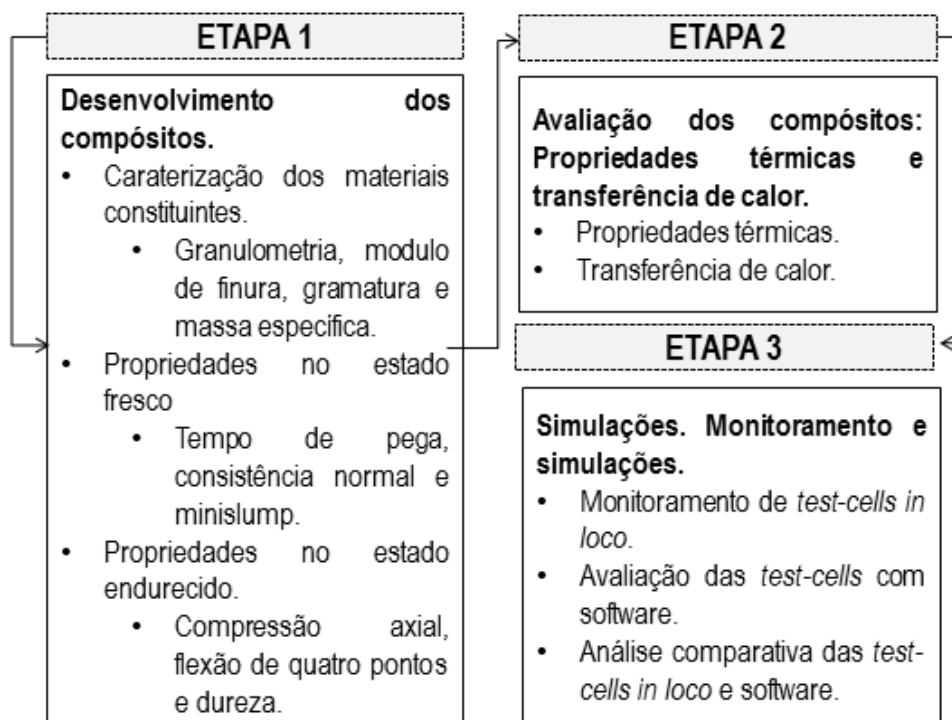
Como foi exposto, existem poucos trabalhos que apresentem análise para compósitos com matriz de gesso e reforço em fibras vegetais. Os trabalhos científicos apresentam diversas vantagens do uso das fibras vegetais a partir da análise das propriedades térmicas e mecânicas, mais não exploram as vantagens da fibra de sisal.

3 METODOLOGIA

3.1 Programa experimental

O programa experimental deste trabalho foi delineado através de quatro etapas distintas e complementares para alcance dos objetivos da pesquisa, conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18. Delineamento das etapas da pesquisa.



Fonte. Autor.

Etapa 1: Desenvolvimento dos compósitos

Na primeira etapa da metodologia foi produzido o gesso de referência com 1% de aditivo na mistura e de três tipologias de compósitos em gesso e manta de sisal conformados com diferentes sequências de camadas.

Posteriormente, foi realizada a caracterização dos materiais constituintes e análise das propriedades em estado fresco e endurecido. A caracterização do gesso em pó e a manta de sisal, assim como analisadas as propriedades em estado fresco da pasta de gesso. Uma vez definidas estas propriedades, foi conformado o gesso e os compósitos para serem avaliados

em estado endurecido através dos ensaios de compressão, dureza e flexão a quatro pontos.

Etapa 2: Avaliação dos compósitos: Propriedades térmicas e transferência de calor

Nesta etapa da pesquisa foram projetados e executados os aparelhos necessários para a realização dos ensaios de condutividade térmica e calor específico, a partir dos requerimentos apresentados pela NBR 15220:2005 e NBR 15575:2013.

A partir dos dados obtidos nos ensaios de condutividade térmica e calor específico, foram realizados os cálculos estabelecidos pela NBR 15220:2005 para a determinação das propriedades térmicas derivadas para os materiais como: resistência térmica, transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico.

Etapa 3: Simulação das test-cells

Para as simulações foi desenvolvida uma *test-cell*, conformada pelas placas de gesso padrão e os compósitos desenvolvidos no laboratório, para analisar a temperatura de ar interna e externa do ambiente construído.

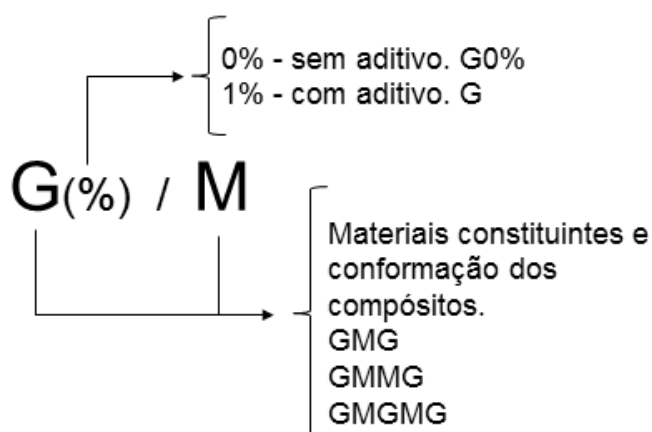
Paralelamente, é realizada uma simulação computacional das placas de gesso e dos compósitos, utilizando o software Energyplus. Para isto, foram feitas modificações nos valores das propriedades térmicas dos materiais constituintes a partir dos ensaios feitos no laboratório, de forma de analisar a temperatura do ar interno das *test-cells* através da simulação de placas de gesso como forro, a partir dos requisitos entregues pela NBR 15575 na zona bioclimática 8, para a cidade de Salvador-BA, recomenda-se aberturas para ventilação grandes com sombreamento e vedações externas para parede e cobertura leves e refletoras.

3.2 Planejamento dos experimentos

Os experimentos foram realizados inicialmente em laboratório, posteriormente *in loco* e complementados com análises em software, a partir das exigências das propriedades analisadas.

Para melhor entendimento dos tipos de componentes e as condições adotadas ao longo do trabalho, foram estabelecidas as nomenclaturas indicadas na Figura 19.

Figura 19. Nomenclatura das amostras.



Fonte. Autor.

As amostras apresentam as seguintes legendas:

- G: Gesso.
- M: manta de sisal.
- GMG: Compósito Gesso Manta Gesso.
- GMMG: Compósito Gesso Manta Manta Gesso.
- GMGMG: Compósito Gesso Manta Gesso Manta Gesso.

A Tabela 6 engloba as propriedades que serão analisadas envolvendo os componentes, normas e os requerimentos de cada ensaio.

Tabela 6. Resumo das propriedades analisadas durante a pesquisa.

CARAT.	COMPONENTE	ENSAIO	REFERÊNCIA
Física	Gesso em pó	Granulometria Módulo de finura	NBR 12.127:2017
	Gesso em pó. Manta de sisal	Massa unitária	NBR 12.127:2017
	Manta de sisal	Gramatura	NBR 12.984:2009
	Gesso endurecido - GMG - GMGMG - GMMG – GMGR	Massa específica	NBR 13.278:2005
Reologia	Pasta de gesso e pasta de gesso com aditivo	Tempo de pega e consistência normal	NBR 12.128:2017
	Pasta de gesso e pasta de gesso com aditivo	<i>Minislump</i>	Pinheiro (2011)
Mecânica	Gesso endurecido - GMG - GMGMG - GMMG – GMGR	Compressão axial	NBR 12.129:2017
	Gesso endurecido - GMG - GMGMG - GMMG – GMGR	Flexão de 4 pontos	NBR 12.142:2010 e JCSE JF4:1984
	Gesso endurecido - GMG - GMGMG - GMMG – GMGR	Dureza	NBR 12.129:2017
Térmico Térmico	Gesso endurecido - GMG - GMGMG - GMMG - GMGR - MATERIAIS CONVENCIONAIS	Condutividade térmica	ASTM C 518:2017 ou ASTM C 177:2013 ou ISO 8302:1991. NBR 15575:2013 - NBR 15220:2005
	Gesso endurecido - GMG - GMGMG - GMMG - GMGR - MATERIAIS CONVENCIONAIS	Calor específico	Medição ASTM C 351 – 92b:1999. NBR 15575:2013 - NBR 15220:2005

Continua.

Tabela 6. Resumo das propriedades analisadas durante a pesquisa.

Térmica	Gesso endurecido - GMG - GMGMG - GMMG - GMGR - MATERIAIS CONVENCIONAIS	Resistência térmica de elementos	ASTM E903-12. NBR 15575:2013 - NBR 15220:2005
	Gesso endurecido - GMG - GMGMG - GMMG - GMGR - MATERIAIS CONVENCIONAIS	Transmitância térmica de elementos MEV	ASTM E903-12. NBR 15575:2013 - NBR 15220:2005 Pinheiro (2011)
	Gesso endurecido - GMG - GMGMG - GMMG - GMGR - MATERIAIS CONVENCIONAIS	Capacidade térmica	NBR 15575:2013 - NBR 15220:2005
	Gesso endurecido - GMG - GMGMG - GMMG - GMGR - MATERIAIS CONVENCIONAIS	Atraso térmico	NBR 15575:2013 - NBR 15220:2005
	Simulação real e virtual	Desempenho térmico	NBR 15575:2013 - NBR 15220:2005

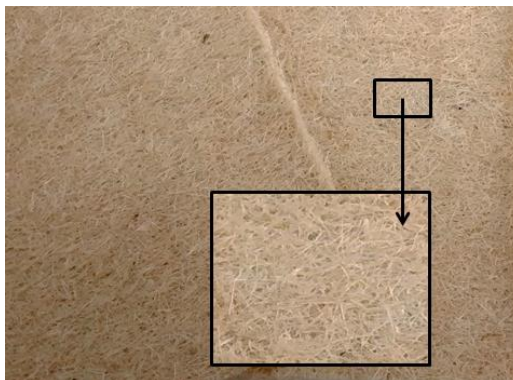
Fonte. Autor.

3.3 Materiais

3.3.1 Manta de sisal

Como material de reforço foram utilizadas mantas de sisal cedida por Hamilton Rios Ltda, que emprega o sisal da cidade de Conceição do Coité – Bahia. A manta foi conformada por compressão das fibras de sisal (Figura 20)

Figura 20. Manta de sisal.



Fonte. Autor.

3.3.2 *Conformação da pasta de gesso*

Para a conformação da pasta de gesso foi utilizado gesso comercial de revestimento, proveniente de Araripe. Para fazer a mistura e obter a consistência da pasta de gesso foi utilizada água destilada com o intuito de evitar a presença de impurezas ou partículas que possam alterar os resultados laboratoriais.

A água destilada foi misturada com o aditivo líquido superplastificante Glenium 51 (fornecido pela BASF) pronto para o uso e livre de cloretos. O aditivo confere alta fluidez, maior trabalhabilidade à pasta de gesso, retardando a pega e reduzindo a relação água-gesso.

3.4 Métodos

Os métodos de ensaios foram planejados para diversas condições na relação água/gesso, percentagem de aditivo utilizado, conformação do compósito em camadas e as temperaturas de análise, conforme pode ser visto na Figura 21.

Figura 21. Esquema das condições de ensaio.

Condições	Teor 0,6		0%	}		
	Água	Gesso	Aditivo			
	180g	300g	0g			
	Teor 0,4		1%		} GMG GMMG GMGMG	
	Água	Gesso	Aditivo			
	120g	300g	3g			
	Teor 0,6		0%		}	
	Água	Gesso	Aditivo			
	180g	300g	0g			
	Teor 0,4		1%			} GMG GMMG GMGMG
	Água	Gesso	Aditivo			
	120g	300g	3g			
Teor 0,6		0%	}			
Água	Gesso	Aditivo				
180g	300g	0g				
Teor 0,4		1%		} GMG GMMG GMGMG		
Água	Gesso	Aditivo				
120g	300g	3g				

Fonte. Autor.

Os ensaios permitem caracterizar a pasta de gesso, a manta de sisal e os compósitos, através de 299 ensaios: para a caracterização física foram realizados 12 ensaios, 72 ensaios para a caracterização mecânica, 18 ensaios para a caracterização reológica e 180 ensaios para as propriedades térmicas. Além disso, foram desenvolvidas *test-cells* para o monitoramento *in loco* e simulações computacionais.

3.4.1 Etapa 1: Desenvolvimento dos compósitos

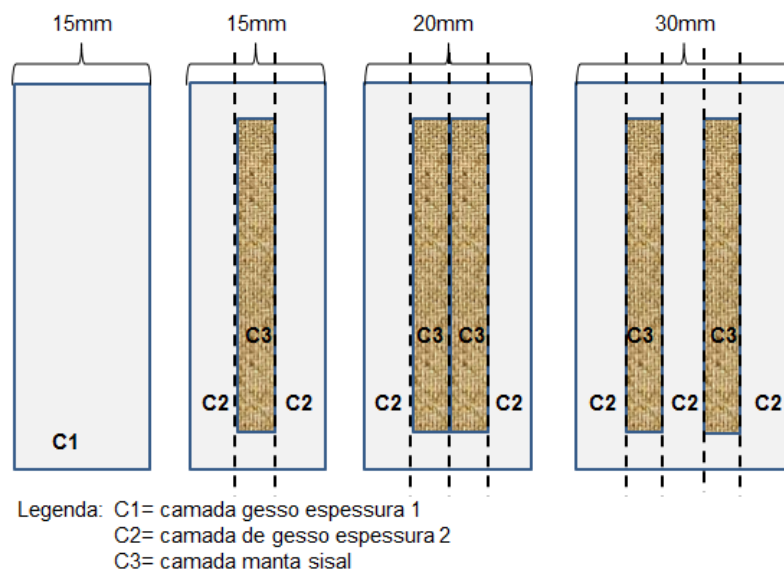
Na produção das três tipologias de compósitos foram utilizadas a pasta de gesso com teor de água/gesso de 0,4 (para uma dosagem de gesso, são utilizados 40% de água) e 1% de aditivo superplastificante, considerando que a porcentagem de aditivo é obtida do total da dosagem de gesso utilizada. Ao acrescentar o aditivo na mistura, a quantidade de água é retirada na mesma porcentagem de aditivo acrescentado.

Para a conformação, foi utilizada uma moldagem preenchida em camadas de pasta de gesso e a manta de sisal intercaladas, de acordo com a amostra a ser produzida.

Os corpos de prova conformados para análise geram cinco tipologias de amostras. A primeira amostra é o gesso sem aditivo (G), a segunda é o gesso com 1% de aditivo (G1%), a terceira amostra foi chamada GMG conformada por uma camada de manta de sisal no meio do compósito e duas camadas laterais de gesso. A quarta amostra, chamada GMMG, tem duas camadas de manta de sisal no meio do compósito e uma camada de gesso nas fases externas. E a quinta amostra, chamada GMGMG, foi feita com uma camada de gesso, uma camada de manta de sisal, uma de gesso, uma de manta de sisal e uma camada final de gesso.

O controle da mistura do material foi realizado em peso, configurando as camadas de gesso e manta de sisal com as mesmas características no interior de cada compósito. As espessuras das amostras são: gesso endurecido sem aditivo e com 1% de aditivo com uma espessura de 15mm, GMG é de 15mm, GMMG com 20mm e GMGMG com 30mm, conforme pode ser visto na Figura 22.

Figura 22. Conformação dos compósitos.



Fonte. Autor.

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% e 47% de fibras, respectivamente.

a) Caracterização dos materiais constituintes

A caracterização dos materiais constituintes foi realizada através de uma análise física com os ensaios de granulometria, módulo de finura e massa unitária para o gesso em pó, segundo os requisitos apresentados pela NBR 12.127:2017 e para a classificação das partículas Quanto ao seu tamanho. Foi realizado o ensaio para um total de três amostras.

Também foi realizado o ensaio de massa unitária e gramatura para a caracterização da manta de sisal, através das prescrições da NBR 12.127:2017 e da NBR 12.984:2009 respectivamente para um total de três amostras para cada ensaio de 200mm x 300mm.

As propriedades físicas foram analisadas no Laboratório de Construção e Estruturas Timoshenkoem conjunto com o Laboratório Centro Tecnológico de Argamassa (CETA) da UFBA.

b) Propriedades no estado fresco

A análise das propriedades no estado fresco da pasta de gesso foi realizada com os ensaios de consistência normal e tempo de pega segundo as prescrições da NBR 12.128:2017. A consistência do gesso em estado fresco foi realizada para teores de 0,4, 0,5 e 0,6 para as pastas sem aditivo e com fator a/g de 0,4 e 0,5 para as pastas com 0,8% e 1,0% de aditivo agregado na água. Depois de atingir a consistência do gesso, foi analisado o tempo de pega, ilustrado na Figura 23. As condições dos ensaios foram controladas, com temperaturas de $24^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de aproximadamente 60%, para a análise de duas amostras para cada teor de água/gesso.

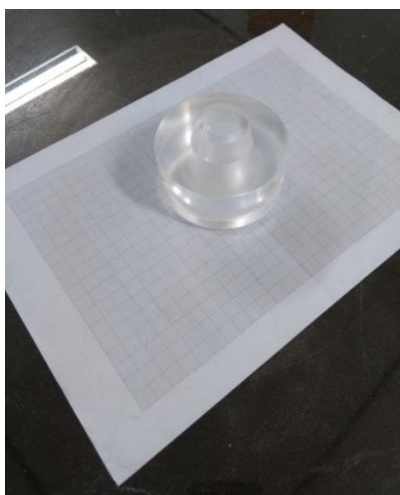
Figura 23. Ensaio de tempo de pega.



Fonte. Autor.

Na sequência, foi realizado o ensaio de *minislump* na pasta de gesso para os teores de água/gesso obtidos no ensaio de consistência. Este ensaio é realizado com duas amostras para cada pasta de gesso com e sem aditivo, através do uso de um tronco cônico de acrílico, uma lâmina de vidro, paquímetro digital e papel milimetrado. No centro da lamina de vidro que será o local no que será instalado o tronco cônico, como pode ser visto na Figura 24.

Figura 24. Ensaio *minislump*.



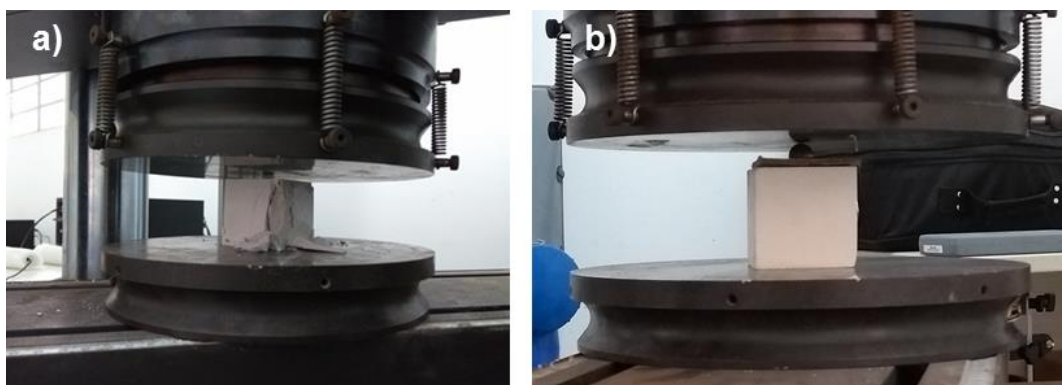
Fonte. Autor

Os equipamentos para desenvolver estes ensaios estão disponíveis no Laboratório de Construção e Estruturas Timoshenko e no Laboratório Centro Tecnológico de Argamassa (CETA) da UFBA.

c) Propriedades no estado endurecido

Para efeito de conhecimento das propriedades no estado endurecido do gesso com e sem aditivo, foi realizado o ensaio de compressão axial e dureza, seguindo os requisitos da NBR 12.129:2017 e a prensa Instron HDX 1000. Foi analisado um total de doze amostras de forma cúbica com dimensões de 50x50 mm², como indicado na Figura 25.

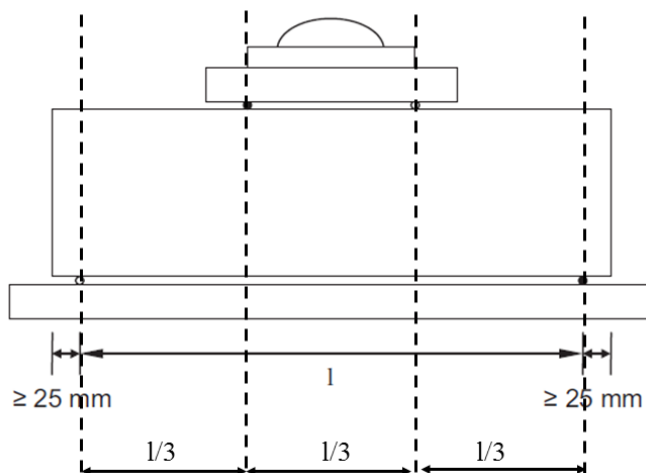
Figura 25. a) Ensaio de compressão, b) Ensaio de dureza.



Fonte. Autor.

Na sequência, os ensaios de flexão de quatro pontos foram realizados com base na NBR 12.142:2010 e a norma Japonesa JCSE-JF4:1984 utilizando-se a máquina universal EMIC DL- 2000 com 20 kN de capacidade máxima de carga, velocidade de teste limitada em 0,5mm/min e apoios distânciados por um comprimento de 120mm (Figura 26). O ensaio à flexão foi adotado com o intuito de determinar a força máxima e de flecha de ruptura.

Figura 26. Esquema dos apoios para ensaio para flexão de quatro pontos.



Fonte. Autor.

As dimensões das amostras foram de $160 \times 50 \times 15 \text{ mm}^3$ para o gesso sem aditivo, para o gesso com 1% de aditivo e para o compósito GMG, de $160 \times 50 \times 20 \text{ mm}^3$ para o compósito GMMG e $160 \times 50 \times 30 \text{ mm}^3$ para o compósito GMGMG. Foram produzidas 30 amostras, sendo seis amostras para cada tipologia de material.

A NBR 12.142:2010 indica que a flexão na ruptura é calculada através da equação 15,

$$f = \frac{3 \cdot F \cdot a}{b \cdot h^2} \quad (15)$$

Onde a é a distância (mm) entre a linha de ruptura fora do terço médio, F é a força de ruptura (N), b a base da seção transversal da amostra (mm) e h é a altura da seção transversal da amostra (mm).

O módulo de elasticidade é calculado como indicado na equação 16,

$$MOE = \frac{c}{4 \cdot b \cdot h^2} \cdot (3 \cdot l^2 - 4 \cdot c^2) \left(\frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon} \right) \quad (16)$$

Onde c é a distância (mm) do apoio ao suporte, l é o vão entre os apoios (mm), b a base da seção transversal da amostra (mm) e h é a altura da seção transversal da amostra (mm).

Os equipamentos para desenvolver os ensaios para a flexão de quatro pontos estão disponíveis no Laboratório de Construção e Estruturas Timoshenko da UFBA.

