



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Milena Paim Da Silva

Simulação termoenergética e análise econômica do uso de telhados de alta refletância solar em uma residência unifamiliar

Florianópolis

2019

Milena Paim da Silva

Simulação termoenergética e análise econômica do uso de telhados de alta refletância solar em uma residência unifamiliar

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Dr. Deivis Luis Marinoski.

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra

Silva, Milena Paim

Simulação termoenergética e análise econômica do uso de telhados de alta refletância solar em uma residência unifamiliar / Milena Paim Silva ; orientador, Deivis Luis Marinoski, 2019.

162 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Telhado frio. 3. Refletância solar. 4. Emitância térmica. 5. Análise Econômica. I. Marinoski, Deivis Luis . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Milena Paim da Silva

Simulação termoenergética e análise econômica do uso de telhados de alta refletância solar em uma residência unifamiliar

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. EneDir Ghisi, *Ph.D.*

Universidade Federal de Santa Catarina

Profª. Kelen Almeida Dornelles, Dra.

Universidade de São Paulo

Prof. Saulo Guths, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Profª. Dra. Poliana Dias de Moraes

Coordenadora do Programa

Prof. Dr. Deivis Luis Marinoski

Orientador

Florianópolis, 2019.

Dedico este trabalho à memória de meu primo, Leonam Penna Boeira, você sempre será lembrado por sua força, coragem e bondade. Aos meus pais, por todo apoio, incentivo e amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por guiar lindamente meu caminho, por ter me dado uma família maravilhosa e ter colocado pessoas incríveis na minha vida.

Agradeço aos meus pais, Jorge e Janete, e meus dois irmãos, Régis e Bernardo, por tudo. Eu devo tudo a vocês. Vocês são meus exemplos, minha fonte de inspiração e coragem. Obrigada por todo suporte, confiança, compreensão, amizade e amor. Estendo esse agradecimento a todos os meus familiares e amigos. Eu tenho muita sorte por tê-los na minha vida.

Agradeço ao André Dresch por ser meu companheiro de vida. Obrigada por ter deixado minha vida ainda mais feliz. Obrigada por toda paciência, compreensão, carinho, parceria e amor. Seu apoio foi fundamental para esta conquista. Estendo esse agradecimento a toda família Dresch e Martins de Oliveira, em especial aos meus sogros, por terem trazido a minha vida ainda mais carinho, amor e felicidade.

Agradeço ao Professor Devis Luis Marinoski pela orientação prestada para que esta pesquisa fosse realizada, pelo suporte e paciência. Agradeço pelos conhecimentos compartilhados e espaço cedido no Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (LabEEE – UFSC). Aos professores membros da comissão de avaliação desta dissertação, pela disponibilidade e todas as contribuições, em especial ao Professor Saulo Guths por ter me acompanhado desde o início do desenvolvimento da pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

O uso de telhados frios (com alta refletância solar e alta emitância térmica) é uma estratégia passiva para reduzir a carga de resfriamento das edificações, em razão de serem de fácil aplicação e energeticamente eficientes. Além disso, a utilização dos telhados frios tem potencial de mitigar o fenômeno Ilha de Calor. O presente estudo objetiva analisar o desempenho termoenergético e a viabilidade econômica da aplicação de um telhado frio em uma edificação unifamiliar, localizada na cidade do Rio de Janeiro - RJ. Para isto, foram selecionados os dois tipos de telhas mais utilizadas nas residências do país, telha de fibrocimento e telha de cerâmica. Foi realizada a medição da refletância solar e da emitância térmica para duas cores nos dois tipos de telhas selecionados, cor natural e cor branca. A análise termoenergética foi realizada por meio do software *EnergyPlus*. Foi avaliado o desempenho térmico dos telhados, convencional e frio, através da temperatura interna do ar, da temperatura da cobertura, da taxa de transferência de calor por radiação térmica, por radiação solar, por convecção natural e por condução. A análise energética consistiu em verificar a influência do desempenho térmico dos telhados no consumo de energia elétrica. A análise da viabilidade econômica foi realizada através dos indicadores financeiros: Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno e *payback*. Foram feitas duas considerações para o fluxo de caixa da análise econômica. Na primeira consideração foi avaliado o custo de manutenção somente nos telhados frios e na segunda consideração foi avaliado o custo de manutenção nos telhados frios e convencionais. Na análise econômica, foi investigado quanto custaria de energia elétrica para uma edificação com telhado convencional (em três diferentes cenários) obter as mesmas condições de temperatura interna de uma edificação com telhado frio. Os cenários foram divididos em edificação sem ar-condicionado (Cenário 1), edificação com ar-condicionado na sala e dormitórios (Cenário 2) e edificação com ar-condicionado somente nos dormitórios (Cenário 3). O telhado frio apresentou maiores valores de refletância solar e valores semelhantes de emitância, quando comparado com o telhado convencional. Em relação à análise térmica, o desempenho térmico das telhas cerâmicas foi superior ao das telhas de fibrocimento, e as telhas de alta refletância solar apresentaram desempenho térmico superior às respectivas telhas convencionais para todos os parâmetros analisados. O telhado frio diminuiu em 59% e 55% o ganho de calor que penetra na edificação, para o telhado de fibrocimento e de cerâmica, respectivamente, quando comparado com o telhado convencional de ambas as telhas. A análise energética apresentou a influência do desempenho térmico no consumo de energia elétrica e através da análise econômica mostrou em quais cenários o investimento foi viável. Na primeira consideração, os cenários 1 e 3 foram viáveis para as telhas de fibrocimento e somente para o cenário 1 para as telhas de cerâmica. O menor tempo de retorno foi para o cenário 1 com telhas de fibrocimento brancas, resultando em um *payback* de 4 anos e 3 meses. Na segunda consideração, todos os cenários foram viáveis. Conclui-se que o investimento é melhor para as edificações que não possuem ar-condicionado em nenhum ambiente, para os casos estudados.

Palavras-chave: Telhado frio. Refletância solar. Emitância térmica. Análise Econômica.

ABSTRACT

The use of cool roofs (with high solar reflectance and high thermal emission) is a passive strategy to reduce the buildings' cooling load, as they are easy to apply and energy efficient. Moreover, cool roofs have the potential to mitigate urban heat islands effects. The main objective of the present study was to analyze both the thermoenergetic performance and the economic viability of a cool roof applied in a house located at Rio de Janeiro city, Brazil. For this, two between the most common tiles types applied in the Brazilian's residences were selected: fiber-cement tiles and ceramic tiles. Solar reflectance and thermal emission were measured for two colors, natural and white, in the selected tiles. Thermoenergetic analysis was performed through EnergyPlus software. The thermal performance of both conventional and cool roofs was evaluated through the indoor build temperature, the roof temperature, and the heat transference rates by thermal radiation, solar radiation, natural convection or conduction. The energetic analysis verified the influence of thermal performance of the roofs over the electric energy consumption. The economic viability analysis was performed through of the financial indicators: Net Present Value, Internal Rate of Return and payback. Two considerations were made for the cash flow of the economic analysis. The first consideration was the maintenance cost on cool roofs only and the second consideration was the maintenance cost on cool and conventional roofs. In the economic analysis, it was investigated how much electricity would cost for a conventional roofed building (in three different scenarios) achieve the same internal temperature conditions as a cool roofed building. The scenarios were divided as without air conditioning (Scenario 1), with air conditioning in both the living room and bedrooms (Scenario 2), and a building with air conditioning only in the bedrooms (Scenario 3). The cool roof presented higher solar reflectance values and similar emittance values when compared to the conventional roof. Regarding the thermal analysis, the thermic performance of ceramic tiles was higher to the fiber cement, and the high solar reflectance tiles presented higher thermal performance than their respective conventional forms, for all analyzed parameters. The cool roof decreases the heat gain that penetrates the building by 59% and 55% for the fiber cement and ceramic roofs, respectively, when compared to the conventional roof of both tiles. The energy analysis showed the influence of thermal performance on electricity consumption and through the economic analysis showed in which scenarios the investment was viable. In the first consideration, scenarios 1 and 3 were feasible for fiber cement tiles and only for scenario 1 for ceramic tiles. The shortest payback was for scenario 1 with white fiber cement shingles, resulting in a payback of 4 years and 3 months. In the second consideration, all scenarios were viable. It is concluded that the investment is better for buildings that do not have air conditioning in any environment, for the studied cases.

Keywords: Cool roof. Solar reflection. Thermal emission. Economic analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Projeção do consumo de energia elétrica para os próximos 15 anos	19
Figura 2 – Consumo de energia elétrica 2004 - 2017 (TWh).....	19
Figura 3 – Consumo de energia elétrica por equipamento (TWh)	21
Figura 4 – Espectro solar	25
Figura 5 – Transferência de calor em uma cobertura	28
Figura 6 – Os princípios básicos dos materiais frios	28
Figura 7 – Refletância espectral de um revestimento preto convencional e um preto frio	30
Figura 8 – Refletância espectral de revestimentos termocrômicos marrom, revestimento frio e comum da mesma cor	31
Figura 9 – Perfil da temperatura da superfície de um revestimento preto, frio e padrão, e a temperatura ambiente (T_{amb}).....	32
Figura 10 – Temperatura da superfície externa da cobertura durante os dias mais quentes do verão (8 a 10 de agosto).....	32
Figura 11 – A diferença máxima da temperatura da superfície ($\Delta T_{máx}$) entre cada revestimento, frio e colorido, durante o dia	34
Figura 12 – Efeito climático nas mudanças de carga de resfriamento e aquecimento para uma refletância solar do telhado de 0,85	35
Figura 13 – Variação do consumo total de energia anual HVAC com variação da refletância solar do telhado para um edifício de escritório nas cinco zonas climáticas italianas	36
Figura 14 – Refletância espectral inicial, envelhecida e restaurada, do revestimento azul frio	38
Figura 15 – Redução na carga de resfriamento com alteração da refletância solar do telhado para quatro valores U diferentes	42
Figura 16 – Fluxograma do método	50
Figura 17 – Telhas cerâmica e fibrocimento, cor natural e branca.....	51
Figura 18 – Componentes do emissômetro	52
Figura 19 – Espectrofotômetro UV-VIS-NIR Lambda 1050	54
Figura 20 – a) Planta baixa do modelo; b) Representação gráfica do modelo	56
Figura 21 – Perfil de ocupação para dias de semana	60
Figura 22 – Perfil de ocupação para finais de semana	60
Figura 23 – Padrão de uso de iluminação para dias da semana.....	61
Figura 24 – Padrão de uso de iluminação para finais de semana	61
Figura 25 – Indicação solar da edificação	65
Figura 26 – Classes de eficiência energética para condicionadores de ar split	70
Figura 27 – Emitância térmica das telhas	77
Figura 28 – Refletância solar das telhas	77
Figura 29 – Refletância espectral por comprimento de onda das telhas cerâmicas	78

Figura 30 – Refletância espectral por comprimento de onda das telhas de fibrocimento	79
Figura 31 – Refletância espectral por comprimento de onda de todas as telhas	79
Figura 32 – Temperatura interna para o dormitório 1 (telhas de fibrocimento).....	83
Figura 33 – Temperaturas interna do dormitório 1 (telhas cerâmicas).....	84
Figura 34 – Temperaturas internas e externa (22 de janeiro)	85
Figura 35 – Temperaturas internas e externa (24 de julho).....	86
Figura 36 – Temperaturas das duas orientações da cobertura com telhas de fibrocimento.....	87
Figura 37 – Temperaturas das duas orientações da cobertura com telhas cerâmicas	88
Figura 38 - Temperatura da cobertura leste da telha de fibrocimento	89
Figura 39 – Temperatura da cobertura leste da telha cerâmica	89
Figura 40 – Temperaturas das coberturas (22 de janeiro)	91
Figura 41 – Temperaturas das coberturas (24 de julho).....	92
Figura 42 – Taxa de transferência de calor por radiação térmica para a cobertura leste de fibrocimento.....	93
Figura 43 – Taxa de transferência de calor por radiação térmica para a cobertura leste de cerâmica.....	94
Figura 44 – Taxa de transferência de calor por radiação térmica (22 de janeiro)	95
Figura 45 – Taxa de transferência de calor por radiação térmica (24 de julho).....	96
Figura 46 – Taxa de ganho de calor por radiação solar anual para telhas de fibrocimento.....	97
Figura 47 – Taxa de ganho de calor por radiação solar anual para telhas cerâmicas	97
Figura 48 – Taxa de ganho de calor por radiação solar (22 de janeiro)	99
Figura 49 – Taxa de ganho de calor por radiação solar (24 de julho).....	100
Figura 50 – Taxa de transferência de calor por convecção natural ($W.m^{-2}$) para as telhas de fibrocimento.....	101
Figura 51 – Taxa de transferência de calor por convecção natural ($W.m^{-2}$) para as telhas cerâmicas	101
Figura 52 – Taxa de transferência de calor por convecção natural da superfície para o ambiente ($W.m^{-2}$) para as telhas de fibrocimento	102
Figura 53 – Taxa de transferência de calor por convecção natural da superfície para o ambiente ($W.m^{-2}$) para as telhas cerâmicas	102
Figura 54 – Taxa de transferência de calor por convecção natural da superfície para o ambiente (W/m^2) para um dia de verão (22 de janeiro).....	103
Figura 55 – Taxa de transferência de calor por convecção natural da superfície para o ambiente ($W.m^{-2}$) para um dia de inverno (24 de julho)	104
Figura 56 – Taxa média de transferência de calor por condução ($W.m^{-2}$) para telhas de fibrocimento.....	105
Figura 57 – Taxa média de transferência de calor por condução ($W.m^{-2}$) para telhas cerâmicas	105

Figura 58 – Taxa média de transferência de calor por condução ($W.m^{-2}$) para um dia de verão (22 de janeiro).....	106
Figura 59 – Taxa média de transferência de calor por condução ($W.m^{-2}$) para um dia de inverno (24 de julho)	107
Figura 60 – Consumo de energia elétrica de aquecimento e resfriamento para a cobertura de fibrocimento.....	111
Figura 61 – Consumo de energia elétrica de aquecimento e resfriamento para a cobertura de cerâmica.....	111
Figura 62 – Consumo de energia elétrica de aquecimento e resfriamento para a cobertura de fibrocimento.....	113
Figura 63 – Consumo de energia elétrica de aquecimento e resfriamento para a cobertura de cerâmica.....	113
Figura 64 – Consumo de energia elétrica de aquecimento e resfriamento para a cobertura de fibrocimento.....	115
Figura 65 – Consumo de energia elétrica de aquecimento e resfriamento para a cobertura de cerâmica.....	115
Figura 66 – Etapas da construção da cobertura para telha cerâmica	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Posse média de equipamentos	21
Tabela 2 – Economia líquida de ciclo de vida de 20 anos e período de retorno para dois cenários de refletância de telhados não isolados	47
Tabela 3 – Distribuição do mercado brasileiro de telhas por tipo	51
Tabela 4 – Características construtivas e propriedades termofísicas das paredes e cobertura	57
Tabela 5 – Características dos materiais utilizados na simulação computacional	58
Tabela 6 – Atividades dos ocupantes	60
Tabela 7 – Densidade de potência instalada de iluminação	61
Tabela 8 – Padrão de uso e potência dos aparelhos elétrico.....	62
Tabela 9 – Resumo dos cenários e da economia de energia.....	68
Tabela 10 – Considerações manutenção do telhado	74
Tabela 11 – Propriedades inseridas no <i>EnergyPlus</i>	80
Tabela 12 – Valores do SRI.....	80
Tabela 13 – Diferenças, máximas e mínimas (em °C), da temperatura interna com telhas naturais e brancas.....	81
Tabela 14 – Temperaturas internas (em °C), máximas e mínimas, para os APP	84
Tabela 15 – Temperaturas máximas e mínimas da cobertura, em °C, para os dois tipos de telhas e cores, e para as duas orientações da cobertura	90
Tabela 16 – Valores máximos e mínimos da taxa de transferência de calor por radiação térmica ($W.m^{-2}$).....	94
Tabela 17 – Valores máximos da taxa de ganho de calor por radiação solar ($W.m^{-2}$)	98
Tabela 18 – Valores máximos de transferência de calor por convecção da superfície do telhado para o ambiente ($W.m^{-2}$)	103
Tabela 19 – Valores máximos de transferência de calor que adentra a edificação ($W.m^{-2}$) ..	106
Tabela 20 – Consumo de energia elétrica dos equipamentos e da iluminação.....	108
Tabela 21 – Levantamento de preços para cobertura de fibrocimento natural.....	118
Tabela 22 – Levantamento de preços para cobertura de cerâmica natural	119
Tabela 23 – Levantamento de preços para cobertura de fibrocimento branca	120
Tabela 24 – Levantamento de preços para cobertura de cerâmica branca	120
Tabela 25 – Diferença de preço das telhas e cumeeira, naturais e brancas	121
Tabela 26 – Tarifa de energia elétrica vigente desde 01/04/2019 da distribuidora Light – Rio de Janeiro	122
Tabela 27 – Custo de energia elétrica (carga térmica) para os diferentes cenários para telhas de fibrocimento.....	123
Tabela 28 – Custo de energia elétrica (carga térmica) para os diferentes cenários para telhas cerâmicas	123

Tabela 29 – Economia de energia elétrica para os 3 cenários para telha de fibrocimento e telha cerâmica.....	124
Tabela 30 – Evolução das revisões e reajustes tarifários da distribuidora Light – RJ	125
Tabela 31 – Série histórica do INPC 2012 a 2018	126
Tabela 32 – Comparação do custo de um telhado convencional e um telhado frio	126
Tabela 33 – Indicadores financeiros para os dois tipos de telhas* para a consideração 1 (com manutenção apenas no telhado frio)	129
Tabela 34 – Indicadores financeiros para os dois tipos de telhas* para a consideração 2 (com manutenção nos dois telhados: frio e convencional).....	129
Tabela 35 – Preço da tesoura para um telhado de fibrocimento.....	144
Tabela 36 – Preço da trama de madeira e do telhamento para um telhado de fibrocimento..	145
Tabela 37 – Preço da cumeeira para o telhado de fibrocimento.....	146
Tabela 38 – Preço da tesoura para um telhado de cerâmica.....	147
Tabela 39 – Preço da trama de madeira para um telhado de cerâmica.....	148
Tabela 40 – Preço do telhamento para o telhado de cerâmica.....	149
Tabela 41 – Preço da cumeeira para o telhado de cerâmica.....	149
Tabela 42 – Fonte dos preços das telhas brancas e da manutenção	150
Tabela 43 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura de fibrocimento – Cenário 1 (consideração 1).....	151
Tabela 44 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura de fibrocimento – Cenário 1 (consideração 2).....	152
Tabela 45 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura de fibrocimento – Cenário 2 (consideração 1).....	153
Tabela 46 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura de fibrocimento – Cenário 2 (consideração 2).....	154
Tabela 47 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura de fibrocimento – Cenário 3 (consideração 1).....	155
Tabela 48 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura de fibrocimento – Cenário 3 (consideração 2).....	156
Tabela 49 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura cerâmica – Cenário 1 (consideração 1).....	157
Tabela 50 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura cerâmica – Cenário 1 (consideração 2).....	158
Tabela 51 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura cerâmica – Cenário 2 (consideração 1).....	159
Tabela 52 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura cerâmica – Cenário 2 (consideração 2).....	160
Tabela 53 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura cerâmica – Cenário 3 (consideração 1).....	161
Tabela 54 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura cerâmica – Cenário 3 (consideração 2).....	162

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABESCO	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia
APP	Ambientes de permanência prolongada
BEN	Balanco Energético Nacional
COP	Coefficiente de Desempenho (tradução)
DPI	Densidade de potência de iluminação
EER	Índice de Eficiência de Energia (tradução)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LABSOLAR	Laboratório de Energia Solar
NIR	Infravermelho Próximo (tradução)
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
SRI	Índice de Reflexão Solar (tradução)
SWERA	<i>Solar and Energy Resource Assessment</i>
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TMY	<i>Typical Meteorological Year</i>
U	Transmitância Térmica
UV	Ultravioleta
VIS	Luz visível
VPL	Valor Presente Líquido
WEO	<i>World Energy Outlook</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVA.....	20
1.2	OBJETIVOS	22
1.2.1	Objetivo geral	22
1.2.2	Objetivos específicos	22
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	PROPRIEDADES TÉRMICAS E ÓPTICAS.....	24
2.2	REVESTIMENTOS FRIOS	26
2.2.1	Diferentes condições climáticas	34
2.2.2	Envelhecimento de revestimentos	37
2.2.3	Vida útil	41
2.2.4	Transmitância Térmica	41
2.3	ILHA DE CALOR	43
2.4	ANÁLISE ECONÔMICA	45
2.5	SÍNTESE DO CAPÍTULO	48
3	MÉTODO	50
3.1	SELEÇÃO DOS MATERIAIS	51
3.2	MEDIÇÃO DAS PROPRIEDADES ÓPTICA E TÉRMICA	52
3.2.1	Medição da emitância térmica	52
3.2.2	Medição da refletância solar	53
3.2.3	Índice de Reflexão Solar (SRI)	54
3.3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	55
3.3.1	Modelo da edificação	55
3.3.2	Construção: materiais e suas propriedades térmicas	56

3.3.3	Contato com o solo	58
3.3.4	Ganhos internos.....	59
3.3.4.1	<i>Ocupação e atividades</i>	59
3.3.4.2	<i>Iluminação e equipamentos</i>	61
3.3.5	Ventilação natural e infiltração	62
3.3.6	Clima, entorno e orientação solar.....	64
3.3.7	Arquivo climático.....	65
3.4	CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO.....	66
3.4.1	Cenário 1.....	66
3.4.2	Cenário 2.....	66
3.4.3	Cenário 3.....	67
3.5	PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS	68
3.5.1	Análise térmica	68
3.5.2	Análise Energética.....	70
3.5.3	Análise Econômica	71
3.5.3.1	<i>Levantamento de preços.....</i>	71
3.5.3.2	<i>Economia de energia</i>	72
3.5.3.3	<i>Fluxo de caixa</i>	73
3.5.3.4	<i>Indicadores financeiros.....</i>	74
4	RESULTADOS.....	48
4.1	PROPRIEDADES ÓPTICAS E TÉRMICAS.....	76
4.1.1	Emitância	76
4.1.2	Refletância Solar	77
4.1.3	Propriedades inseridas no <i>EnergyPlus</i>.....	79
4.1.4	Índice de Reflexão Solar (SRI).....	80
4.2	ANÁLISE TÉRMICA.....	81
4.2.1	Temperatura interna dos ambientes	81

4.2.2	Temperatura externa da cobertura.....	86
4.2.3	Radiação térmica.....	92
4.2.4	Radiação Solar.....	96
4.2.5	Convecção natural.....	100
4.2.6	Condução	104
4.3	ANÁLISE ENERGÉTICA	107
4.3.1	Cenário 1: Consumo de energia elétrica	108
4.3.2	Cenário 2: Consumo de energia elétrica	112
4.3.3	Cenário 3: Consumo de energia elétrica	114
4.4	ANÁLISE ECONÔMICA	117
4.4.1	Levantamento de preços	117
4.4.2	Economia de energia.....	121
4.4.3	Fluxo de caixa	124
4.4.4	Indicadores financeiros.....	127
5	CONCLUSÕES	130
5.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	134
5.2	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	134
	REFERÊNCIAS.....	136
	APÊNDICE A – PESQUISA DE PREÇOS TELHADOS FRIOS	144
	APÊNDICE B – PREÇOS DAS TELHAS BRANCAS E PREÇO DA MANUTENÇÃO	150
	APÊNDICE C – FLUXOS DE CAIXA UTILIZADOS NA ANÁLISE ECONÔMICA.....	151

1 INTRODUÇÃO

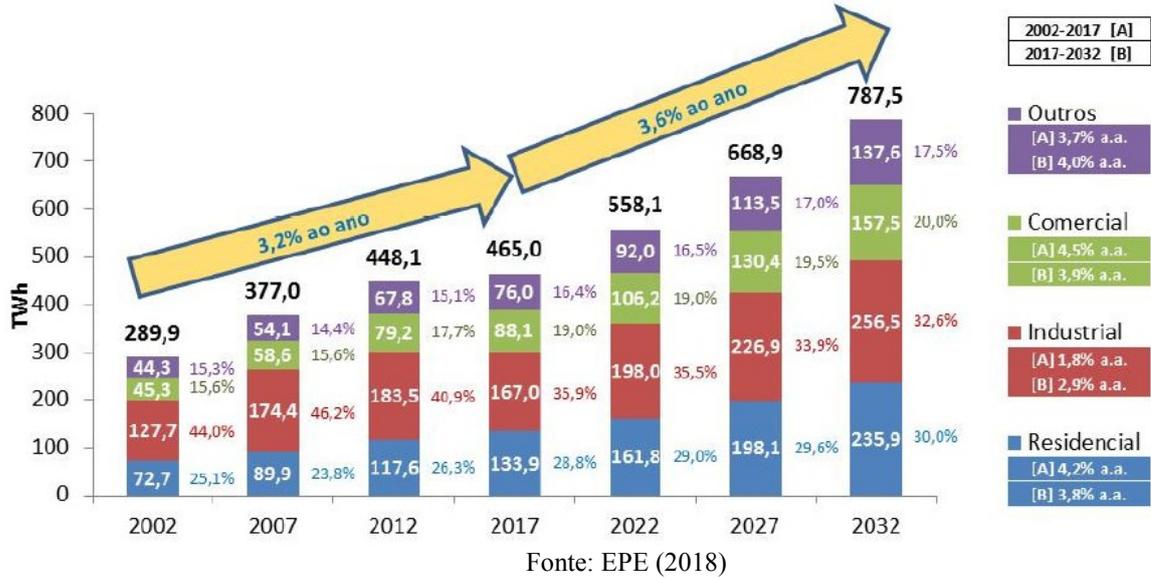
O consumo de energia aumentou rapidamente nos edifícios na última década devido ao crescimento da população, ao maior tempo gasto em ambientes fechados, ao aumento da demanda por funções de construção e qualidade ambiental interna e às mudanças climáticas globais (CAO; DAI; LIU, 2016). Zhou *et al.* (2011) avaliaram o consumo de energia futuro em edifícios chineses, em dois cenários de desenvolvimento, e constataram que o consumo continuará a aumentar nas décadas subsequentes, mesmo com a aplicação de tecnologias de economia de energia.

O consumo de energia para resfriamento mostra uma tendência de crescimento, sendo uma preocupação primordial não apenas para países que são caracterizados por condições climáticas quentes, mas também para as cidades que sofrem com o fenômeno de ilha de calor (SYNNEFA; SANTAMOURIS; AKBARI, 2007), devido ao aumento das temperaturas urbanas associado a esse fenômeno.

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2017 (BEN), o consumo final de energia elétrica para os setores residencial, comercial e público correspondem a 51% do total e são identificados como a principal demanda de eletricidade do país. Entretanto, através de construções energeticamente eficientes e ações de eficiência energética em todos os seguimentos, esse consumo pode ser reduzido, se essas edificações forem projetadas, construídas e operadas adequadamente.

A demanda por energia elétrica no Brasil deverá crescer 3,6% ao ano até 2032, como projeta o Caderno de Demanda de Eletricidade da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018). As projeções levam em conta um cenário de referência. Em um cenário de crescimento econômico inferior, o crescimento da demanda por eletricidade seria de 3,1% e, em um cenário superior, de 3,9%. O consumo total em 2032 deverá atingir 787,5 TWh, contra os 465 TWh registrados em 2017. Do total do consumo projetado, 30% seriam utilizados pelo segmento residencial e 20% pelo comercial, conforme ilustra a Figura 1 (EPE, 2018).

Figura 1 – Projeção do consumo de energia elétrica para os próximos 15 anos



É importante ressaltar que, após dois anos de recessão, o consumo de energia elétrica voltou a subir em 2017; no entanto, com patamar ainda muito próximo ao de 2013, conforme apresenta a Figura 2 (EPE, 2018).

Figura 2 – Consumo de energia elétrica 2004 - 2017 (TWh)



Segundo a Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia (ABESCO, 2015), atualmente, um dos principais desafios do país e dos consumidores de energia é o de encontrar soluções céleres, econômicas e significativas, para superar as dificuldades em relação ao cenário energético e hídrico que preocupa a sociedade brasileira, e influencia o desenvolvimento econômico do país. O custo de energia está alto e a tendência é de aumentar ainda mais. Existem duas formas básicas de se obter energia: gerando energia

através dos mecanismos disponíveis na matriz energética brasileira ou otimizando racionalmente o uso final da energia, observando também as perdas associadas. A primeira solução demanda tempo e altos investimentos, o que não resolveria a curto e médio prazo a situação. Logo, utilizar melhor a energia, reduzindo as perdas através da execução de projetos de eficiência energética é a forma mais rápida e de menor custo para a sociedade.

Isaac e Vuuren (2009) desenvolveram um modelo para prever os principais fatores que afetam o consumo de energia e concluíram que, no cenário de referência, a demanda global de aquecimento residencial diminuiria em 34%, e a demanda de refrigeração aumentaria em 72% até 2100. O consumo de energia para resfriamento aumentará consideravelmente em países em desenvolvimento, como a China e a Índia, devido às condições econômicas e ao aumento das temperaturas nas cidades. Em contraste, as cargas de resfriamento nos EUA e na Europa só aumentarão ligeiramente no próximo século. Pode-se concluir então que o efeito da mudança climática sobre o consumo de energia depende do clima local e das condições econômicas da sociedade.

Neste cenário entram os revestimentos de alta refletância solar, também chamados de revestimentos frios, telhados frios ou refletivos. Esses materiais são tipicamente brancos, e apresentam refletância solar e emitância altas (SANTAMOURIS, 2014). Devido a estas características, esses materiais têm a capacidade de reduzir a necessidade de energia de resfriamento em edifícios condicionados, e melhoram as condições de conforto térmico em edifícios não condicionados (AKBARI; LEVINSON; MILLER; BERDAHL, 2005).

Embora nem sempre seja tão visível quanto as opções do lado da oferta, a eficiência energética é um componente essencial de um futuro energético sustentável. As políticas para melhorar a eficiência do uso de energia podem começar a gerar benefícios rapidamente, inclusive melhorando a segurança energética e a competitividade industrial, reduzindo as contas de energia domésticas e os problemas ligados à poluição do ar local e às mudanças climáticas (IEA, 2013).

1.1 JUSTIFICATIVA

Os telhados são constantemente atingidos pela radiação solar. A utilização de materiais frios (com alta refletância solar e alta emitância térmica) na cobertura proporciona redução significativa no fluxo de calor que adentra uma edificação, causando atenuação na carga de resfriamento do edifício. Desta forma, pode fornecer economia de energia

significativa em edifícios refrigerados ou melhorar as condições térmicas internas de edifícios não refrigerados (ZINZI; AGNOLI, 2012).

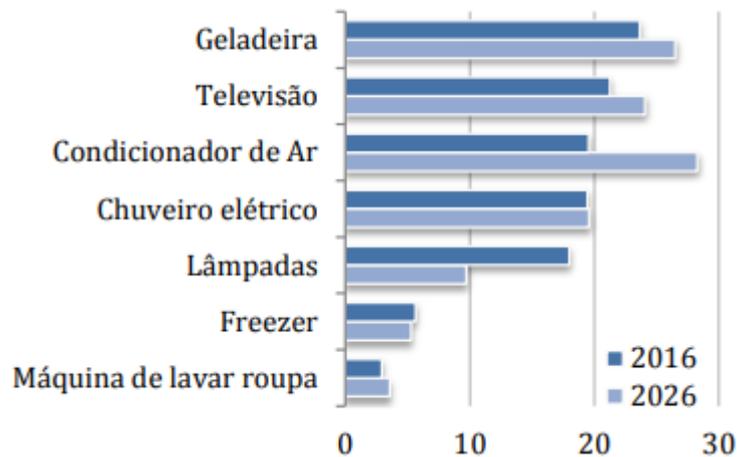
O consumo de energia dos principais equipamentos residenciais crescerá, com destaque para o condicionador de ar (Tabela 1), que por conta da ampliação do seu acesso pelas famílias, será o principal responsável pelo consumo de energia elétrica nos domicílios, de acordo com a Figura 3 (EPE, 2017).

Tabela 1 – Posse média de equipamentos

Equipamento	2016	2021	2026
	unidades/100 domicílios		
Condicionador de ar	46	56	60
Geladeira	108	108	110
Freezer	18	17	15
Chuveiro elétrico	65	61	58
Máquina de lavar roupa	68	74	76
Televisão	181	183	186
Lâmpadas/domicílio	8,9	9,1	9,3

Fonte: EPE (2017)

Figura 3 – Consumo de energia elétrica por equipamento (TWh)



Fonte: EPE (2017)

Os telhados frios, também chamados de revestimentos frios e *cool roofs*, entram nesse cenário como uma técnica passiva para reduzir a carga de resfriamento dos edifícios, e ganharam muito interesse nos últimos anos, em razão de serem eficazes, baratos, de fácil aplicação e energeticamente eficientes (SONG *et al.*, 2013). Para esse efeito, materiais frios são aqueles que refletem uma grande quantidade de radiação solar e evitam o superaquecimento das superfícies. A utilização desses materiais tem potencial de economia de energia de resfriamento não desprezível, pois contribui para a redução da temperatura

ambiente durante o verão e, além disso, contribui para a melhoria do microclima urbano, diminuindo a intensidade do fenômeno ilha de calor (PISELLO *et al.*, 2016).

Nesse contexto, vários estudos têm sido realizados com o objetivo de desenvolver soluções de mitigação das ilhas de calor e estratégias de refrigeração passiva dentro de diferentes limites climatológicos (HABERL; CHO, 2014, PISELLI *et al.*, 2017, SHI; SHANG, 2011, WANG *et al.*, 2008). Os telhados cobrem pelo menos 25% das superfícies urbanas, e aumentar sua refletância teria efeito significativo no balanço energético total da cidade (PISELLO *et al.*, 2016). Por conseguinte, os telhados frios têm grande potencial tanto para a economia de energia nos edifícios, como para a redução do fenômeno ilha de calor.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral e os objetivos específicos previstos como parte integrante da presente pesquisa estão descritos a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo principal realizar uma avaliação termoenergética e econômica do uso de telhados alta refletância solar e alta emitância térmica (telhados frios) em uma residência unifamiliar na cidade do Rio de Janeiro.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estimar os valores do Índice de Reflexão Solar (SRI) para as telhas consideradas nas simulações;
- Avaliar a variação do consumo de energia elétrica e desempenho térmico para o modelo residencial, em três diferentes cenários;
- Realizar a análise de viabilidade econômica para implementação de telhados frios, através dos indicadores financeiros: VPL, TIR e *payback*.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução sobre o tema, justificando o assunto estudado e apresenta também os objetivos que se espera alcançar.

No segundo capítulo é apresentado um referencial teórico referente às propriedades térmicas e ópticas dos materiais, trata também dos revestimentos frios e sua influência quanto as diferentes condições climáticas, ao envelhecimento dos revestimentos, a vida útil e a transmitância térmica de coberturas. Neste capítulo é abordado também o fenômeno ilha de calor e alguns estudos que apresentam análise econômica. Por fim, é apresentada uma síntese do capítulo.

O terceiro capítulo descreve o método utilizado nas medições das telhas e na análise por simulação computacional. No quarto capítulo são exibidos os resultados alcançados nesta pesquisa, incluindo os obtidos pelas medições das telhas e pela aplicação da simulação computacional. No quinto e último capítulo apresentam-se as conclusões averiguadas a partir dos resultados, bem como as limitações que o trabalho apresenta e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir serão descritos os pressupostos teóricos básicos relacionados à temática estudada na presente pesquisa.

2.1 PROPRIEDADES TÉRMICAS E ÓPTICAS

As coberturas das edificações representam uma significativa parcela de exposição à insolação da área urbana, sendo este um importante espaço para a aplicação de técnicas que visem o potencial de redução do consumo de energia e a mitigação das ilhas de calor (SANTAMOURIS, 2014). Segundo Santamouris (2014), altos albedos reduzem a absorção e o acúmulo de calor na cobertura, diminuindo a temperatura da superfície, o que leva a menores fluxos de calor adentrando no ambiente. Por sua vez, a emitância dos telhados define a sua habilidade de dissipar calor através de radiação infravermelha, ou seja, valores elevados de emitância térmica colaboram para menores temperaturas nas superfícies.

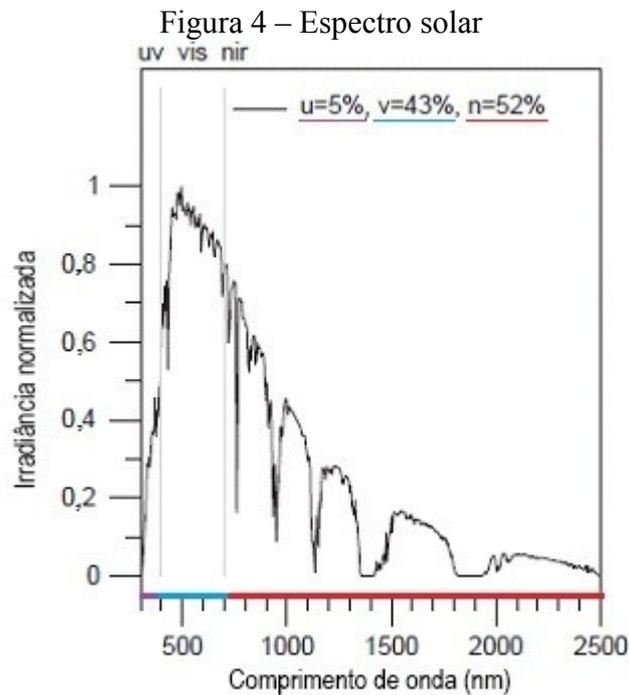
A radiação solar incidente sobre um elemento construtivo é absorvida, transmitida ou refletida. A refletância à radiação solar é definida, segundo a NBR 15220-1 (2003), como o quociente da taxa de radiação solar refletida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície e pode variar de 0 a 1. A refletância solar é dependente das propriedades ópticas dos pigmentos dentro de um revestimento, e é tanto especular quanto difusa. Reflexão especular é uma reflexão espelhada em um ângulo igual, mas oposto, ao ângulo de incidência; ela é dependente da diferença no índice de refração entre dois meios, e pode ser calculada pela lei de Fresnel. A reflexão difusa ocorre sobre uma ampla faixa angular e contém toda a energia radiante refletida, exceto aquela refletida especularmente (BRADY; WAKE, 1992).

A emissividade é definida, segundo a NBR 15220-1 (2003), como o quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura. A emitância por sua vez, é a taxa de emissão de radiação por unidade de área (ABNT, 2003). A emitância, emissão infravermelha, é uma medida da capacidade da superfície em liberar o calor absorvido. Esta medida especifica quão bem uma superfície irradia energia, em comparação a um corpo negro operando na mesma temperatura. É medida em uma escala de 0 a 1 (SYNNEFA; SANTAMOURIS; APOSTOLAKIS, 2007).

A luz visível (VIS) (400 – 700 nm) representa 43% da energia do espectro de irradiância solar global (300 – 2500 nm); 52% de toda energia solar chega como

infravermelho próximo (NIR) (700-2500 nm), e os 5% restantes chegam como radiação ultravioleta (UV) (300 – 400 nm), conforme mostra a Figura 4. Desta forma, a substituição de coberturas que absorvem NIR (revestimentos convencionais) por coberturas que a refletem (revestimentos frios) pode reduzir significativamente o ganho de calor nos edifícios (LEVINSON; BERDAHL; AKBARI, 2005).

Revestimentos convencionais de cor escura geralmente absorvem a radiação infravermelha próxima, aquecendo o edifício. Como a absorção ultravioleta (UV) é necessária para proteger os revestimentos, e a refletância espectral visível (VIS) é fixada para produzir uma cor específica, a maneira mais eficaz de melhorar a refletância é maximizar a refletância NIR (LEVINSON *et al.*, 2007).



A determinação do Índice de Reflexão Solar, do inglês “*Solar Reflectance Index*” (SRI) é uma maneira de quantificar o comportamento da superfície de um material quando este é exposto à incidência da radiação solar. Esse índice indica a capacidade que uma superfície tem de refletir a radiação solar e emitir radiação térmica, reduzindo o aumento da temperatura causada por esta exposição (JACINTO *et al.*, 2016).

De acordo com ASTM E1980 (2011), o SRI quantifica quão quente uma superfície plana ficaria, em relação a um preto padrão (refletância 5%, emitância 90%) e uma superfície branca padrão (refletância 80%, emitância 90%). O cálculo deste índice é baseado em um

conjunto de equações (ASTM, 2011) que exigem valores medidos de refletância solar e emitância para condições ambientais específicas. O SRI tem um valor de zero para a superfície preta padrão, e de 100 para a superfície branca padrão. A partir da definição do SRI, espera-se que materiais muito quentes possam ter valores negativos e materiais muito frios possam ter valores superiores a 100 (SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011).

Shi e Zhang (2011) desenvolveram simulações paramétricas, relacionando a variação da refletância e da emitância, ambos dentro do intervalo de 0,1 a 0,9, com o consumo de energia elétrica de uma edificação em 35 cidades do mundo, e dentre elas, São Paulo, Brasil. A partir desta análise, os autores verificaram a importância destas propriedades no desenvolvimento de um projeto energeticamente eficiente, especialmente em climas tropicais e subtropicais, onde elevados valores de refletância e emitância resultaram na maior eficiência. Vale ressaltar, no entanto, que a análise dos autores abordou tão somente a variação dos citados parâmetros radiativos, não levando em consideração a existência de tais componentes no mercado, nem a composição completa do telhado nas diferentes soluções.

Werle, Loh e John (2014) mediram as propriedades de refletância solar e de emissividade térmica em superfícies pintadas com tinta à base de cal, com diferentes números de demãos e sobre substratos distintos. Os resultados de refletância variaram de 0,56 a 0,83, dependendo do número de demãos e do tipo de substrato. A emissividade térmica manteve-se, em média, em 0,97 para todos os casos. Os autores concluíram que os revestimentos pintados com cal podem ser considerados revestimentos frios, tendo em vista sua alta refletância solar e emissividade térmica.

Marinoski *et al.* (2013) mediram a refletância solar de amostras através de três distintos equipamentos, um espectrofotômetro (UV-VIS-NIR PerkinElmer), um refletômetro (D&S) e um espectrômetro portátil (ALTA II), objetivando verificar a variação de resultados na medição de um mesmo parâmetro. Dentre os três, o espectrofotômetro é considerado o mais exato, pois possibilita a medição de maior parte do espectro solar. Segundo os autores, o refletômetro destaca-se na sequência, com variação absoluta de apenas $\pm 0,011$. O espectrômetro portátil, por outro lado, representa um equipamento para aplicação didática e sem uso normatizado.

2.2 REVESTIMENTOS FRIOS

Os materiais de coberturas absorvem radiação solar e infravermelha, e dissipam para a atmosfera parte do calor acumulado, através de processos convectivos e radiativos,

aumentando a temperatura ambiente (SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011). Nahar, Sharma e Purohit (2003) mencionaram em seu estudo que um telhado pode contribuir com até 50% da carga térmica de edifícios em climas quentes. Assim, as características dos materiais utilizados nas coberturas determinam, em alto grau, o consumo de energia e as condições de conforto térmico nas edificações.

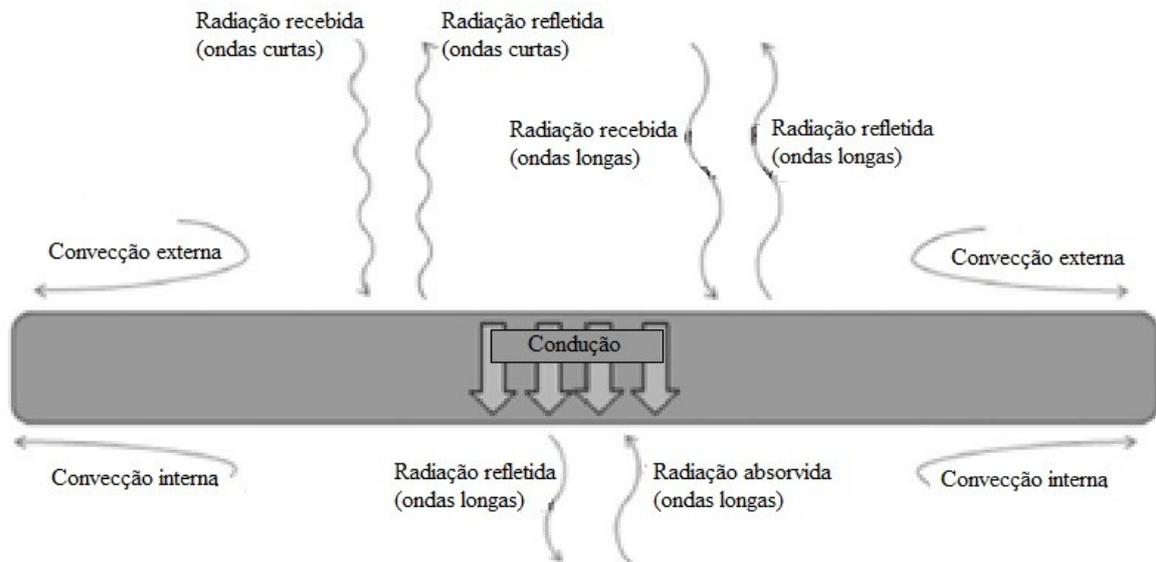
Os materiais com alta refletância solar aplicados aos componentes opacos das edificações tornam-se cada vez mais importantes, devido a seus benefícios em termos de conforto térmico e economia de energia. Devido às suas propriedades ópticas, esses materiais ficam mais frios do que os materiais com refletâncias solares menores, sob as mesmas condições. Por essa razão, são conhecidos como materiais frios (HERNÁNDEZ-PEREZ *et al.*, 2014).

Telhados frios ou refletivos são tipicamente brancos, e apresentam refletância solar e emitância altas (SANTAMOURIS, 2014). Devido a estas características, esses materiais têm a capacidade de reduzir a necessidade de energia de resfriamento em edifícios condicionados, e melhoram as condições de conforto térmico em edifícios não condicionados (AKBARI; LEVINSON; MILLER; BERDAHL, 2005). Uma superfície branca, limpa, lisa e opaca reflete fortemente a radiação visível e NIR, alcançando uma refletância solar de cerca de 0,85 (LEVINSON *et al.*, 2007).

O uso de materiais que apresentam alta refletância solar e alta emitância contribui para o aumento do albedo urbano. A utilização desses materiais gera uma economia de energia indireta, visto que contribui para a redução da temperatura do ar devido ao balanço térmico da superfície do telhado no nível urbano. Por conseguinte, é considerada uma das técnicas mais promissoras e poderosas para mitigar o fenômeno ilha de calor (SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011).

A Figura 5 mostra a transferência de calor em uma cobertura. Parte da radiação solar que chega à superfície do telhado é absorvida e o resto é refletido de volta para o meio. Parte da radiação solar absorvida é reirradiada para a atmosfera, parte dela é conduzida para o edifício e parte é perdida por convecção para a atmosfera. O calor que atinge a superfície interna da edificação é distribuído por convecção e radiação (ARUMUGAM; GARG; RAM; BHATIA, 2015).

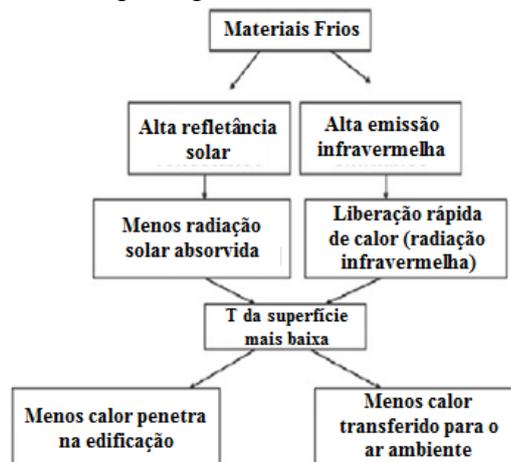
Figura 5 – Transferência de calor em uma cobertura



Fonte: adaptado de ARUMUGAM; GARG; RAM; BHATIA (2015)

Quando a radiação solar incidente atinge a superfície de um revestimento altamente refletivo, grande parte da radiação solar é refletida para o ambiente, reduzindo assim o aquecimento da cobertura. Uma parte do calor absorvido é emitida de volta ao céu na forma de radiação infravermelha, aumentando ainda mais o resfriamento da cobertura. Desta forma, como a superfície tem uma temperatura menor, as trocas de calor por convecção e radiação serão menos intensas, contribuindo para diminuir a temperatura do ar ambiente, e uma quantidade menor de calor adentra na edificação (Figura 6) (SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011).

Figura 6 – Os princípios básicos dos materiais frios



Fonte: adaptado de SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI (2011)

Haberl e Cho (2004) realizaram uma revisão da literatura e, com base em 27 artigos, relataram que a economia de energia de resfriamento, devido à aplicação de materiais frios (principalmente sistemas de cobertura branca), em edifícios residenciais e comerciais, varia de 2% a 44%, e em média, 20%. Esses valores dependem de muitos parâmetros, como as características e o uso do prédio, as condições ambientais dos locais, entre outros (SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011).

Miller *et al.* (2005) relataram que a aplicação de um revestimento frio em uma cobertura de concreto diminui cerca de 70% a transferência de calor que penetra em uma edificação, quando comparado a uma edificação idêntica, mas com uma cobertura convencional. Hernandez-Perez *et al.* (2014) revisaram o desempenho térmico de materiais frios, e seu impacto subsequente em uma variedade de edifícios modelados. Eles descobriram que esses materiais podem reduzir o fluxo de calor de 11 a 60%, reduzir a temperatura interna do ar em até 7°C, reduzir as cargas de resfriamento em até 80% e o consumo anual total de energia em até 20%.

