

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

TRABALHO DE CONCLUSÃO FINAL DE CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE



**FORRO DE PLACAS CIMENTÍCIAS COM
BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS PARA
MELHORAMENTO TERMOENERGÉTICO DE
MORADIAS**

**ENILDA MARIA DA SILVA GARCIA DE
FREITAS**

**CAMPO GRANDE
2019**

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE**

**FORRO DE PLACAS CIMENTÍCIAS COM BORRACHA DE
PNEUS INSERVÍVEIS PARA MELHORAMENTO
TERMOENERGÉTICO DE MORADIAS**

ENILDA MARIA DA SILVA GARCIA DE FREITAS

CAMPO GRANDE

2019

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE**

**FORRO DE PLACAS CIMENTÍCIAS COM BORRACHA DE
PNEUS INSERVÍVEIS PARA MELHORAMENTO
TERMOENERGÉTICO DE MORADIAS**

ENILDA MARIA DA SILVA GARCIA DE FREITAS

Trabalho de Conclusão Final de Curso para Defesa do Mestrado Profissional, pela Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração Sustentabilidade.

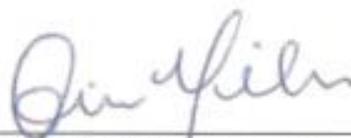
Orientadora: Profa. Dra. Ana Paula da Silva Milani

CAMPO GRANDE

SETEMBRO / 2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

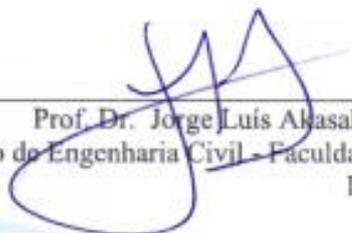
Redação final do Trabalho de Conclusão de Curso defendida por **ENILDA MARIA DA SILVA GARCIA DE FREITAS**, aprovada pela Comissão Julgadora em 04 de setembro de 2019, na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.



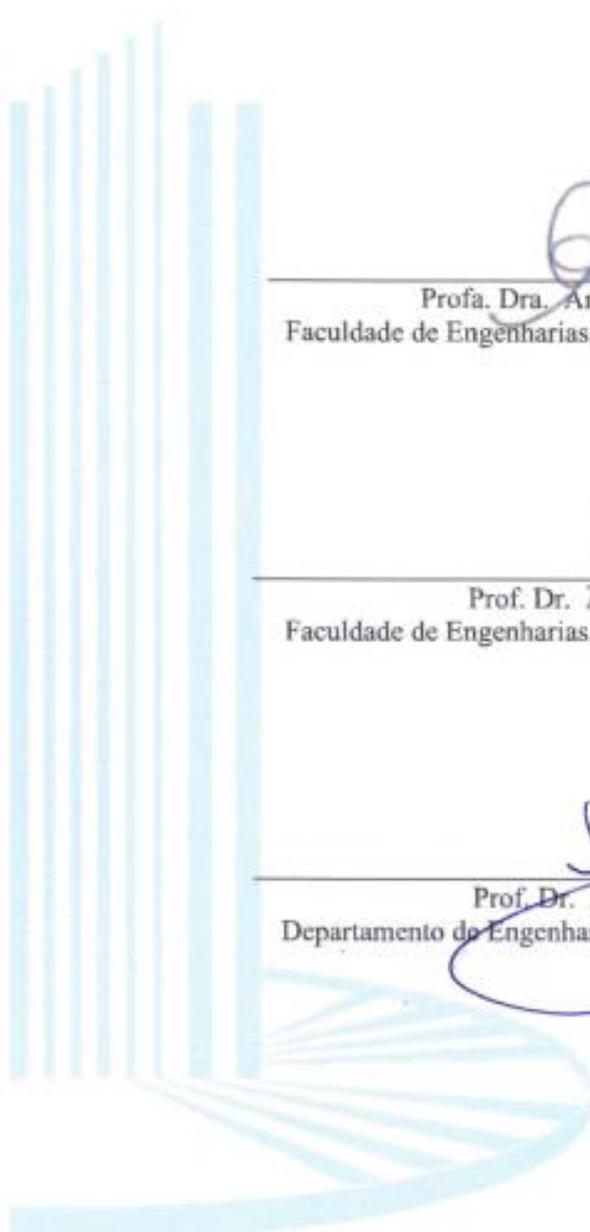
Prof. Dra. Ana Paula da Silva Milani – Orientadora
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia
FAENG/UFMS



Prof. Dr. Arthur Santos Silva – Membro Titular
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia
FAENG/UFMS



Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki – Membro Titular
Departamento de Engenharia Civil - Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira/ UNESP



Ao meu pai Lazaro (*in memoriam*), pelo carinho e amor infinito,
a minha mãe Maria de Lourdes e minha irmã Ana Paula,
grande incentivadoras e luzes da minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida e aos pais maravilhosos que me proporcionou.

A minha gratidão a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para este trabalho.

A minha mãe e irmã pelo apoio e incentivo incondicionais.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Eficiência Energética e Sustentabilidade por todo conhecimento compartilhado.

Ao Israel Vilalba, técnico do Laboratório de Materiais de Construção Civil Prof. Hélio Baís Martins, pelo suporte e auxílio prestado.

Ao Douglas Sousa Tosta, pelo o companheirismo e auxílio no desenvolvimento da pesquisa.

A minha orientadora, Profa. Dra Ana Milani pelo carinho e incentivo a todo momento.

Respondeu-lhes Jesus: Tende fé em Deus.
Em verdade vos digo que qualquer que disser a este monte: Ergue-te e lança-te no mar; e não
duvidar em seu coração, mas crer que se fará aquilo que diz, assim lhe será feito.
(Marcos 11, 22-23)

RESUMO

No Brasil, as habitações de interesse social são geralmente projetadas com as mesmas características construtivas por todo país, desconsiderando o clima e peculiaridades do local, o que resulta em um nível de eficiência energética insatisfatória e o desconforto térmico interno dos moradores. Assim, tem-se intensificado a busca pela melhoria do desempenho termoenergético dos edifícios por meio dos materiais e/ou componentes de construção que possam amenizar tanto a elevação da temperatura interna no ambiente construído quanto ao impacto ambiental e econômico do sistema construtivo. A partir disto, produtos cimentícios com borracha de pneus inservíveis, sem função estrutural, têm-se mostrado viáveis para a aplicação neste contexto devido a sua propriedade de baixa condutividade térmica em vistas aos concretos e argamassas convencionais. Portanto, o presente trabalho buscou estudar argamassas compostas pelas matérias-primas cimento-areia-resíduos de borracha de pneus inservíveis para a confecção de placas de vedação com características favoráveis para o melhoramento termoenergético das edificações. Foram realizados ensaios para a caracterização dos materiais e estudo de dosagem do compósito cimentício com partículas de borracha, sendo nestas argamassas com borracha aplicados os ensaios de resistência à flexão e à compressão, de absorção de água e de condutividade térmica. Também foram verificados os métodos de moldagem para a fabricação de placas cimentícias com borracha, bem como o desempenho térmico dessas placas quando aplicadas como forro de cobertura de habitações através de simulações computacionais (*EnergyPlus*). As placas de argamassas cimentícias com 15% de borracha conferiram o valor médio de resistência à flexão de 4 MPa e redução de 21% da condutividade térmica quando comparada as argamassas tradicionais. Quanto a avaliação termoenergética, moradias com forro de placas cimentícias com borracha tiveram menores picos de fluxos de calor quando comparado ao forro tradicional de PVC (Policloreto de Vinila) para as cidades de Corumbá e de Campo Grande. Desta forma, os resultados encontrados validam a utilização da dosagem de argamassa cimentícia com até 15% de borracha de pneus inservíveis, o que torna um produto com menor massa específica, tecnicamente viável para aplicação como placas pré-moldadas e com o potencial no melhoramento do desempenho térmico das moradias ao compará-lo com as placas convencionais cimentícias e/ou de PVC.

Palavras-chave: resíduo; desempenho térmico; habitação de interesse social; simulação computacional.

ABSTRACT

In Brazil, social interest housing is generally designed with the same constructive characteristics throughout the country, disregarding the climate and the place's peculiarities, which results in a level of unsatisfactory energy efficiency and residents internal thermal discomfort. Thus, the search has been intensified for the buildings thermoenergetic performance improvement through materials and/or building components that can soften both the built environment internal temperature increase and also the building system environmental and economic impact. Starting from this, non-structural tire rubber waste cementitious products have been shown to be viable for application in this context due to their low thermal conductivity property for concrete and conventional mortars. Therefore, the present work aimed to study mortars composed by the raw materials cement-sand-rubber tire waste to produce sealing plates with advantageous characteristics for the buildings thermoenergetic improvement. Tests were performed to characterize the materials and study the dosage of cementitious composite with rubber particles, and in these mortars with rubber applied the tests of flexural and compressive strength, water absorption and thermal conductivity. It was also verified the molding methods for the manufacture of rubber cementitious plates, as well as the thermal performance of these plates when applied as a housing roof by computer simulations (*EnergyPlus*). The cementitious mortar plates with 15% rubber gave the mean value of 4 MPa bending resistance and a 21% reduction in thermal conductivity when compared to traditional mortars. As for the thermo-energetic assessment, dwellings ceiled with cementary plates with rubber had smaller peaks of heat flows when compared to the traditional PVC ceilinging (polyvinyl chloride) for the cities of Corumbá and Campo Grande. In this way, the found results validate the use of cementitious mortar dosage with up to 15% rubber tire waste addition, which makes a product with smaller specific mass, technically feasible for application as precast plates and with potential to improve the thermal performance of houses when compared to conventional cementitious and/or PVC (Polyvinyl Chloride) plates.

Keywords: waste; thermal performance; social interest housing; computational simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da troca de calor em uma cobertura.....	27
Figura 2 - Configuração das coberturas monitoradas por Michels et al. (2018).....	29
Figura 3 – Fluxograma do programa experimental das etapas de desenvolvimento da pesquisa	32
Figura 4 - Etapas de trituração de pneus inservíveis	33
Figura 5 - Imagem das partículas de borracha de pneu peneirada.....	33
Figura 6 - Processo de fabricação da placa por vibração e ensaio mecânico	36
Figura 7 - Imagens processo de moldagem	38
Figura 8 – Princípio do método de medição da resistência térmica	39
Figura 9 - Modelo representativo	42
Figura 10 - Variáveis climáticas a partir do arquivo climático	47
Figura 11 - Rotina de ocupação.....	48
Figura 12 - Taxa de uso de iluminação por ambiente de permanência prolongado	49
Figura 13 - Corte ilustrativo	51
Figura 14 – Curva granulométrica das partículas de borracha de pneu inservível.....	52
Figura 15 – Disposição das partículas de borracha de pneus retidas por peneiras.....	53
Figura 16 - Análise termogravimétrica da borracha de pneu	55
Figura 17 - Curva granulométrica areia natura de Campo Grande.....	56
Figura 18 - Relação água e cimento das argamassas do estudo de dosagem	57
Figura 19 - Resistência média a tração na flexão	58
Figura 20 - Resistência média a compressão.....	59
Figura 21 - Ascensão de água por capilaridade após 72h de ensaio	62
Figura 22 - Comportamento mecânico das placas cimentícias com partículas de borracha	63
Figura 23 - Resistência média a flexão aos 7 dias de idade das placas	66
Figura 24 - Condutividade térmica das placas.....	67
Figura 25 – Imagens MEV da fratura de compósito cimentício com borracha de pneu inservível.	68
Figura 26- Extremos do GHR para os ambientes simulados – Corumbá.....	70
Figura 27 - Extremos do GHR para os ambientes simulados – Campo Grande	71
Figura 28 – Gráfico do indicador média dos quadrados da ANOVA por ambiente – Corumbá	72

Figura 29 – Gráfico do indicador média dos quadrados da ANOVA por ambiente – Campo Grande	73
Figura 30 - Gráfico de caixa do GHR por ambiente de permanência prolongado em relação a cor do telhamento e orientação solar da cidade de Corumbá	74
Figura 31 - Gráfico de caixa do GHR por ambiente de permanência prolongado em relação a cor do telhamento e orientação solar da cidade de Campo Grande.....	75
Figura 32 - Gráfico de caixa do GHR por ambiente de permanência prolongado em relação ao tipo de parede e tipo de forro em Corumbá	76
Figura 33 – Gráfico de caixa do GHR por ambiente de permanência prolongado em relação ao tipo de parede e tipo de forro em Campo Grande.....	77
Figura 34 - Extremos do GHR para os ambientes simulados nas cidades de Campo Grande e Corumbá.	78
Figura 35 - Análise do atraso térmico das moradias na cidade de Corumbá para cor marfim acrílico fosco combinado com orientação da fachada a Oeste.	81
Figura 36 - Análise do atraso térmico das moradias na cidade de Campo Grande para cor marfim acrílico fosco combinado com orientação da fachada a Oeste.	81
Figura 37 – Análise do atraso térmico das moradias na cidade de Corumbá para cor telha acrílico fosco combinado com orientação da fachada a Noroeste.....	83
Figura 38 – Análise do atraso térmico das moradias na cidade de Campo Grande para cor telha acrílico fosco combinado com orientação da fachada a Noroeste.....	83
Figura 39 – Análise do fluxo de calor para cor marfim acrílico fosco combinado com orientação da fachada a Oeste (Corumbá).....	85
Figura 40 - Análise do fluxo de calor para cor marfim acrílico fosco combinado com orientação da fachada a Oeste (Campo Grande)	86
Figura 41 - Análise do somatório do fluxo de calor para os forros de LC, PCB15 e PVC com a composição de cor de telhamento marfim, orientação solar Oeste e Noroeste e paredes de blocos cerâmicos e monolítica de concreto (Corumbá).....	87
Figura 42 - Análise do somatório do fluxo de calor para os forros de LC, PCB15 e PVC com a composição de cor de telhamento marfim, orientação solar Oeste e Noroeste e paredes de blocos cerâmicos e monolítica de concreto (Campo Grande).	87
Figura 43 - Análise do fluxo de calor na cidade de Corumbá para a cor telha acrílico fosco combinado com orientação da fachada a Noroeste	88

Figura 44 - Análise do fluxo de calor na cidade de Campo Grande para a cor telha acrílico fosco combinado com orientação da fachada a Noroeste.....	89
Figura 45 - Análise do somatório do fluxo de calor para os forros de LC, PCB15 e PVC com a composição da cor de telhamento telha, orientação solar Oeste e Noroeste e paredes de blocos cerâmicos e monolítica de concreto (Corumbá).....	90
Figura 46 - Análise do somatório do fluxo de calor para os forros de LC, PCB15 e PVC com a composição da cor de telhamento telha, orientação solar Oeste e Noroeste e paredes de blocos cerâmicos e monolítica de concreto (Campo Grande).....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades consideradas para simulação nos estudos realizados por Mazzaferro et al. (2014).....	29
Tabela 2 - Características cimento Portland CP V – ARI	34
Tabela 3 - Referências Normativas para Caracterização.....	34
Tabela 4 - Estudo de dosagem das argamassas cimentícias com borracha	35
Tabela 5 - Dosagem adotadas para placas cimentícias com borracha.....	37
Tabela 6 - Características dos componentes e materiais de sistema construtivo.....	40
Tabela 7– Características dos componentes e materiais de sistema construtivo em MS	41
Tabela 8 - Características dos componentes e materiais de sistema construtivo.....	43
Tabela 9 - As propriedades térmicas e físicas dos materiais utilizados nas simulações e para os cálculos de transmitância térmica e capacidade térmica para as paredes, piso e portas.....	43
Tabela 10 – Componentes construtivos das paredes utilizadas.....	44
Tabela 11 - As propriedades térmicas e físicas dos materiais utilizado nas simulações e para os cálculos de transmitância térmica e capacidade térmica para a cobertura.	45
Tabelas 12 - Componentes das coberturas utilizadas	45
Tabela 13 - Absortância solar de acordo com a cor do revestimento do telhamento	45
Tabela 14 – Características dos dias selecionados	51
Tabela 15 - Granulometria das partículas de borracha de pneu	53
Tabela 16 – Classificação internacional do resíduo de borracha de pneus	53
Tabela 17 - Resultados de massas específicas borracha de pneu inservível definidos por autores em estudos de compósitos cimentícios.	54
Tabela 18 - Granulometria da areia natural Campo Grande.....	56
Tabela 19 – Dosagens estudadas	57
Tabela 20- Análise de variância no estudo de dosagem das argamassas cimentícias	59
Tabela 21 - Comparação entre as médias dos fatores envolvidos	60
Tabela 22 - Características físicas das argamassas 1:4 e 1:6 com partículas de borracha	61
Tabela 23 - Dosagem das argamassas adotadas para produção das placas cimentícias com partículas de borracha.....	61
Tabela 24 – Caracterização física das placas cimentícias com partículas de borracha	62
Tabela 25 - ANOVA dos resultados dos ensaios de compressão simples.....	63

Tabela 26 - ANOVA dos resultados dos ensaios de flexão.....	64
Tabela 27 - Caracterização físicas das placas cimentícias com partículas de borracha	65
Tabela 28 -Graus-hora de resfriamento Corumbá (composição semelhante Mazzaferro et al. (2014) em São Luiz).....	105
Tabela 29 - ANOVA dos graus-hora de resfriamento sala/cozinha na cidade de Corumbá ..	106
Tabela 30 - ANOVA dos graus-hora de resfriamento do quarto1 na cidade de Corumbá.....	106
Tabela 31 - ANOVA dos graus-hora de resfriamento do quarto2 na cidade de Corumbá.....	106
Tabela 32- ANOVA dos graus-hora de resfriamento da sala/cozinha na cidade de Campo Grande	107
Tabela 33 - ANOVA dos graus-hora de resfriamento do quarto1 na cidade de Campo Grande	107
Tabela 34 - ANOVA dos graus-hora de resfriamento do quarto2 na cidade de Campo Grande	107
Tabela 35 - Teste de Tukey para os resultados de GHR em relação a cor do telhamento para cidade de Corumbá	108
Tabela 36 - Teste de Tukey para os resultados de GHR em relação ao tipo de forro para cidade de Corumbá.....	109
Tabela 37 - Teste de Tukey para os resultados de GHR em relação a orientação solar para cidade de Corumbá.....	109
Tabela 38 - Teste de Tukey para os resultados de GHR em relação ao tipo de parede para cidade de Corumbá.....	109
Tabela 39 - Teste de Tukey para os resultados de GHR em relação a cor do telhamento para cidade de Campo Grande.....	110
Tabela 40 - Teste de Tukey para os resultados de GHR em relação ao tipo de forro para cidade de Campo Grande.....	111
Tabela 41 - Teste de Tukey para os resultados de GHR em relação a orientação solar para cidade de Campo Grande.....	111
Tabela 42 - Teste de Tukey para os resultados de GHR em relação ao tipo de parede para cidade de Campo Grande.....	111
Tabela 43 - Descrição dos cenários com a composição na cor do telhamento marfim acrílico fosco e orientação solar Oeste.	79
Tabela 44 - Descrição dos cenários com a composição na cor do telhamento telha acrílico fosco e orientação solar Noroeste.	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo de caracterização da placa cimentícia com borracha de pneu inservíveis ...
93

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
CPI	Cimento Portland Comum
CP V ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, classe V
CSV	Comma Separated Values
CTA	Capacidade Térmica (KJ/m ² .K)
DTG	Análise térmica Diferencial
FAENG	Faculdade de Engenharias Arquitetura e Urbanismo e Geografia
GHR	Graus-hora de resfriamento (°Ch)
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IC	Índice de Consistência
IEA	International Energy Agency
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IPT	Instituto de Pesquisa Tecnológica
ISO	International Organization for Standardization
LC	Laje de Concreto
LMPT	Laboratórios de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas
Max.	Máximo
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Min.	Mínimo
Min.	Minutos
MS	Mato Grosso do Sul
NBR	Norma Brasileira
Nº	Número
PCB15	Placa Cimentícia com 15% de Borracha de Pneus Inservíveis
PMCMV	Programa Minha Casa Minha Vida
PVC	Policloreto de Vinila

RTQ-R Regulamento Técnico da Qualidade para Avaliação da Eficiência Energética de Edificações Residenciais

SINDIPNEUS Sindicato das Empresas de Revenda e Prestação de Serviços de Reforma de Pneus e Similares do Estado de Minas Gerais

TGA Análise Termogravimétrica

T_{int} Temperatura Interna do Ar no Ambiente

TO Temperatura Operativa (°C)

UFMS Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

UNESP Universidade Estadual Paulista

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
m ²	Unidade de medida de área em metro quadrado
cm	Unidade de medida de comprimento em centímetro
°C	Unidade de medida de temperatura em graus Celsius
mm	Unidade de medida de comprimento em milímetros
ρ	Densidade (kg/m ³)
λ	Condutividade (W/m.K)
c	Calor específico (KJ/kg.K)
m ² K/W por watt	Unidade de resistência térmica de componentes em metros quadrados Kelvin
W/m.K	Unidade de condutividade térmica de componentes watt por metro Kelvin
Kg/m ³	Unidade de densidade aparente em quilograma por metro cúbico
W/m ² K Kelvin	Unidade de transmitância térmica de componentes em watt por metro quadrado
U	Transmitância térmica (W/m ² .K)
R	Resistência térmica (m ² .K/W)
h	Unidade de medida de tempo em horas
α	Absortância a radiação solar
cm ² /g	Unidade de medida da superfície especificada do cimento Portland em centímetro quadrado por gramas
MPa	Unidade de medida de Resistência em MegaPascal
MgO	Óxido de magnésio
SO ₃	Trióxido de enxofre
ml/min	Unidade de vazão em mililitro por minuto
±	Sinal mais e menos
g	Unidade de massa em gramas
a/c	Relação água e cimento
KN	Quilograma Newton
q	Densidade de fluxo de calor (W/m ²)
T	Temperaturas (°C)
L	Espessura da amostra
<	Sinal de comparação, menor que

\leq	Sinal de comparação, menor ou igual que
Kg/s.m	Coefficiente do fluxo do ar em quilograma por segundos metros
W	Unidade de medida de potência em watt
W/m ²	Unidade de medida de energia em watt por metro quadrado
Wh/m ²	Unidade de medida da radiação solar média em watt hora por metro quadrado
m/s	Unidade de medida de velocidade em metros por segundos
°Ch	Unidade de medida de graus-hora de resfriamento em graus Celsius hora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.2 Objetivos.....	21
1.2.1 Objetivo geral	21
1.2.2 Objetivos específicos.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Borracha de pneu inservíveis e sua aplicação na matriz cimentícia.....	21
2.2 Propriedades termofísicas do compósito cimentício com borracha de pneu inservível	24
2.3 Forros e seu papel termoenergético na cobertura	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Materiais	32
3.2 Estudo de dosagem dos compósitos cimentícios com borracha	34
3.3 Processo de fabricação das placas cimentícias com borracha	37
3.4 Comportamento térmico das placas cimentícias com borracha de pneu inservíveis.....	38
3.4.1 Propriedades Termofísicas	38
3.4.2 Simulações termoenergéticas	40
3.4.2.1 Modelo base da geometria e sistemas construtivos	40
3.4.2.2 Configurações para a simulação termoenergética	46
3.4.2.3 Parâmetros analisados da simulação termoenergética.....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 Caracterização dos materiais	52
4.2 Estudo de dosagem	56
4.3 Processo de moldagem das placas cimentícias com partículas de borracha.....	64
4.4 Comportamento térmico das placas.....	66
4.4.1 Condutividade Térmica	66
4.4.2 Avaliação do indicador de graus-hora de resfriamento	68
4.4.3 Avaliação do atraso térmico	79
4.4.4 Avaliação dos fluxos de calor na cobertura.....	84
4.5 Contribuições finais.....	91

5 CONCLUSÃO.....	94
5.1 Limitações do trabalho	95
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	95
6 REFERÊNCIAS	97
APÊNDICE A - Resultados dos graus-hora de resfriamento.....	105
APÊNDICE B - Análise de variância (ANOVA) do parâmetro GHR por ambiente.	107
APÊNDICE C - Resultados das análise estatísticas por meio do teste de Tukey da diferença totalmente significativa	108

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o governo federal lançou em 2009 o programa para construção de habitações de interesse social, denominado “Minha casa, minha vida” (PMCMV) com o intuito de reduzir o déficit habitacional no país (MINISTÉRIOS DAS CIDADES, 2011). Desde 2009, já foram contratadas mais de 5 milhões de unidades habitacionais, beneficiando mais de 20 milhões de pessoas (MINISTÉRIOS DAS CIDADES, 2018). Porém, com a diminuição do crédito para financiamento de imóveis e a alta taxa de desemprego devido aos anos de crise, fez com que aumentasse em 7% o déficit habitacional no Brasil de 2007 a 2017, atingido 7,78 milhões de unidades habitacionais (GAVRAS, 2019).

Além de ser uma tentativa de reduzir o déficit habitacional no Brasil, as habitações de interesse social vêm como garantia de suprir o direito à moradia que é um direito fundamental, civil, político, econômico e social, que excede os direitos individuais e atinge direitos coletivos, como direito à água (BRASIL, 1988). Portanto, os programas governamentais se preocupam mais com a quantidade do que a qualidade, e nesse contexto, construtores procuram intensificar cada vez mais o lucro e diminuir o tempo de execução, o que acarreta uma série de problemas na construção civil que estão vinculados com a desatualização do construtor ou falta de rigor no cumprimento das normas de desempenho e técnicas construtivas (BARBOSA, 2017).

As tipologias construtivas para as habitações de interesse social no Brasil são geralmente projetadas com as mesmas características, desconsiderando o clima e as peculiaridade do local, o que resulta em um nível de eficiência energética insatisfatória e o desconforto térmico dos moradores (INVIDIATA, 2016). Isto faz com que o uso de energia para climatização dessas moradias por meio de ventiladores e condicionamento do ar contribua cada vez mais com o aumento da demanda global de energia (IEA, 2018). O Brasil, em 2017 no setor de edificações (residências, comércio e edifícios públicos), apresentou cerca de 51% do consumo total de energia elétrica, sendo que o consumo residencial é responsável por aproximadamente a metade do consumo do setor da edificação, ou seja, 26% do consumo total de eletricidade no país.

Para tanto, encontrar soluções para melhorias nos projetos de moradias de interesse social, pois é essencial para obtenção da eficiência energética no ambiente que se realize projetos focados na redução de consumo de recursos naturais, materiais e energia na construção e operação (VIERA et al. 2012; LIMA et al. 2012; TRIANA et al. 2015;

MAZZAFERRO et al. 2014; INVIDIATA, et al. 2015; DIDONÉ et al. 2016; TRIANA et al. 2018). A escolha correta na aplicação de materiais e componentes construtivos no sistema de vedações é estratégia que se aproxima de edificações mais eficientes e sustentáveis. Um projeto sustentável, segundo Goulart (2009) deve ser socialmente justo e economicamente viável, deve ser ecologicamente correta, além de outras variáveis, na qual destaca-se o uso racional de energia.

Algumas estratégias adotadas em estudos e pesquisas na tentativa de redução de consumo de recursos naturais e materiais no setor da construção são a utilização de materiais alternativos oriundos do reuso ou reciclagem de refugos domésticos, resíduos de construção e demolição, processos industriais e outros tipos de resíduos. Estas medidas precisam estar comprometidas em manter as propriedades físicas, mecânicas e durabilidade exigidas em normas. Assim, os projetos de moradias sociais devem considerar materiais e componentes construtivos que se adequem ao clima e as peculiaridades do local da implantação destas residências, e atendam o padrão mínimo de desempenho de edifícios residenciais, como apresentado na NBR 15575 (2013), a qual exige que a habitação social seja construída para uma vida útil de pelo menos 50 anos.

Os projetos habitacionais representativos utilizados no PMCMV, cuja a renda é até três salários mínimos, são servidos de dois quartos, banheiro, sala de estar, cozinha, corredor de circulação e área de serviço externa; no entanto, as características predominantes quanto construção são habitações com 39,75 m² de área útil em paredes internas e externas de blocos cerâmicos ou blocos de concreto ou paredes monolíticas de concreto com 10 cm de espessura, e cobertura com ático e telhamento cerâmico com forro de PVC (TRIANA et al., 2015). Segundo Triana et al. (2018), estes projetos destacam-se pelo mau desempenho no clima atual e que, no futuro, serão ainda mais desconfortáveis. Tradicionalmente, os projetos são avaliados a partir de dados meteorológicos de anos anteriores que não levam em consideração a vida útil da edificação. As projeções do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC apontam que nos próximos 100 anos poderá haver um aumento da temperatura média global entre 1,8°C e 4,0°C, o que poderá acarretar em projetos habitacionais com a necessidade ainda maior de concepções e detalhes construtivos onerosos voltados para o atendimento do desempenho térmico das edificações (INPE, 2017).

Analisando o cenário no Brasil, um dos responsáveis pela elevação da temperatura interna em edificações térreas é a cobertura, principalmente devido a exposição da superfície a radiação solar. Estas residências quando são providas de telhas aparentes (ou seja, quando a

mesma não possui forro ou laje para separar o ático do restante da casa) fica mais perceptível o desconforto térmico. Entretanto, a busca por materiais que amenizam a transferência de calor do meio externo (cobertura) ao meio interno se faz necessária para proporcionar o conforto térmico e reduzir o consumo de energia para resfriamento da edificação (MICHELS et al., 2007).

Pellegrino et al. (2016) após analisarem edificações habitacionais tradicionais na cidade de Kolkato, na Índia, indicam que simples intervenções nas edificações, como revestimento reflexivos, uso de películas seletivas em vidros, isolamento térmico do telhado, e adoção de ventilação natural conciliada a rotina de seus moradores podem contribuir na redução no desconforto térmico e apelo ao ar-condicionado.

No Estado de Mato Grosso do Sul, Didoné et al. (2016) realizaram medições *in loco* em edificações habitacionais de interesse social nas cidades de Campo Grande, Sidrolândia e Corumbá. Estas residências foram construídas no sistema construtivo de paredes monolíticas de concreto com distinção nos materiais utilizados na cobertura, forro e as janelas dos dormitórios. As autoras concluíram que é necessária a atenção à adoção em soluções compatíveis com o sistema construtivo como janelas compostas de materiais translúcidos e à aplicação de forro na cobertura com boas características de transmitância e de capacidade térmica.

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT (2018), os isolantes térmicos podem ser resistivos quando o material ou produto possui a característica de dificultar a transferência do calor por condução e reflexivos quando minimizam a passagem por radiação. Sendo assim, aliando a sustentabilidade com a eficiência energética no ambiente construído, tem-se a procura por materiais alternativos, como a borracha de pneus inservíveis, que possuem características de baixa condutividade e viabilidade físico-mecânica no uso em compósitos cimentícios (MEDINA, 2017).

O emprego de um material mais resistente, mais durável e que emprega menos matéria-prima de alto consumo energético é sem dúvida, um material mais sustentável. Por isso, os compósitos cimentícios com incorporação de resíduos conseguiram se tornar um material ambientalmente mais aceitável. O desempenho desses materiais e elementos construtivos são aspectos importantes para a formulação de estratégias na concepção da edificação com eficiência energética. Desta forma, alternativas inovadoras na construção civil devem atender os requisitos mínimos de durabilidade, desempenho térmico e físico-mecânico e garantir sua funcionalidade nas edificações.

Entretanto, as propriedades mecânicas apontadas por diversos pesquisadores após a análise de compósitos cimentícios com borracha de pneus inservíveis constataram a diminuição da resistência à compressão axial, assim como a resistência a tração por compressão diametral e de flexão quando comparado aos compósitos sem borracha de pneu. Segundo Albuquerque (2009) e Marques e Akasaki (2012) esta diminuição aumenta na proporção que cresce o tamanho e o teor das partículas devido a borracha ser um material que apresenta deficiência em aderir a pasta cimentícia, resultando em vazios no compósito e menores densidade e resistência mecânica. Já para Rodrigues e Ferreira (2009), a incorporação da borracha em placas de argamassa proporciona melhora no comportamento pós ruptura da matriz cimentícia, sendo observado incremento no valor na carga de ruptura da placa e significativas deformações, o que denota grande ductilidade desse material.

Lima et al. (2000) afirmam que apesar das consideráveis perdas de resistência mecânica com a incorporação de partículas de borracha de pneus inservíveis, o uso do compósito cimentício com borracha pode ser viável tecnicamente no uso em paredes e isolamento térmico para fins de cobertura. Macedo et al. (2005) têm observado em suas pesquisas sobre desempenho térmico que os materiais cimentícios com borracha de pneus apresentam menores valores nas propriedades termofísicas de condutividade, difusividade, calor específico e coeficiente de dilatação quando comparados a composições cimentícias semelhantes sem as partículas de pneus.

Após realizar o levantamento bibliométrico no contexto do uso de borracha de pneus inservíveis em compósito cimentícios, Alcazas et al. (2018), a fim de verificar as tendências dos estudos em compósitos cimentícios com borracha de pneus, observaram que as pesquisas em sua maioria verificam as propriedades mecânicas, substituindo os agregados miúdos pela borracha de pneu. As autoras ainda complementam que há carência em pesquisas que avaliam os desempenhos estrutural, térmico e acústico direcionadas a produtos e componentes específico da construção civil.

Diante disso, esta pesquisa se propõe a explorar tecnologias construtivas a partir da potencialidade que a borracha de pneu inservível possui quanto suas características termofísicas de baixa densidade e condutividade térmica, focando na aplicação em moradias sociais que possuem limites restritos de conforto térmico, já que os projetos desconsideram o clima local e aplicação de materiais e/ou componentes construtivos que possam amenizar a elevação da temperatura interna nos ambientes.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Verificar o desempenho termoenergético de placas cimentícias com borracha de pneus inservíveis no sistema de cobertura de tipologias de habitações de interesse social.

1.2.2 Objetivos específicos

- contribuir com estudos para fabricação de produtos alternativos na construção civil, a partir de placas de compósitos cimentícios com borracha de pneu;
- colaborar com estudos e melhorias da eficiência energética de edificações já existentes ou em fases de projetos;
- analisar a significância das placas cimentícias com borracha de pneus no desempenho termoenergético das edificações residenciais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Borracha de pneu inservíveis e sua aplicação na matriz cimentícia

De uma forma sucinta, as matérias-primas do pneu constituem de elastômero, produtos têxteis, aço e outros materiais (IBAMA, 2017). E de uma forma mais ampla, o pneu é composto por: borracha natural – derivado do látex extraído de algumas espécies vegetais, dentre elas a seringueira, borracha sintética – elastômero derivado do petróleo, aço, negro fumo, óxidos de zinco e ácido esteárico, enxofre (agente vulcanizador), antidegradantes, aceleradores e retardadores de processo (SINDIPNEUS, 2013).

Quanto à classificação dos resíduos com relação à exposição aos riscos potenciais ao meio ambiente, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) classifica na NBR 10.004:2004 os pneus inservíveis como Classe IIA – não inerte, por terem teores de zinco e manganês no extrato solubilizado superiores aos limites estabelecidos pela norma (BERTOLLO et al., 2000 apud LAGARINHOS, 2011, p. 109).

Para melhor ajuste quanto ao conceito de aproveitamento de resíduos como matérias de construção, Rocha et al. (2003) afirmam que:

- a) a valorização energética é quando o resíduo é utilizado para geração de energia calorífica;
- b) a reciclagem trata da introdução do resíduo no seu ciclo de produção em substituição total ou parcial de uma matéria – prima;
- c) a reutilização é quando o aproveitamento de um resíduo, uma ou mais vezes, na sua forma original, sem beneficiamento.

A borracha de pneus forma partículas que podem ser enquadradas em dois tipos básicos: raspas (fibras) procedentes da raspagem das bandas de rodagem durante o processo de recauchutagem ou partículas granulares, semelhantes a areia ou a brita, procedentes da trituração mecânica com segregação das partes metálicas (ALBUQUERQUE, 2009).