3.4.2 Etapa 2: Avaliação dos compósitos: Transferência de calor e propriedades térmicas

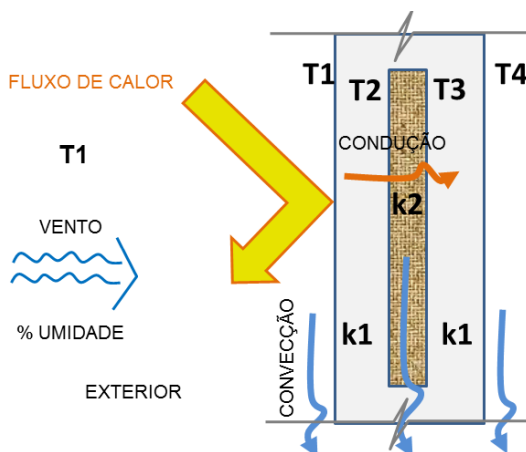
a) Transferência de calor

O comportamento térmico nos compósitos conformados por uma matriz de gesso reforçada com manta de sisal está condicionado pelos mecanismos de transferência de calor que atuam de forma simultânea no material.

A Figura 27 ilustra o compósito GMG, conformado por uma camada externa de gesso exposta à radiação solar, seguida por uma camada de manta de sisal intermediária e uma camada lateral interna de gesso.

A temperatura externa ou da vizinhança T_1 é maior que a temperatura T_2 no interior do compósito, correspondente à intersecção da camada externa de gesso e à camada intermediária da manta de sisal. A temperatura T_3 no limite entre a intersecção da camada intermediária de manta de sisal e a camada lateral interna de gesso também é inferior a T_1 , assim como a temperatura T_4 que atravessa o compósito.

Figura 27. Mecanismos de transferência de calor no GMG.



Fonte. Autor.

Nestas condições há uma transferência de calor contínua do mecanismo de radiação solar no exterior do compósito gerando convecção quando a radiação entra em contato com o ar externo e o gesso.

Outros dois mecanismos por convecção surgem durante a transferência de calor. O primeiro acontece quando o fluxo de calor atravessa o

compósito e atinge a camada interna de manta de sisal gerada pela transpiração e evaporação da água excedente nos poros do gesso que será absorvida pela manta de sisal através dos vazios de ar próprios do material.

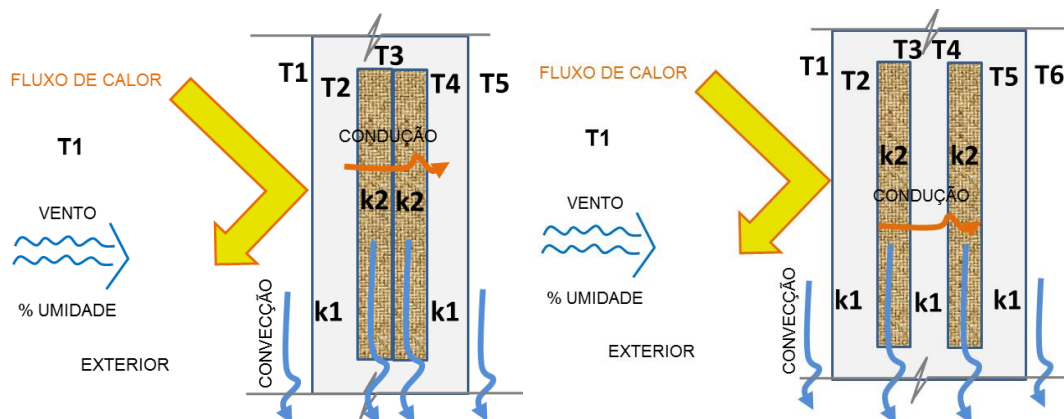
O segundo mecanismo de convecção ocorre quando o fluxo de calor restante que consegue atravessar todo o compósito entra em contato com o ar no ambiente interno (BRANDÃO, 2015).

Portanto, o circuito térmico do compósito é determinado pela radiação total absorvida e a soma das parcelas da convecção externa ao material, a condutividade do gesso, a convecção interna, a condutividade da manta de sisal, a condutividade do gesso e a convecção da face interna do material.

Quando os mecanismos de transferência de calor são analisados nos compósitos GMMG e GMGMG, percebe-se um comportamento similar ao apresentado pelo GMG, entre a temperatura da vizinhança e a temperatura final quando o fluxo de calor percorreu a totalidade do compósito, com uma diminuição da temperatura inicial em função do número de camadas que o fluxo de calor precisa atravessar.

Como ilustra a Figura 28 e 29, nos compósitos GMMG e GMGMG existe uma transferência de calor contínua procedente da radiação solar no exterior do compósito gerando quatro convecções: a primeira quando a radiação entra em contato com o ar externo e atinge o gesso, o qual reage transpirando e evaporando a água livre existente nos seus poros. A segunda e terceira quando o fluxo de calor atinge as camadas internas de manta de sisal gerando transpiração e evaporação da água excedente nos poros do gesso que será absorvida pela manta de sisal. E uma quarta convecção ocorre quando o fluxo de calor restante que consegue atravessar todo o compósito entra em contato com ar no ambiente interno.

Figura 28 e 29. Mecanismos de transferência de calor no GMMG e GMGMG.



Fonte. Autor.

Portanto, o circuito térmico do compósito GMMG é determinado pela radiação total absorvida e a soma das parcelas da convecção externa ao material, a condutividade do gesso, a convecção interna, a condutividade da manta de sisal, uma nova convecção interna, a condutividade da manta de sisal, a condutividade do gesso e a convecção da face interna do material. No entanto, o compósito GMGMG apresenta o mesmo circuito térmico que o compósito GMMG, mas deverá ser acrescentada a condução do fluxo de calor da camada intermediária de gesso.

Os mecanismos de transferência de calor dos compósitos estão vinculados à conformação de cada compósito através da localização das camadas no seu interior. Já que a adesão de cada camada determinará as convecções no interior do compósito e a condutividade do fluxo de calor.

Para analisar a influência da aderência entre a manta de sisal e a matriz de gesso na transferência de calor dos compósitos, foram realizadas imagens com microscopias eletrônicas de varredura no Instituto Federal da Bahia na cidade de Salvador. As micrografias foram obtidas utilizando um microscópio eletrônico de varredura marca Oxford Instrument (Nordlys nano) com aumentos de 50x, 52x e 57x, como indicadas na Figura 30.

Figura 30. Equipamento de ensaio de MEV.



Fonte. Autor.

Antes da varredura as amostras foram colocadas na estufa para a retirada de umidade e posteriormente, foram metalizadas com ouro para impedir o acúmulo de contaminação na superfície dos corpos de prova analisados.

b) Condutividade térmica

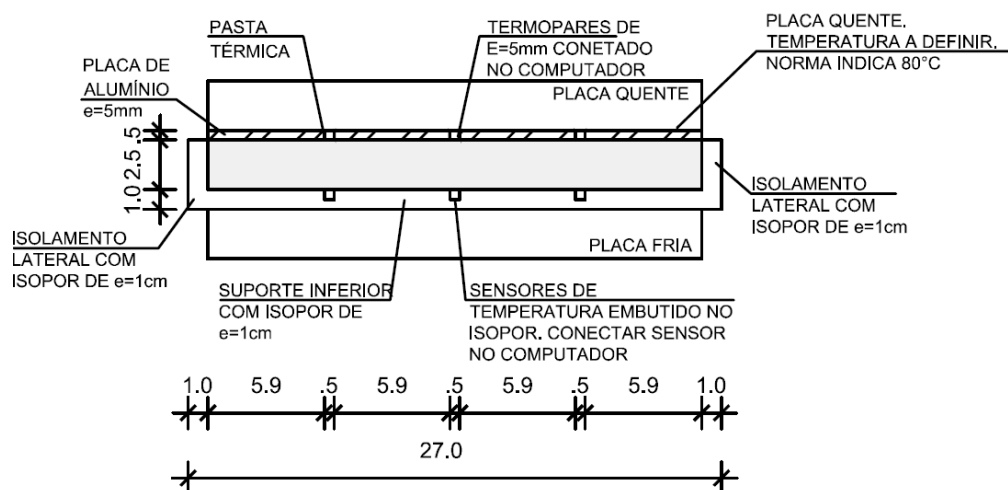
A análise das propriedades térmicas foi iniciada com a fabricação de um aparelho a partir dos requerimentos apresentados pelas normas ASTM C 518:2017, ASTM C 177:2013, ISO 8302:1991, NBR 15575:2013, NBR 15220:2005 e suas normas complementares. O método utilizado para a condutividade térmica é o princípio de placa quente protegida para materiais termicamente homogêneos e não homogêneos que foi realizado no gesso com 1% aditivo, nos três compósitos (GMG, GMMG e GMGMG) e três materiais convencionais utilizados na construção civil (forro de PVC, chapa de *drywall* e granito preto São Gabriel) com dimensões de 25x14cm. Portanto, o ensaio foi realizado para um total de 28 amostras, sendo quatro amostras para cada tipologia de material.

A montagem do conjunto consiste em duas placas horizontais paralelas, uma placa quente inferior e uma placa superior fria, através do uso da prensa térmica localizada no Laboratório de Construção e Estruturas Timoshenko da UFBA.

O fluxo de calor emitido pela prensa térmica foi avaliado através da análise do corpo de prova com uma câmera térmica Flir C2, obtendo-se os dados iniciais da distribuição de calor, podendo-se determinar as dimensões dos corpos de prova a serem analisados.

Conforme a Figura 31, entre as duas placas da prensa térmica foi posicionada a amostra com isolamento lateral com isopor para evitar a perda de calor durante a execução do ensaio.

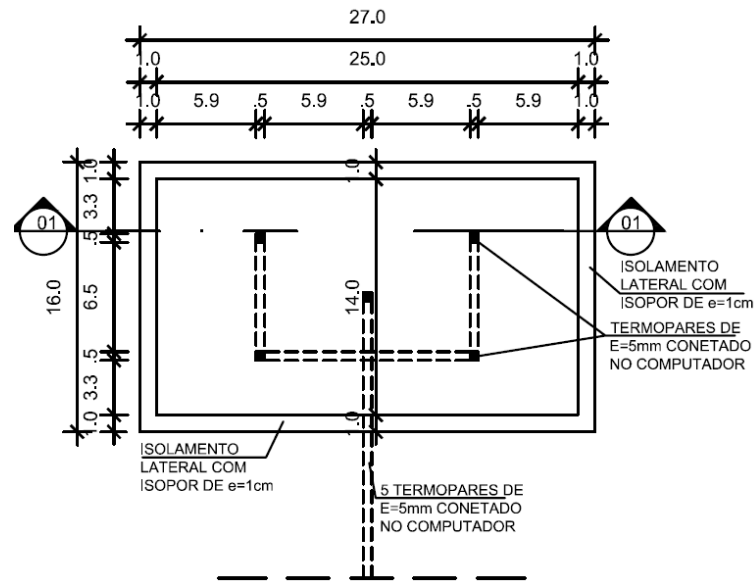
Figura 31. Montagem do conjunto.



Fonte. Autora.

Conforme a Figura 32, entre a amostra e a placa fria superior foi instalado um isolamento térmico de isopor que permitiu embutir os sensores de temperatura Ds18b20, precisão de 0,5°C, para a leitura da temperatura nesta placa em cinco pontos específicos.

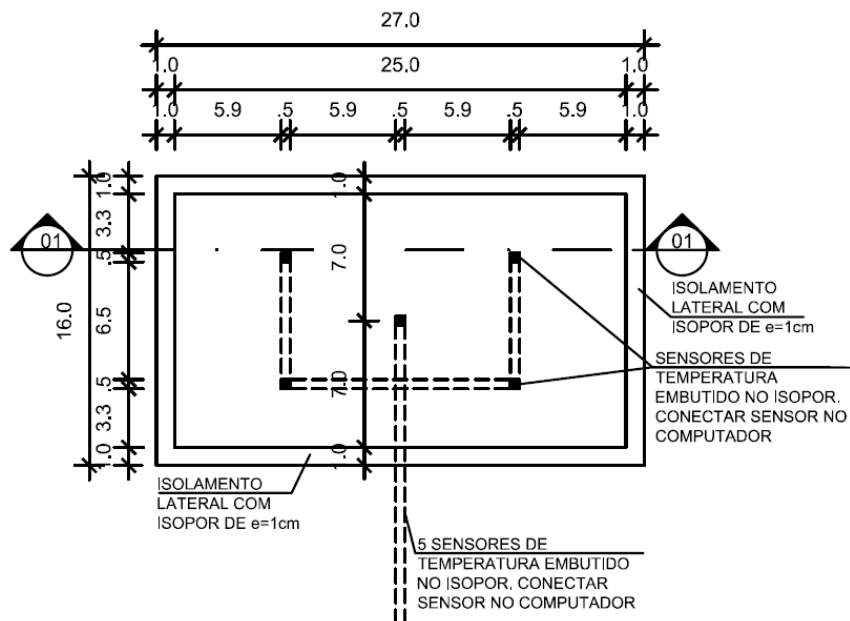
Figura 32. Planta nível placa fria.



Fonte. Autora.

Conforme a Figura 33, entre a amostra e a placa quente inferior foi instalada uma chapa de alumínio que permitiu manter a condutividade térmica da placa quente e localizar os termopares que realizaram a leitura do fluxo de calor desta placa em cinco pontos. O fluxo de calor foi proporcionado pela prensa térmica com uma temperatura constante de 40°C, 60°C ou 80°C.

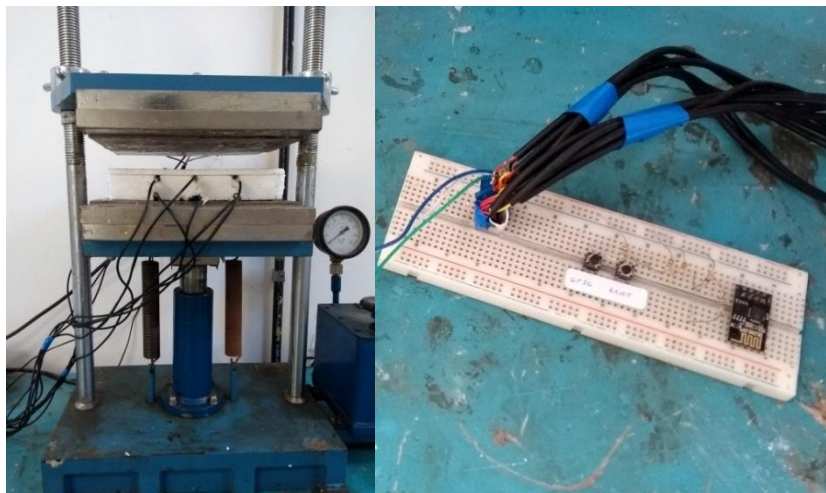
Figura 33. Planta nível placa quente.



Fonte. Autora.

A aquisição de dados das temperaturas dos sensores foi feita através de um computador dedicado que junta as informações em um cartão de memória que transmite os dados ao computador, como indicado na Figura 34.

Figura 34. Equipamentos e montagem do equipamento para ensaio.



Fonte. Autor.

A ASTM C518:2017 determina que a condutividade térmica deve ser calculada como indicado na equação 17 e 18,

$$\lambda = S \cdot E \cdot \frac{L}{\Delta T} \quad (17)$$

$$C = \frac{S \cdot E}{\Delta T} \quad (18)$$

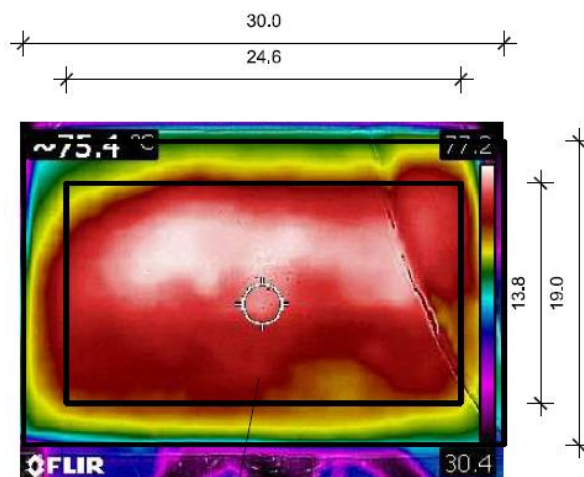
Sendo que S é o fator de calibragem $((W/m^2)/V)$, E é o fluxo de calor do transdutor (V), L a distância entre as placas (m), ΔT é a diferença de temperatura da amostra (K) e C condutância térmica de um material conhecido $(W/(m^2K))$.

Para o desenvolvimento dos ensaios de condutividade térmica foi necessário realizar testes da prensa térmica para avaliar a homogeneidade da transferência do fluxo de calor no corpo de prova. Inicialmente se produziu um corpo de prova de gesso padrão que foi esquentado com a prensa térmica a 80°C durante 4 horas.

O compósito foi retirado da prensa e fotografado com uma câmera térmica Flir C2 obtendo-se os dados iniciais da distribuição do calor. A Figura 35 colaborou com a determinação do tamanho do corpo de prova a ser

utilizado para a execução do ensaio e garantir uma melhor homogeneidade na distribuição de temperatura no corpo de prova.

Figura 35. Imagem térmica do compósito.



Fonte. Autora.

Prévio à análise das amostras foi verificada a confiabilidade do equipamento construído a partir da análise de três materiais utilizados na construção civil com valores de condutividade térmica estabelecida pela NBR 15220:2005: chapa de *drywall*, forro em PVC e granito.

A análise foi realizada com o intuito de atingir os valores apresentados pela NBR 15220:2005, mas foi necessário verificar a hipótese indicada por Callister (2002) que indica que a condutividade térmica dos materiais cerâmicos diminui com o aumento de temperatura, portanto, a análise dos materiais foi realizada a 40°C, 60°C e 80°C, indicados na Tabela 7.

Tabela 7. Condutividade térmica do *drywall*, forro em PVC e granito.

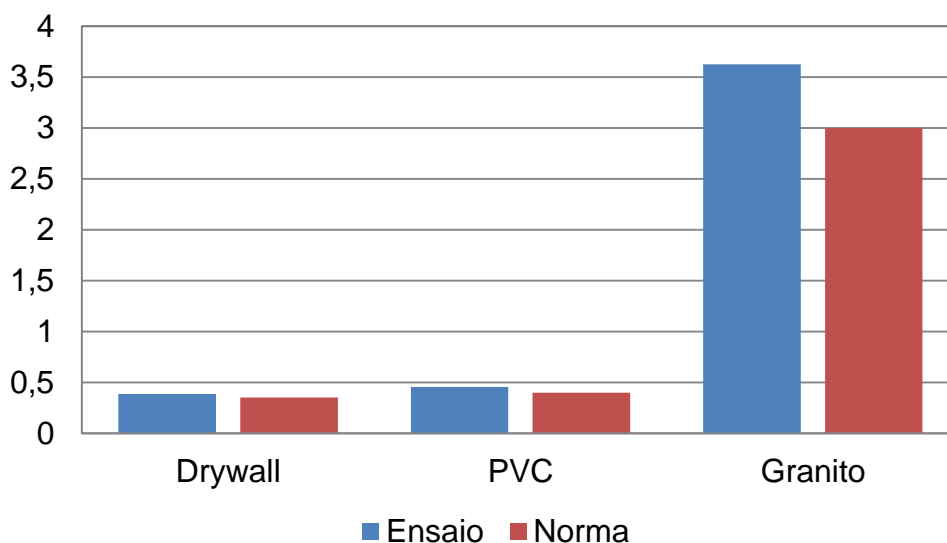
	Taxa de transferência de calor (W)	T2-K (Interna)	T1-K (Externa)	ΔT	Espessura (m)	κ (W/mK)
40°C						
Chapa <i>drywall</i>	800	29,9	40	-10,09	0,011	0,387
PVC	800	33,7	40	-6,26	0,008	0,454
Granito	800	38,0	40	-1,96	0,02	3,624
60°C						
Chapa <i>drywall</i>	800	29,91	60	-30,09	0,011	0,144
PVC	800	33,7395015	60	-26,26	0,008	0,120
Granito	800	38,04	60	-21,96	0,02	0,359
80°C						
Chapa <i>drywall</i>	800	29,91	80	-50,09	0,011	0,092
PVC	800	33,7395015	80	-46,26	0,008	0,073
Granito	800	38,04	80	-41,96	0,02	0,201

Fonte. Autor.

Os resultados obtidos a uma temperatura de 40°C são os valores de maior similitude com os apresentados pela norma, obtendo-se uma condutividade térmica para a chapa de *drywall*, forro de PVC e granito de 0,387, 0,454 e 3,624 W/(mK), respectivamente, para uma densidade de 623,48, 2718,75 e 3306,343 kg/m³, respectivamente.

Estes dados são validados a partir da NBR 15220:2005, que indica que a chapa de *drywall* com uma densidade entre 750-1000 kg/m³ deve ter uma condutividade térmica de 0,35 W/(mK). Para a o forro em PVC a norma indica que para uma densidade entre 1200-1400 kg/m³ a condutividade corresponde a 0,4 W/(mK). Já o granito com uma densidade entre 2300-2900 kg/m³ apresenta uma condutividade de 3,0 W/(mK), como indicado na Figura 36.

Figura 36. Comparativo dos resultados do ensaio e os dados da norma.



Fonte. Autor.

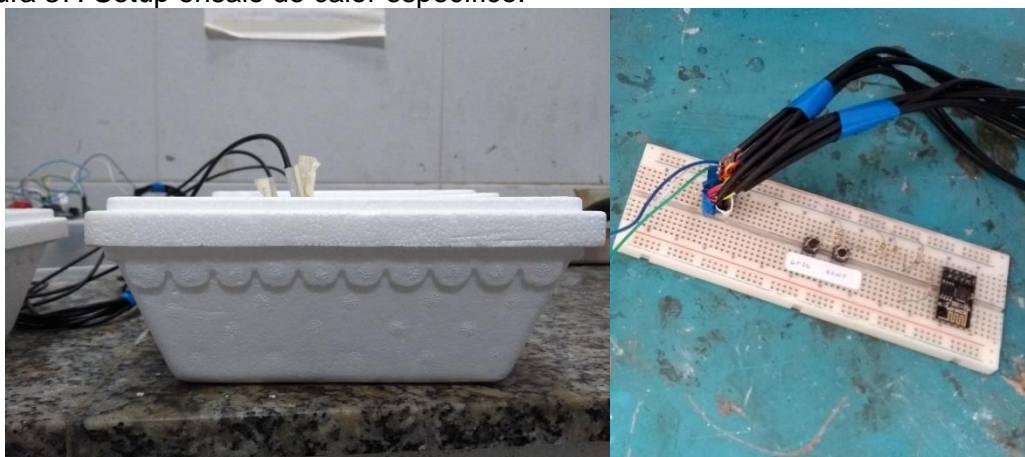
Conclui-se que o aparato de ensaio fabricado neste trabalho conseguiu-se reproduzir os valores propostos na NBR 15220:2005, podendo-se quantificar as diferenças das medições realizadas. Para a chapa de *drywall* obteve-se uma diferença de 0,037 W/(mK), para o forro de PVC existe uma diferença de 0,054 W/(mK) e 0,624 W/(mK) para o granito. A maior diferença nos valores obtidos é do granito pela diferença na massa específica do material analisado e o material apresentado pela norma, assim como a composição do granito, já que é um material natural com mudanças na sua composição mineralógica, podendo aumentar a diferenças dos resultados.

c) Calor específico

Para a execução do ensaio de calor específico foi construído um aparelho a partir dos requerimentos apresentados pelas normas ASTM C 351 – 92b:1999, NBR 15575:2013, NBR 15220:2005 e suas normas complementares. O método utilizado consiste na secagem do corpo de prova com massa conhecida na estufa a uma temperatura conhecida de 40°C, 60°C e 80°C, controlada através de um sensor a prova de água Ds18b20 com precisão de 0,5°C. Quando o corpo de prova se estabiliza termicamente, ele é inserido num

recipiente isolado (isopor) que contém entre 500 ml e 750 ml de líquido não reagente, fazendo com que o corpo de prova libere calor. Este calor é medido através de sensores Ds18b20, precisão de $0,5^{\circ}\text{C}$, encapsulados com proteção a líquidos e conectados a um computador dedicado que permite fazer a leitura das temperaturas da estufa e do líquido não reagente, até o computador, como indicado na Figura 37.