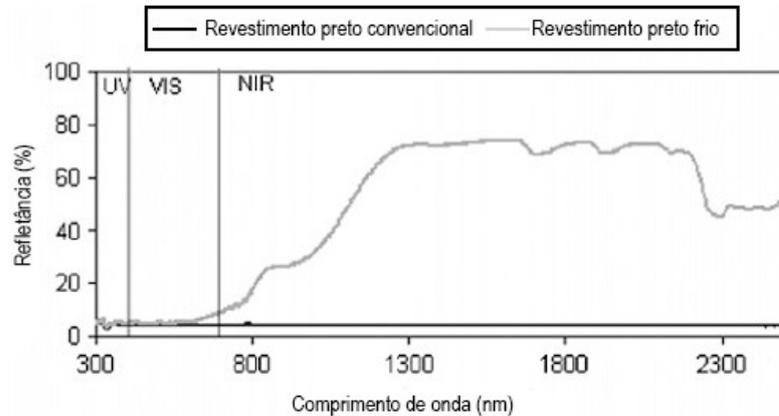
Um telhado frio pode reduzir as temperaturas internas em até 3,3°C, para os climas de Nova Deli e Cairo (SYNNEFA; SANTAMOURIS; AKBARI, 2007), causando com isso um menor consumo de resfriamento para edificações com ar-condicionado, ou melhores condições térmicas para edificações sem ar-condicionado. Pisello, Cotana e (2014) também relataram a redução da temperatura, em um clima temperado na Itália, devido à utilização dos revestimentos frios. Eles estudaram a utilização de telhas de barro altamente refletivas e quase brancas, e constataram que estes revestimentos reduziram em até 4,7°C o superaquecimento interno do sótão no verão do modelo estudado.

Santamouris *et al.* (2011) investigaram a eficácia de vários materiais (materiais coloridos altamente refletivos e altamente emissivos, materiais brancos frios, materiais de mudança de fase e materiais frios dinâmicos) na redução de sua temperatura superficial. Os autores descobriram que, quando os diferentes materiais são expostos à radiação solar, os materiais frios são a solução comercialmente disponível mais apropriada, tanto sob o ponto de vista energético quanto econômico. Por outro lado, os revestimentos com características ópticas dinâmicas (materiais termocrômicos) são promissores; no entanto, precisam de mais pesquisas em relação ao seu envelhecimento e degradação.

A Figura 7 apresenta a refletância espectral de um revestimento preto convencional (refletância solar 0,05) e um preto frio (refletância solar 0,29). Esses dois revestimentos são caracterizados por valores de refletância semelhantes na parte visível do espectro; porém, o revestimento preto frio tem uma refletância que é significativamente maior no infravermelho

próximo, resultando em uma refletância global maior em relação ao revestimento preto convencional (SANTAMOURIS *et al.*, 2011).

Figura 7 – Refletância espectral de um revestimento preto convencional e um preto frio



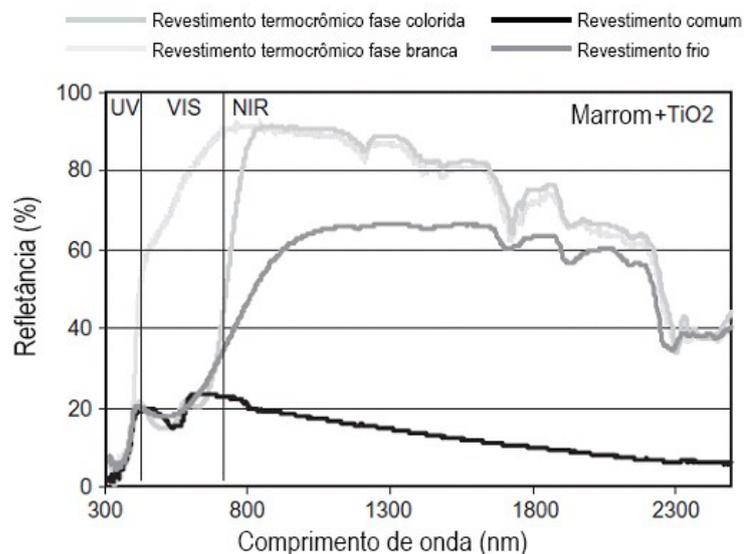
Fonte: adaptado de SANTAMOURIS *et al.*, (2011)

Marino, Minichiello e Bahnfleth (2015) avaliaram a aplicação de tintas frias em edifícios existentes, por meio de simulação, para várias cidades italianas e europeias. Segundo os autores, as necessidades de energia térmica dos edifícios para resfriamento no verão podem ser reduzidas em até 60% com aplicação de tintas frias na superfície externa das paredes e na cobertura. Outro estudo relacionado, de Wang *et al.* (2008), mostra a redução do consumo de energia no desenvolvimento de um modelo dinâmico para um galpão. Os autores compararam o consumo de eletricidade do galpão com diferentes revestimentos para seis locais em todo o mundo. Os revestimentos altamente refletivos reduziram significativamente o consumo de energia em climas quentes, em uma faixa de 25 a 38%. Materiais refletivos têm uma contribuição especial para a diminuição da carga de resfriamento dos edifícios. No entanto, eles podem aumentar as necessidades de aquecimento durante o período de inverno, embora o aumento no consumo de energia de aquecimento seja, geralmente, menor do que a economia de energia de resfriamento correspondente no verão. Nesse cenário entram os revestimentos termocrômicos, devido às suas propriedades ópticas e térmicas exclusivas. Esses revestimentos inovadores podem mudar sua cor com a temperatura, exibindo cores claras no verão e cores escuras no inverno, o que permite que esses revestimentos reflitam a energia solar no verão e absorvam a energia solar no inverno. Desta forma, esses materiais contribuem para diminuir as necessidades de aquecimento e resfriamento dos edifícios. No entanto, a fotodegradação é um grande problema para materiais termocrômicos quando expostos ao ambiente externo. Outro problema é o custo desses materiais, que é atualmente alto, uma vez que eles não são utilizados para o setor de construção. A produção de materiais

termocrômicos pela indústria da construção reduziria significativamente o seu preço. As vantagens que podem ser derivadas de suas propriedades de mudança de cor em relação à eficiência energética em edifícios, e o efeito disso no microclima urbano, encorajam uma investigação mais aprofundada (SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011, SONG, 2013).

No estudo de Karlessi *et al.* (2009) a refletância espectral de revestimentos termocrômicos foi medida, no estado colorido e branco, e também foi medida para os revestimentos frios e comuns. Os resultados mostraram que os revestimentos termocrômicos no seu estado colorido apresentam características ópticas similares ao revestimento frio e comum. Todos os revestimentos termocrômicos do estudo apresentam uma refletância muito alta no infravermelho próximo, e uma absorção muito forte no ultravioleta próximo. A Figura 8 apresenta as curvas espectrais dos revestimentos marrons deste estudo. Quando comparadas às curvas de refletância dos revestimentos termocrômicos em seu estado colorido e incolor, observa-se que a refletância desses revestimentos possui uma refletância solar global maior em relação ao revestimento frio, e ainda maior em relação ao revestimento comum.

Figura 8 – Refletância espectral de revestimentos termocrômicos marrom, revestimento frio e comum da mesma cor

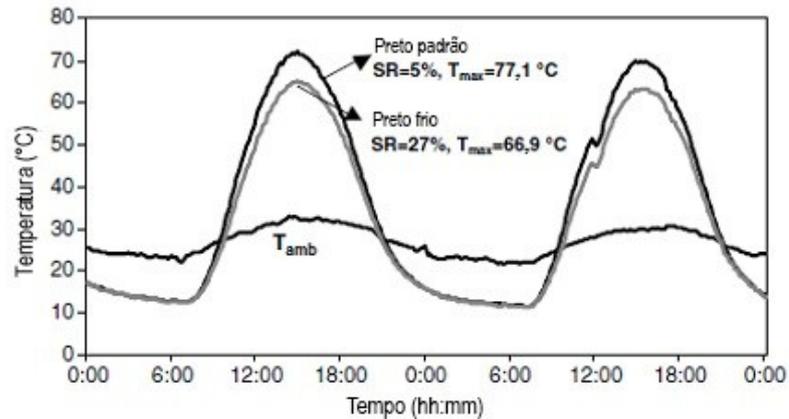


Fonte: adaptado de KARLESSI *et al.*, (2009)

A Figura 9 mostra uma distribuição de 48 horas das temperaturas da superfície do revestimento preto, frio e padrão, e da temperatura ambiente (T_{amb}). O efeito dos pigmentos refletivos do infravermelho nos revestimentos é maximizado no início da tarde, quando a

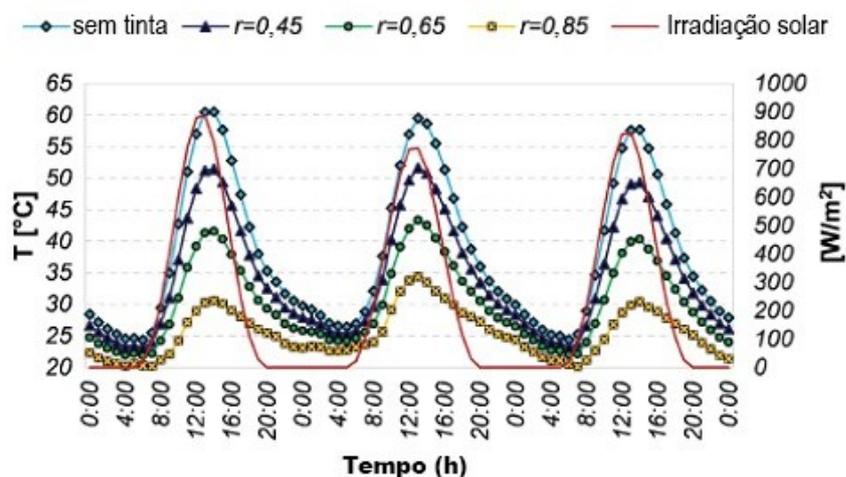
temperatura ambiente aumenta, mantendo a temperatura do revestimento frio mais baixa quando comparada ao revestimento padrão (SYNNEFA *et al.* 2007).

Figura 9 – Perfil da temperatura da superfície de um revestimento preto, frio e padrão, e a temperatura ambiente (T_{amb})



A Figura 10 apresenta a temperatura da superfície externa da cobertura, resultado da simulação dinâmica de um edifício na cidade de Catânia (Sul da Itália), para diferentes condições de refletância solar. Observa-se que a temperatura da superfície do telhado existente (refletância solar de 0,25), sem a utilização de uma tinta fria, é sempre maior do que as alcançadas pelo telhado pintado com a tinta fria. No auge da irradiação solar, o telhado não tratado com tinta fria atinge um pico de cerca de 60°C, enquanto que a telha pintada com a tinta fria (refletância solar de 0,45) mostra uma redução de 10°C, e um telhado com refletância solar de 0,85 apresenta uma redução de 25°C (COSTANZO; GIANPIERO; MARLETTA, 2013).

Figura 10 – Temperatura da superfície externa da cobertura durante os dias mais quentes do verão (8 a 10 de agosto)



Levinson e Akbari (2010) simularam o impacto dos telhados frios na demanda de energia de aquecimento e resfriamento para quatro tipos de escritórios em 236 cidades dos EUA. A penalidade de energia, em termos de aumento da demanda de aquecimento, sempre foi menor do que a redução nas cargas de resfriamento. Em um edifício comercial localizado em Marselha, na França, foi demonstrado que um telhado refletivo proporcionou economia de energia de resfriamento de 34% durante o verão. Por outro lado, o telhado frio levou a uma penalidade de 11% de aquecimento de energia no inverno (LAPISA *et al.*, 2013). Contudo, aumentar a refletância solar do telhado pode potencialmente levar ao aumento da demanda de energia de aquecimento. Estudos (LEVINSON; AKBARI, 2010, LAPISA *et al.*, 2013) mostram que esse aumento é muito menos importante do que a economia de energia de resfriamento correspondente, resultando em economia líquida positiva para condições climáticas quentes/moderadas.

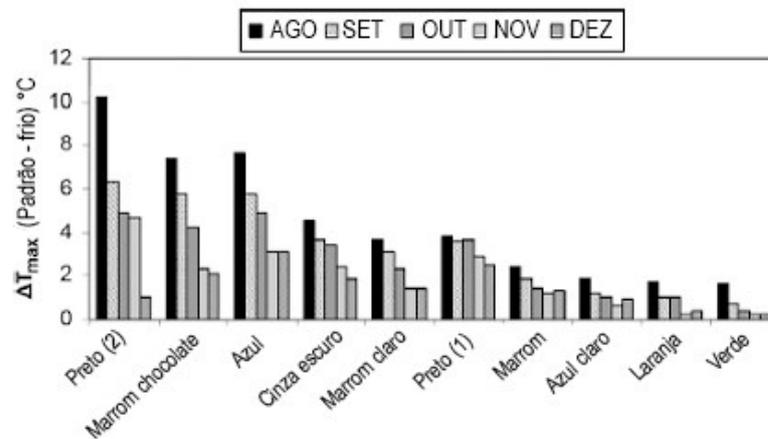
Durante o verão de 2012, um prédio de escritório localizado em Roma, Itália, foi monitorado. Foi investigada a contribuição de um telhado frio, a fim de diminuir a energia necessária para o resfriamento dos ambientes internos. O telhado frio reduziu o consumo de energia do ar-condicionado em cerca de 34% durante o dia (PISELLO; SANTAMOURIS; COTANA, 2013). Outro estudo relacionado mediu o consumo de energia em duas residências em Fresno, EUA. Uma das casas tinha um telhado do tipo *shingle* escuro, enquanto a outra tinha uma cobertura de concreto refletivo. A casa com telhado refletivo apresentou uma economia anual de energia de condicionamento de ar de 10,7 kWh/m² (15%) (ROSADO *et al.* 2014).

Pisello, Cotana, Brinchi (2014) relataram análises experimentais em revestimentos frios para telhas de barro tradicionais. Os resultados mostram que a aplicação deste revestimento reduz o número de horas em que a temperatura operativa é maior que 26°C em cerca de 18%, enquanto a piora no inverno é insignificante. Em relação ao conforto térmico, Constanzo *et al.* (2013) investigaram a eficácia dos telhados frios para melhorar o conforto térmico em um prédio de escritórios em Catania, na Itália. O telhado frio reduziu a intensidade de desconforto térmico em cerca de 21% em relação ao caso base. Ao usar uma tinta mais refletiva, a redução do desconforto térmico foi de 63%. Lapisa *et al.* (2013) também avaliaram a influência de um telhado frio no conforto térmico de um edifício localizado em Marselha, na França. A utilização do telhado frio fez com que as horas de desconforto caíssem 46,8%.

A Figura 11 apresenta a diferença de temperatura entre os revestimentos, frio e padrão, e mostra como essa diferença diminui de agosto a dezembro à medida que a radiação

solar global média diária diminui (estudo realizado no hemisfério norte) e o impacto dos pigmentos refletivos no infravermelho torna-se menos evidente. A diferença média de temperatura máxima entre o revestimento padrão e frio foi de 6,5°C em agosto e caiu para 0,5°C no mês de dezembro. Isso é explicado pelo fato de que durante o inverno o ângulo solar é mais baixo e a radiação solar chega a uma superfície horizontal menos intensa. Há uma probabilidade maior de céus nublados e há menos disponibilidade solar (menos horas de insolação), de modo que menos energia chega a uma superfície a ser absorvida ou refletida no mesmo período de tempo que durante o verão (SYNNEFA *et al.* 2007).

Figura 11 – A diferença máxima da temperatura da superfície ($\Delta T_{\text{máx}}$) entre cada revestimento, frio e colorido, durante o dia



Fonte: adaptado de Synnefa *et al.* (2007)

Synnefa *et al.* (2007) realizaram uma análise paramétrica, simulando telhados frios em edifícios residenciais para uma variedade de climas. Os resultados mostraram que o clima da localização da edificação e o valor da transmitância térmica (U) do telhado foram os dois principais fatores que afetam a economia de energia. Romeo e Zinzi (2013) recomendam que a refletância solar ideal deva ser definida de acordo com o uso da edificação, o isolamento do telhado e as condições climáticas.

2.2.1 Diferentes condições climáticas

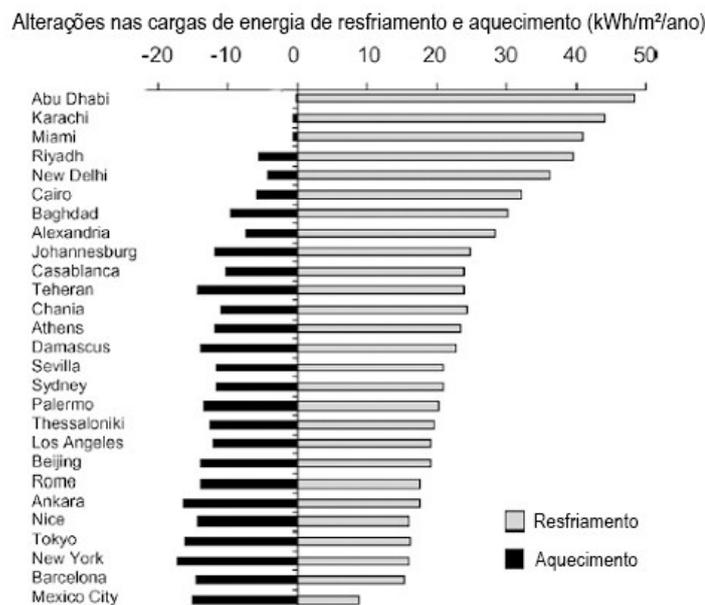
O telhado frio resulta em diferentes economias de energia, dependendo do clima onde está inserido. Esse tema será analisado nesta subseção.

O estudo de Synnefa, Santamouris e Akbari (2007) trata do impacto da alteração da refletância solar na cobertura em relação às cargas de energia, em diferentes condições

climáticas. As cargas de resfriamento foram calculadas para o caso de referência (refletância solar = 0,2), e dois cenários com a refletância solar maior, representando os edifícios utilizando materiais frios. Os resultados, correspondentes a um valor U da cobertura de 0,84 W/m²K, são apresentados na Figura 12.

A Figura 12 mostra que as potenciais economias são maiores nos climas dominados pela carga de resfriamento. Para o edifício escolhido e os climas examinados, mesmo nos casos em que as cargas de aquecimento são mais importantes que as cargas de resfriamento, a diminuição nas cargas de resfriamento sempre excedeu o aumento da carga de aquecimento (exceto para a Cidade do México). Conclui-se, então, que o aumento da refletância solar de um telhado é tipicamente mais benéfico em climas quentes, onde a carga de resfriamento domina parte do ano (SYNNEFA *et al.*, 2007).

Figura 12 – Efeito climático nas mudanças de carga de resfriamento e aquecimento para uma refletância solar do telhado de 0,85

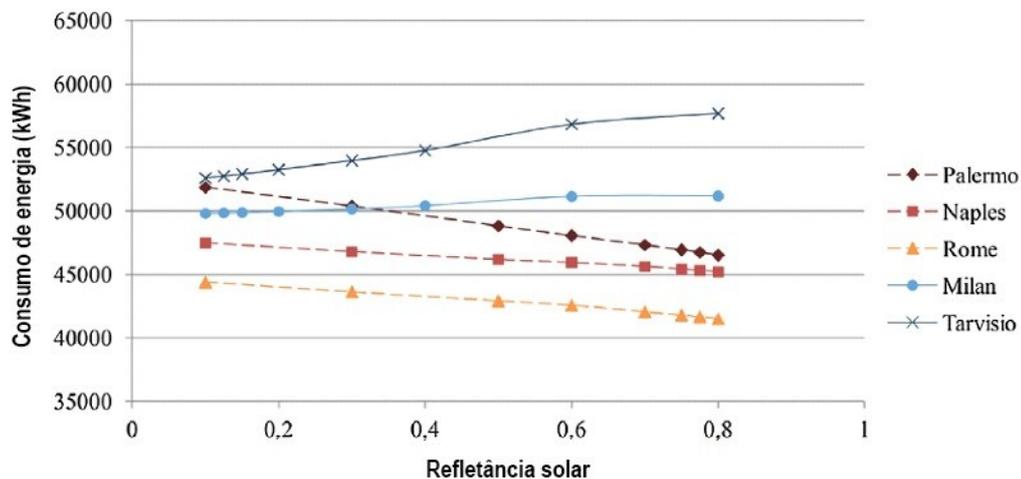


Piselli *et al.* (2017) realizaram uma análise paramétrica, relacionada ao nível de isolamento do telhado e a refletância solar ideal deste, para estimar o impacto no consumo de energia do edifício. Os resultados das otimizações baseadas em simulação mostraram que a refletância solar ótima do telhado, para reduzir o consumo anual de energia do edifício, é afetada principalmente pelo contexto climático.

A Figura 13 apresenta a variação do consumo total de energia HVAC em relação à variação da refletância solar do telhado para um edifício de escritórios nas cinco zonas climáticas italianas. As linhas de tendência mostram que o efeito da refletância do telhado é

principalmente percebido em Palermo (zona B), que representa o clima mais quente, e Tarvisio (Zona F), que representa o clima mais frio. Na zona B, a necessidade anual de energia HVAC do edifício é significativamente reduzida em cerca de 10%, correspondendo a 5,3 MWh, com uma refletância solar de 0,8 (em relação a 0,1). Pelo contrário, na zona F, a necessidade anual de energia HVAC no último andar é reduzida em cerca de 9%, correspondendo cerca de 5,1 MWh, com uma refletância solar igual a 0,1 (em relação a 0,8). Por outro lado, nas zonas mais amenas C, D e E, a tendência de variação do consumo de energia HVAC é mais plana, com economias de energia de 5% (2,3 MWh), 6,5% (2,9MWh) e 3% (1,4 MWh) em Nápoles, Roma e Milão, respectivamente (PISELLI *et al.* 2017).

Figura 13 – Variação do consumo total de energia anual HVAC com variação da refletância solar do telhado para um edifício de escritório nas cinco zonas climáticas italianas



Fonte: adaptado de Piselli *et al.* (2017)

Shi e Zhang (2011) estudaram a variação das cargas anuais de ar condicionado devido a mudanças na refletância solar e na emitância da envoltória de edifícios, em vários climas em todo o mundo. A alta refletância solar e a alta emitância, aplicadas na parte externa da construção, foram as mais favoráveis à economia de energia para climas tropicais e subtropicais. Nos climas do planalto montanhoso e nos climas subárticos, a baixa refletância solar e a baixa emitância da superfície exterior são mais adequadas. Nos climas continentais moderados e nos climas temperados marítimos, a refletância média e a baixa emitância ajustam-se aos requisitos de economia de energia.

Pereira (2014) analisou, através de simulação computacional, a variação das propriedades superficiais do envoltório de um modelo de edificação residencial. A análise foi realizada para os diferentes tipos de clima ocorrente no Brasil, e confirmou-se a indicação de revestimentos com elevada refletância solar para quase todo o território. Com relação à

emitância térmica, para as cidades de clima temperado, as simulações indicaram a adoção de valores menores de emitância térmica na superfície externa do envoltório. Deste modo, Pereira (2014) constatou que os materiais frios não devem ser indicados indistintamente para todas as cidades brasileiras.

2.2.2 Envelhecimento de revestimentos

A refletância solar e a emissão infravermelha de uma superfície exposta a condições externas podem mudar com o tempo, como resultado do envelhecimento, intemperismo e sujeira (KARLESSI *et al.*, 2009). Materiais de construção e polímeros são sistemas multicomponentes, altamente influenciados por efeitos ambientais físicos e químicos (SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011). Os processos relevantes são classificados como envelhecimento em longo prazo e intemperismo, e são iniciados pela temperatura, forças mecânicas, catálise química e processos desencadeados por radiação solar (POSPIŠIL; NESPUREK, 2000).

O intemperismo é considerado como a exposição de materiais a um ambiente natural ou a condições artificiais de envelhecimento acelerado em câmaras de intemperismo, que simulam parâmetros externos. A ciência do intemperismo é um tema complexo, que deve ser estudado como parte da produção de materiais, medição, projeto de teste, exposição e avaliação como um todo (JACQUES, 2000).

A degradação de um material é induzida principalmente pela luz, calor e umidade. Comprimentos de onda mais curtos, que possuem energias de fótons mais altas, são absorvidos na maioria dos materiais poliméricos, tendo o potencial de romper as ligações químicas. A radiação solar varia em intensidade, distribuição de energia espectral, estação, localização e efeitos atmosféricos, como aerossóis ou poluentes (JACQUES, 2000; BERDAHL *et al.*, 2008).

O aumento da temperatura pode levar diretamente à degradação de um material. O efeito depende da fonte de calor e das propriedades específicas da amostra, como refletância, absorvância, emitância e condutividade. As mudanças de temperatura causam tensões, devido à expansão térmica diferencial. A absorção de vapor de água em um material causa expansão de volume e estresse mecânico (JACQUES, 2000; BERDAHL *et al.*, 2008).

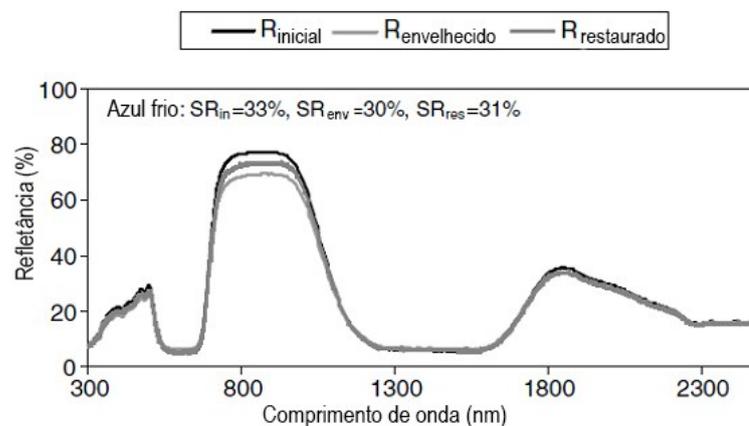
Existem vários outros fatores que influenciam a vida de um material. O vento induz forças, especialmente nas coberturas, causando vibrações que podem levar à formação de rachaduras. Gases atmosféricos e poluentes transportados para uma superfície, por deposição

seca ou úmida, podem interagir com o material, provocando oxidação e corrosão. Crescimento biológico, como fungos, algas, cianobactérias e outros microrganismos são comuns em materiais de construção e coberturas, dependendo das condições ambientais e do período de exposição (JACQUES, 2000; BERDAHL *et al.*, 2008).

Diversos estudos foram realizados sobre o desempenho de materiais ao longo do tempo. Uma refletância solar inicial alta (0,8) de uma membrana de telhado branco pode ser diminuída pela deposição de fuligem, poeira e /ou biomassa para cerca de 0,6 (Levinson *et al.*, 2005). A atenuação das características ópticas de revestimentos frios de cor branca e alumínio foi experimentalmente testada após a exposição a condições externas por 2,5 e 1,5 anos, respectivamente, para o clima de Atenas (SANTAMOURIS *et al.*, 2008). Fotodegradação, estresse do material devido à expansão térmica e deposição de poluentes resultaram em uma diminuição da refletância espectral das amostras que variaram entre 0,01 e 0,19, enquanto a emissão infravermelha não foi consideravelmente alterada (SANTAMOURIS *et al.*, 2008).

Em outro experimento, amostras coloridas foram examinadas após três meses de envelhecimento natural ao ar livre. Foi investigada a eficácia da lavagem na restauração da refletância solar após três meses de exposição. As amostras desgastadas foram lavadas com água e uma esponja. Os resultados demonstraram que, após a lavagem das amostras, o valor inicial da refletância solar foi restaurado até 93% para todas as amostras, indicando que a atenuação foi principalmente devida à coleta de sujeira e não foi permanente. A Figura 14 mostra a refletância espectral inicial, envelhecida e restaurada, para o revestimento frio azul (SYNNEFA *et al.*, 2007).

Figura 14 – Refletância espectral inicial, envelhecida e restaurada, do revestimento azul frio



Fonte: adaptado de SYNNEFA *et al.*, (2007)

Com o objetivo de evitar o escurecimento de superfícies frias, Werle *et al.* (2016) desenvolveram uma superfície fria, autolimpante e a base de cimento, usando dióxido de

titânio (TiO₂), demonstrando que a atividade fotocatalítica é eficaz em manter as superfícies limpas e, portanto, de garantir a manutenção das propriedades frias iniciais. O TiO₂ (anatase) se mostrou interessante devido à capacidade de gerar superfícies funcionais. Quando excitados pela radiação UV, os componentes óxidos de titânico (DESTAILLATS *et al.*, 2012) atuam como biocidas (GUMY *et al.*, 2006) e geram superfícies inorgânicas de autolimpeza (AISSA *et al.*, 2011). Outro estudo de campo mediu os efeitos do envelhecimento e intemperismo de dez telhados na Califórnia. Foi descoberto que a reflexão de materiais frios pode diminuir em até 0,15 devido à deposição de fuligem e poeira, principalmente dentro do primeiro ano de exposição (BERDAHL; BRETZ, 1997).

No entanto, Bretz e Akbari (1997) demonstraram que a lavagem da superfície do telhado poderia quase restaurar a refletância solar original. Em outro estudo de Mastrapostoli *et al.* (2013), foi descoberto que, por meio de processos regulares de limpeza, a refletância solar de tinta pode perder apenas 10% do valor de refletância original, diminuindo assim o efeito de envelhecimento.

Pesquisadores do Laboratório Nacional Lawrence Berkeley (EUA) e do Conselho Nacional de Pesquisa (Canadá) concluíram que os telhados reflexivos perdem, em média, 20% da sua refletância solar inicial nos primeiros três anos. Porém, de 70 a 100% dessa perda poderia ser recuperada através da lavagem com água e detergente. Uma pesquisa do Laboratório Nacional de Oak Ridge mostrou que o benefício econômico da lavagem do telhado varia, dependendo da despesa associada com a lavagem e da consequente redução nos custos de energia. Esses benefícios geralmente dependem da localização, sendo que o clima desempenha um papel importante (*JOURNAL OF ARCHITECTURAL COATINGS*, 2008).

Pereira (2014) avaliou, por meio de análise experimental e simulação computacional, a influência da refletância solar e da emitância térmica de superfícies externas sobre o desempenho térmico de edificações nos diferentes tipos de clima ocorrentes no Brasil. Os resultados mostraram que a exposição das telhas ao meio teve maior impacto sobre a refletância solar do que sobre a emitância térmica de suas superfícies. Nas amostras de cor branca, a exposição às intempéries por um ano reduziu em até 15% a refletância solar. Os impactos da exposição foram provocados, principalmente, pela deposição de sujeira; entretanto, com a realização de limpeza periódica é possível manter a refletância solar próxima ao valor inicial.

Werle (2015) determinou a durabilidade de um revestimento multifuncional que reúne ambas as propriedades: fria e autolimpante. Foi formulado um revestimento cimentício monocamada, com e sem a adição de pigmento, e ambos com elevada refletância solar e

emissividade. Para manter a refletância ao longo do tempo foi realizada a aplicação de TiO_2 anatásio aos revestimentos nas duas formas, com e sem pigmento. A exposição à radiação UV proporciona a fotoativação do anatásio, que possui capacidade de oxidação da matéria orgânica e alteração do ângulo de contato entre a água e a superfície, facilitando o arraste das sujeiras quando esta é molhada, tornando-a autolimpante. Esses revestimentos foram avaliados após 6 e 12 meses de exposição natural, em estações experimentais localizadas nas cidades de Ubatuba, Pirassununga e São Paulo, no Brasil. Os revestimentos apresentaram uma tendência de melhor desempenho para minimização da redução da refletância no revestimento. Porém, vale ressaltar que os valores são muito próximos ao da referência (sem TiO_2) e que o tempo de exposição deve ser ampliado para confirmar tal afirmação.

Um estudo realizado na cidade de Campinas, estado de São Paulo/BR analisou os processos de envelhecimento natural que podem alterar a refletância solar da superfície de telas de fibrocimento. As telhas ficaram expostas aos processos de envelhecimento natural por 36 meses. Foi identificado que as telhas com fungos após 36 meses apresentaram aumento nas absorvâncias e temperaturas superficiais, indicando que a presença de fungos pode incrementar os ganhos de calor solar pelas edificações. Além disso, foi comprovado que os processos de envelhecimento natural de telhas de fibrocimento alteram consideravelmente seu desempenho térmico ao longo da vida útil de uma edificação (COELHO; GOMES; DORNELLES, 2017).

Dornelles, Caram e Sichieri (2015) determinaram a mudança na refletância dos revestimentos submetidos às condições climáticas de São Carlos, São Paulo, Brasil. Vinte amostras (fria e padrão) foram expostas ao clima natural por dezoito meses. Os resultados indicaram uma redução na refletância dos revestimentos após a exposição ao clima pelo período analisado. Durante os primeiros seis meses, há uma redução significativa relacionada ao intemperismo das amostras. As mudanças de refletância devem-se principalmente ao acúmulo de poeira durante o período seco da cidade de São Carlos, seguida pela remoção da poeira pelas chuvas após o inverno, causando um aumento na refletância solar. A redução na refletância solar (diferença entre a refletância solar inicial e após dezoito meses) foi mais evidente para revestimentos com cores claras, com maior redução na amostra S1 (27,9%). Os autores sugerem a necessidade de desenvolver revestimentos capazes de manter suas características refletivas ao longo do tempo, aumentando o potencial de reflexão da radiação solar por essas superfícies e a redução dos ganhos de calor dos edifícios.

2.2.3 Vida útil

Segundo Santamouris, Synnefa e Karlessi (2011), tem sido argumentado que a aplicação de materiais frios também tem o efeito de aumentar a vida útil do telhado. Isso pode ser explicado primeiro por causa de sua temperatura mais baixa. A degradação de materiais está associada a reações químicas, que progridem mais rapidamente com temperaturas mais altas. Além disso, as oscilações de temperatura impõem tensões devido à expansão térmica diferencial. Foi demonstrado que as flutuações diárias da temperatura da superfície para materiais frios são muito menos significativas do que aquelas para uma superfície absorvente escura.

Synnefa *et al.* (2007) demonstraram que as flutuações diárias para um material convencional de telhado escuro (refletância solar 0,18) atingem 25°C durante o verão, e quando este material é substituído por um frio (refletância solar 0,89), as flutuações diárias da temperatura da superfície caem para 8°C. Portanto, a superfície do telhado sofre menos fadiga térmica (SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011).

De modo consequente, os revestimentos frios não apenas contribuem para a diminuição das cargas de resfriamento, aumento do conforto térmico e mitigação do efeito ilha de calor, como também, aumentam a durabilidade e reduzem o custo de ciclo de vida (PISELLO *et al.*, 2016).

2.2.4 Transmitância Térmica

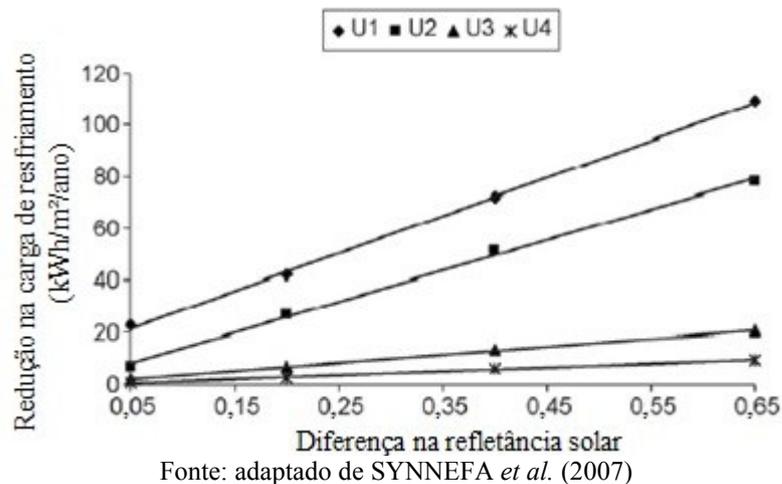
É evidente que o valor da transmitância térmica (U) e, portanto, a quantidade de isolamento do telhado, é um fator muito importante, e que afeta a economia de energia resultante da alteração da refletância do telhado (SYNNEFA; SANTAMOURIS; AKBARI, 2007).

A temperatura da superfície do telhado mudará se a sua refletância mudar. No entanto, se o valor de U for baixo (telhado bem isolado), a transferência de calor entre a superfície do telhado e o interior do edifício é pequena, e o impacto no consumo de energia não é tão significativo. O aumento da refletância seria mais benéfico em relação à redução da economia de energia para níveis mais baixos ou nenhum isolamento do telhado (esta discussão é válida para edifícios horizontais). Esta observação é muito importante, considerando o fato de que a maioria dos edifícios residenciais antigos é pouco ou nada

isolada. Deve-se ressaltar que em climas dominados pela carga de resfriamento, a redução na economia de energia pode ser significativa mesmo para níveis mais altos de isolamento do telhado. É evidente que um aumento igual na refletância solar produz maior redução na carga de resfriamento para climas mais quentes (SYNNEFA; SANTAMOURIS; AKBARI, 2007).

A Figura 15 apresenta a redução anual na carga de resfriamento para a cidade de Damasco, na Síria. A redução na carga de resfriamento foi encontrada como uma função linear das mudanças na refletância solar do telhado para cada valor U no telhado considerado. Para os cálculos, a refletância solar base do telhado foi considerada igual a 0,2. A Figura 15 também mostra os valores calculados da redução anual da carga de resfriamento para várias mudanças na refletância solar do telhado, e para quatro níveis de valores de U (3,24; 2,7; 0,84; 0,39) do telhado. Como esperado, aumentar a refletância do telhado seria mais benéfico para níveis de isolamento mais baixos ou nenhum isolamento. Ou seja, a combinação de um telhado com alta refletância solar e baixo ou nenhum nível de isolamento térmico corresponde a maiores reduções na carga de resfriamento para os casos estudados (SYNNEFA, 2007).

Figura 15 – Redução na carga de resfriamento com alteração da refletância solar do telhado para quatro valores U diferentes



Granja e Labaki (2003) estudaram a influência da cor externa de uma cobertura plana para um dia de projeto em Campinas, Brasil. Quando a cobertura tinha baixa resistência térmica, a mudança de cor de cinza para branco causou uma redução de fluxo de calor de 74 W.m⁻². Em contrapartida, para espessuras superiores a 15 cm, não houve redução significativa do fluxo de calor em função da mudança de cor da cobertura.

Ahmad (2010) avaliou uma cobertura de concreto com isolamento térmico e um revestimento frio em Rawalpindi, Paquistão. A contribuição do ganho de calor do telhado de concreto foi de 55% do ganho total em um prédio. O ganho de calor após a instalação do

isolamento e dos revestimentos foi de apenas 6%. Brito Filho, Henriquez e Dutra (2011) analisaram a aplicação de revestimentos seletivos em telhados com e sem isolamento térmico, usando dados climáticos de São Paulo, Brasil. Foi utilizado um balanço de energia para calcular os fluxos de calor. Uma tinta branca teve um efeito mais significativo no telhado sem isolamento, e diminuiu o fluxo de pico de calor de 225 W.m^{-2} para 50 W.m^{-2} .

Synnefa, Santamouris e Akbari (2007) estimaram o impacto do uso de revestimentos frios no telhado para o resfriamento de edifícios residenciais em 27 cidades ao redor do mundo, representando diferentes condições climáticas. Os resultados mostraram que o aumento da refletância solar do telhado reduz as cargas de resfriamento de 18 a 93%, e a demanda de pico de resfriamento nos edifícios com ar-condicionado de 11 a 27%. Foi concluído no estudo que aumentar a refletância solar do telhado resultou em mais benefícios para níveis de isolamento mais baixos ou inexistentes. Dias *et al.* (2014) verificaram que no edifício de estudo de caso em Portugal, no verão, o aumento do valor da refletância solar, no telhado e na fachada, de 0,50 para 0,92, reduziu a temperatura máxima interna entre 2 e $4,7^{\circ}\text{C}$ (sem isolamento térmico) e entre 1,2 e 3°C na nova construção (com isolamento térmico). Essa discussão depende do tipo e padrão de uso da edificação.

2.3 ILHA DE CALOR

As áreas urbanas em todo o mundo estão experimentando um rápido crescimento populacional e expansão urbana, gerando com isso impactos sobre o clima, através das mudanças resultantes das atividades antrópicas e do efeito do crescimento urbano, que fazem alterações constantes no espaço (FEITOSA *et al.*, 2011, SYNNEFA; SANTAMOURIS; APOSTOLAKIS, 2007). As vegetações naturais dos locais estão sendo substituídas por estruturas urbanas, o que causa uma redução na capacidade da paisagem urbana de regular a temperatura diária do ar através da evapotranspiração das plantas. Como resultado, a energia solar é absorvida por essas estruturas, fazendo com que a temperatura dessas superfícies se torne vários graus mais alta do que a temperatura do ar ambiente. Na medida em que as superfícies se tornam mais quentes, a temperatura ambiente aumenta. Ademais, as cidades têm sua temperatura superior as áreas rurais por refletirem menos a energia solar incidente, isto é, contam com menor albedo. Tal efeito de aquecimento urbano é conhecido como “ilha de calor” (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1992, SYNNEFA; SANTAMOURIS; APOSTOLAKIS, 2007).

Esse fenômeno, denominado “ilha de calor urbana”, tem o efeito de aumentar a demanda de energia, acelerando a formação de poluição nociva, causando desconforto térmico e problemas de saúde ao intensificar as ondas de calor sobre as cidades (SYNNEFA; SANTAMOURIS; APOSTOLAKIS, 2007). Esse fenômeno é o mais documentado das mudanças climáticas. É conhecido há quase um século, e está relacionado a temperaturas urbanas mais altas em comparação com as áreas suburbanas e rurais adjacentes (SANTAMOURIS, 2001).

Além do desconforto térmico, as ilhas de calor são uma preocupação de eficiência energética, pois aumentam a temperatura do ar e elevam as cargas de ar-condicionado nos edifícios, aumentando o consumo de energia, a demanda de pico e os preços da energia (SYNNEFA; SANTAMOURIS; AKBARI, 2007). Este fenômeno também reduz consideravelmente o potencial de resfriamento das técnicas de ventilação natural e noturna, e aumenta a pegada ecológica urbana (KARLESSI *et al.*, 2009). A emissão de poluentes também é intensificada com esse fenômeno e, por conseguinte, também os problemas de saúde (PISELLO, 2016).

Segundo Santamouris *et al.* (2001), o fenômeno ilha de calor na cidade de Atenas, na Grécia, dobra a carga de resfriamento dos edifícios e quase triplica sua demanda de pico de eletricidade. Em paralelo, as estimativas dadas por Akbari e Rose (2008) para quatro cidades americanas, mostram que a fração da área do telhado varia de 20% a 25% para cidades mais ou menos densas. Com base nesses resultados, e considerando que as áreas urbanas ocupam quase 1% de toda a terra, estima-se que a área total de cobertura urbana do mundo esteja próxima de $3,8 \times 10^{11} \text{ m}^2$ (AKBARI *et al.*, 2009 apud SANTAMOURIS, 2014). Logo, os telhados frios se mostram uma boa estratégia para mitigar o fenômeno ilha de calor, tendo um potencial alto de áreas para implementação.

Uma vez que um edifício fornece uma interface entre um clima ao ar livre e um ambiente interno, o consumo de energia do edifício, principalmente a energia utilizada pelo condicionador de ar, está intimamente relacionado aos fatores climáticos externos (HUANG; HWANG, 2016). Logo, o fenômeno ilha de calor é de grande relevância para o consumo de condicionamento de ar e para o conforto térmico nas edificações.

Jo *et al.* (2010) desenvolveram uma metodologia para avaliar os benefícios da instalação de telhados refletivos em áreas urbanizadas. O consumo de energia estimado no estudo foi calculado utilizando o software *EnergyPlus*. A área utilizada na análise foi de 10,36 km² em Phoenix, EUA. Nesta área, a adoção de telhados frios resultaria em uma redução

anual de eletricidade de 4,3% (7.830 MWh). Além disso, reduziria as emissões de 3.823 toneladas de dióxido de carbono (CO₂), além de outros poluentes.

Outro estudo relacionado à mesoescala foi realizado para edifícios residenciais com telhados planos em Andaluzia, Espanha. Boixo *et al.* (2012) criaram um método para estimar as economias de energia nesses edifícios. As porcentagens de cada tipo de edifício, de acordo com sua cor, são estimadas utilizando imagens de satélite do *Google Earth*. A implementação em larga escala de telhados frios poderia economizar 295 MWh por ano (2% do consumo total de eletricidade residencial). Isso é equivalente a uma economia anual de 59 milhões de euros em custos de eletricidade, e a emissão de 136.000 toneladas métricas de CO₂ poderia ser evitada a cada ano. Nesses estudos, não foi analisado o efeito na mudança da temperatura ambiente; no entanto, a relevância da utilização de telhados frios em mesoescala pôde ser verificada.

Em suma, as altas temperaturas ambientais, causadas pelo fenômeno ilha de calor, intensificam o problema energético das cidades, deterioram as condições de conforto térmico, colocam em risco a saúde da população e amplificam os problemas de poluição. Para contrabalancear esse fenômeno, os revestimentos frios são uma importante tecnologia de mitigação (SANTAMOURIS, 2014).

2.4 ANÁLISE ECONÔMICA

Na análise econômica de telhados frios é importante levar em consideração o impacto do envelhecimento, da sujeira e do intemperismo, bem como a sua vida útil. De fato, devido à poeira, poluição do ar, chuva e danos causados pelo sol, a refletância solar dos telhados frios pode ser reduzida de forma considerável com o tempo, afetando os benefícios de resfriamento da superfície do telhado (SAAFI; DAOUAS, 2018).

Eilert (2000) atestou que a redução da refletância solar dos telhados brancos é da ordem de 10 a 30%, com a maior parte da redução ocorrendo nos primeiros anos. Bretz e Akbary (1997) também afirmaram que a maior parte da diminuição da refletância solar ocorre no primeiro ano, possivelmente nos primeiros meses.

O estudo de Saafi e Daouas (2018), realizado para o clima da Tunísia, considerou um modelo de análise com a envoltória adiabática, exceto a superfície do telhado, objeto de análise. Para os três casos foram considerados um teto sem isolamento e com dois tipos de estruturas, R1 ($U = 5,55 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$) e R2 ($U = 1,06 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$). A temperatura interna do modelo foi assumida constante e fixa, considerando um *setpoint* para o verão e outro para o

inverno. Neste estudo, a análise de custo dos revestimentos frios foi através de três cenários de refletância da cobertura: (1) caso de referência; (2) caso restaurado; e (3) caso envelhecido. O caso de referência é um telhado de superfície cinza (refletância solar 0,2). No caso restaurado, foi considerado que o caso de referência (superfície cinza) foi pintado de branco e a refletância original do novo revestimento branco resultou em 0,89. Esse novo revestimento foi restaurado através de lavagens anuais no início do verão. Foi considerada uma refletância de 0,71 para o caso restaurado, 20% do valor da refletância inicial. No caso envelhecido, a refletância sofre uma diminuição de 25% em relação ao valor da refletância inicial, portanto, mantém um valor médio estabilizado de 0,67. Em todos os casos, a emissividade da superfície foi considerada 0,9.

Uma análise de custos de ciclo de vida foi realizada, considerando a vida útil de 20 anos do telhado. Nesta análise foram inclusos os custos de energia, o custo do revestimento refletivo branco, o custo de manutenção para o caso restaurado (lavagem) e a taxa de inflação. As economias líquidas no ciclo de vida (NLCS) são obtidas calculando a diferença entre o custo de energia economizado (devido ao revestimento refletivo) e pagamentos adicionais ao longo do ciclo de vida do edifício, comparado com o telhado convencional (teto não isolado com refletância solar de referência 0,2). Foi realizada uma estimativa do período de retorno (*payback*) que considera os efeitos das taxas de inflação e de desconto (SAAFI; DAOUAS, 2018).

A fim de avaliar a relação custo-benefício dos casos restaurados e envelhecidos de coberturas frias, a análise de custo do ciclo de vida, incluindo os custos de instalação e manutenção, é aplicada às configurações de telhados não isolados para os dois tipos de estruturas. De acordo com a Tabela 2, as economias líquidas no ciclo de vida foram positivas, comprovando a relação custo-benefício de ambos os cenários de telhado frio no contexto climático da Tunísia. O caso do telhado frio restaurado R1 se mostrou mais econômico em comparação ao caso de referência. A instalação e manutenção do revestimento branco são pagas após 3,4 anos. Por outro lado, a configuração do telhado R2, de menor valor de U, é de baixo custo benefício, e o período de retorno é de até 14,98 anos para o caso envelhecido, como mostrado na Tabela 2 (SAAFI; DAOUAS, 2018).

Tabela 2 – Economia líquida de ciclo de vida de 20 anos e período de retorno para dois cenários de refletância de telhados não isolados

Casos de refletância de telhado	R1 ($U = 5,55 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$)		R2 ($U = 1,06 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$)	
	NLCS (TND.m ²)	Payback (anos)	NLCS (TND.m ²)	Payback (anos)
Caso restaurado	44,53	3,40	6,16	11,93
Caso envelhecido	29,20	4,23	2,62	14,98

Fonte: adaptado de SAAFI; DAOUAS (2018)

A partir do estudo de campo publicado no *Journal of Architectural Coatings* (2008), conclui-se que, os cálculos de energia devem se basear em valores de refletância de pelo menos um ano, que são tipicamente de 75 a 80% dos valores iniciais. Entretanto, Bretz e Akbary (1997) e o *Journal of Architectural Coatings* (2008) mostraram, através de testes experimentais, que a refletância original poderia ser restaurada de 90 até 100% através de lavagens periódicas.