Em relação as características físicas e mecânicas, quando usadas partículas granulares de resíduo de borracha de pneu como agregado em matriz cimentícia é reduzida a trabalhabilidade e a resistência à compressão, e causa segregação principalmente em concretos com quantidades entre 80% a 100% de substituição de agregado natural por agregados de resíduo de borracha de pneu. Também há uma diminuição na densidade quando comparado aos concretos com agregados naturais devido às partículas de borracha possuírem massa específica menor do que a brita e a areia natural, e conseqüentemente, aumento da porosidade do produto final (FLORES - MEDINA et al., 2013).

Gupta et al. (2014), após a análise em concretos com cinza e fibra de borracha de pneu, verificaram uma redução no módulo de elasticidade quando comparado com a amostra de referência, demonstrando que este comportamento está relacionado a ductilidade destes compósitos, a qual é proporcionada pela a incorporação de partículas de borracha. Do ponto de vista ambiental, o referido autor complementa que o uso de resíduo de borracha de pneus inservíveis como agregados em concretos viabiliza a redução no consumo de recursos naturais, reduz o acúmulo de pneus e produz um cenário mais sustentável na produção de materiais da construção civil.

No desempenho ao impacto de corpos duros em argamassas contendo borracha de pneus, Pinto et al. (2016) observaram que as argamassas de revestimentos com partículas de borracha são mais tenazes que as argamassas convencionais, embora haja uma redução do módulo de elasticidade.

Já a análise microestrutural de Gupta et al. (2014) em compósitos cimentícios com resíduos de borracha de pneus inservíveis com relação a interface entre cinza/fibra de borracha e a pasta de cimento mostraram que as fissuras iniciadas na interface e ao redor das

partículas de borracha de pneu ocasionam à redução na resistência dos concretos com borracha, comportamento este corroborado por Güneyisi et al. (2004) pela falta de aderência entre as partículas de borracha e a pasta de cimento.

Angelin et al. (2017) estudaram a substituição em massa de 30% de agregado natural por agregado de borracha de pneu em argamassas e encontraram para as argamassas com borracha a capacidade de absorção de água cerca de 4 vezes maior que a argamassa de controle, como também uma redução dos resultados de resistências a compressão e a flexão, e 27% de diminuição da massa específica frente a argamassa com agregados convencionais. No entanto, para os autores, estas características físico-mecânicas permitem o uso de argamassas com borracha em elementos não estruturais.

Assim, como Flores - Medina et al. (2013) encontraram em seu estudo uma diminuição na resistência a compressão, os autores Thomas e Gupta (2016) também obtiveram uma redução nas resistências a compressão e na resistência a flexão em concretos de alta resistência contendo borracha de pneu em substituição parcial de 0% a 20% de areia. Contudo, foi percebido que houve uma diminuição nas resistências acondicionada com o aumento gradativo de quantidade de borracha, ou seja, conforme houve o aumento do teor de borracha menor foi a resistência à compressão quanto à flexão.

Porém, resultados apontaram a obtenção de melhores resistências à abrasão em concreto com borracha de pneu do que em concreto com agregados natural, apontando que podem ser aplicados estes resíduos em concretos de alta resistência desde que a incorporação de borracha de pneu não ultrapasse a 12,5% (massa) na substituição parcial do agregado miúdo. Os autores indicaram a potencialidade do uso do resíduo de borracha em pavimentos, pisos e estradas de concreto ou ainda para outras superfícies sobre as quais as forças abrasivas são solicitadas por objetos móveis durante o uso (THOMAS et al., 2016).

Em referência a tenacidade em compósito cimentícios, pode-se notar que a inclusão de fragmentos de borracha na mistura de concreto aumenta a tenacidade, fato este explicado pela a propriedade que a borracha de pneu inservível possui em absorver parte da energia na qual a matriz é submetida; assim, ganha-se um incremento no valor na carga de ruptura (RASHAD, 2016).

Holmes et al. (2014) e Mohammed et al. (2012) verificaram que o concreto com borracha é mais eficaz que o concreto convencional na análise das propriedades da absorção sonora em concretos. Os resultados apontaram melhores coeficientes de absorção para níveis mais elevados de substituição dos agregados por partículas de borracha no teor de 15% e nas

dimensões de 2-6 mm e 10-19 mm. Entretanto, os autores perceberam que não houve diferença perceptível no concreto com borracha de pneu no comportamento de isolamento acústico dos ambientes quando comparado ao concreto referência, mas pode ser eficaz na redução de ruído urbanos desde que o ambiente esteja em condições apropriadas de absorção sonora.

Outra característica encontrada em compósitos cimentícios com borracha de pneu segundo Benazzouk et al. (2016), quando adicionado resíduo de borracha em até 9% do volume total do concreto não gera risco na estrutura do produto final caso seja submetido à elevadas temperaturas, tornando-se um material capaz de ser utilizado em construções de habitações sem maiores riscos em caso de incêndios, por exemplo.

Os estudos mostram que materiais cimentícios adicionados de borracha de pneu podem atender a resistência mecânica mínima quando aplicados como elementos construtivos, como também apresentam bom desempenho em relação a impacto de corpo duro, a absorção sonora e a tenacidade, deixando aberto o viés para o avanço nos estudos em argamassas cimentícias como componentes de vedação de edificações.

2.2 Propriedades termofísicas do compósito cimentício com borracha de pneu inservível

Diante dos conceitos de comportamento e desempenho térmico, os materiais e componentes dos sistemas de vedações de edifícios reagem termicamente em função das propriedades termofísicas que possuem, sendo as mais relevantes a densidade (ρ), a condutividade térmica (λ) e o calor específico (c).

A busca por materiais alternativos na comunidade da construção civil vem sendo feita através de estudos em concretos e argamassas, objetivando as possíveis vantagens no uso de resíduos na inserção de compósitos cimentícios, vantagens estas investigadas por Sukontasukkul (2009) em concretos com fragmentos de borracha de pneu para uso em painéis. Os resultados encontrados pelo autor mostraram uma redução aproximadamente de 20% a 50% na condutividade térmica quando comparados com concretos comuns, e complementa que a condutividade térmica é inversamente proporcional à densidade do material, e portanto, o concreto com borracha de pneu por possuir menor densidade expõe um valor menor de condutividade térmica.

Os autores Shah et al. (2014), quando investigaram concreto com borracha de pneu em substituição de 15% no volume de agregados naturais, encontraram um aumento da resistência térmica com o aumento do teor de borracha. Turgut et al. (2008) confirmaram tal

comportamento em seus estudos em compósitos cimentícios com borracha de pneu para uso em blocos, sendo observada uma diminuição significativa da transmitância térmica.

Shah et al. (2014), Turgut et al. (2008) e Benazzouk et al.(2008) conferiram a melhora na resistência térmica e a baixa condutividade térmica aos materiais cimentícios com partículas de borracha de pneu pelo fato do aumento de retenção de ar nas misturas, causado pelo processo de não molhamento das partículas durante o preparo da mistura fresca, e conseqüentemente, este aumento de incorporação de ar nas misturas contribuiu na redução das pontes térmicas existentes na matriz.

Turgut et al. (2008) destacaram a baixa massa específica com o bom desempenho térmico dos compósitos cimentícios com borracha de pneu quando comparados a compósitos cimentícios convencionais, indicando que este material de construção apresenta grande potencial na produção de fechamentos (sem função estrutural) em moradias sociais. Outra sugestão apontada por Shah et al. (2014) é o uso de concreto com borracha de pneu em lajes (cobertura) de telhado como alternativa para melhorar o desempenho térmico em edificações.

Pelisser et al. (2012) analisaram o efeito dos teores de 20%, 40% e 60% de borracha de pneus inservíveis em substituição de areia em compósito cimentícios e constataram que a característica de maior resistividade térmica são em argamassas com a maior adição de borracha, ou seja, argamassas leves, o que conferiu o potencial uso em fachadas, pois mostrou-se 15% mais eficiente termicamente. Os autores consideraram que um painel de argamassa com partículas de borracha com cerca de 10 cm de espessura pode alcançar um índice de resistência térmica de $0,306 \text{ m}^2\text{K/W}$ e uma transmitância térmica limite de $3,27 \text{ W/m}^2\text{K}$ para a fachada de edifícios localizados na zona bioclimática brasileira 3.

Mohammed et al. (2012) em estudos de blocos de concreto com 50% de borracha de pneu obtiveram redução na condutividade térmica de $1,13 \text{ W/mK}$ para $0,67 \text{ W/mK}$, e as densidades que eram aproximadamente 1980 kg/m^3 passou a ser cerca de 1500 kg/m^3 , quando comparado aos blocos tradicionais.

Portanto, os elementos construtivos de compósitos cimentícios com borracha tendência apresentar melhores propriedades termofísicas que os materiais convencionais de concreto e argamassa quando submetidos ao processo de transferência de calor. Logo, a apresentação de resultados sobre o comportamento térmico do sistema construtivo com componentes cimentícios adicionados de borracha de pneu se faz necessário para verificar a contribuição no desempenho térmico do ambiente construído.

2.3 Forros e seu papel termoenergético na cobertura

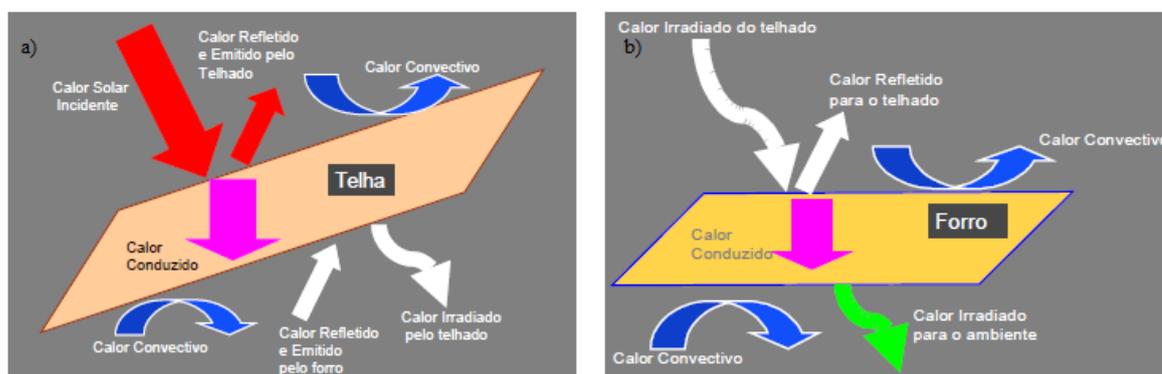
Segundo a NBR 15575-5 (ABNT, 2013) a cobertura de uma edificação tem a função de “assegurar estanqueidade às águas pluviais e salubridade, proteger demais sistemas da edificação habitacional ou elementos e componentes da deterioração por agentes naturais, e contribuir positivamente para o conforto termoacústico da edificação habitacional”.

As diretrizes no âmbito do Programa Minha Casa, Minha Vida (PMCMV) para o sistema de cobertura de casas térreas, segundo o Ministério de Estado das Cidades (BRASIL, 2017), sendo ideal a composição laje-forro e ático com telhado em estrutura de madeira ou metálica; e em caso de uso de telhas cerâmicas esmaltadas, de concreto ou de fibrocimento, utilizar telhas de cor clara, cujas diretrizes são oriundas da NBR 15575 (ABNT, 2013)

O sistema de cobertura é a principal fonte de acumulação de calor em uma edificação horizontal, contribuindo com aproximadamente 70% com ganho total de calor dentro de um edifício (VIJAYKUMAR et al., 2007). Dado que o telhado absorve a maior parte da radiação solar durante os dias quentes, a quantidade de calor que se irradia das superfícies quentes no verão pode chegar a 750 W/m^2 quando a temperatura da superfície do telhado é de aproximadamente 65°C (BOWMAN et al., 1997). E segundo Urban e Roth (2010), a temperatura de telhados escuros normais atinge 66°C ou mais durante os dias quentes. Por outro lado, um telhado refletivo em condições ambientais semelhantes fica aproximadamente 28°C mais frio.

Deste modo, o ganho de energia térmica interna em moradias horizontais, por meio de transferência de calor em coberturas, inicia-se com a incidência da radiação solar sobre a superfície das telhas e as aquece. Uma parte deste calor é perdida por convecção e radiação e a outra parte absorvida pelas telhas, que por sua vez é transmitida ao ático. E no interior do ático, o calor das telhas é transferido até a superfície do forro por convecção e radiação (MICHELS, 2007). Logo, o calor do conjunto cobertura (telhado e ático) é parte absorvido pelo forro e irradiado para o ambiente interno, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Representação da troca de calor em uma cobertura



a) Representação das trocas de calor em um telhado e b) Representação das trocas de calor em um forro

Fonte: Vitorino et al. (2003)

Portanto, numa cobertura constituída de telhado e forro, o forro possui um papel importante no aquecimento interno do ambiente, pois é o componente que está localizado entre o telhado e espaço interno. Logo, o material constituinte do forro influencia nas cargas térmicas transmitidas aos ambientes internos por meio da cobertura e a adoção de materiais que colaborem com o desempenho térmico se faz necessária.

Algumas sugestões são trazidas pelos os autores Shah et al. (2014) como uso de lajes de concreto com borracha de pneu e por Pelisser et al. (2012) no uso e aplicação em painéis cimentícios com borracha. Ambos sistemas de construção conferiram melhores resultados de condutividade térmica em relação aos concretos e argamassas convencionais, porém sem detalhamento do desempenho térmico da edificação provida destas soluções construtivas.

A fim de diminuir o ganho térmico nas edificações por meio das coberturas tem-se realizado estudos em materiais e/ou componentes com características de isolamento térmico em construções residenciais e comerciais na tentativa de reduzir o custo de operação com consumo de eletricidade em projetos de resfriamento e aquecimento. As normas internacionais classificam os materiais isolantes térmicos e resistivos como aqueles que reduzem a transferência de calor por condução; e os isolantes refletivos e as barreiras radiantes são os que reduzem a troca de calor por radiação (VITTORINO et al., 2003).

Michels (2007), após fazer estudo na reprodução compacta da cobertura de uma edificação submetida à radiação solar e às trocas de calor por convecção, verificou que as telhas cerâmicas porosas e as telhas de fibrocimento brancas reduziram representativamente as temperaturas superficiais das telhas e o uso de isolamento térmico reflexivo contribuiu na diminuição da transferência de calor em todas as seções no ganho de energia através da cobertura.

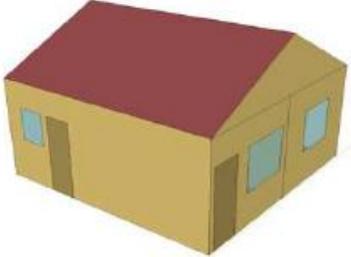
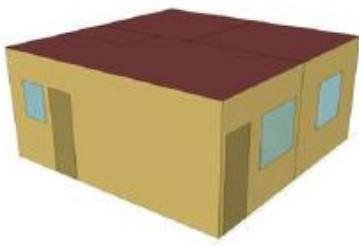
Pires et al. (2004) verificaram o efeito da barreira radiante em um sistema de cobertura e apontou que a eficiência de uma subcobertura composta por feltro de lã de vidro revestida com película de alumínio na face superior e na face inferior revestida com laminado branco é quase 5 vezes maior que a cobertura de fibrocimento sem a aplicação de uma subcobertura.

Dias (2016) avaliou o desempenho térmico do protótipo reduzido de uma cobertura através de simulações com o programa *EnergyPlus*, buscando resultados comparativos de desempenho térmico com cobertura de laje, telhas de fibrocimento e vegetal. A pesquisa apontou que o telhamento de fibrocimento utilizado como referência pelo o pesquisador apresentou condições desfavoráveis para um bom desempenho térmico e uma simples aplicação de uma cor branca externa mostrou-se uma técnica econômica e prática no aperfeiçoamento significativo na redução de ganhos de calor pela cobertura.

Barbosa (2017) ao estudar a influência da orientação solar considerando diferentes padrões de uso no desempenho térmico em moradias na cidade de Goiânia (zona bioclimática 6), constatou que a orientação da fachada solar ao norte e ao sul foram que obtiveram o melhor desempenho e que a orientação solar por si só não define o desempenho, uma vez que a edificação com baixa carga térmica interna orientada a leste ou oeste é capaz de obter melhor desempenho quando comparada a uma edificação orientada a norte ou sul com alta carga térmica interna.

Mazzaferro et al. (2014) estudaram o desempenho térmico em diferentes tipos de modelagens de ático em uma edificação residencial unifamiliar de 36 m² (Tabela 1) nas cidades de Florianópolis (zona bioclimática 3), Curitiba (zona bioclimática 1) e São Luiz (zona bioclimática 8) através de simulação computacional com o programa *EnergyPlus*. A partir dos resultados encontrados pelos os autores para os graus-hora para resfriamento e aquecimento entre a modelagens de áticos, concluíram que a maneira como modelar a cobertura influência sobre a somatória do graus-hora, e por isto, erros na modelagem pode acarretar em falta de precisão dos resultados de desempenho térmico da edificação. Também, por ter sido simulado para três climas diferentes, os autores concluíram que a modelagem do ático teve influência climática significativa, sendo que o clima mais frio (Curitiba) apresentou as maiores diferenças percentuais de graus-hora entre as modelagens.

Tabela 1 - Propriedades consideradas para simulação nos estudos realizados por Mazzaferro et al. (2014).

Modelo	Envoltória	Cobertura
<p>Geométrico</p> 	<p>Piso com transmitância térmica (U) de 3,18 W/m²K, composta de laje maciça 100 mm e piso cerâmico de 10 mm e</p> <p>Paredes com U = 2,34 W/m²K e espessura 150 mm, composta por blocos cerâmicos de 8 furos com e argamassa externa e interna de 25 mm de espessura.</p>	<p>Telha cerâmica de 10 mm e laje maciça de concreto de 100 mm com transmitância térmica (U) da cobertura de 5,05 W/m².K e U = 3,18 W/m².K para laje de concreto.</p>
<p>Equivalente</p> 	<p>Paredes com U = 2,34 W/m²K e espessura 150 mm, composta por blocos cerâmicos de 8 furos com e argamassa externa e interna de 25 mm de espessura.</p>	<p>Telha cerâmica de 10 mm, câmara de ar superior a 50 mm, laje maciça de concreto com 100 mm e forro de gesso de 30 mm e camada equivalente com U = 1,91 W/m².K</p>

Fonte: Mazzaferro et al. (2014) adaptada pela autora (2019)

Michels et al. (2018), ao monitorarem a transferência de calor em áticos através de uma bancada experimental em escala reduzida em quatro configurações de coberturas (Figura 2), verificaram para o período mais quente em Florianópolis que todas as coberturas apresentaram redução do fluxo de calor na face superior da laje de concreto com relação a cobertura de referência. Em relação à resistência térmica, a presença de isolante reflexivo beneficiou o aumento desse valor e também há pouca influência exercida pelo lado em que a face aluminizada está voltada.

Figura 2 - Configuração das coberturas monitoradas por Michels et al. (2018)

Cobertura	Símbolo	Configuração do sistema de cobertura
REF		Laje de concreto + câmara de ar + telha de fibrocimento ($\alpha=0,5$). Cobertura de referência
BRC		Laje de concreto + câmara de ar + telha de fibrocimento pintada de branco ($\alpha=0,2$)
BR ↓		Laje de concreto + espaço do ático + barreira radiante (alumínio para baixo) + camada de ar (5 cm) + telha de fibrocimento convencional ($\alpha=0,5$)
BR ↑		Laje de concreto + espaço do ático + barreira radiante (alumínio para cima) + camada de ar (5 cm) + telha de fibrocimento convencional ($\alpha=0,5$)

Fonte: Michels et al. (2018)

A resistência térmica (R) mostra a eficácia do isolamento térmico nos sistemas de vedações. Nos Estados Unidos, para facilitar a escolha pelo consumidor, os produtos usados como isolantes por condução apresentam o valor de R escrito na embalagem (GHÜTS et al., 2018). Segundo Çengel et al. (2012), a geometria, a espessura, o tipo de material e a diferença de temperatura, o qual esteja incluído, são fatores que influenciam na taxa da condução de calor. No entanto, a resistência térmica superficial, segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005), pode variar de acordo com vários fatores, tais como: emissividade, velocidade do ar sobre a superfície e temperaturas das superfícies, do ar e das superfícies vizinhas.

Segundo Akutsu (2018), o bom desempenho térmico de uma edificação não está limitado somente em aplicação de isolamento térmico e/ou refletivo, o conceito é mais amplo e que pode ser alcançado com a atenuação das variações de temperatura através da inércia térmica. Enquanto a isolação térmica é simplesmente impedir a passagem de calor de um ambiente para outro, a quantidade de massa é que confere a uma edificação maior inércia térmica, e dependendo como o isolante térmico é utilizado, a inércia térmica pode aumentar ou diminuir.

Didoné et al. (2016) ao fazerem medições *in loco* em edificações horizontais de parede monolíticas de concreto nas cidade de Sidrolândia e Campo Grande, ambas pertencentes a zona bioclimática 6, verificaram o atraso térmico de 1h para a cidade de Sidrolândia com o sistema de cobertura composta de telhas cerâmicas e forro em policloreto de vinila (PVC) de 10 mm; e para a cidade de Campo Grande o valor encontrado foi de 3h de atraso térmico com a composição em telhas de fibrocimento com laje maciça de concreto de 10 cm. Segundo as autoras, acredita-se que o resultado do atraso térmico superior e da maior eficiência no desempenho térmico em Campo Grande foi obtido devido a preponderância da maior massa térmica do forro de laje de concreto como constituinte da cobertura.

Dentre as diretrizes construtivas abordadas na NBR 15220-3 (ABNT, 2005) estão as configurações das vedações externas, incluindo parede e coberturas recomendadas para cada uma das zonas bioclimáticas brasileiras, sendo possível verificar que em grande parte do país é recomendada a adoção de algum tipo de isolamento térmico junto a cobertura. Quanto os critérios de cobertura com relação a transmitância térmica, a NBR 15575-5 (ABNT, 2013) aponta que nas zonas bioclimáticas de 3 a 8 sempre que for considerada uma cor escura para telha, terá que ter o uso de isolantes térmicos, pois dificilmente são atingidos valores inferiores à $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ de transmitância sem o uso deste recurso.

Chvatal (2014), estudando a relação da influência da transmitância térmica e absorvância nos sistemas de vedações no nível desempenho de verão pelo método de simulação da NBR 15575:2013, nas cidades de Curitiba (zona bioclimática 1), São Paulo (zona bioclimática 3) e Manaus (zona bioclimática 8), observou que atribuição de diferentes valores de U e α no sistema de cobertura na temperatura máxima interior varia consideravelmente quando comparados a combinações de U e α para as paredes exteriores. O referido autor afirmou que os ganhos solares são maiores pela cobertura, e as variações nas propriedades termofísicas desse elemento construtivo implicam maiores variações na temperatura interior.

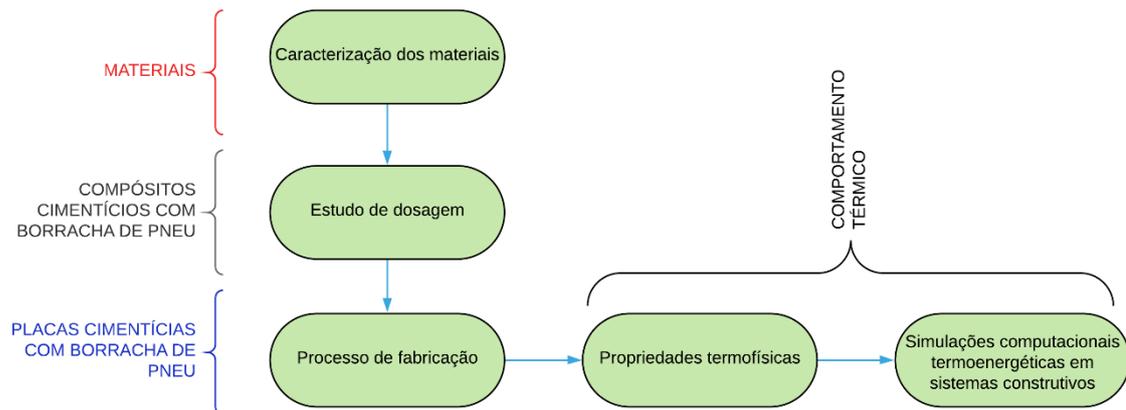
Arantes (2013), ao analisar uma edificação com forro e sem forro pertencente ao conjunto habitacional interesse social da cidade de Bauru por meio de simulação computacional, verificou para um dia de verão que a utilização de forro, seja ele de PVC ou de madeira ou de gesso implica em uma atenuação das temperaturas internas dos ambientes quando comparado a edificação sem o uso do forro; porém, não há uma significativa diferença entre a diminuição da temperatura interna a partir da utilização de um ou outro tipo de forro (PVC, gesso ou madeira).

Deste modo, quando usadas as partículas de borracha de pneus como agregado a matriz cimentícia é reduzida a trabalhabilidade, a resistência mecânica, módulo de tenacidade, a densidade quando comparados aos compósitos cimentícios convencionais. Entretanto, compósitos cimentícios com borracha possuem melhores desempenhos ao impacto de corpos duros, devido aos compósitos cimentícios com borracha serem mais tenazes que os compósitos tradicionais. E ainda, os compósitos cimentícios com borracha de pneus possuem melhores propriedades termofísicas que o concreto e argamassa quando submetidos ao processo de transferência de calor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo descreve o programa experimental das etapas de desenvolvimento da pesquisa, de modo que são expostos os materiais que serão utilizados, bem como a metodologia para atingir os objetivos propostos. Desta forma, foram elencados os ensaios estabelecidos para a caracterização dos materiais e das placas cimentícias convencionais e com borracha de pneu inservível, através do estudo de dosagem, processo de fabricação, propriedades termofísicas e simulações computacionais termoenergéticas em sistemas construtivos. Na Figura 3 é apresentado o fluxograma do processo.

Figura 3 – Fluxograma do programa experimental das etapas de desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Autora (2019)

3.1 Materiais

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural de cava, proveniente da região de Mato Grosso do Sul, Campo Grande. O cimento empregado foi do tipo CP V ARI, por ser um material com menos interferências de adições depois do CPI e por apresentar elevadas resistências nas primeiras idades.

A borracha de pneu inservível utilizada foi na forma de partícula, processada em uma empresa recicladora deste passivo ambiental de Campo Grande/MS por meio de trituração mecânica e sem nenhum procedimento de lavagem ou tratamento físico ou químico na superfície.

O processo da trituração mecânica, inicia-se primeiramente com a moagem dos pneus inservíveis provenientes de carros, motos e caminhões que passam por várias lâminas de disco de rotação que cortam e trituram os pneus (Figura 4 (a)), a borracha triturada é separada por peneiras giratórias (Figura 4 (b)) e, após este processo, as fibras metálicas que não estão presas a pedaços de borracha são coletadas através de um separador magnético (Figura 4 (c)).

Figura 4 - Etapas de trituração de pneus inservíveis



Fonte: Imagens pela empresa recicladora de pneu de Campo Grande/MS

As partículas de borracha utilizadas foram classificadas através de peneiramento manual, utilizando somente as partículas menores e iguais a 2,4 mm (Figura 5). Este processo foi utilizado para o atendimento posterior da fabricação de placas cimentícias, pois segundo a NBR 15498 (ABNT, 2016), as placas de fibrocimento sem amianto de espessuras superiores a 30 mm não são atendidas pela referida norma. Na Tabela 2 estão às características do cimento CP V – ARI.

Figura 5 - Imagem das partículas de borracha de pneu peneirada



Fonte: Autora (2019)

Tabela 2 - Características cimento Portland CP V – ARI

Ensaio Físicos	
Item de Controle	Média (30 dias)
Material Retido #200 (mesh) (%)	0,0
Blaine (cm ² /g)	5909,33
Ínicio de Pega (min)	171,67
Fim de Pega (min)	265,33
Resistência aos 7 dias (MPa)	40,17
Resistência aos 28 dias (MPa)	49,59
Ensaio Químicos	
Perda ao Fogo (%)	6,10
Resíduo Insolúvel (%)	2,38
MgO (%)	4,01
SO ₃ (%)	3,27

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante do cimento Portland.

Caracterização dos materiais

A caracterização dos materiais areia, partículas de borracha e cimento Portland foi realizada conforme as referências normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), listadas na Tabela 3, além da caracterização física correlacionada com a dimensão e distribuição de tamanho das partículas. Elenca - se também a análise termogravimétrica para verificação do perfil de degradação da borracha em função da variação controlada de temperatura, a qual foi realizada por meio de termogravimetria em equipamento TGA Q50 V20.13 Build 39, da TA, vazão de 60 ml/min com temperatura de até 900 °C e taxa de aquecimento de 10 °C por minuto.

Tabela 3 - Referências Normativas para Caracterização

Número de Referência	Título do Ensaio
NBR 52 (ABNT, 2009)	Agregado Miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente
NBR 45 (ABNT, 2006)	Agregados – Determinação da massa unitária e dos volumes de vazios
NBR 248 (ABNT, 2003)	Agregados – Determinação da composição granulométrica
NBR 16605 (ABNT, 2017)	Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica

Fonte: ABNT adaptada pela autora (2019)

3.2 Estudo de dosagem dos compósitos cimentícios com borracha

O estudo de dosagem das argamassas partiram das proporções 1:4 e 1:6 (cimento:areia), em massa, pois segundo Pinto et al. (2016) e Guelmine et al. (2016), com traços de referência nas proporções 1:3 e 1:5 (cimento: areia) para argamassas de

revestimento com adição de borracha obtiveram interação físico-mecânica adequada entre as partículas de borracha com a pasta cimentícia. Os teores de partículas de borracha adicionados no volume total dos componentes anidros foram de até 20% (Tabela 4) baseado nos resultados obtidos por Benazzouk et al. (2008), que puderam constatar perdas de resistência mecânica acentuadas em compósitos com adições de borracha acima de 20%. A relação água/cimento foi determinada visando a consistência ideal para posterior moldagem das placas cimentícias, como observado por Canova et al. (2007) em seus estudos com argamassa de borracha de pneu para revestimento com adequado índice de consistência entre 250 mm a 260 mm. Assim, para o estudo de dosagem adotou-se o índice de trabalhabilidade de 260 ± 5 mm.

Tabela 4 - Estudo de dosagem das argamassas cimentícias com borracha

Traço* identificação	Cimento (g)	Areia Natural (g)	Partícula de Borracha (g)	Traço Unitário (cimento:areia:borracha)
R_4-0	500,00	2000,00	-	1:4
R_4-5	500,00	2000,00	47,2	1:4:0,09
R_4-10	500,00	2000,00	94,4	1:4:0,19
R_4-15	500,00	2000,00	141,6	1:4:0,28
R_4-20	500,00	2000,00	188,9	1:4:0,38
R_6-0	357,14	2142,84	-	1:6
R_6-5	357,14	2142,84	46,4	1:6:0,13
R_6-10	357,14	2142,84	92,8	1:6:0,26
R_6-15	357,14	2142,84	139,2	1:6:0,39
R_6-20	357,14	2142,84	185,5	1:6:0,52
R_8-0	277,77	2221,16	-	1:8
R_8-5	277,77	2221,16	45,9	1:8:0,17
R_8-10	277,77	2221,16	91,9	1:8:0,33
R_8-15	277,77	2221,16	137,8	1:8:0,5
R_8-20	277,77	2221,16	183,7	1:8:0,66

*A nomenclatura das amostras foi dada da seguinte forma: R_(proporção de areia)-(teor de borracha).

Fonte: Autora (2019)

Foram moldados, para cada mistura, três prismas de 4 cm x 4 cm x 16 cm em conformidade com a NBR 13279 (ABNT, 2005), sendo avaliado, aos 7 dias de idade, as resistências à tração na flexão e à compressão NBR 13279 (ABNT, 2005). Também foram realizados os ensaios físicos de densidade de massa e o teor de ar incorporado conforme NBR 13278 (ABNT, 2005) e de capacidade de absorção de água, índice de vazios e massa específica das argamassas conforme descrições da NBR 9778 (ABNT, 2009).

Para a análise do comportamento físico-mecânico e verificação de viabilidade técnica da fabricação das placas cimentícias, foi realizada a avaliação da resistência à tração na flexão em placas de argamassas com borracha, aos 7 e 28 dias de idade, conforme NBR 13279 (ABNT, 2005) sendo o vão adotado entre os apoios inferiores (2 cutelos) da máquina de ensaio baseado na relação obtida entre o vão adotado pela norma citada e o comprimento do prisma, resultando em 20 cm de vão. As placas cimentícias com borracha foram produzidas nas dimensões de 30 cm × 10 cm × 3 cm e seguindo o método de distribuição da argamassa na forma, aplicação do adensamento mecânico através da mesa vibratória, e o tempo de vibração controlado através do surgimento de bolhas de ar na superfície da argamassa (Figura 6).

Figura 6 - Processo de fabricação da placa por vibração e ensaio mecânico



Fonte: Autora (2019)

Contudo, para atender o menor consumo de cimento aliado a maior adição de borracha e a resistência de tração na flexão mínima de 4 MPa para forros cimentícios apontada pela NBR 15498 (ABNT, 2016) e, conseqüentemente, na adoção da dosagem para a produção das placas cimentícias com borracha, foi executado um estudo estatístico por meio de análise de variância (ANOVA) e delineamento experimental em esquema fatorial por meio do teste de Tukey. Após análise estatística conciliada com a consistência ideal para a produção das placas por vibração, o consumo de cimento mínimo obtido foi de 396,89 kg/m³ e a relação água/cimento de 0,70. Desta forma, o ajuste da dosagem foi apresentado na Tabela 5, sendo os teores de borracha incorporados em substituição ao volume da areia, correspondendo aos teores de 0%,10% e 15%. Os ensaios físicos e mecânicos nas placas cimentícias com borracha foram realizados de forma análoga ao estudo de dosagem inicial e acrescido do ensaio de absorção de água por capilaridade NBR 9779 (ABNT, 2013).