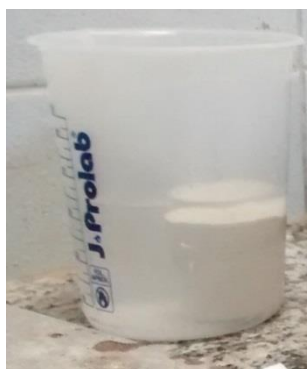
Figura 37. Setup ensaio de calor específico.



Fonte. Autor.

A norma ASTM-351-92b indica que não deve existir uma perda de massa maior que 0,001g do material. Considerando que o gesso perde massa quando submerso na água, é necessário identificar um líquido alternativo que permita realizar o ensaio. Portanto, foi realizada uma análise prévia de diferentes meios que permitiram selecionar o líquido alternativo para o ensaio de calor específico. Conforme a Figura 38, a análise foi realizada com corpos de prova cilíndricos de gesso padrão.

Figura 38. Corpos de prova de gesso padrão.



Fonte. Autora.

Os resultados obtidos para a submersão na água, indicados na Tabela 8, mostram uma perda e ganho de massa superior a 0,001g.

Tabela 8. Resultados de perda de massa na água.

Tempo (min)	Peso (Kg)	
	C.P	Perda de massa
0	0,155	-
1,0	0,170	0,015
2,5	0,165	-0,005
5,0	0,170	0,005
7,5	0,170	0,000
10,0	0,170	0,000
12,5	0,170	0,000
15,0	0,170	0,000
17,5	0,165	-0,005
20,0	0,170	0,005
22,5	0,170	0,000
25,0	0,170	0,000
27,5	0,170	0,000
30,0	0,170	0,000
32,5	0,170	0,000
35,0	0,170	0,000
60,0	0,160	-0,010
Não estabiliza		

Fonte. Autora.

Posteriormente foi necessário identificar um líquido alternativo que permitisse realizar o ensaio, analisando o comportamento do gesso submerso na água destilada, álcool, óleo, álcool gel e vaselina líquida.

A Tabela 14 indica os resultados da vaselina líquida e o óleo, concluindo-se que o gesso padrão tem melhor comportamento na vaselina líquida, mas não consegue se estabilizar, perdendo massa.

Tabela 9. Resultado do gesso endurecido sem aditivo submerso em vaselina líquida e álcool.

Líquido: vaselina líquida			Líquido: óleo		
Tempo (min)	Peso (Kg)		TEMPO (min)	Peso (Kg)	
	Corpo de prova	Perda de massa		Corpo de prova	Perda de massa
0	0,285	-	0	0,275	-
2,5	0,280	0,005	2,5	0,270	0,005
5,0	0,280	0,000	5,0	0,270	0,000
7,5	0,285	0,005	7,5	0,270	0,000
10,0	0,285	0,000	10,0	0,270	0,000
12,5	0,285	0,000	12,5	0,270	0,000
15,0	0,285	0,000	15,0	0,270	0,000
17,5	0,285	0,000	17,5	0,275	0,005
20,0	0,285	0,000	20,0	0,275	0,000
22,5	0,285	0,000	22,5	0,270	-0,005
25,0	0,285	0,000	25,0	0,270	0,000
27,5	0,285	0,000	27,5	0,270	0,000
30,0	0,285	0,000	30,0	0,275	0,005
32,5	0,285	0,000	32,5	0,275	0,000
35,0	0,285	0,000	35,0	0,275	0,000
60,0	0,285	0,000	60,0	0,275	0,000
2,5min tem perda de massa inicial. 7,5 min estável. Absorve líquido.			Não estabiliza		

Fonte. Autora.

A Tabela 10 apresenta os resultados para a água destilada, concluindo-se que o gesso padrão é muito instável, inabilitando o uso deste líquido para o ensaio.

Tabela 10. Resultados do gesso endurecido sem aditivo submerso em água destilada.

Líquido: água destilada		
Tempo (min)	Peso (Kg)	
	Corpo de prova	Perda de massa
0	0,265	-
2,5	0,265	0,000
5,0	0,265	0,000
7,5	0,265	0,000
10,0	0,265	0,000
12,5	0,265	0,000
15,0	0,265	0,000
17,5	0,265 - 0,270	0,0 - 0,05
20,0	0,270	0,0 - 0,05
22,5	0,270	0,000
25,0	0,265 - 0,270	0,0 - 0,05
27,5	0,265	0,0 - 0,05
30,0	0,270	0,005
32,5	0,270	0,000
35,0	0,270	0,000
60,0	0,270	0,000
Não estabiliza		

Fonte. Autora.

Os resultados indicados na Tabela 11, para álcool e álcool gel hidratados com 46 INPM (na atualidade é proibida a venda de álcool puro, portanto existe o INPM, que indica o conteúdo de álcool na mistura com água), indicam uma estabilidade no gesso padrão sem perda de massa num período de tempo de 60 minutos, permitindo o uso deste líquido para análise do gesso com 1% de aditivo e dos compósitos.

Tabela 11. Resultados para gesso endurecido sem aditivo submerso em álcool e álcool gel.

Líquido: álcool			Líquido: álcool gel		
Tempo (min)	Peso (Kg)		Tempo (min)	Peso (Kg)	
	Corpo de prova	Perda de massa		Corpo de prova	Perda de massa
0	0,250	-	0	0,270	-
2,5	0,250	0,000	2,5	0,270	0,000
5,0	0,250	0,000	5,0	0,270	0,000
7,5	0,250	0,000	7,5	0,270	0,000
10,0	0,250	0,000	10,0	0,270	0,000
12,5	0,250	0,000	12,5	0,270	0,000
15,0	0,250	0,000	15,0	0,270	0,000
17,5	0,250	0,000	17,5	0,270	0,000
20,0	0,250	0,000	20,0	0,270	0,000
22,5	0,250	0,000	22,5	0,270	0,000
25,0	0,250	0,000	25,0	0,270	0,000
27,5	0,250	0,000	27,5	0,270	0,000
30,0	0,250	0,000	30,0	0,270	0,000
32,5	0,250	0,000	32,5	0,270	0,000
35,0	0,250	0,000	35,0	0,270	0,000
60,0	0,250	0,000	60,0	0,270	0,000
Estável			Estável		

Fonte. Autora.

Depois de escolhido o líquido alternativo, álcool, avaliou-se a calibragem dos termopares através da análise de uma chapa de *drywall* a uma temperatura de 40°C, com o intuito de atingir os valores apresentados pela NBR 15220:2005.

Para a chapa de *drywall* analisada no álcool obteve-se um calor específico de 0,89 kj/(kgK) para uma densidade de 623,4 kg/m³, observando-se uma diferença como dos dados da NBR 15220:2005 para a chapa, indicando 0,84 kj/(kgK) para uma densidade entre 750-1000 kg/m³. O erro da medição é de 5%, devido à diferença de densidade entre as amostras.

O ensaio deverá ser realizado no gesso com 1% de aditivo, nos compósitos (GMG, GMMG, GMGMG) e três materiais convencionais utilizados na construção civil (forro de PVC, chapa de *drywall* e granito preto são Gabriel).

Obtendo-se um total de 28 amostras, sendo quatro amostras para cada tipologia de material.

Os equipamentos para desenvolver estes ensaios estão disponíveis no Laboratório de Construção e Estruturas Timoshenko da UFBA.

d) Resistência térmica, capacidade térmica, transmitância térmica e atraso térmico

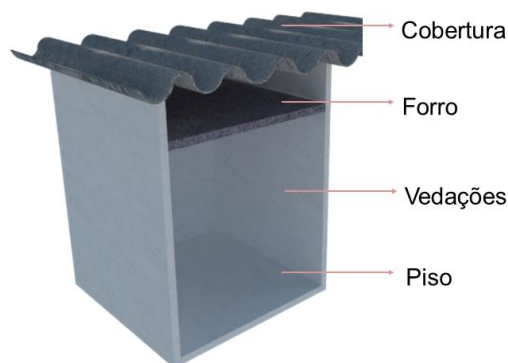
Estas propriedades térmicas do material são derivadas das medições obtidas para os ensaios de condutividade térmica e calor específico, através de métodos de cálculo e os requerimentos indicados pela NBR 15575:2013 e NBR 15220:2005. A análise destas propriedades térmicas deverá ser realizada no gesso com 1% de aditivo, nos compósitos (GMG, GMMG, GMGMG). Obtendo-se um total de 16 amostras, sendo quatro amostras para cada tipologia de material.

3.4.3 Etapa 3: Simulação das test-cells: in loco e software

Simulação das test-cell in loco

Para a simulação das *test-cells* foi construído um cubo com envoltórias em placas de gesso com 1% de aditivo e dimensões de 40x40cm com uma área construída de 1600cm², com pé direito de 40cm e composta por uma área interna livre e sem divisórias, como ilustrado na Figura 39.

Figura 39. Imagem ilustrativa da test-cells.



Fonte. Autor.

Para a realização do estudo, as envoltórias foram construídas e montadas no Laboratório de Construção e Estruturas Timoshenko da UFBA, para posterior traslado das *test-cells* ao local de ensaio, como indicado na Figura 40. Para a seleção do local foi necessário encontrar um terreno sem sombreamentos ou rajadas de vento próprias de locais em altura, portanto, os *test-cells* foram localizados na cidade de Guarajuba-BA.

Figura 40. Localização das *test-cells*.



Fonte. Google, 2018.

As *test-cells* foram construídas com uma face da envoltória e o forro removíveis com o intuito de analisar e comparar os diversos materiais compósitos como forro de forma isolada, como indicadas na Figura 41.

Figura 41. *Test-cell* no terreno.



Fonte. Autor.

Para realizar a comparação dos materiais desenvolvidos no laboratório, foram geradas diferentes configurações para a análise das *test-cells*:

- TCF1. *Test-cell* com vedações verticais e forras em gesso.
- TCF2. *Test-cell* com vedações verticais em gesso e forro em GMG.
- TCF3. *Test-cell* com vedações verticais em gesso e forro em GMMG.
- TCF4. *Test-cell* com vedações verticais em gesso e forro em GMGMG.

A Tabela 12 apresenta as configurações a serem analisadas neste trabalho denominadas TCF1, TCF2, TCF3 e TCF4.

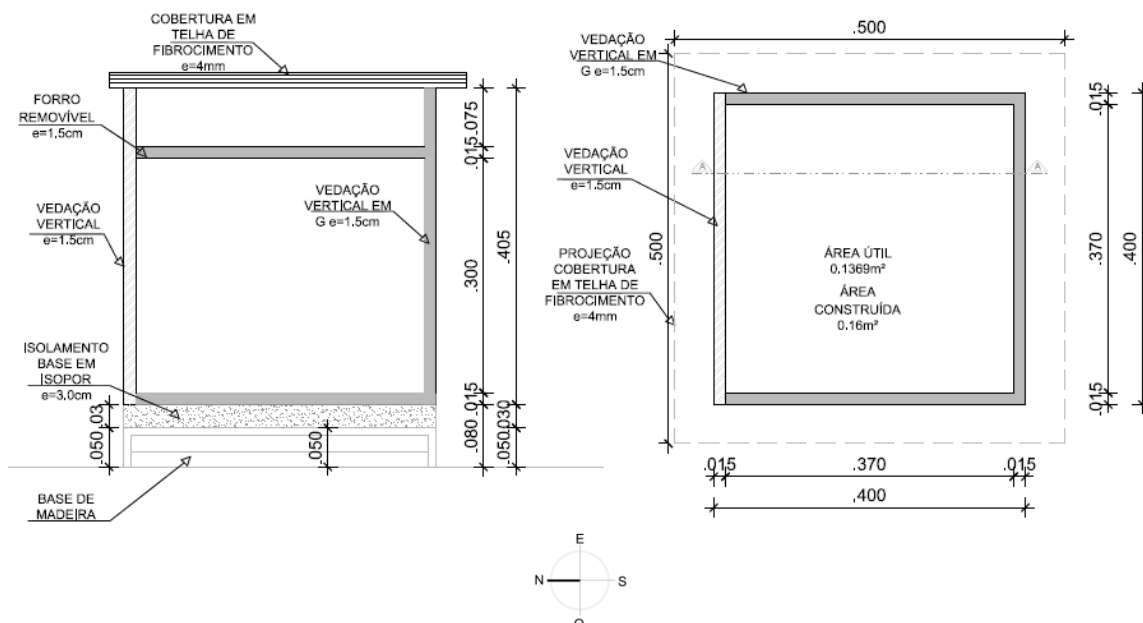
Tabela 12. Configurações *test-cells*.

	Vedações Verticais				Forros			
	G	GMG	GMMG	GMGMG	G	GMG	GMMG	GMGMG
TCF1								
TCF2								
TCF3								
TCF4								

Fonte. Autor.

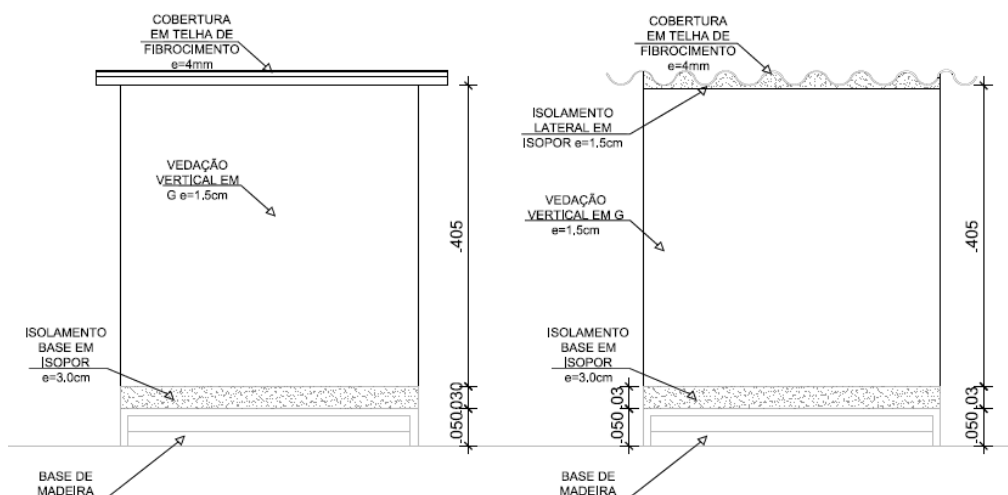
a) Características construtivas da *test-cell*

A primeira etapa consistiu na construção da *test-cell* com vedações verticais e uma base em placas de gesso com 1% de aditivo de 1,5cm, de acordo com o desenho indicado na Figura 42, que apresenta a planta baixa e um corte longitudinal.

Figura 42. Planta e corte da *test cell*.

Fonte. Autor.

O modelo foi construído sobre uma base de madeira de espessura de 5cm com uma placa de isopor de 3cm para isolar termicamente a *test-cell* do terreno, com uma cobertura executada em telha de fibrocimento de 4mm, nas dimensões de 50x50cm, com isolamento lateral em isopor nos encaixes com as placas de forro. A Figura 43 apresenta as fachadas da *test-cell*.

Figura 43. Fachada leste e norte da *test-cell*.

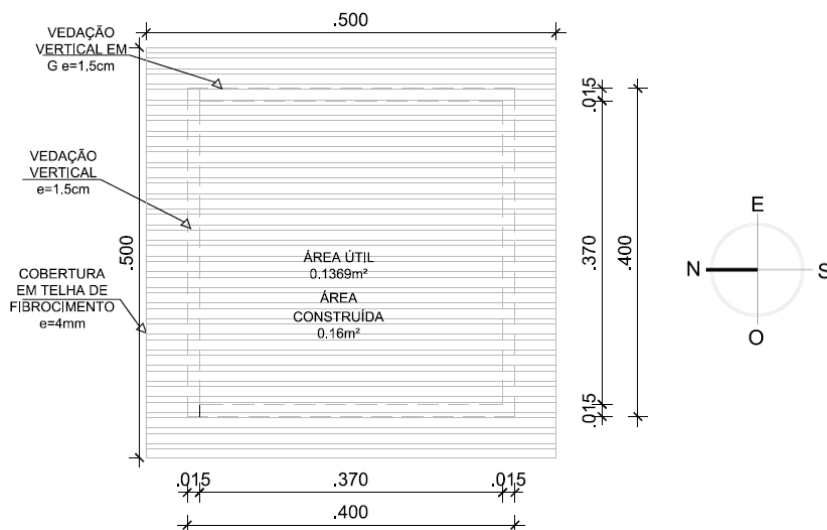
Fonte. Autor.

A *test-cells* tem uma abertura lateral no encaixe do isolamento da cobertura com uma das vedações verticais que permite acessar aos sensores. A instalação dos sensores foi feita através da vedação vertical móvel.

b) Orientação da *test-cell*

Conforme a Figura 44, o modelo foi localizado no terreno com orientação norte verdadeiro para a vedação vertical móvel com o intuito de obter as medições para verão. Destaca-se que existem os distânciamentos necessários entre os limites do terreno e a localização da *test-cell* para evitar possíveis sombreamentos durante a análise.

Figura 44. Orientação das *test-cells*.



Fonte. Autor.

c) Monitoramento de temperatura da *test-cell*

Para realizar o monitoramento das *test-cells* foram utilizados cinco sensores a prova de água Ds18b20, precisão de $0,5^{\circ}\text{C}$, distribuídos no exterior e interior do modelo. Paralelamente, um computador dedicado controla a leitura da temperatura a cada minuto durante 24 horas no dia, por um período de 21 dias, indicado na Tabela 13 e na Figura 45.

Tabela 13. Período de monitoramento do modelo.

	Período
TCF1	29/09/2018 a 01/10/2018
TCF2	11/09/2018 a 13/10/2018
TCF3	14/09/2018 a 16/10/2018
TCF4	17/09/2018 a 19/10/2018
TCF: <i>test-cells</i> para análise do forro.	

Fonte. Autor.

Figura 45. Monitoramento da *test cell*.

Fonte. Autor.

A partir do monitoramento das temperaturas internas e externas das *test-cells* foi analisada a influência das camadas de gesso e manta de sisal que conformam os compósitos no desempenho térmico do volume construído.

Simulação das *test-cell* no software

Depois de realizada a medição do modelo real, foi realizada a simulação computacional das *test-cells* de forma de comparar os resultados obtidos *in loco*, permitindo balizar os dados obtidos no laboratório que serviram de entrada para realizar a simulação. Conforme indicado pela NBR 15575:2013, para a realização das simulações térmicas é recomendado o emprego do software EnergyPlus.

Para a realização das simulações é preciso alimentar o software com os dados fidedignos da localização, dados climáticos e propriedades térmicas dos materiais obtidas nos ensaios laboratoriais. Nesta pesquisa, os dados climáticos utilizados foram do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para

a cidade de Salvador-BA (Zona Bioclimática 8) nos mesmos períodos monitorados das *test-cells* analisadas *in loco*, assim como as propriedades termofísicas obtidas nos ensaios de laboratório (espessura, massa específica, condutividade térmica, absorvância, emissividade e calor específico).

As simulações das *test-cells* foram realizadas com as mesmas configurações das *test-cells in loco*. A diferença dos dados monitorados com os dados simulados será avaliada através do erro percentual e do fator de correlação entre os dados obtidos (SPOSTO et al., 2007; KRÜGER e MICHALOSKI, 2002).

d) Características climáticas de Salvador

A cidade de Salvador-BA está situada entre as latitudes 12°45'00" e 13°7'30" no Sul e longitude de 38°22'30" e 38°37'30" Oeste, conformando uma península no Oceano Atlântico, delimitada pela Bahia de Todos os Santos e o mar aberto. Esta península concede a cidade três fachadas continentais: no sentido noroeste, sudeste e sul que intervêm nas características climáticas da cidade. A península tem um clima tropical quente e úmido, com temperaturas médias máximas no verão de 30°C e média mínima de 26,2°C, enquanto no inverno uma temperatura média máxima de 26,2°C e média mínima de 21°C, atingindo uma insolação máxima em janeiro de 245,6h. A região apresenta precipitações médias máximas de 295mm mensais e umidade relativa sem grandes variações durante o ano com uma média máxima de 83,1% e com uma oscilação de 4%. Os ventos dominantes são no sentido sudeste com velocidade média máxima de 3,2m/s (ANDRADE et al., 2002, NERY et al., 2006).

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização dos materiais constituintes

A caracterização do gesso em pó foi realizada através dos ensaios de granulometria e o módulo de finura. Na caracterização granulométrica por peneiramento manual verificou-se que cerca de 93% dos grãos passaram pela peneira de 0,21mm, atingindo os requisitos da NBR 13207:2017 para gessos de revestimento. Para o módulo de finura, obteve-se 1,47, superior ao valor mínimo limite da NBR 12127:2017 para gessos grossos. A Tabela 14 apresenta as determinações físicas do gesso.

Tabela 14. Propriedades físicas do gesso em pó.

	Valor	Desv. Pad.	C.V (%)	Limite	NBR
Massa unitária (g/cm³)	677,79	6,85	1,01	> 600,0	13.207:2017
Módulo de finura (g/m²)	1,47	0,097	6,64	> 1,1 (grosso)	13.207:2017

Fonte. Autora.

A caracterização da manta de sisal foi realizada através da análise da gramatura, massa unitária e espessura. A caracterização da gramatura indicou que a manta apresenta 724,4 g/m² para uma espessura de 5,63 mm e para uma massa unitária média de 0,13 g/cm³, como indicado na Tabela 15.

Tabela 15. Propriedades físicas da manta de sisal.

	Valor	Desv. Pad.	C.V (%)
Espessura (mm)	5,63	0,01	10,48
Massa unitária (g/cm³)	0,131	0,13	10,2
Gramatura (g/m²)	724,40	0,62	0,086

Fonte. Autora.