Hernandez-Perez *et al.* (2014) analisaram a relação custo-benefício de telhados frios, brancos e coloridos, em comparação com telhados cinzentos convencionais em seis cidades selecionadas no México. Com base nos custos de eletricidade e materiais refletivos, uma análise de custo de ciclo de vida de 10 anos mostrou que, na ausência de isolamento, telhados brancos e coloridos refletivos são mais econômicos do que telhados cinza para todos os locais. No entanto, para telhados isolados, os materiais brancos refletivos são econômicos apenas em locais mais quentes, com longos períodos de retorno do investimento que chegam até nove anos.

Sproul *et al.* (2014), por sua vez, apresentaram uma comparação econômica de telhados planos, brancos, verdes e pretos, usando dados coletados de 22 projetos, ou estudos, de telhados planos nos Estados Unidos, através de uma análise de custo de ciclo de vida de 50 anos, incluindo custos de instalação, substituição e manutenção. Os autores descobriram que os telhados brancos proporcionam uma economia líquida de US \$25/m² em 50 anos, e telhados verdes tiveram uma economia líquida negativa de US \$71/m², comparando a suas contrapartes pretas. Zhang, Tong e Yu (2016) demonstraram a relação custo-benefício do uso de uma tinta fria em coberturas de concretos não ventiladas e ventiladas sob o clima tropical em Cingapura. A análise do ciclo de vida que eles realizam é limitada ao custo inicial de instalação da tinta fria. O período de retorno do investimento utilizando a tinta fria é menor que dois meses na cobertura sem ventilação e menor que seis meses na cobertura ventilada. Os autores concluíram que tanto a pintura fria quanto a ventilação de coberturas são muito eficientes em termos de energia e custo-benefício em clima tropical.

Uma pesquisa, incluindo dados do local e um modelo de simulação de energia de um edifício, foi apresentada por Jo *et al.* (2010), a fim de quantificar a economia anual de eletricidade de um edifício comercial operacional, ao substituir o material de cobertura escuro existente por um sistema de revestimento de telhado frio. Uma análise de custo de 20 anos, incluindo os custos adicionais de reforma e manutenção de resfriamento do telhado, mostrou que uma instalação de telhado 100% refrigerado resultou em uma economia de aproximadamente US\$ 22.000 por ano em custos de energia, e um consequente período de retorno de nove anos.

2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

As evidências da literatura mostram que a utilização dos telhados frios pode resultar em economia anual de energia. Resumindo as afirmações da literatura referente ao tema, tem-se:

- A utilização dos telhados frios reduz a temperatura da superfície externa da cobertura, reduzindo o fluxo de calor que penetra a edificação, fazendo com que diminua a temperatura interna e, conseqüentemente, o consumo de energia elétrica para edificações com ar-condicionado, ou oferecendo melhores condições térmicas para edificações sem ar-condicionado;

- A utilização dos telhados frios ajuda na mitigação do fenômeno “ilha de calor”;

- O nível de economia do consumo de energia elétrica depende de muitos fatores: da quantidade de isolamento da construção, do clima do local, da característica e do uso da edificação, dentre outros;

- Os telhados frios envelhecem e tendem a diminuir sua refletância solar. No entanto, grande parte da refletância solar pode ser restaurada através de processos simples de lavagens;

- No verão e em climas mais quentes, os telhados frios possuem ótimo desempenho. Porém, o equilíbrio entre economias de energia no verão e no inverno é um fator-chave que precisa ser analisado caso a caso.

Grande parte dos estudos citados neste capítulo está limitada à eficiência energética relacionada aos telhados frios. Apenas um número limitado de investigações (e.g. HERNANDEZ-PEREZ *et al.*, 2014, JO *et al.* 2010, SAAFI; DAOUAS, 2018, SPROUL *et al.* 2014, ZHANG; TONG; YU, 2016) analisou a rentabilidade dos telhados frios com base no seu custo.

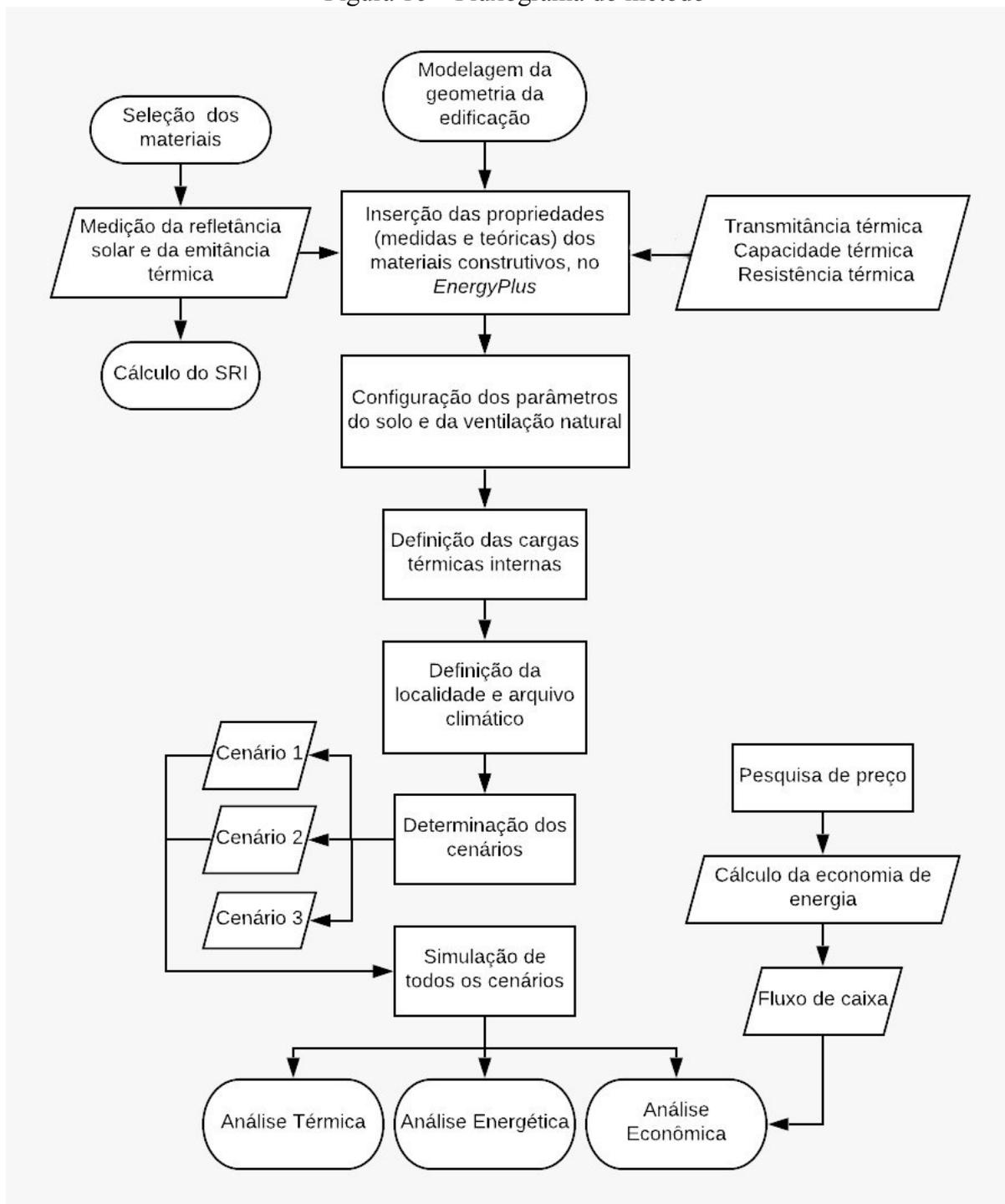
Dada a pesquisa consolidada sobre a eficácia dos telhados frios como técnica de resfriamento passiva, reconhecida por uma variedade de contribuições científicas em todo o mundo, a literatura apresentada foi base para o desenvolvimento do presente estudo.

O valor deste estudo está em investigar a viabilidade econômica da utilização dos telhados frios, bem como avaliar o desempenho térmico e redução do consumo de energia elétrica para residências com e sem aparelho de ar-condicionado. Desta forma, o presente estudo visa preencher a lacuna entre a teoria e a implementação de telhados frios na prática.

3 MÉTODO

Neste capítulo serão relatados os procedimentos do método utilizado para que os objetivos do presente trabalho sejam atendidos. A Figura 16 apresenta o fluxograma do método, e todos os itens presentes no fluxograma são explicados detalhadamente nesta seção.

Figura 16 – Fluxograma do método



Fonte: Da autora (2019)

3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

Silva e Etulain (2010) citam o estudo da SBK Business (empresa associada à Fundação Instituto de Administração - FIA), apresentando dados sobre a distribuição do mercado brasileiro de telhas por tipo, qualificando os percentuais referentes ao mercado total e aos segmentos de coberturas institucionais e residenciais. Pode-se observar a participação dos tipos de telhas no mercado brasileiro de coberturas de 2005-2006 na Tabela 3.

Tabela 3 – Distribuição do mercado brasileiro de telhas por tipo

Tipos de telha	Mercado total	Coberturas institucionais	Coberturas residenciais
Fibrocimento	49%	32%	54%
Cerâmica	35%	7%	43%
Aço	11%	44%	1%
Alumínio	2%	7%	1%
Plástico Translúcido	2%	9%	0%
Outros	1%	1%	1%

Fonte: adaptado de SILVA; ETULAIN (2010)

Neste cenário, a telha fibrocimento e a telha cerâmica representam 97% das coberturas residenciais analisadas no estudo. Foram essas as tipologias escolhidas para o desenvolvimento da pesquisa, tendo em vista o elevado nível da utilização desses tipos de telhas no mercado brasileiro. Cada telha foi analisada de duas formas, na sua cor natural (telhado convencional) e na cor branca (telhado frio), conforme apresentado na Figura 17. A estrutura utilizada para a análise foi uma estrutura leve para a telha de fibrocimento e uma estrutura pesada para a telha cerâmica, como comumente é utilizado.

Figura 17 – Telhas cerâmica e fibrocimento, cor natural e branca



Fonte: Da autora (2019)

3.2 MEDIÇÃO DAS PROPRIEDADES ÓPTICA E TÉRMICA

A verificação das propriedades óptica e térmica das duas telhas nas quatro condições selecionadas foi realizada através de dois equipamentos, um para medir a emitância térmica e outro para medir a refletância solar.

3.2.1 Medição da emitância térmica

O processo de avaliação da emitância térmica das amostras foi realizado com o uso de um emissômetro, fabricado pela empresa Devices and Services Company - D&S, modelo AE1 (Figura 18). A Figura 18 apresenta o emissômetro utilizado para as medições, sendo exemplificado cada componente utilizado. O equipamento conta com um detector; um adaptador para o detector (para medições em áreas menores); um dissipador de calor; duas amostras padrão de calibração, com alta (0,88) e baixa (0,06) emitância, empregadas na calibração do equipamento; e um multímetro.

Figura 18 – Componentes do emissômetro



Fonte: KRELLING *et al.* (2018)

O procedimento de medição foi executado segundo as recomendações da Norma ASTM C1371-15: *Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers* (ASTM, 2015). Com o auxílio do detector, foi medida a tensão das amostras padrão cinco vezes para cada amostra, intercalando da alta para baixa e da baixa para alta emitância, com o propósito de se obter uma reta de referência e, conseqüentemente, uma relação entre a emitância e a tensão, para se obter a emitância das amostras a serem medidas. Posteriormente, na medição das amostras, seguiu-se o mesmo padrão de intercalação. Para cada medida da amostra de alta emitância (telhas), a amostra padrão de baixa emitância era medida, sempre intercalando uma medida de alta emitância e

uma de baixa emitância. Para todos os casos, o tempo de contato entre o detector e a amostra foi de 90 segundos, objetivando possibilitar a estabilização da medição, assim como padronizar o procedimento.

Os resultados de cada medição foram obtidos a partir da visualização do *display* do multímetro, que apresenta valores de tensão em milivolts (mV). Tais resultados foram posteriormente convertidos, a partir de uma equação da reta da relação da tensão versus emitância, na grandeza adimensional da emitância. A norma indica que a precisão mínima do equipamento para a medição da emitância seja de 0,02. O emissômetro utilizado possui precisão de 0,01, atendendo desta forma ao requisitado.

3.2.2 Medição da refletância solar

A refletância de uma superfície varia em função do comprimento de onda da radiação incidente. Por essa razão, o método considerado mais exato para identificar a refletância solar de determinada amostra é a realização da medição dessa propriedade através da análise espectral, ou seja, verificar a refletância da amostra ao longo do espectro solar.

Logo, para a medição da refletância solar, foi preciso medir a refletância espectral utilizando um espectrofotômetro fabricado pela empresa PerkinElmer, modelo Lambda 1050, o qual permite a medição da refletância e transmitância de materiais opacos e transparentes, dentro de uma faixa espectral de 175 nm a 3300 nm. O equipamento é conectado a um computador, por meio do qual a medição pode ser acompanhada em tempo real com o uso de um software próprio do aparelho. Todos os dados são posteriormente armazenados em disco rígido.

O equipamento conta com diferentes módulos e acessórios para medição, sendo a esfera integrada de 150 mm (Figura 19) o módulo empregado na avaliação da refletância. Na esfera estão incorporados internamente dois detectores de radiação, sensíveis a distintas faixas do espectro, sendo o detector UV/VIS responsável pelas faixas entre 160 e 800 nm, e o NIR, de 800 a 2500 nm. A resolução e precisão das medições, nas diferentes faixas espectrais, podem ser visualizadas na Tabela 4.

Figura 19 – Espectrofotômetro UV-VIS-NIR Lambda 1050



Fonte: KRELLING *et al.* (2018)

A Norma ASTM E903: *Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres* (ASTM, 2012) recomenda a medição do espectro entre 300 e 2500 nm, com a utilização de fonte de luz artificial. Além disso, ASTM (2012) especifica o uso de um padrão para calibração, a qual foi efetuada antes de cada grupo de medições das amostras. O padrão empregado neste estudo foi o Spectralon®, cuja refletância é teoricamente suposta como igual a 100%.

Após a calibração, as amostras foram sucessivamente posicionadas no local indicado na borda da esfera, chamado de *sample reflectance port*, de forma tal que todo o orifício de abertura fosse completamente coberto pela amostra, conforme recomenda a ASTM (2012). Complementarmente, foi posicionada sobre a amostra uma capa protetora, própria do equipamento, de modo a impedir a entrada da luz externa. Depois de efetuados os procedimentos descritos, a medição da refletância espectral das telhas foi efetuada em intervalos de 5 em 5 nm.

3.2.3 Índice de Reflexão Solar (SRI)

O Índice de Reflexão Solar (SRI) indica a capacidade de uma superfície de refletir a radiação solar e de dissipar o calor, tomando como base a temperatura de um padrão negro e um padrão branco, reduzindo assim o aumento de temperatura causada pela incidência da radiação solar. O SRI é obtido segundo a Norma ASTM E1980: *Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces* (ASTM, 2011). O SRI pode variar de 0 a 100, sendo que 0 representa o padrão negro e 100 o padrão branco. Dentro dessas condições de padrão, o SRI foi calculado a partir das Equações 1 e 2,

onde h_c representa o coeficiente de convecção; ε a emissividade térmica; e α refere-se à absorptância solar.

A Norma ASTM E1980 (ASTM, 2011) propõe calcular o SRI utilizando três valores para o coeficiente convectivo (h_c): 5, 12 e 30 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, que correspondem, respectivamente, à baixa, à média e à alta condição de transferência de calor entre a superfície e o ar em movimento.

$$x = \frac{(\alpha - 0,029 \cdot \varepsilon) \cdot (8,797 + h_c)}{9,5205 \cdot \varepsilon + h_c} \quad (1)$$

Fonte: ASTM (2011)

$$SRI = 123,97 - 141,35 \cdot \chi + 9,655 \cdot \chi^2 \quad (2)$$

Fonte: ASTM (2011)

Onde:

α é absorptância solar

ε é emissividade térmica

h_c é coeficiente de convecção

3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação termoenergética do modelo da edificação foi realizada utilizando o software *EnergyPlus* (versão 9.0.1) para análise térmica dinâmica, fornecido pelo Departamento de Energia do EUA. O *EnergyPlus* calcula cargas térmicas, baseadas em balanços térmicos, em superfícies externas e internas e condução de calor transitória através do edifício, o programa também estima níveis de iluminação e consumo energético de edificações. As simulações são realizadas com base em um arquivo de dados meteorológicos.

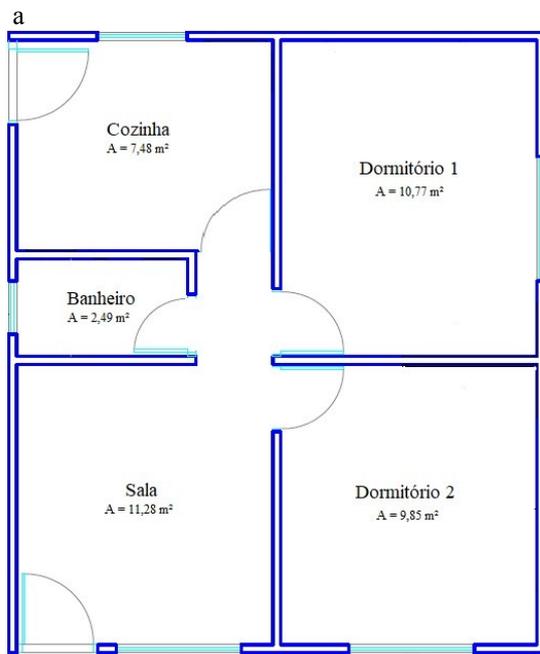
3.3.1 Modelo da edificação

O modelo de construção simulado foi baseado em um projeto padrão de habitação popular unifamiliar desenvolvido pela CAIXA Econômica Federal, o qual se encontra no documento Cadernos CAIXA, Projeto padrão – casas populares de 42m² (CAIXA, 2007). O projeto é uma edificação de um pavimento em contato direto com o solo, e possui forma

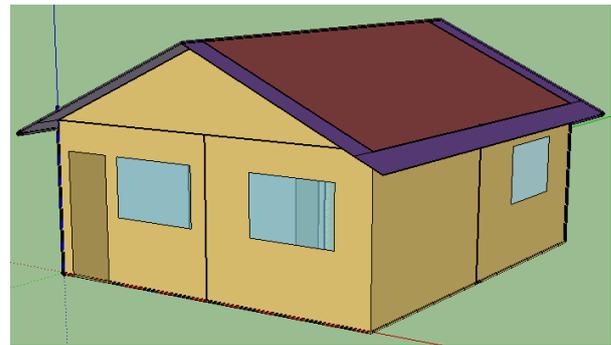
retangular e pé-direito de 2,60 m. É composta por uma cozinha, um banheiro e três ambientes de permanência prolongada (APP): uma sala e dois dormitórios (Figura 20), totalizando 42 m². Cada ambiente da edificação foi considerado como uma zona térmica no *EnergyPlus*.

O telhado é inclinado em duas águas e apresenta 0,50 m de beiral. É constituído por um ático não ventilado, que também foi simulado como uma zona térmica, trocando calor com o interior da edificação através do forro. Para este estudo, foram analisados dois tipos de telhas: telha cerâmica e telha fibrocimento. A estrutura de sustentação é de madeira e o forro, de policloreto de vinila (PVC).

Figura 20 – a) Planta baixa do modelo; b) Representação gráfica do modelo



Fonte: adaptado de CAIXA (2007)



Fonte: Da autora (2019)

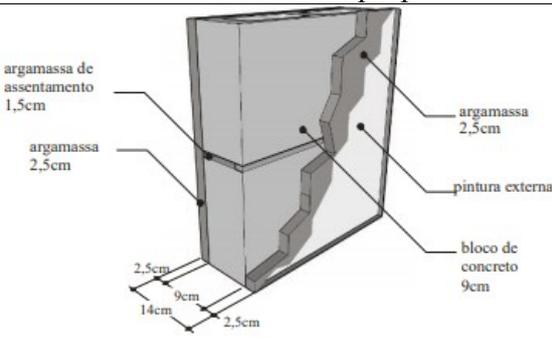
3.3.2 Construção: materiais e suas propriedades térmicas

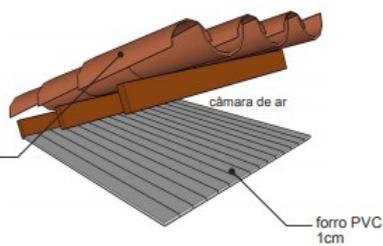
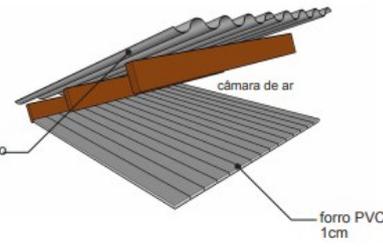
A Tabela 5 apresenta as características construtivas e as propriedades termofísicas dos elementos das paredes e da cobertura da edificação. A escolha por essas características foi baseada no documento Projeto padrão – casas populares de 42 m² (Caixa, 2007), e reflete o que normalmente é empregado nesse tipo de edificação.

A transmitância térmica (U) e a capacidade térmica (C_T) foram calculadas de acordo com a norma brasileira NBR 15220- 2: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificação (ABNT, 2005). A absorção das paredes foi considerada em 0,34, referente a tinta acrílica semibrilho da cor marfim (DORNELLES,

2008). A absorptância (α) da cobertura não foi apresentada na Tabela 4 porque ela é variável, e apresentará quatro diferentes valores, um para cada tipo e cor de telha. Os valores de absorção da cobertura foram obtidos através da medição da refletância solar (dado que a soma da absorptância e da refletância deve ser igual a 1) para as telhas cerâmicas, natural e branca, e para as telhas fibrocimento, natural e branca.

Tabela 4 – Características construtivas e propriedades termofísicas das paredes e cobertura

PAREDES INTERNAS E EXTERNAS		Pintura externa (α) Argamassa externa (2,5 cm) Bloco de concreto (9,0 x 19,0 x 39,0 cm) Argamassa interna (2,5 cm)
		$U = 2,78 \text{ (W.m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{)}$ $C_T = 209 \text{ (kJ.m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{)}$ $\alpha = 0,34$
Fonte: MORISHITA <i>et al.</i> (2011)		

COBERTURAS		Telha cerâmica Câmara de ar (> 5,0 cm) Forro PVC (1,0 cm)
		$U = 1,75 \text{ (W.m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{)}$ $C_T = 21,0 \text{ (kJ.m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{)}$
		Telha fibrocimento Câmara de ar (> 5,0 cm) Forro PVC (1,0 cm)
		$U = 1,74 \text{ (W.m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{)}$ $C_T = 14,7 \text{ (kJ.m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{)}$
Fonte: MORISHITA <i>et al.</i> (2011)		

A Tabela 5 apresenta as características dos materiais utilizados na simulação computacional. Nesta tabela são apresentados: a espessura, a condutividade térmica, a densidade, o calor específico, a absorptância e a resistência térmica de cada material utilizado na construção do modelo da edificação. Os valores das propriedades térmicas dos materiais da Tabela 6 foram baseados no Anexo B da NBR 15220-2 (ABNT, 2005). Os cálculos das resistências térmicas foram realizados baseados nas orientações da mesma norma.

Tabela 5 – Características dos materiais utilizados na simulação computacional

Material (espessura)	Condutividade térmica ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Densidade ($kg.m^{-3}$)	Calor específico ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	Resistência térmica ($m^2.K.W^{-1}$)
Argamassa reboco (2,5 cm)	1,15	2000	1000	0,022
Bloco de concreto (9 cm)	1,75	2400	1000	1,190
Concreto para laje (6 cm)	1,75	2400	1000	0,034
Madeira para porta (3,5 cm)	0,15	550	2300	0,233
Piso cerâmico (0,75 cm)	1,05	2000	920	0,007
PVC para forro (1,0 cm)	0,071	273	960	0,141
Telha cerâmica (1,0 cm)	1,05	2000	920	0,009
Telha de fibrocimento (0,6cm)	0,65	1800	840	0,012
Câmara de ar de alta emissividade, espessura >5,0 cm – fluxo horizontal	-	-	-	0,17
Câmara de ar de alta emissividade, espessura >5,0 cm – fluxo descendente	-	-	-	0,21

Fonte: baseados no Anexo B da ABNT NBR 15220-2 (2005)

É importante ressaltar que o bloco de concreto, utilizado na construção das paredes, possui uma câmara de ar e que esta foi considerada na simulação computacional. As espessuras equivalentes consideradas foram retiradas do trabalho de Weber *et al.* (2017), que desenvolveu uma biblioteca de componentes construtivos para o uso no programa *EnergyPlus*. Portanto, definiu-se uma espessura de 1,73 cm de concreto, 5,54 cm de câmara de ar e a outra camada de concreto com 1,73 cm, totalizando desta forma, os 9 cm da espessura do bloco de concreto.

Em relação às esquadrias, as portas foram consideradas de madeira, com espessura de 3,5 cm. As janelas da sala, cozinha e dormitórios foram consideradas de duas folhas de correr (sem proteção) com dimensões de 1,00 x 1,20 m. A janela do banheiro apresenta dimensão de 0,6 x 0,8 m. Todas as janelas foram consideradas de vidro temperado, comum e incolor, de 3 mm de espessura.

3.3.3 Contato com o solo

O fluxo de calor entre o piso e o solo de uma edificação tem grande influência no seu desempenho térmico e energético. Logo, buscando por resultados de maior confiabilidade, utilizou-se o objeto *GroundDomain:Slab* para calcular a transferência de calor das superfícies da edificação em contato com o solo no *EnergyPlus*. O objeto *GroundDomain:Slab* é utilizado para edificações que possuem a laje em contato com o solo e utiliza um modelo de diferenças finitas implícito para obter as temperaturas do solo.

O *GroundDomain* interage com a zona por meio do “modelo de condições externas” (*OtherSideConditionsModel*) como a condição de contorno externa da superfície. Esse modelo usa o objeto propriedade de superfície: modelo de condições externas (*SurfaceProperty:OtherSideConditionsModel*) para determinar condições de contorno para a modelagem de transferência de calor para as superfícies subjacentes.

São utilizadas iterações para alcançar a convergência das temperaturas no domínio. O modelo determina quais superfícies são acopladas ao domínio do solo e cria uma superfície de área equivalente dentro do domínio do solo. Esta superfície interage com o solo, fornecendo temperaturas atualizadas para o objeto *OtherSideConditionsModel* que são utilizadas nos cálculos de balanço de calor da superfície. No balanço de calor são considerados: a radiação de ondas longas e curtas, a condução, a convecção e a evapotranspiração (MAZZAFERRO; MELO; LAMBERTS, 2015).

O objeto *GroundDomain* utiliza modelo de diferenças finitas para transferência de calor, que utiliza o arquivo climático para obter as condições de contorno da superfície. No começo, é executada a simulação anual do modelo, até que o perfil de temperatura anual do solo alcance comportamento periódico constante. Uma vez que o comportamento de equilíbrio é atingido, as temperaturas do solo são armazenadas para serem utilizadas durante o resto da simulação (ENERGYPLUS, 2018).

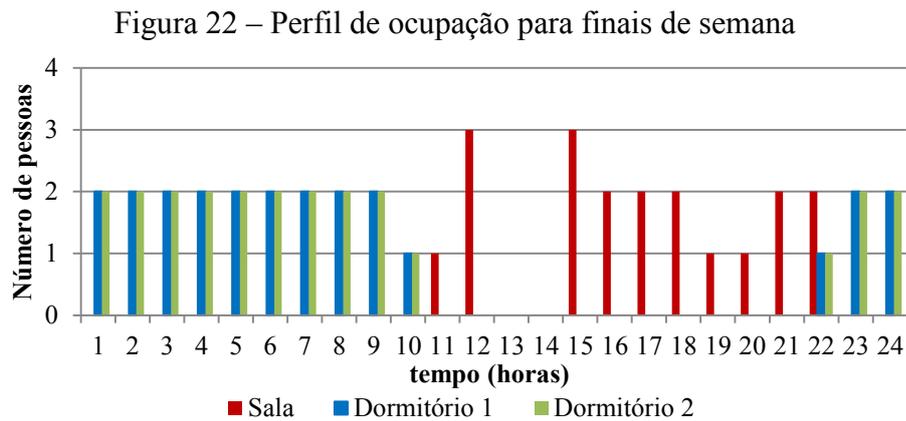
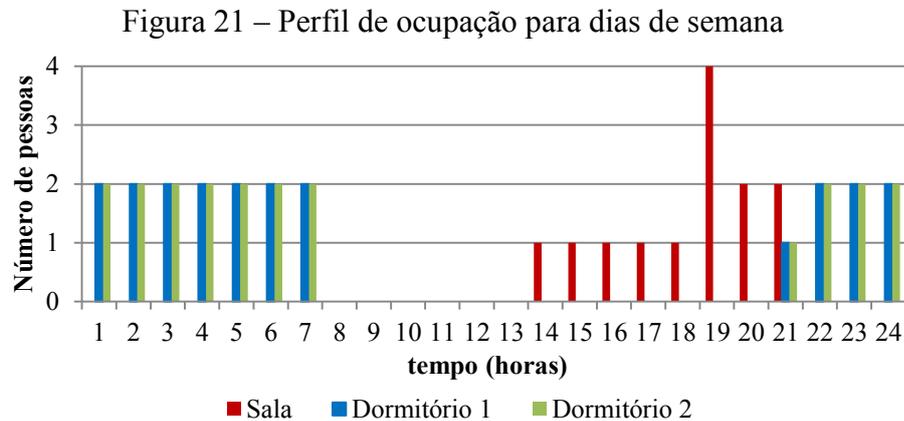
3.3.4 Ganhos internos

Os ganhos internos são decorrentes de fontes internas de calor, através da presença de ocupantes e de suas atividades, da iluminação artificial e de equipamentos, bem como seus padrões de uso. Alguns dos ganhos internos adotados no estudo foram baseados no Método de Simulação da Proposta de Instrução Normativa Inmetro para Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (CB3E, 2018).

3.3.4.1 Ocupação e atividades

Nos parâmetros de projeto foram assumidos valores convencionais para uma família de quatro pessoas, tendo como referência dados do Método de Simulação da Proposta de Instrução Normativa Inmetro para Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (CB3E, 2018). Os perfis de ocupação da edificação para dias de semana e finais de semana adotados na pesquisa são apresentados nas Figuras 21 e 22, respectivamente.

Nestas figuras são apresentados os perfis de ocupação somente para os ambientes de permanência prolongada, objetos de análise da pesquisa. Nos horários em que não há ocupantes nos ambientes de permanência prolongada, significa que os ocupantes não estão na residência ou que estão nos outros ambientes.



A Tabela 6 apresenta a atividade realizada em cada ambiente de permanência prolongada com seu respectivo valor de calor produzido para área de pele (1,80 m²) em Watts (W).

Tabela 6 – Atividades dos ocupantes

Ambiente	Atividade realizada	Calor produzido (W)
Sala	Sentado ou assistindo TV	108
Dormitórios	Dormindo ou descansando	81

Fonte: CB3E (2018)

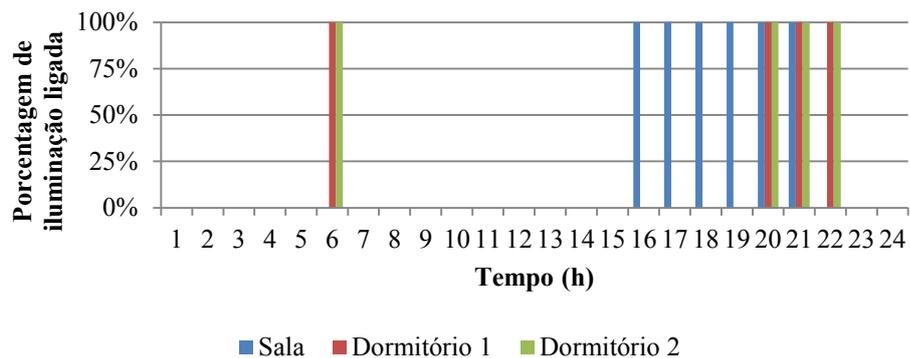
3.3.4.2 Iluminação e equipamentos

A Tabela 7 apresenta a Densidade de Potência de Iluminação (DPI) para os ambientes de permanência prolongada. O padrão de uso de iluminação é apresentado na Figura 23 para os dias de semana e na Figura 24 para os finais de semana. Vale ressaltar que o padrão de iluminação acompanha o perfil de ocupação, no entanto, foi considerado que em algumas horas do dia é feito o uso da iluminação natural.

Ambiente	DPI (W.m ²)
Sala	5,0
Dormitórios	5,0

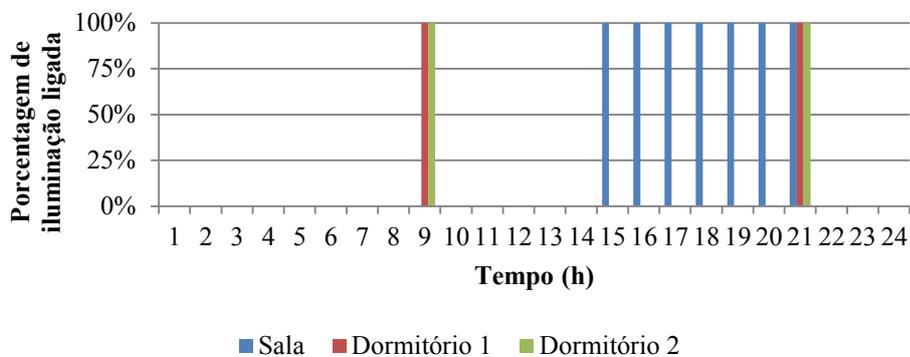
Fonte: CB3E (2018)

Figura 23 – Padrão de uso de iluminação para dias da semana



Fonte: Da autora (2019)

Figura 24 – Padrão de uso de iluminação para finais de semana



Fonte: Da autora (2019)

As cargas internas relacionadas aos equipamentos foram consideradas com um padrão típico de uma família de classe média. Ressalta-se que, na parte dos resultados referentes à análise térmica, foram analisados somente os ambientes de permanência prolongada (sala e dois dormitórios). No entanto, foram considerados na simulação os equipamentos da residência inteira, pelo motivo da tarifa de energia elétrica ser dependente da faixa de consumo de energia. Esta medida foi necessária, tendo em vista que um dos objetivos do presente trabalho é realizar uma análise econômica. Como o valor da tarifa de energia elétrica se altera dependendo do valor do kWh consumido, é importante ter conhecimento do consumo de energia elétrica total da residência, e não somente dos ambientes analisados.

O padrão de uso e a potência dos aparelhos elétricos considerados na simulação computacional são apresentados na Tabela 8. Os valores das potências médias e do padrão de uso dos equipamentos foram baseados no Caderno: Energia Inteligente – Guia do melhor consumo, da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) (CEMIG, 2014).

Tabela 8 – Padrão de uso e potência dos aparelhos elétrico

Zona térmica	Aparelhos elétricos	Potência Média (W)	Dias estimados de uso/mês	Média de utilização/dia
Cozinha	Forno micro-ondas	1200	30	15 min
	Geladeira 2 portas	110	30	24 h *
	Lavadora de roupas	500	12	1 h
Banheiro	Chuveiro elétrico	4500	30	40 min
Sala	TV	120	30	5 h
Dormitório	Notebook	30	30	3 h

Nota: Uma explicação da entrada de dados do funcionamento da geladeira no *EnergiaPlus* é necessária, tendo em vista que este equipamento funciona por ciclos de refrigeração. Foi considerado que o consumo médio mensal de uma geladeira 2 portas de potência média de 110 W seja de 50 kWh por mês (CEMIG, 2014). Logo, para atender esta condição a geladeira precisa estar ligada 15 horas por dia, sendo esta a consideração adotada.

Fonte: Adaptado de CEMIG (2014)

3.3.5 Ventilação natural e infiltração

Nas edificações residenciais e comerciais, a ventilação natural é um importante fator de conforto térmico e um meio de renovação de ar, resultando em melhoria das condições ambientais no interior dos edifícios. O uso da ventilação natural também reduz o consumo de energia, por evitar ou minimizar a utilização dos sistemas de condicionamento de ar (PEREIRA *et al.*, 2013).

É importante ressaltar que a ventilação natural não é alvo de análise deste trabalho. No entanto, a fim de simular a edificação da forma mais realista possível, foi considerada a ventilação natural na simulação computacional. A ventilação natural torna-se necessária na

simulação, uma vez que é utilizada na maioria das edificações, principalmente nas residenciais, mesmo naquelas com condicionamento de ar artificial.

O módulo do *Energyplus* utilizado para a ventilação natural foi o *Air flow Network*. Este módulo calcula o fluxo de ar entre as zonas e o exterior, através de frestas e janelas. Para isto, são determinadas as entradas do fluxo de ar, as características do entorno da edificação, as condições de abertura das janelas e portas, as condições de ventilação, e são criadas *schedules* de controle da ventilação natural (PEREIRA *et al.*, 2013).

Para simular a ventilação natural da edificação no *EnergyPlus*, muitas das informações necessárias para o cálculo do fluxo de ar são automaticamente extraídas da descrição da modelagem da edificação. Isso inclui o volume, a geometria das aberturas, a orientação e a localização das superfícies da edificação que contém aberturas pelas quais o ar flui. Com todas essas informações, o programa cria uma “rede de fluxo de pressão”, que é resolvida a cada intervalo de tempo usando métodos de solução iterativa para obter as pressões e fluxos de ar desconhecidos. O modelo *Airflow Network* calcula os fluxos de cada intervalo de tempo do sistema, dependendo de vários fatores, incluindo direções e velocidade do vento, tamanho e posição das aberturas, temperatura do ar externo e temperatura do ar da zona térmica (PEREIRA *et al.*, 2013).

Os seguintes objetos foram utilizados para simular a ventilação natural. As explicações de cada objeto foram baseadas no documento *Input Output References* do *EnergyPlus* (ENERGYPLUS, 2018):

- *Airflow Network: Simulation Control*: define os parâmetros básicos de execução do modelo. Na simulação, foi considerado que os coeficientes de pressão do vento são calculados pelo programa, através do objeto *Surface Average Calculation*;
- *Airflow Network: MultiZone: Zone*: este objeto permite o controle da ventilação natural através de aberturas externas e internas nas zonas térmicas, onde “abertura” é definida como uma janela ou porta que pode ser aberta;
- *Airflow Network: MultiZone: Surface*: este objeto especifica as propriedades de uma “ligação” (através de nós) da superfície através da qual o ar flui. Esta ligação está sempre associada a uma superfície de transferência de calor com ambas as faces expostas ao ar. Neste objeto foi inserido o valor do fator de abertura das portas e janelas, sendo que para a porta o fator de abertura é 1 (pois a porta abre-se completamente) e para as janelas o fator de abertura é 0,5 (abre somente 50% da sua área), exceto a janela do banheiro onde o valor é 1 (abre-se completamente). Este objeto também especifica o tipo de controle de ventilação natural, que para este caso, foi adotado o controle de temperatura. Ou seja, as janelas serão abertas se

atenderem a três critérios (exceto a janela do banheiro que foi considerada sempre aberta), e as portas internas foram mantidas sempre fechadas. Os critérios de abertura das janelas são exemplificados a seguir:

- 1- Se a temperatura da zona térmica for maior do que a temperatura externa;
- 2- Se a temperatura da zona térmica for maior do que a temperatura prevista (as janelas serão abertas se a temperatura da zona térmica for maior que 20°C);
- 3- E se a *schedule* da disponibilidade de ventilação permitir a ventilação (a *schedule* da disponibilidade de ventilação permite a ventilação natural das 14 às 20 horas). Na escolha do tempo que permite a ventilação natural foi levado em consideração o tempo em que há ocupantes na residência, pois a edificação é térrea, logo, por questão de segurança, essa medida foi tomada.

- *Airflow Network: MultiZone: Component: Detailed Opening*: este objeto especifica as propriedades do fluxo de ar através de janelas e portas quando elas estão fechadas ou abertas. Quando as janelas estão abertas, o coeficiente de descarga de ar para o fator de abertura é de 0,65. Quando as janelas estão fechadas, o coeficiente de fluxo de massa de é de 0,00005 kg.s⁻¹.m⁻¹ para as janelas e, 0,00063 kg.s⁻¹.m⁻¹ para as portas, e ocorrem através de infiltração do ar (LIDDAMENT, 1986). A infiltração considerada pelo *EnergyPlus* é o fluxo não intencional de ar do ambiente externo diretamente para zona térmica. A infiltração é geralmente causada pela abertura e fechamento de portas externas, frestas ao redor de janelas e portas e, mesmo em quantidades muito pequenas, através de elementos de construção.

3.3.6 Clima, entorno e orientação solar

A localização escolhida foi a cidade do Rio de Janeiro – RJ, a fim de complementar estudos sobre a mesma edificação e que estão sendo realizados para essa localidade (ALVES, 2019). O entorno da edificação foi considerado cidade. A orientação solar da edificação é apresentada na Figura 25. A cobertura em duas águas possui uma face voltada para o leste, cobertura dos dormitórios, e uma face voltada para oeste, cobertura da sala, cozinha e banheiro.

Figura 25 – Indicação solar da edificação



PLANTA INDICAÇÃO SOLAR
ESCALA 1/200

Fonte: adaptado CAIXA (2007)

3.3.7 Arquivo climático

O conhecimento das condições climáticas externas é de extrema importância nas simulações termoenergéticas, visto que o desempenho térmico dos elementos de uma edificação está associado diretamente com as variáveis climáticas externas. Porém, uma das dificuldades encontradas na área da simulação termoenergética é com relação aos dados climáticos disponíveis. Os arquivos climáticos provêm de estações climáticas que estão localizadas em aeroportos, na maioria das vezes, não registrando de fato os efeitos da cidade no microclima (SCHELLER *et al.*, 2015).

O projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*), juntamente com o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e o Laboratório de Energia Solar da UFSC (LABSOLAR/UFSC), disponibilizaram arquivos climáticos com extensão TMY (*Typical Meteorological Year*) para 20 cidades brasileiras. No entanto, para que estes arquivos pudessem ser utilizados nas simulações computacionais do desempenho energético de edificações, o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) converteu estes arquivos para a extensão (.epw), para a compatibilidade e o uso adequado no programa *EnergyPlus* (LABEEE, 2015). Para a simulação computacional do presente estudo, foi utilizado o arquivo climático em questão (TMY) para a simulação termoenergética (SCHELLER *et al.*, 2015).

3.4 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

As simulações computacionais foram organizadas em três cenários distintos, portando uma série de simulações dentro de cada um, que serão explicados detalhadamente ao longo desta seção. De forma simplificada, os três cenários iniciais são:

- Cenário 1: Edificação sem ar-condicionado;
- Cenário 2: Edificação com ar-condicionado nos ambientes de permanência prolongada (sala e dormitórios);
- Cenário 3: Combinação dos dois primeiros cenários. Edificação sem ar-condicionado na sala e com ar-condicionado nos dormitórios.

3.4.1 Cenário 1

No cenário 1 foram realizadas três simulações para cada tipo de telha (cerâmica e fibrocimento). Na primeira simulação foi considerada a telha na sua cor natural (cor original), e na segunda simulação, a telha na cor branca. Espera-se que a temperatura interna, quando se utiliza o telhado frio, seja inferior à temperatura interna do que quando se utiliza o telhado convencional, gerando com isso uma diferença de temperatura (ΔT).

A terceira simulação, dentro do cenário 1, consiste em analisar o consumo de energia se o telhado com as telhas na cor original apresentasse as mesmas temperaturas internas de um telhado frio. Ou seja, a terceira simulação tem o objetivo de obter a carga térmica necessária para suprir a diferença de temperatura interna (ΔT) causada pela utilização das diferentes absorvâncias de telhado. Para isso, foi simulado o telhado com as telhas na cor natural colocando ar-condicionado nos ambientes de permanência prolongada com um ajuste de temperatura de hora em hora ao longo de um ano, a fim de que o perfil de temperatura neste caso fosse igual à curva de temperatura interna utilizando o telhado frio (um ajuste de temperatura foi utilizado exatamente com as temperaturas internas, de hora em hora ao longo do ano, resultantes da simulação com o telhado frio, simulação 2).

3.4.2 Cenário 2

No cenário 2, todos os ambientes de permanência prolongada foram avaliados com ar-condicionado, logo, o objetivo é identificar a diferença do consumo de energia elétrica utilizando os telhados nas duas cores, natural e branca. O ajuste de temperatura para este

cenário foi mantido sempre em 23°C, devido a essa temperatura estar dentro das temperaturas de conforto. Para os dormitórios, o ar-condicionado foi considerado ligado no período noturno, das 21 horas até as 6 horas e, para a sala, o ar-condicionado foi considerado ligado 3 horas por dia, das 19 horas às 22 horas. Esta configuração foi adotada para todos os dias e ao longo de todo o ano. O grupo de objetos utilizados para simular o sistema de condicionamento artificial foi o *Ideal Loads Air System*. O cenário 2 possui duas simulações, para cada tipo de telha, em que a primeira simulação considera o telhado com a cor natural e a segunda considera o telhado frio.

3.4.3 Cenário 3

O cenário 3 é a combinação do cenário 1 (para a sala) e do cenário 2 (para os dormitórios). Foi realizada a mesma análise do cenário 1 para a sala (três simulações) e, para os dormitórios, foi realizada a mesma análise do cenário 2 (duas simulações). Logo, foram realizadas 3 simulações para o cenário 3. Na primeira simulação, considerou-se o telhado com as telhas naturais e com ar-condicionado somente nos dormitórios, operando da mesma maneira do cenário 2. A segunda simulação é igual à primeira, mas considerando o telhado frio. A terceira simulação é referente ao telhado com as telhas naturais, com ar-condicionado nos quartos (operando igual ao cenário 2) e com ar-condicionado na sala (com um *setpoint* igual a temperatura interna da sala resultante da segunda simulação do cenário 3, telhado frio).

A economia de energia elétrica para este cenário consiste na diferença da carga térmica da primeira simulação (telhado convencional) menos a carga térmica da segunda simulação (telhado frio). No valor da diferença é adicionado o valor referente à carga térmica da sala, resultante da terceira simulação.

A Tabela 9 apresenta, de forma resumida, todas as simulações realizadas para cada cenário e sua respectiva economia de energia.

Tabela 9 – Resumo dos cenários e da economia de energia

Cenários	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Economia de energia
Cenário 1	Simulação telhado convencional sem ar-condicionado	Simulação telhado frio sem ar-condicionado	Simulação telhado convencional com ar-condicionado nos APP com <i>setpoint</i> igual à <i>Tint</i> resultante do telhado frio (Simulação 2)	Carga térmica resultante da simulação 3
Cenário 2	Simulação telhado convencional com ar-condicionado nos APP	Simulação telhado frio com ar-condicionado nos APP	-	Carga térmica (S1) - Carga térmica (S2)
Cenário 3	Simulação telhado convencional com ar-condicionado somente nos dormitórios	Simulação telhado frio com ar-condicionado somente nos dormitórios	Simulação telhado convencional com ar-condicionado nos dormitórios e na sala com <i>setpoint</i> resultante do telhado frio (simulação 2)	[Carga térmica (S1) - Carga térmica (S2)] + Carga térmica da sala (S3)

Nota: APP – Ambientes de permanência prolongada; S1 – Simulação 1; S2 – Simulação 2; S3 – Simulação 3; *Tint* – Temperatura interna.

Fonte: Da autora (2019)

3.5 PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o propósito de analisar os resultados, a análise foi subdividida em: i. Análise Térmica, ii. Análise Energética e iii. Análise Econômica. A análise térmica consiste em verificar o desempenho térmico das diferentes coberturas. A análise energética compreende a análise do consumo de energia elétrica e da carga térmica do ar-condicionado. Por fim, a análise econômica será realizada através de indicadores financeiros, para averiguar se as coberturas frias são viáveis do ponto de vista econômico.

3.5.1 Análise térmica

Com a finalidade de verificar o desempenho térmico das coberturas, e analisar suas principais características e diferenças, os parâmetros de saída considerados estão listados a seguir. Cada parâmetro de saída apresenta uma rápida descrição. Todas as descrições foram baseadas no documento *Input Output Reference* (ENERGYPLUS, 2018):

- **Temperatura interna dos ambientes:** A temperatura média do ar em cada zona térmica foi obtida através do parâmetro de saída *Zone Mean Air Temperature*, em graus

Celsius (°C). Esse parâmetro é a temperatura fornecida a partir do balanço de calor da zona. É a temperatura média das temperaturas do ar no intervalo de tempo;

- **Temperatura da superfície externa da cobertura:** A temperatura da superfície externa da cobertura foi obtida através do parâmetro de saída *Surface Outside Face Temperature* (°C);

- **Taxa de ganho de calor por radiação térmica:** A taxa de ganho de calor por radiação térmica foi obtida por área na superfície externa da cobertura através do parâmetro de saída *Surface Outside Face Net Thermal Radiation Heat Gain per Area*, em $W.m^{-2}$. Esta medida representa a transferência de calor atribuída às trocas de radiação térmica infravermelha de onda longa entre a superfície e os arredores da face externa, admitindo valores positivos e negativos. Esse parâmetro possibilita observar a influência da emitância no comportamento térmico da edificação, onde valores negativos da taxa indicam a perda de calor por emissão;

- **Taxa de ganho de calor por radiação solar:** A taxa de ganho de calor por radiação solar foi obtida por área na superfície externa da cobertura através do parâmetro de saída *Surface Outside Face Solar Radiation Heat Gain Rate per Area*, em $W.m^{-2}$. Essa medida representa a transferência de calor atribuída à absorção de radiação solar na face externa, admitindo apenas valores positivos. Esse parâmetro possibilita observar a influência da refletância solar no comportamento térmico da edificação. Visto a relação entre absortância e refletância, cuja soma deve ser igual a um, entende-se que, quanto maior for a taxa de ganho de calor por radiação, menor será a energia refletida pela superfície;

- **Taxa de transferência de calor por convecção natural:** Este parâmetro descreve o calor transferido por convecção entre a face externa da cobertura e o ar ambiente. Os valores podem ser positivos ou negativos, sendo que os valores positivos indicam que o calor é transferido para a face da superfície da cobertura, por transferência de calor por convecção. Este parâmetro de saída foi obtido através do *output Surface Outside Face Convection Heat Gain Rate per Area*, em $W.m^{-2}$;

- **Taxa média de transferência de calor por condução:** Este parâmetro combina os relatórios de condução da face interna e da face externa para descrever a situação de condução em uma superfície. É simplesmente a média das taxas de condução da face interna e externa, mas com a convenção de sinais para a face externa trocada para combinar com a face interna, de modo que valores positivos indiquem calor fluindo para a zona térmica. É apresentado o fluxo por unidade de área ($W.m^{-2}$) para este parâmetro. Este parâmetro de

saída foi obtido através do *output Surface Average Face Conduction Heat Transfer Rate per Area*.