Tabela 5 - Dosagem adotadas para placas cimentícias com borracha

Traço unitário (em massa) (cimento: areia: borracha:água)	Teor de borracha	Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Borracha (kg/m ³)	Água (kg/m ³)
1: 3,94:0:0,70	0%	396,39	1561,78	-	277,47
1:3,56:0,19:0,70	10%	396,89	1412,93	75,41	277,82
1:3,38:0,28:0,70	15%	396,85	1341,35	111,12	277,80

Fonte: Autora (2019)

3.3 Processo de fabricação das placas cimentícias com borracha

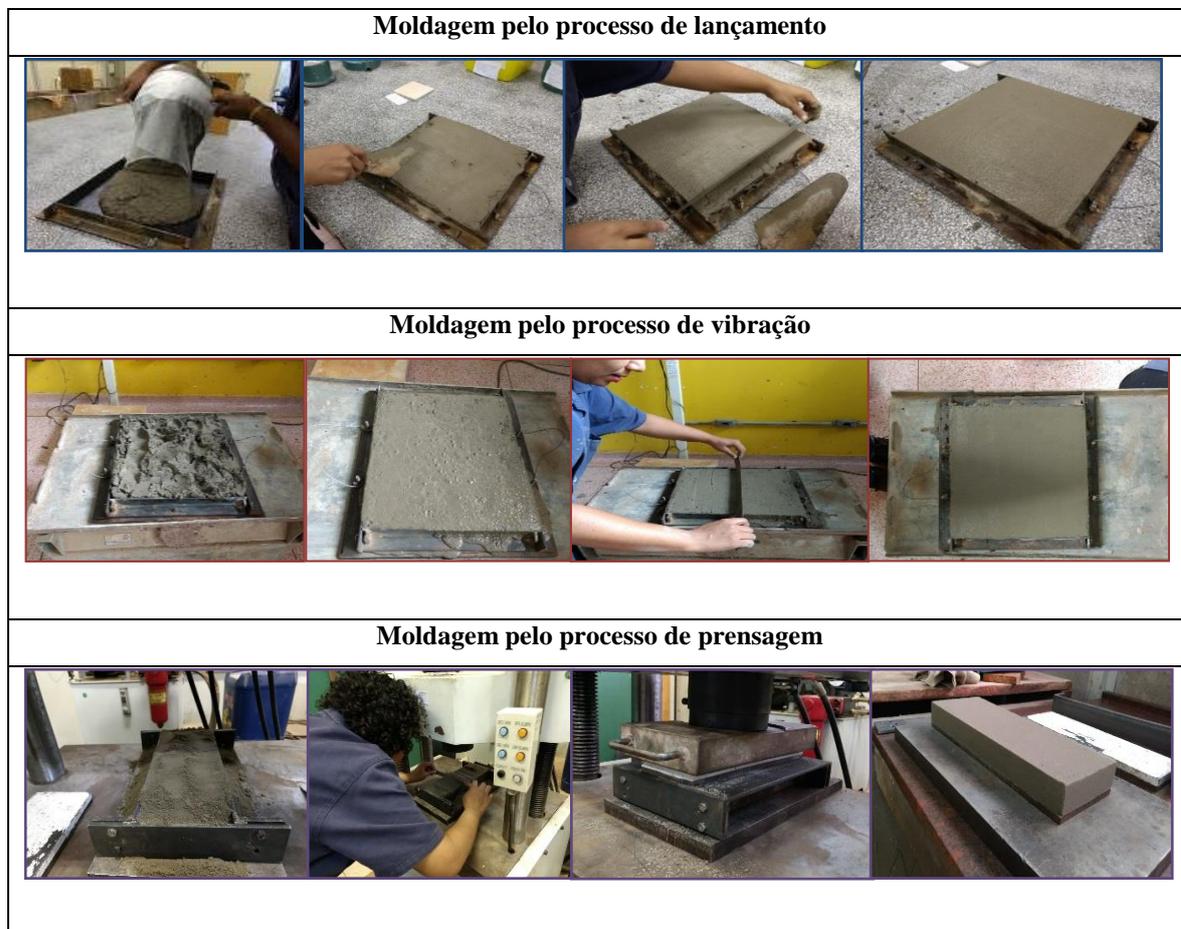
Para avaliar o efeito dos procedimentos de moldagem na resistência físico-mecânica das placas cimentícias com borracha de pneus inservíveis foram explorados três métodos no processo de fabricação das placas com as argamassas a seguir (Figura 7). Em todos os processos de fabricação das placas, a desmoldagem ocorreu após 24h e a cura das placas foi via úmida com posterior aplicação dos ensaios de resistência à tração na flexão de forma análoga a caracterização das argamassas.

Lançamento: o processo consiste em lançar a argamassa no molde, preenchendo através do espalhamento manual interno da fôrma e em seguida foi rasada a superfície. Entretanto para adequar a consistência mais fluida e garantir o espalhamento homogêneo no molde foi necessário aumentar a relação água/cimento (a/c) de 0,70 para 0,80 nos traços adotados.

Vibrada: a metodologia consiste na distribuição da argamassa na forma e em seguida é realizado o adensamento mecânico através da mesa vibratória. O tempo de vibração foi controlado através do surgimento de bolhas de ar a superfície da argamassa.

Prensada: o procedimento consiste em introduzir e distribuir a argamassa em toda área da fôrma. Após a moldagem foi aplicada a prensagem uniaxial em uma prensa hidráulica com carga média de 9 kN para o traço de argamassa sem borracha de pneu e 7 KN para as argamassas com borracha de pneu, o tempo foi em média 60 s e 74 s, respectivamente para os traços sem borracha e com borracha de pneu. E para a conformação nos moldes, a relação água/cimento dimensionado foi de 0,23 para todas as misturas.

Figura 7 - Imagens processo de moldagem



Fonte: Autora (2019)

3.4 Comportamento térmico das placas cimentícias com borracha de pneu inservíveis

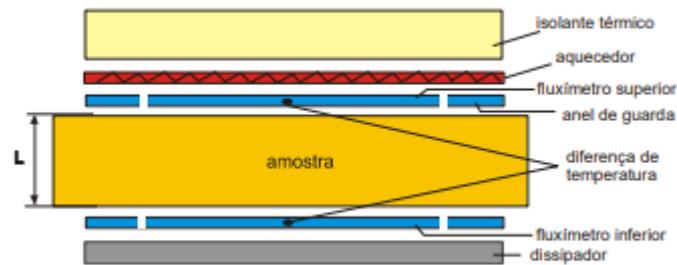
3.4.1 Propriedades Termofísicas

O método de cálculo utilizado para avaliações termoenergéticas em edificações por meio das simulações computacionais necessita de informações das propriedades térmicas como condutividade e calor específico, e propriedades físicas como densidade e espessura dos materiais constituintes da envoltória. Desta forma, foi necessária a realização do ensaio de condutividade térmica (λ) da argamassa cimentícia com borracha para determinação desta propriedade a ser utilizada nas simulações termoenergéticas.

Foi moldada uma amostra de placas para cada traço unitário de argamassa com 0%, 10% e 15% de borracha, o qual foi definido no estudo de dosagem. O adensamento das placas foi realizado por mesa vibratória e apresentou as dimensões de 30 cm x 30 cm e espessura de

62 cm. O ensaio foi realizado no laboratório de Meio Porosos e Propriedades Termofísicas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), seguindo respectivamente o procedimento da norma técnica ISO 8301 (1991) – *Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus* conforme mostrado esquematicamente na Figura 8.

Figura 8 – Princípio do método de medição da resistência térmica



Fonte: Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas – LMPT (2018)

A resistência térmica foi determinada a partir da lei de Fourier (equação (1)),

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{q_1 + q_2}{2}\right)} \quad (1)$$

onde:

R é a resistência térmica ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$);

q_1 e q_2 a densidade de fluxo de calor medido pelos fluxímetros (W/m^2); e

T_1 e T_2 as temperaturas superficiais da amostra medidas por termopares tipo T dispostos em arranjo diferencial.

Considerando que a amostra é homogênea, foi possível determinar com a equação (2) a condutividade térmica do material (λ),

$$\lambda = \frac{L}{R} \quad (2)$$

onde:

λ é a condutividade térmica ($\text{W}/\text{m K}$); e

L é a espessura da amostra (m).

3.4.2 Simulações termoenergéticas

O *EnergyPlus* é um programa computacional que foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos e o objetivo principal é estimar as trocas energéticas, níveis de iluminação, aquecimento e resfriamento de edificações. Através dele é possível simular o ambiente construído com diferentes cenários (clima, sistema construtivo, cobertura, orientação, etc.) conforme o interesse dos usuários. O *software* possibilita tomadas de decisões de projeto, com relação a melhor estratégia a ser adotada antes da construção do edifício (LAMBERTS et al., 2010).

Sendo assim, para analisar o efeito da placa cimentícia com borracha no desempenho termoenergética do sistema de cobertura em moradias, foi utilizado o programa *EnergyPlus* na versão 8.9.0, variando as peculiaridades da edificação através do objeto *Parametric:SetValueForRun*. O referido objeto foi utilizado nas simulações termoenergéticas, o qual permitiu realizar variações no sistema de cobertura, nos componentes construtivos das paredes e na orientação solar.

3.4.2.1 Modelo base da geometria e sistemas construtivos

Para a modelagem da geometria foi considerada o projeto representativo de habitação unifamiliar, faixa 1, baseando-se no levantamento realizados por Triana et al. (2015) projetos habitacionais no Programa Minha Casa Minha Vida; e também pelos estudos apontados por Didoné et al. (2016) nas medições em cidades de Mato Grosso do Sul (MS).

O projeto representativo para moradias térreas unifamiliares, faixa 1 de Triana et al. (2015) constitui-se de 39,75 m² (sala/cozinha = 17,83 m²; Dormitório 1 = 8,07 m²; Dormitório 2 = 7,54 m², banheiro = 4,09 m² e corredor de circulação entre os quartos 2,21 m²), com as descrições dos componentes e materiais de sistemas construtivos conforme tabela 6.

Tabela 6 - Características dos componentes e materiais de sistema construtivo

Componentes	Descrição
Paredes	13 cm, de blocos cerâmicos de 6 furos, com dimensões 9 cm x 14 cm x 19 cm com 2 cm de reboco interno e externo
Cobertura	2 águas, telhas cerâmicas e espessura, ático e forro de PVC. Inclinação: 23,6°.

Continua

Componentes	Descrição
Janelas	sala (estar) e dormitórios de 1,50 m ² com 2 folhas de correr; cozinha janela de 1,20 m ² com 2 folhas de correr e banheiro de 0,48 m ² . Todas sem sombreamento
Portas	5 portas de 0,80 m x 2,10 m sendo 2 externas metálicas e 3 internas em madeira
Beiral	50 cm
Pé direito	2,50 m
Piso	Piso cerâmico de 1 cm de espessura, argamassa de regularização de 2 cm e junta.
Área Construída	39,75 m ²
Pintura	Não mencionado

Fonte: Triana et al. (2015) adaptada pela autora (2019)

Já a tipologia construtiva (componentes e materiais) de moradias de interesse social nas zonas bioclimáticas 6 e 8, na qual as pesquisadoras Didoné et al. (2016) realizaram o monitoramento de um dormitório de edificações nas cidades de Sidrolândia (zona bioclimática 6), Corumbá (zona bioclimática 8) e Campo Grande (zona bioclimática 6) antes da ocupação dos moradores, é semelhante aos projetos representativos estudados por Triana et al. (2015), porém os três projetos na região de Mato Grosso do Sul foram de paredes monolíticas de concreto e distinguem - se quanto aos materiais utilizados na cobertura, forro e as janelas nos dormitórios e a metragem de área construída, como pode ser visto na Tabela 7.

Tabela 7– Características dos componentes e materiais de sistema construtivo em MS

Cidades	Campo Grande	Sidrolândia	Corumbá
Componentes	Descrição		
Paredes	Monolíticas de concreto com 10 cm de espessura, acabamento em massa corrida PVA espessura 2 mm	Monolíticas de concreto com 10 cm de espessura, acabamento em massa corrida PVA espessura interna e externa de 2 mm	Monolíticas de concreto com 10 cm de espessura, acabamento em massa corrida PVA espessura interna e externa de 2 mm.
Cobertura	Laje moldado <i>in loco</i> de concreto 10 cm a espessura; telhas de fibrocimento e espessura 6 mm	Forro em PVC, espessura 10 mm; telhas cerâmicas	Laje pré -moldadas de concreto 10 cm a espessura; telhas de fibrocimento e espessura 6 mm e manta metalizada dupla face, espessura 2 mm
Janelas	Alumínio em duas folhas, uma fixa e outra móvel com vidro e com veneziana em chapa metálica.	Alumínio em duas folhas, uma fixa e outra móvel com vidro e sem veneziana.	Alumínio em duas folhas, uma fixa e outra móvel com vidro e com veneziana em chapa metálica.

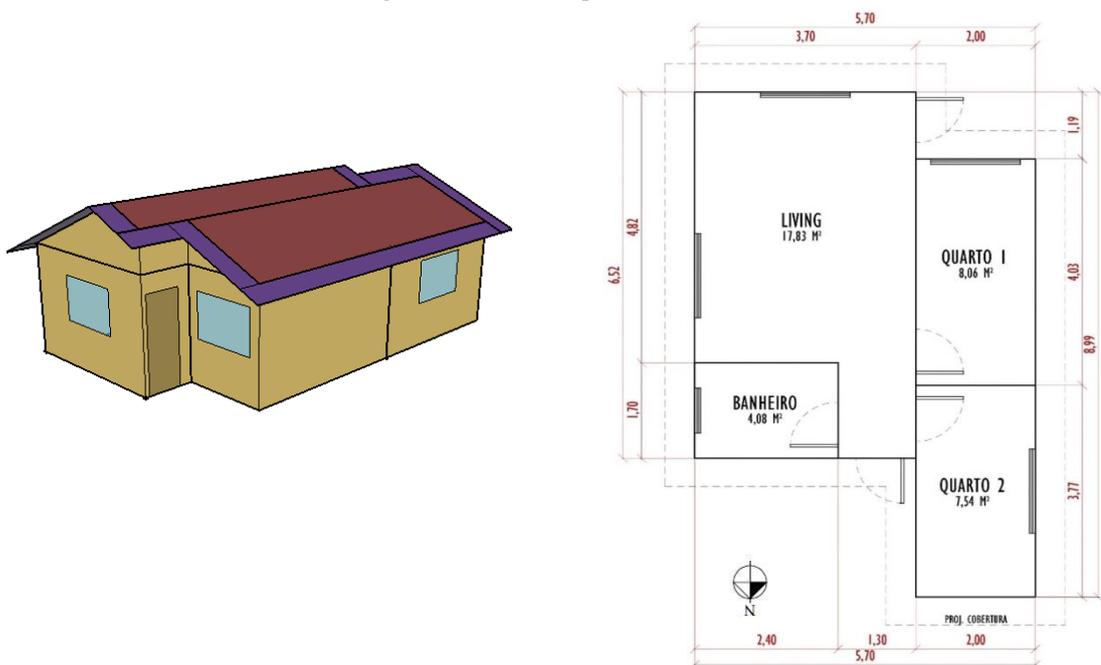
Continua

Cidades	Campo Grande	Sidrolândia	Corumbá
Componentes	Descrição		
Portas	Portas externas metálicas e internas em madeira	Portas externas metálicas e internas em madeira	Portas de madeira
Beiral	Não mencionados	Não mencionados	Não mencionados
Pé direito	Não mencionados	Não mencionados	Não mencionados
Piso	Revestimento cerâmico	Revestimento cerâmico	Revestimento cerâmico
Área Construída	44 m ²	60 m ²	43,55 m ²
Pintura	Tinta látex; acabamento externo com massa texturizada, espessura 0,5 cm, na cor bege	Tinta látex; acabamento com massa texturizada, espessura de 0,5 cm, em cor clara	Tinta Latex, acabamento externo com massa texturizada, espessura 1 cm, cor clara.

Fonte: Didoné et al. (2016) adaptada pela autora (2019)

Portanto, foi definido o modelo base para simulação computacional contendo 39,72 m² (sala/cozinha = 17,83 m²; Quarto1 = 8,06 m²; Quarto2 = 7,54 m²; Banheiro = 4,08 m² e corredor de circulação entre os quartos de 2,21 m²), com pé direito de 2,5 m. Foram definidas a partir da geometria ilustrada na Figura 9, as seguintes zonas térmicas: sala/cozinha, Quarto1, Quarto2, Banheiro e ático, com as características construtivas conforme Tabela 8. A geometria foi realizada com o *SketchUp Pro 2017*; este *software* é próprio para criação de modelos em 3D e possui interface com o *EnergyPlus* através do *plugin* do *OpenStudio* do *SketchUp*.

Figura 9 - Modelo representativo



Fonte: Autora (2019)

Tabela 8 - Características dos componentes e materiais de sistema construtivo

Componentes	Descrição
Cobertura	2 águas, telhas cerâmicas e espessura 1 cm, ático (altura = 1,24 m) com forro. Inclinação: 23,5°.
Janelas	Aberturas sem sombreamento, janelas do sala/cozinha, dormitórios e cozinha de 1,50 m ² com 2 folhas e basculante no banheiro com 0,48 m ² . Vidro de 4 mm de espessura.
Portas	5 portas de 0,80 m x 2,10 m sendo 2 externas metálicas e 3 internas em madeira
Beiral	50 cm
Pé direito	2,50 m
Piso	Uma camada de 3 cm de brita, laje de concreto de 5 cm de espessura, piso cerâmico de 1 cm de espessura, argamassa de regularização de 2 cm e junta.
Área Construída	39,72 m ²

Fonte: Autora (2019)

Foram determinados os valores de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) das paredes e coberturas (Tabela 9) através do método de cálculo definido pela NBR 15220 parte 2 (ABNT, 2005), considerando densidade (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) à partir do Anexo B da NBR 15220-2 (ABNT, 2005). Entretanto, para as argamassas cimentícias de revestimento interno e externo, foram adotados valores resultantes de ensaio de condutividade e densidade desenvolvidos no presente estudo.

Tabela 9 - As propriedades térmicas e físicas dos materiais utilizados nas simulações e para os cálculos de transmitância térmica e capacidade térmica para as paredes, piso e portas.

Material	Espessura equivalente (m)	Condutividade (W/m.K)	Densidade (kg/m ³)	Calor Específico (KJ/kg.K)	Absortância Solar (α)
Bloco cerâmico 8 furos (9 cm x 19 cm x 19 cm)	0,013	0,900	1600,0	0,92	0,70
Argamassa de revestimento	0,02	1,170	1840,0	1,00	0,60
Piso cerâmico	0,01	1,050	1900,0	0,92	0,40
Argamassa de regularização	0,02	1,150	1950,0	1,00	0,70
Laje de concreto piso	0,05	1,75	2300,0	1,00	0,70
Brita piso	0,03	0,70	1250,0	0,80	0,80
Porta de madeira	0,05	0,23	675,0	1,34	0,70
Porta metálica (alumínio)	0,02	55,00	7800,0	0,460	0,60

Fonte: Autora (2019)

Desta forma, para atender as tipologias construtivas estudadas por Triana et al. (2015) e Didoné et al. (2016), foram adotados nas simulações dois tipos de paredes, a primeira com

13 cm de espessura, constituída por blocos cerâmicos 8 furos, com dimensões de 9 cm × 19 cm × 19 cm e revestimento em argamassa interna e externa com reboco de 2 cm; e o segundo tipo foi a parede monolítica de concreto com espessura de 10 cm sem revestimento interno e externo.

A Tabela 10 possui os componentes dos tipos de paredes utilizados nas simulações, sendo considerada para parede de bloco cerâmico a resistência térmica do ar de 0,16 m²K/W para câmara de ar de superfície de alta emissividade, espessura entre 2 cm a 5 cm - fluxo horizontal, conforme NBR 15220 parte 2 (ABNT, 2005).

Tabela 10 – Componentes construtivos das paredes utilizadas

Tipo de parede	Composição	Espessura (e) (cm)	U (W/m²K)	CT (KJ/m²K)
Bloco cerâmico	Argamassa interna	2,0	2,48	112,65
	Cerâmica	1,30		
	Câmara de ar	2,0 < e ≤ 5,0		
	Cerâmica	1,30		
	Argamassa externa	2,0		
Monolítica de concreto	Concreto	10 cm	4,40	220,00

Fonte: Autora (2019)

O sistema construtivo de cobertura baseou-se nos estudos realizados por Didoné et al. (2016) em duas edificações: uma em Campo Grande com telhas onduladas de fibrocimento de espessura de 6 mm em estrutura metálica e forro em laje de concreto maciça de 10 cm de espessura e outra em Sidrolândia com telhas cerâmicas em estrutura metálica e forro de policloreto de vinila (PVC). Assim, para o presente estudo, a cobertura adotada foi telhamento cerâmico com as variações dos tipos de forros em três componentes: o primeiro forro em laje de concreto maciça (LC) com 10 cm de espessura, o segundo forro de PVC com 1 cm de espessura e o terceiro forro de placa cimentícia com borracha de pneu (PCB15) com a espessura de 3 cm para atender a viabilidade técnica de manuseio, transporte e assentamento desta placa em uma edificação por dois trabalhadores (Tabela 11 e Tabela 12). Para as determinações das transmitâncias térmica das coberturas com seus respectivos forros foram admitidos fluxo do calor descendente, sendo assim, a resistência térmica de 0,21 m².K/W para câmara de ar de superfície de alta emissividade, espessura maior que 5 cm, resistência térmica externa 0,04 (m².K)/W e resistência térmica interna de 0,17 (m².K)/W.

Tabela 11 - As propriedades térmicas e físicas dos materiais utilizado nas simulações e para os cálculos de transmitância térmica e capacidade térmica para a cobertura.

Material	Espessura equivalente (m)	Condutividade (W/m.K)	Densidade (kg/m ³)	Calor Específico (KJ/kg.K)	Absortância Solar
Telha cerâmica	0,01	1,050	1900,0	0,92	-
LC	0,10	1,750	2200,0	1,00	0,90
PCB15	0,03	0,922	1690,0	1,00	
PVC	0,01	0,200	1300,0	0,96	

Fonte: Autora (2019)

Tabelas 12 - Componentes das coberturas utilizadas

Tipo de forro	Composição	Espessura (e) (cm)	U (W/m ² K)	CT (KJ/m ² K)
LC	Telha cerâmica	1,0	2,05	237,5
	LC	10,0		
PCB15	Telha cerâmica	1,0	2,16	68,2
	PCB15	3,0		
PVC	Telha cerâmica	1,0	2,08	30,0
	PVC	1,0		

Fonte: Autora (2019)

Outra forma de verificação do desempenho térmico do sistema de cobertura foi através da absortância à radiação solar, onde foi variada a cor do revestimento externo no telhamento, adotando tintas de cor clara denominada marfim e cor escura denominada telha; e para cada cor com as versões acrílica fosca e acrílica semi-brilho, sendo os valores de absortância adotados dos estudos de Dornelles (2008) (Tabela 13).

Tabela 13 - Absortância solar de acordo com a cor do revestimento do telhamento

Cor	Versão	Absortância solar
Marfim	Acrílica Fosca	0,267
	Semi-brilho	0,339
Telha	Acrílica Fosca	0,708
	Semi-brilho	0,696

Fonte: Autora

Já a orientação solar considerada nas simulações foram as compreendidas entre o Norte, Noroeste e Oeste, pois Almeida (2017), após realizar o estudo comparativo de carga térmica solar com alteração de variáveis de edificação em um ambiente envidraçado na cidade de Campo Grande - MS, concluiu que o maior ganho de calor (sol de verão) ocorre nestas três orientações em ordem crescente.

Deste modo, para a presente pesquisa, foram realizadas 72 simulações (2 tipos de paredes × 3 tipos de forros × 4 cores de revestimento do telhamento × 3 orientações solares) com intuito de verificar os efeitos das placas cimentícias com borracha de pneu sobre as cargas térmicas internas de ambientes simulados na região de Mato Grosso do Sul. A região Sul Matogrossense possui o clima tropical com inverno seco (KÖPPEN, 1936 apud ALVAREZ et al., 2014, p. 717), sendo destacados dois zoneamentos bioclimáticos, os quais foram representados pela cidade de Corumbá, pertencente a zona bioclimática 8, e pela cidade de Campo Grande, que fica na zona bioclimática 6. A escolha por estas duas cidades partiu das medições *in loco* realizadas por Didoné et al. (2016), que encontraram diferenças significativas de desempenho térmico em habitações de interesse social diante do uso de tipologias com diferentes forros na cobertura.

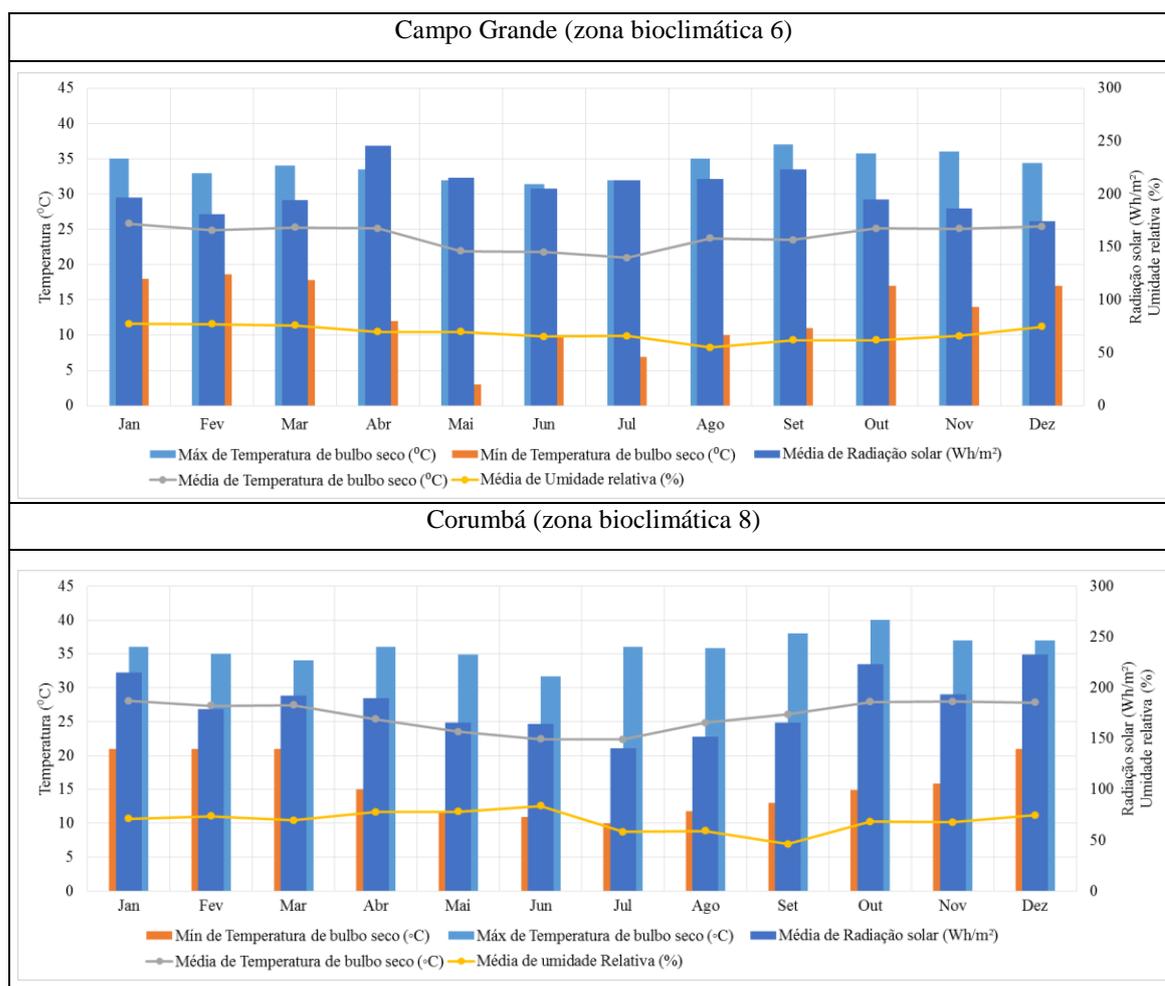
3.4.2.2 Configurações para a simulação termoenergética

Para a realização da simulação termoenergética, as configurações de cargas internas, ventilação natural, rotina de uso e ocupação foram adotadas conforme o RTQ-R (INMETRO, 2012) para se aproximar da realidade das rotinas dos usuários de moradias de interesse social. Ressalta-se que as configurações pertinentes ao RTQ-R foram admitidas para este trabalho desconsiderando os pré-requisitos específicos e qualquer avaliação quanto o nível de eficiência resultante das 72 simulações.

Desta forma, os arquivos climáticos das cidades de Campo Grande e de Corumbá foram retirados do site *Climate.OneBuilding.Org*¹, onde são disponibilizados arquivos climáticos de vários continentes. Sendo assim, as simulações foram realizadas para um ano referência contendo 8760 horas. A Figura 10 mostra as variáveis climáticas das cidades simuladas, a partir dos seus respectivos arquivos climáticos.

¹ O site do *Climate.OneBuilding.Org* <<http://climate.onebuilding.org/about/default.html>> disponibiliza arquivos climáticos de vários continentes para uso em simulações computacionais.

Figura 10 - Variáveis climáticas a partir do arquivo climático



A edificação foi considerada em contato direto do solo através de uma camada de brita (3 cm) e de uma laje (5 cm); assim, a simulação de contato foi adicionada no *site:groundTemperature:BuildingSurface* com as temperaturas mensais média do solo a 4 m de profundidade retiradas dos arquivos climáticos de suas respectivas cidades.

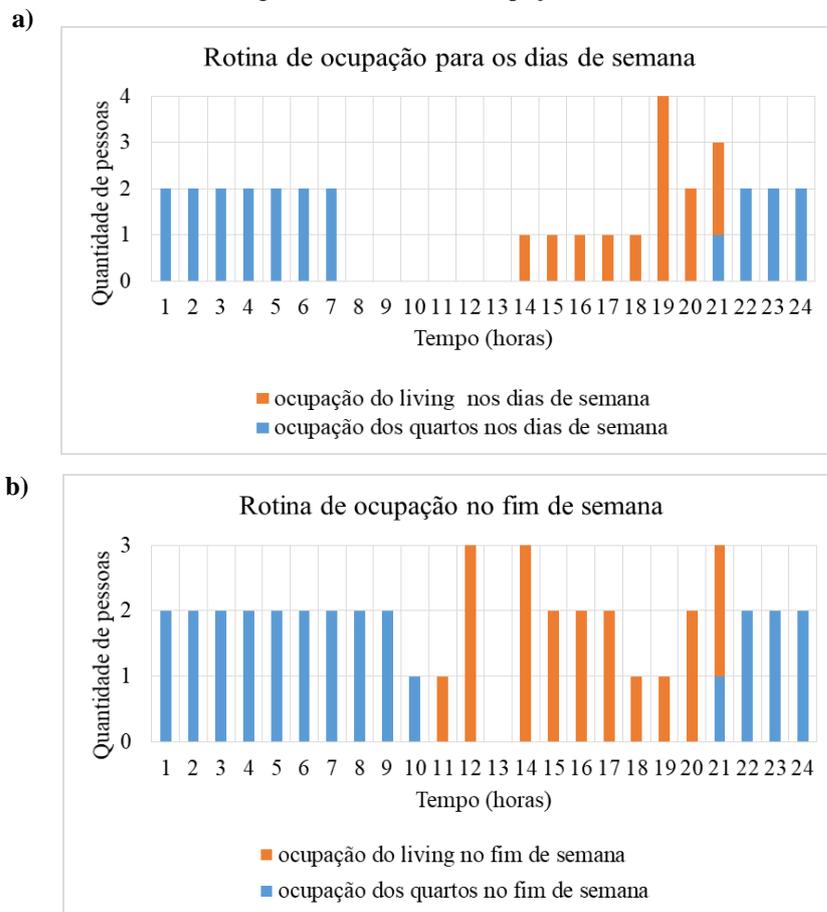
Quanto à ventilação, considerou-se a natural, ou seja, a ventilação é proporcionada através das aberturas de janelas e portas, ocorrendo ao longo do ano e 24 h por dia. O controle de aberturas das janelas foi através da temperatura, a qual habilita a abertura da janela quando a temperatura do ar do ambiente (T_{int}) é igual ou superior a temperatura de 20°C (RTQ-R, 2012). Entretanto, para as portas externas foram simuladas fechadas 24h e portas internas todas abertas 24h. Todas as entradas para a configuração da ventilação natural foram realizadas pelo objeto *AirflowNetwork*, porém as rotinas de controle de abertura e fechamento de janela foram incluídas no objeto *Schedule:Compact*.

As taxas de aberturas para ventilação natural para as janelas com 2 folhas de correr foram de 45% (sala/cozinha, cozinha e quartos) e para a janela do banheiro basculante 90% e como portas e janelas são retangulares, os coeficientes de descarga utilizado foi de 0,60 e os coeficientes do fluxo do ar por frestas de 0,001 kg/s.m (RTQ-R, 2012).

A fim de representar os ganhos internos por ocupação dos ambientes, admitiu-se a edificação ocupada por quatro habitantes, com dois moradores por quarto e na sala/cozinha todos os habitantes. De acordo com RTQR-R (INMETRO, 2012), em função do tipo de atividade desempenhada em cada ambiente, para a sala/cozinha, como os moradores poderiam estar sentados ou assistindo TV, foi adotado a taxa metabólica de 108 W; e nos quartos 81 W por pessoa, o que representariam os moradores dormindo ou descansando.

As rotinas de ocupação foram elaboradas conforme a Figura 11 considerando-se os ambientes de permanência prolongada sala/cozinha, quarto1 e quarto2, modelando assim, a ocupação dos ambientes de permanência prolongada por quantidades de pessoas disponíveis a cada horário para os dias de semana (Figura 11, item a)), e outro para os finais de semana (Figura 11, item b)).

Figura 11 - Rotina de ocupação

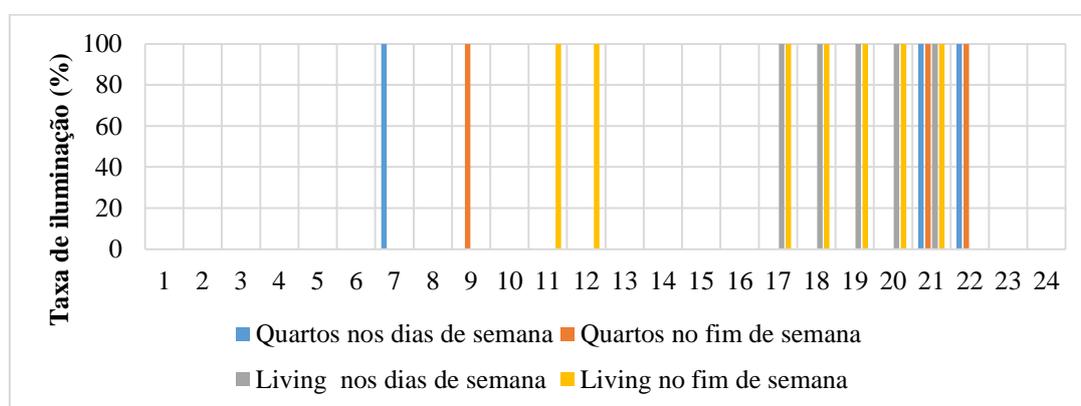


Fonte: RTQ-R (INMETRO, 2012) adaptado pela autora (2019)

Além dos ganhos térmicos considerados pela taxa metabólica para as simulações, tem-se também a densidade de potência instalada de iluminação que o RTQ-R (INMETRO, 2012) determina de 5 W/m² para os quartos e 6 W/m² para sala/cozinha. Em relação a carga interna de equipamentos, o referido regulamento aponta para o período de 24h do dia durante todo o período simulado para o ambiente sala/cozinha uma potência de 1,5 W/m².

Na Figura 12 é possível verificar a taxa de uso da iluminação para cada ambiente de permanência prolongado para os dias de semana e finais de semana considerados em todas simulações.

Figura 12 - Taxa de uso de iluminação por ambiente de permanência prolongado



Fonte: RTQ-R (INMETRO, 2012) adaptado pela autora (2019)

3.4.2.3 Parâmetros analisados da simulação termoenergética

Para avaliar o desempenho termoenergético do forro de placa cimentícia com borracha de pneu (PCB15) em habitações de interesse social, o desempenho da edificação resultante das 72 combinações simuladas foi avaliado pelo parâmetro graus-hora de resfriamento (GHR), a partir da somatória da diferença de temperatura operativa horária, quando esta se encontrou superior a temperatura base, no qual foi adotado 26 °C (INMETRO, 2012). Somente foi considerado a quantidade de horas de desconforto por calor, pois segundo o RTQ-R considera-se o parâmetro graus-hora de aquecimento somente para zonas bioclimáticas frias de 1 a 4.