4.2 Análise das propriedades no estado fresco

A análise das propriedades no estado fresco foi realizada para desenvolver a pasta de gesso através dos ensaios de consistência normal, tempo de pega e *minislump*.

A consistência normal da pasta de gesso sem aditivo foi analisada com três teores de a/g 0,4, 0,5 e 0,6 (para uma dosagem de gesso, são

utilizados 40%, 50% ou 60% de água) Uma vez atingida a consistência da pasta de gesso, foi acrescentado o aditivo superplastificante em diversas percentagens calculados a partir da dosagem de gesso utilizada. Ao acrescentar o aditivo na mistura, a quantidade de água é retirada na mesma porcentagem de aditivo acrescentado.

A Tabela 16 indica que a pasta de gesso sem aditivo na mistura atinge a consistência normal com um fator de a/g de 0,6. No entanto, quando o aditivo superplastificante foi acrescentado na água prévio à mistura, foi necessário analisar a porcentagem de aditivo e o fator de a/g apropriados para atingir a consistência normal. A análise consistiu em determinar o fator a/g entre 0,4 ou 0,5 com uma porcentagem de aditivo entre 0,8% a 1%. Os resultados obtidos permitem determinar que a conformação da pasta de gesso devesse ser feita com teor a/g de 0,4 e 1% de aditivo, permitindo diminuir a quantidade de água utilizada na mistura.

Tabela 16. Resultados de consistência normal para pastas de gesso.

Pastas sem aditivo						
a/g	Gesso (g)	Água (g)	Aditivo (%)	Aditivo (g)	mm	Consistência
0,4	300	120	0%	0	18	22
0,5	300	150	0%	0	16	24
0,6	300	180	0%	0	10	30
Pastas com aditivo						
0,4	300	120	0,80%	2,4	6	34
0,4	300	120	1%	3	8	32
0,4	300	120	1,20%	3,6	5	35
0,5	300	120	0,8%	2,4	3	37
0,5	300	150	1%	3	4	36
0,5	300	150	1,2%	3,6	4,5	38

Fonte. Autor.

As pastas de gesso que atenderam os valores de consistência foram verificadas no tempo de pega, *minislump* e propriedades mecânicas, confirmando o uso para a conformação do compósito.

Após a realização da verificação da consistência da pasta de gesso, avaliou-se o tempo de pega das pastas com consistência satisfatória, conforme a Tabela 17. Observa-se que o início de pega da pasta de gesso sem aditivo

com fator a/g de 0,6 acontece com 8 minutos aproximadamente e o fim de pega se dá em torno de 20 minutos.

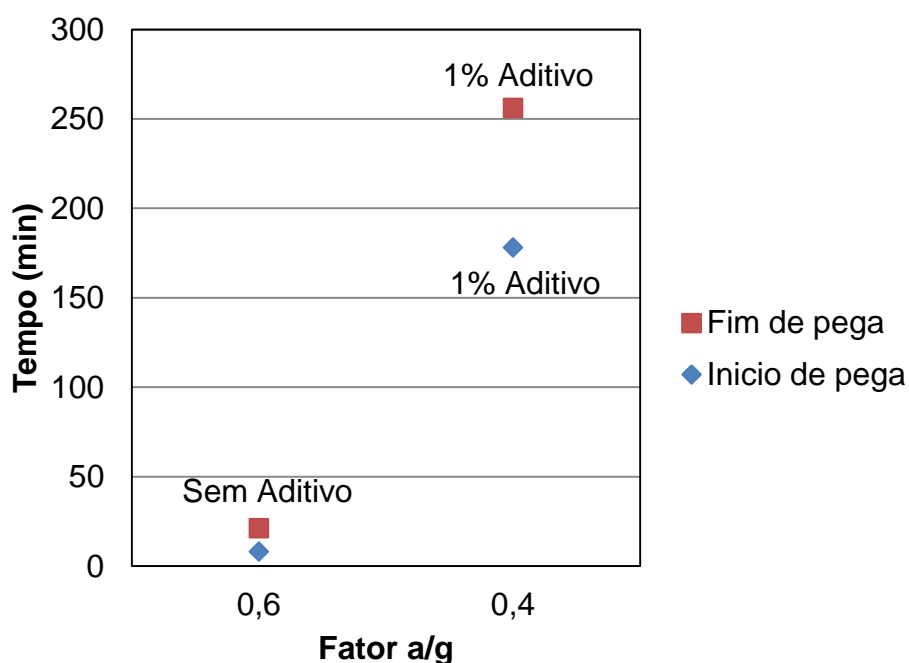
Tabela 17. Tempo de pega das pastas de gesso.

Fator a/g	Aditivo	Início da pega	Fim da pega
0,6	0%	8	20'11"
0,4	1%	178'	256'

Fonte. Autor.

As pastas de gesso com 1% de aditivo e com relação a/g de 0,4 apresenta o início de pega com 178 minutos e o fim de pega com 256 minutos, como indicado na Figura 46.

Figura 46. Tempo de pega das pastas de gesso.



Fonte. Autor.

O aumento dos tempos de início e fim de pega ocorre a partir da maior quantidade de aditivo e menor a quantidade de água adicionada na mistura, sendo que o tempo de pega aumenta com maior porcentagem de aditivo utilizado.

Os requisitos físicos do gesso para a construção civil indicado pela NBR 13207:2017 recomendam que as pastas de gesso apresentem um início de pega ≥ 4 min e o fim de pega ≥ 50 min, portanto as pastas de gesso sem aditivo e com 1% de aditivo, atingem os requisitos da norma.

Na continuidade da caracterização da pasta de gesso, foi investigado o espalhamento da pasta, parâmetro fundamental para a conformação do compósito, já que influência diretamente no comportamento mecânico do material, diminuindo sua resistência e a carga aplicada. Para a definição da pasta de gesso foram analisadas as amostras com fator a/g de 0,6 sem aditivo e 0,4 com dosagem de 1% de superplastificante Glenium 51 adicionado na mistura, conforme a Tabela 18.

Tabela 18. Espalhamento da pasta de gesso.

Fator a/g	Aditivo	Espalhamento (mm)	Desv. Pad	C.V (%)
0,6	0%	80,7	3,94	4,88
0,4	1%	57,66	2,85	4,71

Fonte. Autor.

As pastas de gesso com superplastificante incorporado na mistura apresentam um espalhamento de $57,66 \pm 2,85$ mm, diferenciando-se das pastas sem aditivo, que amostram um espalhamento de $80,7 \pm 3,94$ mm.

4.3 Análise das propriedades no estado endurecido

As propriedades no estado endurecido para o gesso com e sem aditivo foram avaliadas através dos ensaios de compressão axial, dureza e flexão de quatro pontos. No entanto, os compósitos foram avaliados através do ensaio de flexão de quatro pontos.

Os requisitos de dureza indicados NBR 13207:2017 foram analisados para as pastas de gesso com e sem aditivo, conforme a Tabela 19. Os resultados indicam que o gesso endurecido com 1% de aditivo (fator a/g 0,4) apresentou $32,32 \pm 2,84$ N/mm², aumentando a dureza 65,8% em relação ao gesso endurecido sem aditivo, que apresentou $11,05 \pm 1,33$ N/mm² devido à redução da quantidade de água na mistura da pasta.

Tabela 19. Dureza da pasta de gesso.

Fator a/g	Aditivo	Dureza (N/mm ²)	Desv. Pad.	C.V (%)
0,6	0%	11,03	1,33	12,1
0,4	1%	32,32	2,84	8,78

Fonte. Autor

O requisito de resistência mínima estabelecido pela NBR 13207:2017 para o gesso endurecido é $\geq 20,0$ N/mm² que corresponde à relação entre a

carga aplicada e a impressão no corpo de prova. Portanto, o resultado obtido para as amostras endurecidas de gesso com 1% de aditivo, $32,32\text{N/mm}^2$, atingiram os requisitos de resistência mecânicos da norma.

Seguindo os parâmetros fixados pela NBR 13207:2017, para o gesso endurecido que atendeu aos requisitos de dureza, foi verificada a compressão axial, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 20. A partir dos requisitos da NBR 12.129:2010 nota-se que os gessos endurecidos com 1% de aditivo comparados com gessos sem aditivo tiveram um aumento percentual na resistência à compressão de 60,9%, com $10,63 \pm 1,40$ MPa. No entanto, o gesso endurecido sem aditivo apresenta uma resistência de $4,15 \pm 0,51$ MPa.

Tabela 20. Resistência à compressão da pasta de gesso.

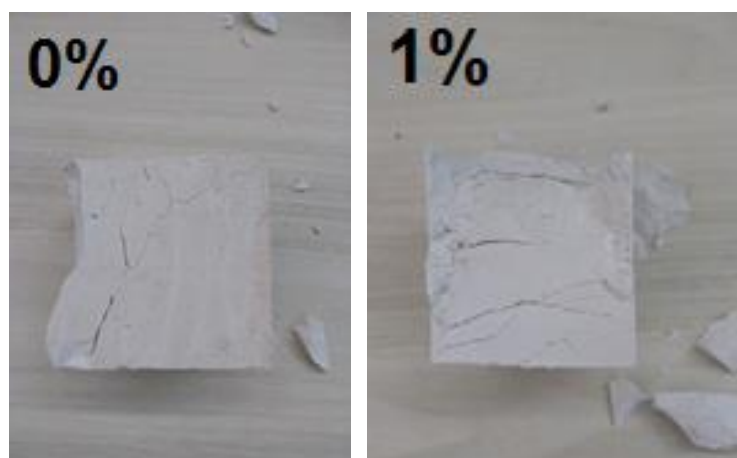
Fator a/g	Aditivo	Resistência à compressão (MPa)	Desv. Pad.	C.V (%)
0,6	0%	4,15	0,51	12,40
0,4	1%	10,63	1,40	13,20

Fonte. Autor

Comparando os resultados do gesso sem aditivo e o gesso com 1% de aditivo verificou-se, como era esperado, que a diminuição da quantidade de água e o uso de aditivo na conformação da pasta de gesso, aumentaram a resistência à compressão das amostras, resistindo a cargas maiores.

As amostras de gesso exibem fissuras que se propagaram rapidamente e com uma ruptura frágil. A montagem do ensaio de compressão está ilustrada na Figura 47.

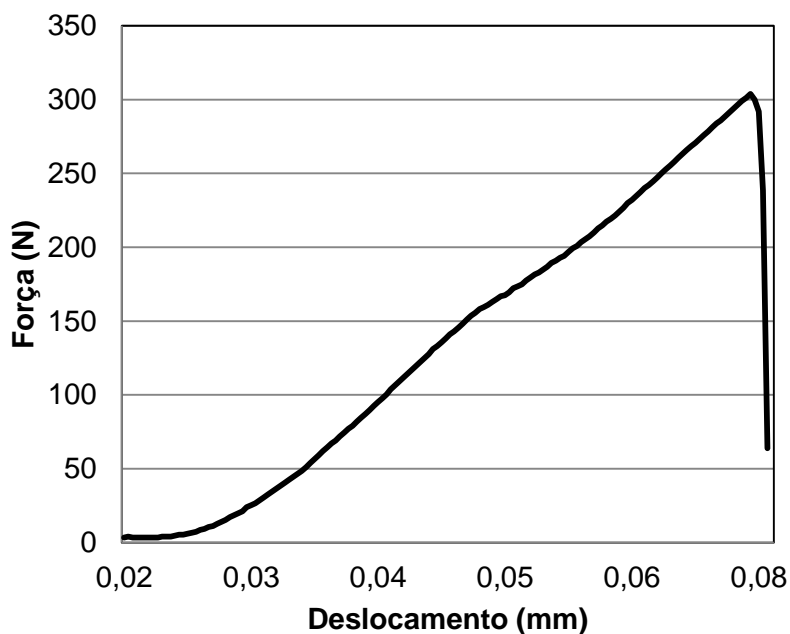
Figura 47. Ensaio de compressão.



Fonte. Autor.

Após a verificação do comportamento à compressão e dureza, realizou-se o ensaio de flexão de quatro pontos nos corpos de prova de 0,17x0,05x0,015m para o gesso endurecido com e sem aditivo e o compósito GMG, para as amostras de 0,17x0,05x0,025m e 0,17x0,05x0,03m, para o compósito de GMMG e GMGMG, respectivamente. Os gessos endurecidos com e sem aditivo analisados exibiram uma ruptura frágil, sem deslocamento expressivo durante a carga até a ruptura e com uma curva típica do material indicada na Figura 48.

Figura 48. Curva típica do gesso com e sem aditivo.



Fonte. Autor.

Obteve-se para os corpos de prova válidos de gesso sem aditivo uma carga máxima suportada em média de $345,83 \pm 40,36$ N, o módulo de ruptura (MOR) de $5,52 \pm 0,63$ MPa com deslocamento central de $0,34 \pm 0,01$ mm e módulo elástico (MOE) de $2219,57 \pm 214,17$ MPa, conforme apresentado na Tabela 21 (O detalhamento dos resultados das amostras é mostrado no Anexo).

Tabela 21. Comportamento do gesso endurecido na flexão.

CP	Massa específica (kg/m ³)	F (N) Máx	Deslocamento (mm)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
G	1256,80	345,83	0,34	2219,57	5,52
G1%	1233,85	381,84	0,21	3823,67	6,11

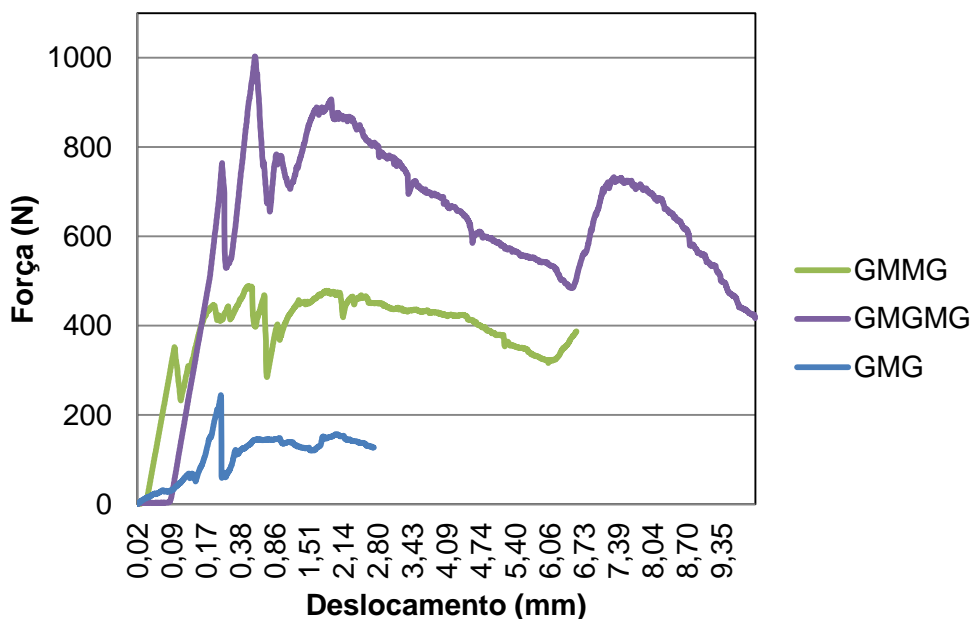
Fonte. Autor.

Para o gesso com 1% de aditivo, é possível determinar nos quatro corpos de prova válidos um aumento de carga média de 36,01 N, do módulo de ruptura em 0,59 MPa e módulo de elasticidade de 1604,1 MPa, mas com uma diminuição do deslocamento central de em 0,13 mm.

O gesso endurecido sem aditivo tem uma resistência à flexão inferior em 42%, em relação ao gesso com 1% de aditivo, resistindo a 9,4% menos de carga aplicada.

O ensaio de flexão de quatro pontos nos compósitos foi desenvolvido com corpos de prova com teor de fibra de 9,42% para os compósitos que contém uma camada de sisal e 26,98% e 23,71% de fibra para os compósitos que contém duas camadas de manta de sisal. Segundo a composição dos compósitos e a distribuição das camadas de gesso e sisal, obtiveram-se diferentes curvas típicas para a flexão indicadas na Figura 49.

Figura 49. Curvas típicas para os compósitos.



Fonte. Autor.

Na Figura 49 e na Tabela 22 observa-se para os compósitos um aumento do teor de fibras que melhora proporcionalmente a resistência à primeira fissura, mas a resistência à flexão diminui com o aumento de reforço. No entanto, quando aumenta o número de camadas de gesso dos compósitos, a resistência à flexão dos compósitos com duas camadas de manta de sisal aumenta. Destaca-se que o detalhamento dos resultados para os compósitos é apresentado no Anexo.

Tabela 22. Resumo resultados ensaio flexão.

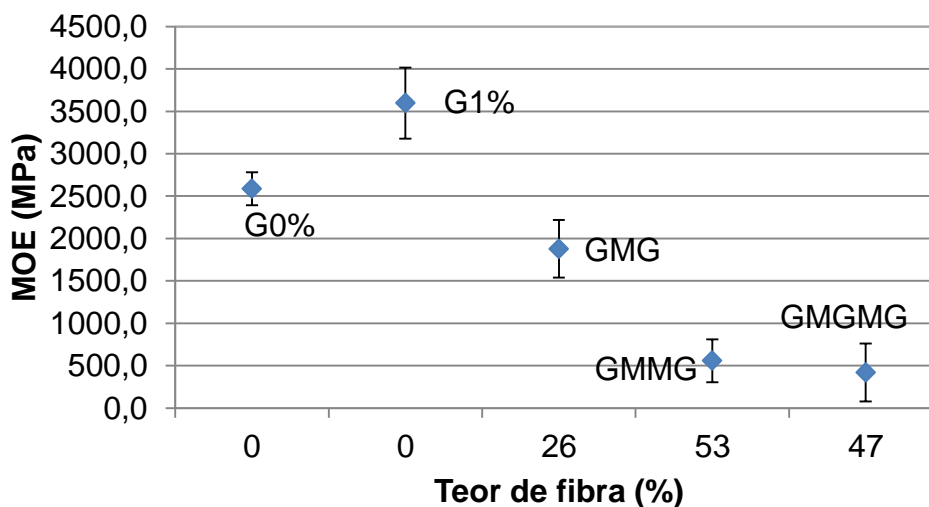
CP	Massa específica (kg/m ³)	F (N) Máx	Deslocamento (mm)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
G0%	1256,80	345,83	0,34	2219,57	6,5,52
G	1233,85	381,84	0,21	3823,67	6,11
GMG	1003,67	249,51	4,85	1872,63	3,99
GMMG	799,31	341,02	0,41	776,51	1,96
GMGMG	1156,09	728,99	1,92	811,56	2,89

Fonte. Autor.

Observou-se nos compósitos uma força máxima aplicada, uma resistência à flexão, MOE e MOR inferiores aos valores apresentados pelo gesso endurecido com e sem aditivo, no entanto, o deslocamento central dos compósitos foi maior que os gessos endurecidos, devido à capacidade do compósito de absorver uma maior quantidade de energia.

Quanto ao módulo de elasticidade das amostras, a Figura 50 ilustra a relação entre o módulo de elasticidade e a porcentagem de fibra no compósito, indicando um aumento do módulo de elasticidade do gesso quando é incrementado o superplastificante e é reduzida a quantidade de água na mistura, assim como uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento do teor de fibra utilizado.

Figura 50. Relação do módulo de elasticidade com teor de fibra.



Fonte. Autor.

Os valores apresentados de força máxima, módulo de elasticidade e módulo de ruptura para o gesso com 1% de aditivo e para o compósito GMG se aproximam aos valores de Brandão (2015). Quando a camada de sisal é inserida no gesso, existe um aumento de força máxima aplicada no compósito, com um aumento gradativo quando são acrescentadas as camadas nos compósitos GMMG e GMGMG.

4.4 Análise da transferência de calor nos compósitos

Para analisar a relação entre a aderência e a transferência de calor nos compósitos, foram realizadas imagens com microscopias eletrônicas de varredura para avaliar a manta de sisal e a matriz de gesso.

As Figuras 51 e 52 ilustram as microscopias eletrônicas de varredura (MEV) da manta de sisal e do gesso com 1% de aditivo, indicando a adesão entre a matriz e o reforço em manta de sisal. A imagem retrata os pontos de entrada e saída das fibras de sisal dentro da matriz, retratando uma boa aderência entre os materiais, conformando um compósito com fibras descontínuas orientadas aleatoriamente.

Figura 51 e 52. MEV das mantas de sisal e a matriz de gesso.



Fonte. Autor.

Nas Figuras 53 e 54, observou-se que a manta de sisal e o gesso com 1 % de aditivo apresentam falhas de aderência entre a fibra e o gesso geradas em duas situações: quando existem porosidades na pasta utilizada na conformação do compósito que geram vazios internos no gesso e quando a fibra de sisal absorve altos teores de água durante a conformação do compósito que provoca um aumento do volumen da fibra que posteriormente volverá ao tamanho original quando libere o excesso de água, gerando um vazío entre o gesso e a fibra. Estas falhas afetam o comportamento mecânico do compósito, mas também atuam como câmeras de ar que facilitam a evaporação da água livre dos cristais de gesso, gerando convecções internas no compósito que ajudam a dissipar o calor interno do material.

Figura 53 e 54. Falhas de aderência entre a manta de sisal e a matriz de gesso.



Fonte. Autor.

A Figura 55 ilustra a inexistência de aderência entre as fibras, já que não existe um elemento que dê liga. É visível a presença de vazios entre as fibras que conformam a manta de sisal e que intervêm no comportamento mecânico e térmico do material. Os vazios internos da manta de sisal atuam como barreiras de ar frente ao fluxo de calor, dificultando a transferência de calor. Portanto, quanto maior seja o número de camadas de manta de sisal na conformação do compósito, mais adequada serão as propriedades térmicas do material, aumentando a resistência térmica do material.

Figura 55. Aderência manta de sisal.



Fonte. Autor.

4.5 Análise das propriedades térmicas dos compósitos

a) Condutividade térmica

Os valores de condutividade térmica indicados na Tabela 23, para uma temperatura de análise de 40°C, indicam que o gesso com 1% de aditivo tem em média $0,75 \pm 0,09$ W/(mK), valor que diminui 28% quando é inserida a camada de manta no compósito GMG (mantendo a espessura do material), melhorando seu comportamento $0,211$ W/(mK). No caso dos compósitos GMMG e GMGMG, a adesão das camadas (manta e gesso) e o aumento da espessura dos compósitos não contribuíram significativamente para melhorar a condutividade térmica do gesso com 1% de aditivo, pelo contrario, a condutividade térmica dos compósitos GMMG e GMGMG, aumenta 11% e 18%, respectivamente.

Tabela 23. Resultados condutividade térmica a 40°C.

	Massa específica (kg/m ³)	T2-K (Interna)	T1-K (Externa)	ΔT	Espessura (m)	κ (W/mK)
G	1570,51	305,98	313,15	-7,16	0,015	0,75
GMG	1319,44	303,25	313,15	-9,89	0,015	0,539
GMMG	971,15	302,64	313,15	-10,50	0,025	0,845
GMGMG	1105,76	301,51	313,15	-11,63	0,030	0,916

Fonte. Autor.