3.5.2 Análise Energética

A análise energética consiste em verificar o consumo de energia dos equipamentos e da iluminação, bem como da carga térmica para os diferentes cenários. Para tal, duas saídas no *EnergyPlus* foram necessárias, sendo elas:

- **Consumo de energia:** Este parâmetro de saída informa o consumo de energia elétrica total da edificação. Para obtê-lo foi inserido o objeto *Output: Table: Monthly*, que informa o valor do uso final de energia elétrica mensalmente (ENERGYPLUS, 2018);
- **Cargas térmicas de resfriamento e aquecimento:** O somatório das cargas térmicas de resfriamento e aquecimento foi obtido através dos parâmetros *Zone Ideal Loads Zone Total Cooling Energy* e *Zone Ideal Loads Zone Total Heating Energy*, em kWh. As cargas térmicas representam a quantidade de calor a ser inserida ou retirada do ar, de modo a manter o ambiente nas condições desejadas (ENERGYPLUS, 2018). Para transformar a carga térmica em consumo de energia elétrica é preciso ser considerado o Coeficiente de Desempenho (COP) para o caso de aquecimento e o Índice de Eficiência de Energia (EER) para o caso de resfriamento. Ambos, COP e EER, são a razão entre o calor fornecido ou retirado do ambiente e a energia elétrica consumida ($W_{\text{térmico}}/W_{\text{elétrico}}$). A Figura 26 exibe as classes de eficiência para condicionadores de ar-condicionado *split*. Baseado nesta tabela, o valor do COP e do EER considerado neste trabalho foi 3. Logo, o valor da carga térmica, em kWh resultante da simulação computacional, foi dividido por 3 para resultar no consumo de energia elétrica do ar-condicionado.

Figura 26 – Classes de eficiência energética para condicionadores de ar split

Classes	Coeficiente de eficiência energética (W/W)	
A	3,23	<CEE
B	3,02	<CEE ≤ 3,23
C	2,81	<CEE ≤ 3,02
D	2,60	≤CEE ≤ 2,81

Fonte: BRASIL (2018)

3.5.3 Análise Econômica

Nesta seção, são relatados os procedimentos e considerações feitas para se obter a análise econômica proposta no presente estudo. Primeiramente, levantaram-se os preços necessários para a realização da análise. Posteriormente, decidiu-se o que seria considerado como economia de energia, e por fim, foi realizado o fluxo de caixa com todas as economias e despesas, e levando os valores para Valor Presente (VP). A partir disso, três indicadores financeiros foram detalhados, sendo eles: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e tempo de retorno do investimento (*payback*).

A análise econômica torna-se necessária, uma vez que as telhas na cor branca possuem um preço superior às telhas naturais. Contudo, a análise econômica proposta tem a finalidade de averiguar até que ponto as coberturas frias são viáveis do ponto de vista econômico.

3.5.3.1 Levantamento de preços

Para realizar a análise econômica é preciso obter o custo de todos os itens do sistema, além do custo da mão de obra, da instalação do sistema e sua manutenção, quando necessário. Foi utilizada a planilha do SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil) de maio de 2019 para o Rio de Janeiro para realizar a grande maioria desses levantamentos de preços. O SINAPI é uma fonte de referência de preços de insumos e de custos de composições de serviços para elaboração de orçamento de obras e serviços. A Caixa Econômica Federal é responsável por toda base técnica de engenharia (especificação de insumos, composições de serviços e orçamentos de referência), e pelo processamento de dados e publicação dos relatórios de preços e custos. Na parte da realização da pesquisa mensal de preço, tratamentos de dados, formação e divulgação dos índices, o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) é o responsável. As planilhas SINAPI contém séries mensais, e por região, de custos e índices para o setor habitacional, e séries mensais de salários medianos de mão de obra e preços medianos de materiais, máquinas e equipamentos e serviços da construção, para setores de saneamento básico, infraestrutura e habitação (CAIXA, 2019).

Em vista disto, os custos referentes aos materiais necessários para a construção da cobertura, estrutura de suporte de madeira e telhamento, foram obtidos através das planilhas SINAPI, bem como o custo da mão de obra e dos equipamentos necessários. No entanto, a

planilha considera os valores das telhas, de cerâmica e de fibrocimento, nas cores naturais. Para obter o valor das telhas na cor branca, foi realizada uma pesquisa de preço nos sites de grandes redes de lojas de materiais de construção presentes na cidade do Rio de Janeiro. Foi preciso realizar também o levantamento do valor de manutenção (lavagem da cobertura), para os casos do telhado branco.

3.5.3.2 *Economia de energia*

A análise econômica será realizada para 3 cenários:

- **Cenário 1:** Será avaliado quanto custaria, de energia elétrica, para que o telhado da cor natural possa proporcionar a mesma condição térmica interna que o telhado frio, com o auxílio de um sistema de ar-condicionado. Ou seja, a economia considerada neste cenário será os valores das cargas térmicas da terceira simulação, e tem o objetivo de analisar quanto o consumidor, com um telhado de cor natural, pagaria para obter as mesmas temperaturas internas se utilizasse o telhado frio;

- **Cenário 2:** Será analisado o consumo do ar-condicionado para todos os ambientes de permanência prolongada, para os diferentes tipos e cores dos telhados. Ou seja, a economia de energia para este cenário será os valores das cargas térmicas da primeira simulação (telhado convencional) menos os valores das cargas térmicas da segunda simulação (telhado frio);

- **Cenário 3:** A análise será a mesma do cenário 1 para a sala, e para os quartos será analisado qual o consumo do ar-condicionado para os diferentes tipos e cores dos telhados. Ou seja, a economia para este cenário será a carga térmica resultante da terceira simulação do cenário 3.

O consumo de energia utilizando os telhados nas duas cores, natural e branco, é obtido como resultado da simulação computacional por meio do software *EnergyPlus*. Para obter o custo de energia elétrica é preciso multiplicar o consumo de energia, em kWh, pela tarifa de energia, em R\$/kWh, conforme mostra a Equação 3. Portanto, a Equação 3 foi calculada para as telhas de cerâmica e de fibrocimento. A tarifa de energia foi considerada a vigente da distribuidora do Rio de Janeiro (Light):

$$Custo = Cons_{energia} * T_e \quad (3)$$

Onde $Custo$ é o custo anual de energia elétrica, $Cons_{energia}$ é o consumo de energia mensal (kWh/mês), obtido através da simulação, e T_e é a tarifa de energia (R\$/kWh).

3.5.3.3 Fluxo de caixa

Um dos indicadores financeiros utilizado na análise econômica foi o *Payback* Descontado, cujos valores do fluxo de caixa precisam ser trazidos para o valor presente (VP) por meio de uma taxa de desconto (i). Para calcular o *Payback* Descontado é preciso ter conhecimento do investimento inicial, ou seja, o custo total da implementação do telhado frio, e precisa ser levada em consideração uma taxa de juros ao ano (taxa de desconto), também conhecida como Taxa Mínima de Atratividade (TMA). A economia de energia referente à utilização do telhado frio será trazida para o valor presente, porque desta forma indica quanto vale atualmente um fluxo de caixa que ocorrerá em uma data futura. O VP pode ser calculado através da Equação 4. Para este caso, utilizou-se a fórmula VP do software Excel[®].

$$VP = \frac{VF}{(1 + i)^n} \quad (4)$$

Onde o VF é valor do fluxo de caixa no futuro, i é a taxa de desconto e n é o prazo ou o ano avaliado. O VF será a economia de energia ao longo do ano, levando em consideração o reajuste anual da tarifa de energia elétrica e o custo anual de manutenção (limpeza do telhado).

O fluxo de caixa foi realizado por ano. No ano zero foi adotado um valor negativo, o que indica o quanto foi gasto para implementar o telhado frio, ou seja, é a saída de caixa. No ano um foi considerada a economia de energia, resultante da utilização do telhado frio (considerando uma taxa anual de aumento da tarifa de energia elétrica), menos as despesas anuais que o sistema necessita (limpeza do telhado). Esse valor resultante é chamado de lucro nominal. O valor resultante do ano um (lucro nominal) foi trazido para o valor presente e descontado da saída de caixa. Assim foi feito sucessivamente até a quantidade de anos equivalente à vida útil da cobertura. A vida útil da cobertura foi considerada 20 anos segundo as recomendações da NBR 15575-1 (ABNT, 2013). O *Payback* Descontado é encontrado quando o fluxo de caixa apresenta o primeiro valor positivo, ou seja, este será o ano que o investimento se pagará.

Em relação à manutenção (limpeza) dos telhados foram feitas duas considerações, conforme apresentadas na Tabela 10. A primeira consideração foi avaliada somente a

manutenção do telhado frio, uma vez que não é comum a realização de manutenção (limpeza) dos telhados convencionais, pelo menos não na mesma frequência que o telhado frio necessita (pelo menos uma vez ao ano). Como consequência desta consideração, o custo de manutenção entra no fluxo de caixa. Na consideração 2, foi avaliada a manutenção no telhado frio e no telhado convencional, assumindo que a limpeza é realizada uma vez ao ano em cada telhado e que o valor da manutenção é o mesmo para ambos os telhados, uma vez que a metragem dos dois telhados é a mesma. Como consequência desta consideração, o custo de manutenção não entra no fluxo de caixa, visto que o valor da manutenção é o mesmo para os dois telhados, logo esse valor acaba se anulando.

Tabela 10 – Considerações manutenção do telhado

Considerações	Manutenção		Consequência
	Manutenção telhado frio	telhado convencional	
Consideração 1	Sim	Não	Custo de manutenção no fluxo de caixa
Consideração 2	Sim	Sim	Sem custo de manutenção no fluxo de caixa (custos de manutenção se anulam)

Fonte: Da autora (2019)

3.5.3.4 Indicadores financeiros

Para avaliar se um investimento é viável ou não, geralmente, três indicadores financeiros são analisados: VPL, TIR e *Payback*. O VPL (Valor Presente Líquido) precisa apresentar um valor positivo para que o projeto seja viável. Isso significa que o valor positivo do VPL é o valor que o investidor ganhará a mais do que se deixasse o valor investido aplicado com juros da TMA.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é comparada com a TMA. Se o investidor deixasse o valor do investimento aplicado a uma TMA o valor estaria rendendo uma taxa igual à TMA. Caso o investidor queira aplicar seu dinheiro em um projeto, este projeto trata um retorno, em percentual, igual à da TIR. Contudo, se a TIR apresentar valor superior ao da TMA, este projeto será viável. A TIR calcula a taxa de desconto que deve ter um fluxo de caixa para que seu VPL se iguale a zero. A TIR é utilizada para avaliar a atratividade de um projeto ou investimento, logo, se a TIR de um projeto exceder a Taxa Mínima de Atratividade significa que o investimento é viável, e se ficar abaixo da TMA o investimento deve ser rejeitado; caso seja igual à TMA, a decisão de seguir com o investimento fica a cargo dos responsáveis.

Portanto, para classificar um projeto como sendo viável, o VPL precisa apresentar valor positivo e a TIR precisa ser maior que a TMA. O *Payback* é um delimitador de tempo, e geralmente é definido pelo investidor. Este indicativo financeiro indica em quanto tempo o valor investido irá retornar para o investidor, com o valor corrido no tempo.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta, primeiramente, os valores medidos da refletância solar e da emitância térmica, bem como os resultados do SRI e sua análise. Posteriormente, são apresentados os resultados das simulações computacionais. Os parâmetros de saída das simulações são apresentados de forma anual e diária (um dia de verão e um dia de inverno). Os dias escolhidos para análise foram os dias que apresentaram o maior e o menor valor para a diferença de temperatura interna, utilizando as diferentes cores de telhas analisadas (temperatura interna da telha natural menos a temperatura interna da telha branca, para os dois tipos de telhas).

Após a análise térmica das diferentes telhas e cores, inicia-se a apresentação dos resultados do consumo de energia, nos três cenários, para a análise energética. Por fim, este capítulo apresenta os resultados da análise econômica, apresentando o VPL, a TIR e o *Payback* para cada cenário considerado.

4.1 PROPRIEDADES ÓPTICAS E TÉRMICAS

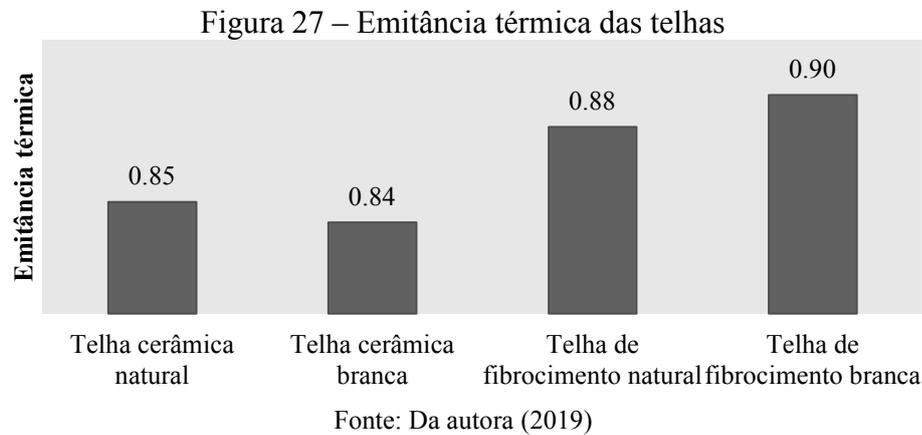
Nesta seção são apresentados os valores da emitância térmica e da refletância solar, bem como o valor do SRI para cada telha analisada. São apresentados também os valores das propriedades inseridas no *EnergyPluy*: emitância térmica, absorvância solar e absorvância visível. As absorções solar e visível foram obtidas através da refletância solar e visível, respectivamente.

4.1.1 Emitância

A Figura 27 apresenta os índices obtidos para a emitância térmica das telhas analisadas. Os resultados das medições da emitância térmica dos dois tipos de telhas no presente estudo demonstraram que a emitância das telhas de fibrocimento é superior (3,4% maior que a telha natural e 6,7% maior que a telha branca) à das telhas cerâmicas. Indica, desta forma, que as telhas de fibrocimento emitem uma pequena porcentagem a mais de radiação de ondas longas em relação às telhas cerâmicas.

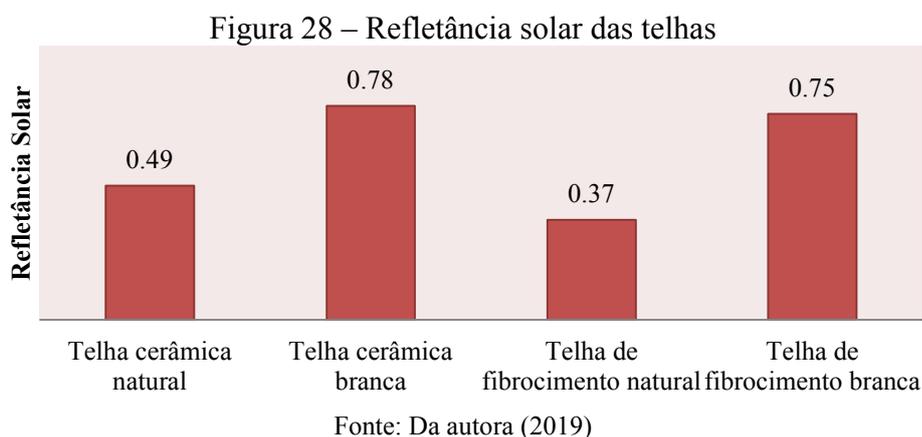
Quando se analisa as telhas por tipo, observa-se que os valores da emitância térmica apresentam um valor muito semelhante nas duas telhas cerâmicas e nas duas telhas de fibrocimento, porque a emitância térmica não está relacionada com a cor das telhas, mas sim

com suas propriedades térmicas. A emitância térmica da telha cerâmica natural é 1,2% superior à da telha cerâmica branca, e a emitância da telha de fibrocimento branca é 2,2% superior à da telha de fibrocimento natural.



4.1.2 Refletância Solar

A Figura 28 apresenta os índices obtidos para a refletância solar das telhas. Como esperado, a refletância solar das telhas na cor branca é superior à das telhas naturais. As telhas cerâmicas apresentaram refletância solar superior à das telhas de fibrocimento, tanto para a telha branca quanto para a telha natural. A telha que apresentou a maior refletância solar (0,78) foi a telha cerâmica branca, 3,8% superior à da telha de fibrocimento branca, que apresentou a segunda maior refletância solar (0,75). Em relação às telhas naturais, a telha cerâmica apresentou uma refletância de 0,49 (24,5% superior à da telha de fibrocimento natural, que apresentou uma refletância solar de 0,37). Em relação as telhas por tipo, a telha cerâmica branca apresentou uma refletância solar 37,2% superior a telha cerâmica natural, e a telha de fibrocimento branca 50,7% superior a telha de fibrocimento natural.

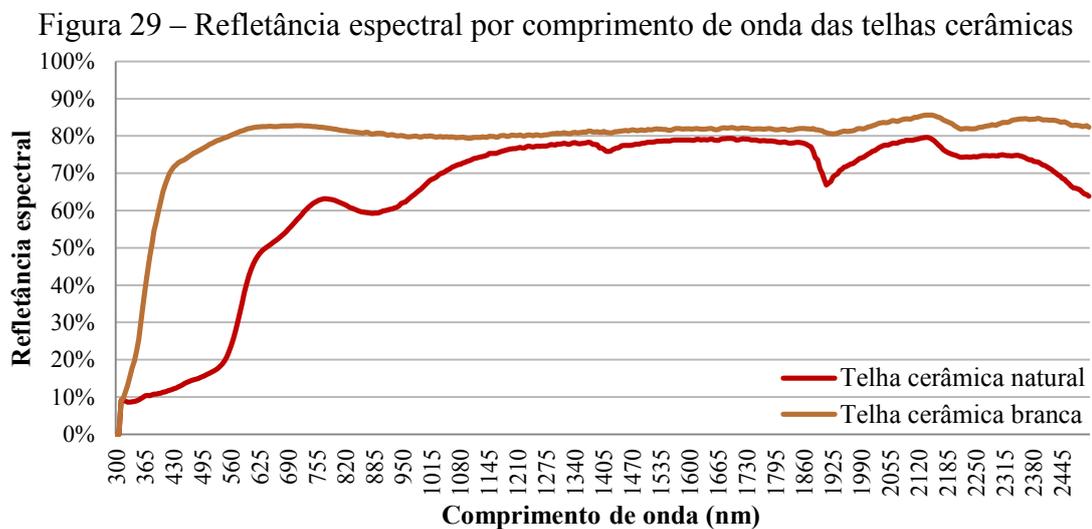


As curvas espectrais da refletância solar são exibidas nas Figuras 29, 30 e 31. A refletância solar é a integral da curva, resultante de todo o espectro, e ajustada ao espectro solar padrão.

A telha cerâmica branca mostra uma refletância solar superior à da telha cerâmica natural em todo o espectro, como pode ser observado na Figura 29. A partir de cerca de 1200 nm (no infravermelho próximo) a refletância solar da telha natural se aproxima da refletância solar da telha branca. Porém, em nenhum comprimento de onda elas chegam a se igualar. Desta forma, a telha branca não somente reflete mais na faixa do visível, o que era esperado devido a sua cor, como também na faixa do ultravioleta e infravermelho próximos.

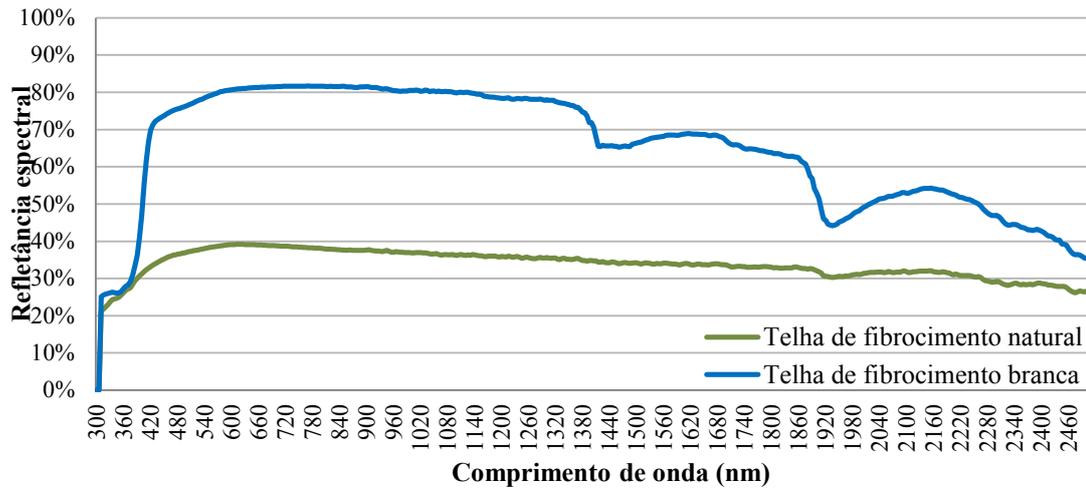
A telha de fibrocimento branca, assim como a telha cerâmica branca, apresenta uma refletância solar superior a da telha de fibrocimento natural em todo o espectro, como mostra a Figura 30. No entanto, a diferença da refletância da telha branca e da telha natural para a telha de fibrocimento é superior à diferença das telhas cerâmicas. Isso é devido às características distintas dos materiais das telhas de fibrocimento e de cerâmica.

A Figura 31 compara as curvas espectrais de todas as telhas. As telhas brancas apresentam um comportamento parecido no ultravioleta, visível e até os 1200 nm do infravermelho próximo. Após esse comprimento de onda, a curva da telha de fibrocimento branca começa a cair, fazendo com que a refletância desta telha seja inferior à da telha cerâmica branca. Isso porque a telha de fibrocimento branca absorve mais no infravermelho próximo, em relação à telha cerâmica branca e também à telha cerâmica natural. A telha cerâmica natural apresenta a terceira maior refletância solar, sendo superior a telha de fibrocimento natural em todo espectro a partir dos 600 nm, aproximadamente.



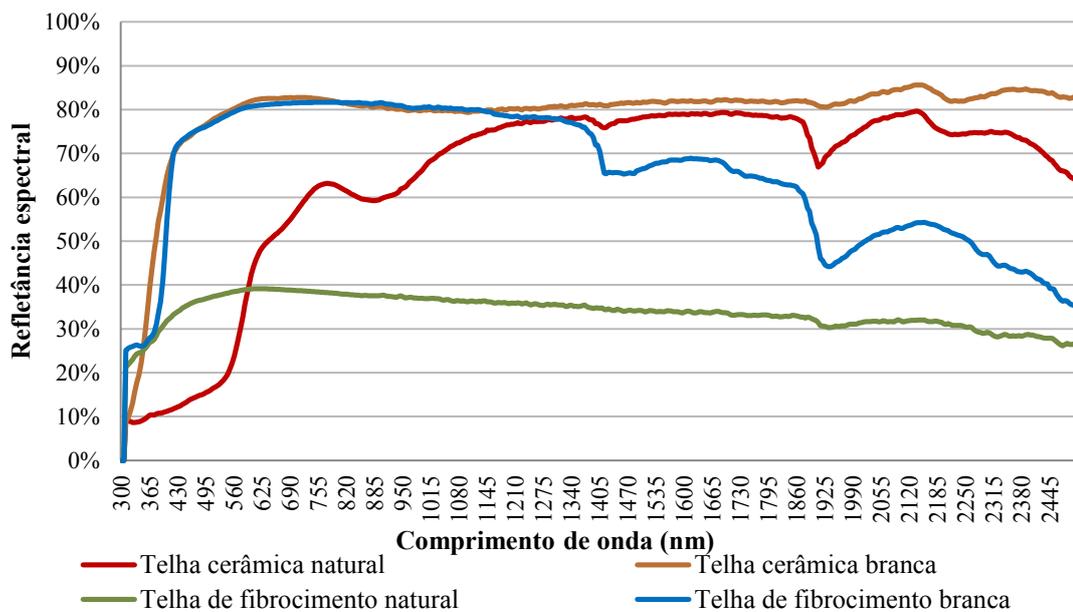
Fonte: Da autora (2019)

Figura 30 – Refletância espectral por comprimento de onda das telhas de fibrocimento



Fonte: Da autora (2019)

Figura 31 – Refletância espectral por comprimento de onda de todas as telhas



Fonte: Da autora (2019)

4.1.3 Propriedades inseridas no *EnergyPlus*

Os dados exibidos na Tabela 11 foram os dados inseridos no *EnergyPlus* para realizar as simulações computacionais. O *EnergyPlus* pede como parâmetro de entrada a absorvância solar e a visível, ao invés da refletância solar e visível. Uma vez que as refletâncias, solar e visível, foram extraídas da curva da refletância espectral, e como o somatório da refletância solar (ρ) e da absorvância solar (α) é igual a 1, desta forma, foi possível encontrar a absorvância solar ($\alpha=1-\rho$). O mesmo procedimento foi realizado para

encontrar a absorptância visível. A emitância térmica é a mesma já apresentada na subseção 4.1.1.

Tabela 11 – Propriedades inseridas no *EnergyPlus*

Telhas	Emitância térmica (ϵ)	Absortância Solar (α)	Absortância Visível (α_{vis})
Cerâmica natural	0,85	0,51	0,71
Cerâmica branca	0,84	0,22	0,20
Fibrocimento natural	0,88	0,64	0,62
Fibrocimento branca	0,90	0,25	0,21

Fonte: Da autora (2019)

4.1.4 Índice de Reflexão Solar (SRI)

A Tabela 12 exibe os dados que foram utilizados para calcular o SRI. As coberturas com telha cerâmica e de fibrocimento normalmente são empregadas em altas inclinações. Para este caso, o SRI precisa apresentar valor igual ou superior a 39, para atender aos requisitos da certificação LEED (LEED, 2019). Para as telhas analisadas no estudo, todas se enquadram no requisito LEED, para os três valores de coeficiente de convecção natural requeridos em norma, como pode ser observado na Tabela 12.

A telha de fibrocimento natural revelou menores valores de SRI, seguida da telha cerâmica natural. Os maiores valores de SRI foram encontrados para a telha cerâmica branca, seguido da telha de fibrocimento branca. Outro ponto a se destacar é que os valores de SRI variam conforme o valor do coeficiente de convecção (h) adotado. Quanto maior o coeficiente de convecção natural maior a troca de calor por convecção, resultando em perdas maiores entre a telha e o ambiente externo e, desta forma, obtendo melhor desempenho térmico, em climas quentes.

Tabela 12 – Valores do SRI

Amostras		Refletância Solar (ρ)	Absorção Solar (α)	Emitância (ϵ)	Índice de Refletância Solar (SRI)		
					h_5	h_{12}	h_{30}
Cerâmica	Natural	0,49	0,51	0,85	54,30	55,50	56,60
	Branca	0,78	0,22	0,84	95,50	96,00	96,50
Fibrocimento	Natural	0,37	0,64	0,88	39,10	39,90	40,60
	Branco	0,75	0,25	0,90	92,60	92,80	93,00

Fonte: Da autora (2019)

4.2 ANÁLISE TÉRMICA

A fim de analisar os resultados mais detalhadamente, foram apresentados os resultados ao longo do ano e os resultados diários, para um dia de verão e outro de inverno. A escolha dos dias foi baseada na maior e na menor diferença de temperatura interna encontradas, considerando as diferentes cores das telhas. Desta forma, para o verão foi analisado o dia 22 de janeiro e para o inverno, foi analisado o dia 24 de julho. A Tabela 13 exhibe as diferenças máximas e mínimas da temperatura interna, considerando as diferentes cores de telhas, para todos os ambientes de permanência prolongada para os dias 22 de janeiro e 24 de julho.

Tabela 13 – Diferenças, máximas e mínimas (em °C), da temperatura interna com telhas naturais e brancas

Telhas	Dormitório 1		Dormitório 2		Sala	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Telha cerâmica	2,64	0,00	2,61	0,07	2,48	0,03
Telha de fibrocimento	3,52	0,00	3,48	0,10	3,35	0,05

Fonte: Da autora (2019)

Observa-se na Tabela 13 que as diferenças máximas para os dormitórios resultaram em valores semelhantes quando comparados com a diferença máxima da sala. Esse fato pode ser explicado devido à orientação da edificação. Os dormitórios estão voltados para o leste enquanto a sala para o oeste. Observa-se também que entre as telhas de fibrocimento a diferença de temperatura foi maior do que entre às telhas cerâmicas, esse ponto será explicado ao longo da discussão da análise térmica.

4.2.1 Temperatura interna dos ambientes

As figuras com os resultados da temperatura interna do ar foram apresentadas somente para o dormitório 1, pois foi o ambiente que apresentou tanto a maior quanto a menor diferença de temperaturas interna do ar entre a telha natural e a branca. Optou-se por expor os resultados somente de um dos ambientes de permanência prolongada, visto que os resultados variaram muito pouco entre si.

A Figura 32 apresenta o comportamento da temperatura interna ao longo do ano para o dormitório 1, tanto para as telhas de fibrocimento natural quanto branca, e a Figura 33 para

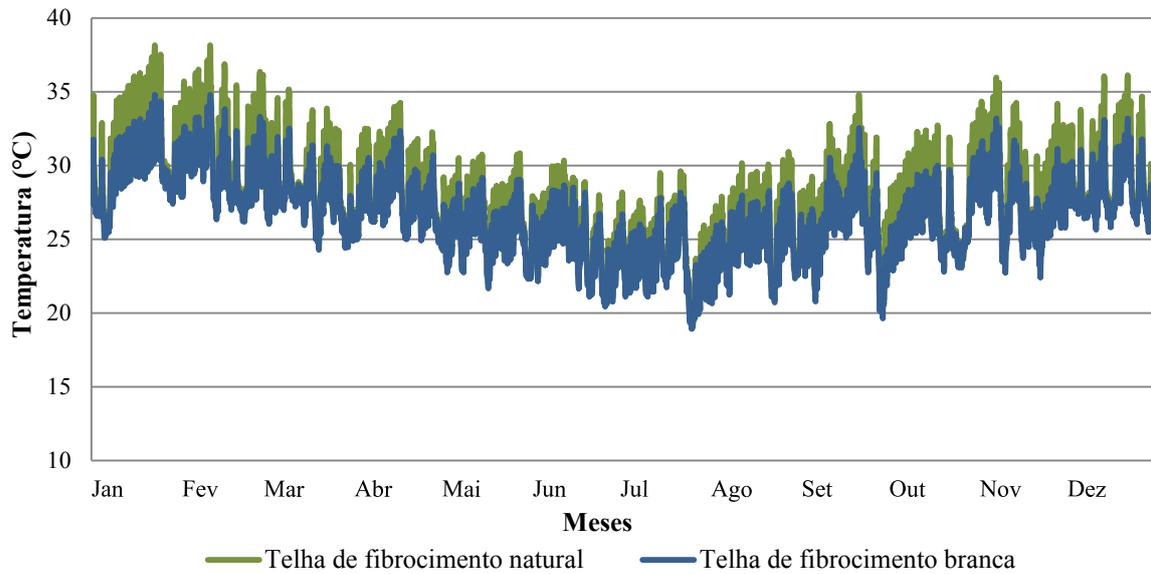
as telhas cerâmicas. Consegue-se constatar que a temperatura interna, quando se utiliza a telha na cor natural, é superior à da telha branca ao longo de todo o ano. Nos meses considerados mais quentes, observa-se que essa diferença da temperatura interna é maior do que nos meses mais frios. Este comportamento é observado para os dois tipos de telhas, com a diferença de que, para as telhas de cerâmicas, as temperaturas internas alcançam temperaturas levemente inferiores, com relação às telhas de fibrocimento. Isso é devido ao fato que o SRI das telhas cerâmicas é superior ao das telhas de fibrocimento (para as duas cores de telhas).

A temperatura interna máxima do ar na edificação, considerando o telhado de fibrocimento convencional, resultou em 38,2°C, enquanto considerando o telhado frio resultou em 34,8°C, ao longo do ano. Evidencia-se que a máxima temperatura interna para o telhado natural ocorreu no dia 10 de fevereiro às 15 horas e que a temperatura externa neste momento era 37,9°C, ou seja, a temperatura interna estava 0,2°C acima da temperatura externa. A temperatura interna máxima utilizando o telhado frio ocorreu no mesmo dia e uma hora depois, às 16 horas. Neste momento, a temperatura externa era de 37,3°C. Logo, a temperatura interna utilizando o telhado frio apresentou uma temperatura de 2,5°C inferior à temperatura externa.

Ressalta-se que uma temperatura interna de 34,8°C não é uma temperatura de conforto térmico. No entanto, o que está sendo avaliado neste trabalho é uma das várias possibilidades e estratégias de eficiência energética de edificação. Destaca-se a importância de avaliar essas estratégias como um todo, a fim de que cada estratégia contribua para melhorar o conforto térmico dos usuários, e assim, diminua o consumo de energia elétrica de aparelhos de ar-condicionado.

O dormitório 1 apresenta uma temperatura interna mínima de 19,1°C para a telha de fibrocimento natural e de 18,9°C para a telha de fibrocimento branca. Tanto a temperatura interna máxima quanto a mínima da telha de fibrocimento branca apresentaram temperaturas inferiores em relação à da telha de fibrocimento natural. Isso porque sua refletância solar é superior à da telha natural, ou seja, o telhado frio reflete a radiação solar em maior quantidade quando comparado ao telhado convencional. Portanto, a taxa de transferência de calor da cobertura para o interior da edificação é menor utilizando o telhado frio, resultando em menores temperaturas internas.

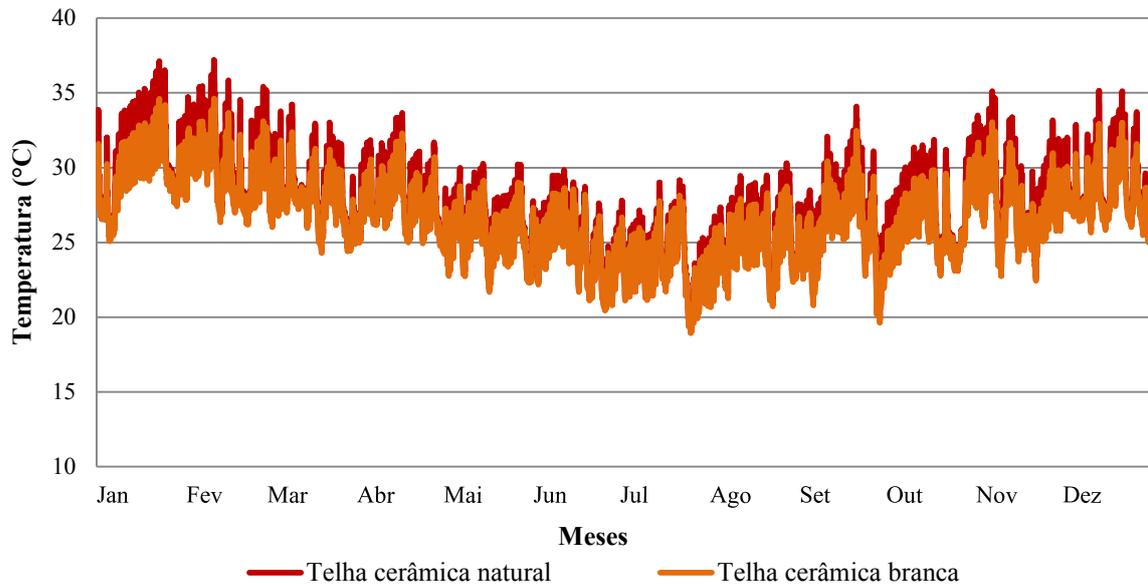
Figura 32 – Temperatura interna para o dormitório 1 (telhas de fibrocimento)



Fonte: Da autora (2019)

Para as telhas cerâmicas, a maior temperatura interna ao longo do ano, resultante da utilização da telha natural, foi de 37,2°C, e a da telha branca foi de 34,6°C. Nota-se uma diferença menor de temperatura interna, para as duas cores, quando comparada com a telha de fibrocimento. Este fato pode ser explicado pelas diferentes propriedades dos diferentes tipos de telhas, cerâmica e fibrocimento. As máximas temperaturas internas para as telhas cerâmicas ocorreram no mesmo dia e horário das telhas de fibrocimento, para a telha natural, no dia 10 de fevereiro às 15 horas, e para a telha branca às 16 horas do mesmo dia. A máxima temperatura interna, utilizando a telha natural, foi 0,7°C inferior à temperatura externa, enquanto para o telhado branco foi 2,6°C inferior à temperatura externa. Com relação à temperatura mínima, a telha natural, apresentou 19,1°C e a telha branca 18,9°C, ao longo do ano.

Figura 33 – Temperaturas interna do dormitório 1 (telhas cerâmicas)



Fonte: Da autora (2019)

A Tabela 14 exibe as temperaturas internas máximas e mínimas para todos os ambientes de permanência prolongada, para os dois tipos de telhas e para as duas cores analisadas.

Tabela 14 – Temperaturas internas (em °C), máximas e mínimas, para os APP

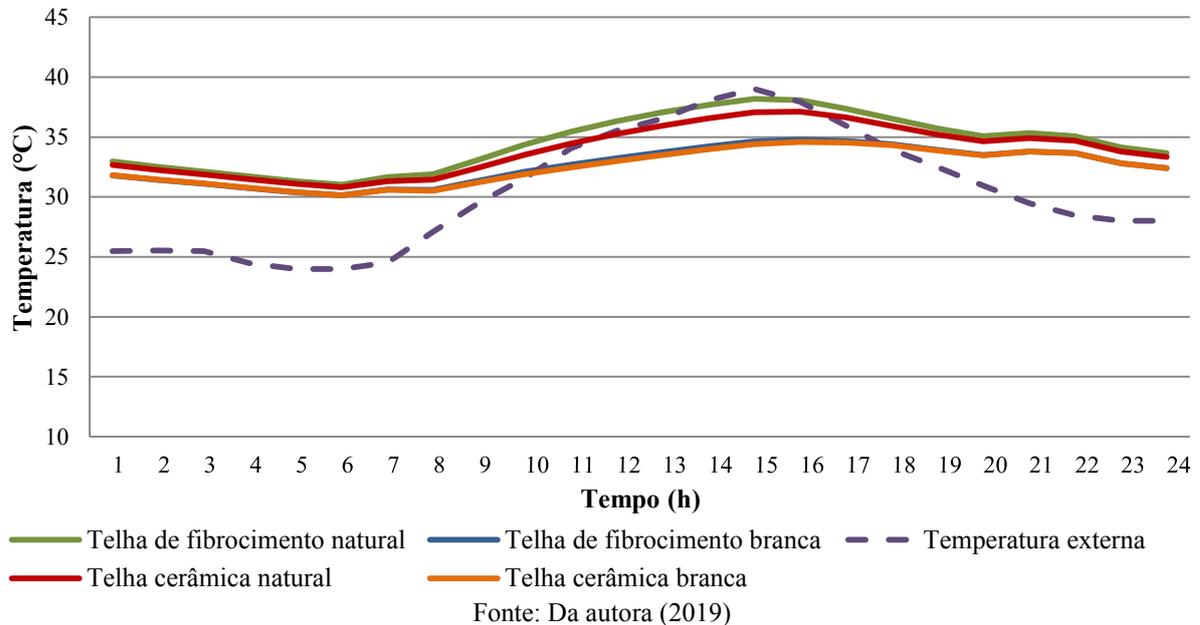
Tipos de telha	Temperatura interna máxima			Temperatura interna mínima		
	Dorm. 1	Dorm. 2	Sala	Dorm. 1	Dorm. 2	Sala
Telha de fibrocimento natural	38,2	38,0	38,2	19,1	19,1	18,9
Telha de fibrocimento branca	34,8	34,7	35,9	18,9	18,9	18,7
Telha cerâmica natural	37,2	37,0	37,5	19,1	19,0	18,9
Telha cerâmica branca	34,6	34,5	35,8	18,9	18,9	18,7

Fonte: Da autora (2019)

A Figura 34 apresenta as temperaturas internas para um dia de verão para as telhas de fibrocimento e de cerâmica e a temperatura externa para fins de comparação. Observa-se que a temperatura interna, quando se utiliza as telhas naturais, é superior em todas as horas do dia, em relação à temperatura interna quando se utiliza as telhas brancas. Porém, a telha cerâmica natural exibe temperaturas internas inferiores as referentes à telha de fibrocimento natural. Durante o dia, a diferença entre as temperaturas internas resultantes das diferentes cores das telhas é maior, em função da radiação solar incidente sobre a cobertura e paredes externas da edificação. Como a refletância solar das telhas naturais é inferior à das telhas brancas, as telhas naturais transferem mais calor para a edificação, por refletir menos a radiação solar,

resultando em uma temperatura interna maior. À noite, essa diferença diminuiu em função da temperatura externa diminuir e pela não incidência da radiação solar.

Figura 34 – Temperaturas internas e externa (22 de janeiro)

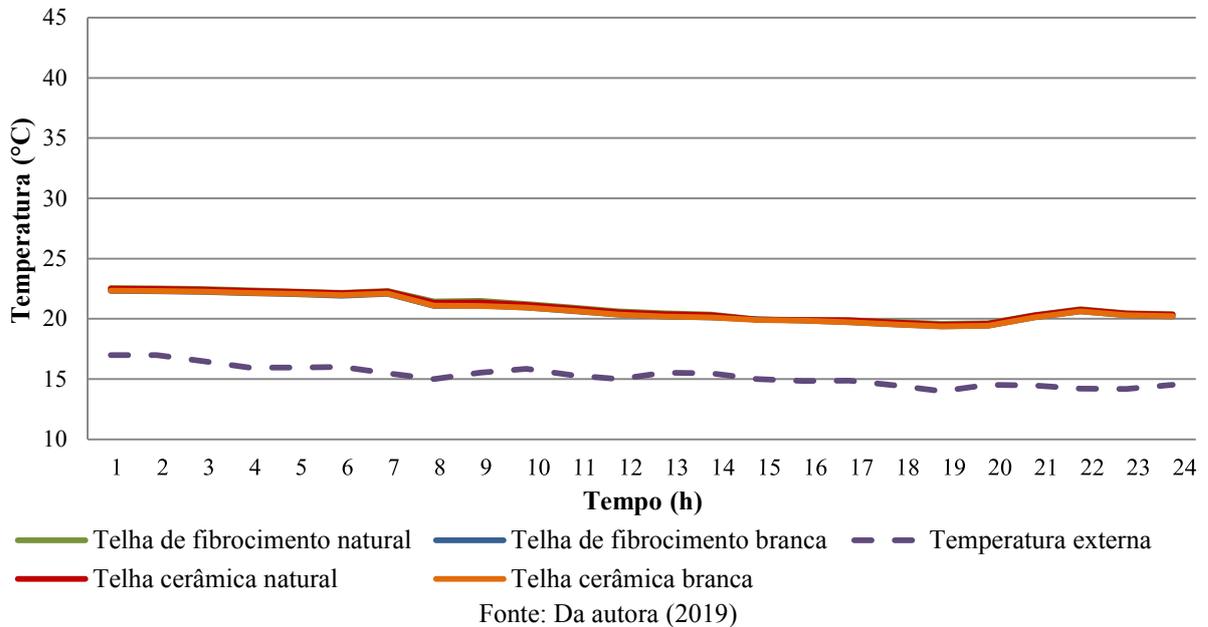


Nos períodos mais frios do ano essa diferença é mínima, como pode ser percebido na Figura 35. Nota-se que a temperatura interna utilizando as duas cores de telhas é praticamente a mesma, e acompanha o comportamento da temperatura externa (que representa uma curva típica de dias nublados); porém, a temperatura interna é cerca de 5°C superior a temperatura externa. Este comportamento, de não haver diferença entre a temperatura interna das duas cores de telhas, é em virtude de a temperatura externa ser menor. Além de que, no inverno a tendência é que a incidência de radiação solar seja menor, e a temperatura da cobertura, para ambas as cores, resulte em valores praticamente iguais neste período do ano. Dessa forma os resultados mostraram que independentemente do tipo de material (nesse caso cerâmica e fibrocimento), em períodos mais frios os telhados frios não trazem benefícios com relação às condições de conforto térmico, para o caso estudado.

Por este motivo, as coberturas frias são indicadas para climas quentes. Caso o Rio de Janeiro não apresentasse um clima quente, muito provavelmente a cobertura branca iria perder mais calor para o meio durante o inverno, e conseqüentemente, transferir menos calor para a edificação, sendo que neste período do ano a transferência de calor para dentro da edificação é desejável. Para que os materiais frios possam ser utilizados em climas mais variados, é

interessante o emprego de materiais termocrômicos, em razão de suas propriedades, conforme explorados na seção 2.2 no capítulo do Referencial Teórico deste trabalho.

Figura 35 – Temperaturas internas e externa (24 de julho)



4.2.2 Temperatura externa da cobertura

A análise detalhada da temperatura externa da cobertura é importante, não só pelo fato do seu desempenho térmico, mas também para analisar a troca de calor com o meio, a fim de verificar sua contribuição ou não para o fenômeno ilha de calor.

Como a cobertura da edificação é composta de duas águas, definiu-se pela apresentação dos resultados gráficos de somente uma das águas, pelo fato de que os resultados das diferentes orientações da cobertura apresentam pouca variação. Apesar da parte oeste da cobertura resultar em temperaturas levemente superiores à da cobertura leste, optou-se por expor os resultados da cobertura leste, tendo em vista que é a parte da cobertura que atende o dormitório 1, alvo de avaliação da temperatura interna.

As Figuras 36 e 37 apresentam a temperatura máxima, mínima e média da cobertura, leste e oeste da edificação, com telhas de fibrocimento e de cerâmica, respectivamente. A temperatura máxima é a que mais apresentou variação. A temperatura ambiente máxima foi de 40°C, a temperatura máxima da cobertura leste, com a telha de fibrocimento e na cor natural, foi de 71,2°C (31,2°C superior à temperatura ambiente máxima), enquanto com a mesma telha na cobertura oeste a temperatura foi de 73,9°C (33,9°C superior à temperatura

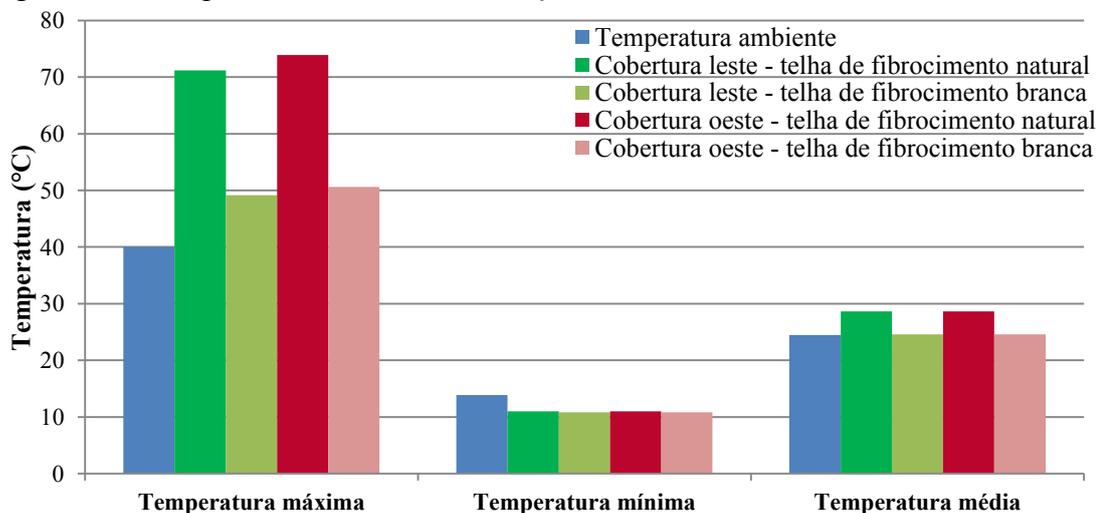
ambiente máxima). Com relação às telhas de fibrocimento brancas, as temperaturas máximas nas coberturas resultaram em valores mais próximos à temperatura ambiente. A cobertura leste apresentou uma temperatura máxima de 49,2°C (9,2°C superior à temperatura ambiente máxima) com as telhas brancas, enquanto na cobertura oeste foi de 50,6°C (10,6°C superior à temperatura ambiente máxima).