Os dados da temperatura horária operativa (TO) foram obtidos através da saída solicitada das simulações para cada ambiente avaliado. Assim, os dados em arquivo “csv” foram agrupados no programa *Microsoft* excel auxiliado pela ferramenta (comando) macro e foram calculados os GHR para os 72 resultados, a partir da condições da equação (3), onde

GHR é graus-hora de resfriamento (°Ch) e T_i é a temperatura operativa em cada uma das 8760 horas do ano (°C).

$$GHR = \sum_{i=0}^{8760} \begin{cases} \text{se } T_i > 26, (T_i - 26) \\ \text{se } T_i \leq 26, (0) \end{cases} \quad (3)$$

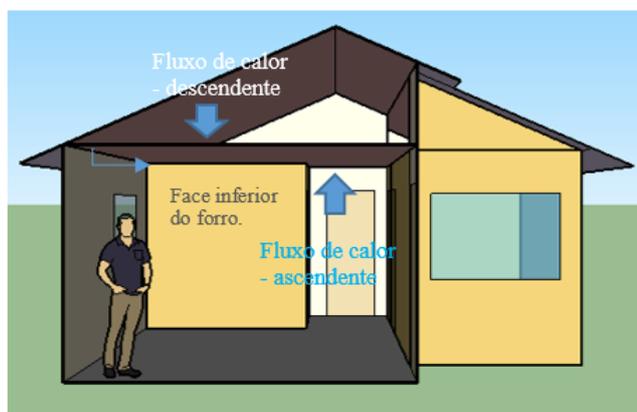
Os resultados foram submetidos a análise estatística para verificação da variância entre cada fator adotado (cor do telhamento, tipo de forro, orientação da fachada e tipo de parede) em cada ambiente de permanência prolongada nos valores de GHR resultantes. Para o tratamento foi utilizado o *software* RStudio (2018), que consiste em um compilador para linguagem de programação R. Desta forma, foi aplicada a análise de variância (ANOVA), com a finalidade de demonstrar que as variações nos fatores atribuídos nas simulações tem influência nos resultados do indicador de graus-hora de resfriamento. Por conseguinte, foi aplicado o teste de Tukey da diferença totalmente significativa indicada pelo o grau de comparação aos pares de cada fator adotado. Então, a partir dos dados fornecidos pelo o teste e pelo o gráfico de caixa (*boxplot*) gerado, foi possível correlacionar os valores de GHR e os fatores cor do telhamento, tipo de forro, orientação da fachada e tipo de parede e encontrar, estatisticamente, os fatores com resultados mais expressivos.

Para avaliar o tempo transcorrido entre a temperatura externa e a temperatura interna em cada ambiente, foi avaliado o parâmetro atraso térmico nos ambientes de permanência prolongada através da diferença horária alcançada pelas temperaturas máximas do ar externo e do ar interno de cada ambiente. As compilações dos dados de temperatura do ar externo (temperatura de bulbo seco) e temperatura do ar interno foram obtidas através da saída solicitada das simulações para cada ambiente avaliado (*Zone*). E o parâmetro amortecimento térmico dos ambientes de permanência prolongada (sala/cozinha, quarto1 e quarto2) foi avaliado através da porcentagem resultante da relação entre diferença da temperatura interna do ar dos ambientes e temperatura externa do ar pela temperatura externa do ar.

Por fim, foi avaliado o parâmetro fluxo de calor (W/m²) por condução na face inferior de cada tipo de forro (LC, PCB15 e PVC) no ambiente de permanência prolongada. Esta grandeza térmica foi obtida através dos dados horários por área da saída solicitada nas simulações. A Figura 13 contém o corte ilustrativo com a direção do fluxo de calor ascendente, quando o fluxo de calor resultante é negativo, e descendente para os resultados de fluxo de calor positivo. Entretanto, a fim de reduzir a quantidade de dados resultantes de cada área de permanência prolongada e facilitar a análise dos resultados, foi analisada a

transferência de calor resultante através da média ponderada de suas respectivas áreas de permanência prolongada.

Figura 13 - Corte ilustrativo



Fonte: Autora (2019)

Ressalta-se que a verificação do indicador de graus-hora de resfriamento foi realizada para todas as 72 simulações e considerando 8760 horas por ambiente de permanência prolongada; e para os parâmetros atraso térmico no ambiente e fluxo de calor por condução no forro foram criados cenários, partindo da avaliação estatística e dos fatores atribuído nas simulações que destacaram com menor e maior resultado em graus-hora de resfriamento.

Porém, tanto o atraso térmico quanto o fluxo de calor foi avaliado para um dia correspondente ao período de verão e a definição deste dia seguiu a metodologia do Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT (AKUTSU et al. 1991 apud GOULART, 1993), considerando os arquivos climáticos de cada cidade e a frequência de ocorrência das temperaturas mais próxima de 10%, pois a metodologia seleciona as frequências de 1%; 2,5%; 5% e 10% para os dias quentes. Na tabela 14 tem-se as algumas características climáticas dos dias selecionados.

Tabela 14 – Características dos dias selecionados

	Campo Grande	Corumbá
Data	25/01	25/01
Temp. máxima de bulbo seco (°C)	34,0	36,0
Temp. mínima de bulbo seco (°C)	21,0	25,4
Temp. média de bulbo seco (°C)	25,6	29,9
Umidade relativa média do ar (%)	71,5	71,0
Radiação solar média (Wh/m ²)	319,0	230,9
Velocidade média do vento (m/s)	4,6	3,6

Fonte: Autora (2019)

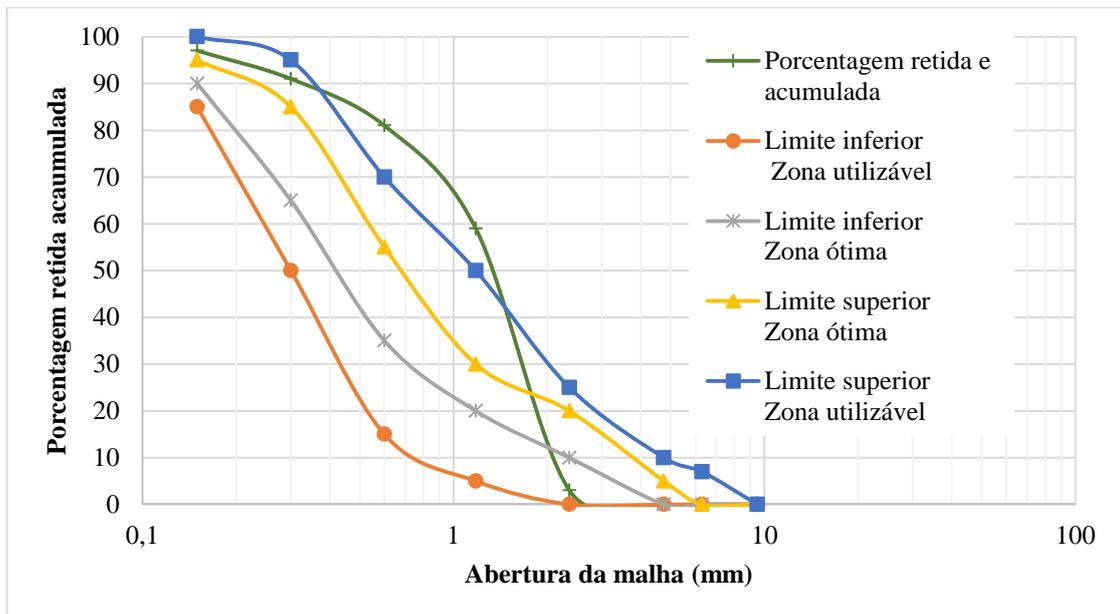
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos materiais

Para atender um padrão de dimensões geométricas na produção de placas cimentícias, as partículas de borracha de pneu inservível foram classificadas a partir do peneiramento de diâmetro máximo de 2,36 mm, resultando em um módulo de finura de 3,31 (Tabela 15). A distribuição granulométrica das partículas de borracha (Figura 14) não atendeu nenhum intervalo granulométrico estabelecido na NBR 7211 (ABNT, 2009), e portanto, foram adotados classificações internacionais utilizadas para agregados leves (Tabela 16), sendo as partículas de borracha do presente estudo classificadas como partículas granulares.

A Figura 15 possui a disposição das partículas de pneus retidas por peneiras, a qual mostra uma concentração maior das partículas de borracha de pneu no intervalo de 1,18 mm a 0,30 mm.

Figura 14 – Curva granulométrica das partículas de borracha de pneu inservível.



Fonte: Autora (2019)

Tabela 15 - Granulometria das partículas de borracha de pneu

Abertura da malha (mm)	Porcentagem retida	
	Individual	Acumulada
6,30	0	0
4,75	0	0
2,36	3	3
1,18	56	59
0,60	22	81
0,30	10	91
0,15	6	97
Dimensão máxima (mm)		2,4
Módulo de finura		3,31

Fonte: Autora (2019)

Tabela 16 – Classificação internacional do resíduo de borracha de pneus

Classificação	Dimensões dos resíduos	
	Medina et al. (2014)*	Kardos et al. (2015)**
Tiras (<i>sheds</i>)	50 mm - 305 mm	50 mm - 305 mm
Pedaços (<i>chips</i>)	10 mm - 50 mm	12 mm - 50 mm
Borracha granulada (<i>granulated rubber</i>)	7 mm - 15 mm; 2 mm - 7 mm e 0,5 mm - 2 mm	0,425 mm - 12 mm
Pó (<i>powders</i>)	0,5 mm - 0 mm e 0 mm - 500 µm	0,5 mm e ≥ 0,075 mm

*European Normative: Final Draft FprCEN/TS 1424 Materials produced from end of life tyres—specification of categories based on their dimension and impurities and methods for determining their dimension and impurities

**ASTM D6270 (2017) - Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering

Fonte: Medina et al. (2014) e Kardos et al. (2015) adaptada pela autora (2019)

Figura 15 – Disposição das partículas de borracha de pneus retidas por peneiras



Fonte: Autora (2019)

A massa específica das partículas de borracha de pneus inservíveis foi de 1,32 g/cm³. Na Tabela 17, constam resultados de massas específicas de borracha de pneus inservíveis de alguns estudos que incorporaram matrizes cimentícias, demonstrando que a partícula de borracha utilizada neste estudo esta em conformidade com os valores encontrados nas referências estudadas.

Tabela 17 - Resultados de massas específicas borracha de pneu inservível definidos por autores em estudos de compósitos cimentícios.

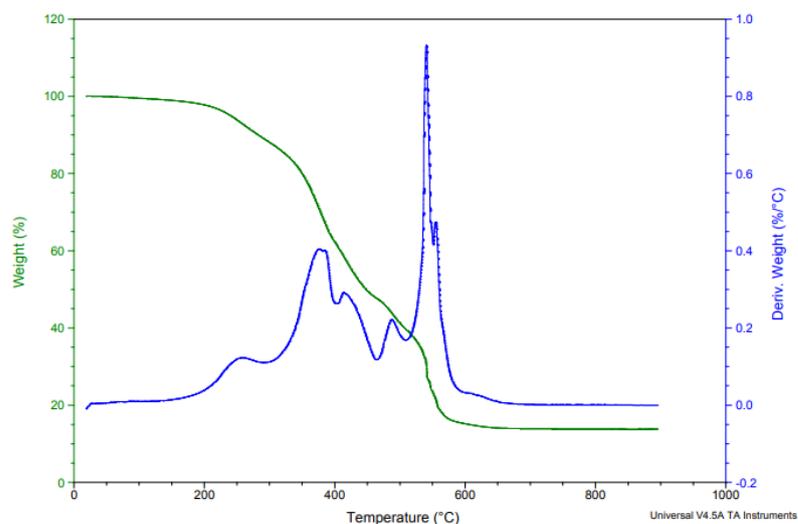
Autor	Massa específica (g/cm ³)
Pinto et al. (2016)	1,15
Guelmine et al. (2016)	1,20
Bravo (2014)	1,10
Costa et al. (2013)	1,25

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

A massa unitária das partículas de borracha de pneus inservíveis foi de 541,17 kg/m³, o que confere uma classificação semelhante às densidades de agregados leves como a argila expandida produzida pelo em fornos rotativos (Barroca, 2013).

A Figura 16 apresenta as curvas de termogravimetria (TG) e análise térmica diferencial (DTG), onde são observados os eventos de perdas de massa que ocorrem com as mudanças de temperatura na borracha de pneu utilizada neste estudo. A amostra apresentou três eventos referentes a perda de massa. Pode-se observar um declínio que se inicia em uma temperatura de aproximadamente 188°C, terminando em aproximadamente 600°C. O primeiro evento de perda de massa apresentou um pico em 278°C, corresponde provavelmente a volatilização de plastificantes, óleos e aditivos de baixo ponto de ebulição presentes na formulação dos pneus. O segundo evento, que acontece entre 373°C e 487°C, com um pico intenso em 389°C, pode ser atribuído a degradação da borracha natural e outros elastômeros presentes na composição. Segundo Menezes (2005), a degradação dos elastômeros ocorre no intervalo entre 350°C - 500°C. No intervalo de temperatura dec 493°C e 589°C, ocorre mais um evento com um pico máximo em 538°C, que pode ser atribuído a decomposição térmica do polibutadieno, um dos principais componentes do pneu.

Figura 16 - Análise termogravimétrica da borracha de pneu

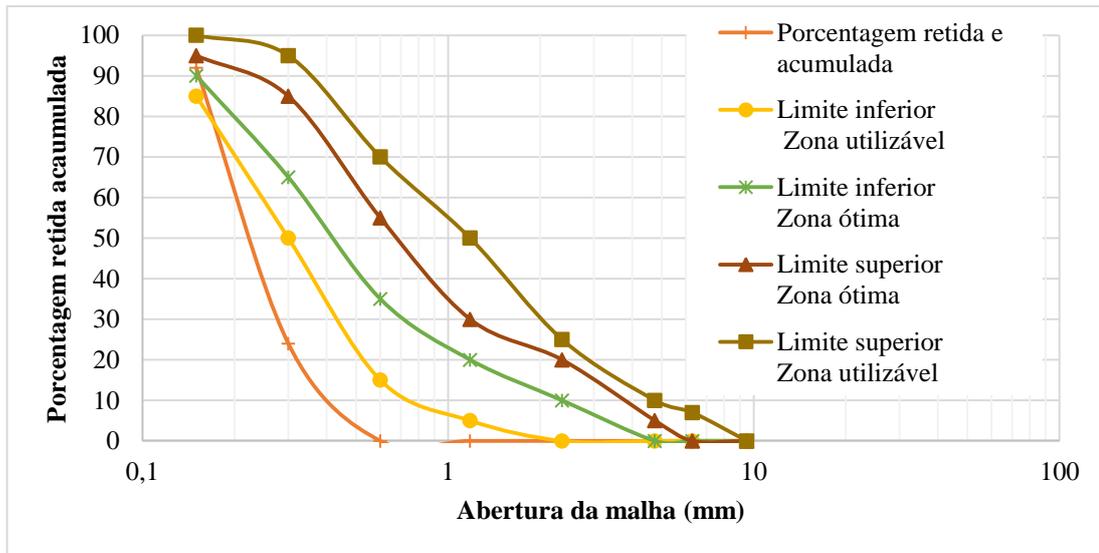


Fonte: Resultado da pesquisa

Segundo Guelmine et al. (2016), a substituição parcial de areia natural por agregados de borracha de pneu em até 9%, não causa instabilidade físico-mecânica das argamassas de borracha para exposições térmicas até 200°C. Porém, além deste limite, a combustão das partículas de borracha de pneu compromete a estabilidade de materiais à base de cimento, principalmente para taxas superiores a 3%, ou seja, o reuso de partículas de borracha de pneu em materiais cimentícios em até 3%, pode ser usado com a mesma segurança encontrados nos agregados naturais, sem qualquer risco a combustão em caso de incêndio. De acordo com a regulamentação portuguesa quanto ao uso de compósitos cimentícios com borracha e as restrições relacionadas à reação ao fogo, os concretos não estruturais com até 15% de incorporação de borracha de pneu são aplicáveis para revestimentos de paredes e tetos em rotas de fuga, caixa à prova de fogo e outras áreas específicas com maior risco de incêndio; e o compósito estrutural é restringido no uso em estruturas de telhados, escadas, dutos de ventilação e compartimento de coleta de lixo (CORREIA et al., 2011).

A areia natural de Campo Grande possui massa específica de 2,65 g/cm³, massa unitária de 1540,93 kg/m³, dimensão máxima de 0,6 mm e módulo de finura de 1,16 (Tabela 18); e de acordo com a Figura 17 esta areia apresenta a curva granulométrica abaixo dos limites das zonas granulométricas estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009). E o cimento apresentou massa específica de 3,01 g/cm³.

Figura 17 - Curva granulométrica areia natural de Campo Grande



Fonte: Autora (2019)

Tabela 18 - Granulometria da areia natural Campo Grande

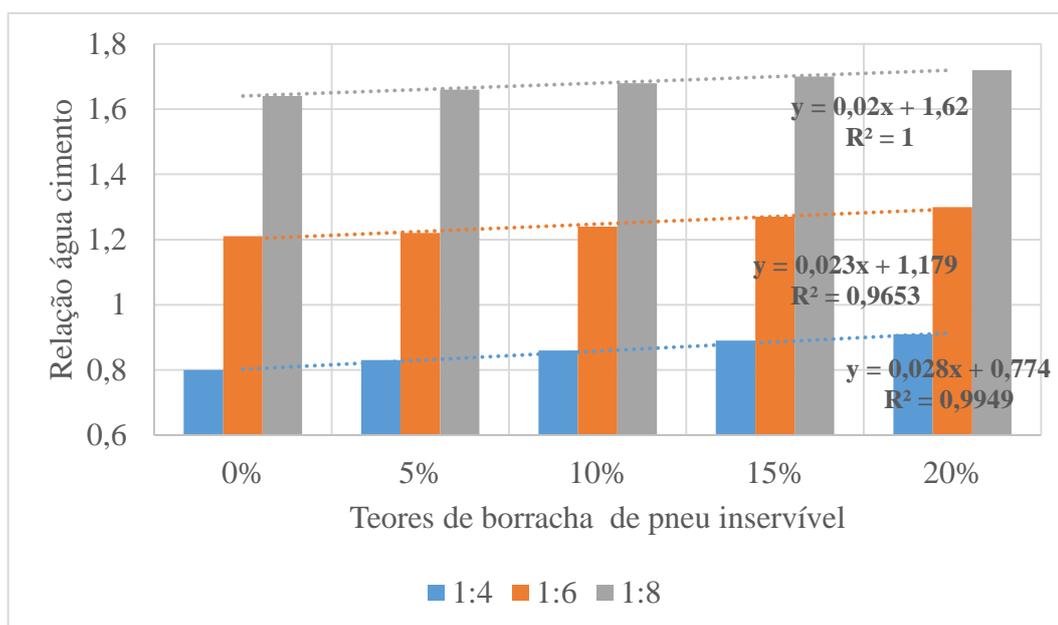
Abertura da malha (mm)	Porcentagem retida	
	Individual	Acumulada
6,30	0	0
4,75	0	0
2,36	0	0
1,18	0	0
0,60	0	0
0,30	24,1	24
0,15	68,1	92
Dimensão máxima (mm)		0,6
Módulo de finura		1,16

Fonte: Autora (2019)

4.2 Estudo de dosagem

A relação água/cimento (a/c) resultante para cada mistura de cimento+areia+partículas de borracha foi à partir do alcance do índice de consistência (IC) de 260 ± 5 mm e estão apresentados na Tabela 19. Analisando o efeito da adição de borracha de pneus inservíveis ao volume total das misturas, através do coeficiente angular da equação da linha de tendência de cada traço (Figura 18), houve o aumento proporcional médio de 0,02 nas relações a/c conforme o acréscimo relativo de 5% de borracha, resultando num intervalo de 0,80 a 1,72 nas relações a/c das argamassas estudadas.

Figura 18 - Relação água e cimento das argamassas do estudo de dosagem



Fonte: Autora (2019)

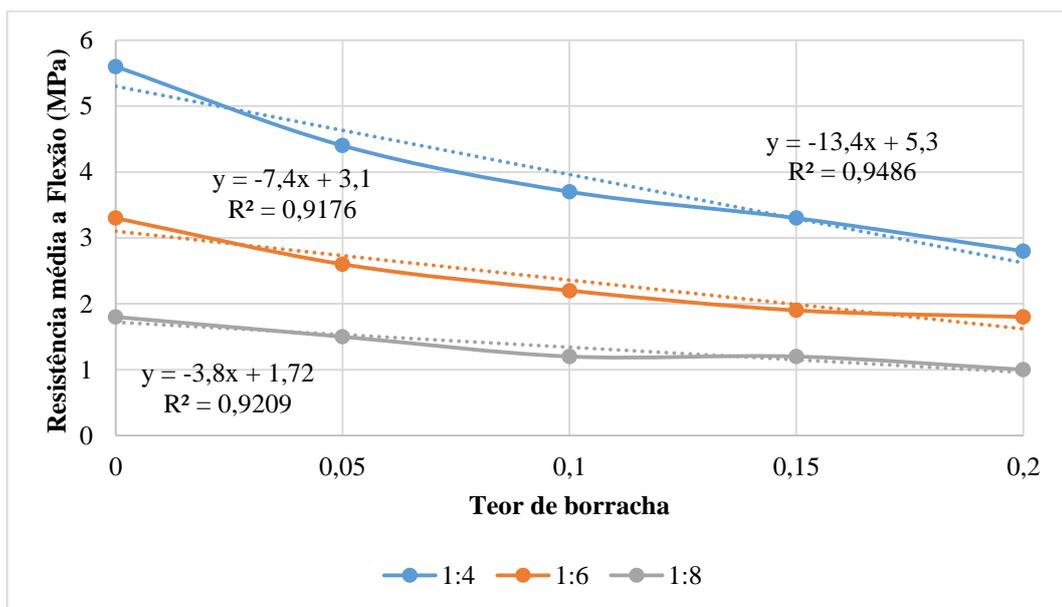
Tabela 19 – Dosagens estudadas

Identificação	Cimento (g)	Areia Natural (g)	Fragmento de Borracha (g)	Água (ml)	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Traço Unitário (cimento:areia:borracha:a/c)
R_4-0	500	2000	0	400	380,53	1:4:0:0,8
R_4-5	500	2000	47,2	415	366,83	1:4:0,09:0,83
R_4-10	500	2000	94,4	428	353,63	1:4:0,19:0,86
R_4-15	500	2000	141,6	444	341,53	1:4:0,28:0,89
R_4-20	500	2000	188,9	455	330,49	1:4:0,38:0,91
R_6-0	357,1	2142,8	0	432	263,69	1:6:0:1,21
R_6-5	357,1	2142,8	46,4	435	256,46	1:6:0,13:1,22
R_6-10	357,1	2142,8	92,8	443	242,28	1:6:0,26:1,24
R_6-15	357,1	2142,8	139,2	453	235,07	1:6:0,39:1,27
R_6-20	357,1	2142,8	185,5	464	228,14	1:6:0,52:1,3
R_8-0	277,8	2222,2	0	455	127,53	1:8:0:1,64
R_8-5	277,8	2222,2	45,9	461	122,93	1:8:0,17:1,66
R_8-10	277,8	2222,2	91,9	467	120,80	1:8:0,33:1,68
R_8-15	277,8	2222,2	137,8	473	118,65	1:8:0,5:1,7
R_8-20	277,8	2222,2	183,7	479	116,67	1:8:0,66:1,72

Fonte: Autora (2019)

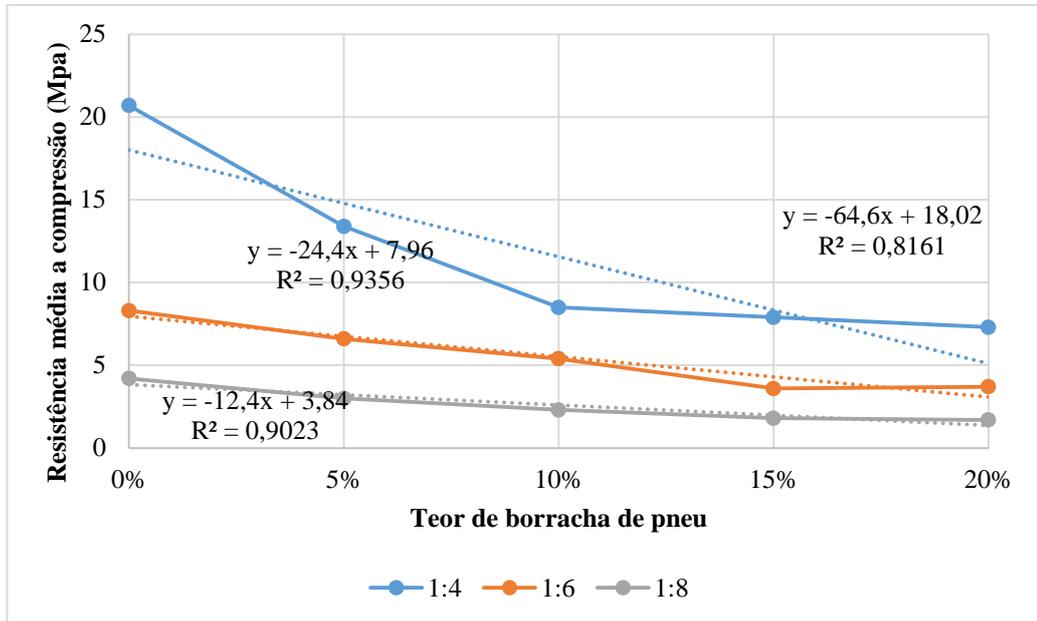
Foram verificadas as resistências médias à flexão (Figura 19) e à compressão axial (Figura 20), sendo notado que, independente da dosagem unitária, houve significativas diminuições nas resistências mecânicas nas argamassas contendo borracha de pneus quando comparadas as argamassas referências. Os coeficientes angulares negativos das equações das linhas de tendências mostraram que há diminuição nas resistências mecânicas conforme o aumento da adição das partículas de borracha nas argamassas, o que corrobora os resultados encontrados nos estudos de Pinto et al. (2016), Thomas et al. (2016), Flores-Medina et al. (2013) e Angelin et al. (2017) em compósitos cimentícios com borracha de pneu. Porém, a taxa de redução nos valores de resistência a tração na flexão é menos intensa do que a encontrada para à compressão axial, demonstrando que este comportamento está relacionado a ductilidade destes compósitos cimentícios com borracha de pneu (ALBUQUERQUE, 2009).

Figura 19 - Resistência média a tração na flexão



Fonte: Autora (2019)

Figura 20 - Resistência média a compressão



Fonte: Autora (2019)

Ao realizar a análise variância e o teste de Tukey no estudo de dosagem das argamassas cimentícias com borracha pode ser observado que a variação na quantidade de cimento é o fator mais relevante na eficácia das dosagens em relação às resistências mecânicas (Tabela 20 e Tabela 21). Isso ocorre porque a matriz preponderante dentro da argamassa foi o cimento e as adições de partículas de borracha não foram significativas, chegando a máxima de 20% do volume final, quanto a proporção de areia na argamassa.

Tabela 20- Análise de variância no estudo de dosagem das argamassas cimentícias

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Estatística do teste
Fator 1 (Borracha)	4	16,05	4,01301	513,6109
Fator 2 (Cimento)	2	52,29	26,14515	3346,2218
Interação Fat.1xFat.2	8	3,63	0,45415	58,1246
Tratamentos	14	71,98	5,14111	657,9917
Resíduo	30	0,23	0,00781	
Total	44	72,21		

Fonte: Autora (2019)

Tabela 21 - Comparação entre as médias dos fatores envolvidos

Teor de borracha de pneu adicionada x Massa do cimento (g)			
	1:4 (500g)	1:6 (357,1g)	1:8 (277,8g)
0%	5,5867 aA	3,2667 aB	1,8000 aC
5%	4,4000 bA	2,6000 bB	1,5000 bC
10%	3,6667 cA	2,2333 cB	1,2333 cC
15%	3,3333 dA	1,8667 dB	1,2000 cC
20%	2,8000 eA	1,7667 dB	0,9667 dC
Diferença mínima significativa entre colunas = 0,2097		Diferença mínima significativa entre linhas = 0,1776	

* Em cada coluna, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey
Em cada linha, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey

Fonte: Autora (2019)

Visto que a perda de resistência mecânica a cada 5% de adição não foi consideravelmente significativa e devido aos baixos valores de resistência à tração da dosagem de 1:8 (cimento:areia), tornando inviável sua utilização na moldagem das placas cimentícias, optou-se pela caracterização físico-mecânico das argamassas estudadas para os traços unitários 1:4 e 1:6 (cimento:areia), com as variações das adições de borracha no intervalo de 10%.

Ao verificar a Tabela 22, foi possível constatar que os maiores valores de teor de ar incorporado estão nos traços com maiores quantidades de partículas de borracha, e por consequência foram os traços que apresentaram menores valores de massa específica aparente, o que pode contribuir para estruturas de suporte de placas cimentícias menos complexas. Já o comportamento mecânico das placas cimentícias com borracha apresentou-se semelhante aos resultados de tração na flexão nas amostras prismáticas dos compósitos cimentícios com borracha, sendo as reduções significativas nos valores de resistências à flexão das placas quanto maior foi a adição de partículas de borracha.

Tabela 22 - Características físicas das argamassas 1:4 e 1:6 com partículas de borracha

Identificação	Massa específica (g/cm ³)	Teor de ar incorporado	Resistência à flexão média (MPa)	
			7 dias	28 dias
R_4-0	2,10	7,35%	4,62	5,04
R_4-10	1,90	12,50%	2,86	2,88
R_4-20	1,81	14,90%	1,74	2,20
R_6-0	2,04	13,00%	2,27	2,32
R_6-10	1,87	19,50%	1,59	2,04
R_6-20	1,42	22,00%	1,39	1,58

Fonte: Autora (2019)

Ao analisar o estudo de dosagem verificou-se que o consumo de cimento foi o fator mais relevante para atingir a resistência média à flexão mínima de 4 MPa para placas cimentícias. Sendo assim, para atingir a resistência mínima de aplicação do compósito cimentício como placas de vedação aliado a maior adição de partículas de borracha de pneu, foram adotados três novos traços para confecção das placas de compósito cimentício com borracha, a partir da dosagem 1:4 (cimento:areia), onde foram fixados consumo cimento de 396,86 kg/m³, relação a/c de 0,70, e os teores de partículas de borracha passou a ser incorporado em substituição ao volume de areia, correspondendo aos teores de 0%, 10% e 15% (Tabela 23).

Tabela 23 - Dosagem das argamassas adotadas para produção das placas cimentícias com partículas de borracha

Traço unitário (em massa) (cimento: areia: borracha:água)	Teor de borracha	Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Borracha (kg/m ³)	Água (kg/m ³)
1: 3,94:0:0,70 (referência)	0%	396,39	1561,78	-	277,47
1:3,56:0,19:0,70	10%	396,89	1412,93	75,41	277,82
1:3,38:0,28:0,70	15%	396,85	1341,35	111,12	277,80

Fonte: Autora (2019)

Do mesmo modo que ocorreu no estudo de dosagem, foi possível constatar na Tabela 24 maiores valores de incorporação de ar e de índice de consistência nas misturas com maior quantidade de partículas de borracha, ou seja, quanto maior for o teor de ar incorporado, menor foi a densidade da argamassa. Já o fato das diferenças não significativas entre os resultados de índice de vazios das misturas pode ser atribuído ao adensamento mecânico por

vibração durante a moldagem das placas, a qual permitiu a saída do ar, facilitou o arranjo interno dos agregados e partículas de borracha, e conseqüentemente, diminuiu os vazios internos da matriz.

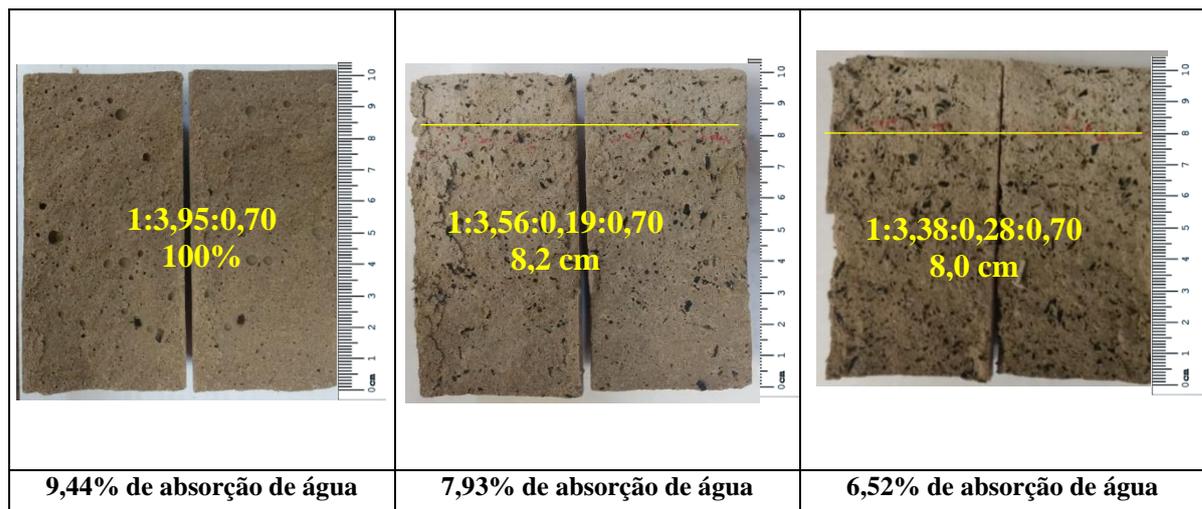
Tabela 24 – Caracterização física das placas cimentícias com partículas de borracha

Traço Unitário (cimento: areia: borracha: A/C)	IC (mm)	Teor de Ar Incorporado (%)	Absorção da Água por imersão (%)	Massa específica(g/cm³)	Índice de Vazios (%)
1:3,95:0,70	216,20	9	10,21	1,84	18,79
1:3,56:0,19:0,70	226,17	11	11,10	1,73	19,20
1:3,38:0,28:0,70	242,17	16	11,80	1,69	19,92

Fonte: Autora (2019)

A Figura 21, as misturas com borracha tiveram melhor desempenho no ensaio de absorção de água por capilaridade quando comparados com o traço referência (0% borracha), pois a ascensão de água nas argamassas sem borracha apresentaram subida de água de 100% no corpo de prova. Houve uma tendência decrescente nos valores de absorção de água por capilaridade conforme maiores porcentagens de borracha de pneu, corroborando o estudo de Maio et al. (2018), o qual afirma que o incremento na incorporação de ar nas argamassas com borracha de pneu criam microbolhas que interrompem os capilares, impedindo que a água percole por eles e assim, resultando em um melhor desempenho frente a ascensão de água.

Figura 21 - Ascensão de água por capilaridade após 72h de ensaio



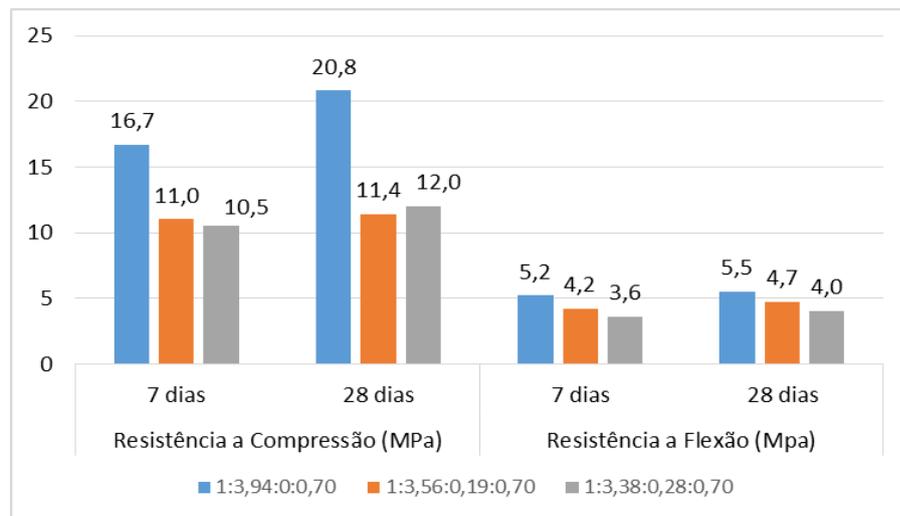
Fonte: Autora (2019)

Nota-se na Figura 22, quando assumido o consumo de cimento de 396,89 kg/m³, as argamassas cimentícias com borracha atingiram valores maiores e iguais a 4 MPa na

resistência a flexão aos 28 dias, embora com redução significativa da resistência mecânica quando comparada a argamassa referência, corroborando os resultados apresentados no estudo de dosagem.