Em relação aos valores tradicionais indicados pela NBR 15220:2005 para materiais conhecidos, o gesso com 1% de aditivo se posiciona junto com a argamassa de gesso com $0,75$ W/mK e $0,70$ W/mK, respectivamente. Os compósito GMG e GMMG apresentam uma condutividade térmica de $0,539$ W/mK e $0,845$ W/mK, e se localizam na faixa do gesso projetado com massa aparente elevada ($0,50$ W/mK) e do concreto com argila expandida para uma densidade de $1400-1600$ kg/m³ com $0,85$ W/mK, respectivamente. O compósito GMGMG possui uma condutividade de $0,916$ W/mK, valor similar ao tijolo cerâmico com densidade de $1300-1600$ kg/m³ e condutividade de $0,90$ W/mK.

Numa segunda instância foi analisada a condutividade térmica dos materiais a uma temperatura de 60°C. Os resultados da Tabela 24 indica que todos os materiais analisados apresentaram uma diminuição da condutividade térmica, em relação aos valores obtidos a uma temperatura de análise de 40°C.

O gesso com 1% de aditivo diminuiu 6%, o GMG 45%, o GMMG 56% e o GMGMG 36%.

Tabela 24. Resultados condutividade térmica a 60°C.

	Massa específica (kg/m ³)	T2-K (Interna)	T1-K (Externa)	ΔT	Espessura (m)	κ (W/mK)
G	1570,51	313,65	333,15	-19,48	0,015	0,305
GMG	1319,44	312,86	333,15	-20,28	0,015	0,292
GMMG	971,15	306,09	333,15	-27,05	0,025	0,365
GMGMG	1105,76	310,58	333,15	-22,51	0,030	0,594

Fonte. Autor.

Paralelamente é possível determinar com o aumento de temperatura que o comportamento do compósito GMG é similar ao do gesso com 1% de aditivo, diminuindo 45,8% seu comportamento térmico. No entanto, os compósitos GMMG e GMGMG, com o aumento da temperatura de análise para 60°C, tem sua condutividade térmica reduzida em 56,8% e 35,2%, respectivamente, atingindo um valor similar ao do gesso com 1% de aditivo.

A Tabela 25 indica os valores obtidos de condutividade térmica a uma temperatura de análise de 80°C. Todos os materiais tem sua condutividade térmica diminuída, de forma abrupta, em relação à temperatura de 40°C. O gesso com 1% de aditivo diminui 32%, o GMGMG 52%, o GMMG 34% e o GMGMG 22%. É possível observar na Tabela 33 que todos os materiais apresentam um comportamento similar.

Tabela 25. Resultados condutividade térmica a 80°C.

	Massa específica (Kg/m ³)	T2-K (Interna)	T1-K (Externa)	ΔT	Espessura (m)	κ (W/mK)
G	1570,513	322,96	353,15	-30,17	0,015	0,211
GMG	1319,444	319,83	353,15	-33,30	0,015	0,191
GMMG	971,154	316,19	353,15	-36,95	0,025	0,286
GMGMG	1105,769	308,71	353,15	-44,41	0,030	0,286

Fonte. Autor.

Destaca-se que o detalhamento dos resultados para as diferentes temperaturas das amostras analisadas aparece no Anexo.

b) Calor específico

O ensaio de calor específico foi realizado a uma temperatura de 40°C, 60°C e 80°C. Na análise dos materiais a 40°C obtiveram-se os resultados da Tabela 26. Os valores indicam que o gesso com 1% de aditivo tem em média $0,885 \pm 0,08$ kJ/(kgK), valor que aumenta quando é inserida a camada de manta no compósito GMG. No entanto, no compósito GMMG, quando é acrescentada uma segunda camada de manta de sisal o valor para o calor específico diminui, atingindo o melhor comportamento de todos os materiais avaliados, seguido pelo compósito GMGMG.

Tabela 26. Resultados do calor específico a 40°C.

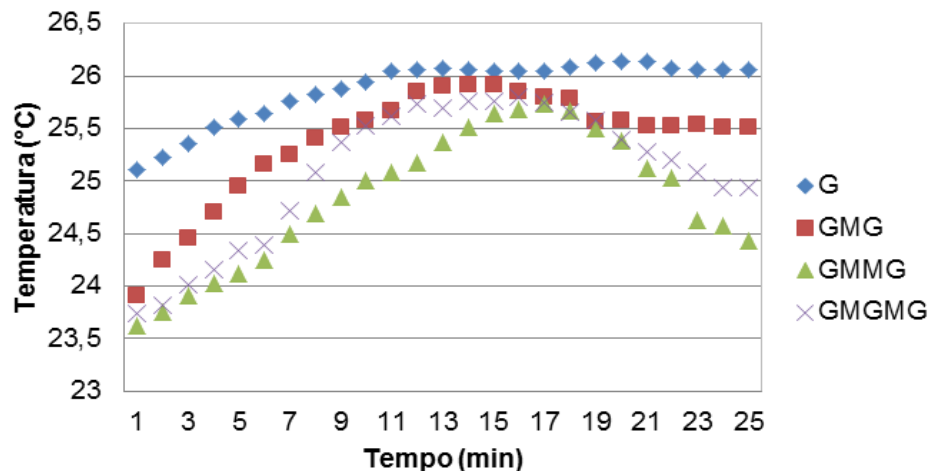
	T° inicial Álcool °C	Massa álcool kg	T° Líquido °C	Massa kg	Q Álcool -	Calor Específico kJ/(kgK)
G	24,5	0,20	25,88	0,07	923,74	0,88
GMG	24,2	0,25	25,38	0,07	983,05	0,92
GMMG	24,2	0,45	24,84	0,08	975,04	0,80
GMGMG	24,2	0,45	25,08	0,11	1347,63	0,82

Fonte. Autor.

Na Figura 56 mostra a troca de calor inicial que acontece no minuto 0 que corresponde a primeira troca de calor entre o corpo de prova e o álcool. Esta troca de calor é importante no início do processo para as amostras de gesso com 1% de aditivo, já que alcança 25,2°C, com uma troca máxima de calor em 13 minutos aproximadamente, modificando a temperatura do álcool para 25,9°C para posteriormente se estabilizar. No entanto, o compósito GMMG é o material que atingiu menor temperatura na estufa, com uma troca de calor inicial a 23,62°C em um tempo de troca de calor máxima de 15 minutos, transferindo 25,76°C para o álcool. No entanto, os compósitos GMG e GMGMG, liberam o calor de forma mais paulatina em até 15 minutos, transpassando 25,76°C e 25,79°C para o álcool, respectivamente.

A 40°C, o compósito GMMG é o material com menor troca de calor inicial, mantendo as temperaturas mais baixas, a diferença do gesso, que possui um comportamento inverso.

Figura 56. Troca de calor das amostras a 40°C.



Fonte. Autor.

Os resultados das amostras para calor específico a uma temperatura de 60°C, exibidos na Tabela 27, mostram um aumento nos valores de todos os materiais analisados, em relação à temperatura de análise de 40°C. Existe um aumento de 2% para as amostras de gesso, 8% para o compósito de GMG, 9% para o compósito GMMG e 11% para o compósito GMGMG.

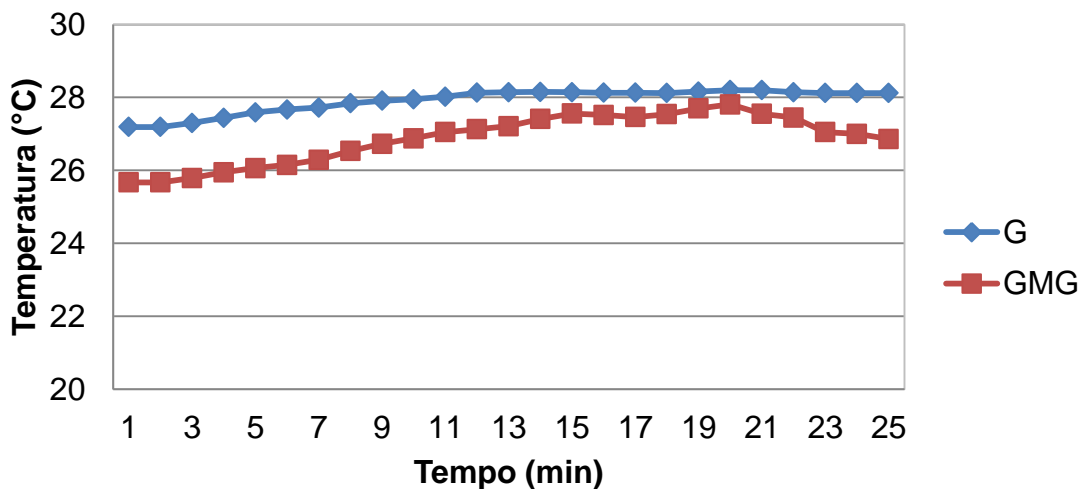
Tabela 27. Resultados do calor específico a 60°C.

	T° inicial Álcool Tc - °C	Massa álcool Mw - kg	T°Líquid o Tm - °C	Massa CP- Kg	Q Álcool - J	Calor Específico Cs - kJ/(kgK)
G	24,5	0,20	27,69	0,07	2155,60	0,90
GMG	24,2	0,25	27,10	0,07	2415,70	1,00
GMMG	24,2	0,45	25,79	0,08	2414,00	0,88
GMGMG	24,2	0,45	26,43	0,11	3400,54	0,92

Fonte. Autor.

A Figura 57 ilustra o comportamento das amostras de gesso com 1% de aditivo e o compósito GMG, com uma troca de calor inicial que atinge 27,2°C e 25,67°C, respectivamente. A troca de calor máxima alcança 28,1°C e 27,8°C, no gesso com 1% de aditivo e no GMG, liberando o calor a partir dos 13 e 21 minutos para se estabilizar com 19 e 22 minutos, respectivamente.

Figura 57. Troca de calor das amostras de G e GMG a 60°C.

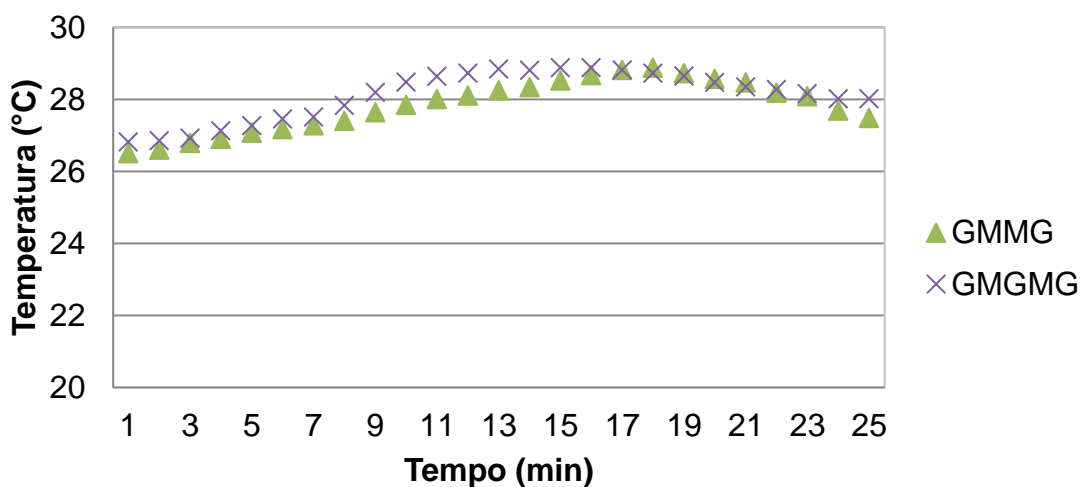


Fonte. Autor.

A Figura 58 ilustra o comportamento dos compósitos GMMG e GMGMG, com uma troca de calor inicial de 26,5°C e 26,85°C, respectivamente, liberando o calor restante de forma paulatina. O compósito GMGMG inicia a transferência de calor em 16 minutos, atingindo uma troca de calor máxima de 28,8°C, a diferença do GMMG que atinge a mesma temperatura só que em 17 minutos.

A 60°C, o compósito GMG é o material com menor troca de calor inicial, mantendo as temperaturas mais baixas de análise.

Figura 58. Troca de calor das amostras de GMMG e GMGMG a 60°C.



Fonte. Autor.

Para as amostras analisadas a 80°C, indicada na Tabela 28, também existe um aumento nos valores para calor específico das amostras ao aumentar a temperatura. As amostras de gesso com 1% de aditivo apresentam um aumento de 1%, já nos compósitos o aumento é maior atingindo um 8% aproximado para cada compósito. Este acréscimo do calor específico é similar aos valores obtidos a 60°C.

Tabela 28. Resultados do calor específico a 80°C.

	T° inicial Álcool Tc - °C	Massa álcool Mw - kg	T°Líquid o Tm - °C	Massa CP- Kg	Q Álcool - J	Calor Específico Cs - kJ/(kgK)
G	24,5	0,2	29,49	0,07	3377,90	0,91
GMG	24,2	0,24	29,07	0,07	4052,55	1,08
GMMG	24,2	0,44	26,88	0,08	4072,69	0,96
GMGMG	24,2	0,44	27,97	0,11	5746,79	1,01

Fonte. Autor.

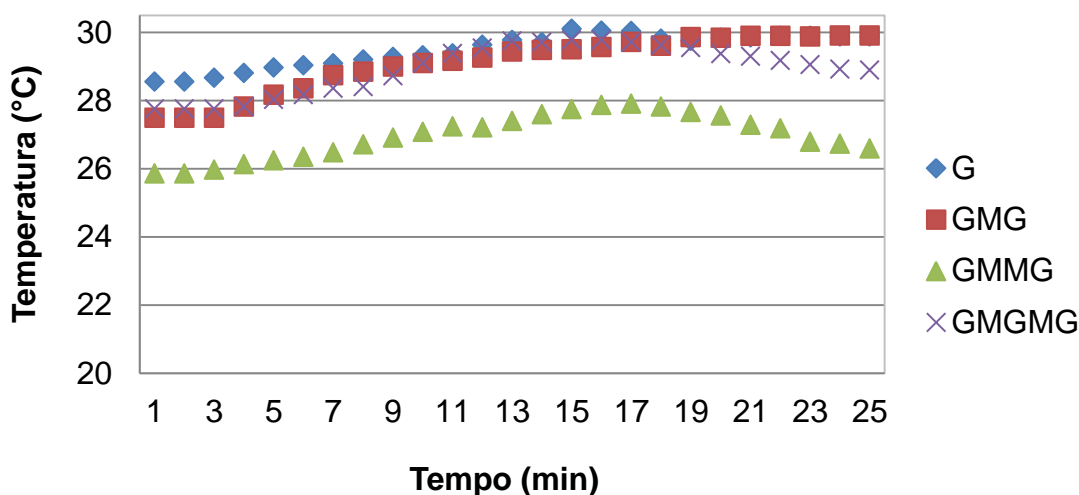
Na Figura 58 percebe-se que as amostras de gesso com 1% de aditivo, GMG e GMGMG possuem uma troca de calor inicial similar que com o decorrer do tempo será liberada de forma diferente. O gesso com 1% de aditivo é o material com uma troca de calor máxima que atinge 29,77°C, seguido pelos compósitos GMG e GMGMG com 29,85°C e 29,7°C, respectivamente.

A troca de calor máxima é atingida no minuto 17 para o gesso com 1% de aditivo, no entanto, o compósito GMG atinge a temperatura com 19 minutos e o GMGMG com 15 minutos, para posteriormente liberar o calor restante da amostra. Percebe-se que só o gesso com 1% de aditivo e o GMG atingem o equilíbrio térmico dentro do intervalo de 25 minutos.

A troca de calor inicial no compósito GMMG é a mais baixa com 25,85°C, realizando a troca de calor máxima em 17 minutos, alcançando 27,9°C. Este compósito não alcança o equilíbrio térmico durante os 25 minutos.

A 80°C, o compósito GMMG é o material com menor troca de calor inicial, mantendo as temperaturas mais baixas, a diferença do gesso com 1% de aditivo e os compósitos GMG e GMGMG, com um comportamento similar e inferior ao do compósito GMMG, como ilustra a Figura 59.

Figura 59. Troca de calor das amostras a 80°C.



Fonte. Autor.

Para todas as amostras avaliadas, o gesso com 1 % de aditivo sempre tem um comportamento inferior, em relação aos compósitos. Esta condição pode ser explicada pela velocidade na troca de calor dos compósitos, que se caracteriza por serem rápidas e breves devido ao preenchimento dos vazios na manta de sisal, bem como a capacidade da manta de absorver o calor nos compósitos.

Ao comparar os materiais desenvolvidos com alguns materiais tradicionais utilizados na construção civil, conclui-se para a temperatura de análise de 40°C e com o auxílio da NBR 15220:2005, que o gesso com 1% de aditivo está na faixa da argamassa de gesso, o GMG apresenta um calor específico similar ao do asfalto. No entanto, o GMMG tem condutividade térmica similar à da brita, já o GMGMG tem valores similares ao do granito.

c) Resistência térmica

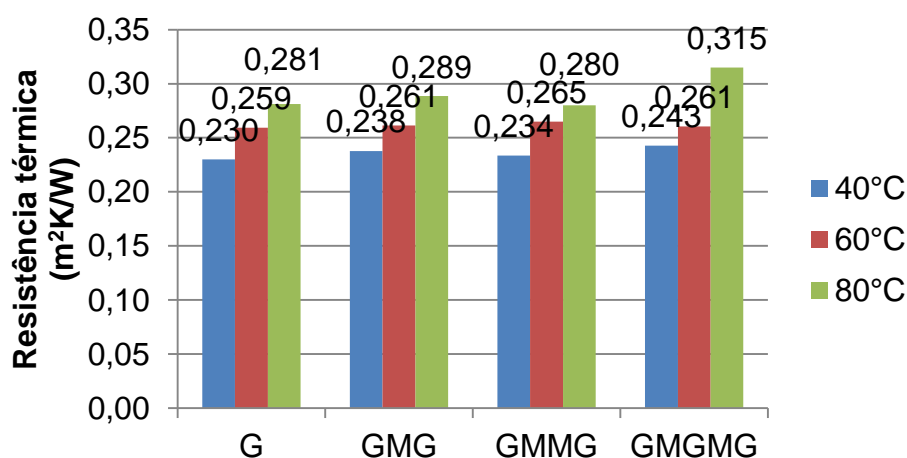
Segundo a definição da NBR 15220:2005, a resistência térmica é o quociente da diferença de temperatura entre as superfícies de um material pela densidade do fluxo de calor. No entanto, para os materiais homogêneos a resistência total é considerada a somatória do conjunto de camadas que conformam o material. A resistência térmica é considerada uma propriedade

derivada da condutividade térmica e está condicionada pela resistência superficial.

Para a análise dos componentes heterogêneos foi considerada a área do corpo de prova de 24x13cm, a espessura de cada compósito, a resistência superficial e a condutividade térmica da manta de sisal a 40°C, 60°C e 80°C, de 0,045 W/(mK), 0,0617 W/(mK) e 0,059 W/(mK), respectivamente. Também foi utilizada a resistência térmica da manta com 0,1251 m²K/W, 0,091 m²K/W e 0,0954 m²K/W.

A partir da leitura da Figura 60, nota-se que a 40°C o gesso com 1% de aditivo apresenta o menor valor de resistência térmica, seguido pelos compósitos GMMG, GMG e GMGMG que aumentam 1,73%, 3,47% e 5,65%, respectivamente. A uma temperatura de análise de 60°C, que a resistência térmica do gesso com 1% de aditivo aumentou 0,025 m²K/W, assim como nos compósitos GMG, GMMG e GMGMG, com 0,023 m²K/W, 0,031 m²K/W e 0,018 m²K/W, respectivamente. A uma temperatura de análise de 80°C nota-se um aumento na resistência térmica dos materiais, inferior ao apresentado pelas amostras a 60°C. Existe um aumento de 0,021 m²K/W para o gesso com 1% de aditivo, 0,028 m²K/W para o compósito GMMG, 0,019 m²K/W para o compósito GMMG e 0,054 m²K/W para o GMGMG. É possível observar que os materiais aumentam proporcionalmente sua resistência térmica com o aumento de temperatura.

Figura 60. Comparativo da resistência térmica das amostras.



Fonte. Autor.

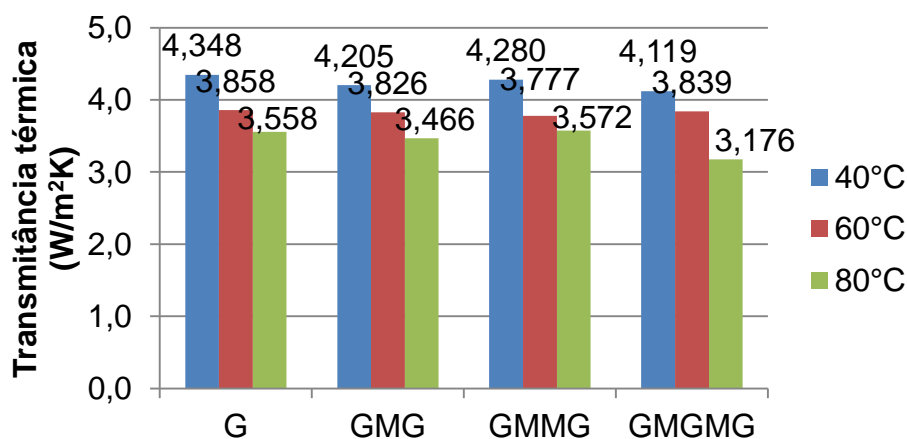
O aumento da resistência térmica dos materiais compósitos e do gesso acontece com a mudança na temperatura do fluxo de calor. Quanto maior a espessura do compósito, maior são os valores de resistência térmica, justificando o melhor comportamento do compósito GMGMG. Isto pode ser explicado a partir do número de camadas do material, já que quanto menor a espessura, menor será a quantidade de vazios próprios da conformação da fibra e a porosidade do gesso, portanto, menor será o fluxo de calor que conseguirá atravessá-lo, resistindo ao passo do calor.

d) Transmitância térmica

Após a verificação da resistência térmica, foi avaliada a transmitância térmica das amostras. Segundo a NBR 15220:2005, a transmitância térmica dos materiais é o inverso da resistência térmica total do sistema. Portanto é uma propriedade derivada da condutividade térmica dos materiais.

Na Figura 61, são apresentados os resultados de transmitância térmica das amostras a temperaturas de análise de 40°C, 60°C e 80°C. Os valores obtidos a 40°C têm o gesso com 1% de aditivo apresentando os valores mais altos de transmitância térmica, alcançando 4,34 W/(m²K), comportamento que é melhorado progressivamente pelos materiais compósitos com uma diminuição nos valores, os compósitos GMG, GMMG e GMGMG, alcançam 4,20 m²K/W, 4,28 m²K/W e 4,12 m²K/W, respectivamente.

Figura 61. Comparativo da transmitância térmica das amostras.