As temperaturas mínimas das telhas de fibrocimento naturais e brancas, nas duas orientações da cobertura, resultaram em valores muito semelhantes, e somente cerca de 3°C inferior à temperatura ambiente mínima. Com relação às temperaturas médias, nota-se que a telha de fibrocimento branca apresentou temperaturas muito próximas à temperatura ambiente média. As telhas de fibrocimento naturais apresentaram uma média cerca de 4°C superior as demais telhas.

De maneira geral, as temperaturas para as telhas cerâmicas resultaram em valores muito semelhantes às das coberturas utilizando as telhas de fibrocimento. Os valores para as temperaturas mínima e média da telha cerâmica resultaram em valores levemente inferiores em relação às da telha de fibrocimento. Para as temperaturas máximas, a telha cerâmica apresentou valores da ordem de 6°C menores que as temperaturas máximas das telhas de fibrocimento.

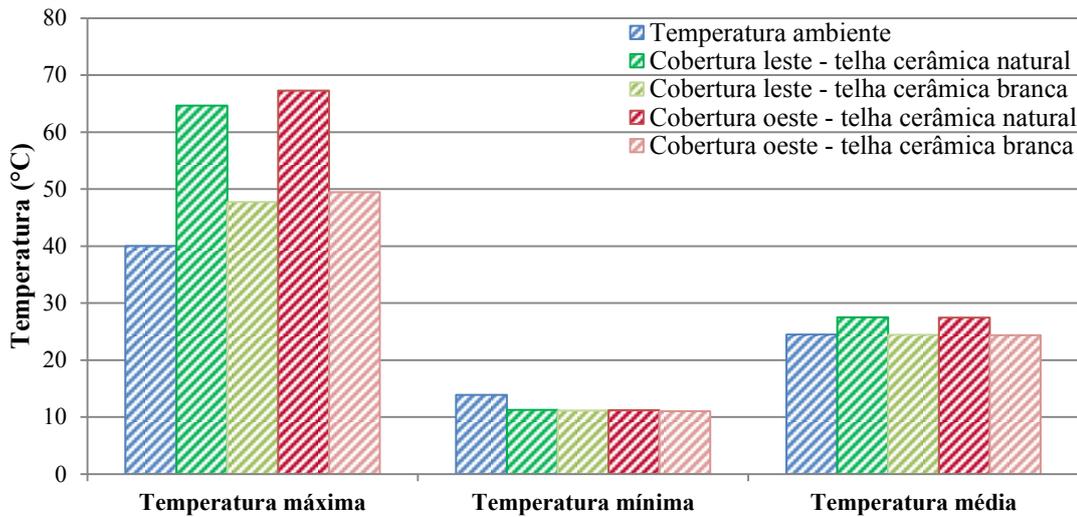
A temperatura máxima da cobertura leste, com telhas cerâmicas naturais, foi de 64,7°C, enquanto com telhas brancas foi de 47,7°C. Para a cobertura oeste, com as telhas naturais, a temperatura máxima foi de 67,2°C, enquanto com telhas brancas foi de 49,4°C. A análise das Figuras 36 e 37 foram realizadas para os valores do ano inteiro.

Figura 36 – Temperaturas das duas orientações da cobertura com telhas de fibrocimento



Fonte: Da autora (2019)

Figura 37 – Temperaturas das duas orientações da cobertura com telhas cerâmicas



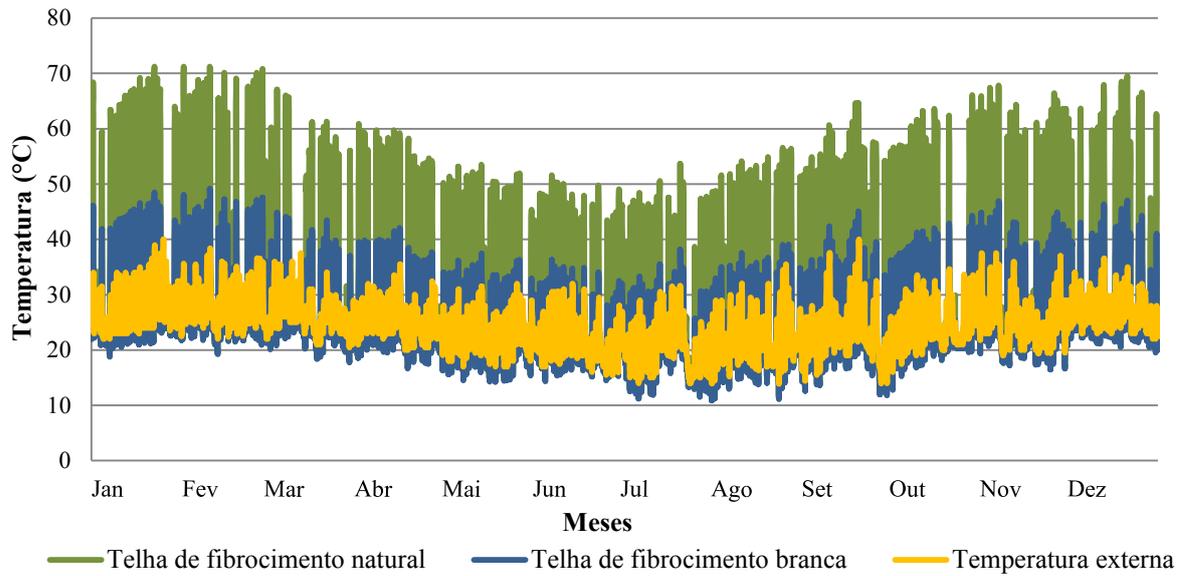
Fonte: Da autora (2019)

As Figuras 38 e 39 mostram como as temperaturas das coberturas leste se comportam, ao longo do ano, para as telhas de fibrocimento e cerâmica, respectivamente. A maior amplitude térmica da temperatura ambiente é de 26,1°C ao longo do ano; enquanto a da telha de fibrocimento natural é de 60,2°C, da telha de fibrocimento branca de 38,4°C, da telha cerâmica natural de 53,5°C e da telha cerâmica branca, de 36,6°C.

De modo geral, o comportamento da temperatura da cobertura com telhas cerâmica é muito semelhante ao da cobertura com telhas de fibrocimento. Todavia, as temperaturas para as telhas cerâmicas resultam em valores inferiores a das telhas de fibrocimento. Quando se faz um comparativo com os resultados avaliados até aqui, entre a telha cerâmica e a telha de fibrocimento, independentemente da cor, nota-se que o desempenho térmico da telha cerâmica é superior ao da telha de fibrocimento. Isto se deve ao fato de a telha cerâmica atingir valores inferiores de temperatura na cobertura e, conseqüentemente, transferir menos calor para a edificação.

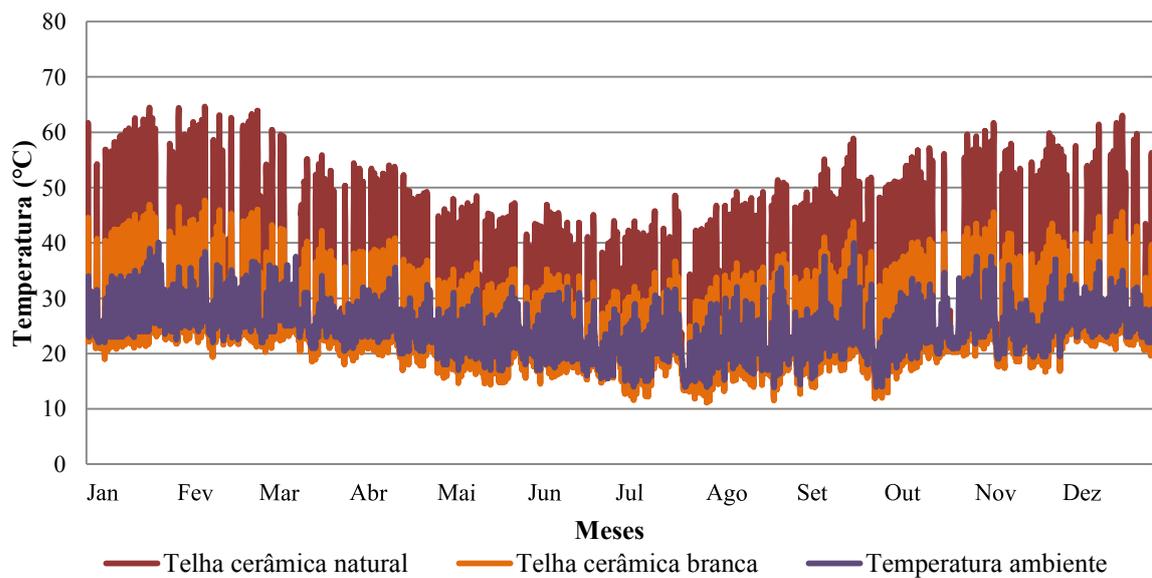
Quando analisadas as máximas temperaturas externas da superfície do telhado, verificou-se que a temperatura externa do telhado frio é 31,0% menor do que a temperatura externa do telhado convencional, para as telhas de fibrocimento. Para as telhas cerâmicas, a temperatura externa do telhado frio é 26,3% menor do que a temperatura externa do telhado convencional.

Figura 38 - Temperatura da cobertura leste da telha de fibrocimento



Fonte: Da autora (2019)

Figura 39 – Temperatura da cobertura leste da telha cerâmica



Fonte: Da autora (2019)

A Tabela 15 apresenta a temperatura máxima e mínima para as diferentes coberturas e para as duas orientações da cobertura.

Tabela 15 – Temperaturas máximas e mínimas da cobertura, em °C, para os dois tipos de telhas e cores, e para as duas orientações da cobertura

Tipo de telha	Leste		Oeste	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Telha de fibrocimento natural	71,2	11,0	73,9	11,0
Telha de fibrocimento branca	49,2	10,8	50,6	10,8
Telha cerâmica natural	64,7	11,2	67,2	11,2
Telha cerâmica branca	47,7	11,1	49,4	11,0

Fonte: Da autora (2019)

A temperatura externa da cobertura reflete na quantidade de calor transferida para dentro da edificação, como já discutido anteriormente. No entanto, a cobertura também está trocando calor com o ambiente externo. Logo, as menores temperaturas que a telha branca resulta são de grande importância para mitigar o fenômeno ilha de calor, pois o ambiente recebe menos calor de uma superfície de telhas brancas do que de uma com telha natural, em função da sua temperatura.

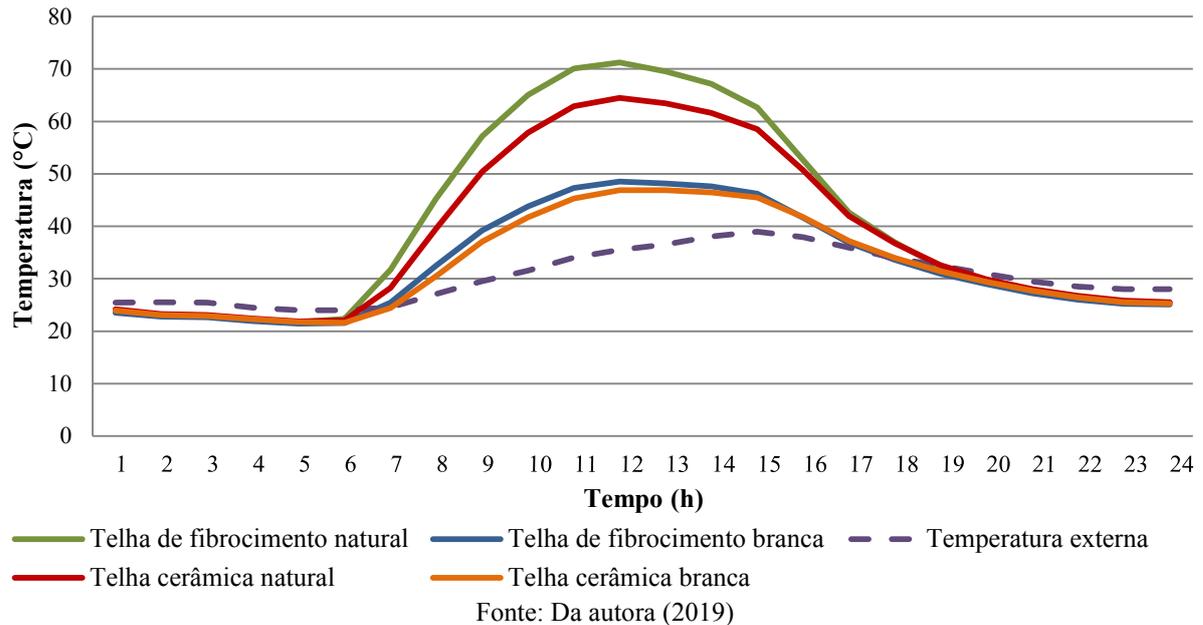
Na Figura 40 pode ser analisado como as temperaturas das coberturas se comportam ao longo de um dia de verão para as telhas de fibrocimento e de cerâmica. Observa-se que no período noturno as temperaturas das coberturas com telhas naturais e brancas são praticamente as mesmas, e muito próximas à temperatura ambiente, pelo fato de não haver ganho por radiação solar, e a superfície da cobertura estar constantemente trocando calor com o meio, tendendo ao equilíbrio térmico. Durante o dia, quando a temperatura ambiente aumenta devido à radiação solar, a temperatura das telhas também aumenta, devido à constante incidência de radiação solar sobre elas. Entretanto, em função da refletância solar das telhas brancas ser maior do que a das telhas naturais, as telhas brancas refletem a radiação solar em maior quantidade, resultando em temperaturas menores da superfície. Como o desempenho térmico das telhas cerâmicas é superior ao das telhas de fibrocimento, esse aumento na temperatura da cobertura é inferior ao apresentado para a telha de fibrocimento.

Na Figura 40, observa-se que as telhas brancas, de fibrocimento e de cerâmica, apresentam temperaturas muito próximas entre si, e isso é em função do SRI das telhas ter valores próximos. O SRI da telha de fibrocimento branca é 93 enquanto que o da telha cerâmica branca é 96. Já para as telhas naturais, a diferença de SRI passa a ser de 15, pois a telha de fibrocimento natural apresenta um SRI de 40 e a telha cerâmica natural de 55.

Outro fator importante a ser comentado é a questão da durabilidade das telhas devido ao stress térmico. Como estudado por Santamouris, Synnefa e Karlessi, 2011; Pisello *et al.*, 2016, quanto menor a variação da temperatura das telhas, maior sua durabilidade. Portanto, as

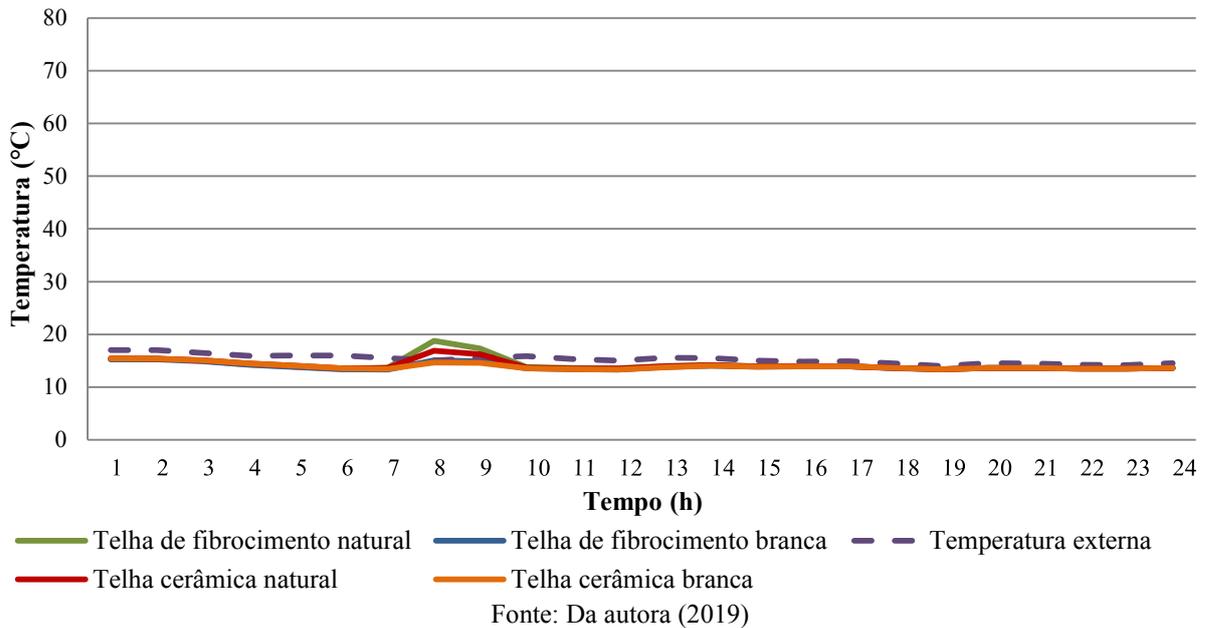
telhas brancas têm como sua principal característica a alta refletância solar. Este fato faz com que a cobertura reflita a radiação solar em maior quantidade, fazendo com que a temperatura da cobertura não alcance altas temperaturas como as coberturas com telhas convencionais alcançam. Isto resulta em temperaturas internas menores, contribui para a mitigação do fenômeno ilha de calor, além de aumentar a durabilidades das telhas.

Figura 40 – Temperaturas das coberturas (22 de janeiro)



A Figura 41 apresenta as temperaturas das coberturas para um dia de inverno, para as telhas de fibrocimento e de cerâmica. Nota-se que as temperaturas tanto das telhas naturais quanto das telhas brancas são praticamente as mesmas, exceto no início da manhã, onde as telhas naturais resultam em uma temperatura levemente superior. Ao longo de todo dia, as temperaturas das coberturas possuem uma pequena variação com relação à temperatura ambiente. Isso está relacionado ao fato de que, no inverno, o ângulo solar é mais baixo e a radiação solar chega a uma superfície com menor intensidade. Há uma probabilidade maior também de céus nublados, simultaneamente a uma menor disponibilidade solar (menos horas de insolação).

Figura 41 – Temperaturas das coberturas (24 de julho)



4.2.3 Radiação térmica

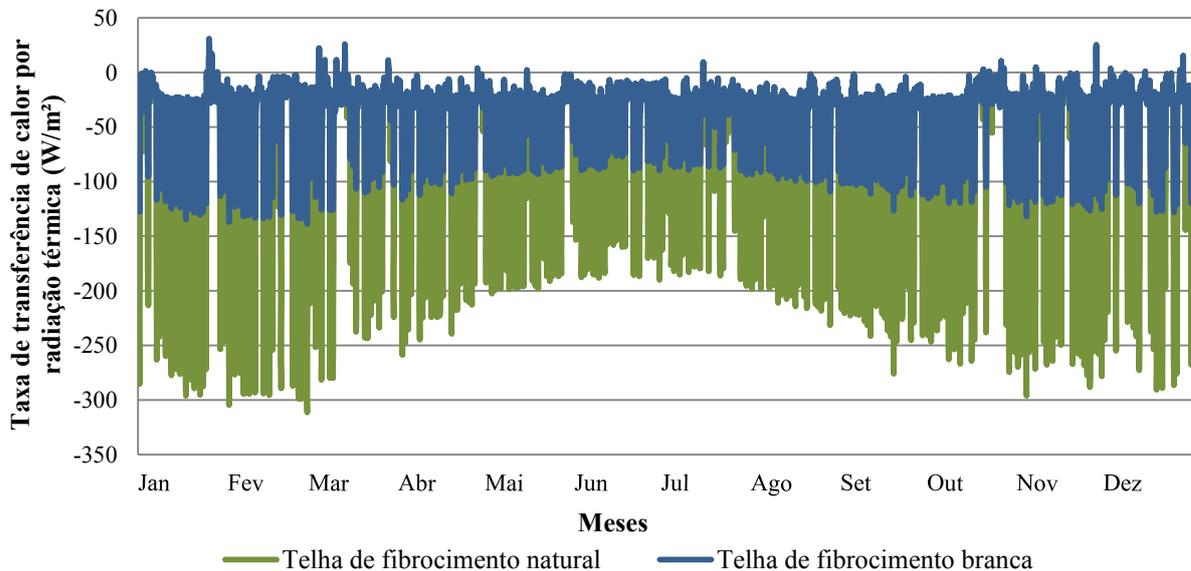
Com o intuito de demonstrar a influência da emitância térmica das telhas no comportamento térmico da edificação, foi analisada a taxa de transferência de calor por radiação térmica. Esta medida representa a transferência de calor atribuída às trocas de radiação térmica infravermelha de onda longa, entre a cobertura e o meio. Os valores negativos da taxa indicam perda de calor por emissão, logo, os valores positivos indicam ganho de calor também por emissão.

Como visto na subseção 4.1.1 deste capítulo, a emitância das amostras das telhas de cor natural e branca apresentou pouca variação, quando comparadas por tipo e cor de telha. Logo, os resultados apresentados nesta subseção são decorrentes, principalmente, da grande diferença da temperatura das telhas, e não da diferença da emitância propriamente dita. Uma vez que a transferência de calor por radiação térmica é um fenômeno superficial, em que o calor emitido está de acordo com a temperatura superficial do material.

De acordo com a Figura 42, a telha de fibrocimento natural perde calor por emissão térmica em uma magnitude maior quando comparada à telha de fibrocimento branca. A telha natural chega a perder até $311,4 \text{ W.m}^{-2}$ na cobertura leste, e $325,3 \text{ W.m}^{-2}$ na cobertura oeste, enquanto a telha branca perde $138,9 \text{ W.m}^{-2}$ e $149,2 \text{ W.m}^{-2}$ na cobertura leste e oeste, respectivamente. A cobertura também ganha calor por radiação térmica, porém, em uma magnitude muito inferior a que emite. Na cobertura leste, a telha natural ganha até $29,3 \text{ W.m}^{-2}$

², enquanto a branca até $31,0 \text{ W.m}^{-2}$. Na cobertura oeste, a telha natural ganha até $27,9 \text{ W.m}^{-2}$, enquanto a branca até $30,5 \text{ W.m}^{-2}$.

Figura 42 – Taxa de transferência de calor por radiação térmica para a cobertura leste de fibrocimento

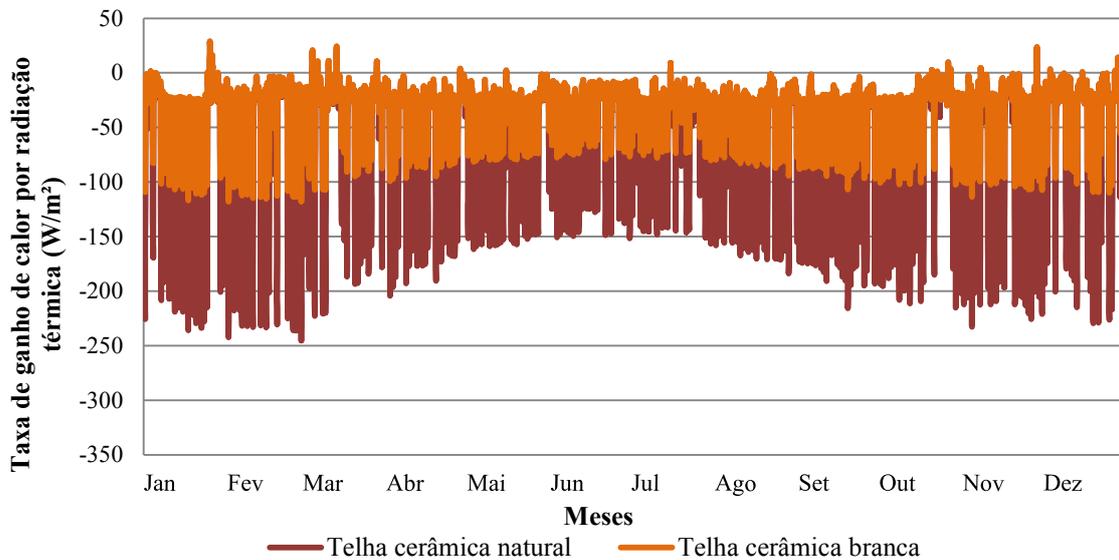


Fonte: Da autora (2019)

A telha cerâmica apresenta o mesmo comportamento da telha de fibrocimento, entretanto, com uma magnitude menor, tendo em vista que a telha cerâmica resulta em temperaturas de cobertura inferiores à das telhas de fibrocimento. A Figura 43 exibe o comportamento da taxa de transferência de calor por radiação térmica para a cobertura com telhas cerâmicas. A máxima perda de calor por radiação térmica da telha cerâmica para o ambiente é de $245,2 \text{ W.m}^{-2}$ para a cobertura leste e $261,2 \text{ W.m}^{-2}$ para cobertura oeste, para a telha natural. Para a telha branca, a máxima perda de calor foi de $118,2 \text{ W.m}^{-2}$ para cobertura leste e $130,6 \text{ W.m}^{-2}$ para cobertura oeste. Ambas as telhas, natural e branca, ganham calor por radiação térmica, entretanto, com uma magnitude muito menor. O máximo ganho de calor da telha natural foi de $28,6 \text{ W.m}^{-2}$, enquanto o da telha branca foi de $29,1 \text{ W.m}^{-2}$ para a cobertura leste. Para a cobertura oeste, o máximo ganho de calor foi de $27,6 \text{ W.m}^{-2}$ para a telha natural e $28,6 \text{ W.m}^{-2}$ para a telha branca.

A taxa de perda de calor por radiação térmica na cobertura leste para o telhado frio de fibrocimento é 55,5% menor do que a do telhado convencional. Para as telhas cerâmicas na mesma orientação, a taxa de perda de calor por radiação térmica do telhado frio é 51,8% menor do que a do telhado convencional, quando se analisa as perdas máximas de calor por radiação térmica.

Figura 43 – Taxa de transferência de calor por radiação térmica para a cobertura leste de cerâmica



Fonte: Da autora (2019)

A Tabela 16 apresenta os valores máximos e mínimos da taxa de transferência de calor, por radiação térmica, para os diferentes tipos de coberturas e orientações.

Tabela 16 – Valores máximos e mínimos da taxa de transferência de calor por radiação térmica ($W.m^{-2}$)

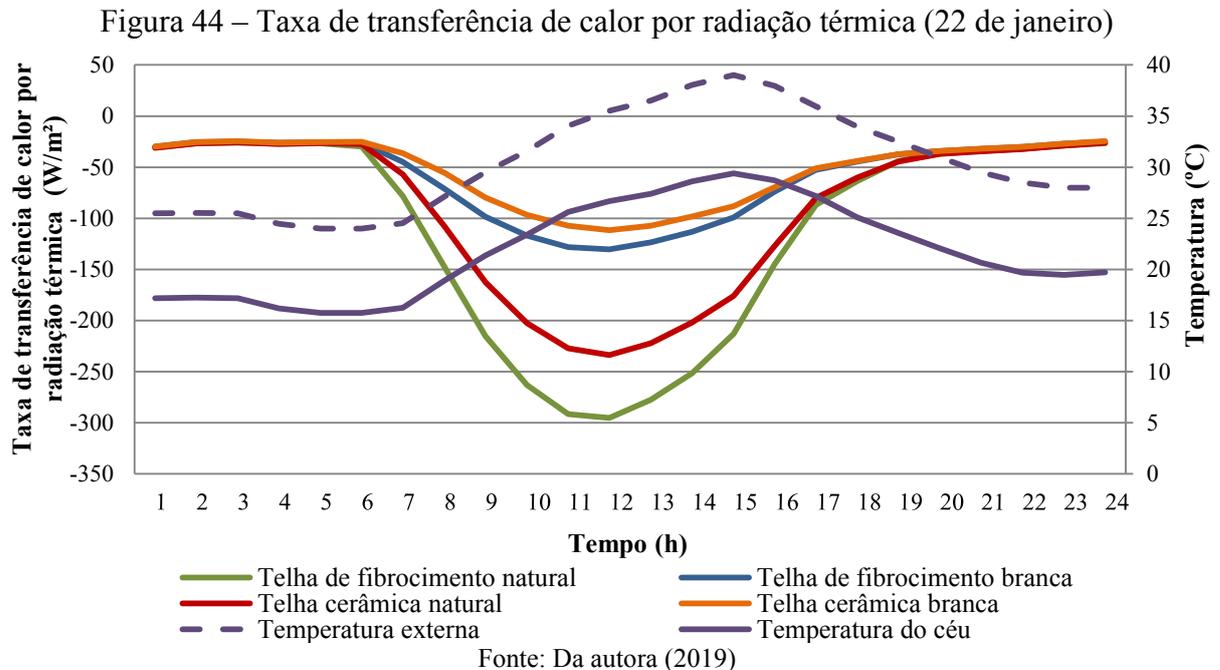
Tipo de telha	Leste		Oeste	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Telha de fibrocimento natural	-311,4	29,3	-325,3	27,9
Telha de fibrocimento branca	-138,9	31,0	-149,2	30,5
Telha cerâmica natural	-245,2	28,6	-261,2	27,6
Telha cerâmica branca	-118,2	29,1	-130,6	28,6

Fonte: Da autora (2019)

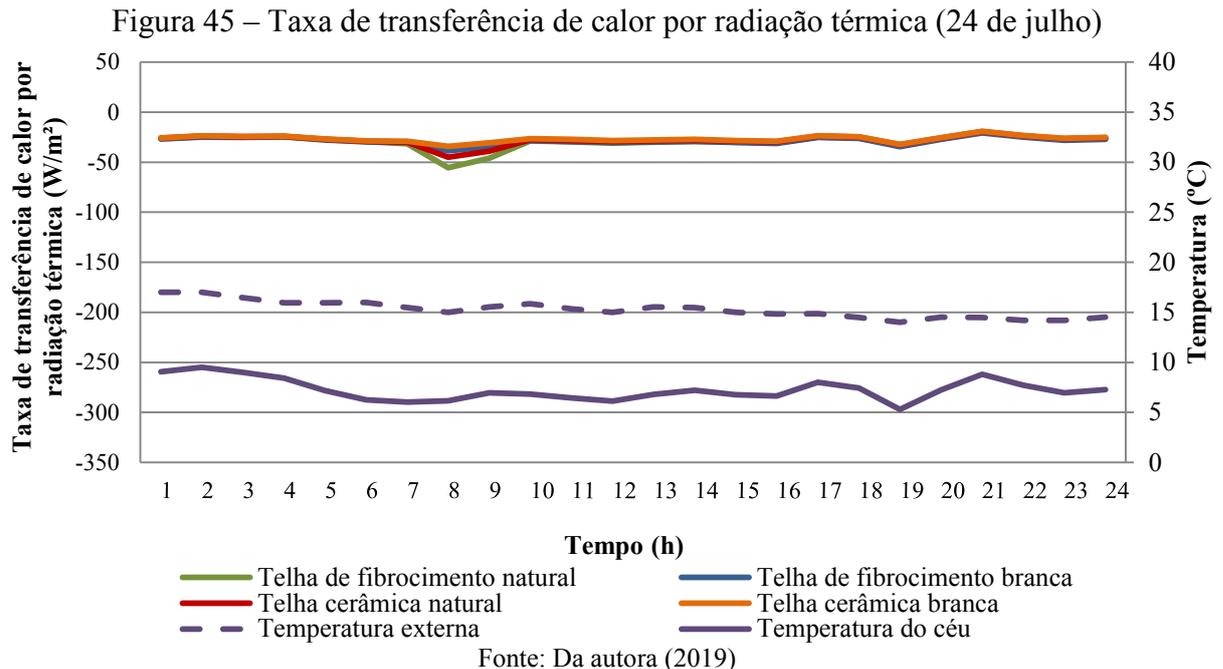
Para discutir os resultados da taxa de transferência de calor por radiação térmica é importante analisar conjuntamente a temperatura externa da cobertura (subseção 4.2.2.1). Visto que este é o principal motivo da diferença de emissão no infravermelho das telhas, em virtude da emitância entre as telhas possuir variação pequena.

Uma vez que, no período noturno, as temperaturas das coberturas apresentam pouca diferença entre si, a transferência de calor por radiação térmica também apresenta pouca diferença entre as telhas. No decorrer do dia, quando as temperaturas das telhas aumentam, consequentemente, aumenta também a taxa de perda de transferência de calor por radiação térmica. Este fato pode ser observado na Figura 44, para as telhas de fibrocimento e cerâmica.

Como a temperatura das telhas naturais é superior à das telhas brancas, a taxa de perda de calor por radiação térmica das telhas naturais, da mesma forma, é superior as das telhas brancas. Isso porque a energia emitida é proporcional à quarta potência da temperatura das telhas.



Para um dia de inverno, quando analisada a figura da taxa de transferência de calor por radiação térmica juntamente com a figura da temperatura da superfície do telhado, observa-se que ambas apresentam um comportamento muito parecido. A taxa de perda de calor por radiação térmica é pequena e praticamente constante ao longo de todo dia, para as duas cores de telhas, exceto nas primeiras horas da manhã, em que apresenta uma perda de calor maior para a telha natural, exatamente igual ao comportamento da temperatura da superfície do telhado para um dia de inverno. Este comportamento pode ser observado na Figura 45 para as telhas de fibrocimento e cerâmica.



4.2.4 Radiação Solar

Para observar a influência da refletância solar no comportamento térmico da cobertura, a taxa de ganho de calor por radiação solar foi analisada. Esta taxa representa a transferência de calor atribuída à absorção da radiação solar na face externa da cobertura e apresenta apenas valores positivos. Com a relação entre absorvância e refletância, cuja soma deve ser igual a um, entende-se que, quanto maior for a taxa de ganho de calor por radiação solar, menor será a energia refletida pela superfície.

As Figuras 46 e 47 apresentam o comportamento da taxa de ganho de calor por radiação solar ao longo do ano para as telhas de fibrocimento e de cerâmica, respectivamente. Para as telhas naturais, esta taxa é maior nos meses mais quentes do ano e menor nos meses mais frios. Para as telhas brancas, este fato pode ser observado da mesma forma, no entanto, com uma amplitude menor ao longo do ano.

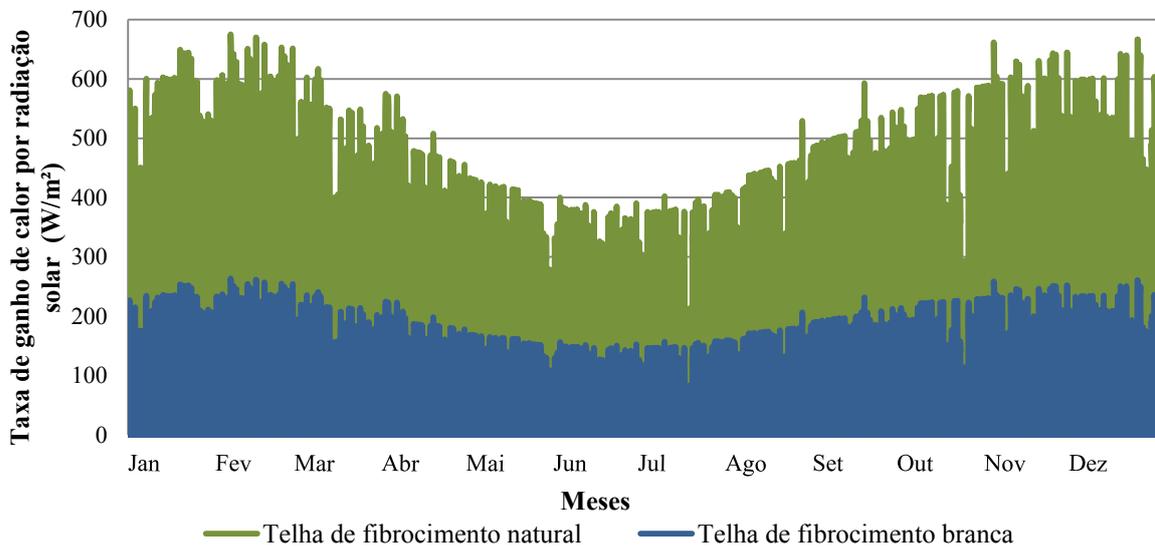
Ambas as cores das telhas recebem a mesma quantidade de radiação solar. Contudo, como a refletância solar das telhas brancas é superior à das telhas naturais, as telhas brancas, consequentemente, refletem a radiação solar em uma quantidade maior do que as telhas naturais. Este fato explica a diferença do ganho de calor por radiação solar entre as telhas.

As telhas de fibrocimento naturais têm um ganho máximo, ao longo do ano, de $675,0 \text{ W.m}^{-2}$, em contrapartida, as telhas de fibrocimento brancas de $263,7 \text{ W.m}^{-2}$, uma diferença de $411,3 \text{ W.m}^{-2}$ para a cobertura leste. Para a cobertura oeste, as telhas de fibrocimento naturais

resultam em um ganho máximo de $689,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, enquanto as telhas de fibrocimento brancas de $269,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, uma diferença de $420,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

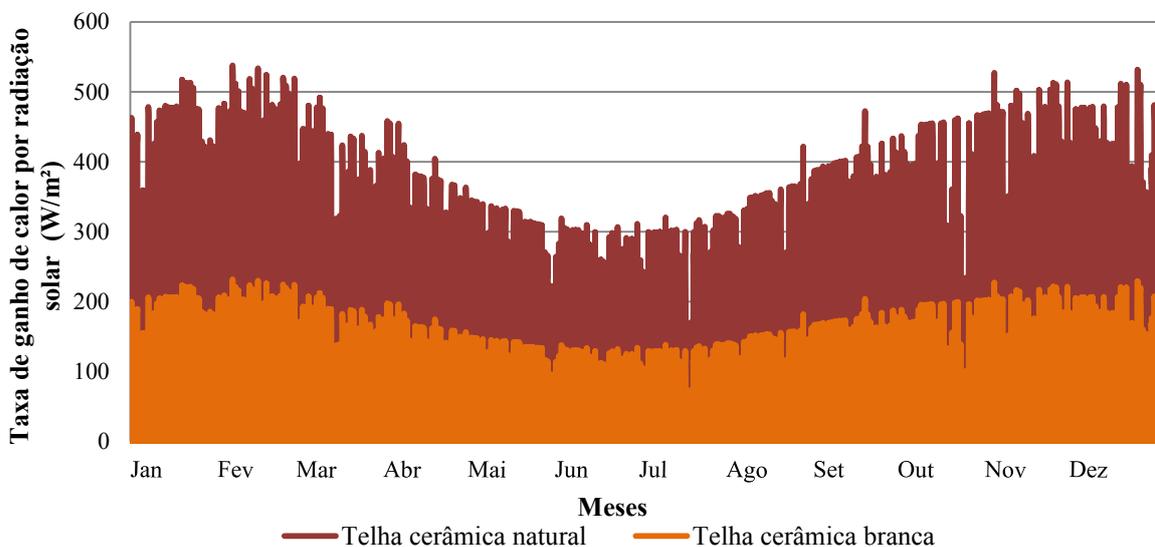
As telhas cerâmicas exibem uma faixa menor de valores, quando comparadas com as telhas de fibrocimento. As telhas cerâmicas naturais possuem uma taxa máxima de ganho de calor por radiação solar de $537,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, enquanto as telhas brancas de $232,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, uma diferença de $305,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ para a cobertura leste. Para a cobertura oeste, a máxima taxa de ganho de calor para a telha natural foi de $549,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, enquanto a telha branca de $237,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, uma diferença de $312,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Figura 46 – Taxa de ganho de calor por radiação solar anual para telhas de fibrocimento



Fonte: Da autora (2019)

Figura 47 – Taxa de ganho de calor por radiação solar anual para telhas cerâmicas



Fonte: Da autora (2019)

Quando analisadas as máximas taxas de ganho de calor por radiação solar na cobertura leste, observou-se que o telhado frio de fibrocimento ganha 60,9% menos calor do que o telhado convencional de fibrocimento. Para o telhado de cerâmica, na mesma orientação, o telhado frio ganha 56,9% menos calor do que o telhado convencional.

A Tabela 17 exhibe os valores máximos para a taxa de ganho de calor por radiação solar, para os diferentes tipos de coberturas e para as duas orientações.

Tabela 17 – Valores máximos da taxa de ganho de calor por radiação solar (W.m^{-2})

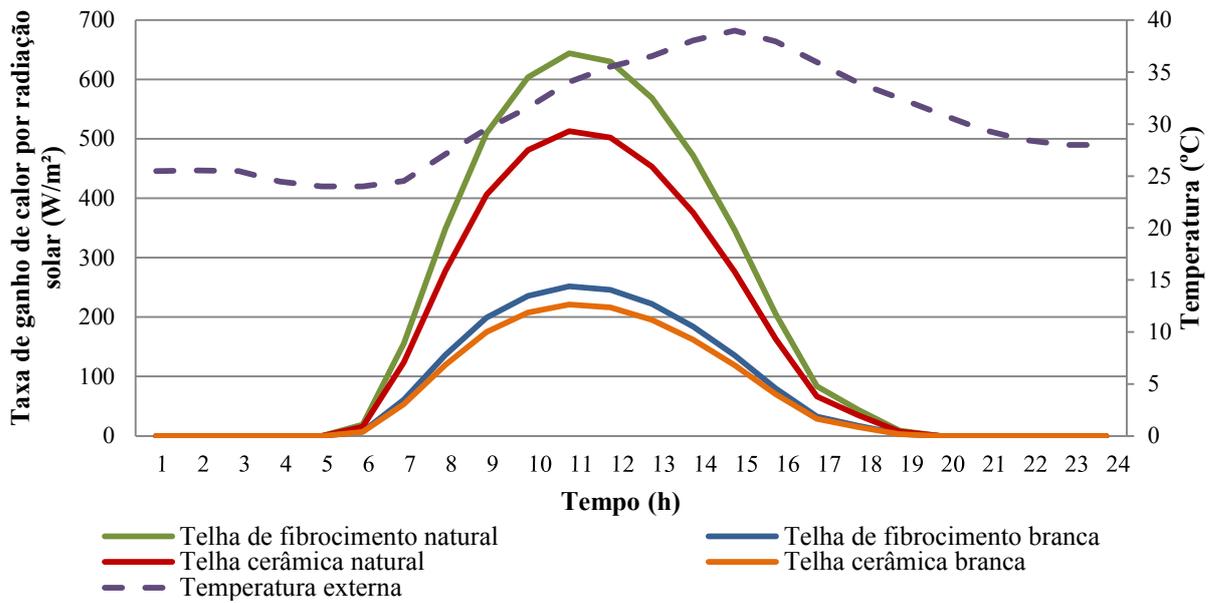
Tipo de telha	Leste	Oeste
	Máx.	Máx.
Telha de fibrocimento natural	675,0	689,5
Telha de fibrocimento branca	263,7	269,3
Telha cerâmica natural	537,9	549,5
Telha cerâmica branca	232,0	237,0

Fonte: Da autora (2019)

A Figura 48 mostra a taxa de ganho de calor por radiação solar para um dia de verão, para as telhas de fibrocimento e cerâmica. Durante a noite, o ganho de calor por radiação solar é zero e vai aumentando durante o dia, conforme a radiação solar vai aumentando, até chegar no seu máximo. Para a cobertura leste, o horário de ganho máximo de calor foi às 11 horas, para ambas as cores das telhas de fibrocimento, atingindo um ganho de $644,1 \text{ W.m}^{-2}$ para a telha natural e $251,6 \text{ W.m}^{-2}$ para a telha branca. Para a cobertura oeste, o horário de ganho de calor máximo para a telha de fibrocimento foi às 14 horas, para ambas as cores, atingindo $647,5 \text{ W.m}^{-2}$ para a telha natural e $252,9 \text{ W.m}^{-2}$ para a telha branca.

Para as telhas cerâmicas, a taxa máxima de ganho de calor para a telha natural foi de $513,9 \text{ W.m}^{-2}$ e ocorreu às 11 horas, enquanto para a telha branca foi de $221,4 \text{ W.m}^{-2}$ e ocorreu no mesmo horário, resultando em uma diferença entre as telhas de $291,9 \text{ W.m}^{-2}$ para a cobertura leste. Na cobertura oeste, a taxa máxima de ganho de calor para a telha natural foi de $516,00 \text{ W.m}^{-2}$ e ocorreu às 14 horas, enquanto para a telha branca foi de $222,6 \text{ W.m}^{-2}$, e ocorreu no mesmo horário, resultando em uma diferença de $293,4 \text{ W.m}^{-2}$ entre as telhas.

Figura 48 – Taxa de ganho de calor por radiação solar (22 de janeiro)



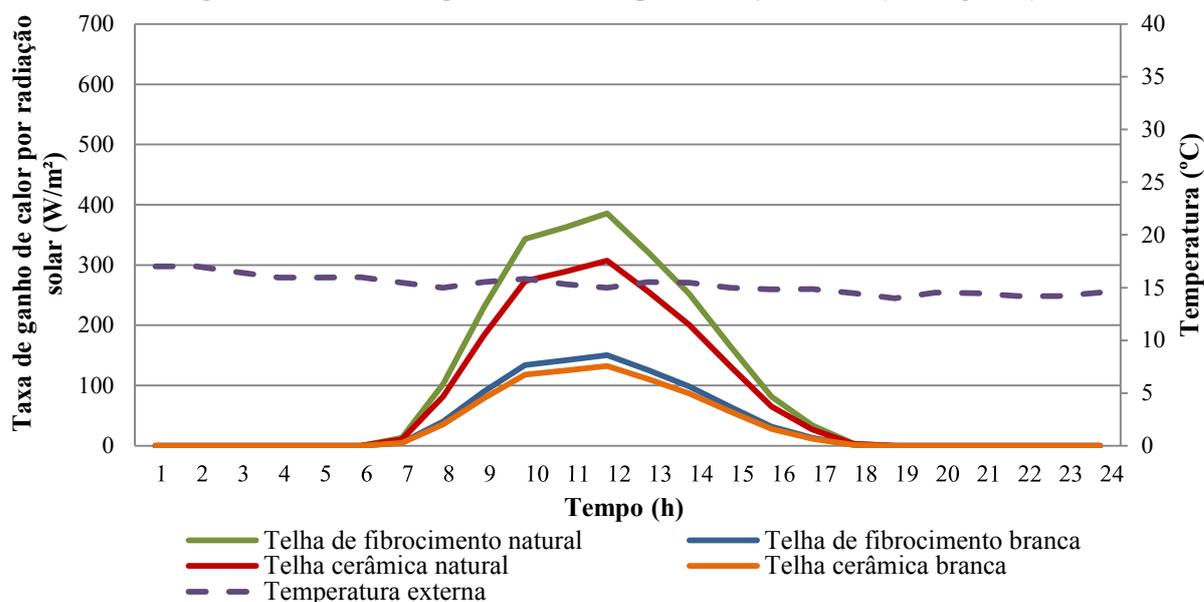
Fonte: Da autora (2019)

Para um dia de inverno, a taxa de ganho de calor por radiação solar pode ser visualizada na Figura 49 para as telhas de fibrocimento e cerâmica. As curvas da taxa de ganho de calor para um dia de inverno possuem uma irregularidade, ao contrário das curvas da taxa de ganho de calor para um dia verão. Isso acontece porque, no inverno, há maior probabilidade de dias nublados enquanto no verão há maior probabilidade de dias totalmente ensolarados.

Para as telhas de fibrocimento, a maior taxa de ganho de calor por radiação solar para a telha natural foi de $385,6 \text{ W.m}^{-2}$, enquanto para a telha branca foi de $150,6 \text{ W.m}^{-2}$, uma diferença de $235,0 \text{ W.m}^{-2}$ para a cobertura leste. Ambas as taxas máximas ocorreram às 12 horas. Para a cobertura oeste, a máxima ocorreu às 13 horas para ambas as cores, sendo que para a telha natural a máxima foi de $359,3 \text{ W.m}^{-2}$ e para a telha branca, de $140,3 \text{ W.m}^{-2}$, uma diferença de $218,9 \text{ W.m}^{-2}$.

Para as telhas cerâmicas, a máxima taxa de ganho de calor foi de $307,3 \text{ W.m}^{-2}$ para a telha natural e ocorreu às 12 horas. Já para a telha branca na mesma orientação, foi de $132,5 \text{ W.m}^{-2}$, uma diferença de $174,7 \text{ W.m}^{-2}$, para a cobertura leste. Para a cobertura oeste, a máxima taxa de ganho de calor foi de $286,3 \text{ W.m}^{-2}$ para a telha natural, enquanto para a telha branca foi de $123,50 \text{ W.m}^{-2}$, ambas às 13 horas e resultando em uma diferença de $162,8 \text{ W.m}^{-2}$.