A análise estatística (Tabela 25 e Tabela 26) indicou que o fator idade não surte efeito sobre a resistência a compressão axial, enquanto que para o fator teor de borracha houve a influência significativa nos resultados analisados. Assim, para a variável compressão simples, o traço contendo 15% de borracha não difere significativamente do traço contendo o teor de 10% de borracha de pneu, enquanto o traço referência (0% de borracha) difere das dosagens contendo 10% e 15% de borracha. Já para a variável flexão, os fatores teor de borracha e idade influenciaram significativamente nos resultados analisados, sendo que teores diferentes de borracha de pneu incorporada a matriz cimentícia produziram significativa redução na resistência à flexão; ou seja, no quesito resistência à flexão os teores de 10% e 15% diferem estaticamente entre si.

Figura 22 - Comportamento mecânico das placas cimentícias com partículas de borracha



Fonte: Autora (2019)

Tabela 25 - ANOVA dos resultados dos ensaios de compressão simples

Fator	Grau de liberdade	Soma quadrado	Média quadrado	F	Valor P
Teor de borracha	2	300,5	150,27	25,845	$2,85 \cdot 10^{-6}$
Idade	1	24,2	24,2	4,163	0,0547
Total	3	324,7			

Fonte: Autora (2019)

Tabela 26 - ANOVA dos resultados dos ensaios de flexão

Fator	Grau de liberdade	Soma quadrado	Média quadrado	F	Valor P
Teor de borracha	2	7,568	3,784	22,693	$2,85 \cdot 10^{-5}$
Idade	1	0,889	0,889	5,331	0,0367
Total	3	8,457			

Fonte: Autora (2019)

4.3 Processo de moldagem das placas cimentícias com partículas de borracha

Foram observadas dificuldades na fabricação das placas através do processo por prensagem, visto que houve interferência das partículas de borracha de pneu por serem constituídas de elastômeros e ter como característica alta flexibilidade e capacidade de retomar à sua forma original após receber pressão ou carga. Em alguns testes de moldagem, as argamassas que continham borracha apresentaram fissuradas e uma variação de tempo e de carga na conformação das placas. Sendo assim, o processo de fabricação por meio da mesa vibratória e por lançamento obtiveram melhores resultados de resistência à flexão, com teor máximo de 15% de borracha incorporado à placa.

Na Tabela 27, os índices de consistências (IC) relacionados a moldagem das placas com a mesma quantidade de borracha mostraram que o processo realizado por meio de mesa vibratória teve resultados de IC menores quando comparado ao processo realizado por meio de lançamento, fato devido à redução da relação água/cimento. Entretanto, houve aumento nos IC para mesma quantidade de água relativos ao mesmo processo de moldagem, conferindo para as argamassas os IC maiores quanto maior a quantidade de borracha de pneu. Este efeito pode ser explicado pela substituição de areia por partículas de borracha, que possuem propriedade de baixa absorção de água nos compósitos cimentícios, ou seja, a redução de areia e aumento de partículas de borracha diminuem a quantidade de materiais permeáveis a mistura, resultando maior quantidade de água livre a mistura. Também deve-se elencar que a incorporação de ar resultante da inclusão das partículas de borracha de pneu nas argamassas melhorou a trabalhabilidade da mistura.

Referente aos índices de vazios, os resultados da Tabela 27 mostraram um aumento em média 19% das argamassas com borracha sobre as argamassas referencias (0%), quando se migra do processo de moldagem vibrado para o prensado com a mesma quantidade de

borracha de pneu. Este aumento de vazios é resultante do processo de adensamento, o qual o processo mecânico de vibração permite a saída do ar, facilita o arranjo interno dos agregados e conseqüentemente, diminui os vazios internos da matriz cimentícia.

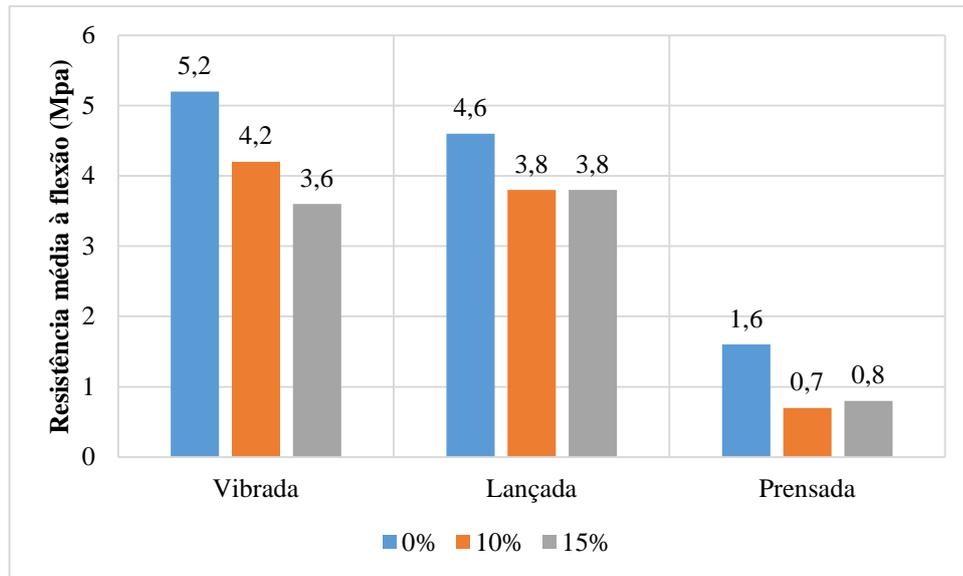
Tabela 27 - Caracterização físicas das placas cimentícias com partículas de borracha

Teor borracha	Tipo de Moldagem	IC (mm)	AI (%)	Absorção d'água (%)	Massa específica (g/cm³)	Índice vazios (%)
0%	Vibrada	216,20	11	10,21	1,84	18,79
	Lançada	264,50	12	10,68	1,84	19,70
	Prensada	-	-	22,59	1,67	37,50
10%	Vibrada	226,17	13,0	11,10	1,73	19,20
	Lançada	267,23	13,5	11,65	1,73	20,16
	Prensada	-	-	26,22	1,53	40,04
15%	Vibrada	242,17	13,0	11,80	1,69	19,92
	Lançada	270,33	13,5	11,88	1,68	20,00
	Prensada	-	-	23,70	1,56	37,09

Fonte: Autora (2019)

Os resultados de resistências média a flexão aos 7 dias de idade (Figura 23) para o processo de moldagem por prensagem apresentaram redução significativa diante aos demais processos, sendo que as placas moldadas por meio de vibração e de lançamento apresentaram comportamento físico-mecânico semelhantes, independente do teor de borracha. O baixo desempenho mecânico do processo de prensagem está relacionado a adoção de relação de a/c de 0,23, e embora a redução fizesse com que o consumo de cimento aumentasse em comparação a outros dois processos de moldagens, acredita-se que a quantidade de água não foi o suficiente para garantir a sua hidratação. As reduções de aproximadamente 50% da resistência a flexão nas argamassas com borracha quando comparada a argamassas referência (0%) e o aumento significativo do índices de vazios nas argamassas com borracha apontam para que a moldagem por prensagem na etapa de adensamento da mistura foi comprometida devido o uso de menores cargas adotadas para os compósitos cimentícios com borracha quando comparadas as argamassas com 0% de borracha. Desta forma, a carga média de prensagem não foi suficiente para garantir um maior empacotamento e rearranjo dos grânulos de borracha para a redução dos poros intergranulares, proporcionando o aumento no índice de vazios no processo prensado e conseqüentemente, placas mais frágeis.

Figura 23 - Resistência média a flexão aos 7 dias de idade das placas



Fonte: Autora (2019)

4.4 Comportamento térmico das placas

Neste item são apresentados os resultados e discussões do comportamento térmico das placas cimentícias com borracha de pneus e os subitens foram separados de acordo com as variáveis avaliadas. As variáveis resultantes das simulações termoenergéticas foram analisadas para ambas as cidades simultaneamente, a partir dos ambientes de permanência prolongada: sala/cozinha, quarto1 e quarto2.

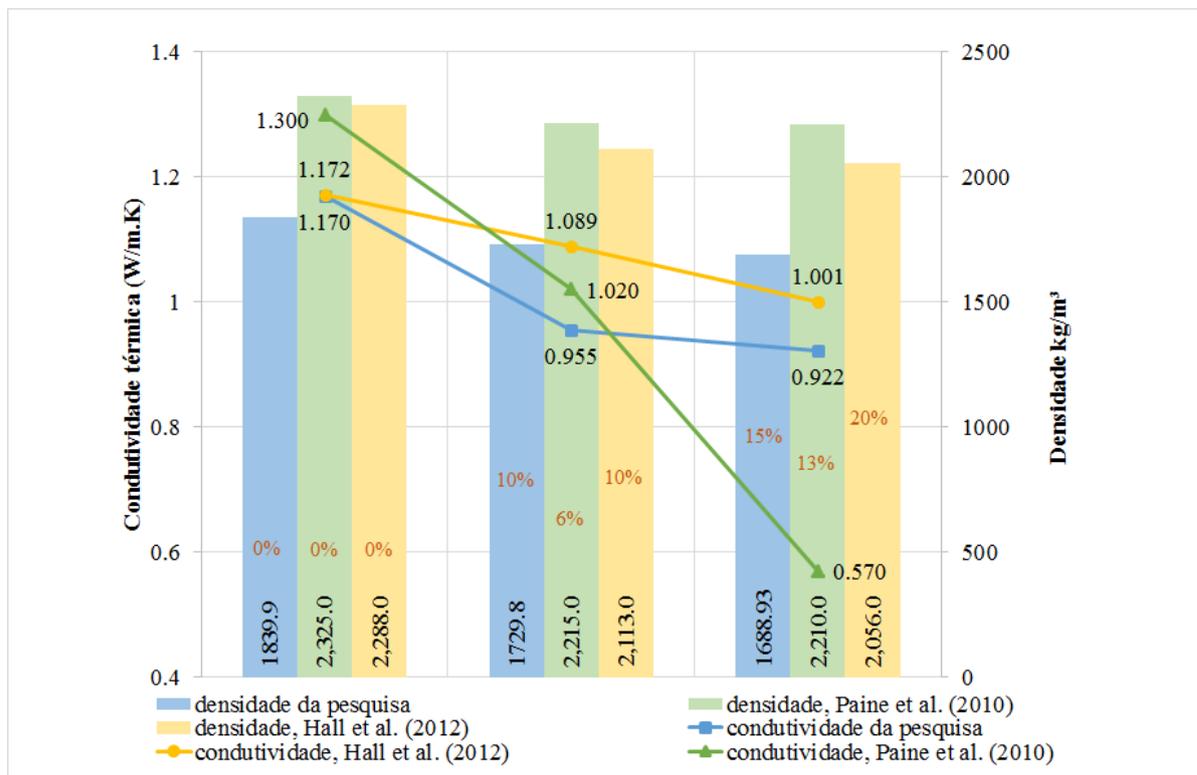
4.4.1 Condutividade Térmica

Os resultados de condutividade térmica apresentaram reduções significativas nas argamassas com borracha quando comparada a argamassa de referência, com redução aproximadamente de 21% para as argamassas com 15% de borracha e 18% para as argamassas com 10% de borracha (Figura 24). Isto se deve ao incremento de porosidade que favorece a diminuição da condutividade térmica nos compósitos cimentícios (SAHA, 2019). Esta maior quantidade de poros na argamassa com borracha de pneu foi evidenciada pelos valores inferiores nas massas específicas nos compósitos cimentícios com borracha de pneu (média de 1,71 g/cm³) quando comparados a argamassa sem borracha (1,84 g/cm³).

Na Figura 24 estão alguns resultados de condutividade térmica e densidade estudados por diferentes autores em compósitos cimentícios com borracha de pneu e também os

resultados encontrados na presente pesquisa. Observa-se que a incorporação de borracha de pneu aos compósitos cimentícios confere uma redução significativa na densidade e na condutividade, quando comparado aos concretos e argamassa com agregado mineral. A redução da condutividade térmica deve-se a característica intrínseca da borracha quanto a condução de calor, transferindo parcialmente esta característica ao compósito, além de um teor maior de ar incorporado encontrado nas amostras de borracha (ALBUQUERQUE, 2009).

Figura 24 - Condutividade térmica das placas



Fonte: Autora (2019)

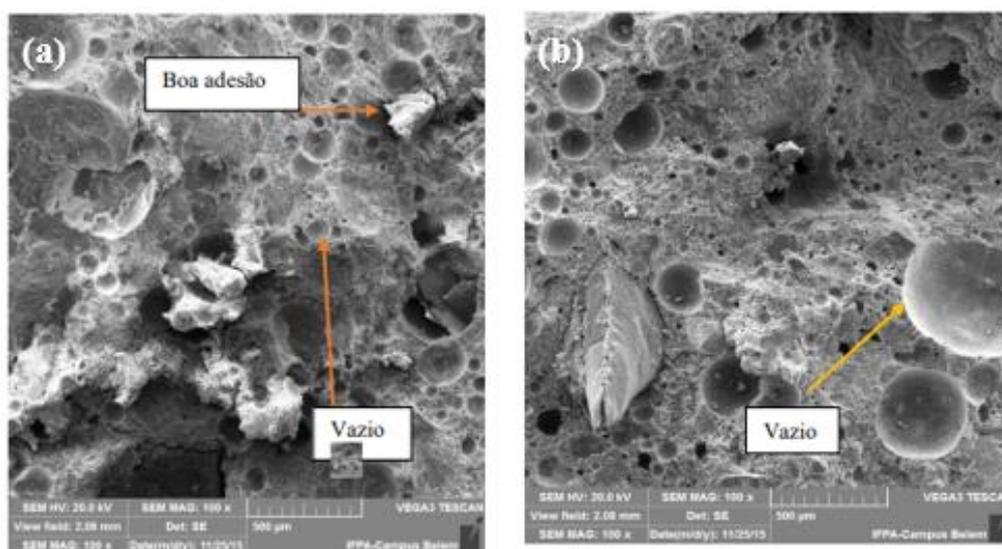
Segundo Eiras et al. (2014), a redução da condutividade em argamassas e concretos com borracha de pneu se deve à diferença de condutividade entre o agregados silicosos (2,45 W/m.K a 5,20 W/m.K) e as partículas de borracha de pneu (0,25 W/m.K a 0,50 W/m.K). Entretanto a condutividade térmica não depende exclusivamente das propriedades térmicas dos seus constituintes, mas da porosidade, teor de umidade, grau de cristalização e estrutura celular do compósito (HALL et al., 2012).

A tendência de melhoramento na propriedade de isolamento térmico pelo uso de borracha pode ser atribuída a retenção de ar na mistura causado pela a propriedade de não molhamento da borracha (hidrofóbica), desta forma a combinação de aumento de vazios e retenção de ar inibe o fluxo de calor (SAHA et al., 2019). Além do que dentro do mesmo tipo

de agregado, as argamassas mais porosas levam a produzir resultados mais baixos de condutividade devido à baixa condutividade térmica do ar, assim poros inferiores 20 μm são mais propensos a redução da condutividade em compósitos cimentícios, denotando que a morfologia da matriz é mais relevante para a condutividade térmica do que a composição química de seus componentes (MENDES et al., 2019).

A Figura 25 mostram as imagens do microscópio eletrônico de varredura (MEV). Por meio das análises das imagens foi constatado o aumento da quantidade de microporos no acréscimo de 5% de borracha de pneu, comprovando o aumento de porosidade entre os compósitos cimentícios.

Figura 25 – Imagens MEV da fratura de compósito cimentício com borracha de pneu inservível.



(a) Concreto com 5% de borracha de pneu em substituição em massa da areia
(b) Concreto com 10% de borracha de pneu em substituição em massa de areia

Fonte: Sousa et al. (2016)

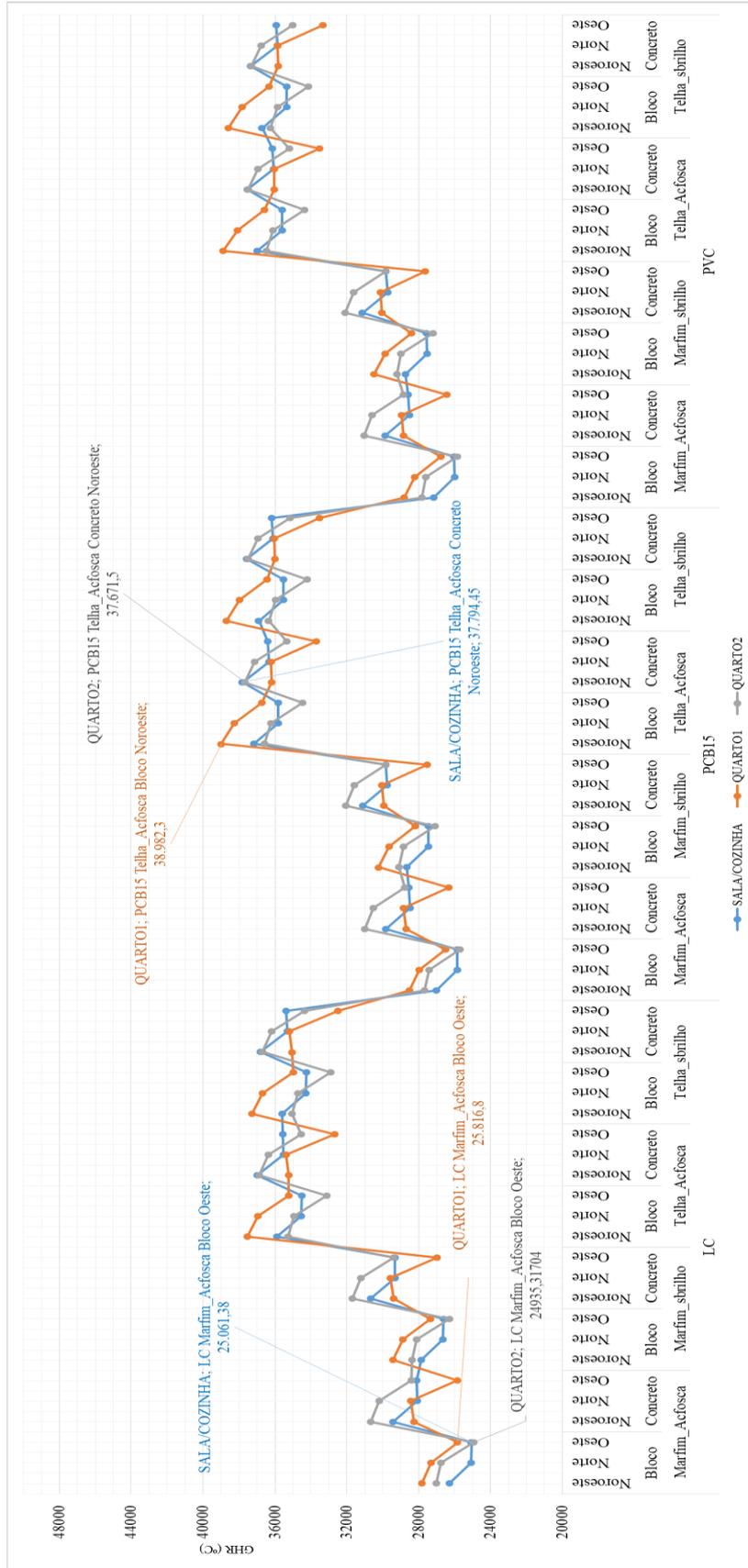
4.4.2 Avaliação do indicador de graus-hora de resfriamento

As Figuras 26 e 27 apresentam os resultados dos graus horas para resfriamento (GHR) das 72 combinações. O maior valor de GHR para às cidades de Corumbá e Campo Grande ocorreu no quarto1, com a envoltória composta por parede de bloco cerâmico, orientação solar Noroeste e cobertura com forro de PCB15 para Corumbá e forro de PVC para a cidade de Campo Grande. Independentemente da cidade e do tipo de parede, a cor marfim do telhamento ($\alpha = 0,708$) se mostrou significativa na composição de menor valor de GHR em todos os ambientes. Quando foi avaliada a influência do tipo de forro por ambiente de permanência prolongada, embora o forro de LC estivesse presente em todos os cenários com o

menor valor de GHR, é possível notar que os patamares para todos os forros tiveram valores de GHR próximos, denotando um desempenho térmico semelhante dos demais forros na interação com as envoltórias parede e cobertura.

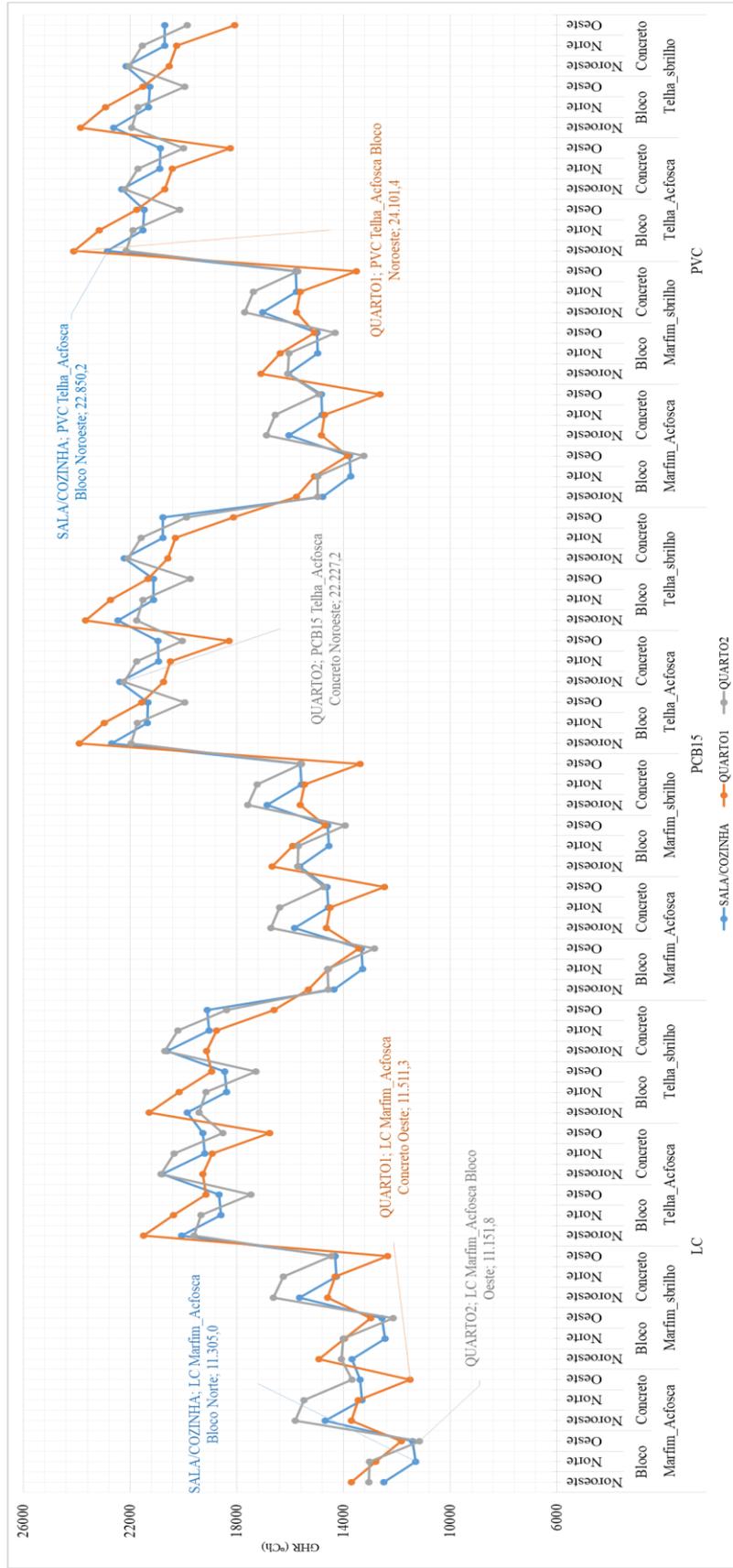
Mazzaferro et al. (2014) encontraram em seus estudos para a cidade de São Luiz (Zona bioclimática 8) 32.636 graus-hora de resfriamento para uma edificação composta de parede de bloco cerâmicos e cobertura em telha cerâmica com forro de laje de concreto maciça. Este resultado quando comparado ao presente estudo realizado no mesmo zoneamento bioclimático com composição construtiva semelhante apresentou mais 1.861,34 graus-hora de resfriamento (Tabela 28 do APÊNDICE A), distribuindo esta diferença ao ano em 0,21 graus-hora para resfriamento para cada hora, assim, denotando comportamento semelhante aos GHR encontrado para a cidade de Corumbá.

Figura 26- Extremos do GHR para os ambientes simulados – Corumbá



Fonte: Autora (2019)

Figura 27 - Extremos do GHR para os ambientes simulados – Campo Grande



Fonte: Autora (2019)

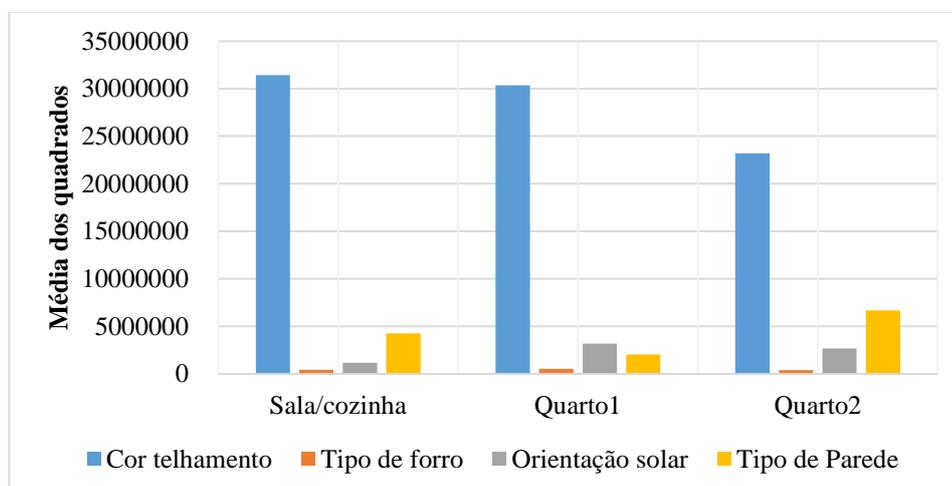
Ao realizar a análise variância a partir dos resultados da Tabela 29, Tabela 30, e Tabela 31 para a cidade de Corumbá e em Campo Grande nas Tabelas 32, 33 e 34 do APÊNDICE B foram gerados indicadores para os fatores cor de telhamento, tipo de forro, orientação solar e tipo de parede em relação aos graus-hora para resfriamento dos ambientes de permanência prolongada (sala/cozinha, quarto1 e quarto2).

Para a cidade de Corumbá nos ambientes quarto1 e quarto2, os fatores cor de telhamento, orientação solar e tipo de parede influenciaram significativamente os resultados de GHR, entretanto para a sala/cozinha somente cor do telhamento e tipo de parede atestam-se o efeito significativo. Portanto, estatisticamente, os valores finais da avaliação do GHR por ambiente de permanência prolongada não sofrem interferência relevante pelo o tipo de forro nas análises realizadas.

Para a cidade de Campo Grande no ambiente quarto1 todos os fatores (cor de telhamento, tipo de forro, orientação solar e tipo de parede) influenciaram significativamente os resultados do GHR, sendo que no quarto2 houve a exceção para o fator tipo de parede, que não influenciou expressivamente na resultante GHR. Entretanto, para a sala/cozinha, somente a cor do telhamento e tipo de forro atestam-se o efeito significativo. Portanto, estaticamente, os valores finais da avaliação do GHR por ambiente de permanência prolongada sofrem interferência relevante pelo tipo de forro aplicado.

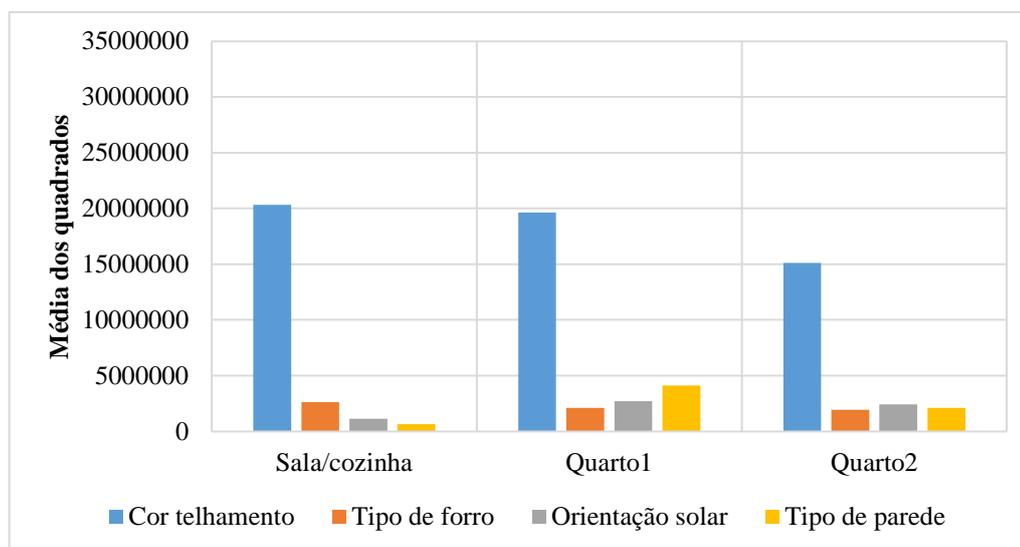
A variação na cor do telhamento é o fator mais relevante em relação graus-hora de resfriamento nos 3 ambientes para análises realizadas, como pode ser visto nas Figura 28 e 29 que possuem os gráficos com as médias dos quadrados por fator. Desta forma, a cor clara (marfim) denota resultados menores quando comparadas a cor escura (telha) para os GHR.

Figura 28 – Gráfico do indicador média dos quadrados da ANOVA por ambiente – Corumbá



Fonte: Autora (2019)

Figura 29 – Gráfico do indicador média dos quadrados da ANOVA por ambiente – Campo Grande



Fonte: Autora (2019)

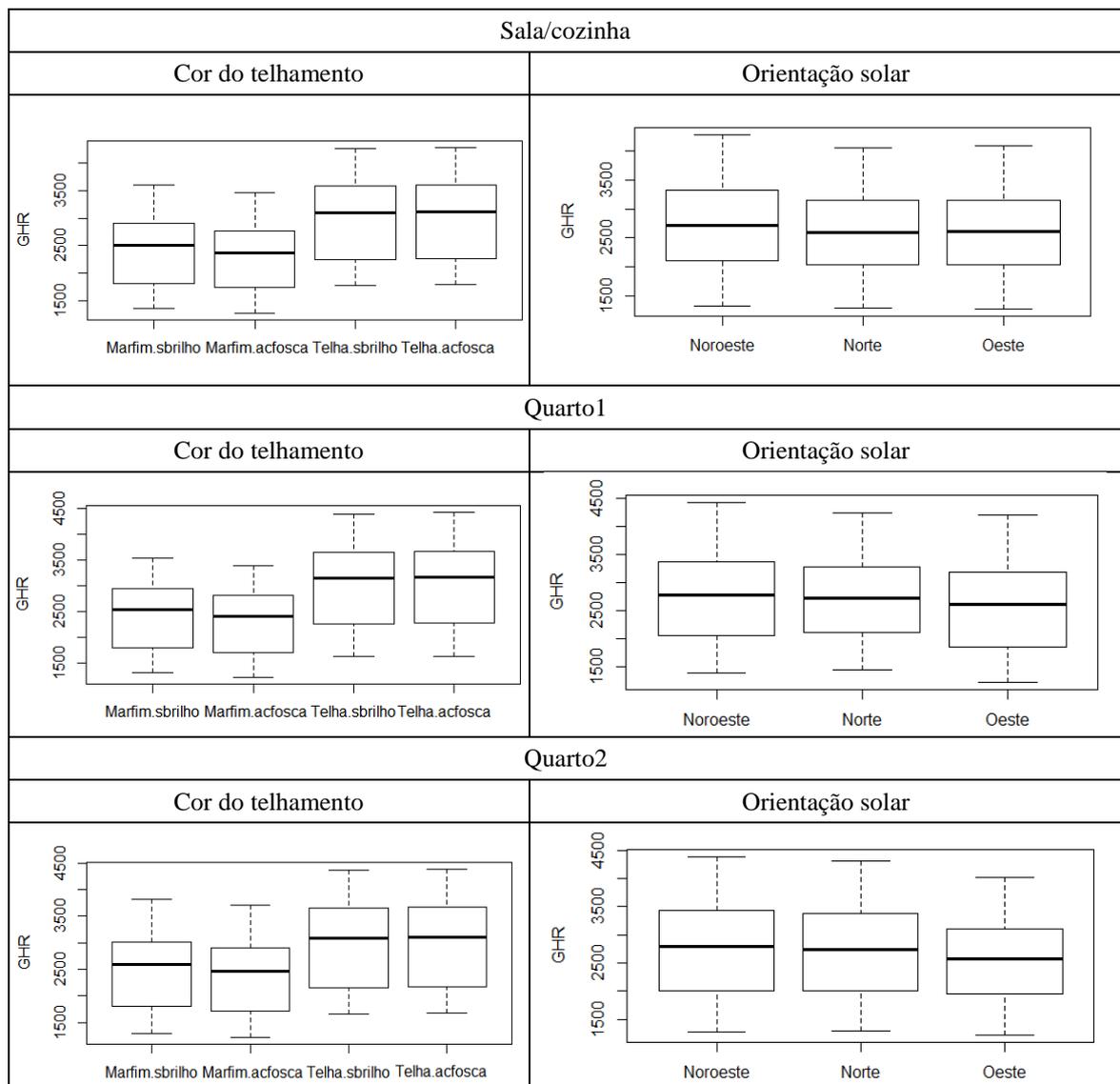
Nas Tabelas 35 a 42 do APÊNDICE C estão discriminados, respectivamente, os resultados da análise de influência dos fatores cor do telhamento, tipo de forro, orientação solar e tipo de parede no valor de graus-hora de resfriamento para ambas as cidades analisadas. Pela análise das comparações indicada na coluna valor de P, em todos os ambientes de permanência prolongada nas cidades de Corumbá e Campo Grande, a cor telha acrílica fosca ($\alpha = 0,708$) apresenta valores estaticamente equivalentes a cor telha semi-brilho ($\alpha = 0,696$) e entre os forros, o forro de PVC ($U = 2,08 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) não difere significativamente do forro de placas cimentícias de borracha de pneu com 15% de borracha ($U = 2,16 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Analisando a absorvância solar e a transmitância adotada nas cidades analisadas em relação ao mesmo fator observado, existe uma diferença não significativa quando comparados estas propriedades térmicas, o que pode ter ocasionado a similaridade no resultado de GHR entre estes forros.