A uma temperatura de análise de 60°C, todas as amostras diminuem sua transmitância, o gesso com 1% de aditivo diminui 11,29%, o GMG 9,04%, GMMG 11,91% e GMGMG 7,03%. Existe uma aproximação nos resultados dos compósitos, destacando-se que o compósito com menor transmitância térmica é aquele que contém maiores números de camadas, é o GMGMG com 4,12 W/(m²K), inclusive, é o material com os menores valores para as temperaturas de 40°C e 80°C analisadas.

Ao avaliar os valores a 80°C, o comportamento térmico é ainda melhor que a 40°C e 60°C, com uma diminuição da transmitância dos materiais, em relação a 60°C: o gesso com 1% de aditivo diminui 0,3 W/(m²K) o GMG 0,36 W/(m²K), GMMG 0,2 W/(m²K) e GMGMG 0,66 W/(m²K).

As amostras permitiram observar que o aumento das camadas de manta de sisal e gesso no compósito diminuíram a transferência de calor inicial apresentada pelo gesso com 1% de aditivo. Isso pode ser explicado pela relação direta entre a transmitância térmica e a capacidade térmica do material, já que os compósitos com maior capacidade térmica apresentam menor transmitância térmica.

Destaca-se que o sistema simplificado de análise apresentado pela norma não é sensível a absorvância das fases que conforma o material, a diferença das simulações realizadas com diversos softwares, o que pode gerar divergências nos resultados obtidos no monitoramento e nas simulações (FERREIRA *et al.*, 2017).

e) Capacidade térmica

Esta propriedade térmica é derivada do calor específico e da resistência térmica do material, e se relaciona à quantidade de calor recebida pelos materiais a 40°C, 60°C e 80°C e a variação interna de temperatura em função do fluxo de calor incidente. A Tabela 29 indica os resultados para as amostras a uma temperatura de 40°C, que indicam uma diminuição de 12,7% da capacidade térmica do compósito GMG em relação ao gesso com 1% de aditivo. No entanto, o compósito GMMG diminui a capacidade térmica do gesso

com 1% de aditivo 25,5% e o compósito GMGMG aumenta a capacidade térmica 30,45%.

Tabela 29. Capacidade calorífica das amostras a 40°C;

	Calor específico Cp - kJ/(kgK)	Densidade kg/m³	Espessura (m)	Capacidade térmica Ct (kJ/m²K)
G	0,885	1550,214	0,015	20,85
GMG	0,916	1180,556	0,015	18,2
GMMG	0,804	1122,863	0,020	15,53
GMGMG	0,822	1153,579	0,030	27,20

Fonte. Autor.

Os dados apresentados na Tabela 30 e 31 para as amostras a 60°C e 80°C é similar aos valores obtidos a 40°C. A 60°C, o gesso com 1% de aditivo aumenta a capacidade térmica em 0,47kJ/m²K, o compósito GMG em 1,59kJ/m²K, GMMG em 1,56kJ/m²K e GMGMG em 3,31kJ/m²K.

Tabela 30. Capacidade calorífica das amostras a 60°C.

	Calor específico Cp - kJ/(kgK)	Densidade kg/m³	Espessura (m)	Capacidade térmica Ct (kJ/m²K)
G	0,90	1550,214	0,015	21,52
GMG	1,0	1180,556	0,015	19,79
GMMG	0,88	1122,863	0,020	17,09
GMGMG	0,92	1153,579	0,030	30,51

Fonte. Autor.

A 80°C, os resultados da Tabela 31 exibem que o gesso com 1% de aditivo aumenta a capacidade térmica em 0,24 kJ/m²K, o compósito GMG em 1,58 kJ/m²K, GMMG em 1,55 kJ/m²K e GMGMG em 2,99 kJ/m²K, em relação a uma temperatura de análise de 60°C.

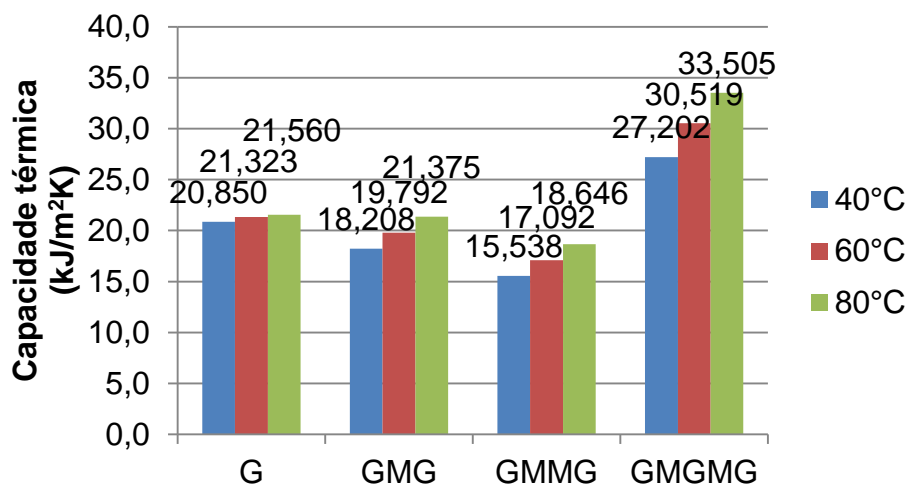
Tabela 31. Capacidade calorífica das amostras a 80°C.

	Calor específico Cp - kJ/(kgK)	Densidade kg/m³	Espessura (m)	Capacidade térmica Ct (kJ/m²K)
G	0,91	1550,214	0,015	21,56
GMG	1,08	1180,556	0,015	21,37
GMMG	0,96	1122,863	0,020	18,64
GMGMG	1,01	1153,579	0,030	33,50

Fonte. Autor.

A Figura 62 ilustra que quanto maior a temperatura de análise do material, maior será a quantidade de calor necessária para variar a temperatura das amostras, por exemplo, o compósito GMGMG. No entanto, os compósitos GMG e GMMG mostram uma diminuição da capacidade térmica, em relação ao gesso com 1% de aditivo para todas as temperaturas de análise.

Figura 62. Comparativo da capacidade térmica das amostras.



Fonte. Autor.

f) Atraso térmico

Quanto ao atraso térmico (Tabela 32), para uma temperatura de análise de 40°C, que o compósito GMG e GMGMG aumentam o atraso térmico do gesso com 1% de aditivo em 0,05h e 0,21h, respectivamente. No entanto, o compósito GMMG diminui os valores de atraso térmico em 0,03h.

Desta forma, os compósitos GMG e GMGMG apresentaram valores mais acentuados devido em parte à resistência e capacidade térmica dos materiais.

Tabela 32. Atraso térmico das amostras a 40°C.

	B1	B2	B0	Atraso térmico (hrs)
G	207876,07	7138,86	18308,49	0,47
GMG	118035,86	3168,10	14422,54	0,52
GMMG	137796,21	1182,73	21077,71	0,44
GMGMG	202665,13	2373,95	26859,54	0,68

Fonte. Autor.

Ao avaliar os materiais a uma temperatura de 60°C, existe um aumento no tempo transcorrido entre as variações térmicas para cada material. O gesso com 1% de aditivo aumenta o tempo em 0,27h, o GMG em 0,21h, o GMMG em 0,26h e o GMGMG em 0,22h. Novamente os compósitos GMG e GMGMG apresentam os valores mais altos de atraso térmico, a diferença do GMG (Tabela 33).

Tabela 33. Atraso térmico das amostras a 60°C.

	B1	B2	B0	Atraso térmico (hrs)
G	86087,16	2939,67	18659,29	0,74
GMG	62081,40	2035,60	15909,01	0,73
GMMG	82256,37	1583,56	23421,17	0,70
GMGMG	114982,48	1854,78	30355,20	0,90

Fonte. Autor.

A Tabela 34 indica os resultados das amostras para uma temperatura de análise de 80°C. O compósito GMGMG aumenta o tempo entre as variações térmicas para 0,466h, atingindo o maior tempo de atraso térmico das amostras para todas as temperaturas de análise. Os compósitos GMG e GMMG apresenta um tempo de 0,21h e 0,13h, respectivamente. O compósito GMG é o compósito que mais aumenta o tempo entre os 60°C e 80°C, sendo que o compósito GMGMG é o compósito com maior atraso térmico.

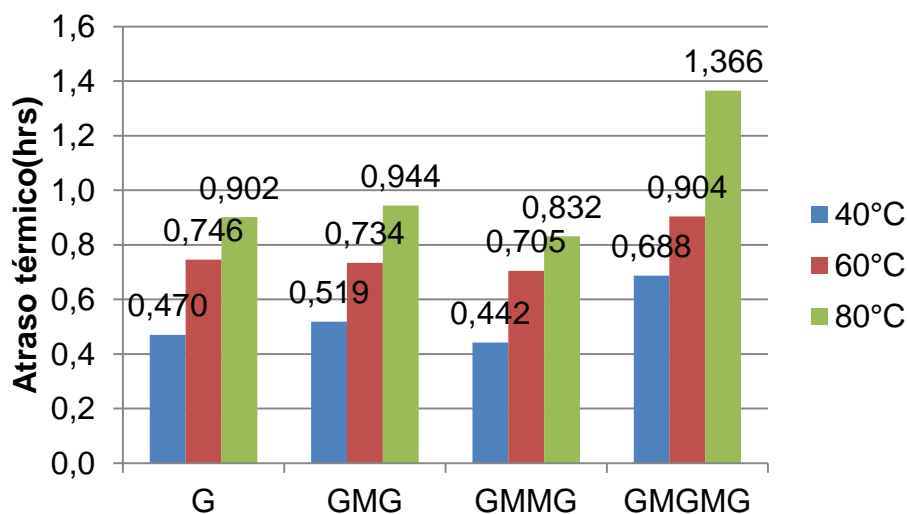
Tabela 34. Atraso térmico das amostras a 80°C.

	B1	B2	B0	Atraso térmico (hrs)
G	60020,48	2039,44	18715,86	0,90
GMG	46272,78	46272,78	17066,01	0,94
GMMG	61353,27	46272,78	25081,92	0,83
GMGMG	85130,94	46272,78	32853,86	1,36

Fonte. Autor.

Na Figura 63, percebe-se que com o aumento da temperatura, aumenta o tempo entre as variações térmicas para o gesso e para os compósitos. Sendo que o compósito GMG é o único compósito com um atraso térmico inferior ao gesso com 1% de aditivo.

Figura 63. Comparativo do atraso térmico das amostras.



Fonte. Autor.

Quando é acrescentada mais de uma camada na conformação dos compósitos e por consequência é aumentada a capacidade térmica do material, o atraso térmico aumenta, já que as camadas adicionais de manta de sisal e gesso vão criar uma interferência física para o fluxo de calor.

Outro fator que justifica os resultados de atraso térmico é quão homogêneo ou heterogêneo é o material analisado. Quanto mais heterogêneo o material analisado, maior será o atraso térmico que este apresentará, já que o fluxo de calor precisa atravessar diferentes meios com características e propriedades diferentes, o que justifica o melhor comportamento do GMGMG.

A Tabela 35 apresenta um resumo das propriedades térmicas analisadas durante os ensaios de laboratório e suas derivadas. As propriedades térmicas avaliadas a 40°C correspondem aos valores determinados pela norma para o gesso com 1 % de aditivo. No entanto, quando foi acrescentada uma camada de manta no gesso, é alterado de forma significativa o comportamento do gesso, melhorando a condutividade, resistência e transmitância térmica. No entanto, os compósitos com mais camadas na sua conformação, GMMG e GMGMG, apresentam uma melhora significativa na resistência, transmitância e atraso térmico.

Tabela 35. Resumo propriedades térmicas.

	κ (W/mK)	Calor Específico Cs - kj/(kgK)	Resistência térmica (m ² K/W)	Transmitância térmica (W/(m ² K))	Capacidade térmica Ct (KJ/m ² K)	Atraso térmico (hrs)
40°C						
G	0,750	0,885	0,230	4,34	20,85	0,47
GMG	0,539	0,92	0,238	4,20	18,20	0,52
GMMG	0,845	0,80	0,234	4,28	15,53	0,44
GMGMG	0,916	0,82	0,243	4,12	27,20	0,68
60°C						
G	0,305	0,90	0,259	3,85	21,32	0,74
GMG	0,292	1,00	0,261	3,82	19,79	0,73
GMMG	0,365	0,88	0,285	3,77	17,09	0,70
GMGMG	0,594	0,92	0,261	3,83	30,51	0,90
80°C						
G	0,211	0,91	0,281	3,55	21,56	0,90
GMG	0,191	1,08	0,289	3,46	21,37	0,94
GMMG	0,286	0,96	0,280	3,57	18,64	0,83
GMGMG	0,286	1,01	0,315	3,17	33,50	1,36

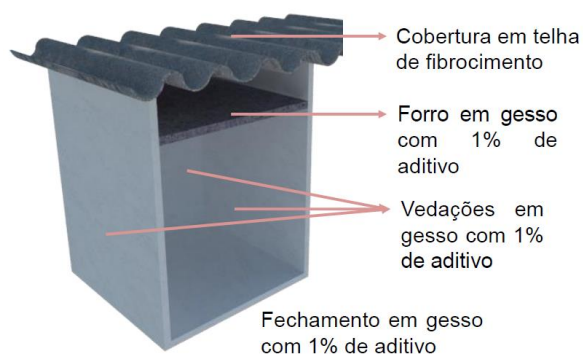
Fonte. Autor.

4.6 Análise das medições *in loco* e das simulações computacionais das *test-cells*.

As medições das *test-cells in loco* e com o software Energyplus visam a obtenção da temperatura interna do ambiente em análise, permitindo avaliar a resposta térmica das *test-cells* segundo as temperaturas externas obtidas com o banco climático da INMET e os valores dos ensaios para as propriedades térmicas realizados no laboratório. Pode ser estabelecida uma comparação entre os resultados das *test-cells in loco* e do software.

A primeira *test-cell* está conformada por vedações e forro em gesso com 1% de aditivo com cobertura em telha de fibrocimento e ático não ventilado, como é ilustrado na Figura 64.

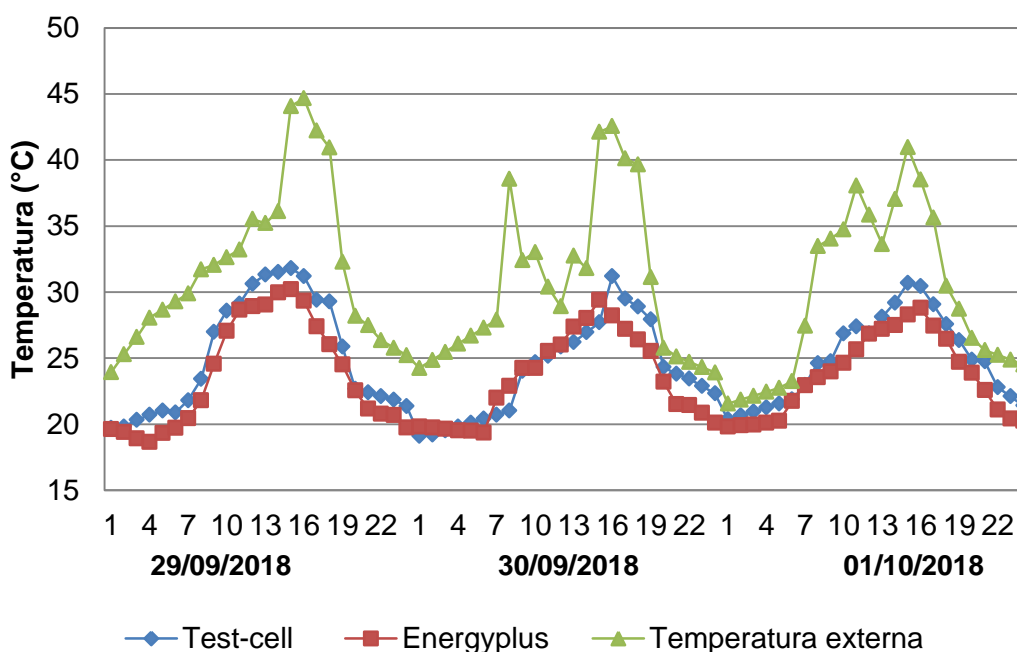
Figura 64. Esquema *test-cell* 1.



Fonte. Autor.

Nos resultados da Figura 65, para o período entre 29/09/2018 e 01/10/2018, percebe-se a sobreposição das curvas de temperatura dos dados medidos *in loco* e dos dados simulados no Energyplus.

Figura 65. Resultados obtidos para vedações da *test-cell* 1.



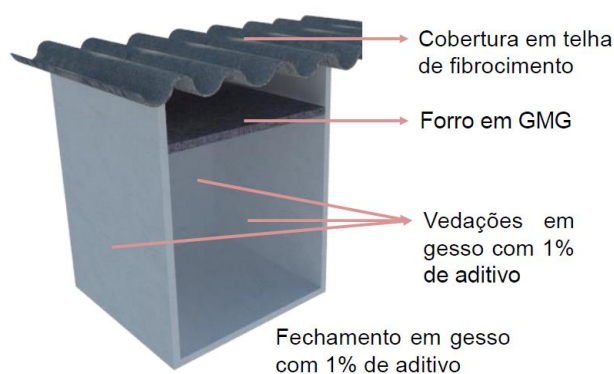
Fonte. Autor.

Verifica-se certa proximidade nos dados da temperatura simulada *in loco* e no Energyplus, com um leve deslocamento no segundo dia de avaliação. A comparação entre as curvas monitoradas e simuladas foi realizada por meio de análise de dispersão, através do erro percentual e o coeficiente de correlação entre os resultados. De acordo com Baker (2004), este desvio não deve ser maior que 13%.

Realizando uma comparação da dispersão dos resultados, obteve-se um erro percentual por hora, mínimo de 0,13%, máximo de 11,1% e uma média de 4,08%, já no caso do coeficiente de correlação, existe uma relação linear de 0,93. A comparação estatística evidenciou uma boa correlação dos resultados das simulações com os dados obtidos *in loco*.

A segunda test-cell está conformada por vedações em gesso com 1% de aditivo, cobertura em telha de fibro cimento, forro para GMG e ático não ventilado, como indicado na Figura 66.

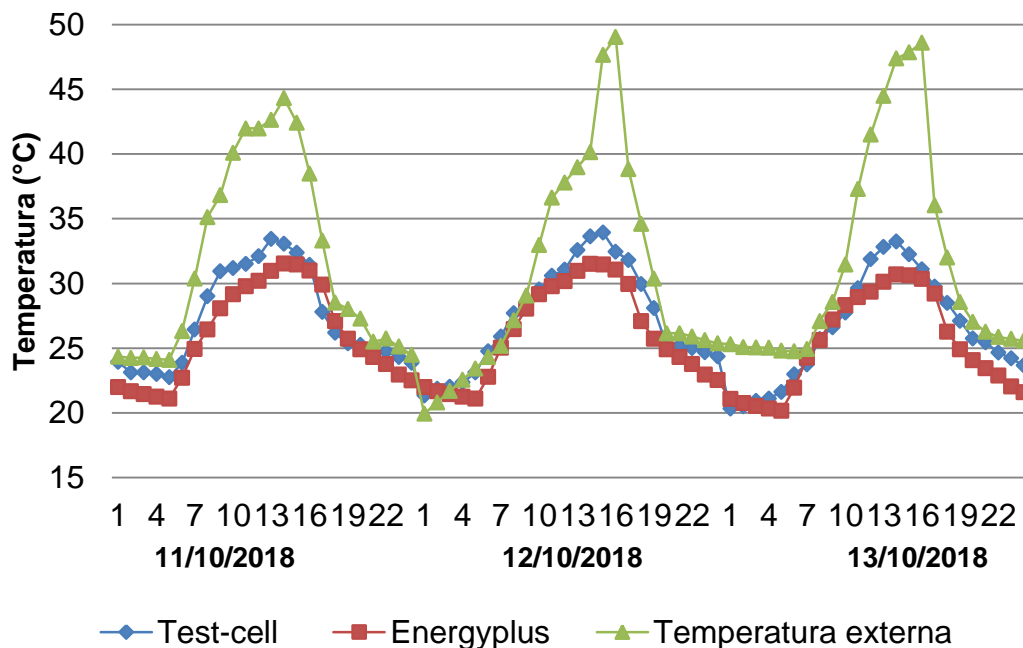
Figura 66. Esquema *test-cell* 2.



Fonte. Autor.

Os resultados exibidos na Figura 67, para o período de 11/09/2018 a 13/10/2018, indicam uma sobreposição das curvas de temperatura dos dados simulados *in loco*, os dados do Energyplus e de algumas temperaturas externas medida *in loco*.

Figura 67. Resultados obtidos para o forro da *test-cell* 2.



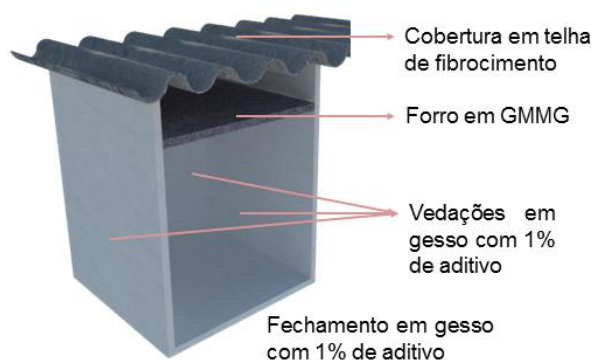
Fonte. Autor.

Constata-se certa proximidade nos dados de temperatura simulada *in loco* e no Energyplus, com um leve deslocamento nos horários de maior temperatura externa para todos os dias de avaliação, sendo que entre os dias 12/10 e 13/10 existe uma diminuição das temperaturas.

Os resultados indicam uma dispersão com um erro percentual por hora mínimo de 0,22%, máximo de 9,54% e uma média de 4,14%, no entanto, o coeficiente de correlação, indica uma relação linear de 0,96. A comparação estatística evidenciou uma boa correlação dos resultados das simulações com os dados obtidos *in loco*.

A terceira *test-cell* está conformada com um forro em GMMG, todas as vedações verticais em gesso com 1% de aditivo, cobertura em telha de fibrocimento e ático não ventilado, como ilustrado na Figura 68.