Figura 49 – Taxa de ganho de calor por radiação solar (24 de julho)

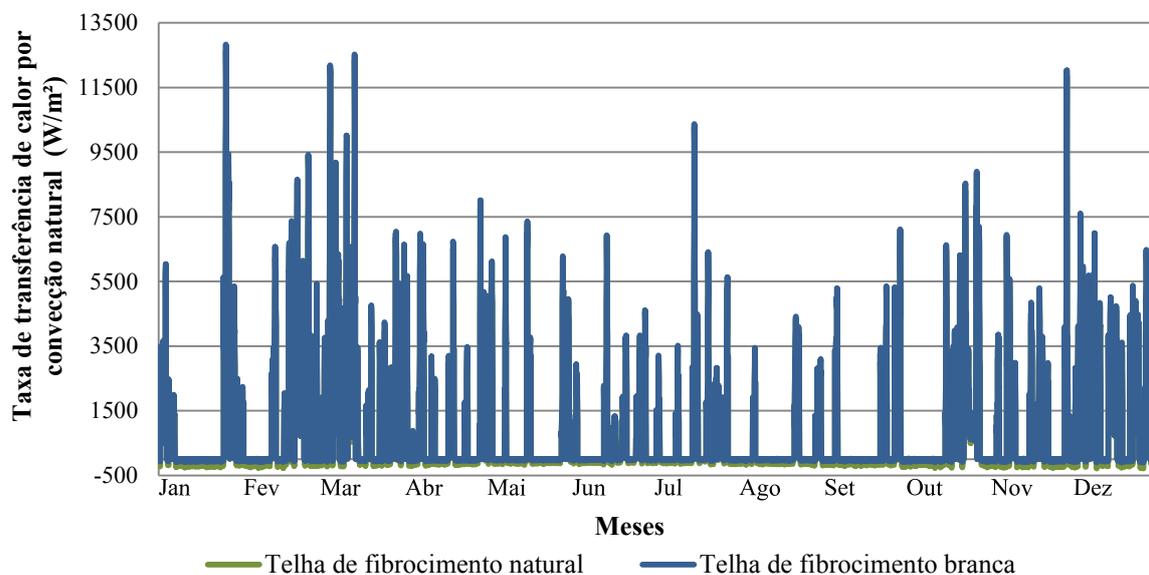


Fonte: Da autora (2019)

4.2.5 Convecção natural

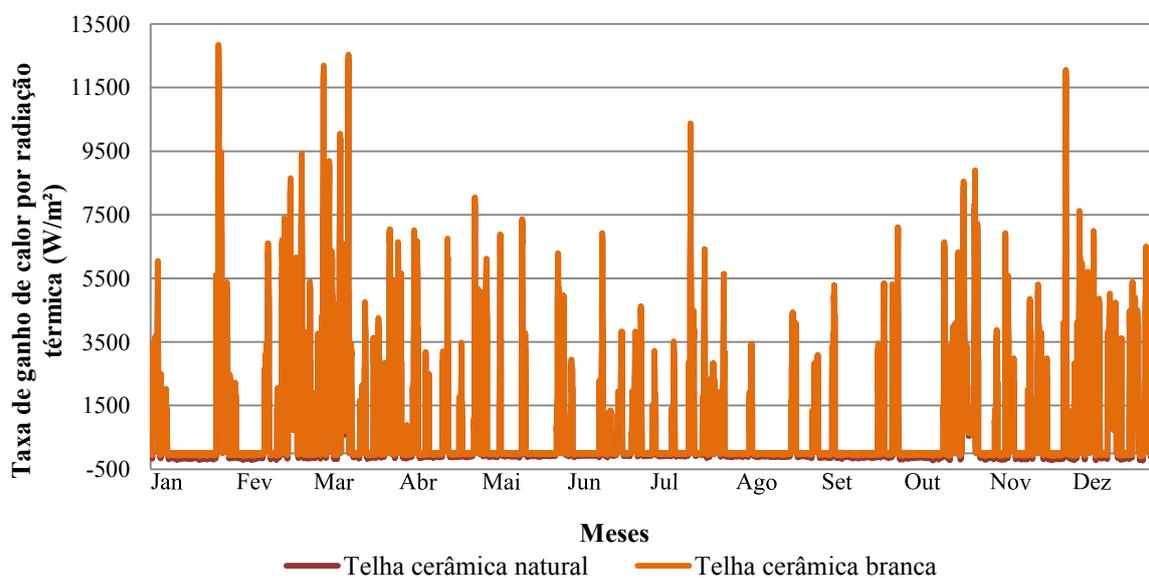
As Figuras apresentadas nesta subsecção demonstram a transferência de calor entre a superfície do telhado e o ar em movimento sobre a sua estrutura. Os valores positivos indicam que o ambiente está transferindo calor para a superfície do telhado, enquanto os negativos indicam que o calor está sendo transferido da superfície do telhado para o ambiente externo. A Figura 50, referente à telha de fibrocimento, indica que o ambiente transfere calor para a superfície do telhado numa magnitude muito maior do que recebe da superfície. Nota-se que o comportamento de ambas as cores de telhas é similar, com relação à taxa de transferência de calor para a superfície do telhado. O mesmo comportamento observa-se para as telhas cerâmicas, demonstrado na Figura 51.

Figura 50 – Taxa de transferência de calor por convecção natural ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) para as telhas de fibrocimento



Fonte: Da autora (2019)

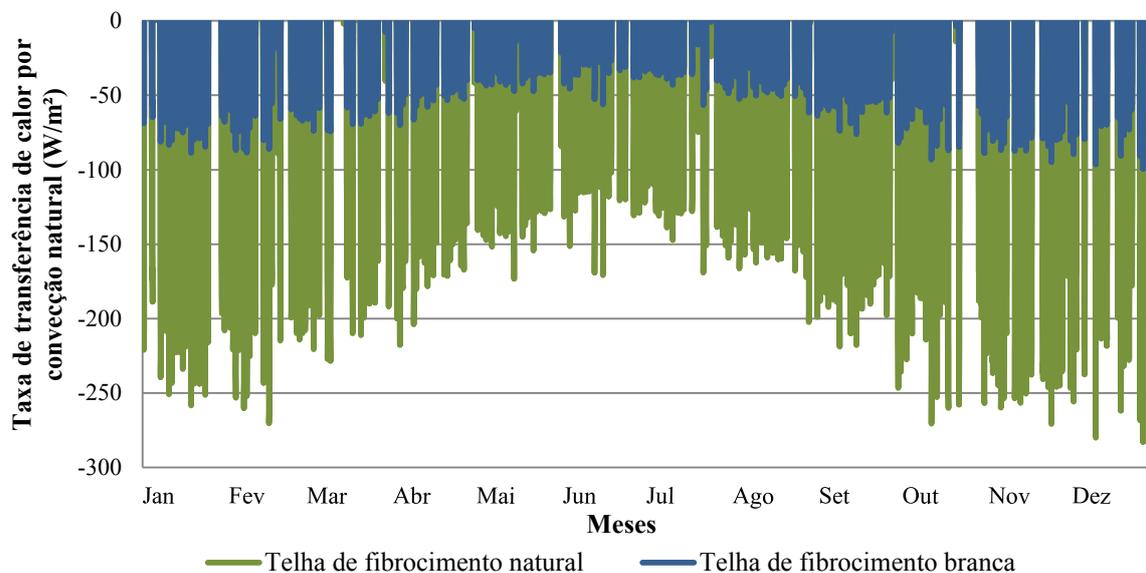
Figura 51 – Taxa de transferência de calor por convecção natural ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) para as telhas cerâmicas



Fonte: Da autora (2019)

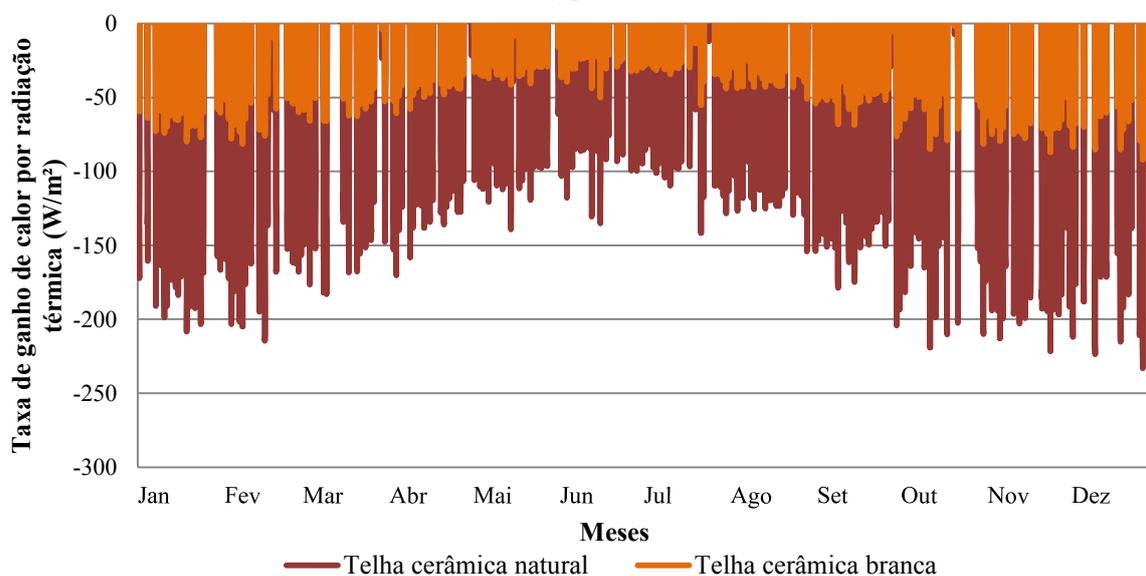
A Figura 52, referente às telhas de fibrocimento, também apresenta a taxa de transferência de calor por convecção natural ao longo do ano; porém, esta abrange somente os valores negativos, ou seja, o calor transferido da superfície do telhado para o ambiente. Percebe-se que a telha natural transfere mais calor, por convecção natural, para o ambiente do que a telha branca. O mesmo comportamento observa-se para as telhas cerâmicas (Figura 53).

Figura 52 – Taxa de transferência de calor por convecção natural da superfície para o ambiente ($W.m^{-2}$) para as telhas de fibrocimento



Fonte: Da autora (2019)

Figura 53 – Taxa de transferência de calor por convecção natural da superfície para o ambiente ($W.m^{-2}$) para as telhas cerâmicas



Fonte: Da autora (2019)

Quando analisados os valores máximos de transferência de calor da superfície do telhado para o ambiente, observou-se que, para a cobertura leste, o telhado frio de fibrocimento transfere 64,7% menos calor para o ambiente, quando comparado com o telhado convencional. Analisando o telhado de cerâmica, para a mesma orientação, observou-se que o telhado frio transfere 60,5% menos calor para o ambiente quando comparado com o telhado

convencional. Os valores máximos de calor que as superfícies das coberturas transferem para o ambiente estão exibidos na Tabela 18.

Tabela 18 – Valores máximos de transferência de calor por convecção da superfície do telhado para o ambiente ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

Tipo de telha	Leste	Oeste
	Máx.	Máx.
Telha de fibrocimento natural	282,7	327,5
Telha de fibrocimento branca	99,4	113,5
Telha cerâmica natural	233,2	262,3
Telha cerâmica branca	92,2	103,7

Fonte: Da autora (2019)

Para entender com mais detalhes como essa taxa de transferência de calor se comporta, é apresentado seu comportamento para um dia de verão e outro de inverno. A Figura 54 apresenta a taxa de transferência de calor por convecção natural da superfície do telhado para o ambiente, para um dia de verão, para as telhas de fibrocimento e de cerâmica. No inverno, é o ambiente que transfere calor para a superfície da cobertura, como mostra a Figura 55, para as telhas de fibrocimento e de cerâmica.

Figura 54 – Taxa de transferência de calor por convecção natural da superfície para o ambiente (W/m^2) para um dia de verão (22 de janeiro)

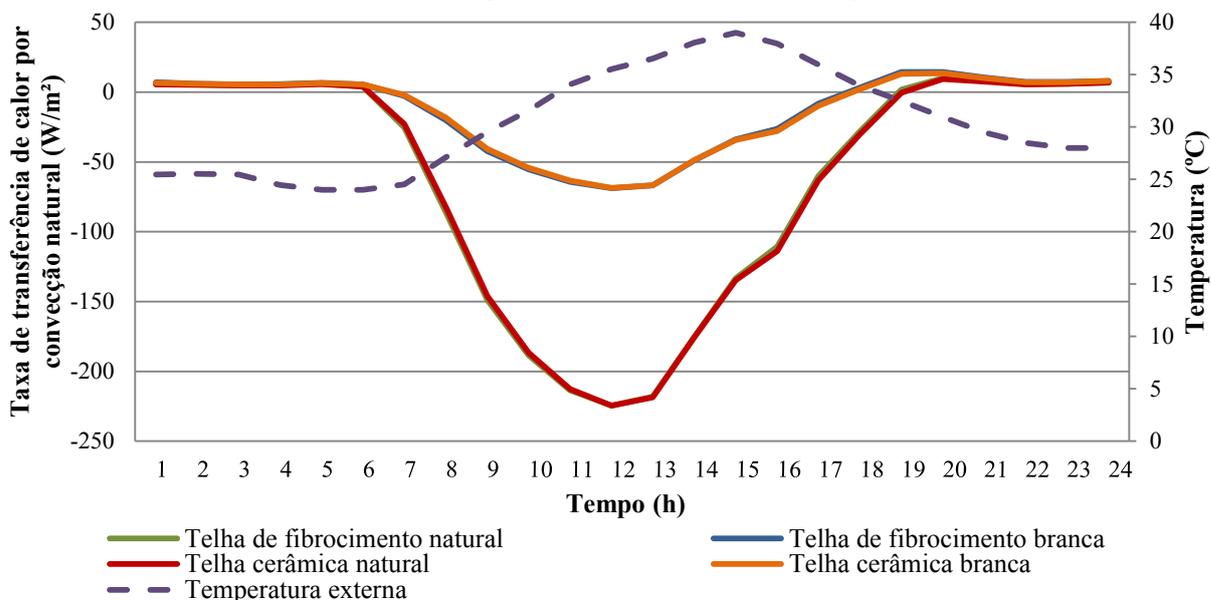
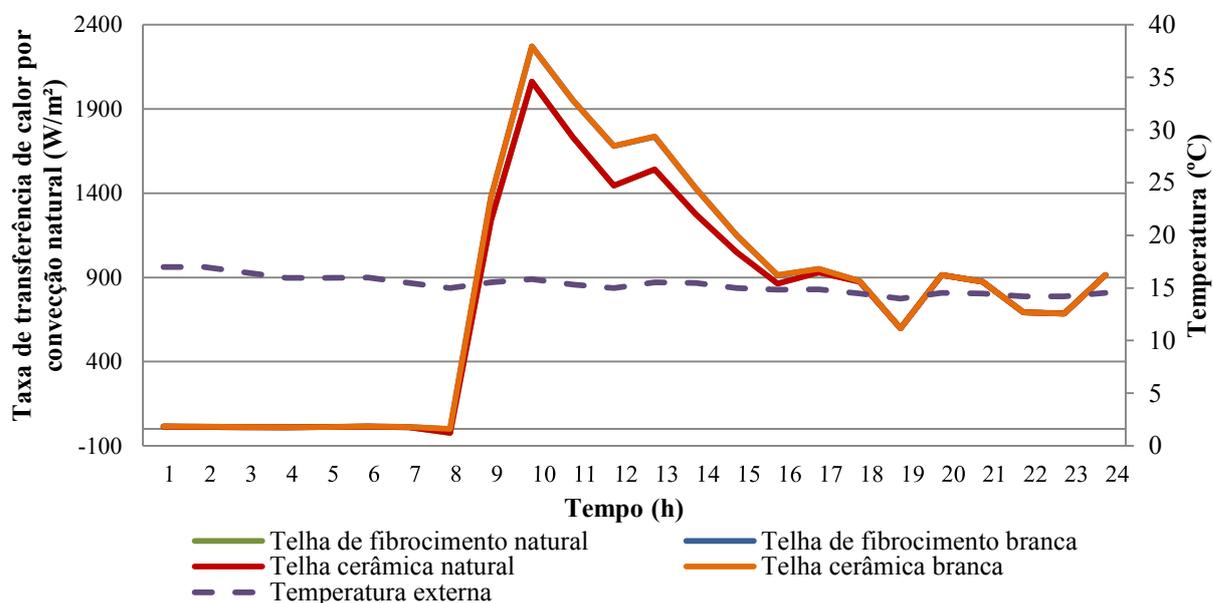


Figura 55 – Taxa de transferência de calor por convecção natural da superfície para o ambiente ($W.m^{-2}$) para um dia de inverno (24 de julho)

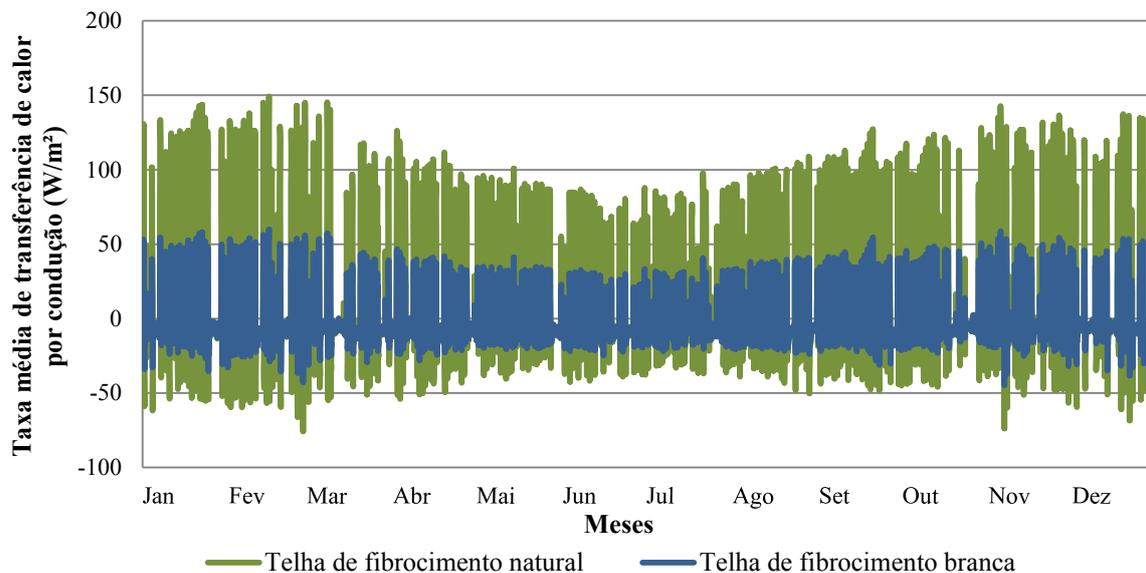


4.2.6 Condução

A condução de calor analisada para a superfície da cobertura é a média das taxas de condução da face interna e da face externa, onde valores positivos indicam calor fluindo para o interior da edificação.

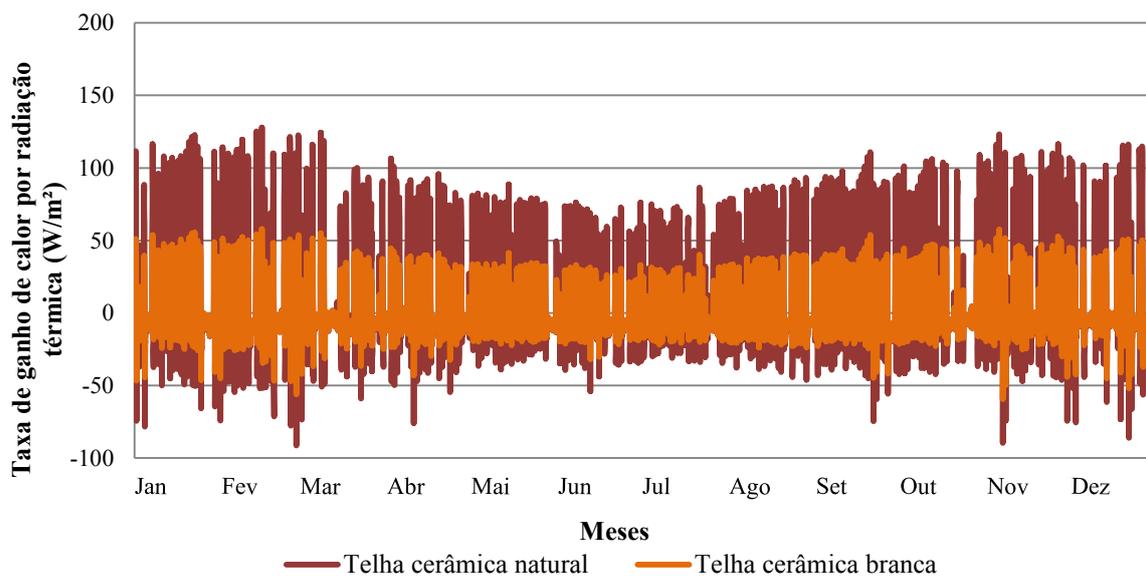
As Figuras 56 e 57 exibem a taxa média de transferência de calor por condução para as telhas de fibrocimento e de cerâmica, respectivamente. Nota-se que a amplitude das telhas naturais é maior em relação às das telhas brancas. Consequentemente, a taxa de calor que adentra na edificação é menor quando se considera as telhas brancas. Nota-se também que a magnitude dos valores para as telhas cerâmicas é menor do que os das telhas de fibrocimento.

Figura 56 – Taxa média de transferência de calor por condução ($W.m^{-2}$) para telhas de fibrocimento



Fonte: Da autora (2019)

Figura 57 – Taxa média de transferência de calor por condução ($W.m^{-2}$) para telhas cerâmicas



Fonte: Da autora (2019)

Os revestimentos frios (telhas brancas), por possuírem altas refletâncias solar, reduzem a absorção e o acúmulo de calor da cobertura, como pode ser observado nas Figuras 56 e 57. Desta forma, diminui a temperatura da superfície, o que leva a menores fluxos de calor adentrando na edificação. A utilização do telhado frio de fibrocimento, para esse caso, diminuiu até 59,4% a transferência de calor que penetra no teto da edificação, quando comparado com o telhado convencional de fibrocimento. Para as telhas cerâmicas, o telhado

frio diminuiu até 54,7% a transferência de calor que penetra no teto da edificação, quando comparado com o telhado convencional. A Tabela 19 apresenta os valores máximos de transferência de calor que adentra a edificação.

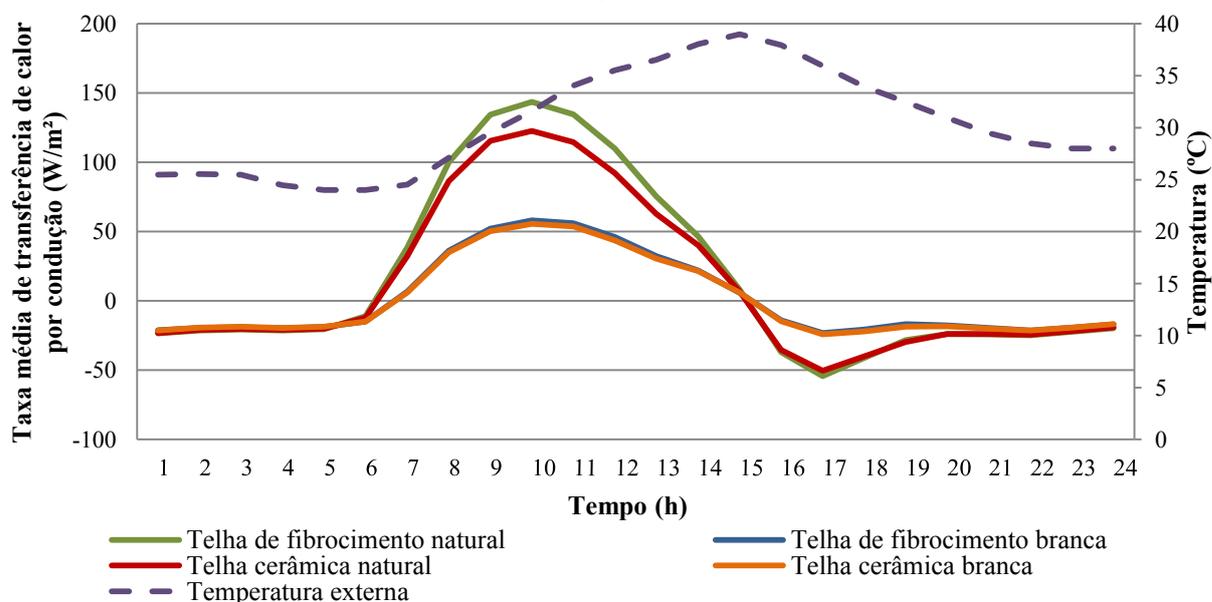
Tabela 19 – Valores máximos de transferência de calor que adentra a edificação ($W.m^{-2}$)

Tipo de telha	Leste	Oeste
	Máx.	Máx.
Telha de fibrocimento natural	149,2	129,9
Telha de fibrocimento branca	60,1	52,7
Telha cerâmica natural	127,9	110,4
Telha cerâmica branca	57,9	50,9

Fonte: Da autora (2019)

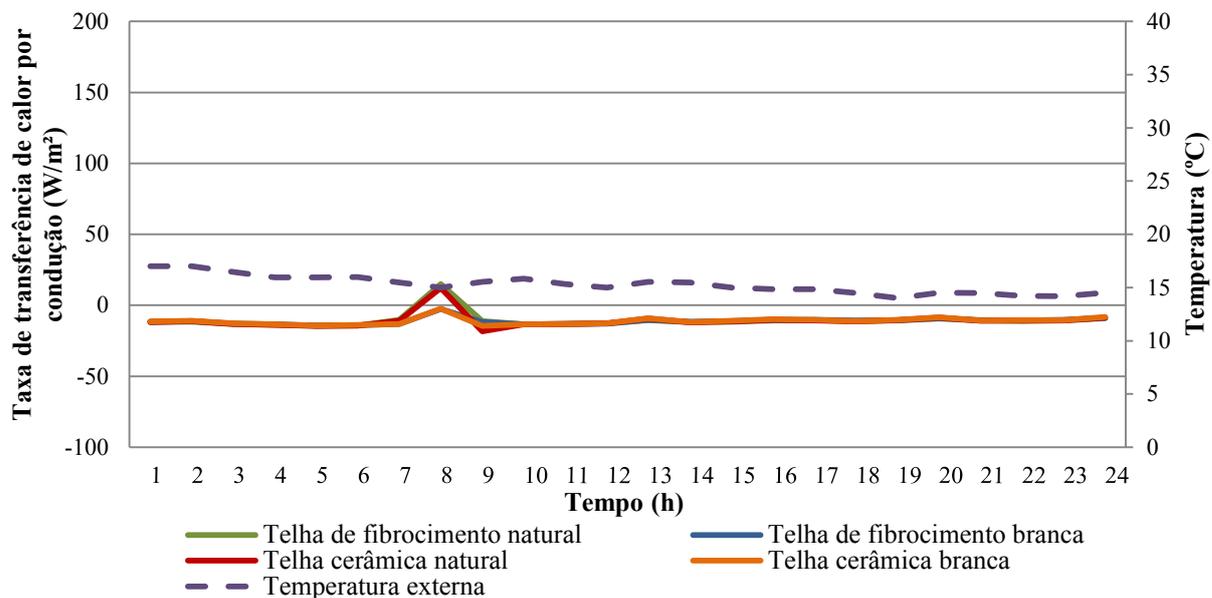
A Figura 58 exibe a taxa média de transferência de calor por condução para um dia de verão, para as telhas de fibrocimento e de cerâmica. Por sua vez, a Figura 59 exibe esta taxa para um dia de inverno. Observa-se que a diferença da taxa média entre as cores das telhas só é vista para o dia de verão, enquanto para o inverno a taxa média é praticamente a mesma para ambas as cores.

Figura 58 – Taxa média de transferência de calor por condução ($W.m^{-2}$) para um dia de verão (22 de janeiro)



Fonte: Da autora (2019)

Figura 59 – Taxa média de transferência de calor por condução ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) para um dia de inverno (24 de julho)



4.3 ANÁLISE ENERGÉTICA

A análise energética consiste em verificar o consumo de energia elétrica da residência analisada, dos equipamentos, da iluminação e da carga térmica, para condicionar os ambientes de permanência prolongada. A Tabela 20 traz os valores do consumo de energia elétrica mensal e anual dos equipamentos e da iluminação. Como o consumo de todos os equipamentos foi considerado com um uso padrão, o principal fator de diferença do consumo entre os meses é a quantidade de dias de cada mês.

Tabela 20 – Consumo de energia elétrica dos equipamentos e da iluminação

Meses	Consumo de energia elétrica (kWh)
Janeiro	199,75
Fevereiro	180,56
Março	199,76
Abril	193,53
Mai	199,75
Junho	193,53
Julho	199,76
Agosto	199,75
Setembro	194,04
Outubro	199,75
Novembro	193,02
Dezembro	200,27
Anual	2353,48

Fonte: Da autora (2019)

4.3.1 Cenário 1: Consumo de energia elétrica

Com a análise dos resultados das simulações houve a necessidade de realizar outras duas simulações extras, dentro do cenário 1, com o intuito de obter uma investigação mais completa sobre tema. Uma dessas simulações extras foi referente à ventilação natural. Como a ventilação natural ajuda a minimizar as temperaturas internas, principalmente em climas mais quentes, optou-se por realizar uma simulação sem a ventilação natural somente com a troca de ar por infiltração para se observar a mudança da temperatura interna, e conseqüentemente, da carga térmica sem a influência da ventilação natural. Outra simulação realizada foi em relação ao *setpoint* do ar-condicionado. No cenário 1, foi realizada a simulação com um *setpoint* exatamente igual às temperaturas internas resultantes da simulação do telhado frio. A outra simulação extra também considerou as temperaturas internas da simulação do telhado frio, no entanto, foi considerado um *setpoint* com temperatura mínima de 20°C. Essa necessidade veio após análise dos resultados, uma vez que a temperatura utilizando o telhado frio apresentou temperaturas menores no inverno, tendo uma penalidade no aquecimento dos ambientes. A intenção dessa simulação é analisar esta penalidade no inverno.

Considerando todos os componentes, o cenário 1 obteve ao todo 14 simulações (inclusas as análises destes dois pontos extras). As 3 primeiras simulações foram realizadas para a telha de fibrocimento e telha cerâmica, totalizando 6 simulações (explicadas na seção de métodos). Nas simulações sem a ventilação natural, repetem-se todas as simulações anteriormente citadas para os dois tipos de telhas (6 simulações, 3 para telha fibrocimento e 3

para telha cerâmica). E para as simulações com o *setpoint* mínimo, foram realizadas 2 simulações, uma para cada tipo de telha. De forma resumida, as simulações do cenário 1 são apresentadas a seguir:

- **Simulação 1:** Edificação com o telhado com as telhas na cor natural (telha de fibrocimento e telha cerâmica);
- **Simulação 2:** Edificação com o telhado com as telhas brancas (telha de fibrocimento e telha cerâmica);
- **Simulação 3:** Edificação com o telhado com as telhas na cor natural utilizando ar-condicionado nos ambientes de permanência prolongada, a fim de que o perfil de temperatura interna para este caso seja o mesmo de quando se utiliza o telhado com telhas brancas (telha de fibrocimento e telha cerâmica);
- **Simulação extra 1:** Repetem-se as 3 simulações, não considerando a ventilação natural, somente infiltração (para os dois tipos de telhas). Foi considerada uma taxa de infiltração de 0,3 trocas de ar por hora (PEREIRA *et al.*, 2013), para todos os ambientes de permanência prolongada;
- **Simulação extra 2:** Repete-se a simulação 3, alterando o *setpoint* para que a temperatura mínima seja 20°C (para os dois tipos de telhas).

A Figura 72 exibe o consumo de energia elétrica de aquecimento e resfriamento para as simulações computacionais do cenário 1. O tom em azul é referente ao consumo de resfriamento (R1) e os tons em verde também se referem ao consumo de resfriamento, porém, estes representam o consumo das simulações extras (R2 e R3). Os tons em vermelho são referentes ao aquecimento, e são nomeados por A1, A2 e A3 (sendo A2 e A3 os consumos referentes às simulações extras). Os números que acompanham o “R” e o “A” são referentes às três simulações realizadas no cenário 1, e são detalhadas a seguir:

- **A1 e R1:** estes valores foram obtidos a partir de três simulações:
 - 1- **Simulação 1:** utilizando as telhas na cor natural na cobertura (sem ar-condicionado);
 - 2- **Simulação 2:** utilizando as telhas na cor branca na cobertura (sem ar-condicionado);
 - 3- **Simulação 3:** utilizando as telhas na cor natural na cobertura e considerando o ar-condicionado nos ambientes de permanência prolongada (*setpoint* do telhado frio). Os valores exibidos nas Figuras 60 e 61 são a soma dos valores do consumo da sala e dos dois dormitórios (Caso 1).

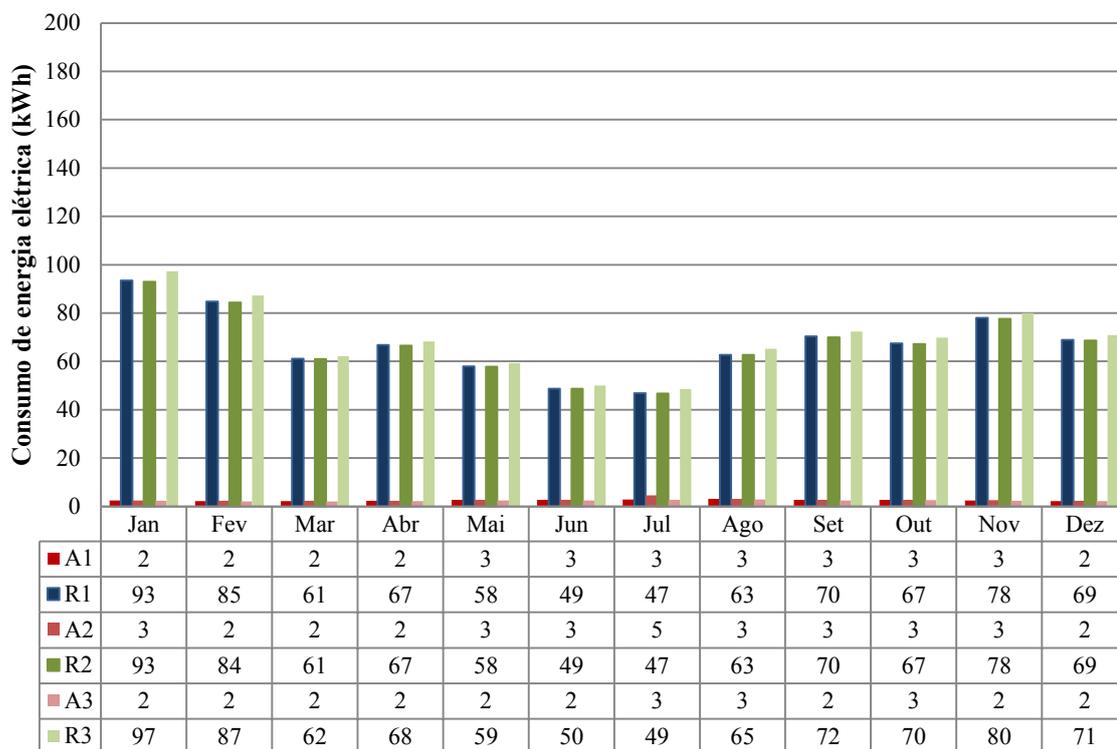
- **A2 e R2:** esses valores foram obtidos da mesma forma que os valores de A1 e R1, utilizando as três simulações anteriormente citadas, com a única diferença de que foi atribuído um valor mínimo de 20°C no *setpoint* do ar-condicionado (Caso 2);
- **A3 e R3:** os valores para este caso foram obtidos da mesma forma que os valores de A1 e R1. Porém, as simulações para obter os valores de A1 e R1 foram consideradas com ventilação natural. E para o caso de A3 e R3, não foi considerada a ventilação natural, e as trocas de ar para este caso foram consideradas somente por infiltração (Caso 3).

O procedimento descrito foi empregado para os dois tipos de telhas, cerâmica e fibrocimento. O consumo para aquecimento exibido nas Figuras 60 e 61, para as telhas de fibrocimento e cerâmica, respectivamente, indica que, em alguns momentos, a temperatura interna utilizando o telhado frio foi inferior à temperatura interna utilizando o telhado natural. Ou seja, o aparelho de ar-condicionado precisou elevar a temperatura interna (utilizando o telhado natural) para que essa temperatura se igualasse à temperatura interna de quando utilizado o telhado frio. No entanto, este consumo é muito baixo e muito inferior ao consumo de resfriamento.

Quando se analisa o caso 1 (valores de A1 e R1) e o caso 2 (valores de A2 e R2) nota-se que os consumos, de aquecimento e resfriamento, foram muito semelhantes para todos os meses. Esta discussão é válida para os dois tipos de telhas, apresentadas nas Figuras 60 e 61, respectivamente.

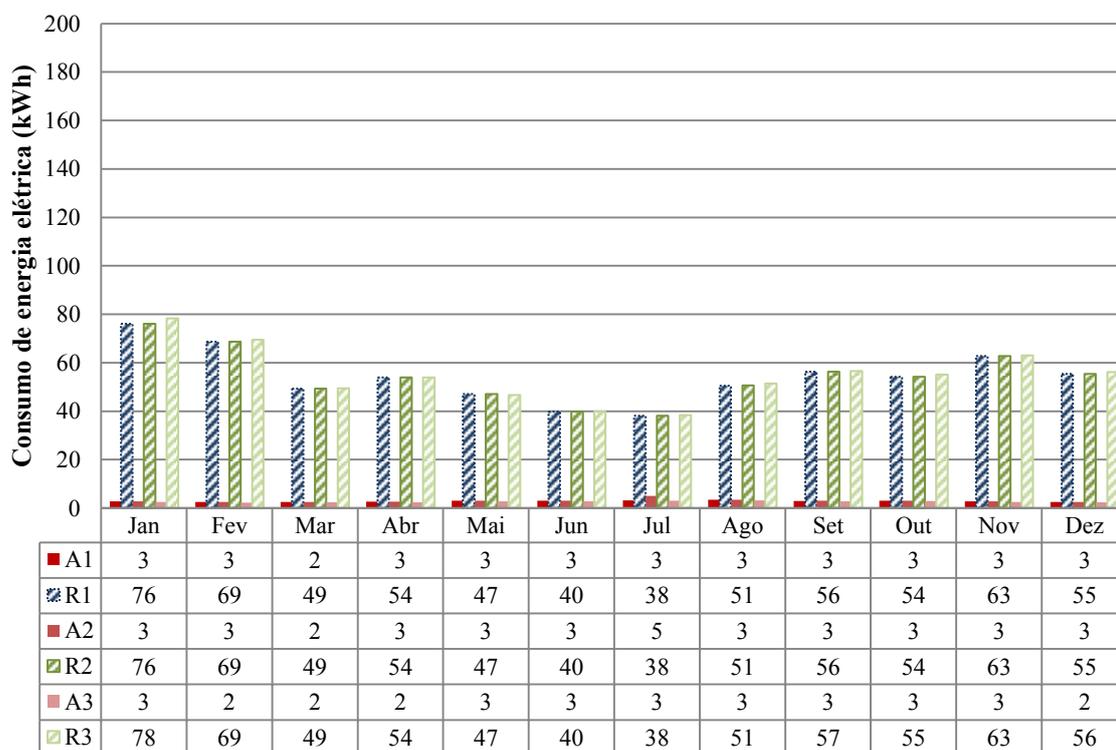
Para as telhas de fibrocimento, para o caso 3 (A3 e R3) os valores de aquecimento possuem uma variação pequena, de no máximo 1 kWh, em comparação com o caso 1. Os resultados de resfriamento para o caso 3 exibiram valores maiores para todos os meses em relação ao caso 1, no entanto, com uma diferença máxima de 4 kWh no mês de janeiro. Essa diferença pequena indica que a ventilação natural poderia ser mais bem explorada para diminuir a carga térmica de resfriamento. Entretanto, como a ventilação natural não era o alvo deste trabalho, esta investigação não aconteceu. O mesmo padrão da telha de fibrocimento pôde ser observado para a telha cerâmica, entretanto com valores menores de consumo para resfriamento, em razão do seu desempenho térmico ser melhor em relação ao das telhas de fibrocimento. Com relação ao caso 1 e 3 observa-se que, em alguns meses, a diferença de resfriamento foi igual, e que em outros o caso 3 obteve consumo maior de resfriamento. Porém, a diferença máxima foi de apenas 2 kWh em janeiro.

Figura 60 – Consumo de energia elétrica de aquecimento e resfriamento para a cobertura de fibrocimento



Fonte: Da autora (2019)

Figura 61 – Consumo de energia elétrica de aquecimento e resfriamento para a cobertura de cerâmica



Fonte: Da autora (2019)

4.3.2 Cenário 2: Consumo de energia elétrica

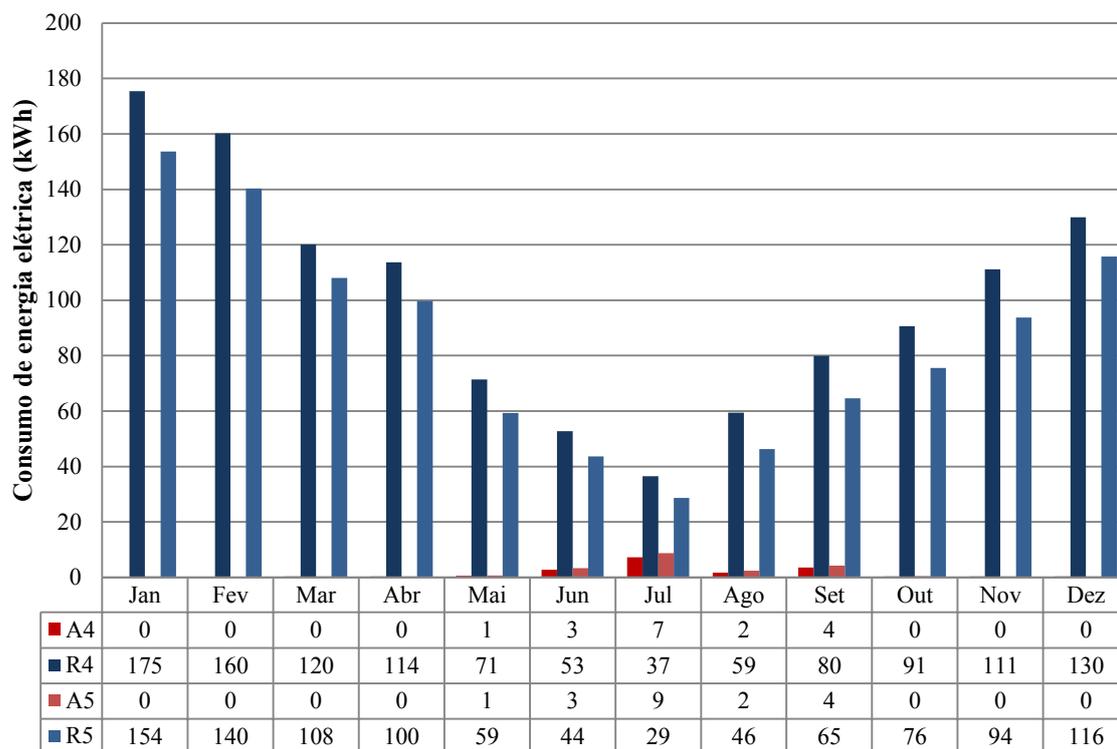
Nas Figuras 62 e 63 a letra “A” representa o aquecimento e a letra “R” o resfriamento. O cenário 2 foi obtido através de duas simulações, explicadas a seguir:

- **A4 e R4:** simulação considerando a telha na cor natural (para os dois tipos de telhas) e ar-condicionado, no período noturno, para os dormitórios e para a sala, um período diário de 3 horas, todos os dias (Caso 4);
- **A5 e R5:** simulação considerando o telhado frio (para os dois tipos de telhas) e ar-condicionado, com o mesmo período de utilização do caso 4, para a sala e dormitórios (Caso 5).

O caso 4 da Figura 62, referente à telha de fibrocimento de cor natural, obteve um consumo de resfriamento superior ao consumo de resfriamento referente ao telhado frio, em todos os meses. O maior consumo para resfriamento foi de 175 kWh em janeiro para a telha natural, enquanto que para a telha branca foi de 154 kWh, uma diferença de 21 kWh. O consumo para resfriamento diminui até o mês de julho e em agosto volta a aumentar, para as duas cores de telhas, como pode ser visto na Figura 62. Com relação ao consumo de aquecimento, somente os meses de maio a setembro apresentaram consumo, para as duas cores de telhas, com um consumo máximo de 7 kWh em julho para a telha natural e 9 kWh também em julho para a telha branca.

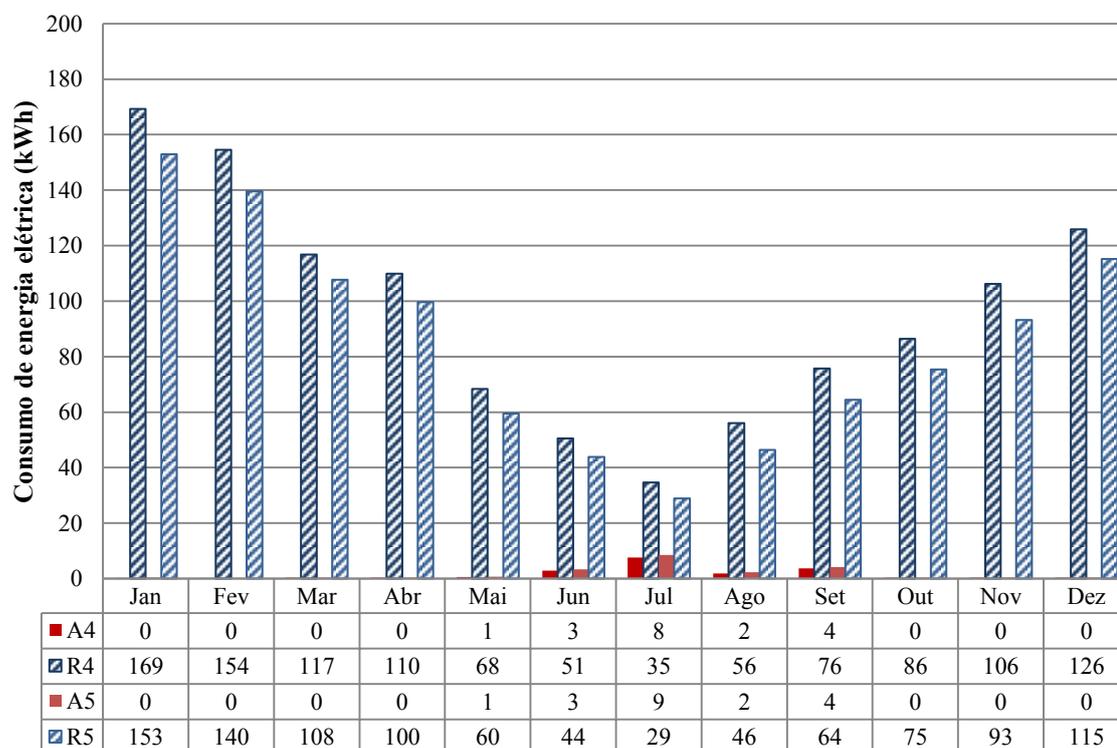
Os valores de consumo da Figura 63, referentes à telha cerâmica, são muito semelhantes à Figura 62, referente à telha de fibrocimento, porém com consumos menores. O consumo para aquecimento, nas diferentes cores das telhas cerâmicas, possui diferenças mínimas, sendo que somente nos meses de maio a setembro apresentou consumo para aquecimento, tendo como consumo máximo o mês de julho, para ambas as cores, sendo 8 kWh para a telha natural e 9 kWh para a telha branca. O consumo de resfriamento é maior em todos os meses para a cobertura com telhas naturais. O maior consumo de resfriamento foi de 169 kWh em janeiro, para a telha natural, e de 153 kWh em janeiro, para a telha branca, uma diferença de 16 kWh.

Figura 62 – Consumo de energia elétrica de aquecimento e resfriamento para a cobertura de fibrocimento



Fonte: Da autora (2019)

Figura 63 – Consumo de energia elétrica de aquecimento e resfriamento para a cobertura de cerâmica



Fonte: Da autora (2019)

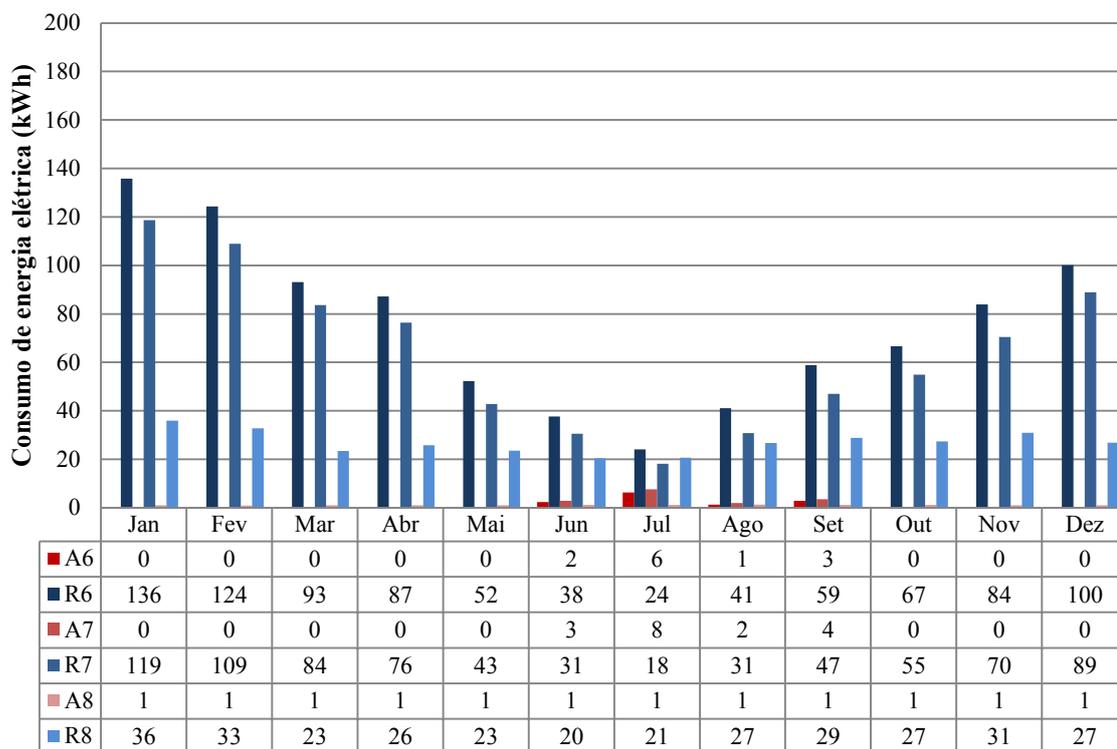
4.3.3 Cenário 3: Consumo de energia elétrica

Nas Figuras 64 e 65 a letra “A” representa o aquecimento e a letra “R” o resfriamento. O cenário 3 foi obtido através de uma combinação dos cenários 1 e 2, e contou com a realização de três simulações computacionais, conforme explicados a seguir:

- **A6 e R6:** O consumo de energia elétrica para este caso é referente à simulação considerando o telhado natural com ar-condicionado somente nos dormitórios, operando no período noturno, igual o considerado no cenário 2 (Caso 6);
- **A7 e R7:** O consumo de energia deste caso foi encontrado da mesma forma do caso 6, mas para o telhado frio (Caso 7);
- **A8 e R8:** Para este caso, realizou-se outra simulação considerando a telha natural e com ar-condicionado nos dormitórios (igual ao cenário 2), e para a sala, inclui-se um ar-condicionado com um *setpoint* igual à temperatura interna da sala, resultante do telhado frio (Caso 7), como foi realizado no cenário 1. Logo, o consumo considerado para este caso 8, foi somente o consumo referente à sala (Caso 8).