Desta forma, com base na interpretação das informações obtidas por meio do teste de Tukey e com o auxílio dos gráficos de caixas indicado nas Figuras 28 e 29, que contém os desempenhos dos GHR respectivamente das cidades de Corumbá e Campo Grande a partir do fator cor do telhamento, observou-se pelas medianas que em todos os ambientes de permanência prolongada das cidades de Corumbá e Campo Grande, a cor marfim prevaleceu com os menores valores para GHR em comparação com a cor telha. Este comportamento foi relatado nos estudos realizados por Peralta (2006), onde o telhamento que recebeu a aplicação de tinta látex acrílico branco apresentou diminuição das temperaturas internas do ambiente,

sendo aproximadamente 68% para telhas de fibrocimento, 60% para telhas de aço e 29% para as telhas cerâmicas. Em superfícies exteriores polidas ou pintadas em cores claras ocorre reflexão da grande parte da radiação solar incidente, e conseqüentemente, a redução da quantidade de energia absorvida (PERALTA, 2006).

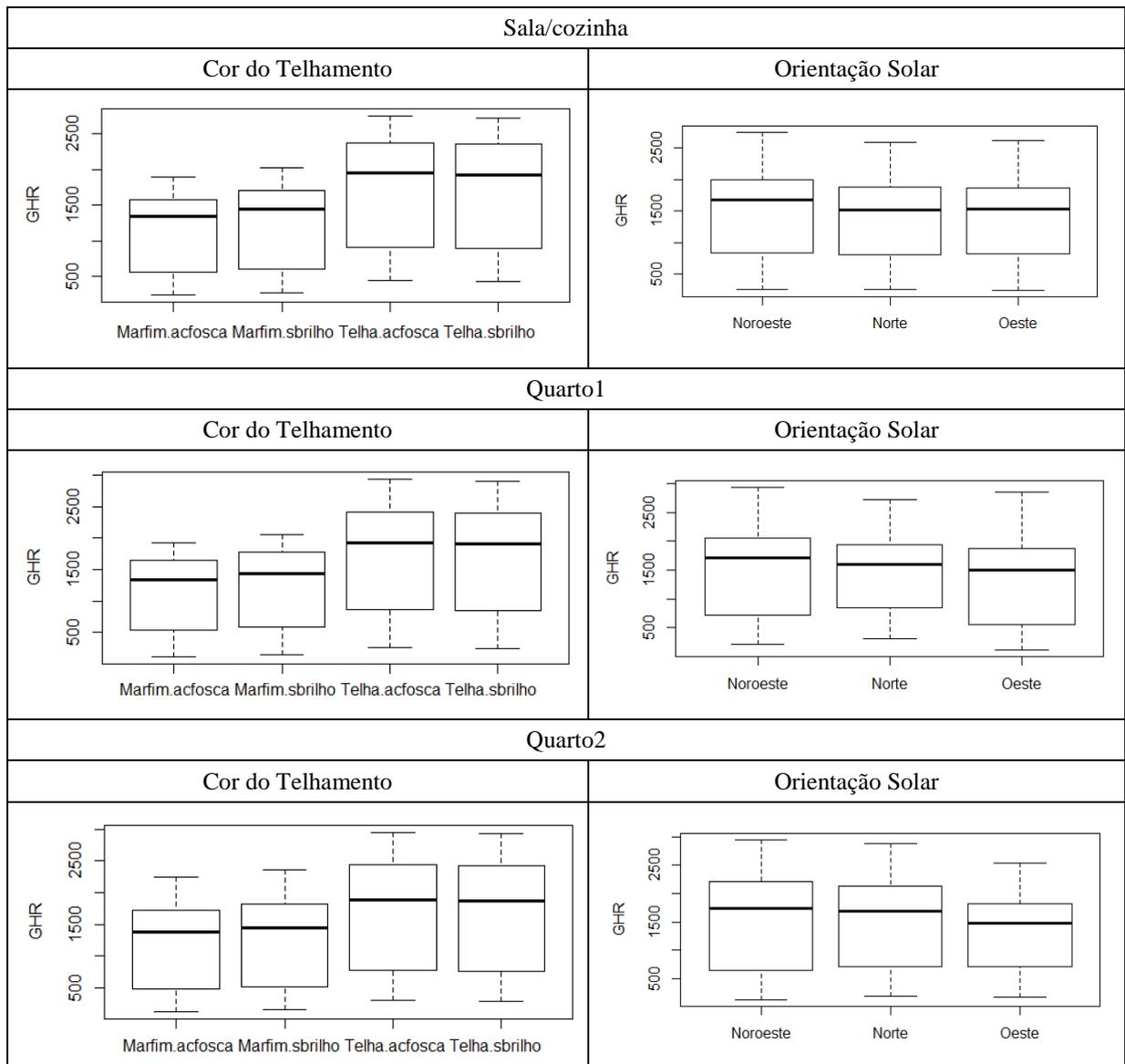
As Figuras 30 e 31 apresentam-se os gráficos de caixa do GHR para as análises de ambas as cidades através do fator orientação solar da fachada. Observou-se que nos três ambientes (sala/cozinha, quarto1 e quarto2) as medianas dos resultados nas duas cidades estudadas é menor para orientação de fachada Oeste, entretanto a fachada Noroeste possui a mediana dos resultados maior para todos os ambientes estudados.

Figura 30 - Gráfico de caixa do GHR por ambiente de permanência prolongado em relação a cor do telhamento e orientação solar da cidade de Corumbá



Fonte: Autora (2019)

Figura 31 - Gráfico de caixa do GHR por ambiente de permanência prolongado em relação a cor do telhamento e orientação solar da cidade de Campo Grande



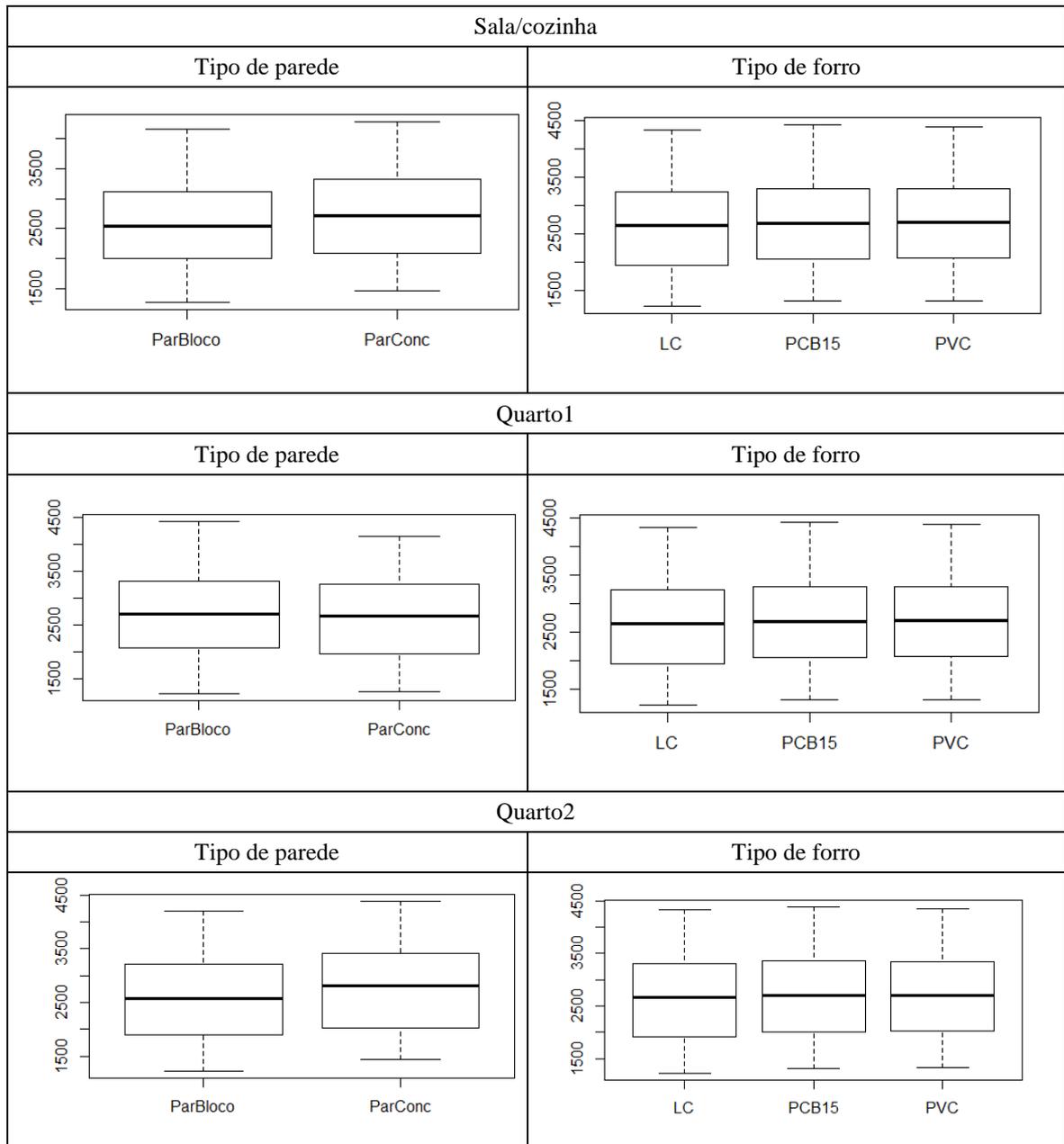
Fonte: Autora (2019)

Analisando o indicador de graus-hora de resfriamento em relação ao tipo de parede para as cidades de Corumbá (Figura 32) e Campo Grande (Figura 33), tem-se que a mediana dos resultados é menor para a parede constituída de blocos cerâmicos nos ambientes sala/cozinha e quarto2, porém para quarto1 a mediana dos resultados prevaleceu discretamente maior para parede de blocos cerâmicos.

Os gráficos de caixa que estão apresentados nas Figuras 32 e 33 corroboram com a similaridades entre os resultados do GHR avaliados pelo teste de Tukey entre os forros de

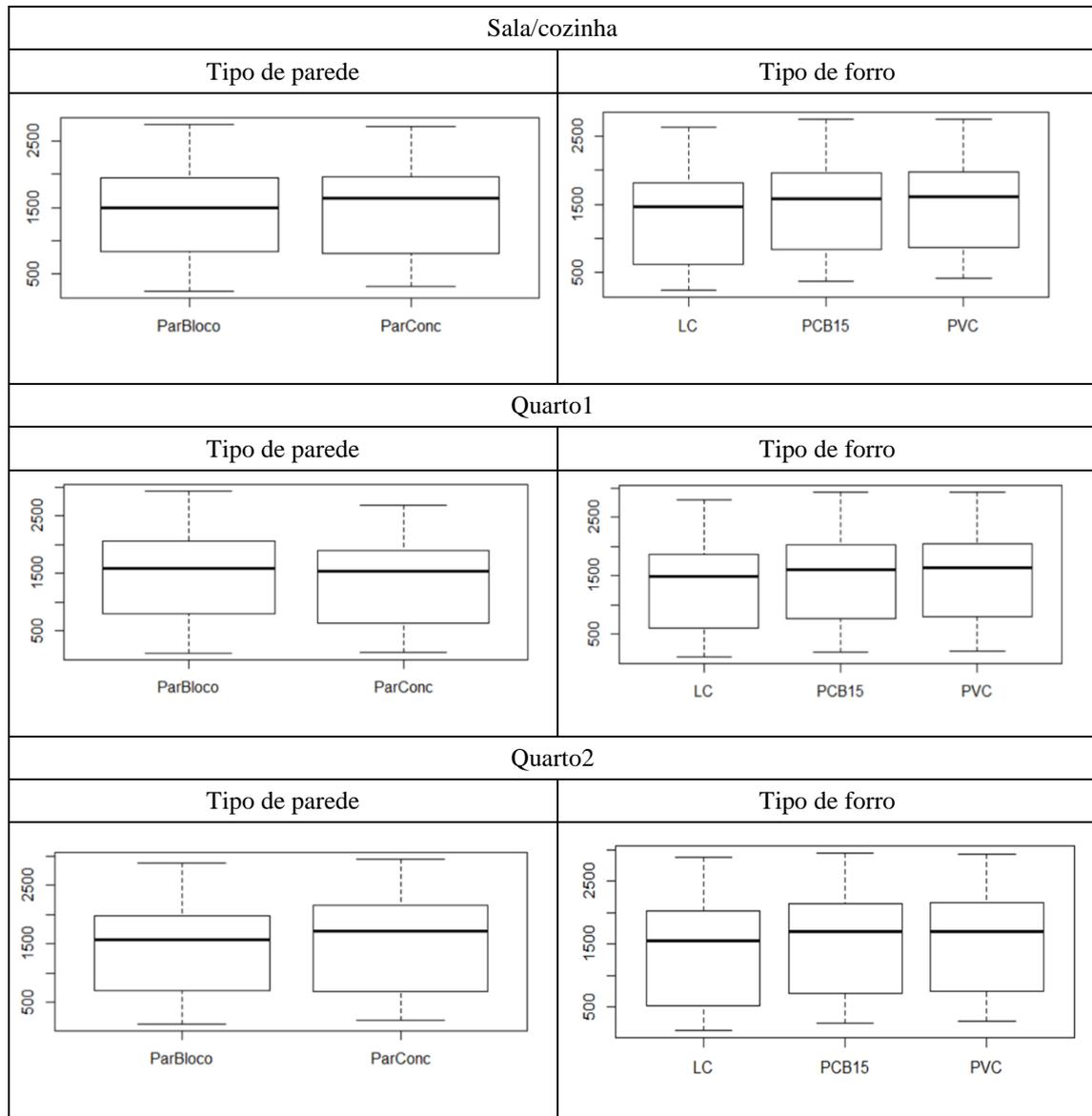
PVC e a placa PCB15, denotando para as lajes de concreto maciça resultados de medianas inferiores aos demais forros.

Figura 32 - Gráfico de caixa do GHR por ambiente de permanência prolongado em relação ao tipo de parede e tipo de forro em Corumbá



Fonte: Autora (2019)

Figura 33 – Gráfico de caixa do GHR por ambiente de permanência prolongado em relação ao tipo de parede e tipo de forro em Campo Grande



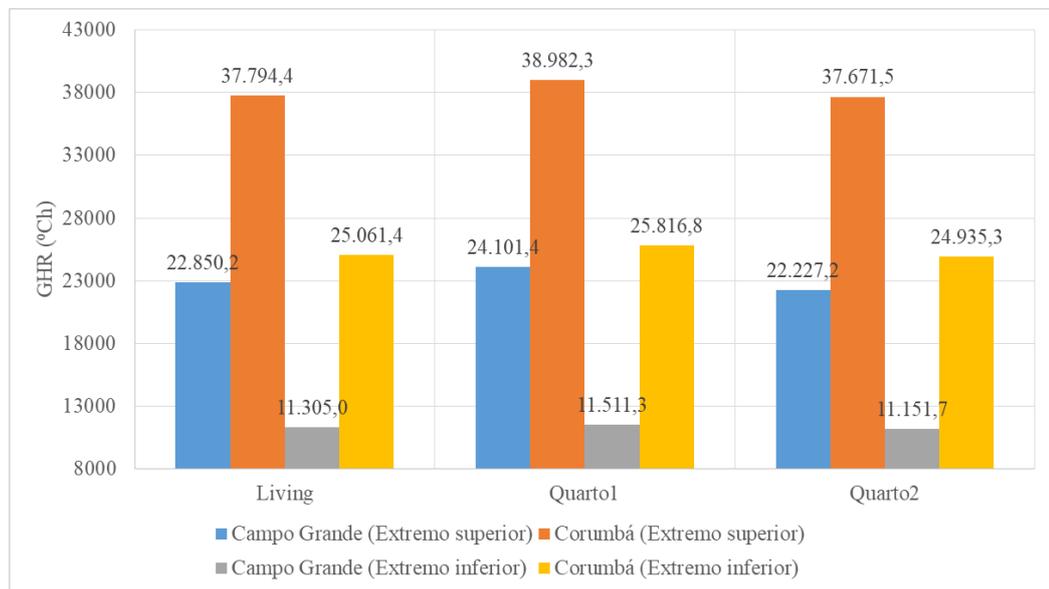
Fonte: Autora (2019)

De modo geral, pode-se concluir para as cidades de Corumbá e Campo Grande que a cor de revestimento externo do telhamento em marfim, forro de laje de concreto e orientação solar a oeste produziram menores resultados para o GHR, entretanto, a combinação de cor de revestimento externo do telhamento na cor telha e orientação solar da fachada a noroeste obtiveram maiores resultados de GHR.

O comportamento dos sistemas construtivos simulados em relação ao parâmetro graus-hora de resfriamento para a cidade de Campo Grande mostrou-se de forma semelhante quando

comparado a cidade de Corumbá, porém os extremos do GHR no clima de Campo Grande tiveram valores inferiores aos encontrados para o clima de Corumbá, bem como o fator tipo de forro influenciou significativamente nos resultados do GHR em todos os ambientes simulados na cidade de Campo Grande (Figura 34). Esta semelhança de comportamento com diferenças nos valores de GHR mostrou que as simulações tiveram interferência do rigor climático das cidades analisadas, sendo que o clima de Campo Grande possui temperaturas mais amenas quando comparada as temperaturas de Corumbá e por pertencerem diferentes zonas bioclimáticas.

Figura 34 - Extremos do GHR para os ambientes simulados nas cidades de Campo Grande e Corumbá.



Fonte: Autora (2019)

Na Tabela 43 tem-se a disposição de cada cenário composto pela cor que se destacou positivamente no desempenho do GHR. O cenário raiz com a cor de telhamento marfim e orientação da fachada a Oeste, denominada de A e derivando outros cenários por meio de três tipos de forro e dois tipos de parede. Outro cenário raiz denominado de B derivou-se de forma semelhante de A, porém, a partir da cor telha para o telhamento e fachada a noroeste, com as mesmas variações entre os fatores propostos anteriormente (Tabela 44).

Tabela 43 - Descrição dos cenários com a composição na cor do telhamento marfim acrílico fosco e orientação solar Oeste.

Nomenclatura	Cor do telhamento	Forro	Orientação solar	Parede
A1	Marfim acrílico fosco	LC	Oeste	Bloco
A2				Concreto
A3		PCB15		Bloco
A4				Concreto
A5		PVC		Bloco
A6				Concreto

Fonte: Autora (2019)

Tabela 44 - Descrição dos cenários com a composição na cor do telhamento telha acrílico fosco e orientação solar Noroeste.

Nomenclatura	Cor do telhamento	Forro	Orientação solar	Parede
B1	Telha acrílico fosco	LC	Noroeste	Bloco
B2				Concreto
B3		PCB15		Bloco
B4				Concreto
B5		PVC		Bloco
B6				Concreto

Fonte: Autora (2019)

4.4.3 Avaliação do atraso térmico

No dia típico a cidade de Corumbá alcançou a temperatura máxima de 35,5 °C às 16h e mínima de 25,6 °C às 3h resultando uma amplitude térmica de 9,9 °C e em Campo grande a temperatura máxima foi de 33,5 °C às 13h e mínima de 25 °C às 5h e amplitude térmica de 8,5 °C. As Figuras 35 e 36 mostram as análises do atraso térmico dos cenários derivados da cor do telhamento marfim acrílico fosco com orientação da fachada a Oeste combinado com os três tipos de forros nas cidades, respectivamente, de Corumbá e Campo Grande, tanto para parede de blocos cerâmicos quanto para parede monolítica de concreto.

Observa-se na cidade de Corumbá (Figura 35) que as temperaturas internas em todos os ambientes avaliados estão superiores as temperaturas externas para os cenários que contém forro de PCB15 e PVC, independentemente do tipo de parede, entretanto na cidade de Campo Grande (Figura 34) as temperaturas internas em todos os ambientes avaliados estão inferiores as temperaturas externas no intervalo das 09h às 15h para o cenário LC com parede constituída de bloco cerâmico (A1), e para o cenário (A2) em parede monolítica de concreto o intervalo é das 10h às 15h. Porém, há uma redução do intervalo para os cenários constituídos de paredes de blocos cerâmicos e forro de PCB15 ou PVC, que ocorre entre 9h às 14h. Os cenários constituídos de paredes de concreto maciça com forro de PCB15 (A4) tiveram um intervalo de aproximadamente 5h em todos os ambientes de temperatura interna inferior a

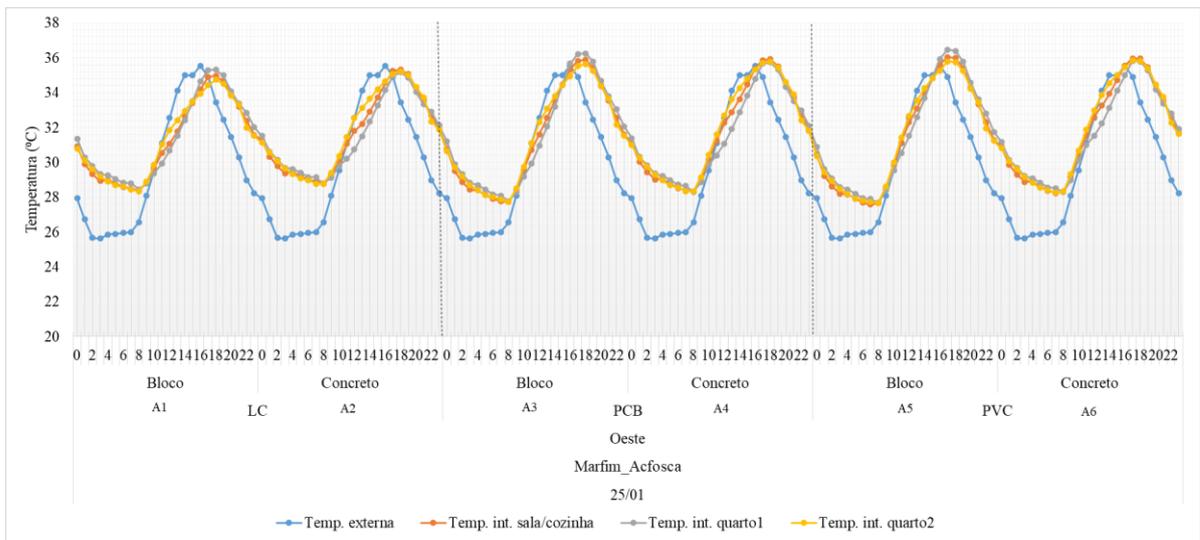
temperatura externa e para o cenário com forro de PVC (A6) tiveram em todos os ambientes avaliados um intervalo aproximadamente de 4,5h com temperatura interna menor que a temperatura externa.

Para a cidade de Corumbá (Figura 36) as temperaturas máximas dos três ambientes ocorreram às 18h com os forros de laje de concreto e placas cimentícias com 15% de borracha de pneu, computando assim, 2h de atraso térmico para os cenários A1, A2, A3 e A4. Já para o cenário com forro de PVC, as temperaturas internas máximas dos ambientes ocorreram às 17h, significando 1h de atraso térmico para os cenários A5 e A6. Em relação ao amortecimento térmico ocorreu somente para os cenários com laje de concreto, com o valor de amortecimento positivo de aproximadamente 1,5% (0,5 °C) para o ambiente com parede de bloco e 0,8% (0,3 °C) para o ambiente com parede de concreto maciça. Entretanto, quando comparado as temperaturas internas entre os ambientes com forro de laje e os demais, o forro PCB15 no ambiente com parede de blocos cerâmicos teve um acréscimo de 2,6% e de 1,6% para ambiente com paredes monolíticas de concreto. Para o forro de PVC obteve-se um aumento de 3,1% para os ambientes com paredes de blocos cerâmicos e de 1,8% para o ambiente com parede de concreto, o que tendência a temperatura interna superior para as paredes de blocos cerâmicos quando combinados com forro de PVC ou PCB15, fachada a Oeste e cor do telhamento marfim a para o dia observado.

As temperaturas máximas dos três ambientes de permanência prolongada das moradias analisadas da cidade de Campo Grande (Figura 36) ocorreram às 16h, independentemente do tipo de forro e do tipo de parede, resultando em um atraso térmico de 3h em todos os cenários, porém, o forro de laje de concreto possui picos inferiores nas temperaturas máximas alcançadas no interior dos ambientes de permanência prolongado em relação aos demais forros. Em relação ao amortecimento térmico, em todos os cenários de Campo Grande houve um amortecimento térmico positivo com aproximadamente 6,0% (2,0°C), independentemente do tipo de parede. Os cenários com forro de PCB15 obtiveram 3% (1,0°C) de amortecimento térmico, tanto em parede de blocos cerâmicos, quanto em parede de concreto maciça, sendo que o mesmo ocorreu no forro de PVC, porém com 2% (0,75) no cenário com parede de bloco cerâmico. Entretanto, quando comparado as temperaturas internas entre os ambientes com forro de laje e os demais, o forro de PCB15 há um aumento de aproximadamente 1,0°C para o cenário com paredes de blocos cerâmico (A3) e 0,8°C em paredes monolíticas de concreto (A4); e no forro de PVC o aumento para o cenário com parede de bloco cerâmico (A5) foi de 1,3°C e de 0,9 °C em paredes de concreto. Portanto, independentemente do material

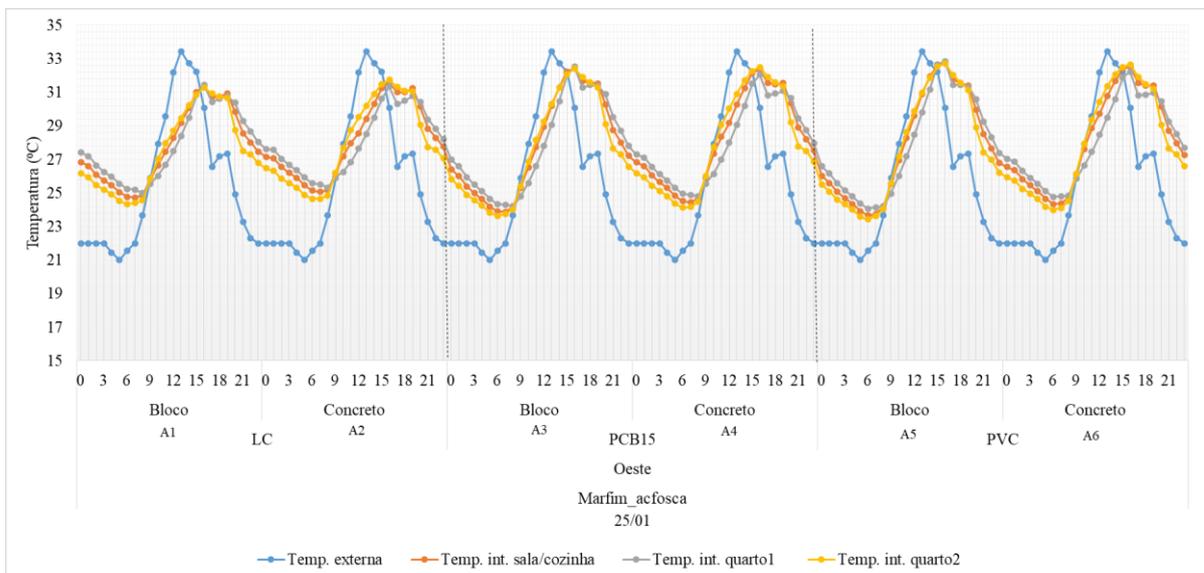
constituente da parede, o forro em placas cimentícias com 15% de borracha tiveram comportamento semelhante aos cenários com forro de PVC em relação as temperaturas internas nos ambientes analisados; e quando comparado em um mesmo cenário, independentemente do tipo de forro, em relação a parede não há variações significativas nas temperaturas internas nos ambiente analisados com fachada a Oeste e cor do telhamento marfim a para o dia observado.

Figura 35 - Análise do atraso térmico das moradias na cidade de Corumbá para cor marfim acrílico fosco combinado com orientação da fachada a Oeste.



Fonte: Autora (2019)

Figura 36 - Análise do atraso térmico das moradias na cidade de Campo Grande para cor marfim acrílico fosco combinado com orientação da fachada a Oeste.



Fonte: Autora (2019)

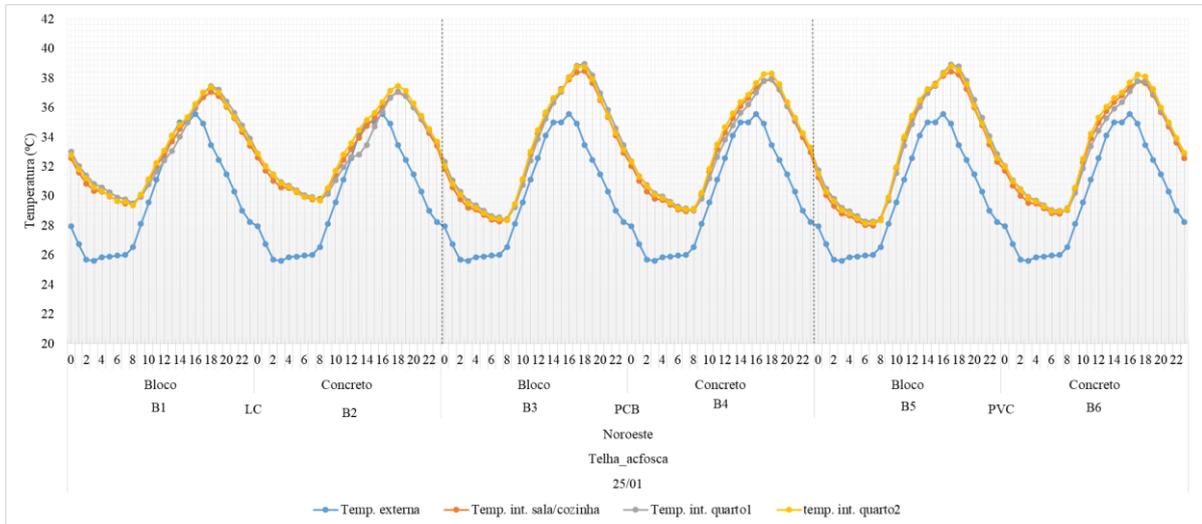
As Figuras 37 e 38 contém os gráficos das análises dos atrasos térmicos internos para as cidades de Corumbá e Campo Grande dos ambientes sala/cozinha, quarto1 e quarto2 com os cenários composto revestimento externo do telhamento na cor telha acrílica fosca com orientação da fachada a Noroeste derivando os cenários B1, B2, B3, B4, B5 e B6. As análises das temperaturas internas para o clima da cidade de Corumbá permaneceram superiores a temperatura externa, entretanto na cidade de Campo Grande as temperaturas internas foram superiores a externa somente para os cenários com forro de PCB15 e PVC independentemente do tipo de parede, tiveram temperaturas máximas internas próximas a 35,4 °C.

As temperaturas máximas para a cidade de Corumbá (Figura 37) nos ambientes de permanência prolongada com forro PCB15 e LC foram às 18h, resultando em um atraso térmico de 2h para os cenários B1, B2, B3 e B4, porém os ambientes sala/cozinha e quarto2 para os cenários os B5 e B6 com forro de PVC e independente do tipo de parede, computou 1h hora de atraso quando suas temperaturas máximas interna ocorreram as 17h, no quarto1 com o cenário B5 (parede de bloco) obteve 1h de atraso térmico interno, e no cenário B6 um atraso térmico de 2h. Ainda na cidade de Corumbá, os ambientes de permanência com forro PCB15 e LC atingiram as temperaturas máximas às 16h, resultando um atraso térmico de 3h para os cenários B1, B2, B3 e B4; porém os ambientes sala/cozinha e quarto2 para os cenários B5 e B6 com forro de PVC computou 2h de atraso quando suas temperaturas máximas internas ocorreram as 15h, e no quarto1 com o cenário B5 (parede de bloco) e B6 (parede de concreto) obteve 3h de atraso térmico.

Os valores de amortecimento térmico foram negativos para o clima de Corumbá, sendo que as diferenças de temperatura interna e externa foram menores para a laje de concreto com 5,1% (1,7 °C) para parede de bloco cerâmico e para parede de concreto foi de 5,4% (1,6 °C). Os forros PCB15 e PVC tiveram desempenho semelhante com amortecimento de 9,0% (3,1°C) em ambientes com paredes de bloco cerâmicos e 7,6% (2,3 °C) em ambientes com paredes de concreto.

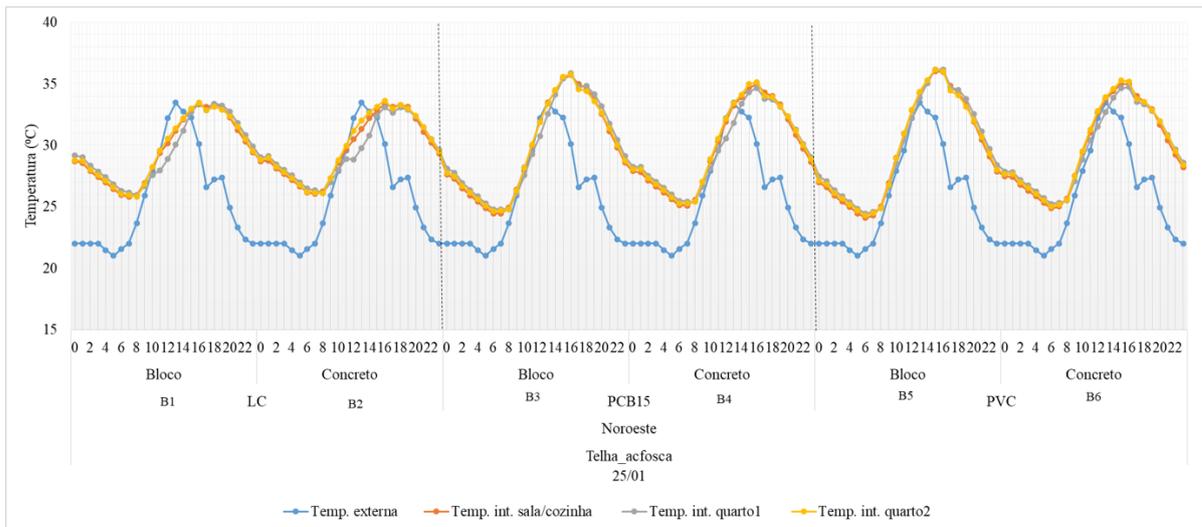
As diferenças de temperatura interna e externa para o clima de Campo Grande também foram menores para a laje de concreto com 0,4% (0,13 °C) para parede de bloco cerâmico e para parede de concreto foi de 0,5% (0,18 °C). Os forros PCB15 apresentaram valores de amortecimento de 6,8% (2,3°C) em ambientes com paredes de bloco cerâmicos e 4,2% (1,4 °C) em ambientes com paredes de concreto; e nos ambientes com forro de PVC a diferença de temperatura interna e externa foi de 7,7% (2,6°C) com cenário em parede de bloco cerâmico e 4,5% (1,5°) para o cenário com parede de concreto (Figura 36).

Figura 37 – Análise do atraso térmico das moradias na cidade de Corumbá para cor telha acrílico fosco combinado com orientação da fachada a Noroeste.



Fonte: Autora (2019)

Figura 38 – Análise do atraso térmico das moradias na cidade de Campo Grande para cor telha acrílico fosco combinado com orientação da fachada a Noroeste.