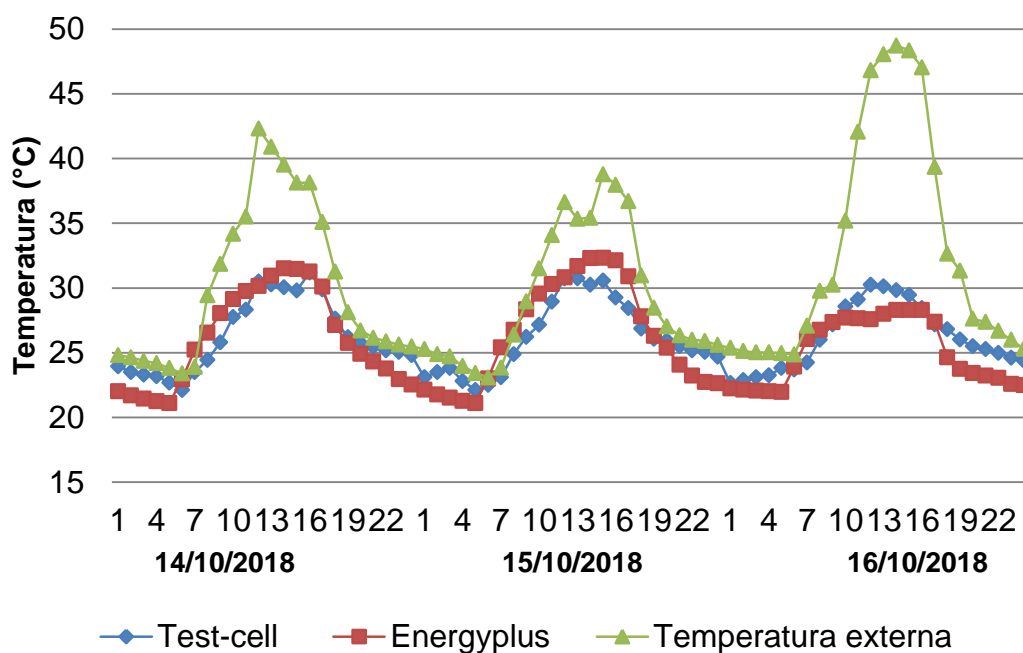
Figura 68. Esquema *test-cell* 3.



Fonte. Autor.

Os resultados do monitoramento da *test-cell* são apresentados na Figura 69, para um período de 14/09/2018 a 16/10/2018.

Figura 69. Resultados obtidos para o forro da *test-cell* 3.

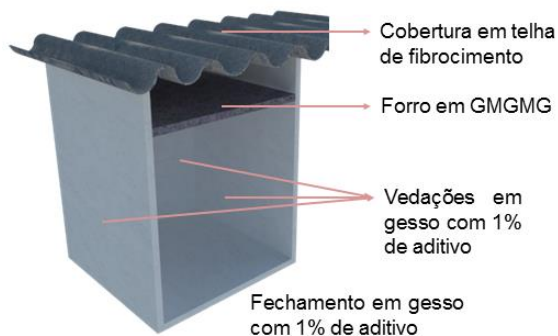


Fonte. Autor.

A *test-cell* com forro em GMMG tem uma similitude entre as menores temperaturas externas e as temperaturas obtidas *in loco*, as quais estão levemente deslocadas em função das temperaturas obtidas no Energyplus. Na comparação entre as curvas monitoradas e simuladas por dispersão, obteve-se um erro percentual por hora, mínimo de 0,21%, máximo de 9,92% e uma média de 4,24%, com um coeficiente de correlação, foi obtida uma relação linear de 0,90.

Considera-se a quarta *test-cell*, com forro em GMGMG, todas as vedações verticais em gesso com 1% de aditivo, cobertura em telha de fibrocimento e ático não ventilado, como está ilustrada na Figura 70.

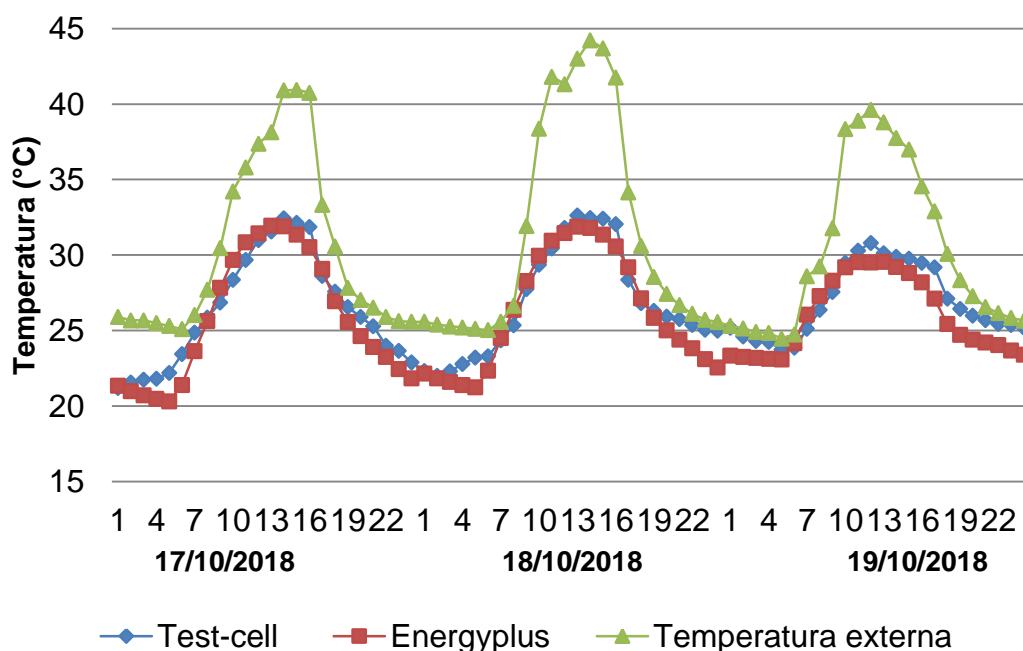
Figura 70. Esquema *test-cell* 4.



Fonte. Autor .

Os resultados para a *test-cell* são exibidos na Figura 71, para o período de 17/09/2018 a 19/10/2018.

Figura 71. Resultados obtidos para o forro da *test-cell* 4.



Fonte. Autor.

A *test-cell* apresenta um leve deslocamento superior nas horas de menor temperatura durante o dia, mas com proximidade nos dados de temperatura simulada e monitorada. Na comparação entre as curvas, obteve-se um erro percentual por hora, mínimo de 0,57%, máximo 9,77% e uma média

de 3,22%, já no caso do coeficiente de correlação, existe uma relação linear de 0,97, evidenciando-se a melhor correlação dos resultados das simulações com os dados obtidos *in loco*.

A Tabela 36 apresenta um resumo das medidas obtidas *in loco* e os dados simulados no Energyplus, observando-se uma temperatura média externa similar para todas as datas simuladas, obtendo-se as temperaturas internas máximas quando o material utilizado é o gesso com 1% de aditivo, atingindo uma diminuição nas temperaturas internas quando são utilizados os compósitos.

Tabela 36. Resumo dados medidos *in loco* e simulados.

	G	GMG	GMMG	GMGMG
Média temperatura externa	30,03	30,28	30,04	30,12
Média temperatura interna	27,38	25,67	25,04	25,47
Média temperatura simulada	26,32	24,49	24,6	24,72
Média do erro	4,08	4,14	4,24	3,22

Fonte. Autor.

A partir da avaliação dos resultados obtidos *in loco* e na simulação para as *test-cells*, observa-se que a simulação realizada com o software Energyplus, utilizando os dados experimentais obtidos em laboratório foram suficientes para estimar as temperaturas internas medidas diretamente no *test-cell*, com erro percentual inferiores a 10% e com médias inferiores a 5%.

Por tanto, os níveis mais elevados de erro percentual, não implicam necessariamente um erro no monitoramento ou na simulação, já que existe uma relação direta entre os parâmetros de análise e as temperaturas obtidas.

5 CONCLUSÕES

Em relação à conformação do compósito pode-se observar que as camadas inseridas em diferentes sequências atuam como diferentes barreiras que o fluxo de calor precisa ultrapassar, portanto é importante alternar as camadas para que o fluxo de calor intercepte materiais que tem uma conformação físico-química diferente.

Os resultados da caracterização dos materiais constituintes e para a análise das propriedades no estado fresco e endurecido permitem concluir que a pasta de gesso com relação 0,4 e 1% de aditivo permitiu conformar o gesso apropriado para a conformação do compósito. Além disso, com as modificações realizadas no gesso com o incremento de uma camada de manta de sisal com teor de fibra de 26% melhoram as propriedades de flexão a quatro pontos, em relação ao gesso com 1 % de aditivo, absorvendo uma carga maior ao longo da deformação e por um período de tempo maior. Esta melhora também é observada quando são acrescentadas maiores teores de fibra e uma camada intermediária na conformação dos compósitos.

A análise do comportamento térmico dos compósitos através da análise das propriedades térmicas e a transferência de calor do material, conclui-se que:

- As modificações realizadas no gesso com o incremento de uma camada de manta de sisal geraram uma melhora das propriedades térmicas do gesso com 1 % de aditivo, mas quando são acrescentadas mais camadas e com um aumento da espessura, a melhora progressiva das propriedades térmicas não são tão evidentes, já que existe uma melhoria pequena das propriedades térmicas em relação a quantidade de camadas de material utilizado.
- As propriedades térmicas são otimizadas com o uso da manta de sisal, mas é fundamental encontrar uma relação entre a quantidade de gesso e manta na conformação do compósito com o intuito de manter a espessura, já que criar camadas iguais e intercaladas não apresentam o melhor comportamento térmico.

Os resultados para o monitoramento das *test-cells* e as simulações realizadas no Energyplus, permitiram concluir que:

- O material compósito GMG é mais uma alternativa eficiente para atingir o desempenho térmico no espaço construído. Os compósitos analisados melhoram o desempenho térmico dos materiais convencionais mais prepondera um estúdio específico para cada localidade, já que não pode ser utilizado de forma padronizada para todas as situações.
- Outra questão a ser discutida são as divisões das zonas bioclimáticas apresentadas pela norma, já que avalia cidades com climas diferentes em uma mesma zona climática (8). Portanto, as exigências padronizadas da norma para as soluções projetuais não necessariamente vão permitir atingir o conforto térmico no espaço construído já que tem uma influência muito grande as variáveis climáticas na avaliação da edificação.
- Existe a suspeita de que as propriedades térmicas de condutividade térmica indicadas pela NBR 15220:2005 pode ser adotada para diversos projetos com diversas temperaturas externas, mas através dos ensaios laboratoriais foi possível determinar que talvez seja necessário realizar ensaios para caracterizar o materiais a diversas temperaturas e assim determinar com maior exatidão o uso.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS E LIMITAÇÕES

- Avaliar os materiais compósitos através de simulações computacionais para uma residência de interesse social que atinga as necessidades e requerimento da NBR 15575 para o projeto arquitetônico no inverno.
- Modificar a espessura dos materiais compósitos para que todos estejam na mesma condição física para posterior avaliação térmica do material.
- Realizar medições *in loco* para diferentes test-cells a partir da análise em um mesmo período de tempo e em pequenos empreendimentos em Salvador para avaliar o comportamento dos materiais.
- Complementar a análise térmica dos materiais com a análise acústica dos mesmos, com o intuito de determinar seu comportamento no ambiente construído, viabilizando ou não seu uso.
- Avaliar o uso do gesso e os compósitos em áreas externas a partir do uso de aditivos na conformação da pasta de gesso.
- Avaliar a aderência da manta de sisal com o gesso a partir do tratamento das fibras, hornificação e o arranchamento.

7 REFERÊNCIAS

AGARWAL, B.D., BROUTMAN, L.J., CHANDRASHENKHARA, K. **Analysis and performance of fibre composites**. Nova Deli. Terceira Edição. Wiley Publications. 2006. p.562.

ALEXANDER, B.; MISHRA, S.; LAMPKE, T. **Plant Fibers as Reinforcement Green Composites**. In: Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. p. 896, 2005.

ALONSO, C.; OTEIZA, I.; GARCÍA-NAVARRO, J.; MARTÍN-CONSUEGRA, F. **Energy consumption to cool and heat experimental modules for the energy refurbishment of façades. Three case studies in Madrid**. Energy and Buildings. 2016. p.11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.034>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C177**: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus. Estados Unidos. 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C351-92B**: Standard Test Method for Mean Specific Heat of Thermal Insulation. Estados Unidos. 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **C518**: Standard Test Method for Solar Absorptance, reflectance and Transmittance Of Materials using Intergrating Spheres. Estados Unidos. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E903**: Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers. Estados Unidos. 2015.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **55**: Thermal Enviromental Conditions for Human Occupancy. Estados Unidos. 2017.

AMICO, S. C. **Vegetable fibers as multifunctional materials**. Revista Materia, v. 15, n. 2, p. 386–395, 2010.

ANDRADE, T.C.Q; FREIRE, T.M.M; NERY, J.M.F.G; KATZSCHNER, L. **Thermal comfort and urban climate of the tropical city of Salvador, Bahia**. TECBAHIA: Revista Bahiana de Tecnologia de Salvador. V.17. p.34-45. 2002

ANTUNES, R. P.d N. **Estudo da influência da cal hidratada nas pastas de gesso**. 1999. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

APARECIDA, L.M de C.; AGOPYAN, V. **Caracterização de Fibras Curtas Empregadas na Construção Civil**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo. 2007.

ARAUJO. A.C.C. **Estudo de comportamento térmico de compósito à base de gesso e vermiculita**. 2017. p.57 Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal Rio Grande do Norte. Natal. 2017.

ASHOUR, T.; WIELAND, H.; GEORG, H.; BOCKISCH, F.; WU, W. **The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings**. Materials and design. 2010. p.10 doi:10.1016/j.matdes.2010.05.026

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12127 (MB-3468)**: Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12128 (MB-3469)**: Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas da pasta. Rio de Janeiro. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12129 (MB-3470)**: Gesso para construção - Determinação das propriedades mecânicas. Rio de Janeiro. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12984**: Não-tecido – determinação da massa por unidade de área. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220**: Desempenho térmico das edificações Parte 1, 2, 3, 4 e 5. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575**: edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Rio de Janeiro. 2013.

BAKER, P. **IQ-test-improving quality in testing and evaluation of solar and thermal characteristics of building components**. Energy and buildings. 2004. p.7. doi:10;1016/j.enbuild.2004.01.046

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F.; LUZ, A. B. **Gipsita. Rochas e Minerais Industriais: usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. cap. 21, p. 449-470.

BARROS, F.A; RAMOS, S.S. **Manual de conforto térmico**. Studio Novel. 5ª Edição. São Paulo. 2005

BDMEP. **Série Histórica – Dados diários e mensais**. Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa. Instituto Nacional de Meteorologia. Consultado em 10 de agosto de 2018.

BEN (Balanço Energético Nacional) **Relatório Nacional de balanço energético**. Rio de Janeiro, 2017.

BIANCO, L. et al. **Thermal and optical properties of a thermotropic glass pane: laboratory and in-field characterization**. 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015. Energy Procedia. 2015. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.124

BRAIEK,A. et al. **Estimation of the thermophysical properties of date palm fibers/gypsum composite for use as insulating materials in building**. Energy and Buildings. 2017. p.12. doi:10.1016/j.enbuild.2017.02.001

BRANDÃO, C. **Compósito com matriz de gesso e reforço em manta de sisal**. 2015, p.102. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal da Bahia. Salvador. 2015.

CALLISTER, Jr, W.D. **Ciencia e Engenharia dos Materiais: uma Introdução**. Rio de Janeiro. Editorial LTC. 2002. p.370.

CANEVAROLO, J.S.V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo.Artiliber. 2004. p. 236-284.

CARUTA, B.M. **Ceramics and composite materials: new research**. Nova Science Publishers Inc. United Kingdom. 2006.

CARVALHO, R.F. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira**. 2005. p.133. Dissertação (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade de São Paulo. São Carlos. 2005.

CHAWLA, K.K. **Cerâmico matrix composites**. Chapman & Hall. London. 1993.

CHERKI, A. et al. **Experimental thermal properties characterization of insulating cork-gypsum composite**. Construction and building materials. 2014. p.8. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.12.076

CHIKKI, M. et al. **Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation.** Energy and buildings. 2013. P.7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.019>

CHIKHI, M. **Young's moduls and thermophysical performances of bio-sourced materials based on date palm fibers.** Energy and buildings. 2016. p.9. doi:10.1016/j.enbuild.2016.08.034

CHUNG, D.D.L **Composite materials.** Science and applications. Engineering material and processes. Springer. 2^oEd. 2010.

DEBENEDETTI, P. G. **Supercooled and glassy water.** Journal of Physics: condensed matter, v. 15, n. 45, p. R1669-R1726, 2003.

DIAS, D.S.R. **Estudo térmico e de materiais de um compósito a base de gesso e EPS para a construção de casas populares.** 2008. p.92. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2008.

DOMÍNGUEZ, L. V.; SANTOS, A. G. **Manual Del Yeso.** Asociación Técnica y Empresarial del Yeso (ATEDY)Madrid. 2001. p.267.

FERREIRA, C.C.; SOUZA, H. A.; ASSIS, E.S. **Discussão dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos segundo as normas de desempenho térmico brasileiras.** Ambiente Construído, Porto Alegre. V.17, n 1. 2017.

FOLLNER, S. et al. **The setting behavior of α and β $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ as a function of crystal structure and morphology.** Crystal Research and Technology, v. 37, n. 10, p. 1075- 1087, 2002.

GUICHARD, S. et al. **A complex roof incorporating phase change material for improving thermal comfort in a dedicated test cell.** Renewable Energy. 2016. p. 12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.018>

INMET. **Normas Climatológicas do Brasil.** Instituto Nacional de Meteorologia. Consultado em 10 de agosto de 2018.

INTERNATIONAL STANDARIZATION ORGANIZATION. **8302:** Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus. Estados Unidos. 2013.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Part III ; 2. Method of test for steel fiber reinforced concrete.** Concrete Library of JSCE ; SF4, n°3, 1984, 74 pag.

JAUHARI, N.; MISHRA, R.; THAKUR, H. **Natural fiber reinforced composite laminates – A review.** Materials Today: Proceedings, v. 2, n. 4–5, p. 2868–2877, 2015.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. **Gesso de construção civil.** In: IBRACON, Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. Nº1, G.C. Isaia, Cap. 22.2, p. 727-760. 2007

KARNI, J.; KARNI, E. **Gypsum in construction: origin and properties.** Materials and Structures, v. 28, n. 2, p. 92-100, 1995.

KAW, A.K. **Mechanics of composite materials.** 2ªEd. Taylor & Francis Group. New York. 2006.

KLOPROGGE, J.T.; FROST, R.L. **Raman microscopy at 77K of natural gypsum CaSO₄.2H₂O.** Materials science letter. V.19.p 229-231, 2000.

KRÜGER, E. L.; MICHALOSKI, A.O. **Avaliação térmica de habitação popular através de simulação computacional como parâmetro de projeto arquitetônico: Estudo de caso na Vila Tecnológica de Curitiba.** In: IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. ENTAC, IX: Foz de Iguaçu, 7 a 10 de maio de 2002. Anais. Foz de Iguaçu, ENCAC, 2003. p.115-123.

LANZON, M.; GARCIA – RUIZ, P.A. **Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of gypsum building plasters.** Construction and Building Materials. N.28, 2012. P. 506 – 511.

KREITH, F.; MANGLIK, R.M; BOHN, M.S. **Principios de transferência de calor.** 7ªEd. Ed. Rilha. 2014

LI, Y.; MAI, Y.W.; YE, L. **Sisal fiber and its composites: a review of recent developments.** Composites Science and Technology, v 60, 2037 – 2055 p., 2000.

LILHOLT, H.; LAWOTHER, J. M. **Natural organic fibres.** In A. Kelly, & C. H. Zweben (Eds.), Comprehensive Composite Materials. New York: Elsevier Science, 2002.

LOW, I.M. **Ceramic matrix composites. Microstructure, properties and applications.** Woodhead Publishing and Maney Publishing. England. 2006

MAGALHÃES. C.A.B, FREITAS. F.B, BENVINDO DA LUZ. **A.Gipsita.** Capítulo 23. Rochas e Minerais Industriais – O Centro de tecnologia Mineras. CETEM/2008, 2ª Edição.

MALKAPURAM, R.; KUMAR, V.; NEGI, Y. S. **Recent Development in Natural Fiber Reinforced Polypropylene Composites.** Journal of Reinforced Plastics

and Composites, v. 28, n. 10, p. 1169–1189, 2009.p.21.
doi:10.1177/0731684407087759

MANDAL, P. K.; MANDAL, T. K. **Anion water in gypsum (CaSO₄.2H₂O) and hemihydrate (CaSO₄.1/2H₂O).** Cement and Concrete Research, v. 32, n. 2, p. 313- 316, 2002.

MASSÓ, Y.M. et al. **Guia sobre Materiais Isolantes e Eficiência Energética.** Consejería de Economía e Hacienda. Gráficas Areas Montado S.A. Madrid. 2012.

MINERALOGY DATABASE. **Gypsum mineral data.** Disponível em:
<<http://webmineral.com/data/Gypsum.shtml>>. Acesso em: 02 nov. 2009b.

MUNIZ. T.L, RAMOS. C. A.N. **Sumário Mineral.** Proteção Nacional de Proteção Mineral. Vol. 33. Brasília. 2015. ISSN 0101;2053

NERY, J.; ANDRADE, T.; MOURA, T. **Conforto Térmico em Salvador: o índice PET e sua abordagem projetual.** Revista de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal da Bahia-UFBA, vol. 7, nº 1, Salvador, p. 70-77, 2006.

OLIVEIRA, F. et al. **Características mineralógicas e cristalográficas da Gpsita do Araripe.** Holos, ano 28, vol.4, 2012. ISSN 1807 -1600.

PINHEIRO, S. M. de M. **Gesso recilcado: avaliação das propriedades para uso em componentes.** 2011. p. 165. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Estadual de Campinas. São Paulo. 2011.

POTTER, M.C; SCOTT, E.P. **Ciências térmicas. Termodinâmica, mecânica dos fluídos e transferência de calor.** Editora Thomson. 2007

RICL. A.M.S.O. **Caracterização da Fibra do Licuri (Syagrus Coronata (Martius) Beccari) para aplicações na construção civil.** 2010. p.128. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) Universidade Federal da Bahia. Salvador. 2010.

SARTORI, A.P. **Desenvolvimento e caracterizacao de compósitos sanduiche para isolamento térmico.** 2009, p.81. Dissertação (Mestrado em Materiais) Universidade Caxias do Sul. Caxias do Sul. 2009.

SILVA, R. V. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, Centro Tecnológico. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais.** São Carlos. 157 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais), 2003.

SILVA, C. D.; FREIRE JÚNIOR, R. C. S.; AQUINO, E. M. F. **Análise de mecanismo de dano em compósitos híbridos, tipo sanduíche utilizando**

fibras naturais. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Porto Alegre. 2004. p. 14.

SOBRINHO, A. C. P. et al. **Balanço mineral brasileiro 2001: Gipsita.** Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2001, 23 p.

SONG, K.M. et al. **Simultaneous monitoring of hydration kinetics, microstructural evolution, and surface interactions in hydrating gypsum plaster in the presence of additives.** J Mater Sci, vol. 45, 2010. p. 5282–5290. DOI 10.1007/s10853-010-4572-7

SOPHIA. M. et al. **Gypsum as a Construction Material- A Review of Recent Developments.** International Journal for Innovative Research in Science & Technology. Vol. 2. 2016 ISSN: 2349-6010

SORGATO, M.J. et al. **Avaliação de desempenho térmico pela norma NBR 15575 em consulta pública em 2012.** Universidade Federal de Santa Catarina. LABEEE – Laboratório de Eficiência Energetica em Edificações, 2012.