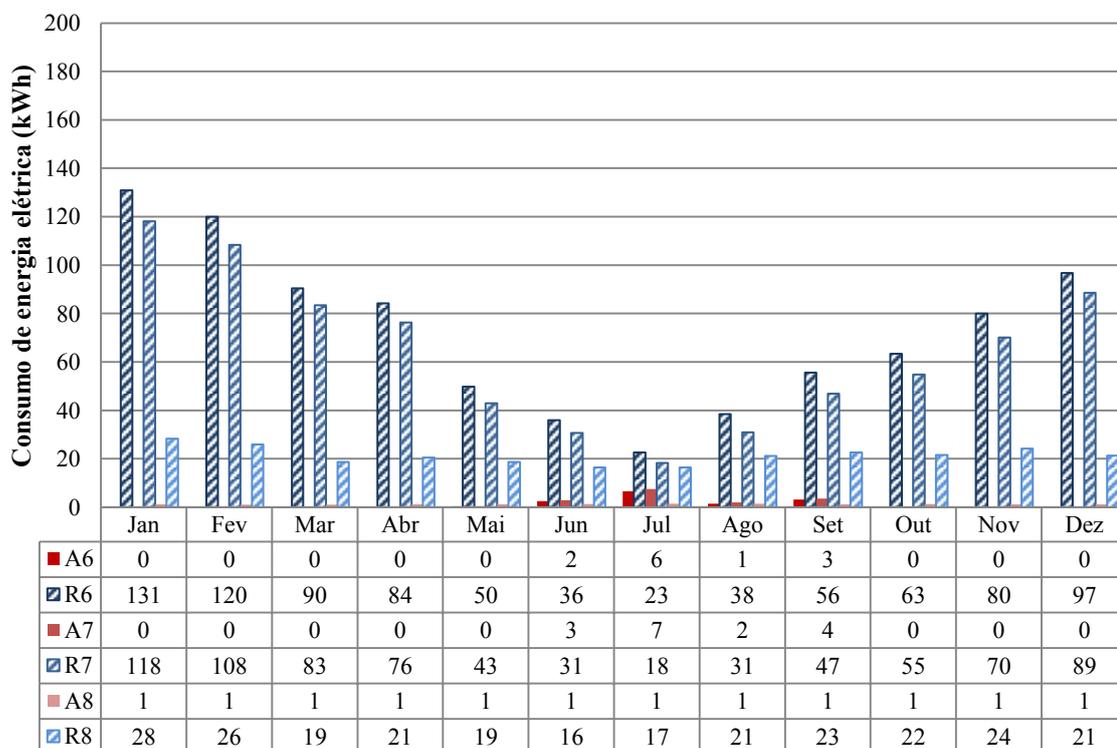
As Figuras 64 e 65 apresentam os consumos de energia elétrica de aquecimento e resfriamento para o Cenário 3, para as telhas de fibrocimento e de cerâmica, respectivamente. O consumo de resfriamento para o caso 6 e 7 possui um comportamento semelhante ao do cenário 2, porém, os valores dos consumos para o cenário 3 são menores. Isso porque o cenário 2 possui ar-condicionado nos dormitórios e na sala, e para o caso 6 e 7 do cenário 3 há ar-condicionado somente nos dormitórios. Comparando as Figuras 64 e 65, observa-se o mesmo comportamento para ambos os tipos de telhas discutidas nos cenários anteriores. No entanto, o consumo referente às telhas cerâmicas é um pouco menor em relação às telhas de fibrocimento. O caso 8 (A8 e R8) exhibe o consumo somente da sala, resultante da simulação com telhas naturais e com ar-condicionado com *setpoint* igual à temperatura interna, utilizando o telhado frio.

Figura 64 – Consumo de energia elétrica de aquecimento e resfriamento para a cobertura de fibrocimento



Fonte: Da autora (2019)

Figura 65 – Consumo de energia elétrica de aquecimento e resfriamento para a cobertura de cerâmica



Fonte: Da autora (2019)

Quando se analisa os três cenários propostos pode-se chegar em algumas conclusões:

- Não houve diferença significativa para o cenário 1 proposto no método e na simulação extra referente à temperatura mínima de 20°C no *setpoint*, para os dois tipos de telhas;
- A segunda simulação extra, referente à ventilação natural, resultou em valores levemente superiores aos demais casos, no cenário 1. Porém, a utilização de telhados frios juntamente com a ventilação natural poderia ser melhor explorado para resultar em temperaturas internas ainda menores;
- Para o cenário 2, os valores de resfriamento para as telhas naturais foram superiores aos das telhas brancas, em todos os meses do ano, tanto para a telha de fibrocimento quanto para as telhas cerâmicas;
- No cenário 3, o comportamento de R6 e R7 foram muito semelhantes aos R4 e R5 do cenário 2, porém resultaram em valores menores. Uma vez que para o cenário 3 foi considerado ar-condicionado somente nos dormitórios enquanto no cenário 2 foi considerado nos dormitórios e na sala. O R8 do cenário 3 resultou em valores menores de resfriamento uma vez que esse valor é somente para suprir a diferença de temperatura dos dois tipos de telhados (frio e convencional);
- As telhas cerâmicas resultaram em valores inferiores comparados com as telhas de fibrocimento, para os três cenários analisados;
- Os valores de consumo referentes ao aquecimento não foram significativos para nenhum dos cenários.

4.4 ANÁLISE ECONÔMICA

Este capítulo apresenta todos os passos que foram realizados para a análise econômica. Primeiramente, foram exibidos os preços para a construção completa de um telhado de fibrocimento e um telhado cerâmico, e posteriormente, a diferença de preço para o telhado frio, de ambos os materiais, bem como o valor considerado de manutenção para o telhado. Com os preços dos telhados e manutenção, pode-se calcular o fluxo de caixa, levando os valores para valor presente e, sucessivamente, o VPL, a TIR e o payback, finalizando, assim, a análise econômica.

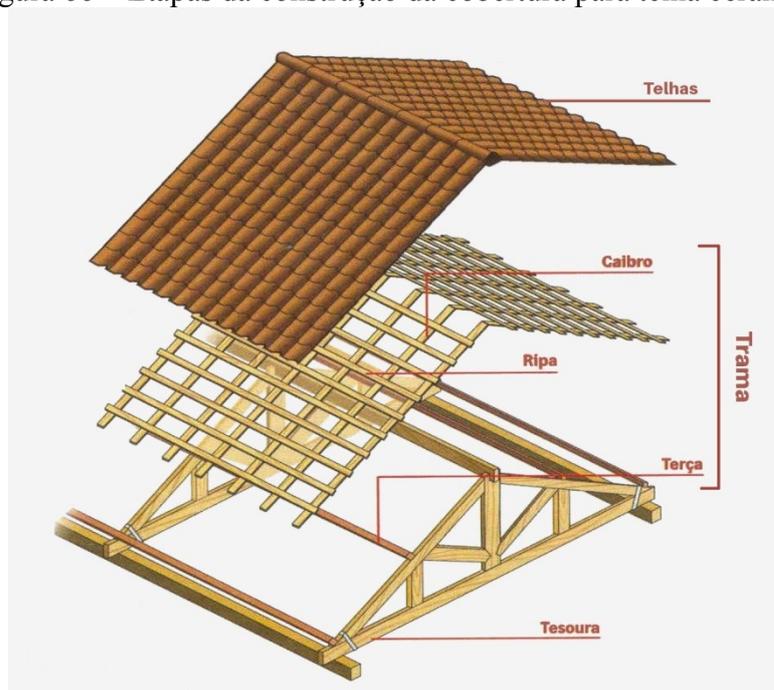
4.4.1 Levantamento de preços

As etapas de construção de um telhado consistem na fabricação e instalação das tesouras e da trama de madeira e, posteriormente, do telhamento e da instalação das cumeeiras. Estas etapas são exibidas, para fins ilustrativos, na Figura 66. Desta forma, o levantamento de preços dos telhados foi obtido por etapas.

As planilhas do SINAPI apresentam os preços para cada unidade de tesoura, para cada m² da trama de madeira, para cada m² de telhamento e para cada metro linear de cumeeira. Nas Tabelas 21 e 22 são exibidas a descrição de cada etapa, qual a unidade de preço da etapa (e.g. por unidade, m² ou m), e o seu respectivo preço. Verificando as dimensões do telhado, foram determinadas quantas tesouras seriam necessárias, assim como quantos m² de trama de madeira e telhamento seriam precisos. Por fim, quantos metros de cumeeira seriam necessários. Desta forma, foi obtido o preço total por etapa, e conseqüentemente, o preço total para a construção da cobertura completa.

As Tabelas 21 e 22, de levantamento de preços, são apresentadas de maneira simplificada para a cobertura com telhas de fibrocimento e telhas cerâmicas, respectivamente. As tabelas completas são exibidas no Apêndice A. Nas tabelas completas, foi levado em consideração todo o dimensionamento das madeiras, para a construção da tesoura e trama de madeira, bem como o uso de pregos e guinchos, e o preço da mão de obra do carpinteiro, ajudante de carpinteiro e telhadista. Vale ressaltar que as estruturas de madeiras para a cobertura de fibrocimento e de cerâmica são diferentes, e esta diferença foi levada em consideração.

Figura 66 – Etapas da construção da cobertura para telha cerâmica



Fonte: adaptado de ANDRADE (2017)

Tabela 21 – Levantamento de preços para cobertura de fibrocimento natural

	Etapas	Unidades	Preço por unidade, m², m	Unidades necessárias	Preço total (R\$)
1	Fabricação e instalação de tesoura inteira em madeira não aparelhada, vão de 6 m, para telha ondulada de fibrocimento, incluso içamento	1 unidade	1.067,26	4 unidades	4.269,04
2 ^a	Trama de madeira composta por terças para telhado de até 2 águas para telha ondulada de fibrocimento, incluso transporte vertical	1 m ²	15,1	60,3 m ²	910,53
3 ^a	Telhamento com telha ondulada de fibrocimento, com até 2 águas, incluso içamento	1 m ²	37,85	60,3 m ²	2.282,35
4 ^a	Cumeeira para telha de fibrocimento, incluso acessório de fixação e içamento	1 m	50,28	8 m	402,24
Preço total da cobertura de fibrocimento					7.864,16

Fonte: Da autora (2019)

Tabela 22 – Levantamento de preços para cobertura de cerâmica natural

	Etapas	Unidades	Preço por unidade, m², m	Unidades necessárias	Preço total (R\$)
1 ^a	Fabricação e instalação de tesoura inteira em madeira não aparelhada, vão de 6 m, para telha cerâmica, incluso içamento	1 unidade	1.072,30	4 unidades	4.289,20
2 ^a	Trama de madeira composta por ripas, caibros e terças para telhado de até 2 águas para telha de encaixe de cerâmica, incluso transporte vertical	1 m ²	53,69	60,3 m ²	3.237,51
3 ^a	Telhamento com telha, cerâmica de encaixe, tipo portuguesa, com até 2 águas, incluso transporte vertical	1 m ²	48,21	60,3 m ²	2.907,06
4 ^a	Cumeeira para telha cerâmica emboçada com argamassa para telhados com até 2 águas, incluso transporte vertical	1 m	28,46	8 m	227,68
Preço total da cobertura cerâmica					10.661,45

Fonte: Da autora (2019)

As tabelas SINAPI apresentam a cotação de preço somente para as telhas nas cores naturais. Para as telhas frias, as pesquisas de preços foram realizadas em sites de grandes lojas de construção do Rio de Janeiro. Os preços encontrados para as telhas de fibrocimento branca apresentaram grande variação. Para ajudar nesta questão, foi feita uma consulta com um grande fornecedor de telhas de fibrocimento branca e apurado que a telha de fibrocimento branca é, em média, 30% mais cara do que a telha de fibrocimento convencional. Logo, este valor diferenciado foi adotado para realização da análise econômica. Para as telhas cerâmicas brancas foi adicionado um valor de R\$ 2,00 em relação ao preço da telha cerâmica natural. As fontes dos preços das telhas brancas são apresentadas no Apêndice B. Visto que os telhados frios possuem as mesmas etapas e estruturas dos telhados convencionais, e que somente as telhas e as cumeeiras terão um preço diferente, as Tabelas 23 e 24 exibem os preços dos telhados frios da mesma forma dos telhados convencionais, somente alterando os preços das telhas e cumeeiras.

Tabela 23 – Levantamento de preços para cobertura de fibrocimento branca

	Etapas	Unidades	Preço por unidade, m², m	Unidades necessárias	Preço total
1 ^a	Fabricação e instalação de tesoura inteira em madeira não aparelhada, vão de 6 m, para telha ondulada de fibrocimento, incluso içamento	1 unidade	1.067,26	4 unidades	4.269,04
2 ^a	Trama de madeira composta por terças para telhado de até 2 águas para telha ondulada de fibrocimento, incluso transporte vertical	1 m ²	15,1	60,3 m ²	910,53
3 ^a	Telhamento com telha ondulada de fibrocimento, com até 2 águas, incluso içamento	1 m ²	46,01	60,3 m ²	2.774,40
4 ^a	Cumeeira para telha de fibrocimento, incluso acessório de fixação e içamento	1 m	59,63	8 m	477,04
Preço total da cobertura de fibrocimento					8.431,01

Fonte: Da autora (2019)

Tabela 24 – Levantamento de preços para cobertura de cerâmica branca

	Etapas	Unidades	Preço por unidade, m², m	Unidades necessárias	Preço total
1 ^a	Fabricação e instalação de tesoura inteira em madeira não aparelhada, vão de 6 m, para telha cerâmica, incluso içamento	1 unidade	1.072,30	4 unidades	4.289,20
2 ^a	Trama de madeira composta por ripas, caibros e terças para telhado de até 2 águas para telha de encaixe de cerâmica, incluso transporte vertical	1 m ²	53,69	60,3 m ²	3.237,51
3 ^a	Telhamento com telha, cerâmica de encaixe, tipo portuguesa, com até 2 águas, incluso transporte vertical	1 m ²	83,71	60,3 m ²	5.047,71
4 ^a	Cumeeira para telha cerâmica emboçada com argamassa para telhados com até 2 águas, incluso transporte vertical	1 m	34,46	8 m	275,68
Preço total da cobertura cerâmica					12.850,10

Fonte: Da autora (2019)

As Tabelas 23 e 24 apresentam os valores totais para cada etapa da construção do telhado branco, não sendo possível comparar somente o valor das telhas e cumeeiras. Por isso, é exibida na Tabela 25 somente a diferença de preços das telhas e cumeeiras, para as cores naturais e brancas.

Tabela 25 – Diferença de preço das telhas e cumeeira, naturais e brancas

Tipo de telha	Preço/m² (telhas) Preço/m (cumeeira)	Preço total para o telhado completo (R\$)
Telha de fibrocimento natural	27,18	1.638,95
Telha de fibrocimento branca	35,34	2.131,00
Cumeeira de fibrocimento natural	31,16	249,28
Cumeeira de fibrocimento branca	40,50	324,00
Telha cerâmica natural	39,23	2.365,57
Telha cerâmica branca	74,72	4.505,62
Cumeeira de cerâmica natural	15,21	121,68
Cumeeira de cerâmica branca	21,21	169,68

Fonte: Da autora (2019)

Com o passar do tempo de exposição do telhado branco ao meio, este vai envelhecendo e perdendo parte da sua refletância solar. No entanto, autores como (BRETZ, AKBARI; 1997, JORNAL OF ARCHITECTURAL COATINGS, 2008; PEREIRA, 2014) afirmam que, quando o telhado frio é submetido a processos de limpeza, sua refletância pode ser restaurada em quase 100% da sua refletância original. Em vista disso, buscou-se o levantamento de preço da manutenção (limpeza) do telhado frio. O valor adotado para a manutenção foi de R\$ 10,00 para cada m² de telhado (fontes no Apêndice B).

4.4.2 Economia de energia

Para utilizar a Equação 3 (custo anual de energia elétrica), exibida no método, necessita-se dos valores de consumo de energia elétrica ($Cons_{energia}$), em kWh/mês, obtidos através das simulações computacionais, e da tarifa de energia elétrica (T_e), em R\$/kWh. A tarifa de energia elétrica da distribuidora Light, atuante no Rio de Janeiro, para a classe de consumo residencial, é de 0,65920 R\$/kWh (vigente desde 01/04/2019), com os encargos PIS e COFINS. Este valor é cobrado para consumidores que consomem até 50 kWh de energia elétrica, pois até esta faixa de consumo o consumidor é isento de ICMS. A partir deste consumo, o ICMS é cobrado em cima da tarifa de energia elétrica (R\$ 0,65920) e este é diferente para cada faixa de consumo. Os valores de energia elétrica, por faixa de consumo, estão apresentados na Tabela 26 (LIGHT, 2019a).

Os valores de $Cons_{energia}$ são exibidos nas Tabelas 27 e 28, para as telhas de fibrocimento e cerâmica, respectivamente. O consumo total de energia elétrica, considerando o consumo dos equipamentos, da iluminação e da carga térmica dos aparelhos de ar-condicionado, é importante para verificar em qual faixa de consumo de energia elétrica cada

mês se enquadra, de acordo com a Tabela 26. No entanto, para a análise econômica, somente o consumo referente as cargas térmicas é analisado, tendo em vista que, para todos os cenários, o consumo referente aos equipamentos e iluminação são os mesmos. Os consumos de energia elétrica dos equipamentos, da iluminação e das cargas térmicas foram apresentados na seção anterior, na análise energética. Vale ressaltar que, para o cenário 1, a análise econômica foi realizada baseada no que foi descrito no método, ou seja, para os valores de A1 e R1. Para as simulações extra do cenário 1 não foram realizadas as análises econômicas; as simulações extra serviram apenas para analisar melhor alguns critérios.

Tabela 26 – Tarifa de energia elétrica vigente desde 01/04/2019 da distribuidora Light – Rio de Janeiro

Tarifa de baixa tensão – R\$/kWh							
Tarifa com PIS/COFINS e ICMS							
Classe de consumo	Faixa consumo					Tarifa homologada pela ANEEL sem incidência de ICMS/PIS/COFINS	Tarifa com PIS/COFINS isenta de ICMS
	Até 50 kWh	de 51 até 300 kWh	até 300 kWh	de 301 até 450 kWh	acima de 450 kWh		
	Residencial (isento de ICMS)	Residencial (ICMS de 18%)	Demais Classes (ICMS de 20%)	Todas as Classes (ICMS de 31%)	Todas as classes (ICMS de 30%)		
Residencial	0,65920	0,81348	-	0,97895	0,96387	0,62565	0,6592

Fonte: LIGHT (2019a)

As Tabelas 27 e 28 apresentam o custo de energia elétrica para todos os cenários, para a telha de fibrocimento e para a telha cerâmica, respectivamente. Porém, o consumo considerado foi somente o referente às cargas térmicas, mas a tarifa de energia para cada mês foi referente ao consumo total, como discutido anteriormente.

O custo de energia do cenário 1 consiste no custo de energia elétrica que seria necessário para que o telhado com telhas naturais tivesse as mesmas temperaturas internas de um telhado frio. Para o cenário 2, o custo é apresentado em duas colunas, uma delas referente à cobertura com telhas naturais (N) e a outra à cobertura com telhas brancas (B). Este custo consiste no consumo de energia elétrica do ar-condicionado, para os ambientes de permanência prolongada. Como o cenário 3 é uma combinação dos cenários 1 e 2, este apresenta três colunas de custo de energia. As colunas denominadas Cenário 3 (N) e Cenário 3 (B) são iguais aos do cenário 2 (N) e (B), com o ar-condicionado operando nas mesmas horas e mesmas temperaturas. A única diferença é que no cenário 3 o aparelho de ar-condicionado é considerado somente nos dormitórios. Por fim, a coluna referente ao cenário 3

(N_sala) é o custo de energia elétrica referente à carga térmica apenas da sala. O consumo considerado para o Cenário 3 (N_sala) foi simulado considerando o telhado natural, com ar-condicionado nos dormitórios (mesma configuração do cenário 2), e na sala com um *setpoint* igual as temperaturas internas da sala do cenário 3 (B), utilizando a cor branca (mesma análise do cenário 1).

Tabela 27 – Custo de energia elétrica (carga térmica) para os diferentes cenários para telhas de fibrocimento

Meses	Custo de energia elétrica (R\$)					Cenário 3 (N_sala)
	Cenário 1	Cenário 2 (N)	Cenário 2 (B)	Cenário 3 (N)	Cenário 3 (B)	
Jan	78,05	171,94	150,70	133,12	116,40	30,07
Fev	70,81	157,05	137,62	121,85	88,72	27,44
Mar	51,54	117,95	106,16	75,97	68,23	19,83
Abr	56,22	111,56	81,48	71,11	62,34	21,80
Mai	49,28	58,52	48,85	42,74	35,09	19,98
Jun	41,79	45,22	38,26	32,59	27,22	17,52
Jul	40,47	35,66	30,45	24,74	20,98	17,74
Ago	53,59	49,70	39,57	34,49	26,67	22,71
Set	59,42	67,84	56,01	50,24	41,16	24,33
Out	57,07	74,06	61,84	54,42	44,86	23,25
Nov	65,54	109,12	76,56	68,41	57,48	25,99
Dez	57,93	127,58	113,63	98,23	72,54	22,68
Anual	681,69	1126,21	941,12	807,91	661,69	273,35

Fonte: Da autora (2019)

Tabela 28 – Custo de energia elétrica (carga térmica) para os diferentes cenários para telhas cerâmicas

Meses	Custo de energia elétrica (R\$)					Cenário 3 (N_sala)
	Cenário 1	Cenário 2 (N)	Cenário 2 (B)	Cenário 3 (N)	Cenário 3 (B)	
Jan	64,14	165,90	150,00	192,53	173,92	24,03
Fev	57,94	151,46	136,93	176,45	159,38	22,01
Mar	42,17	114,65	105,81	133,17	122,82	16,09
Abr	45,93	107,93	81,35	124,09	112,42	17,59
Mai	40,71	56,02	48,99	61,23	52,89	16,17
Jun	34,87	43,48	38,36	46,88	40,97	14,37
Jul	33,53	34,29	30,43	35,57	31,44	14,53
Ago	43,89	47,06	39,62	48,68	40,12	18,34
Set	48,23	64,58	55,84	71,66	61,64	19,40
Out	46,48	70,63	61,65	77,65	67,14	18,62
Nov	53,29	86,64	76,14	117,80	85,85	20,69
Dez	47,08	123,52	113,15	142,53	130,45	18,22
Anual	558,26	1066,15	938,28	1228,23	1079,04	220,07

Fonte: Da autora (2019)

A economia de energia para o cenário 1 será o próprio custo de energia elétrica exibido nas Tabelas 27 e 28, para as telhas de fibrocimento e telhas cerâmicas, respectivamente. Esta economia representa o custo, considerando um telhado com telhas naturais, de se obter exatamente as mesmas temperaturas internas, nos ambientes de permanência prolongada, de quando se utiliza um telhado frio. Para o cenário 2, a economia de energia consiste na diferença de energia elétrica utilizando o telhado natural e branco. Como o cenário 3 é uma combinação do cenário 1 e 2, a economia de energia elétrica foi obtida a partir da diferença do custo do telhado natural e branco (com ar-condicionado somente dos dormitórios). No valor da diferença, é adicionado o custo referente à carga térmica para a sala (terceira simulação dentro do cenário 3). As economias de energia consideradas são exibidas na Tabela 29, para os dois tipos de telhas.

Tabela 29 – Economia de energia elétrica para os 3 cenários para telha de fibrocimento e telha cerâmica

Economia de energia (R\$)						
Meses	Telha de fibrocimento			Telha cerâmica		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3*	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3*
Janeiro	78,05	21,24	46,80	64,14	15,90	42,64
Fevereiro	70,81	19,44	60,58	57,94	14,53	39,08
Março	51,54	11,79	27,57	42,17	8,84	26,44
Abril	56,22	30,08	30,57	45,93	26,58	29,27
Mai	49,28	9,66	27,63	40,71	7,03	24,50
Junho	41,79	6,96	22,88	34,87	5,12	20,28
Julho	40,47	5,21	21,50	33,53	3,86	18,66
Agosto	53,59	10,13	30,53	43,89	7,44	26,90
Setembro	59,42	11,83	33,40	48,23	8,74	29,42
Outubro	57,07	12,22	32,81	46,48	8,98	29,14
Novembro	65,54	32,56	36,92	53,29	10,49	52,64
Dezembro	57,93	13,95	48,37	47,08	10,37	30,30
Anual	681,69	185,09	419,56	558,26	127,88	369,26

Nota: Economia de energia Cenário 3* = [Cenário 3 (N) – Cenário 3 (B)] + Cenário 3 (N_sala).

Fonte: Da autora (2019)

4.4.3 Fluxo de caixa

A taxa de juros, também conhecida como TMA, para trazer os valores para o valor presente foi considerada em base à Taxa SELIC de julho de 2019, com um valor de 6,5% ao ano. Segundo o Banco Central do Brasil (BCB), a taxa SELIC é a taxa básica de juros da economia, e é o principal instrumento de política monetária utilizada pelo Banco Central para

controlar a inflação. Esta taxa influencia todas as demais taxas de juros do país, como as taxas de juros dos empréstimos, dos financiamentos e das aplicações financeiras (BCB, 2019).

A taxa de reajuste anual da tarifa de energia elétrica foi considerada como a média das revisões e reajustes tarifários, de 2012 a 2019, conforme mostra a Tabela 30 (LIGHT, 2019b). Outro quesito importante e necessário para o cálculo do fluxo de caixa é a vida útil do telhado. Segundo a NBR 15575-1 a vida útil para cobertura é maior e/ou igual a 20 anos; logo, a vida útil considerada na análise econômica foi de 20 anos (ABNT, 2013).

Tabela 30 – Evolução das revisões e reajustes tarifários da distribuidora Light – RJ

Ano	Evolução das revisões e reajustes tarifários
2012	12,27%
2013	-15,98%
2014	19,20%
2015	39,28%
2016	-12,25%
2017	10,45%
2018	10,36%
2019	8,82%
Média	9,02%

Fonte: adaptado LIGHT (2019b)

No valor considerado da manutenção (limpeza) das coberturas, foi aplicada uma taxa de juros para corrigir seu valor no tempo. Esta taxa foi considerada a partir do Índice Nacional de Preços ao Consumidor (INPC), que é um instrumento criado pelo IBGE e serve para mostrar o crescimento do custo de vida do cidadão comum. Ele estabelece a variação dos preços de produtos e serviços no mercado varejista. Buscou-se a série histórica do INPC de 2012 a 2018, e o valor utilizado para a análise econômica foi a média destes 7 anos, conforme mostra a Tabela 31 (IBGE, 2019).

Tabela 31 – Série histórica do INPC 2012 a 2018

Ano	Variação (%) no ano
2012	6,20%
2013	5,56%
2014	6,23%
2015	11,28%
2016	6,58%
2017	2,07%
2018	3,43%
Média	5,91%

Fonte: adaptado IBGE (2019)

A Tabela 32 exibe o custo total para a construção de um telhado convencional e um telhado frio, para os dois tipos de telhas. Observa-se que a diferença de preço de um telhado convencional para o telhado frio é de R\$ 566,85, para telhas de fibrocimento, e de R\$ 2.188,65 para telhas de cerâmica. Como a estrutura é a mesma para ambos os telhados, e o que se altera é somente o valor das diferentes cores das telhas, os valores anteriormente citados são considerados os investimentos para o telhado frio com telhas de fibrocimento e para o telhado frio com telhas cerâmicas.

Tabela 32 – Comparação do custo de um telhado convencional e um telhado frio

Tipo de telhado	Convencional	Frio
Telhado de fibrocimento	R\$ 7.864,16	R\$ 8.431,01
Telhado de cerâmica	R\$ 10.661,45	R\$ 12.850,10

Fonte: Da autora (2019)

O fluxo de caixa é composto por 20 anos, com o ano zero tendo o valor do investimento, ou seja, valor que está saindo do caixa (valor negativo). Os valores para o ano 1 até o ano 20 são compostos pela economia de energia, o valor de entrada (valor positivo). Para esta economia, a partir do ano 2, é aplicada uma taxa média anual de aumento da tarifa de energia, com a intenção de acompanhar o aumento anual da energia elétrica. Deste valor, da economia de energia com a taxa anual de reajuste da tarifa de energia, é subtraído anualmente o valor da manutenção, sendo um valor de saída (valor negativo). O valor da manutenção também foi corrigido no tempo através da taxa de juros do INPC. O valor da manutenção é descontado do ano 1 ao 20, visto que a limpeza dos telhados é prevista para acontecer uma vez por ano. Portanto, o fluxo de caixa final é a economia anual de energia elétrica com reajuste anual da tarifa de energia elétrica menos o valor da manutenção anual

corrigido no tempo. Os valores do fluxo de caixa são trazidos para o valor presente (VP), por meio de uma taxa de desconto (TMA), através da fórmula VP do Excel[®]. As Tabelas com os fluxos de caixa são apresentadas no Apêndice C.

4.4.4 Indicadores financeiros

Para avaliar se o investimento (dos telhados frios e nas condições propostas) é viável, foram considerados três indicadores financeiros: VPL, TIR e *Payback*. O VPL (Valor Presente Líquido) precisa apresentar um valor positivo para que o projeto seja viável. Isso significa que o valor positivo do VPL é o valor que o investidor ganhará a mais do que se deixasse o valor investido aplicado com juros da TMA considerada. A TIR é comparada com a TMA, e precisa apresentar um valor superior ao da TMA para que este projeto seja viável. Por fim, o *Payback* indica em quanto tempo o valor investido irá retornar para o investidor, com o valor corrigido no tempo. Portanto, para classificar um projeto como sendo viável, o VPL precisa apresentar valor positivo e a TIR precisa ser maior que a TMA. O *Payback* é um delimitador de tempo, e geralmente é definido pelo investidor. Os indicadores financeiros, VPL e TIR, foram calculados através das fórmulas VPL e TIR do Excel[®]. O *Payback* é o primeiro ano em que o valor do fluxo de caixa, com os valores trazidos para o presente, apresenta valor positivo.

As Tabelas 33 e 34 exibem os valores encontrados para cada indicador financeiro, para os dois tipos de telhas e para as duas considerações analisadas de fluxo de caixa. Analisando primeiramente a Tabela 33 referente à primeira consideração (manutenção somente nos telhados frios), nota-se que apenas o cenário 1 é viável para os dois tipos de telhas. Para o cenário 2 a TIR apresentou valores negativos, indicando que a soma dos fluxos de caixa futuros é inferior ao investimento inicial. Logo, o VPL apresentou valor negativo e conseqüentemente, o investimento não se pagou nos 20 anos considerados. O cenário 3 resultou em um cenário viável apenas para as telhas de fibrocimento. Já para as telhas cerâmicas a TIR resultou em 5% ao ano, que é menor que a TMA de 6,5% ao ano, logo o cenário 3 para as telhas cerâmicas não é viável economicamente. O menor *payback* (4 anos e 3 meses) resultante foi para o cenário 1 com as telhas de fibrocimento. O VPL do cenário 1 para as telhas de fibrocimento (R\$ 8.562,17) é mais que o dobro do que o VPL das telhas cerâmicas (R\$ 4.019,33), para o mesmo cenário, ou seja, depois de vinte anos o investidor ganhará estes valores com a economia de energia elétrica que obteve ao investir em um telhado frio. A TIR referente ao cenário 1 foi de 42% ao ano, para a telha de fibrocimento e de

15% ao ano para a telha cerâmica, enquanto a taxa mínima de atratividade (TMA) considerada foi de 6,5% ao ano, no Cenário 1.

Na Tabela 34 para a segunda consideração (onde os custos de manutenção dos dois tipos de telhas se anulam e o custo de manutenção não entra nos cálculos do fluxo de caixa), os indicadores financeiros foram viáveis para os três cenários e para os dois tipos de telhas. Os resultados das telhas de fibrocimento resultaram em valores melhores, do que os das telhas cerâmicas, para os três cenários analisados. Assim como para a primeira consideração, o Cenário 1 se mostrou o melhor cenário para os dois tipos de telhas e apresentou o melhor *payback* (9 meses para as telhas de fibrocimento). Ressalta-se que o Cenário 1 considera uma edificação sem ar-condicionado nos APP. O Cenário 3 obteve o segundo melhor cenário e ressalta-se que nesse cenário foi considerado uma edificação mista, com ar-condicionado somente nos dormitórios ligados no período noturno. Dentre os três cenários, o Cenário 2 obteve os piores indicadores financeiros, e ressalta-se que nesse cenário foi considerado ar-condicionado nos três ambientes de permanência prolongada. Conclui-se então que o investimento é melhor para as edificações que não possuem ar-condicionado em nenhum ambiente ou com ar-condicionado somente nos dormitórios, apesar de que o Cenário 2 (com ar condicionado nos dormitórios e na sala) também apresenta valores viáveis, para essa consideração.

Em suma, o investimento é viável somente para o Cenário 1, para os dois tipos de telhas, e no Cenário 3 somente para a telha de fibrocimento, analisando a primeira consideração. Quando se analisa a segunda consideração feita, observa-se que todos os cenários e para os dois tipos de telhas, o investimento é viável. Isso porque na segunda consideração não entra o valor da manutenção anual para os telhados.

Entre as duas considerações feitas, pode-se dizer que a primeira tem maior probabilidade de ocorrer. Uma vez que não se costuma fazer manutenção em telhas convencionais, ou pelo menos não com a mesma frequência com que os telhados com telhas brancas necessitam. Por esse motivo, a primeira consideração torna-se mais realista, apesar da segunda consideração ter resultados melhores de indicadores financeiros.

Tabela 33 – Indicadores financeiros para os dois tipos de telhas* para a consideração 1 (com manutenção apenas no telhado frio)

Consideração 1	Telha de fibrocimento Branca			Telha de cerâmica Branca		
	VPL	TIR (a.a.)	Payback	VPL	TIR (a.a.)	Payback
Cenário 1 (sem ar-condicionado)	R\$ 8.562,17	42%	4 anos e 3 meses	R\$ 4.019,33	15%	12 anos e 5 meses
Cenário 2 (ar-condicionado nos dormitórios e sala)	R\$ -3.190,11	-	-	R\$ -6.165,76	-	-
Cenário 3 (ar-condicionado apenas nos dormitórios)	R\$ 2.358,73	16%	13 anos e 4 meses	R\$ -453,43	5%	-

Nota: Dados para uma residência unifamiliar de 42m², localizada na cidade do Rio de Janeiro, RJ.

Fonte: Da autora (2019)

Tabela 34 – Indicadores financeiros para os dois tipos de telhas* para a consideração 2 (com manutenção nos dois telhados: frio e convencional)

Consideração 2	Telha de fibrocimento Branca			Telha de cerâmica Branca		
	VPL	TIR (a.a.)	Payback	VPL	TIR (a.a.)	Payback
Cenário 1 (sem ar-condicionado)	R\$ 15.565,54	129%	9 meses	R\$ 11.022,70	34%	4 anos
Cenário 2 (ar-condicionado nos dormitórios e sala)	R\$ 3.813,26	41%	3 anos e 2 meses	R\$ 837,61	10%	15 anos e 4 meses
Cenário 3 (ar-condicionado apenas nos dormitórios)	R\$ 9.362,09	83%	1 anos e 4 meses	R\$ 6549,94	25%	6 anos

Nota: Dados para uma residência unifamiliar de 42m², localizada na cidade do Rio de Janeiro, RJ.

Fonte: Da autora (2019)

5 CONCLUSÕES

A pesquisa foi desenvolvida com o intuito de verificar a influência do telhado frio (alta refletância solar e alta emitância térmica) no desempenho termoenergético de uma edificação unifamiliar térrea, de 42m², localizada na cidade do Rio de Janeiro - RJ, bem como verificar a viabilidade econômica da implementação por meio de três cenários. Para tal, foram selecionados dois modelos de telhas comumente utilizadas no país em duas cores, cor natural de cada telha (telhado convencional) e a telha na cor branca (telhado frio). Realizou-se a medição da refletância solar e a emitância térmica de cada telha analisada, a fim de se utilizarem valores mais exatos na simulação computacional. Para verificar o desempenho termoenergético da edificação, em relação a cada tipo de telha, foram realizadas simulações no software *EnergyPlus*.

Os resultados foram divididos em três análises: análise térmica, análise energética e análise econômica. A análise térmica e energética foi baseada nos resultados das simulações computacionais. Na análise térmica analisou-se a temperatura interna da edificação, a temperatura do telhado, e as taxas de transferência de calor por radiação térmica, radiação solar, convecção natural e condução, para cada telha analisada. Na análise energética, verificou-se a influência do desempenho térmico das telhas no consumo de energia elétrica, através da carga térmica de aparelhos de ar-condicionado. Por fim, na análise econômica, foram calculados três indicadores financeiros: VPL, TIR e *payback*.

Em relação às propriedades medidas nas telhas, foi observado que a emitância térmica das telhas de fibrocimento é levemente superior à das telhas cerâmicas (3,4% maior que a telha natural e 6,7% maior que a telha branca). Esse resultado é um indicativo, apesar da incerteza da medição, de que as telhas de fibrocimento emitem uma pequena parcela a mais de radiação de ondas longas em relação às telhas cerâmicas. Os valores da emitância térmica foram muito semelhantes para as duas telhas cerâmicas e para as duas telhas de fibrocimento, porque a emitância térmica não está relacionada com a cor das telhas, mas sim com as características da forma da telha e do próprio material.

Como esperado, a refletância solar das telhas na cor branca apresentou valores superiores aos das telhas naturais. As telhas cerâmicas apresentaram refletância solar superior à das telhas de fibrocimento, tanto para a telha branca quanto para a telha natural. A telha que apresentou a maior refletância solar foi a telha cerâmica branca (0,78), valor 3,8% superior à da telha de fibrocimento branca, que apresentou a segunda maior refletância solar (0,75). Em relação às telhas naturais, a telha cerâmica apresentou uma refletância de 0,49, valor 24,5%

superior à da telha de fibrocimento natural, que apresentou uma refletância solar de 0,37. Em relação às telhas por tipo, a telha cerâmica branca apresentou uma refletância solar 37,2% superior à telha cerâmica natural, e a telha de fibrocimento branca foi 50,7% superior à telha de fibrocimento natural.

A determinação do Índice de Reflexão Solar (SRI) é uma forma de quantificar o comportamento da superfície do material perante a incidência da radiação solar. Sua determinação para os revestimentos é critério fundamental na avaliação do desempenho térmico para diferentes tipologias, e o quanto cada uma contribui para mitigar o fenômeno ilha de calor. A telha de fibrocimento natural revelou menores valores de SRI em relação às telhas cerâmicas. Os maiores valores de SRI foram encontrados para a telha cerâmica branca (SRI = 96), seguido da telha de fibrocimento branca (SRI = 93). Para as telhas naturais, o SRI resultou em 55 para a telha cerâmica, e 40 para a telha de fibrocimento (todos os valores de SRI exibidos aqui são referentes ao coeficiente de convecção médio). As telhas brancas, dos dois materiais, têm maior contribuição para mitigar o fenômeno ilha de calor, tendo em vista seus elevados valores de SRI.

Verificou-se que a temperatura interna do ar no interior da edificação com telhado frio pode alcançar temperaturas internas de até 34,8°C para as telhas de fibrocimento, enquanto que o telhado convencional de fibrocimento alcança valores de até 38,2°C. Ou seja, o telhado frio, para este caso, reduziu em até 3,4°C a temperatura interna do ar interno da edificação. Para as telhas cerâmicas, o telhado frio alcançou temperatura interna de até 34,6°C, enquanto que a temperatura interna com o telhado convencional chegou a 37,2°C. Ou seja, uma diferença de temperatura de 2,6°C. A temperatura externa da superfície (da cobertura leste) do telhado frio para as telhas de fibrocimento alcançou valores até 49,2°C, enquanto para as telhas convencionais chegou a 71,3°C, resultando em uma diferença de 22,1°C. Para as telhas cerâmicas (cobertura leste), a temperatura externa do telhado frio chegou a 47,7°C e para o telhado convencional chegou a 64,7°C, uma diferença de 17°C.

As temperaturas internas, para o verão, resultantes da utilização de telhados frios não apresentaram temperaturas de conforto térmico, para o caso simulado. No entanto, a utilização de telhados frios colabora para obtenção de valores menores de temperatura interna, quando comparados com os telhados convencionais. Porém, o que foi analisado no presente trabalho é uma das várias possibilidades e estratégias de eficiência energética em edificações. Destaca-se a importância de avaliar as estratégias como um todo, a fim de que cada uma contribua um pouco para melhorar as condições internas nas edificações, diminuindo assim o consumo de energia elétrica dos aparelhos de ar-condicionado.

O telhado frio de fibrocimento perde até 55,5% menos calor por radiação térmica quando comparado ao telhado convencional de fibrocimento. Para as telhas cerâmicas, o telhado frio perde até 51,8% menos calor por radiação térmica quando comparado ao telhado convencional. Isso é devido ao telhado convencional apresentar maiores temperaturas de superfície, uma vez que as emitâncias térmicas são semelhantes. Em relação ao ganho de calor por radiação solar, os telhados frios ganham até 60,9% e 56,9% menos calor, quando comparados com os telhados convencionais, para telhas de fibrocimento e telhas cerâmicas, respectivamente. Com relação à transferência de calor por convecção da superfície do telhado para o ambiente externo, os telhados frios transferem 64,7% e 60,5% menos calor para o ambiente externo, quando comparados com os telhados convencionais, para as telhas de fibrocimento e telhas cerâmicas, respectivamente. Essas constatações são referentes à cobertura leste da edificação (sob a qual estão posicionados os dormitórios).

A utilização do telhado frio de fibrocimento diminuiu até 59,4% o ganho de calor que penetra no teto da edificação, quando comparado com o telhado convencional de fibrocimento. Para as telhas cerâmicas, o telhado frio diminuiu até 54,7% o ganho de calor que penetra no teto da edificação, quando comparado com o telhado convencional.

As figuras da análise térmica (seção 4.2 do presente trabalho) demonstraram, graficamente, os fenômenos de transferência de calor para um telhado convencional e frio, e para telhas de fibrocimento e de cerâmica. Foi demonstrado que, quando a radiação solar incidente atinge a superfície de um revestimento altamente refletivo (telhado frio), grande parte da radiação solar (ondas curtas) é refletida para o ambiente (céu e entorno), reduzindo assim o aquecimento da cobertura e resultando em temperaturas menores da superfície em relação aos telhados convencionais. Devido à emitância térmica elevada, mesmo a parte do calor que é absorvido tem uma parcela devolvida para o céu, na forma de radiação térmica (infravermelha), aumentando ainda mais o resfriamento da cobertura. No entanto, como o telhado frio tem uma temperatura menor, as trocas de calor por convecção e radiação foram menos intensas, quando comparado com o telhado convencional. Assim, este fato contribui para diminuir a temperatura do ar ambiente, ou seja, gera uma contribuição para mitigar o fenômeno ilha de calor, e conseqüentemente, uma quantidade menor de calor adentra na edificação, melhorando o desempenho térmico e energético das edificações.

Como as coberturas das edificações representam uma significativa parcela de exposição da área urbana, a utilização de telhados frios para climas quentes torna-se importante, visando o potencial de redução do consumo de energia e a mitigação das ilhas de calor. Os revestimentos frios não apenas contribuem para a diminuição das cargas de

resfriamento, criando melhores condições térmicas internas nas edificações e atuando na mitigação do efeito ilha de calor, como também aumentam a durabilidade dos telhados.

A decisão de implementar medidas que sejam diferentes das comumente utilizadas por projetistas está baseada em aspectos econômicos. Por este motivo, a presente pesquisa incorporou uma análise econômica, para verificar se a implementação de um telhado frio seria viável economicamente. Na primeira consideração (manutenção somente do telhado frio), para dois cenários estudados, a implementação do telhado frio mostrou-se viável. No cenário 1, para os dois tipos de telhas, foi observada uma TIR de 42% ao ano para telhas de fibrocimento e de 15% ao ano para telhas cerâmicas. Para as telhas de fibrocimento, o *payback* resultou em 4 anos e 3 meses, enquanto para as telhas cerâmicas este tempo foi de 12 anos e 5 meses. Para o cenário 3, somente a telha de fibrocimento apresentou valores viáveis, com TIR de 16% ao ano e *payback* de 13 anos e 4 meses.

Na segunda consideração (manutenção nos dois telhados: frio e convencional) os três cenários, para as duas telhas, mostrou-se viável. Assim como na primeira consideração, o cenário 1 obteve melhores resultados. Conclui-se então que o investimento é melhor para as edificações que não possuem ar-condicionado em nenhum ambiente ou com ar-condicionado somente nos dormitórios, embora o Cenário 2 (com ar condicionado nos dormitórios e na sala) também apresenta valores viáveis, para essa consideração.

De maneira geral, como o cenário 1 resultou no melhor cenário para as duas considerações feitas, constata-se que o melhor investimento é para edificações que não possuem ar-condicionado, nas condições estudadas. Entre as duas considerações feitas, pode-se dizer que a primeira tem maior probabilidade de ocorrer. Uma vez que não se costuma fazer manutenção em telhas convencionais, ou pelo menos não com a mesma frequência com que os telhados com telhas brancas necessitam. Por esse motivo, a primeira consideração torna-se mais realista, apesar da segunda consideração ter resultados melhores de indicadores financeiros.

Ressalta-se que todos os resultados gerados e as discussões realizadas no presente estudo são válidos para o conjunto de todas as características e casos aqui apresentados. Como a localidade, Rio de Janeiro, para paredes externas claras, para a orientação considerada e as demais considerações feitas.

O Brasil é um país de clima quente o ano todo nas regiões norte, nordeste e em partes do centro-oeste; e na estação de verão, nas regiões sul e sudeste. Ou seja, o potencial do mercado para produtos com alta refletância e alta emitância térmica (telhas, pavimentos, tintas etc.) é grande. As telhas brancas avaliadas no presente estudo mostraram ser mais eficientes

do que os produtos convencionais, e mostraram-se economicamente viáveis para alguns dos cenários analisados, mesmo tendo um preço mais elevado. Por fim, pesquisas nessa área são de grande importância para que projetistas e a sociedade em geral saibam dos benefícios dos revestimentos frios, e desta forma, incentivar a indústria a investir nestes materiais, tendo por consequência a redução nos preços dos produtos.

5.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

O presente trabalho apresenta limitações que precisam ser consideradas, sendo elas:

- As análises realizadas em todo trabalho consideraram resultados somente para cidade Rio de Janeiro;
- Neste trabalho foram analisados os revestimentos frios somente para a cobertura da edificação;
- Na análise econômica, foi considerado um valor anual de manutenção (limpeza) dos telhados. Este valor foi incorporado tendo em vista que diversos estudos comprovam que, ao se realizar lavagens periódicas das coberturas, a refletância solar poderia voltar ao seu valor inicial (ou muito próximo) em relação às reduções observadas na deposição de sujeira. Porém, com o passar dos anos a refletância solar dificilmente permanecerá inalterada, mesmo sendo realizadas as lavagens todos os anos.
- Na análise econômica foi considerada uma vida útil para os telhados de até 20 anos. No entanto, pelo fato dos telhados frios apresentarem menor variação de temperatura, a sua durabilidade pode ser superior aos telhados convencionais. Esse fato não foi levado em consideração na análise econômica.
- Com a pesquisa de preço, foi possível perceber que o mercado brasileiro de materiais de construção não está pronto para atender aos consumidores que possuem esta preocupação econômica e ambiental. Os preços das telhas de fibrocimento brancas e das telhas cerâmicas brancas, assim como os das cumeeiras, não foram de fácil acesso, e em algumas lojas sequer foram encontrados.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para dar continuidade nos estudos desta área, segue algumas sugestões para futuros trabalhos:

- Como os revestimentos frios podem trazer ou não benefícios para as diferentes características climáticas do país, expandir a análise do presente estudo para as demais regiões do país seria de fundamental importância;
- Uma análise envolvendo também as demais superfícies externas da edificação (além da cobertura) bem como outras tipologias, seria interessante para estudar como melhorar ainda mais o desempenho termoenergético de edificações;
- Nos estudos relacionados com revestimentos frios, normalmente são consideradas análises utilizando tintas de alta refletância solar. O presente estudo se destaca por considerar revestimentos fabricados na cor branca, sem a utilização de tinta. Uma pesquisa comparando a eficácia das tintas frente aos revestimentos brancos seria de grande relevância, bem como avaliações para outros tipos de telhas utilizados em construções.
- Um estudo de longo prazo em relação ao envelhecimento das coberturas frias, considerando lavagens periódicas, seria de grande importância.