Fonte: Autora (2019)

Portanto, os cenários contendo cor do telhamento marfim acrílico fosco obtiveram temperaturas internas nos ambientes de permanência prolongadas inferiores as temperaturas internas dos cenários que contém a cor telha no revestimento externo do telhamento, corroborando o desempenho apresentado no parâmetro GHR. Em relação aos tipos de forros, o forro laje de concreto proporcionou menores picos de temperaturas máximas diante os forros de PCB15 e de PVC, sendo que este desempenho pode estar atrelado a capacidade térmica superior que a LC possui perante aos outros materiais constituintes dos forros estudados. Porém, quando comparado o atraso térmico entre as duas cidades analisadas,

houve um aumento nos valores de atraso na cidade de Campo Grande quando comparado a cidade de Corumbá, como também, para a cor do telhamento em marfim na cidade de Campo Grande tiveram um atraso térmico único 3h, independentemente do tipo de envoltória, do forro e da orientação solar. Novamente, destaca-se que o desempenho dos sistemas construtivos nas simulações tiveram influência dos diferentes zoneamentos bioclimáticos estudados.

Destaca-se que Didoné et al. (2016) apontaram estas mesmas relações, visto que após fazerem monitoramento em casas de parede monolítica de concreto na cidade de Corumbá, encontraram para habitação com cobertura com forro em PVC temperaturas internas até 1,7°C mais elevada que a temperatura do ar externo, bem como para casas com cobertura com forro em laje de concreto um amortecimento de 2°C a 3°C e atraso térmico superior quando comparado ao forro de PVC, atribuindo assim, os resultados superiores do atraso térmico para cobertura com forro de laje de concreto devido a considerável massa térmica quando comparado ao forro de PVC.

4.4.4 Avaliação dos fluxos de calor na cobertura

Nas Figuras 39 e 40 encontra-se o gráfico do fluxo do calor dos cenários com a cor do telhamento marfim combinado com a orientação da fachada a Oeste, respectivamente, das cidades de Corumbá e Campo Grande, dos cenários A1, A2, A3, A4, A5 e A6. Observa-se para as cidades analisadas que há uma redução no fluxo de calor quando o cenário é composto por LC, independentemente do tipo de parede; entretanto, os maiores picos de fluxo de calor foram alcançados para os cenários composto com forro de PVC.

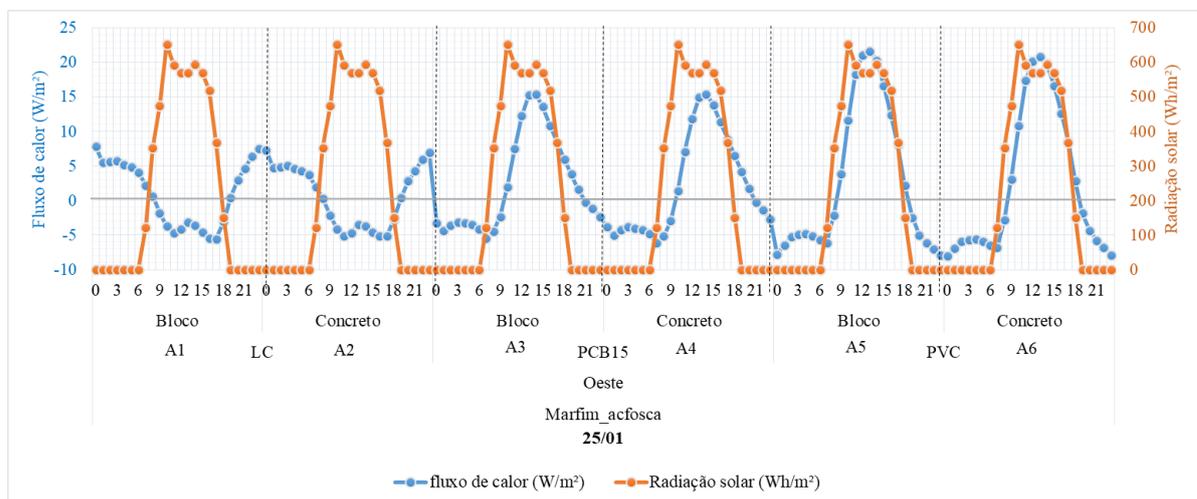
Analisando o fluxo de calor descendente (fluxo de calor positivo) por tipo de parede entre os forros, para a cidade de Corumbá (Figura 39) o uso de forro de PCB15 quando comparado ao forro de LC aumentou 7,57 W/m² para o ambiente com parede de blocos cerâmicos e 8,10 W/m² no ambiente com parede de concreto. Ainda destaca-se um aumento expressivo no fluxo de calor descendente para o forro de PVC em relação ao forro LC, sendo 13,73 W/m² para o ambiente com parede de bloco cerâmicos e 13,55 W/m² no ambiente com parede de concreto.

O fluxo de calor descendente para as habitações na cidade de Campo Grande (Figura 40) por tipo de parede entre os forros, o uso de forro de PCB15 quando comparado ao forro de LC aumentou 11,0 W/m² para ambiente com parede de blocos cerâmicos e 11,6 W/m² em ambiente com parede de concreto. Ainda, destacou-se um aumento expressivo no fluxo de

calor descendente para o forro de PVC em relação ao forro LC, sendo $20,4 \text{ W/m}^2$ para ambiente com parede de bloco cerâmicos e $20,1 \text{ W/m}^2$ em ambiente com parede de concreto.

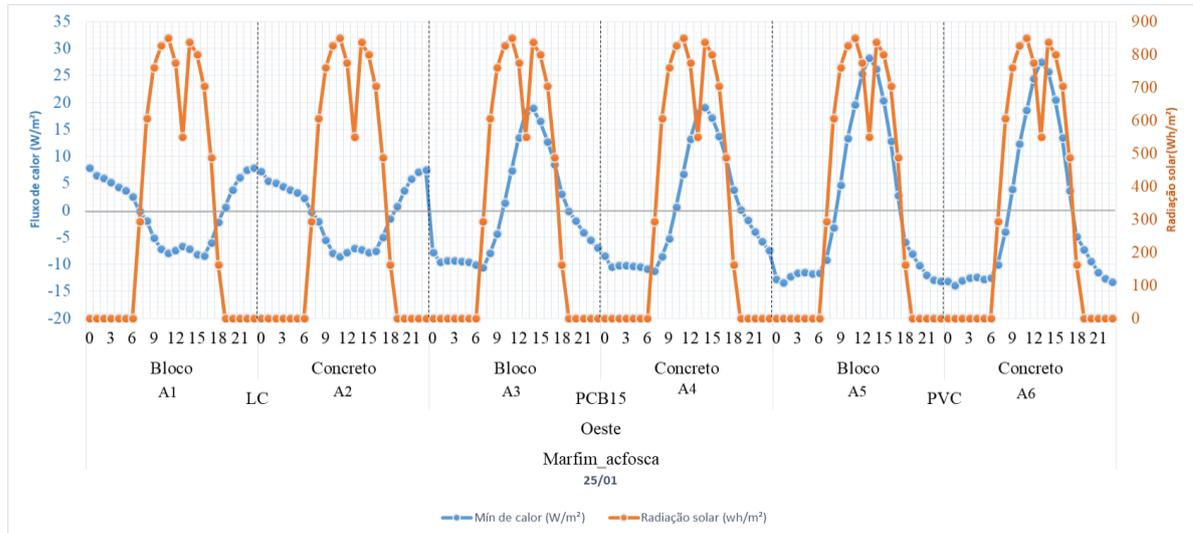
Outro fato importante verificado para o clima de Corumbá (Figura 39) foi que os fluxos de calor ascendentes (fluxo de calor negativos) ocorreram para os forros de placas cimentícias com 15% de borracha de pneu e de PVC no período das 20h às 09h; já para o LC os fluxos de calor ascendente ocorreram no intervalo das 08h às 19h. Neste mesmo intervalo, para o forros de PCB15 e PVC, a transferência de calor foram descendentes. O mesmo comportamento foi verificado para a cidade de Campo Grande com relação ao fluxo de calor negativo, porém em períodos diferentes e menores, para os forros de placas cimentícias com 15% de borracha de pneu e de PVC no período das 18h às 09h. Já para a LC, os fluxos de calor ascendente ocorreram no intervalo das 09h às 18h. Neste mesmo intervalo, para o forros de PCB15 e PVC, a transferência de calor foram descendentes, denotando para as cidades analisadas um desempenho diferente entre o forro de LC para os demais forros, o que entra em concordância com os resultados dos GHR em que o forro de PCB15 e PVC não diferem significativamente entre si.

Figura 39 – Análise do fluxo de calor para cor marfim acrílico fosco combinado com orientação da fachada a Oeste (Corumbá)



Fonte: Autora (2019)

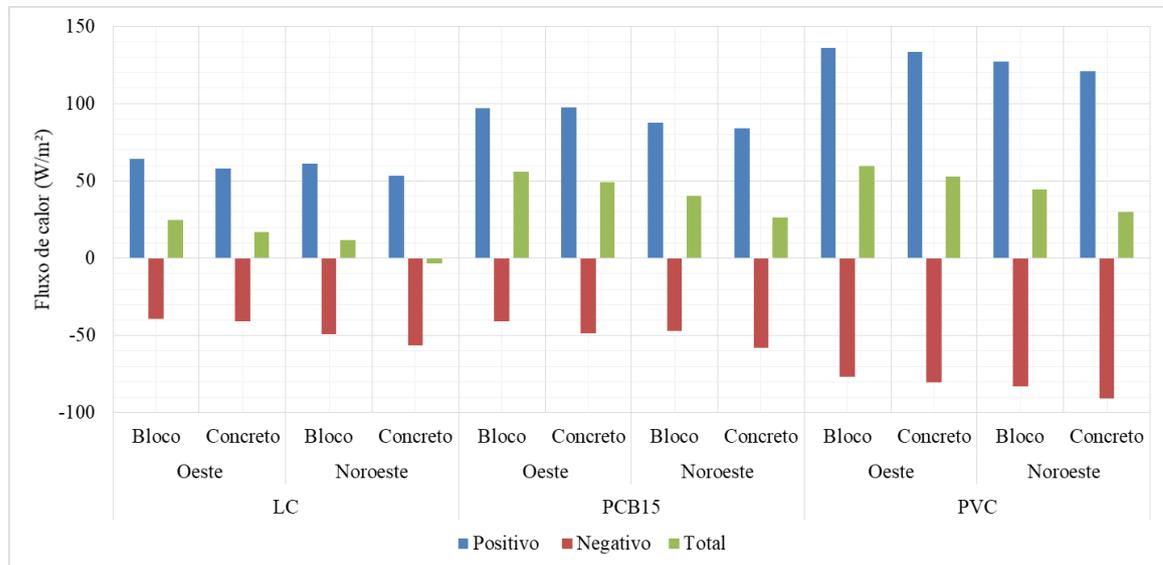
Figura 40 - Análise do fluxo de calor para cor marfim acrílico fosco combinado com orientação da fachada a Oeste (Campo Grande)



Fonte: Autora (2019)

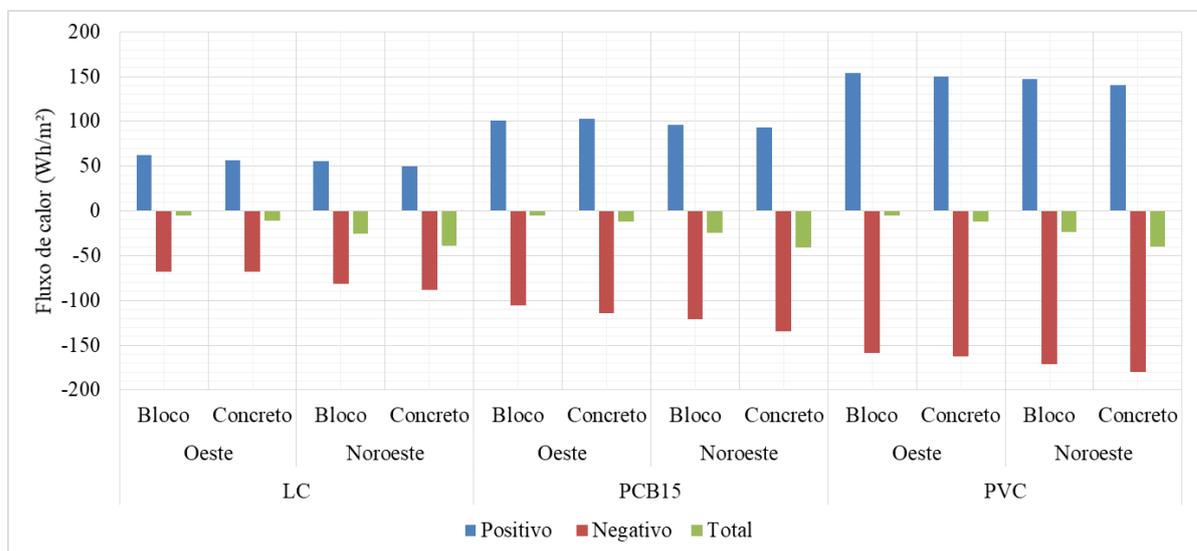
Analisando o somatório do fluxo de calor dos cenários com a cor do telhamento marfim combinado com a orientação da fachada a Oeste e Noroeste e paredes constituídas de blocos cerâmicos e monolítica de concreto, tem-se da Figura 41 e Figura 42 que há uma diferença significativa na transferência de calor por meio do forro no ambiente interno, independentemente do clima analisado, em ordem crescente sobre os resultados de fluxos de calor positivos (descendentes): LC, PCB15 e PVC. Nesta mesma ordem que se trata da espessuras dos forros 100 mm, 0,03 mm e 0,01 mm e também das capacidades térmicas das coberturas com forro 237,48 kJ/m²K, 68,18 kJ/m²K e 29,96 kJ/m²K. Por fim, analisando a somatória do fluxo térmico para a cidade de Corumbá e Campo Grande tem-se que o forro de PVC e PCB15 não diferiram significativamente entre si, entretanto a variações de fluxos de calor foram maiores no forro de PVC. As somatórias do fluxo térmico positivo para ambas as cidades analisadas, o forro de PVC destaca-se dos demais forros com maiores valores, porém na cidade de Campo Grande os ambientes analisados através das suas médias ponderadas das áreas possuem maiores influências na transferência de calor ascendente quando analisado o fluxo de calor total. No entanto, os forros analisados há uma tendência de menores fluxos de calor na composição com parede de concreto.

Figura 41 - Análise do somatório do fluxo de calor para os forros de LC, PCB15 e PVC com a composição de cor de telhamento marfim, orientação solar Oeste e Noroeste e paredes de blocos cerâmicos e monolítica de concreto (Corumbá).



Fonte: Autora (2019)

Figura 42 - Análise do somatório do fluxo de calor para os forros de LC, PCB15 e PVC com a composição de cor de telhamento marfim, orientação solar Oeste e Noroeste e paredes de blocos cerâmicos e monolítica de concreto (Campo Grande).

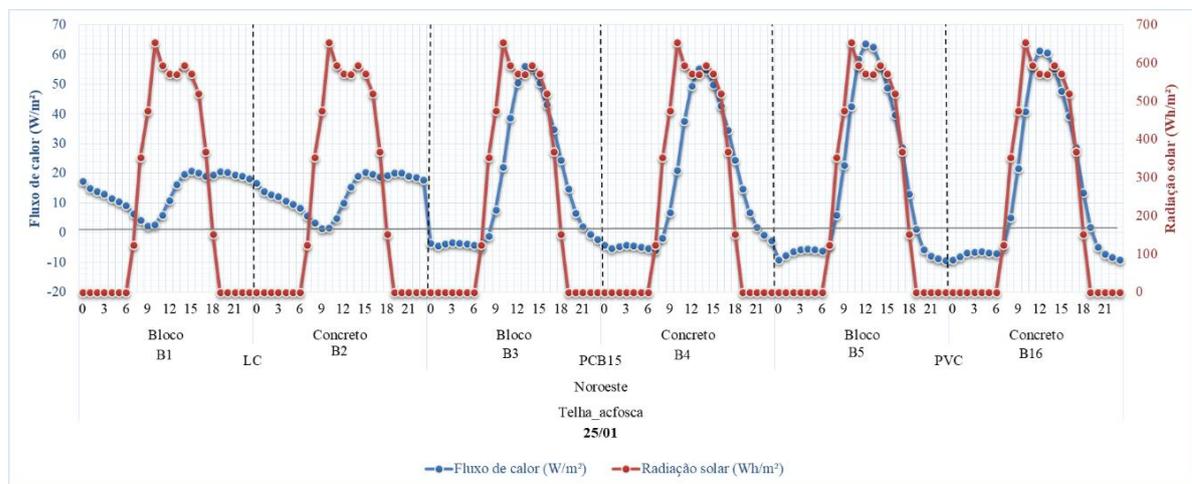


Fonte: Autora (2019)

Nas Figuras 43 e 44 estão as análises do fluxo de calor, das cidades, respectivamente, Corumbá e Campo Grande, com os cenários com o telhamento na cor telha e orientação da fachada a Noroeste que derivou os cenários B1, B2, B3, B4, B5 e B6. Tem-se os cenários com laje de concreto os menores picos de fluxo de calor descendente, quando comparado aos

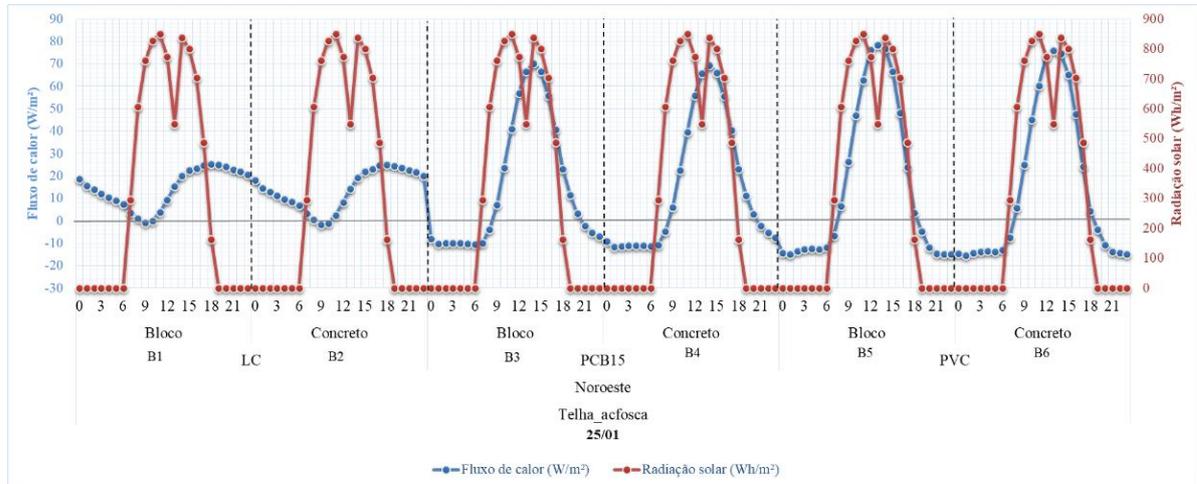
outros tipos de forro, independentemente do tipo de parede e a cidade analisada. Este desempenho também foi notado quando se usou a cor marfim no telhamento. Entretanto, quando comparado as cores marfim e telha no telhamento nos mesmos cenários, há um aumento significativo quando migra-se do cenário com cor marfim no revestimento externo das telhas para o telhamento na cor telha, sendo que para cidade de Corumbá o fluxo de calor aumentou cerca de 2,9 vezes para LC, 3,7 vezes para PCB15 e aproximadamente 3,0 vezes para PVC. Ainda analisando as Figuras 41 e 42, a transferência de calor através da radiação solar nos cenários com forro de PCB15 e PVC tiveram resultados semelhantes dos cenários com a cor do telhamento em marfim. Da mesma forma que ocorreu em Corumbá, há um aumento expressivo para a cidade de Campo Grande quando muda-se do cenário com cor marfim para a cor telha no revestimento externo do telhamento, visto que o fluxo de calor aumentou cerca de 3,5 vezes para LC, 3,6 vezes para PCB15 e aproximadamente 2,8 vezes para PVC.

Figura 43 - Análise do fluxo de calor na cidade de Corumbá para a cor telha acrílico fosco combinado com orientação da fachada a Noroeste



Fonte: Autora (2019)

Figura 44 - Análise do fluxo de calor na cidade de Campo Grande para a cor telha acrílico fosco combinado com orientação da fachada a Noroeste

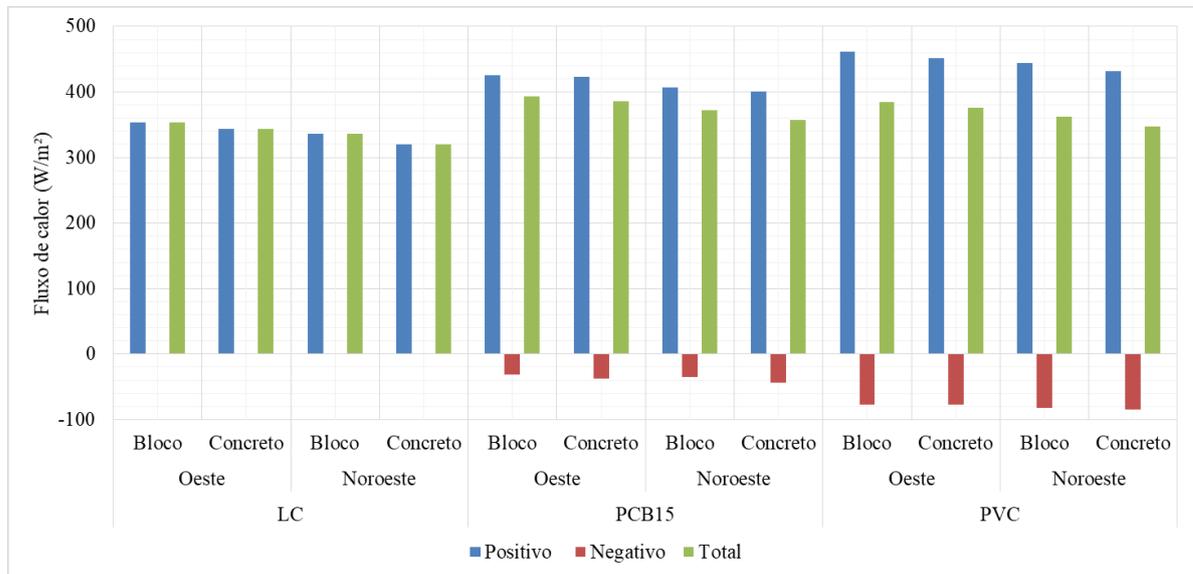


Fonte: Autora (2019)

Analisando acúmulo de fluxo de calor dos cenários com telhamento na cor telha (Figura 45 e Figura 46), tanto a cidade de Corumbá, quanto a cidade de Campo Grande tiveram o mesmo comportamento, onde o forro de LC apresentou menores valores para os fluxos de calor positivo (descendente), entretanto, como foi observado anteriormente, não houve transferência de calor do ambiente interno para o ático. Os picos de fluxo de calor positivo para o forro de PCB15 foram menores que os forros de PVC, porém, com menores diferenças entre si quando comparada aos cenários na cor marfim.

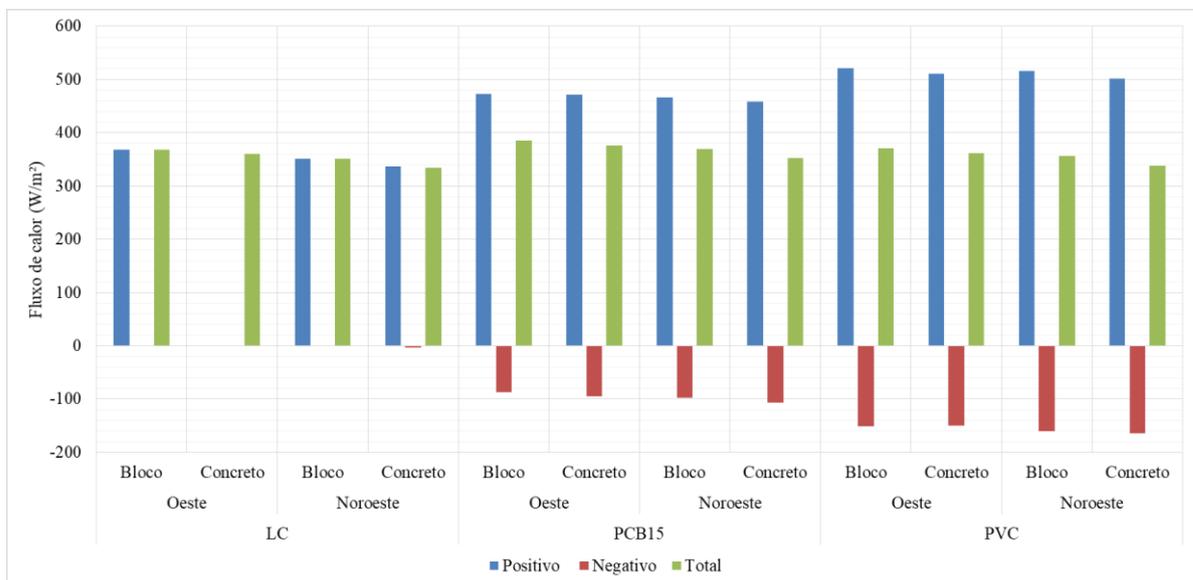
Contudo, para o clima de Campo Grande o fator tipo de forro tiveram diferenças significativas nos resultados no fluxo de calor, o que entra em concordância com a análise estatística realizada para o parâmetro graus-hora de resfriamento. Quanto a orientação solar na mesma cor de telhamento, independentemente da cidade analisada, não diferenciaram significativamente nos resultados finais, mostrando-se que a maior influência está na cor do revestimento externo no telhamento, tratando-se que os aumentos das temperaturas das superfícies externa do telhamento (absortância) resultou em maiores resultados na transferência de calor para os ambientes de permanência prolongada.

Figura 45 - Análise do somatório do fluxo de calor para os forros de LC, PCB15 e PVC com a composição da cor de telhamento telha, orientação solar Oeste e Noroeste e paredes de blocos cerâmicos e monolítica de concreto (Corumbá).



Fonte: Autora (2019)

Figura 46 - Análise do somatório do fluxo de calor para os forros de LC, PCB15 e PVC com a composição da cor de telhamento telha, orientação solar Oeste e Noroeste e paredes de blocos cerâmicos e monolítica de concreto (Campo Grande).



Fonte: Autora (2019)

Portanto, os cenários que foram composto por cor de telhamento marfim obtiveram resultados de fluxo de calor inferior ao telhamento na cor telha, o que corrobora com resultados encontrados por Michels et al. (2018) e Dias (2016), que ao adotarem o revestimento nas telhas de fibrocimento a cor clara reduziu os ganhos térmicos em relação a cobertura que não recebeu o revestimento. Como os ganhos solares são maiores pela

cobertura, o fato de atribuir valores diferentes de transmitância e absorptância solar no sistema de cobertura implicam em maiores e significativas variações na temperatura interior do ambiente (CHVATAL, 2014).

4.5 Contribuições finais

O sistema construtivo cobertura e sua composição com forro exerce considerável influência sobre os parâmetros somatório de graus-hora, atraso térmico e fluxo de calor, independentemente do tipo de zoneamento climático que se encontra o ambiente modelado. Por ter sido efetuado para dois climas diferentes, o estudo também indicou que o nível de influência de diferentes envoltórias e sistemas de coberturas sobre o desempenho termoenergético do edifício pode variar de acordo com o clima analisado. No geral, a variação do tipo de forro na edificação localizada em Campo Grande causou impacto significativo nos graus-hora de resfriamento dos ambientes analisados, ou seja, o forro de PCB15 foi mais impactante quando aplicado no clima mais ameno, o que vai de encontro as diretrizes da NBR 15220 parte 3 (ABNT, 2005) para a zona bioclimática 6, que deve utilizar cobertura leve e isolada; diferentemente da zona bioclimática 8 que pede cobertura leve e refletora, assim, não sendo tão importante o uso de forro perante a absorptância do telhamento.

Outro ponto a ser ressaltado é que, para ambas as cidades analisadas, a edificação simulada foi considerada naturalmente ventilada e permaneceu com as janelas abertas ao longo do dia, pois as temperaturas externas estavam acima de 20°C (em Corumbá 87,3% das horas anual com temperaturas acima de 20°C e 78,9% para a cidade de Campo Grande). Desta forma, nas horas mais quentes, o gradiente de temperatura interna e externa dos ambientes analisados pode tender a diminuir para menores diferenças de temperatura, demonstrando que este regresso influencia negativamente no parâmetro graus-hora de resfriamento.

Sorgato (2009) apontou que o desempenho térmico no ambiente construído está intimamente ligado aos componentes da envoltória da edificação, logo, as propriedades termofísicas dos materiais influenciam significativamente no fluxo do calor, corroborando com os resultados no presente trabalho que as maiores capacidades térmicas dos forros determinaram menores fluxos de calor. Portanto, acredita-se que os diferentes desempenhos térmicos dos ambientes de permanência prolongada (sala/cozinha, quarto1 e quarto2) estejam nas diferentes áreas de superfície exposta ao exterior, devido as variações das orientações solares (hora com maior e menor exposição solar) e pelas dimensões volumétricas dos ambientes, parâmetros estes significativos para definir as condições térmicas dos ambientes.

Também nota-se que a massa térmica dos forros cimentícios (LC e PCB15) foi mais representativa no indicador do atraso térmico em Corumbá do que em Campo Grande, na qual todos os forros levaram os ambientes ao alcance de similares valores de atraso térmico. Isso pode ser explicado devido as amplitudes térmicas das cidades estudadas, pois Corumbá apresentou maior amplitude térmica, o que caracteriza a possibilidade de uso da estratégia bioclimática de elementos construtivos com maior inércia térmica. Segundo Papst (2009), uma edificação com pouca inércia térmica segue muito próxima a variação das temperaturas externa e interna, além do que, a razão entre o calor absorvido e o calor armazenado nos materiais que compõe a edificação depende da capacidade térmica dos materiais. Sendo assim, se o calor específico dos materiais estiverem entre 0,87 KJ/kg.K a 1,67 KJ/kg.K, a capacidade térmica dos componentes das edificações é quase completamente dependente da massa térmica da estrutura.

Peralta (2006), Sorgato (2009), Dias (2016) e Michels et al. (2018) ilustram que as coberturas escuras resultam em um desempenho inferior em relação as coberturas claras para os climas quentes. Logo, a variação dos valores de absorvância solar da superfície das telhas tiveram maior influência na transferência de calor por meio da cobertura do que nos gradientes de temperatura interna dos ambientes, pois os resultados de fluxo de calor foram significativamente elevados quando migrados na cor do telhamento da cor marfim para cor telha. Assim, ficou demonstrada a importância da refletância e absorvância solar nas características térmicas das superfícies das telhas e no desempenho térmico das edificações. No entanto, a redução na temperatura da superfície pode-se reduzir o ganho de calor no interior das edificações em proporções menores quando comparada à diminuição da temperatura superficial do telhamento (PERALTA, 2006).

Sob os aspectos finais, conforme apontamentos de Abu-Jdayil et al. (2019), o uso de materiais de isolamento térmico em construções de residências e comércio resulta na diminuição no custo de operações de consumo de eletricidade e a redução de custos com materiais de isolamento térmico pode ser conseguida utilizando materiais naturais e/ou resíduos. A maioria dos materiais isolantes para a construção civil é fabricado a partir de compósitos poliméricos pela baixa condutividade térmica, entretanto, os materiais não-convencionais como celulose, madeira, lã de escória e borracha de pneus sofrem limitações nas baixas propriedades mecânicas, mas podem ser melhorados ou modificadas com implementos de cargas inorgânicas ou cargas minerais, resultando em potenciais sistemas construtivos energeticamente eficientes.

No Quadro 1 esta apresentado o resumo das propriedades físicas, mecânicas e térmicas obtidas do estudo de caso para a placa cimentícia com borracha de pneu inservível, os valores utilizados nas simulações computacionais e a composição do sistema de cobertura considerada na avaliação do comportamento termoenergético da PCB15.

Quadro 1 - Resumo de caracterização da placa cimentícia com borracha de pneu inservíveis

COMPOSIÇÃO		
Traço unitário (em massa) (cimento:areia: relação água/cimento)	1:3,38:0,28:0,70	
Teor de borracha (%)	15	
Cimento (kg/m ³)	396,85	
Areia (kg/m ³)	1341,35	
Borracha (kg/m ³)	111,12	
Água (kg/m ³)	277,80	
Processo de fabricação (adensamento)	Vibração - mesa vibratória	
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS		
Estado fresco:		
Índice de Consistência (mm)	242,17	
Teor de ar incorporado (%)	16,00	
Estado endurecido:		
Espessura das placas (mm)	30,00	
Massa específica (g/cm ³)	1,69	
Absorção de água por imersão (%)	11,80	
Absorção de água por capilaridade após 72h de ensaio (%)	6,52	
Determinação da resistência:		
Compressão	Idade	MPa
	7 dias	10,5
	28 dias	12,0
Flexão	7 dias	3,6
	28 dias	4,0
PROPRIEDADES TÉRMICAS		
Condutividade térmica (W/m.K)	0,922	
Transmitância térmica (W/m ² .K)	2,160	
Capacidade térmica (KJ/m ² .K)	68,200	
Resistência térmica (m ² .K/W)	0,067	
SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA		
Programa computacional	<i>EnergyPlus</i> na versão 8.9.0	
Calor específico (KJ/kg.K)	1,00	
Absortância solar	0,90	
Graus-hora de resfriamento:	Extremos (°Ch)	
	Inferior	Superior
Zona bioclimática 6	11.151,8	24.101,4
Zona bioclimática 8	24.935,3	38.982,3
Sistema de cobertura considerada:		
Composição	Espessura	
Telha cerâmica	1,0 cm	
Câmara de ar	> 5,0 cm	
Forro de placas cimentícia com 15% de borracha de pneu (PCB15)	3,0 cm	

Fonte: Autora (2019)

5 CONCLUSÃO

O programa experimental buscou verificar o desempenho termoenergético de placas cimentícias com borracha de pneus em sistema de coberturas de tipologias de habitações de interesse social por meio de caracterizações físicas, mecânicas e do comportamento termoenergético dos forros de placas cimentícias com borracha de pneus inservíveis. Dessa forma foi possível alcançar os objetivos geral e específicos, com base nos resultados obtidos de ensaios laboratoriais e das simulações computacionais.

A argamassa cimentícia com 15% de borracha de pneu inservível se mostrou viável na aplicação como forro de placa (vedação sem função estrutural), pois confere o valor de resistência à flexão de 4 MPa e redução de 21% da condutividade térmica quando comparada a argamassa tradicional; como também apresenta-se como um elemento construtivo mais leve para aplicação em edificações, sem a necessidade do uso de equipamentos e/ou maquinários pesados para transporte e movimentação deste produto pré-moldado.

Referente ao comportamento térmico, independentemente da cor do telhamento, do tipo de fachada e do tipo de parede, o forro de placa cimentícia com borracha pode contribuir para menores graus horas de resfriamento e fluxo de calor, como também para maiores valores de atraso térmico e amortecimento térmico nos ambientes estudados quando comparados aos tradicionais forros de PVC. No entanto, mesmo que os ganhos positivos no desempenho térmico do ambiente não apresentaram significância dentro da moradia simulada, se faz necessária a avaliação de outros aspectos como ganhos ambiental e social acerca do aproveitamento de borracha de pneu inservível.

A argamassa com borracha de pneu pode apresentar possibilidades de melhoramento térmico significativos quando aplicado em outros sistemas construtivos que estruturalmente suportem espessuras maiores deste compósito e seja viável tecnicamente de execução, visto que o aumento da camada do compósito cimentício com borracha aumentará a massa térmica e capacidade térmica do elemento, bem como o maior controle do fluxo de calor no ambiente. Ressalta-se ainda que o compósito cimentício com borracha pode apresentar ganhos mais significativos no desempenho térmico da cobertura de uma edificação dependendo do clima e do zoneamento bioclimático que for aplicado este material.