SORGATO, M.J; VERSAGE, R; LAMBERTS, R. **A influência da área de ventilação no desempenho térmico de edificações residenciais.** Universidade Federal de Santa Catarina. LABEEE – Laboratório de Eficiência Energetica em Edificações, 2012.

SORGATO, M.J. et al. **Proposta para o método de simulação da norma de desempenho NBR 15575.** Universidade Federal de Santa Catarina. LABEEE – Laboratório de Eficiência Energetica em Edificações, 2012.

SPOSTO, R.M.; KOMENO, M.H; KRÜGER. E.L. **Viabilidade energético-econômica de habitações de interesse social em Brasília com uso de blocos de concreto e entulho.** Engenharia Civil. 2007. p.519-524.

STARR, F. W.; NIELSEN, J. K.; STANLEY, H. E. **Fast and slow dynamics of hydrogen bonds in liquid water.** Physical Review Letters, v. 82, n. 11, p. 2294-2297, 1999.

TEIXEIRA, A.H DE C. **Informações Agrometeorológicas do Polo Petrolina, PE/ Juazeiro, BA – 1963 a 2009.** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Semiárido. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Petrolina-PE. 2010.

TIBERIO, G. C.; VECCHIA, F. **Comparison of thermal performance between test cells with different coverage systems for experimental typical day of heat in Brazilian Southeastern.** Frontiers of Architectural Research. 2014. p.12 <http://dx.doi.org/10.1016/j.foar.2014.04.007>

WALKER, J; RESNICK, R.; HALLIDAY, D. **Fundamentos de Física. Gravitação, ondas e termodinâmica.** 9ª Edição. Vol 2. 2010

YU. Q.L, BROUWERS. H.J.H. **Development of a self-compacting gypsum-based lightweight composite.** Cement & Concrete Composites. 2012. p.11
doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.05.004

YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. **Microstructure and mechanical properties of β -hemihydrate produced gypsum:** An insight from its hydration process. Construction and building Materials, nº 25, p. 3149-3157, 2011.

ANEXO

Resultados ensaios de flexão.

Tabela 37. Comportamento do gesso endurecido sem aditivo na flexão.

CP	Massa específica (kg/m ³)	F (N) Máx	Deslocamento (mm)	MOE (MPa)	MOR
1	1176,47	396,19	0,36	2416,08	6,34
2	1372,55	332,21	0,34	2130,78	5,32
3	1333,33	367,61	0,33	2446,86	5,92
4	1158,82	291,56	0,33	1928,72	4,66
Média	1256,80	345,83	0,34	2219,57	5,52
Desv. Pad.	93,89	40,36	0,01	214,17	0,63
C.V (%)	7,47	11,67	3,6	9,65	11,45

Fonte. Autor.

Tabela 38. Comportamento do gesso com 1% de aditivo na flexão.

CP	Massa específica (kg/m ³)	F (N) Máx	Deslocamento (mm)	MOE (MPa)	MOR
1	1294,12	380,27	0,21	3948,91	6,08
2	1294,12	377,85	0,17	4847,02	6,05
3	1137,25	398,85	0,25	2899,29	6,38
4	1254,90	370,93	0,22	3851,92	5,93
Média	1233,85	381,84	0,21	3823,67	6,11
Desv. Pad.	58,82	10,33	0,03	689,61	0,17
C. V (%)	4,77	2,7	13,59	18,04	2,70

Fonte. Autor.

Tabela 39. Resultados ensaio flexão compósito GMG

GMG					
CP	Massa específica (kg/m ³)	F (N) Máx	Deslocamento (mm)	MOE (MPa)	MOR
1	901,96	255,10	4,50	1854,36	4,08
2	823,53	220,40	5,20	2001,19	4,40
3	1098,04	250,40	5,42	1456,47	3,53
4	1137,25	275,30	4,37	2275,24	4,01
Média	1003,67	249,51	4,85	1872,63	3,99
Desv. Pad.	131,17	19,63	0,45	295,72	0,31
C.V (%)	13,07	7,87	9,21	15,79	7,87

Fonte. Autor.

Tabela 40. Resultados ensaio flexão compósito GMMG

GMMG					
CP	Massa específica (kg/m ³)	F (N) Máx	Deslocamento (mm)	MOE (MPa)	MOR
1	847,06	333,71	0,41	785,95	1,92
2	800,00	365,61	0,36	707,74	2,11
3	752,94	324,40	0,43	848,92	1,87
4	823,53	340,35	0,42	763,42	1,96
Média	799,31	341,02	0,41	776,51	1,96
Desv. Pad.	34,80	15,29	0,03	50,58	0,09
C.V (%)	4,35	4,48	6,65	6,51	4,48

Fonte. Autor.

Tabela 41. Resultados ensaio flexão compósito GMGMG.

GMGMG					
CP	Massa específica (kg/m ³)	F (N) Máx	Deslocamento (mm)	MOE (MPa)	MOR
1	1352,94	708,63	1,82	878,03	2,83
2	1137,25	811,66	2,36	885,01	3,15
3	1058,82	743,19	1,50	723,53	2,97
4	1176,47	660,67	2,10	771,55	2,64
Média	1156,09	728,99	1,92	811,56	2,89
Desv. Pad.	98,96	55,00	0,32	69,15	0,19
C.V (%)	8,56	8,55	16,69	8,52	6,43

Fonte. Autor.

Resultados ensaios de condutividade térmica.

Tabela 42. Resultados condutividade térmica a 40°C do gesso com 1% de aditivo.

G	Taxa de transferência de calor (W)	T2-K (Interna)	T1-K (Externa)	ΔT	Espessura (m)	κ (W/mK)
1	800	307,22	313,15	-5,93	0,015	0,898
2	800	306,45	313,15	-6,7	0,015	0,795
3	800	304,84	313,15	-8,31	0,015	0,641
4	800	305,42	313,15	-7,73	0,015	0,689
Média	800	305,98	313,15	-7,16	0,015	0,750
Desv.Pad.		0,82	0,00	0,82	0,00	0,09
C.V (%)		0,27	0,00	-11,46	0,00	11,86

Fonte. Autor.

Tabela 43. Resultados condutividade térmica a 40°C do GMG.

GMG	Taxa de transferência de calor (W)	T2-K (Interna)	T1-K (Externa)	ΔT	Espessura (m)	κ (W/mK)
1	800	303,68	313,15	-9,47	0,015	0,563
2	800	303,57	313,15	-9,58	0,015	0,556
3	800	302,55	313,15	-10,6	0,015	0,503
4	800	303,21	313,15	-9,94	0,015	0,536
Média	800	303,25	313,15	-9,898	0,015	0,539
Desv.Pad		0,39	0,00	0,39	0,00	0,02
C.V (%)		0,13	0,00	-3,99	0,00	3,88

Fonte. Autor.

Tabela 44. Resultados condutividade térmica a 40°C do GMMG.

GMMG	Taxa de transferência de calor (W)	T2-K (Interna)	T1-K (Externa)	ΔT	Espessura (m)	κ (W/mK)
1	800	302,6	313,15	-10,55	0,025	0,842
2	800	302,67	313,15	-10,48	0,025	0,847
3	800	302,96	313,15	-10,19	0,025	0,871
4	800	302,35	313,15	-10,8	0,025	0,822
Média	800	302,64	313,15	-10,50	0,025	0,845
Desv.Pad		0,19	0,00	0,19	0,00	0,02
C.V (%)		0,06	0,00	-1,85	0,00	1,86

Fonte. Autor.

Tabela 45. Resultados condutividade térmica a 40°C do GMGMG.

GMGMG	Taxa de transferência de calor (W)	T2-K (Interna)	T1-K (Externa)	ΔT	Espessura (m)	κ (W/mK)
1	800	301,4	313,15	-11,75	0,03	0,907
2	800	301,23	313,15	-11,92	0,03	0,894
3	800	301,8	313,15	-11,35	0,03	0,939
4	800	301,63	313,15	-11,52	0,03	0,925
Média	800	301,51	313,15	-11,63	0,030	0,916
Desv.Pad		0,19	0,00	0,19	0,00	0,02
C.V (%)		0,06	0,00	-1,67	0,00	1,67

Fonte. Autor.

Tabela 46. Resultados condutividade térmica a 60°C do gesso com 1% de aditivo.

G	Taxa de transferência de calor (W)	T2-K (Interna)	T1-K (Externa)	ΔT	Espessura (m)	κ (W/mK)
1	800	316,48	333,15	-16,66	0,015	0,355
2	800	312,26	333,15	-20,89	0,015	0,283
3	800	312,08	333,15	-21,07	0,015	0,281
4	800	313,82	333,15	-19,33	0,015	0,306
Média	800	313,65	333,15	-19,48	0,015	0,305
Desv.Pad		1,58	0,00	1,58	0,00	0,03
C.V (%)		0,50	0,00	-8,10	0,00	8,75

Fonte. Autor.

Tabela 47. Resultados condutividade térmica a 60°C do GMG.

GMG	Taxa de transferência de calor (W)	T2-K (Interna)	T1-K (Externa)	ΔT	Espessura (m)	κ (W/mK)
1	800	313,75	333,15	-19,39	0,015	0,305
2	800	313,94	333,15	-19,21	0,015	0,308
3	800	312,37	333,15	-20,78	0,015	0,285
4	800	311,39	333,15	-21,76	0,015	0,272
Média	800	312,86	333,15	-20,28	0,015	0,292
Desv.Pad		0,93	0,00	0,93	0,00	0,01
C.V (%)		0,30	0,00	-4,60	0,00	4,54

Fonte. Autor.

Tabela 48. Resultados condutividade térmica a 60°C do GMMG.

GMMG	Taxa de transferência de calor (W)	T2-K (Interna)	T1-K (Externa)	ΔT	Espessura (m)	κ (W/mK)
1	800	307,22	333,15	-25,93	0,025	0,380
2	800	306,9	333,15	-26,25	0,025	0,376
3	800	304,12	333,15	-29,03	0,025	0,340
4	800	306,14	333,15	-27,00	0,025	0,365
Média	800	306,09	333,15	-27,05	0,025	0,365
Desv.Pad		1,08	0,00	1,08	0,00	0,01
C.V (%)		0,35	0,00	-3,99	0,00	3,85

Fonte. Autor.

Tabela 49. Resultados condutividade térmica a 60°C do GMGMG.

GMGMG	Taxa de transferência de calor (W)	T2-K (Interna)	T1-K (Externa)	ΔT	Espessura (m)	κ (W/mK)
1	800	317,56	333,15	-15,58	0,03	0,760
2	800	315,46	333,15	-17,68	0,03	0,670
3	800	304,76	333,15	-28,38	0,03	0,417
4	800	313,02	333,15	-20,15	0,03	0,588
Média	800	312,66	333,15	-20,45	0,030	0,594
Desv.Pad		4,34	0,00	4,34	0,00	0,14
C.V (%)		1,39	0,00	-21,24	0,00	19,01

Fonte. Autor.

Tabela 50. Resultados condutividade térmica a 80°C do gesso com 1% de aditivo.

G	Taxa de transferência de calor (W)	T2-K (Interna)	T1-K (Externa)	ΔT	Espessura (m)	κ (W/(mK))
1	800	327,11	353,15	-26,03	0,015	0,244
2	800	320,31	353,15	-32,83	0,015	0,193
3	800	321,03	353,15	-32,12	0,015	0,197
4	800	323,45	353,15	-29,7	0,015	0,214
Média	800,00	322,96	353,15	-30,17	0,015	0,211
Desv.Pad	0,00	2,37	0,00	2,37	0,00	0,02
C.V (%)	0,00	0,73	0,00	-7,87	0,00	8,38

Fonte. Autor.

Tabela 51. Resultados condutividade térmica a 80°C do GMG.

GMG	Taxa de transferência de calor (W)	T2-K (Interna)	T1-K (Externa)	ΔT	Espessura (m)	κ (W/(mK))
1	800	323,47	353,15	-29,67	0,015	0,214
2	800	321,09	353,15	-32,05	0,015	0,198
3	800	320,35	353,15	-32,8	0,015	0,193
4	800	314,48	353,15	-38,66	0,015	0,164
Média	800,00	319,83	353,15	-33,30	0,015	0,191
Desv.Pad	0,00	2,96	0,00	2,96	0,00	0,02
C.V (%)	0,00	0,92	0,00	-8,88	0,00	8,40

Fonte. Autor.

Tabela 52. Resultados condutividade térmica a 80°C do GMMG.

GMMG	Taxa de transferência de calor (W)	T2-K (Interna)	T1-K (Externa)	ΔT	Espessura (m)	κ (W/(mK))
1	800	316,4	353,15	-36,75	0,025	0,288
2	800	316,65	353,15	-36,5	0,025	0,290
3	800	315,95	353,15	-37,2	0,025	0,284
4	800	315,77	353,15	-37,37	0,025	0,283
Média	800,00	316,19	353,15	-36,95	0,025	0,286
Desv.Pad	0,00	0,31	0,00	0,31	0,00	0,01
C.V (%)	0,00	0,10	0,00	-0,84	0,00	0,84

Fonte. Autor.

Tabela 53. Resultados condutividade térmica a 80°C do GMGMG.

GMGMG	Taxa de transferência de calor (W)	T2-K (Interna)	T1-K (Externa)	ΔT	Espessura (m)	κ (W/(mK))
1	800	307,75	353,15	-45,4	0,03	0,279
2	800	304,66	353,15	-48,48	0,03	0,262
3	800	308,62	353,15	-44,52	0,03	0,285
4	800	313,91	353,15	-39,24	0,03	0,323
Média	800,00	308,71	353,15	-44,41	0,030	0,286
Desv.Pad	0,00	2,98	0,00	2,98	0,00	0,02
C.V (%)	0,00	0,96	0,00	-6,70	0,00	7,02

Fonte. Autor.

Resultados ensaios de calor específico.

Tabela 54. Resultados do calor específico a 40°C do gesso com 1% de aditivo.

G	T° inicial Álcool Tc - °C	Massa álcool Mw - kg	T° Líquid o Tm - °C	Massa CP- Kg	Q Álcool - J	Calor Específico Cs - kJ/(kgK)
1	24,5	0,200	25,73	0,07	821,51	0,80
2	24,5	0,200	25,98	0,08	994,26	0,94
3	24,5	0,200	25,78	0,07	857,02	0,81
4	24,5	0,200	26,02	0,07	1022,18	0,99
Média	24,5	0,20	25,88	0,07	923,74	0,885
Desv.Pad	0,00	0,00	0,13	0,00	85,97	0,08
C.V (%)	0,00	0,00	0,49	1,76	9,31	9,27

Fonte. Autor.

Tabela 55. Resultados do calor específico a 40°C para GMG.

GMG	T° inicial Álcool Tc - °C	Massa álcool Mw - kg	T° Líquido Tm - °C	Massa CP Kg	Q Álcool J	Calor Específico Cs - kJ/(kgK)
1	24,2	0,245	25,33	0,07	945,28	0,88
2	24,2	0,245	25,44	0,07	1036,22	0,96
3	24,2	0,245	25,49	0,07	1070,71	1,01
4	24,2	0,245	25,26	0,07	879,98	0,81
Média	24,2	0,25	25,38	0,07	983,05	0,92
Desv.Pad	0,00	0,00	0,09	0,00	75,10	0,08
C.V (%)	0,00	0,00	0,36	0,63	7,64	8,52

Fonte. Autor.

Tabela 56. Resultados do calor específico a 40°C para GMMG.

GMMG	T° inicial Álcool Tc - °C	Massa álcool Mw - kg	T° Líquido Tm - °C	Massa CP Kg	Q Álcool J	Calor Específico Cs - kJ/(kgK)
1	24,2	0,44	24,83	0,08	943,90	0,78
2	24,2	0,45	24,82	0,08	950,53	0,78
3	24,2	0,45	24,91	0,08	1085,90	0,90
4	24,2	0,45	24,80	0,08	919,83	0,76
Média	24,2	0,45	24,84	0,08	975,04	0,80
Desv.Pad	0,00	0,00	0,04	0,00	65,02	0,06
C.V (%)	0,00	0,97	0,17	0,00	6,67	6,96

Fonte. Autor.

Tabela 57. Resultados do calor específico a 40°C para GMGMG.

GMGMG	T° inicial Álcool Tc - °C	Massa álcool Mw - kg	T° Líquido Tm - °C	Massa CP Kg	Q Álcool J	Calor Específico Cs - kj/(kgK)
1	24,2	0,45	25,08	0,11	1345,29	0,82
2	24,2	0,45	25,08	0,11	1346,51	0,82
3	24,2	0,45	25,13	0,11	1417,91	0,87
4	24,2	0,45	25,04	0,11	1280,78	0,78
Média	24,2	0,45	25,08	0,11	1347,63	0,82
Desv.Pad	0,00	0,00	0,03	0,00	48,51	0,03
C.V (%)	0,00	0,00	0,13	0,13	3,60	3,92

Fonte. Autor.

Tabela 58. Resultados do calor específico a 60°C do gesso com 1% de aditivo.

G	T° inicial Álcool Tc - °C	Massa álcool Mw - kg	T° Líquido Tm - °C	Massa CP Kg	Q Álcool J	Calor Específico Cs - kj/(kgK)
1	24,5	0,200	27,56	0,07	2067,2	0,886
2	24,5	0,200	27,64	0,08	2121,6	0,869
3	24,5	0,200	27,82	0,07	2244	0,937
4	24,5	0,200	27,74	0,07	2189,6	0,919
Média	24,5	0,20	27,69	0,07	2155,60	0,90
Desv.Pad	0	0	0,10	0,00	66,97	0,03
C.V (%)	0	0	0,36	1,76	3,11	2,95

Fonte. Autor.

Tabela 59. Resultados do calor específico a 60°C para GMG.

GMG	T° inicial Álcool Tc - °C	Massa álcool Mw - kg	T° Líquido Tm - °C	Massa CP Kg	Q Álcool J	Calor Específico Cs - kj/(kgK)
1	24,2	0,245	27,05	0,07	2374,05	0,987
2	24,2	0,245	27,12	0,07	2432,36	1,002
3	24,2	0,245	27,25	0,07	2540,65	1,063
4	24,2	0,245	26,98	0,07	2315,74	0,948
Média	24,2	0,25	27,10	0,07	2415,70	1,00
Desv.Pad	0	0	0,10	0,00	83,09	0,04
C.V (%)	0	0	0,37	0,63	3,44	4,14

Fonte. Autor.

Tabela 60. Resultados do calor específico a 60°C para GMMG.

GMMG	T° inicial Álcool Tc - °C	Massa álcool Mw - kg	T° Líquido Tm - °C	Massa CP Kg	Q Álcool J	Calor Específico Cs - kj/(kgK)
1	24,2	0,44	25,50	0,08	1944,8	0,705
2	24,2	0,45	25,98	0,08	2723,4	1,001
3	24,2	0,45	25,81	0,08	2463,3	0,901
4	24,2	0,45	25,85	0,08	2524,5	0,924
Média	24,2	0,45	25,79	0,08	2414,00	0,88
Desv.Pad	0	0,001	0,18	0,00	287,45	0,11
C.V (%)	0	0,97	0,68	0,00	11,91	12,37

Fonte. Autor.

Tabela 61. Resultados do calor específico a 60°C para GMGMG.

GMGMG	T° inicial Álcool Tc - °C	Massa álcool Mw - kg	T° Líquido Tm - °C	Massa CP Kg	Q Álcool J	Calor Específico Cs - kj/(kgK)
1	24,2	0,45	26,75	0,11	3884,16	1,062
2	24,2	0,45	26,58	0,11	3625,216	0,986
3	24,2	0,45	25,95	0,11	2665,6	0,714
4	24,2	0,45	26,45	0,11	3427,2	0,929
Média	24,2	0,45	26,43	0,11	3400,54	0,92
Desv.Pad	0	0	0,30	0,00	454,21	0,13
C.V (%)	0	0	1,13	0,13	13,36	14,04

Fonte. Autor.

Tabela 62. Resultados do calor específico a 80°C do gesso com 1% de aditivo.

G	T° inicial Álcool Tc - °C	Massa álcool Mw - kg	T° Líquido Tm - °C	Massa CP Kg	Q Álcool J	Calor Específico Cs - kj/(kgK)
1	24,5	0,200	29,78	0,07	3576,8	0,99
2	24,5	0,200	29,30	0,08	3250,4	0,85
3	24,5	0,200	29,67	0,07	3502	0,93
4	24,5	0,200	29,20	0,07	3182,4	0,85
Média	24,52	0,2	29,49	0,07	3377,90	0,91
Desv.Pad	0	0	0,24	0,00	165,41	0,06
C.V (%)	0	0	0,82	1,76	4,90	6,65

Fonte. Autor.

Tabela 63. Resultados do calor específico a 80°C para GMG.

GMG	T° inicial Álcool Tc - °C	Massa álcool Mw - kg	T° Líquido Tm - °C	Massa CP Kg	Q Álcool J	Calor Específico Cs - kj/(kgK)
1	24,2	0,245	29,40	0,07	4331,6	1,17
2	24,2	0,245	28,98	0,07	3981,74	1,06
3	24,2	0,245	28,61	0,07	3673,53	0,98
4	24,2	0,245	29,27	0,07	4223,31	1,13
Média	24,2	0,245	29,07	0,07	4052,55	1,08
Desv.Pad	0	0	0,30	0,00	252,83	0,07
C.V (%)	0	0	1,04	0,63	6,24	6,72

Fonte. Autor.

Tabela 64. Resultados do calor específico a 80°C para GMMG.

GMMG	T° inicial Álcool Tc - °C	Massa álcool Mw - kg	T° Líquido Tm - °C	Massa CP Kg	Q Álcool J	Calor Específico Cs - kj/(kgK)
1	24,2	0,44	27,01	0,08	4203,76	0,99
2	24,2	0,45	26,75	0,08	3901,5	0,92
3	24,2	0,45	26,90	0,08	4131	0,97
4	24,2	0,45	26,85	0,08	4054,5	0,95
Média	24,2	0,4475	26,88	0,08	4072,69	0,96
Desv.Pad	0	0,001	0,09	0,00	112,04	0,03
C.V (%)	0	0,97	0,35	0,00	2,75	2,92

Fonte. Autor.

Tabela 65. Resultados do calor específico a 80°C para GMGMG.

GMGMG	T° inicial Álcool Tc - °C	Massa álcool Mw - kg	T° Líquido Tm - °C	Massa CP Kg	Q Álcool J	Calor Específico Cs - kj/(kgK)
1	24,2	0,45	27,72	0,11	5363,74105	0,93
2	24,2	0,45	27,95	0,11	5712	1,00
3	24,2	0,45	28,21	0,11	6108,032	1,08
4	24,2	0,45	28,01	0,11	5803,392	1,01
Média	24,2	0,448	27,97	0,11	5746,79	1,01
Desv.Pad	0	0	0,17	0,00	265,35	0,05
C.V (%)	0	0	0,62	0,13	4,62	5,05

Fonte. Autor.