Portanto, atribuir a qualidade térmica no ambiente construído desprende do envolvimento de inúmeras variáveis, entre elas, o aproveitamento do potencial que cada material oferece na especificação correta em um projeto; e é neste contexto que o estudo das placas cimentícias de argamassa com borracha de pneus inservíveis contribuiu, sendo

destacado seu potencial de mitigação dos impactos ambientais sob o aspecto de reuso de resíduos, e de viabilidade técnica de produção de elementos construtivos aliado ao melhoramento termoenergético de moradias.

5.1 Limitações do trabalho

Os resultados das simulações computacionais para verificar o desempenho termoenergético de placas cimentícias com borracha de pneus inservíveis no sistema de coberturas de tipologias de habitações de interesse social limitou-se a apenas as zonas climáticas presentes no estado de Mato Grosso do Sul (Zonas bioclimáticas 6 e 8). Não foram consideradas zonas bioclimáticas com temperaturas mais amenas e/ou frias do país, como as zonas bioclimáticas de 1 a 4. Como visto nos resultados, o desempenho termoenergético do edifício pode variar de acordo com o clima analisado.

Para ambas as cidades analisadas a edificação simulada foi considerada naturalmente ventilada, limitando-se a abertura de janela $T_{int} \geq 20$ °C. Desta forma, a diferença de temperatura interna e externa dos ambientes analisados na horas mais quentes tendência a menores gradientes, pois as temperaturas externas estavam a cima de 20 °C para os climas de Corumbá e Campo Grande.

Por fim, este trabalho limitou-se a 3 cm de espessura do forro de placas cimentícias com borracha de pneu no comportamento termoenergético para o sistema de cobertura em habitações de interesse social através da simulação computacional, havendo a possibilidade de melhoramento térmico significativo no aumento da espessura do compósito cimentício com borracha.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se para os trabalhos futuros verificar o desempenho termoenergético de forros de placas cimentícias com borracha de pneu inservíveis em moradias de interesse social nas zonas bioclimáticas frias e zonas bioclimáticas intermediárias. Desta forma o trabalho não se limitaria a apenas a dois arquivos climáticos e permitiria uma análise mais ampla.

Complementando ainda, seria interessante para avaliar o comportamento termoenergético no sistema de coberturas com forro de placas cimentícia com borracha de pneu, a adoção de um único projeto representativo de habitação de interesse social e variando-se a espessura da placa cimentícia com borracha admitindo-se espessuras superiores a 3 cm e

inferiores a 10 cm. Assim, amplia a possibilidade de melhoramento térmico significativo quando aplicado em outros sistemas construtivos que estruturalmente suportem espessuras maiores deste componente.

Por fim, sugere-se a avaliação das placas cimentícias com borracha de pneu sob o comportamento de ação do fogo, ensaios de durabilidade como envelhecimento acelerado e resistência à abrasão e permeabilidade, assim garantindo uma maior abrangência de uso e aplicação desse material de construção.

6 REFERÊNCIAS

ABU-JDAYIL, B.; MOURAD, A.; HITTINI, W. HASSAN, M.; HAMEEDI, S. Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview.

Construction and Building Materials. v. 214, p. 709-735, 2019.

AKUTSU, M. **Inércia térmica, a chave do conforto**. Materiais e Soluções. Disponível em:

<https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/inercia-termica-a-chave-do-conforto_1499_10_18>.

Acesso em: 07 jun 2019

ALBUQUERQUE, A. C. **Estudo das propriedades de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu**. 2009. 257 f. Tese (Doutorado em engenharia) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

ALCAZAS, J. C.; MILANI, A. P. S.; LOPES, J. C. Tendências do uso de borracha de pneu inservíveis em compósito cimentícios. In: Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, 2018, Anais... Campo Grande: ALCONPAT BRASIL, 2018.

ALMEIDA, O. F. L. **Análise comparativa de cargas térmicas solares em fachada envidraçada para estudo em eficiência energética**. Dissertação (Mestrado em Eficiência Energética e Sustentabilidade) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Programa de Pós – Graduação em Eficiência Energética e Sustentabilidade – PPGEES. Campo Grande, 2017.

ALVAREZ, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. **Köppens's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, p. 711-728, 2014.

ANGELIN, A. F. ; LINTZ, R. C. C.; GACHET-BARBOSA, L. A. ; OSÓRIO, W. R. **The effects of porosity on mechanical behavior and water absorption of an environmentally friendly cement mortar (with recycled rubber)**. Construction and Building Materials, v. 151, p. 534-545, 2017.

ARANTES, B. **Conforto térmico em habitações de interesse social – Um estudo de caso**. 2013,. 114 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UNESP, Bauru.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 45: Agregado – Determinação da massa unitária e dos volumes de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 248**: Agregado - Determinação da composição granulométrica: Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 52**: Agregado Miúdo – Determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 2009

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos – Capilaridade. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 9979:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005

_____. **NBR. 13278:** Argamassa para assentamento ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento- Resistência à tração na flexão e a compressão. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15.220:** Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo de transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elemento e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15.220:** Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575:** Edificações habitacionais – Desempenho – Desempenho Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15498:** Placa de fibrocimento sem amianto - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 10.004:** Resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

BARBOSA, K. H. Avaliação da influência da orientação solar, associada ao comportamento do usuário, no desempenho térmico unifamiliar em Goiânia. Dissertação (mestre em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, SC, 2017

BARROCA, P. A. G. Comportamento reológico e mecânico de argamassas com agregados leves. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade da Beira Interior. Covilhã, 2013.

BENAZZOUK, A.; DOUZANE, O.; MEZREB, K.; LAIDOUDI, M.; QUÉNEUDEK, M. Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling. **Construction and Building Materials.** v. 22. P. 573-579, 2008.

BENAZZOUK, A.; HADJAB, H.; GUELMINE, L. Effect of Elevated Temperatures on Physical and Mechanical Properties of Recycled Rubber Mortar. **Construction and Building materials.** v. 26, 77-85, 2016.

BERTOLLO, S. A. M.; JÚNIOR, J. L. F.; VILLAVERDE, R. B.; FILHO, D. M.. Pavimentação asfáltica: uma alternativa para a reutilização de pneus usados. **Revista de Limpeza Pública**, São Paulo, n. 54, p. 23-30, 2000

BOWMAN, N.; LOMAS, K. COOK, M.; EPPEL, H.; FORD, B.; HEWITT, M. Application of passive draught evaporative cooling (PDEC) to non-domestic buildings. **Renewable Energy** 1997;10(2):191–6

BRASIL. Ministério de Estado das Cidades. **Portaria nº 269, de 22 de março de 2017**. Consolidada com as alterações da Portaria nº 643, de 13.11.17 e IN 40 (Entidades) e da Portaria nº 114, de 09.02.18 (FAR). Diário Oficial da União, Brasília, ed. 58, seção 1, p. 119, 24 mar 2017.

BRAVO, R. S. **Análise de blocos de concreto com resíduos de borracha de pneu e metacaulim**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Ilha Solteira, 2014.

BUONFIGLIO, L. V. **Habitação de interesse social**. Mercator. V. 17, 1-16, 2018

CANOVA, J. A.; BERGAMASCO, R.; DE ANGELIS, G. **A Utilização de Resíduos de Pneus Inservíveis em Argamassa de Revestimento**. Acta Scientiarum 29, 141-149, 2007

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática**. 4 e. São Paulo: Editora AMGH editora LTDA, 2012.

CHVATAL, K. M. S. Avaliação do procedimento simplificado da NBR 15575 para determinação do nível de desempenho térmico de habitações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 119-134, out./dez. 2014. ISSN 1678-8621

CORREIA, J. R.; MARQUES, A. M.; PEREIRA, C. M. C.; BRITO, J. . Fire reaction properties of concrete made with recycled rubber aggregate. **Fire and Materials**. V. 36, p. 139–152. 2011.

COSTA, H. C.; ALCAZAS, J. C.; BERTOCINI, S. R. Ciclovia pavimentada com peças de concreto com adição de borracha triturada de pneus. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 55., 2013, Gramado. **Anais...**São Paulo: IBRACON, 2013. p. 1-13

DIAS, A. E. **O desempenho térmico de uma cobertura verde em simulações computacionais em três cidades brasileiras**. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, SC, 2016.

DIDONÉ, K. R.; MILANI, A. P. S.; BERTOCINI, S. R. Desempenho térmico por meio de medições *in loco* de edificações construídas em paredes de concreto na zona bioclimática 6 e 8. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, XVI., 2016, São Paulo. **Anais...**São Paulo: ENTAC, 2016. p. 788-800.

DORNELLES, Kelen Almeida. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. 2008. 160p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

EIRAS, J.N.; SEGOVIA, F.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.; BONILLA, M.; PAYÁ, J. Physical and mechanical properties of foamed Portland cement composite containing crumb rubber from worn tires. **Materials and Design**. V. 59, p. 550-557, 2014.

FLORES-MEDINA, D.; MEDINA, N. F. Static mechanical properties of waste rests of recycled rubber and high quality recycled rubber from crumbed tyres used as aggregate um dry consistency concretes. **Materials and Structures**, v. 47, p. 1185-1193, 2013.

GRAVAS, D. **Deficit habitacional é recorde no país**. Estadão. Disponível em:< <https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,deficit-habitacional-e-recorde-no-pais,70002669433>>. Acesso em: 14 Jun 2019

GOULART, S. **Sustentabilidade nas edificações e no espaço urbano**, Material didático. Disponível;< http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV5161_Sustentabilidade_apostila_0_0.pdf>. Acesso em: 13 mai 2019

GOULART, S. V. G. **Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações em Florianópolis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 1993.

GUELMINE, L.; HADJAB, H.; BENAZZOUK, A. Effect of elevated temperatures on physical and mechanical properties of recycled rubber mortar. **Construction and Building Materials**. v. 126, p. 77-85, 2016.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; ÖZTURAN, T. Properties of rubberized concretes containing silica fume. **Cement and Concrete Research**, v .34, p. 2309-2317, 2004.

GUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R. K. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. **Construction and Building Materials** 73, p. 562–574, 2014.

GÜTHS, S., GÜTHS, G. L., MICHELS, C. Resistência térmica de cavidades de ar horizontais e fechadas para aplicações em edificações. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

HALL, M. R.; NAJIM, K. B.; HOPFE, C. J. Transient thermal behavior of crumb rubber-modified concrete and implications for thermal response and energy efficiency in buildings. **Applied Thermal Engineering**, v. 33-34, p. 77-85, 2012.

HOLMES, N.; BROWNE, A.; MONTAGUE, C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement. **Construction and Building Materials**. v.73, 195–204. 2014.

IBAMA. **Relatório pneumático 2017**. Disponível: <file:///G:/relatorio%20pneumaticos%20-%202015.pdf>. Acesso: 07/07/2016.

INMETRO. PORTARIA N° 18, DE 16 DE JANEIRO DE 2012. Regulamento Técnico da Qualidade para a Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Caracterização de produtos isolantes térmicos para indústria e construção civil**. 2018. Disponível em: <https://www.ipt.br/solucoes/184caracterizacao_de_produtos_isolantes_termicos_para_industria_e_construcao_civil.htm>. Acesso em: 28 jun. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Monitoramento do território: mudanças climáticas**. 2017. Disponível em: <<http://www.inpe.br/faq/index.php?pai=9>> interesse social, 2012. Anais... Florianópolis.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning**. OECD/IEA: Paris, 2018

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Thermal insulation – Determination of steady – state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus: ISO 8301**, 1991.

INVIDIATA, A.; FOSSATI, M.; ORDENES, M.M.; LAMBERTS, R. Improved the energy efficiency in brazilian social housing with the contribution of solar decathlon. PLA 2015 Conference on Passive and Low Energy Architecture 31. Bolonha, Itália, 2015.

INVIDIATA, A.; SOUSA, R. F.; MELO, A. P.; FOSSATI, M.; LAMBERTS, R. Análise do desempenho termoenergético de habitações unifamiliares de interesse social através do método de simulação do regulamento brasileiro. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, XVI., 2016, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ENTAC, 2016. p. 1065-1078.

KARDOS, A. J.; DURHAM, S. A. Strength, durability, and environmental properties of concrete utilizing recycled tire particles for pavement applications. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 832-845, 2015.

LAGARINHOS, C. A. F.. **Reciclagem de Pneus: Análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa**. 2011. 291 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

LAMBERTS, R.; GHISI, E., PEREIRA, C. D.; BATISTA, J. O. B.(Ed.). **Casa eficiente: Simulação Computacional do Desempenho Termoenergético**. v. 4. Florianópolis: UFSC/LabEEE. 2010.

LIMA G.L.F.; PEDRINI, A.; ALVES, A.F.M. Avaliação do desempenho térmico de uma habitação de interesse social localizada no clima quente e úmido da cidade de Parnamirim/RN

com base no método de simulação do RTQ-R. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, XIV., 2012, Juiz de Fora. **Anais...** São Paulo: ENTAC, 2012

LIMA, I. S., ROCHA, F. S., FERREIRA, J. B. Um estudo da argamassa de cimento com adição de fibras de borracha vulcanizada para a construção civil. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 42., 2000, Fortaleza. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2000.

MACEDO, D. C. B.; TUBINO, R. M. C. Comportamento térmico e acústico de placas pré – moldadas com borracha de pneu. In: Encontro Nacional de Pesquisa – Projeto – Produção em Concreto pré-moldado, 1., 2005, São Carlos. **Anais...** São Paulo: USP, 2005.

MAIO, L. D; COPPOLA, B.; MICHEL, L. C. F.; INCARNATO, L.; SCARFATO, P. Data on thermal conductivity, water vapour permeability and water absorption of a cementitious mortar containing end-of-waste plastic aggregates. **Data in Brief**. v.18. P. 1057-1063, 2018.

MARQUES, A. C.; AKASAKI, J. L.; FIORITI, C. F. Análise da resistência mecânica à compressão de concretos incorporados com resíduos de pneus submetidos à elevada temperatura. **Tópos**, v.6, n. 1, p. 1-17, 2012.

MAZZAFERRO, L. ; SORGATO, M. J.; MEKO, A. P.; LAMBERTS, R. Análise comparativa de modelagem de áticos e zonas subterrâneas no programa energyplus. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, XV., 2014, Maceió. **Anais...** São Paulo: ENTAC, 2014.

MEDINA, D. F; MEDINA, N.R.; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. Static mechanical properties of waste rests of recycled rubber and high quality recycled rubber from crumbed tyres used as aggregate in dry consistency concretes. **Materials and Structures**, v. 47, p. 1185-1193, 2014.

MEDINA, N. F., MEDINA, D. F., HERNÁNDEZ-OLIVARES, F.; NAVACERRADA, M. A. Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling. **Construction and Building Materials**. v.144, p.563-573, 2017.

MENDES, J. C.; BARRETO, R.R.; PAULA, A. C. B.; ELÓI, F. P. F.; BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, R. A. F. On the relationship between morphology and thermal conductivity of cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**. v.104, p. 103365, 2019.

MENEZES, V. J. **Avaliação das emissões oriundas da degradação térmica de pneus**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Macromoléculas, Professora Eloisa Mano, Rio de Janeiro, 2005.

MICHELS, C. **Análise da transferência de calor em coberturas com barreiras radiantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2007.

MICHELS, C., GÜTHS, S. Desempenho térmico de áticos com isolamento térmico reflexivo: estudo em uma bancada experimental. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...**Porto Alegre: ANTAC, 2018.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Déficit habitacional no Brasil 2008. Brasília, DF, 2011.

Disponível em:

http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNH/ArquivosPDF/DHB_2008_Final_2011.pdf>. Acesso em: 07 jun. 18.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Minha casa minha vida terá 22 mil nova unidade habitacionais. Brasília, DF, 2018. Disponível em:

<http://legado.brasil.gov.br/noticias/infraestrutura/2018/06/minha-casa-minha-vida-tera-22-mil-novas-unidades-habitacionais>. Acesso em: 15 mai 2019.

MOHAMMED, B. S.; HOSSAIN, K. M. A.; SWEE, J. T. E.; WONG, G. Properties of crumb rubber hollow concrete block. **Journal of Cleaner Production**. v. 23, p. 57-67.2012.

PELISSER F.; BARCELOS, A.; SANTOS, D; PETERSON, M.; BERNARDIN, A. M. Lightweight concrete production with low Portland cement consumption. **Journal of Cleaner Production**. v. 23, p. 68-74, 2012.

PELLEGRINO, M. SIMONETTI, M., CHIESA, G. Reducing thermal discomfort and energy consumption of Indian residential buildings: Model validation by in-field measurements and simulation of low-cost interventions. **Energy and Buildings**, 2016, p. 145–158.

PERALTA, G. **Desempenho térmico de telhas: Análise de monitoramento e noramalização específica**. Dissertação (Mestre em Arquitetura e Urbanismo). – Universidade Estadual de São Paulo. São Carlos, 2006.

PINTO, N. A.; FIORITI C. F. Desempenho de Argamassas de Revestimento Produzidas com Borracha de Pneus. **Mix Sustentável**. v. 2, n. 2, 2016.

PIRES, M.; WESTPHAL, F. Avaliação do impacto de subcoberturas no desempenho térmico de uma edificação residencial. In: Encontro Nacional de Tecnologia do ambiente construído, 15., 2014, Maceió. **Anais...** São Paulo: ENTAC, 2014. p. 123-132.

RASHAD, A. M. A comprehensive overview about recycling rubber as fine aggregate replacement in traditional cementitious materials. **Journal of Sustainable Built Environment**, v.5, p. 46-82, 2016

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. **Aproveitamento de resíduos na construção**. Coletânea Habitare: Utilização de Resíduos na Construção Habitacional, Porto Alegre, v. 4, p. 73-78, 2003.

RODRIGUES, M. R. P.; FERREIRA, O. P. Compósito cimentícios com adição de borracha de pneus inservíveis. **Pesquisa e Tecnologia: Minerva**, v. 6, n. 3, p. 255-261, 2009.

SAHA, A. K.; SARKER, P. K.; GOLOVANEVSKIY, V..Thermal properties and residual strength after high temperature exposure of cement mortar using ferronuckel slag aggregate. **Construction and Building Materials**. v. 199, p. 601-612, 2019.

SHAH, S. F. A.; NASEER, A.; SHAH, A. A.; ASHRAF, M. Evaluation of Thermal and Structural Behavior of Concrete Containing Rubber Aggregate. © **King Fahd University of Petroleum and Minerals**, Dhahran, Saudi Arabia. 2014.

SINDIPNEUS. **O pneu, composição e estrutura**. Manual TWI – Informações técnicas sobre pneus, 15 Jul 2013. Disponível em:< http://www.vias-seguras.com/layout/set/print/veiculos/pneumaticos/manual_twi_informacoes_tecnicas_sobre_pneus/o_pneu_composicao_e_estrutura> Acesso: 07 jul. 2016.

SORGATO, M. J. **Desempenho térmico de edificação residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, SC, 2009.

SUKONTASUKKUL, P. Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre – cast concrete panel. **Construction and Building Materials**. v. 23, p. 1084-1092, 2009.

THOMAS, B. S.; GUPTA, R. C. Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. **Journal of Cleaner Production**. v. 113, p. 86-92, 2016.

TRIANA, A.M.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterization of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy and Buildings**, v. 87, p. 524-541, 2015.

TRIANA, A.M.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1379-1392, 2018

TURGUT P.; YESILATA B; Physico-mechanical and thermal performances of newly developed rubber-added bricks. **Energy and Buildings**. v. 40, p. 679- 688, 2008.

URBAN B.; ROTH K. Guidelines for selecting cool roofs. **Energy Efficient & Renewable Energy**, v. 12, p. 1-23, 2010.

VIEIRA, A. S.; BIGI, A.C.; BITTENCOURT, D. L.; GHISI, E.; DE FREITAS, M. N. Identificação de estratégias para aumentar a eficiência energética de habitações de interesse social localizadas na grande Florianópolis: aplicação do RTQ-R. In: Workshop da rede de pesquisa: uso racional da água e eficiência energética em habitações de interesse social, 3., 2012, Curitiba. Anais... Florianópolis: UFSC, 2012.

VIJAYKUMAR, K.C. K.; SRINIVASAN, P. S. S; DHANDAPANI, S. A performance of hollow tiles clay (HTC) laid reinforced cement concrete (RCC) roof for tropical summer climates. **Energy Build**. v. 39, 886–92, 2007.

VITORINI, F. SATO, N. M.; AKUTSU, M. Desempenho térmico de isolantes refletivos e barreiras radiantes aplicados em coberturas. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente, 2003., Curitiba, 2003. **Anais...** São Paulo: ENTAC – COTEDI, 2003. p. 1277-1284.

APÊNDICE A – Resultados dos graus-hora de resfriamento

Na tabela 28 estão os graus-hora de resfriamento para cidade de Corumbá com composição semelhantes ao estudos de Mazzaferro et al. (2014) que encontraram em seus estudos para a cidade de São Luiz (Zona bioclimática 8) 32.636 graus-hora de resfriamento para uma edificação composta de parede de bloco cerâmicos e cobertura em telha cerâmica com forro de laje de concreto maciça.

Tabela 28 -Graus-hora de resfriamento Corumbá (composição semelhante Mazzaferro et al. (2014) em São Luiz)

Mês	Cor	Forro	Or. Solar	Parede	GHR (°Ch)		
					Living	Quarto1	Quarto2
1	Telha_acfosca	LC	Oeste	Bloco	3765.18	3934.70	3642.92
2	Telha_acfosca	LC	Oeste	Bloco	3103.06	3220.73	2978.01
3	Telha_acfosca	LC	Oeste	Bloco	3524.18	3549.84	3392.83
4	Telha_acfosca	LC	Oeste	Bloco	2492.23	2429.79	2316.26
5	Telha_acfosca	LC	Oeste	Bloco	1932.79	1877.87	1807.20
6	Telha_acfosca	LC	Oeste	Bloco	1795.23	1736.46	1673.10
7	Telha_acfosca	LC	Oeste	Bloco	1992.26	1936.94	1894.40
8	Telha_acfosca	LC	Oeste	Bloco	2305.22	2298.66	2190.62
9	Telha_acfosca	LC	Oeste	Bloco	2872.59	2953.65	2810.83
10	Telha_acfosca	LC	Oeste	Bloco	3917.69	4118.75	3808.94
11	Telha_acfosca	LC	Oeste	Bloco	3400.66	3581.84	3330.79
12	Telha_acfosca	LC	Oeste	Bloco	3396.24	3614.31	3267.92
				Total	34497.34	35253.55	33113.80

Fonte: Autora (2019)

APÊNDICE B – Análise de variância (ANOVA) do parâmetro GHR por ambiente.

Nas Tabela 29, Tabela 30 e Tabela 31 estão dispostos respectivamente as análises de variância do parâmetro GHR dos ambientes sala/cozinha, quarto1 e quarto2, na cidade de Corumbá.

Tabela 29 - ANOVA dos graus-hora de resfriamento sala/cozinha na cidade de Corumbá

Fator	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	F	Valor P
Cor telhamento	3	94.283.356	31.427.785	74,351	$< 2 \cdot 10^{-16}$
Tipo de forro	2	839.282	419.641	0,993	0,37097
Orientação solar	2	2.371.378	1.185.689	2,805	0,06106
Tipo de parede	1	4.266.759	4.266.759	10,094	0,00154
Total	8	101.760.755			

Fonte: Autora (2019)

Tabela 30 - ANOVA dos graus-hora de resfriamento do quarto1 na cidade de Corumbá

Fator	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	F	Valor P
Cor telhamento	3	91.095.379	30.365.126	63,40	$< 2 \cdot 10^{-16}$
Tipo de forro	2	1.063.688	531.844	1,11	0,32989
Orientação solar	2	6.389.057	3.194.529	6,67	0,00134
Tipo de parede	1	2.035.541	2.035.541	4,25	0,03955
Total	8	100.583.665			

Fonte: Autora (2019)

Tabela 31 - ANOVA dos graus-hora de resfriamento do quarto2 na cidade de Corumbá

Fator	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	F	Valor P
Cor telhamento	3	69.593.268	23.197.759	44,454	$< 2 \cdot 10^{-16}$
Tipo de forro	2	822.751	411.375	0,788	0,454940
Orientação solar	2	5.378.811	2.689.405	5,154	0,005959
Tipo de parede	1	6.673.665	6.673.665	12,789	0,000368
Total	8	82.468.495			

Fonte: Autora (2019)

APÊNDICE B – Análise de variância (ANOVA) do parâmetro GHR por ambiente.

Nas Tabela 32, Tabela 33 e Tabela 34 estão dispostos respectivamente as análises de variância do parâmetro GHR dos ambientes sala/cozinha, quarto1 e quarto2, na cidade de Campo Grande.

Tabela 32- ANOVA dos graus-hora de resfriamento da sala/cozinha na cidade de Campo Grande

Fator	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	F	Valor P
Cor telhamento	3	61.001.322	20.333.774	50.739	$< 2 \cdot 10^{-16}$
Tipo de forro	2	5.250.208	2.625.104	6.550	0,0015
Orientação solar	2	2.279.404	1.139.702	2.844	0,0587
Tipo de parede	1	638.123	638.123	1.592	0,02073
Total	8	69.169.057			

Fonte: Autora (2019)

Tabela 33 - ANOVA dos graus-hora de resfriamento do quarto1 na cidade de Campo Grande

Fator	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	F	Valor P
Cor telhamento	3	58.946.750	19.648.917	40.856	$< 2 \cdot 10^{-16}$
Tipo de forro	2	4.235.457	2.117.729	4.403	0,01251
Orientação solar	2	5.434.698	2.717.349	5.650	0,00365
Tipo de parede	1	4.106.112	4.106.112	8.538	0,00357
Total	8	72.723.017			

Fonte: Autora (2019)

Tabela 34 - ANOVA dos graus-hora de resfriamento do quarto2 na cidade de Campo Grande

Fator	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	F	Valor P
Cor telhamento	3	45.313.895	15.104.632	27.756	$< 2 \cdot 10^{-16}$
Tipo de forro	2	3.877.189	1.938.594	3.562	0,454940
Orientação solar	2	4.855.111	2.427.556	4.461	0,005959
Tipo de parede	1	2.092.945	2.092.945	3.846	0,000368
Total	8	56.139.140			

Fonte: Autora (2019)

APÊNDICE C - Resultados das análises estatísticas por meio do teste de Tukey da diferença totalmente significativa

Tabela 35 - Teste de Tukey para os resultados de GHR em relação a cor do telhamento para cidade de Corumbá

Cor do telhamento	Centro	Limite inferior	Limite superior	P valor
sala/cozinha				
Marfimsbrilho-MarfimAcfosca	117,9140	- 43,1232	278,9513	0,2353135
TelhaAcfosca-MarfimAcfosca	724,1874	563,1502	885,2246	0,0000000
Telhasbrilho-MarfimAcfosca	704,2162	543,1790	865,2534	0,0000000
TelhaAcfosca-Marfimsbrilho	606,2734	445,2362	767,3106	0,0000000
Telhasbrilho-Marfimsbrilho	586,3022	425,2649	747,3394	0,0000000
Telhasbrilho-TelhaAcfosca	-19,9712	- 181,0084	141,0660	0,9887434
Quarto1				
Marfimsbrilho-MarfimAcfosca	117,19505	- 54,22404	288,6141	0,293601
TelhaAcfosca-MarfimAcfosca	712,23454	540,81545	883,6536	0,0000000
Telhasbrilho-MarfimAcfosca	692,87852	521,45943	864,2976	0,0000000
TelhaAcfosca-Marfimsbrilho	595,03949	423,62040	766,4586	0,0000000
Telhasbrilho-Marfimsbrilho	575,68347	404,26438	747,1023	0,0000000
Telhasbrilho-TelhaAcfosca	- 19,35602	- 190,77511	152,0631	0,991448
Quarto2				
Marfimsbrilho-MarfimAcfosca	100,47597	- 78,45304	279,4050	0,4712936
TelhaAcfosca-MarfimAcfosca	621,86639	442,93737	800,7954	0,0000000
Telhasbrilho-MarfimAcfosca	604,65620	425,72719	783,5852	0,0000000
TelhaAcfosca-Marfimsbrilho	521,18023	342,46140	700,3194	0,0000000
Telhasbrilho-Marfimsbrilho	504,18023	325,25122	683,1092	0,0000000
Telhasbrilho-TelhaAcfosca	- 17,21019	- 196,13920	161,7188	0,9946681

Fonte: Autora (2019)

APÊNDICE C - Resultados das análises estatísticas por meio do teste de Tukey da diferença totalmente significativa

Tabela 36 - Teste de Tukey para os resultados de GHR em relação ao tipo de forro para cidade de Corumbá

Tipo de forro	Centro	Limite inferior	Limite superior	P valor
Sala/cozinha				
PCB15-LC	68,995278	- 58,20661	196,1972	0,4105883
PVC-LC	62,799583	- 64,40231	190,0015	0,4780593
PVC-PCB15	- 6,195694	- 133,39758	121,0062	0,9928164
Quarto1				
PCB15-LC	73,879340	- 61,52309	209,2818	0,4062775
PVC-LC	79,971529	- 60,43090	210,3740	0,3955705
PVC-PCB15	1,092187	- 134,31024	136,4946	0,9998023
Quarto2				
PCB15-LC	66,419861	- 74,91459	207,7543	0,5122497
PVC-LC	64,458333	- 76,87612	205,7928	0,5325193
PVC-PCB15	- 1,961528	- 143,29598	139,3729	0,9994148

Fonte: Autora (2019)

Tabela 37 - Teste de Tukey para os resultados de GHR em relação a orientação solar para cidade de Corumbá

Orientação solar	Centro	Limite inferior	Limite superior	P valor
sala/cozinha				
Norte-Noroeste	- 112,41132	- 239,6132	14,79057	0,0956968
Oeste-Noroeste	- 109,81257	- 237,0145	17,38932	0,1064121
Oeste-Norte	2,59875	- 124,6031	129,80064	0,9987324
Quarto1				
Norte-Noroeste	- 22,39229	- 157,7947	113,01014	0,9202777
Oeste-Noroeste	- 192,58049	- 327,9829	- 57,17809	0,0025220
Oeste-Norte	- 170,18819	- 305,5906	- 34,78576	0,0091194
Quarto2				
Norte-Noroeste	- 33,1574	- 174,4919	108,177059	0,8460964
Oeste-Noroeste	- 181,4728	- 322,8073	- 40,138393	0,0074627
Oeste-Norte	- 148,3155	- 289,6499	- 6,980997	0,0370857

Fonte: Autora (2019)

Tabela 38 - Teste de Tukey para os resultados de GHR em relação ao tipo de parede para cidade de Corumbá

Tipo de parede	Centro	Limite inferior	Limite superior	P valor
Sala/cozinha				
Concreto-Bloco	140,5472	53,72101	227,3734	0,0015408
Quarto1				
Concreto-Bloco	- 97,07627	- 189,50000	- 4,652507	0,0395529
Quarto2				
Concreto-Bloco	175,7743	79,3014	272,2472	0,0003683

Fonte: Autora (2019)

APÊNDICE C - Resultados das análises estatísticas por meio do teste de Tukey da diferença totalmente significativa

Tabela 39 - Teste de Tukey para os resultados de GHR em relação a cor do telhamento para cidade de Campo Grande

Cor do telhamento	Centro	Limite inferior	Limite superior	P valor
Sala/cozinha				
Marfimsbrilho-MarfimAcfosca	91,72657	- 65,07485	248,5280	0,4344088
TelhaAcfosca-MarfimAcfosca	581,42829	424,62687	738,2297	0,0000000
Telhasbrilho-MarfimAcfosca	564,94671	408,14529	721,7481	0,0000000
TelhaAcfosca-Marfimsbrilho	489,70171	332,90029	646,5031	0,0000000
Telhasbrilho-Marfimsbrilho	473,22014	316,41872	630,0216	0,0000000
Telhasbrilho-TelhaAcfosca	- 16,48157	- 173,28299	140,3198	0,9930725
Quarto1				
Marfimsbrilho-MarfimAcfosca	90,26880	- 81,5034	262,0410	0,5295407
TelhaAcfosca-MarfimAcfosca	571,54801	399,7758	743,3202	0,0000000
Telhasbrilho-MarfimAcfosca	555,44194	383,6698	727,2141	0,0000000
TelhaAcfosca-Marfimsbrilho	481,27921	309,5070	653,0514	0,0000000
Telhasbrilho-Marfimsbrilho	465,17315	293,4010	636,9453	0,0000000
Telhasbrilho-TelhaAcfosca	- 16,10606	- 187,8783	155,6661	0,9950550
Quarto2				
Marfimsbrilho-MarfimAcfosca	78,49884	- 104,2216	261,2193	0,6860291
TelhaAcfosca-MarfimAcfosca	500,90954	318,1891	683,6300	0,0000000
Telhasbrilho-MarfimAcfosca	486,66366	303,9432	669,3841	0,0000000
TelhaAcfosca-Marfimsbrilho	422,41069	239,6902	605,1312	0,0000000
Telhasbrilho-Marfimsbrilho	408,16481	225,4444	590,8853	0,0000000
Telhasbrilho-TelhaAcfosca	- 14,24588	- 196,9663	168,4746	0,99711379

Fonte: Autora (2019)

APÊNDICE C - Resultados das análises estatísticas por meio do teste de Tukey da diferença totalmente significativa

Tabela 40 - Teste de Tukey para os resultados de GHR em relação ao tipo de forro para cidade de Campo Grande

Tipo de forro	Centro	Limite inferior	Limite superior	P valor
Sala/cozinha				
PCB15-LC	157,63635	33,78029	281,4924	0,0081150
PVC-LC	172,13441	48,27835	295,9905	0,0032841
PVC-PCB15	14,49806	- 109,35801	138,3541	0,9592228
Quarto1				
PCB15-LC	140,12476	4,443411	275,8061	0,0410767
PVC-LC	155,69802	20,016675	291,3794	0,0196748
PVC-PCB15	15,57326	- 120,108082	151,2546	0,9607626
Quarto2				
PCB15-LC	134,40441	- 9,924876	278,7337	0,0740825
PVC-LC	148,72080	4,391513	293,0501	0,0416615
PVC-PCB15	14,31639	- 130,012896	158,6457	0,9705457

Fonte: Autora (2019)

Tabela 41 - Teste de Tukey para os resultados de GHR em relação a orientação solar para cidade de Campo Grande

Orientação solar	Centro	Limite inferior	Limite superior	P valor
Sala/cozinha				
Norte-Noroeste	- 110,263299	- 234,1194	13,52976	0,0924585
Oeste-Noroeste	- 107,604479	- 231,4605	16,25158	0,1034426
Oeste-Norte	2,658819	- 121,1972	126,51488	0,9986005
Quarto1				
Norte-Noroeste	- 47,79899	- 183,4803	87,882353	0,6862895
Oeste-Noroeste	- 186,97052	- 322,6519	- 51,289175	0,0036091
Oeste-Norte	- 139,17153	- 274,8529	- 3,490182	0,0428677
Quarto2				
Norte-Noroeste	- 22,7509	- 167,0802	121,578383	0,9272944
Oeste-Noroeste	- 169,1691	- 313,4984	- 24,839812	0,0166474
Oeste-Norte	- 146,4182	- 290,7475	- 2,088909	0,0458734

Fonte: Autora (2019)

Tabela 42 - Teste de Tukey para os resultados de GHR em relação ao tipo de parede para cidade de Campo Grande

Tipo de parede	Centro	Limite inferior	Limite superior	P valor
Sala/cozinha				
Concreto-Bloco	54,35324	- 30,18914	138,8956	0,20734
Quarto1				
Concreto-Bloco	- 137,8759	- 230,4901	- 45,2618	0,00357
Quarto2				
Concreto-Bloco	98,43556	- 0,08155397	196,9527	0,0501895

Fonte: Autora (2019)