REFERÊNCIAS

- ABESCO (Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia). **O consumo de energia elétrica nas edificações no Brasil**. São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.abesco.com.br/pt/novidade/o-consumo-de-energia-eletrica-nas-edificacoes-no-brasil/>. Acesso em: 27 set. 2018.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1 – Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 15220-2 – Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 15575-1 – Desempenho de edificações habitacionais**. Rio de Janeiro, 2013.
- AHMAD, I. Performance of antisolated roof system. **Renewable Energy**. v. 35, p. 31-46, 2010.
- AISSA, A. H.; PUZENAT, E.; PLASSAIS, A.; HERRMANN, J.M.; HAEHNEL, C.; GUILLARD, C. Characterization and photocatalytic performance in air of cementitious materials containing TiO₂. Case study of formaldehyde removal. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 107, p. 1-8, 2011.
- AKBARI, H.; ROSE, L. S. Urban surfaces and heat island mitigation potentials. **Journal of Human-Environment System**, v. 11, p. 85-101, 2008.
- AKBARI, H.; LEVINSON, R.; MILLER, W.; BERDAHL, P. Cool colored roofs to save energy and improve air quality. In: **International Conference on Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment**. Santorini, Grécia. p. 89-100, 2005.
- ALVES, J. Y. C. C. **Análise do desempenho termoenergético em dormitórios condicionados artificialmente: zonas bioclimáticas 3 e 8**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2019.
- ANDRADE, C. T. **AUT 186 Aula “Cobertura/Telhado”**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3383982/mod_resource/content/0/2017%20Coberturas%20-%20Resumo.pdf> Acesso em: 27 mai. 2019.
- ARUMUGAM, R. S.; GARG, V.; RAM, V. V.; BHATIA, A. Optimizing roof insulation for roofs with high albedo coating and radiant barriers in India. **Journal of Building Engineering**, v. 2, p. 55-58, 2015.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1371-15: Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers**. ASTM International, 2015.

_____. **E1980-01**: Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces. ASTM International, 2011.

_____. **E903-12**: Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. ASTM International, 2012.

_____. **G173-12**: Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiance at Air Mass 1.5: Direct Normal and Hemispherical on 37_ Tilted Surface, Technical report. ASTM International, 2012.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxa Selic**. Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>. Acesso em: 07 de jun. 2019.

BERDAHL, P.; AKBARI, H.; LEVINSON, R.; MILLER, W.A. Weathering of roofing materials – an overview. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 423–433, 2008.

BERDAHL, P.; BRETZ, S. E. Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. **Energy Building**, v. 25, p. 149-158, 1997.

BOIXO, S.; DIAZ-VICENTE, M.; COLMENAR, A.; ALONSO CASTRO, M. Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia. **Energy**, v. 38, p. 425-438, 2012.

BRADY, R.; WAKE, L. Principles and formulations for organic coatings with tailored infrared properties. **Progress in Organic Coatings**, v. 20, p. 1-25, 1992.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior – MDIC. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO. **Selo PROCEL de Economia de Energia**. Rio de Janeiro, 2018.

BRETZ, S.E.; AKBARI, H. Long-term performance of high-albedo roof coatings. **Energy and Buildings**, v. 25, p. 159-167, 1997.

BRITO FILHO, J. P.; HENRIQUEZ, J. R.; DUTRA, J. C. Effects of coefficients of solar reflectivity and infrared emissivity on the temperature and heat flux of horizontal flat roofs of artificially conditioned nonresidential buildings. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 440-445, 2011.

CAIXA. **Cadernos CAIXA Projeto padrão – casas populares| 42m²**. 2007. Disponível em: <http://www1.caixa.gov.br/download>. Acesso em: 05 out. 2018.

CAIXA. **SINAPI_ref_Insumos_Composicoes_RJ_052019_NaoDesonerado**. 2019. Disponível em: http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_656. Acesso em: 20 mai. 2019.

CAO, X.; DAI, X.; LIU, J. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 198-213, 2016.

CB3E (Florianópolis). **Proposta de Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. 2018. Disponível em: <http://cb3e.ufsc.br/etiquetagem/desenvolvimento/atividades-2012-2016/trabalho-1/pesquisas>. Acesso em: 7 fev. 2019.

CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais). **Guia do melhor consumo: dicas de economia de energia e segurança com a rede elétrica**. Belo Horizonte: CEMIG, 2014.

COELHO, T. da C. C.; GOMES, C. E. M.; DORNELLES, K. A. Desempenho térmico e absorptância solar de telhas de fibrocimento sem amianto submetidas a diferentes processos de envelhecimento natural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 147-161, jan./mar. 2017.

CONSTANZO, V.; EVOLA, G.; GAGLIANO, A.; MARLETTA, L.; NOCERA, F. Study on the application of cool paintings for the passive cooling of existing buildings in Mediterranean climates. **Advanced Mechanical Engineering**, v. 2013, p. 1-10, 2013.

COSTANZO, V.; GIANPIERO, E.; MARLETTA, L. Cool roofs for passive cooling: performance in different climates and for different insulation levels in Italy. **Advances in Building Energy Research**, v. 7:2, p. 155-169, 2013.

D&S – DEVICES AND SERVICES. **Solar spectrum reflectometer model SSR version 6**. Disponível em: <http://www.devicesandservices.com/SSR%20S%20pec%20Sheet.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2017.

DESTAILLATS, H.; SLEIMAN, M.; SULLIVAN, D. P.; JACQUIOD, C.; SABLAYROLLES, J.; MOLINS, L. Key parameters influencing the performance of photocatalytic oxidation (PCO) air purification under realistic indoor conditions. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 128, p. 159-170, 2012.

DIAS, D.; MACHADO, J.; LEAL, V.; MENDES, A. Impact of using cool paints on energy demand and thermal comfort of a residential building. **Applied Thermal Engineering**, v. 65, p. 273-281, 2014.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e 96 PVA**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2008.

Durability, pausing for reflection on aging of the cool roof. **Journal of Architectural Coatings**. 2008. Disponível em: http://www.paintsquare.com/library/articles/Durability_Pausing_for_reflection_on_aging_of_the_cool_roof.pdf. Acesso em: 02 out. 2018.

Eilert P. High albedo (cool) roofs: codes and standards enhancement (CASE) study. **Pacific Gas and Electric Company**. San Francisco, USA, 2000.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus™**. Engineering reference, Version 8.7 documentation. USA: University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkeley national laboratory, 2016.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus™ Version 9.0.1 Documentation - Input Output Reference**. Disponível em: <https://energyplus.net/documentation>. Acesso em: 4 dez. 2018.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1992. **Cooling our communities guidebook on tree planting and light colored surfacing**. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=2000G1NT.txt>. Acesso em: 20 dez. 2017.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Balanco Energético Nacional, Ano Base 2016**. Brasília: EPE, 2017.

_____. **Caderno de Demanda de Eletricidade**. Brasília: EPE, 2018.

_____. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026/ Ministério de Minas e Energia**. Brasília: MME/EPE, 2017.

FEITOSA, S. M. R.; GOMES J. M. A.; MOITA NETO J.M.; ANDRADE C. S. P. Consequências da urbanização na vegetação e na temperatura da superfície de Teresina- Piauí. **Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba, v. 6, n. 2, p. 58-75, 2011.

GRANJA, A.D.; LABAKI, L.C. Influence of external surface colour on the periodic heat flow through a flat solid roof with variable thermal resistance. **International Journal of Energy Research**, v. 27, p. 771-779, 2003.

GUMY, D.; MORAIS, C.; BOWEN, P.; PULGARIN, C.; GIRALDO, S.; HAJDU, R.; KIWI, J. Catalytic activity of commercial of TiO₂ powders for the abatement of the bacteria (*E. coli*) under solar simulated light: influence of the isoelectric point. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 63, p. 76-84, 2006.

HABERL, J.; CHO, S. Literature Review of Uncertainty of Analysis Methods (Cool Roofs), Report to the Texas Commission on Environmental Quality. **Energy Systems Laboratory**, Texas A&M University, 2004.

HERNÁNDEZ-PÉREZ, I.; ÁLVAREZ, G.; XAMÁN, J.; ZAVALA-GUILLÉN, I.; ARCE, J.; SIMÁ, E. Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components – A review. **Energy and Buildings**, v. 80, p. 81-105, 2014.

HUANG, K. T.; HWANG, R. L. Future trends of residential building cooling energy and passive adaptation measures to counteract climate change: The case of Taiwan. **Applied Energy**, v. 184, p. 1230-1240, 2016.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Índice Nacional de Preços ao Consumidor (INPC) – Série Histórica 2012 a 2020**. Rio de Janeiro, 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **World Energy Outlook**. 2013.

ISAAC, M.; VUUREN, D.P.V. Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. **Energy Policy**, v. 37, p. 507-521, 2009.

JACINTO, L. I.; SILVA, M. E. X.; MARINOSK, D. L.; FREDEL, M. C.; SCHABBACH, Luciana M. Determination of solar reflectance index of ceramic coatings for use in outside surfaces. **Materials Science Forum**, v. 881, p. 251-256, 2016.

JACQUES, L. Accelerated and outdoor/natural exposure testing of coatings. **Progress in Polymer Science**, v. 25, p. 1337–1362, 2000.

JO, J. H.; CARLSON, J.; GOLDEN, J. S.; BRYAN, H. Sustainable urban energy: development of a mesoscale assessment model for solar reflective roof technologies. **Energy Policy**, v. 38, p. 7951-7959, 2010.

KARLESSI, T.; SANTAMOURIS, M.; APOSTOLAKIS, K.; SYNNEFA, A.; LIVADA, I. Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures. **Solar Energy**, v. 83, p. 538-551, 2009.

KRELLING, A.F.; SILVA, M.P.; SOUZA, R.V.; MARINOSKI, D.L.; GÜTHS, S. **Análise laboratorial de propriedades ópticas e térmicas de dezesseis amostras de telhas disponíveis no mercado brasileiro**. In: Anais do XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Foz do Iguaçu, Brasil, 2018.

LAPISA, R.; BOZONNET, E.; ALBADIE, O.M.; SALAGNAC, P. Cool roof and ventilations efficiency as passive cooling strategies for commercial low-rise buildings- ground thermal inertia impact. **Advances in Building Energy Research**, v. 7, p. 192-208, 2013.

LEED. **LEED v4 for building design and construction**. United States Green Building Council: LEED, 2019.

LEVINSON, R.; AKBARI, H. Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants. **Energy Efficiency**, v. 3, p. 53-109, 2010.

LEVINSON, R.; BERDAHL, P.; AKBARI, H.; MILLER, W.; JOEDICKE, I.; REILLY, J.; SUZUKI, Y.; VONDRA, M. Methods of creating solar-reflective nonwhite surfaces and their application to residential roofing materials. **Solar Energy Materials Solar Cells**, v. 91, p. 304-314, 2007.

LEVINSON, R.; BERDAHL, P.; AKBARI H. Solar spectral optical properties of pigments – part I: model for deriving scattering and absorption coefficients from transmittance and reflectance measurements. **Solar Energy Materials Solar Cells**, v. 89, p. 319-349, 2005.

LIDDAMENT, M. **Air Infiltration Calculation Techniques – An Applications Guide**. Bracknell, Berkshire. 1986.

LIGHT. **Composição da Tarifa**. Rio de Janeiro, 2019a. Disponível em: <http://www.light.com.br/para-residencias/Sua-Conta/composicao-da-tarifa.aspx>. Acesso em: 02 jun. 2019.

LIGHT. **Histórico do Efeito Médio Percebido**. Rio de Janeiro, 2019b. Disponível em: <http://www.light.com.br/para-residencias/Sua-Conta/historico.aspx>. Acesso em: 02 jun. 2019.

MARINO, C.; MINICHIELLO, F.; BAHNFLETH, W. The influence of surface finishes on the energy demand of HVAC systems for existing buildings. **Energy and building**, v. 95, p. 70-79, 2015.

MARINOSKI, D.; ORIGE, L.; GUESSER, A.; GUTHS, S.; LAMBERTS, R. Análise comparativa de valores de refletância solar de superfícies opacas utilizando diferentes equipamentos de medição em laboratório. **XII Encontro Nacional e VIII Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído**, ENCAC, Brasília, 2013.

MASTRAPOSTOLI, E.; SANTAMOURIS, M.; KOLOKOTSA, D.; VASSILIS, P.; VENIERI, D.; GOM-PAKIS, K. A numerical and experimental analysis of the aging of the

cool roofs for buildings in Greece. **In: Proceedings of the 34th AIVC Conference Energy conservation technologies for mitigation and adaptation in the built environment: the role of ventilation strategies and smart materials.** Atenas, Grécia, 2013.

MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto *Ground Domain* no programa *EnergyPlus*** Florianópolis, 2015. Disponível em: <http://labeee.ufsc.br/>. Acesso em: 09 fev. 2019.

MILLER, W.A.; DESJARLAIS, A.; ATCHLEY, J.; KEYHANI, M.; MACDONALD, W.; OLSON, R.; VANDEWATER, J. Experimental Analysis of the Natural Convection Effects Observed within the Closed Cavity of Tile Roof Systems. “Cool Roofing. . . Cutting through the Glare”. Atlanta, GA, p. 12–13, 2005.

MORISHITA, C.; SORGATO, M. J.; VERSAGE, R.; TRIANA, M. A.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. **Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações.** Florianópolis, 2011. Disponível em <http://labeee.ufsc.br/>. Acesso em: 17 jan. 2019.

NAHAR, N.M.; SHARMA, P.; PUROHIT, M.M. Performance of different passive techniques for cooling of buildings in arid regions. **Building and Environment**, v. 38, p. 109-116, 2003.

PEREIRA, C. D. **Influência da refletância e da emitância de superfícies externas no desempenho térmico de edificações.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

PEREIRA, H. A. da C.; MELO, A. P.; VERSAGE, R.; SORGATO, M.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa *EnergyPlus*.** Florianópolis, 2013. Disponível em: <http://labeee.ufsc.br/>. Acesso em: 29 jan. 2019.

PERKINELMER. **Technical Specifications for Spectroscopy the LAMBDA 1050 UV/Vis/NIR and LAMBDA 950 UV/Vis/NIR Spectrophotometers.** Disponível em: <http://camcor.uoregon.edu/site/wp-content/uploads/2012/11/Lambda-1050-spec.pdf> . Acesso em: 20 dez. 2017.

PISELLI, C.; SAFFARI, M.; GRACIA, A.; PISELLO, A. L.; COTANA, F.; CABEZA, L. F. Optimization of roof solar reflectance under different climate conditions, occupancy, building configuration and energy systems. **Energy and Buildings**, v. 151, p. 81-97, 2017.

PISELLO, A.L.; CASTALDO, V.L.; PIGNATTA, G.; COTANA, F.; SANTAMOURIS, M. Experimental in-lab and in-field analysis of waterproof membranes for cool roof application and urban heat island Mitigation. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 180-190, 2016.

PISELLO, A. L.; COTANA, F. The thermal effect of an innovative cool roof on residential buildings in Italy: results from two years of continuous monitoring. **Energy and Buildings**, v. 69, p. 154-164, 2014.

PISELLO, A. L.; COTANA, F.; BRINCHI, L. On a cool coating for roof clay tiles: development of the prototype and thermal-energy assessment. **Energy Procedia**, v. 45, p. 453-462, 2014.

PISELLO, A. L.; SANTAMOURIS, M.; COTANA, F. Active cool roof effect: impact of cool roofs on cooling system efficiency. **Advances in Building Energy Research**, v. 7, p. 209-221, 2013.

POSPI'SIL, J.; NESPUREK, S. Photostabilization of coatings. Mechanisms and performance. **Progress in Polymer Science**, v. 25, p. 1261–1335, 2000.

ROMEO, C.; ZINZI, M. Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study. **Energy and Buildings**, v. 67, p. 647-657, 2013.

ROSADO, P. J.; FAULKNER, D.; SULLIVAN, D. P.; LEVISON, R. Measured temperature reductions and energy savings from a cool tile roof on a central California home. **Energy and Buildings**, v. 80, p. 57-71, 2014.

SAAFI, K.; DAOUAS, N. A life-cycle cost analysis for an optimum combination of cool coatings and thermal insulation of residential building roofs in Tunisia. **Energy**, v.152, p. 925-938, 2018.

SANTAMOURIS, M. Energy and climate in the urban built environment. **James and James Science Publishers**. London, 2001.

SANTAMOURIS, M. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Solar Energy**, v. 103, p. 682 – 703, 2014.

SANTAMOURIS, M.; PAPANIKOLAOU, N.; LIVADA, I.; KORONAKIS, I.; GEORGAKIS, C.; ARGIRIOU, A.; ASSIMAKOPOULOS, D. N. On the impact of urban climate to the energy consumption of buildings. **Solar Energy**, v. 70, p. 201-216, 2001.

SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. **Solar Energy**, v. 85, p. 3085-3102, 2011.

SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KOLOKOTSA, D.; DIMITRIOU, V.; APOSTOLAKIS, K. Passive Cooling of the built environment – use of innovative reflective materials to fight heat island and decrease cooling needs. **International Journal Low Carbon Technologies**, v. 3, p. 71-82, 2008.

SCHELLER, C.; MELO, A. P.; SORGATO, M.; LAMBERTS, R. **Análise de arquivos climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações**. Florianópolis, 2015. Disponível em: <http://labeee.ufsc.br/>. Acesso em: 18 fev. 2019.

SHI, Z.; ZHANG, X. Analyzing the effect of the longwave emissivity and solar reflectance of building envelopes on energy-saving in buildings in various climates. **Solar Energy**, v. 85, p. 28-37, 2011.

SILVA, A.L.G.; ETULAIN, C. **Avaliação do Impacto Econômico da Proibição do Uso do Amianto na Construção Civil no Brasil** - Convênio de Cooperação Técnica 4416 – ABIFibro/Unicamp – Relatório Final de Pesquisa. 2010. Disponível em:

<https://inverde.files.wordpress.com/2010/10/estudo-unicamp-impacto-economico-da-proibicao-do-amianto.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2018.

SONG, Z.; ZHANG, W.; SHI, Y.; SONG, J.; QU, J.; QIN, J.; ZHANG, T.; LI, Y.; ZHANG, H.; ZHANG, R. Optical properties across the solar spectrum and indoor thermal performance of cool white coatings for building energy efficiency. **Energy and Buildings**, v. 63, p. 49-58, 2013.

SPROUL, J.; WAN, M. P.; MANDEL, B. H.; ROSENFELD, A. H. Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States. **Energy Build**, v. 71, p. 20-27, 2014.

SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; AKBARI, H. Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. **Energy and Buildings**, v. 39, p. 1167-1174, 2007.

SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; APOSTOLAKIS, K. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. **Solar Energy**, v. 81, p. 488-497, 2007.

WANG, X.; KENDRICK, C.; ODGEN, R.; MAXTED, J. Dynamic thermal simulation of a retail shed with solar reflective coatings. **Applied Thermal Engineering**, v. 28, p. 1066-1073, 2008.

WEBER, F. S.; MELO, A. P.; MARINOSKI, D. L.; GUTHS, S.; LAMBERTS, R. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedade térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Florianópolis, 2017. Disponível em: <http://labeee.ufsc.br/>. Acesso em: 10 jan. 2019.

WERLE, A. P. **Vida útil de revestimento frio autolimpante**. 2015. 272f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

WERLE, A. P.; LOH, K.; JOHN, V. M. Pintura à base de cal como alternativa de revestimento frio. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 149-157, jul./set. 2014.

WERLE, A. P.; SOUZA, M. L.; LOH, K.; ANDO, R.; JOHN, V. M. The performance of a self-cleaning cool cementitious surface. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 200-205, 2016.

ZHANG, Z.; TONG, S.; YU, H. Life-cycle analysis of cool roof in tropical areas. **Procedia Engineering**, v. 9, p. 169-392, 2016.

ZHOU, N.; FRIDLEY, D.; McNEIL, M.; ZHENG, N.; KE, J.; LEVINE, M. China's Energy and Carbon Emissions Outlook to 2050. **In: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory**, 2011. Disponível em: <https://china.lbl.gov/sites/all/files/lbl-4472e-energy-2050april-2011.pdf>. Acesso em: 18 set. 2018.

ZINZI, M.; AGNOLI, S. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 66-76, 2012.

APÊNDICE A – PESQUISA DE PREÇOS TELHADOS FRIOS

As tabelas do Apêndice A são referentes às informações utilizadas para o levantamento dos preços para a construção da cobertura. Estas informações foram baseadas nas planilhas SINAPI com encargos sociais não desonerados, que possuem contribuição de INSS de 20% sobre folha de pagamento. A tabela SINAPI utilizada foi a de maio de 2019 para a cidade do Rio de Janeiro – RJ (CAIXA, 2019). A primeira coluna indica o código de cada item da planilha SINAPI; a segunda coluna a descrição de cada item; a terceira indica a unidade; a quarta o coeficiente considerado (o coeficiente é o número que representa a fração da unidade utilizada naquele serviço); a quinta o preço de cada item; e a sexta o preço total por item para as dimensões do telhado do estudo.

As Tabelas 35, 36 e 37 são referentes às telhas de fibrocimento e as Tabelas 38, 39, 40 e 41 às telhas cerâmicas.

Tabela 35 – Preço da tesoura para um telhado de fibrocimento

CÓDIGOS	DESCRIÇÃO	UN	COEFICIENTE	PREÇO POR m/ un/ kg/ h	PREÇO TOTAL (R\$)
92558	Fabricação e instalação de tesoura inteira em madeira não aparelhada, vão de 6 m, para telha ondulada de fibrocimento, metálica, plástica ou termoacústica, incluso içamento. Af 12/2015	M	Coeficiente	Preço por m/ un/ kg/ h	Preço total (R\$)
4400	Caibro de madeira não aparelhada *6 x 8* cm, maçaranduba, angelim ou equivalente da região	M	3,5000000	10,23	35,81
4425	Viga de madeira não aparelhada 6 x 12 cm, maçaranduba, angelim ou equivalente da região	M	13,5000000	15,68	211,68
6193	Tabua de madeira não aparelhada *2,5 x 20* cm, cedrinho ou equivalente da região	M	3,0000000	8,44	25,32
21142	Estribo com parafuso em chapa de ferro fundido de 2" x 3/16" x 35 cm, seção "u", para madeiramento de telhado	UN	1,0000000	26,63	26,63
39027	Prego de aço polido com cabeça 19 x 36 (3/4 x 9)	KG	1,6500000	10,15	16,75
88239	Ajudante de carpinteiro com encargos complementares	H	2,5940000	22,41	58,13
88262	Carpinteiro de formas com encargos complementares	H	11,2410000	26,56	298,56
92260	Instalação de tesoura (inteira ou meia), biapoiada, em madeira não aparelhada, para vãos maiores ou iguais a 6,0 m e menores que 8,0 m, incluso içamento. Af_12/2015	UN	1,0000000	394,38	394,38
Preço total para 1 unidade de tesoura					1067,26
Preço total para 4 unidades de tesouras					4269,02

Tabela 36 – Preço da trama de madeira e do telhamento para um telhado de fibrocimento

CÓDIGOS	DESCRIÇÃO	UN	COEFICIENTE	PREÇO POR m/ un/ kg/ h	PREÇO TOTAL (R\$)
92543	Trama de madeira composta por terças para telhados de até 2 águas para telha ondulada de fibrocimento, incluso transporte vertical.	M	Coefficiente	Preço por m/ kg/ h/ CHP/ CHI	Preço total (R\$)
4425	Viga de madeira não aparelhada 6 x 12 cm, maçaranduba, angelim ou equivalente da região	M	0,6310000	15,68	9,89
40568	Prego de aço polido com cabeça 22 x 48 (4 1/4 x 5)	KG	0,0300000	10,24	0,31
88239	Ajudante de carpinteiro com encargos complementares	H	0,0650000	22,41	1,46
88262	Carpinteiro de formas com encargos complementares	H	0,1180000	26,56	3,13
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno. Af_03/2016	CHP	0,0046000	28,87	0,13
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno. Af_03/2016	CHI	0,0064000	28,06	0,18
Preço total de 1 m² de trama de madeira					15,10
Preço total de 60,3 m² de trama de madeira					910,80
CÓDIGOS	DESCRIÇÃO	UN	COEFICIENTE	PREÇO POR m/ un/ kg/ h	PREÇO TOTAL (R\$)
94207	Telhamento com telha ondulada de fibrocimento e = 8 mm, com recobrimento lateral de 1/4 de onda para telhado com inclinação maior que 10°, com até 2 águas, incluso içamento. Af_06/2016	M2	Coefficiente	Preço por CJ/ un/ m²/ h/ CHP/ CHI	Preço total (R\$)
1607	Conjunto arruelas de vedação 5/16" para telha fibrocimento (uma arruela metálica e uma arruela pvc - cônicas)	CJ	1,2700000	0,21	0,27
4302	Parafuso zincado rosca soberba, cabeça sextavada, 5/16 " x 250 mm, para fixação de telha em madeira	UN	1,2700000	3,22	4,09
7194	Telha de fibrocimento ondulada e = 6 mm, de 2,44 x 1,10 m (sem amianto)	M2	1,2750000	21,32	27,18
88316	Servente com encargos complementares	H	0,1500000	21,24	3,19
88323	Telhadista com encargos complementares	H	0,1150000	24,23	2,79
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno. Af_03/2016	CHP	0,0050000	28,87	0,14
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno. Af_03/2016	CHI	0,0069000	28,06	0,19
Preço total de 1 m² de telhamento					37,85
Preço total de 60,3 m² de telhamento					2282,35

Fonte: adaptado de CAIXA (2019)

Tabela 37 – Preço da cumeeira para o telhado de fibrocimento

CÓDIGOS	DESCRIÇÃO	UN	COEFICIENTE	PREÇO POR m/ un/ kg/ h	PREÇO TOTAL (R\$)
94223	Cumeeira para telha de fibrocimento ondulada, incluso acessórios de fixação e içamento. Af_06/2016	M	Coeficiente	Preço por CJ/ un/ h/ CHP/ CHI	Preço total (R\$)
1607	Conjunto arruelas de vedação 5/16" para telha fibrocimento (uma arruela metálica e uma arruela pvc - cônicas)	CJ	4,2000000	0,21	0,88
4302	Parafuso zincado rosca soberba, cabeça sextavada, 5/16 " x 250 mm, para fixação de telha em madeira	UN	4,2000000	3,22	13,52
7219	Cumeeira universal para telha ondulada de fibrocimento, aba 210 mm, comprimento 1100 mm (sem amianto)	UN	1,0290000	30,28	31,16
88316	Servente com encargos complementares	H	0,1080000	21,24	2,29
88323	Telhadista com encargos complementares	H	0,0950000	24,23	2,30
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno. Af_03/2016	CHP	0,0018000	28,87	0,05
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno. Af_03/2016	CHI	0,0026000	28,06	0,07
Preço total de 1 m de cumeeira					50,28
Preço total de 8 m de cumeeira					402,28

Fonte: adaptado de CAIXA (2019)

Tabela 38 – Preço da tesoura para um telhado de cerâmica

CÓDIGOS	DESCRIÇÃO	UN	COEFICIENTE	PREÇO POR m/ un/ kg/ h	PREÇO TOTAL (R\$)
92548	Fabricação e instalação de tesoura inteira em madeira não aparelhada, vão de 6 m, para telha cerâmica, incluso içamento. 1072,29	UN	Coefficiente	Preço por m/ un/ kg/ h	Preço total (R\$)
4400	Caibro de madeira não aparelhada *6 x 8* cm, maçaranduba, angelim ou equivalente da região	M	3,5000000	10,23	35,81
4425	Viga de madeira não aparelhada 6 x 12 cm, maçaranduba, angelim ou equivalente da região	M	14,0000000	15,68	219,52
6193	Tabua de madeira não aparelhada *2,5 x 20* cm, cedrinho ou equivalente da região	M	3,0000000	8,44	25,32
21142	Estribo com parafuso em chapa de ferro fundido de 2" x 3/16" x 35 cm, seção "u", para madeiramento de telhado	UN	1,0000000	26,63	26,63
39027	Prego de aço polido com cabeça 19 x 36 (3 1/4 x 9)	KG	1,3750000	10,15	13,96
88239	Ajudante de carpinteiro com encargos complementares	H	2,5940000	22,41	58,13
88262	Carpinteiro de formas com encargos complementares	H	11,2410000	26,56	298,56
92260	Instalação de tesoura (inteira ou meia), biapoçada, em madeira não aparelhada, para vãos maiores ou iguais a 6,0 m e menores que 8,0 m, incluso içamento. Af_12/2015	UN	1,0000000	394,38	394,38
Preço total para 1 unidade de tesoura					1072,30
Preço total para 4 unidades de tesouras					4289,22

Fonte: adaptado de CAIXA (2019)

Tabela 39 – Preço da trama de madeira para um telhado de cerâmica

CÓDIGOS	DESCRIÇÃO	UN	COEFICIENTE	PREÇO POR m/ un/ kg/ h	PREÇO TOTAL (R\$)
92539	Trama de madeira composta por ripas, caibros e terças para telhados de até 2 águas para telha de encaixe de cerâmica, incluso transporte vertical. 53,63	M2	Coeficiente	Preço por m// kg/ h/ CHP/ CHI	Preço total (R\$)
4408	Ripa de madeira não aparelhada *1,5 x 5* cm, maçaranduba, angelim ou equivalente da região	M	3,1530000	1,79	5,64
4425	Viga de madeira não aparelhada 6 x 12 cm, maçaranduba, angelim ou equivalente da região	M	0,6310000	15,68	9,89
4430	Caibro de madeira não aparelhada *5 x 6* cm, maçaranduba, angelim ou equivalente da região	M	1,8740000	8,1	15,18
20247	Prego de aço polido com cabeça 15 x 15 (1 1/4 x 13)	KG	0,0700000	11,25	0,79
39027	Prego de aço polido com cabeça 19 x 36 (3 1/4 x 9)	KG	0,0500000	10,15	0,51
40568	Prego de aço polido com cabeça 22 x 48 (4 1/4 x 5)	KG	0,0300000	10,24	0,31
88239	Ajudante de carpinteiro com encargos complementares	H	0,3940000	22,41	8,83
88262	Carpinteiro de formas com encargos complementares	H	0,3670000	26,56	9,75
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno. Af_03/2016	CHP	0,0413000	28,87	1,19
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno. Af_03/2016	CHI	0,0572000	28,06	1,61
Preço total de 1 m² de trama de madeira					53,69
Preço total de 60,3 m² de trama de madeira					3237,75

Fonte: adaptado de CAIXA (2019)

Tabela 40 – Preço do telhamento para o telhado de cerâmica

CÓDIGOS	DESCRIÇÃO	UN	COEFICIENTE	PREÇO POR m/ un/ kg/ h	PREÇO TOTAL (R\$)
94195	Telhamento com telha cerâmica de encaixe, tipo portuguesa, com até 2 águas, incluso transporte vertical. 48,19	M2	Coefficiente	Preço por un/ h/ CHP/ CHI	Preço total (R\$)
7175	Telha de barro / cerâmica, tipo romana, americana, portuguesa, francesa, comprimento de *41* cm, rendimento de *16* telhas/m2	UN	17,7490000	2,21	39,23
88316	Servente com encargos complementares	H	0,2530000	21,24	5,37
88323	Telhadista com encargos complementares	H	0,0820000	24,23	1,99
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno. Af_03/2016	CHP	0,0240000	28,87	0,69
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno. Af_03/2016	CHI	0,0333000	28,06	0,93
Preço total de 1 m² de telhamento					48,21
Preço total de 60,3 m² de telhamento					2907,25

Fonte: adaptado de CAIXA (2019)

Tabela 41 – Preço da cumeeira para o telhado de cerâmica

CÓDIGOS	DESCRIÇÃO	UN	COEFICIENTE	PREÇO POR m/ un/ kg/ h	PREÇO TOTAL (R\$)
94221	Cumeeira para telha cerâmica emboçada com argamassa traço 1:2:9 (cimento, cal e areia) para telhados com até 2 águas, incluso transporte vertical. 28,43	M	Coefficiente	Preço por un/ m³/ h/ CHP/ CHI	Preço total (R\$)
7181	Cumeeira para telha cerâmica, comprimento de *41* cm, rendimento de *3* telhas/m	UN	3,0000000	5,07	15,21
87337	Argamassa traço 1:2:9 (cimento, cal e areia média) para emboço/massa única/assentamento de alvenaria de vedação, preparo mecânico com misturador de eixo horizontal de 300 kg. Af_06/2014	M3	0,0117000	376,77	4,41
88316	Servente com encargos complementares	H	0,2090000	21,24	4,44
88323	Telhadista com encargos complementares	H	0,1640000	24,23	3,97
93281	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chp diurno. Af_03/2016	CHP	0,0063000	28,87	0,18
93282	Guincho elétrico de coluna, capacidade 400 kg, com moto freio, motor trifásico de 1,25 cv - chi diurno. Af_03/2016	CHI	0,0087000	28,06	0,24
Preço total de 1 m de cumeeira					28,46
Preço total de 8 m de cumeeira					227,66

Fonte: adaptado de CAIXA (2019)

APÊNDICE B – PREÇOS DAS TELHAS BRANCAS E PREÇO DA MANUTENÇÃO

A Tabela 42 exhibe o preço por unidade para as telhas brancas, bem como a loja pesquisada e seu respectivo endereço eletrônico. A Tabela 42 também apresenta o preço por m² da manutenção (limpeza) do telhado frio.

Tabela 42 – Fonte dos preços das telhas brancas e da manutenção

Produto	Preço/ unidade e Preço/m²	Loja	Endereço eletrônico
Telha ondulada de Fibrocimento branca 2,44x 1,10mx 6mm	R\$ 69,69	Leroy Merlin	https://www.leroymerlin.com.br/telha-fibrocimento-2,44x1,10mx6mm-topcomfort-branco-brasilit_89712273 https://www.telhanorte.com.br/telha-ondulada-de-fibrocimento-244x110cm-6mm-top-comfort-branca-brasilit-1415220/p?idsku=1415220&gclid=Cj0KCQjwvdXpBRCoARIsAMJSKqITdbezza-Kw42KnRNzearVflfuBCfwqtRVJZD7tupGugwsNTaxOIaAkGAEALw_wcB
Telha ondulada de Fibrocimento branca 2,44x 1,10mx 6mm	R\$ 72,90	Telhanorte	https://www.telhanorte.com.br/telha-ondulada-de-fibrocimento-244x110cm-6mm-top-comfort-branca-brasilit-1415220/p?idsku=1415220&gclid=Cj0KCQjwvdXpBRCoARIsAMJSKqITdbezza-Kw42KnRNzearVflfuBCfwqtRVJZD7tupGugwsNTaxOIaAkGAEALw_wcB
Telha ondulada de Fibrocimento branca 2,44x 1,10mx 6mm	R\$ 85,57	Copafer	https://www.copafer.com.br/telha-topcomfort-2-44-x-1-10-metro-6mm-225162445-brasilit-p1085154
Telha cerâmica esmaltada branca	R\$ 3,79	Leroy Merlin	https://www.leroymerlin.com.br/telha-supernova-branca-16,5x27x43cm-perkus_89821683
Limpeza telhado	R\$ 10,00	-	https://www.habitissimo.com.br/orcamentos/limpeza-de-telhados#1
Limpeza telhado	R\$ 10,00	-	https://www.gazetadopovo.com.br/imoveis/telhados-precisam-de-limpeza-e-manutencao-frequente-ebw51msd94pifrlqepgh5c66m/

Fonte: Da autora (2019)

APÊNDICE C – FLUXOS DE CAIXA UTILIZADOS NA ANÁLISE ECONÔMICA

O Apêndice C apresenta os fluxos de caixa e valor presente para cada tipo de telha, para cada cenário e para as duas considerações de fluxo de caixa. As Tabelas 43, 44, 45, 46, 47, e 48 são referentes às telhas de fibrocimento nas duas considerações de fluxo de caixa e as Tabelas 49, 50, 51, 52, 53 e 54 referem-se as telhas cerâmicas nas duas considerações de fluxo de caixa analisados.

Tabela 43 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura de fibrocimento – Cenário 1 (consideração 1)

Ano	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica - valor anual de manutenção	Fluxo descontado (VP)	VP acumulado
0	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85
1	R\$ 681,69	R\$ 78,69	R\$ 73,89	-R\$ 492,96
2	R\$ 743,18	R\$ 104,54	R\$ 92,17	-R\$ 400,79
3	R\$ 810,22	R\$ 171,58	R\$ 142,04	-R\$ 258,74
4	R\$ 883,30	R\$ 244,66	R\$ 190,18	-R\$ 68,56
5	R\$ 962,97	R\$ 324,34	R\$ 236,73	R\$ 168,16
6	R\$ 1.049,83	R\$ 411,20	R\$ 281,81	R\$ 449,97
7	R\$ 1.144,53	R\$ 505,89	R\$ 325,54	R\$ 775,51
8	R\$ 1.247,76	R\$ 609,13	R\$ 368,05	R\$ 1.143,57
9	R\$ 1.360,31	R\$ 721,67	R\$ 409,44	R\$ 1.553,01
10	R\$ 1.483,01	R\$ 844,38	R\$ 449,82	R\$ 2.002,83
11	R\$ 1.616,78	R\$ 978,14	R\$ 489,28	R\$ 2.492,11
12	R\$ 1.762,61	R\$ 1.123,98	R\$ 527,91	R\$ 3.020,02
13	R\$ 1.921,60	R\$ 1.282,96	R\$ 565,81	R\$ 3.585,83
14	R\$ 2.094,93	R\$ 1.456,29	R\$ 603,05	R\$ 4.188,88
15	R\$ 2.283,89	R\$ 1.645,26	R\$ 639,72	R\$ 4.828,60
16	R\$ 2.489,90	R\$ 1.851,26	R\$ 675,89	R\$ 5.504,49
17	R\$ 2.714,49	R\$ 2.075,85	R\$ 711,63	R\$ 6.216,12
18	R\$ 2.959,34	R\$ 2.320,70	R\$ 747,01	R\$ 6.963,13
19	R\$ 3.226,27	R\$ 2.587,63	R\$ 782,10	R\$ 7.745,22
20	R\$ 3.517,28	R\$ 2.878,64	R\$ 816,95	R\$ 8.562,17

Fonte: Da autora (2019)

Tabela 44 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura de fibrocimento – Cenário 1 (consideração 2)

Ano	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica - valor anual de manutenção	Fluxo descontado (VP)	VP acumulado
0	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85
1	R\$ 681,69	R\$ 681,69	R\$ 640,09	R\$ 73,24
2	R\$ 743,18	R\$ 743,18	R\$ 655,23	R\$ 728,47
3	R\$ 810,22	R\$ 810,22	R\$ 670,74	R\$ 1.399,21
4	R\$ 883,30	R\$ 883,30	R\$ 686,61	R\$ 2.085,82
5	R\$ 962,97	R\$ 962,97	R\$ 702,86	R\$ 2.788,67
6	R\$ 1.049,83	R\$ 1.049,83	R\$ 719,49	R\$ 3.508,16
7	R\$ 1.144,53	R\$ 1.144,53	R\$ 736,51	R\$ 4.244,67
8	R\$ 1.247,76	R\$ 1.247,76	R\$ 753,94	R\$ 4.998,61
9	R\$ 1.360,31	R\$ 1.360,31	R\$ 771,78	R\$ 5.770,38
10	R\$ 1.483,01	R\$ 1.483,01	R\$ 790,04	R\$ 6.560,42
11	R\$ 1.616,78	R\$ 1.616,78	R\$ 808,73	R\$ 7.369,16
12	R\$ 1.762,61	R\$ 1.762,61	R\$ 827,87	R\$ 8.197,03
13	R\$ 1.921,60	R\$ 1.921,60	R\$ 847,46	R\$ 9.044,49
14	R\$ 2.094,93	R\$ 2.094,93	R\$ 867,51	R\$ 9.912,00
15	R\$ 2.283,89	R\$ 2.283,89	R\$ 888,04	R\$ 10.800,03
16	R\$ 2.489,90	R\$ 2.489,90	R\$ 909,05	R\$ 11.709,08
17	R\$ 2.714,49	R\$ 2.714,49	R\$ 930,56	R\$ 12.639,65
18	R\$ 2.959,34	R\$ 2.959,34	R\$ 952,58	R\$ 13.592,23
19	R\$ 3.226,27	R\$ 3.226,27	R\$ 975,12	R\$ 14.567,34
20	R\$ 3.517,28	R\$ 3.517,28	R\$ 998,19	R\$ 15.565,54

Fonte: Da autora (2019)

Tabela 45 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura de fibrocimento – Cenário 2 (consideração 1)

Ano	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica - valor anual de manutenção	Fluxo descontado (VP)	VP acumulado
0	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85
1	R\$ 185,09	-R\$ 417,91	-R\$ 392,41	-R\$ 959,26
2	R\$ 201,78	-R\$ 436,86	-R\$ 385,16	-R\$ 1.344,41
3	R\$ 219,98	-R\$ 418,65	-R\$ 346,58	-R\$ 1.691,00
4	R\$ 239,82	-R\$ 398,81	-R\$ 310,01	-R\$ 2.001,00
5	R\$ 261,46	-R\$ 377,18	-R\$ 275,30	-R\$ 2.276,30
6	R\$ 285,04	-R\$ 353,60	-R\$ 242,33	-R\$ 2.518,63
7	R\$ 310,75	-R\$ 327,89	-R\$ 211,00	-R\$ 2.729,63
8	R\$ 338,78	-R\$ 299,86	-R\$ 181,18	-R\$ 2.910,81
9	R\$ 369,34	-R\$ 269,30	-R\$ 152,79	-R\$ 3.063,60
10	R\$ 402,65	-R\$ 235,98	-R\$ 125,71	-R\$ 3.189,31
11	R\$ 438,97	-R\$ 199,66	-R\$ 99,87	-R\$ 3.289,19
12	R\$ 478,57	-R\$ 160,07	-R\$ 75,18	-R\$ 3.364,37
13	R\$ 521,73	-R\$ 116,90	-R\$ 51,56	-R\$ 3.415,93
14	R\$ 568,80	-R\$ 69,84	-R\$ 28,92	-R\$ 3.444,85
15	R\$ 620,10	-R\$ 18,54	-R\$ 7,21	-R\$ 3.452,06
16	R\$ 676,03	R\$ 37,40	R\$ 13,65	-R\$ 3.438,40
17	R\$ 737,01	R\$ 98,37	R\$ 33,72	-R\$ 3.404,68
18	R\$ 803,49	R\$ 164,85	R\$ 53,06	-R\$ 3.351,61
19	R\$ 875,96	R\$ 237,33	R\$ 71,73	-R\$ 3.279,88
20	R\$ 954,98	R\$ 316,34	R\$ 89,78	-R\$ 3.190,11

Fonte: Da autora (2019)

Tabela 46 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura de fibrocimento – Cenário 2
(consideração 2)

Ano	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica - valor anual de manutenção	Fluxo descontado (VP)	VP acumulado
0	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85
1	R\$ 185,09	R\$ 185,09	R\$ 173,79	-R\$ 393,06
2	R\$ 201,78	R\$ 201,78	R\$ 177,90	-R\$ 215,16
3	R\$ 219,98	R\$ 219,98	R\$ 182,11	-R\$ 33,04
4	R\$ 239,82	R\$ 239,82	R\$ 186,42	R\$ 153,38
5	R\$ 261,46	R\$ 261,46	R\$ 190,83	R\$ 344,21
6	R\$ 285,04	R\$ 285,04	R\$ 195,35	R\$ 539,56
7	R\$ 310,75	R\$ 310,75	R\$ 199,97	R\$ 739,53
8	R\$ 338,78	R\$ 338,78	R\$ 204,70	R\$ 944,23
9	R\$ 369,34	R\$ 369,34	R\$ 209,55	R\$ 1.153,77
10	R\$ 402,65	R\$ 402,65	R\$ 214,50	R\$ 1.368,28
11	R\$ 438,97	R\$ 438,97	R\$ 219,58	R\$ 1.587,86
12	R\$ 478,57	R\$ 478,57	R\$ 224,78	R\$ 1.812,63
13	R\$ 521,73	R\$ 521,73	R\$ 230,09	R\$ 2.042,73
14	R\$ 568,80	R\$ 568,80	R\$ 235,54	R\$ 2.278,26
15	R\$ 620,10	R\$ 620,10	R\$ 241,11	R\$ 2.519,38
16	R\$ 676,03	R\$ 676,03	R\$ 246,82	R\$ 2.766,19
17	R\$ 737,01	R\$ 737,01	R\$ 252,66	R\$ 3.018,85
18	R\$ 803,49	R\$ 803,49	R\$ 258,64	R\$ 3.277,48
19	R\$ 875,96	R\$ 875,96	R\$ 264,75	R\$ 3.542,24
20	R\$ 954,98	R\$ 954,98	R\$ 271,02	R\$ 3.813,26

Fonte: Da autora (2019)

Tabela 47 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura de fibrocimento – Cenário 3
(consideração 1)

Ano	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica - valor anual de manutenção	Fluxo descontado (VP)	VP acumulado
0	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85
1	R\$ 419,56	-R\$ 183,44	-R\$ 172,24	-R\$ 739,09
2	R\$ 457,40	-R\$ 181,23	-R\$ 159,79	-R\$ 898,88
3	R\$ 498,66	-R\$ 139,98	-R\$ 115,88	-R\$ 1.014,76
4	R\$ 543,64	-R\$ 95,00	-R\$ 73,84	-R\$ 1.088,60
5	R\$ 592,68	-R\$ 45,96	-R\$ 33,55	-R\$ 1.122,15
6	R\$ 646,14	R\$ 7,50	R\$ 5,14	-R\$ 1.117,01
7	R\$ 704,42	R\$ 65,78	R\$ 42,33	-R\$ 1.074,68
8	R\$ 767,96	R\$ 129,32	R\$ 78,14	-R\$ 996,54
9	R\$ 837,23	R\$ 198,59	R\$ 112,67	-R\$ 883,87
10	R\$ 912,74	R\$ 274,11	R\$ 146,02	-R\$ 737,84
11	R\$ 995,07	R\$ 356,44	R\$ 178,29	-R\$ 559,55
12	R\$ 1.084,83	R\$ 446,19	R\$ 209,57	-R\$ 349,98
13	R\$ 1.182,68	R\$ 544,04	R\$ 239,93	-R\$ 110,05
14	R\$ 1.289,36	R\$ 650,72	R\$ 269,46	R\$ 159,42
15	R\$ 1.405,66	R\$ 767,02	R\$ 298,24	R\$ 457,65
16	R\$ 1.532,45	R\$ 893,81	R\$ 326,33	R\$ 783,98
17	R\$ 1.670,68	R\$ 1.032,04	R\$ 353,80	R\$ 1.137,78
18	R\$ 1.821,37	R\$ 1.182,73	R\$ 380,71	R\$ 1.518,49
19	R\$ 1.985,66	R\$ 1.347,02	R\$ 407,13	R\$ 1.925,62
20	R\$ 2.164,77	R\$ 1.526,13	R\$ 433,11	R\$ 2.358,73

Fonte: Da autora (2019)

Tabela 48 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura de fibrocimento – Cenário 3
(consideração 2)

Ano	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica - valor anual de manutenção	Fluxo descontado (VP)	VP acumulado
0	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85	-R\$ 566,85
1	R\$ 419,56	R\$ 419,56	R\$ 393,95	-R\$ 172,90
2	R\$ 457,40	R\$ 457,40	R\$ 403,27	R\$ 230,38
3	R\$ 498,66	R\$ 498,66	R\$ 412,82	R\$ 643,19
4	R\$ 543,64	R\$ 543,64	R\$ 422,58	R\$ 1.065,78
5	R\$ 592,68	R\$ 592,68	R\$ 432,58	R\$ 1.498,36
6	R\$ 646,14	R\$ 646,14	R\$ 442,82	R\$ 1.941,18
7	R\$ 704,42	R\$ 704,42	R\$ 453,30	R\$ 2.394,48
8	R\$ 767,96	R\$ 767,96	R\$ 464,02	R\$ 2.858,50
9	R\$ 837,23	R\$ 837,23	R\$ 475,00	R\$ 3.333,51
10	R\$ 912,74	R\$ 912,74	R\$ 486,24	R\$ 3.819,75
11	R\$ 995,07	R\$ 995,07	R\$ 497,75	R\$ 4.317,50
12	R\$ 1.084,83	R\$ 1.084,83	R\$ 509,53	R\$ 4.827,02
13	R\$ 1.182,68	R\$ 1.182,68	R\$ 521,58	R\$ 5.348,61
14	R\$ 1.289,36	R\$ 1.289,36	R\$ 533,92	R\$ 5.882,53
15	R\$ 1.405,66	R\$ 1.405,66	R\$ 546,56	R\$ 6.429,09
16	R\$ 1.532,45	R\$ 1.532,45	R\$ 559,49	R\$ 6.988,58
17	R\$ 1.670,68	R\$ 1.670,68	R\$ 572,73	R\$ 7.561,31
18	R\$ 1.821,37	R\$ 1.821,37	R\$ 586,28	R\$ 8.147,59
19	R\$ 1.985,66	R\$ 1.985,66	R\$ 600,15	R\$ 8.747,74
20	R\$ 2.164,77	R\$ 2.164,77	R\$ 614,35	R\$ 9.362,09

Fonte: Da autora (2019)

Tabela 49 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura cerâmica – Cenário 1
(consideração 1)

Ano	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica - valor anual de manutenção	Fluxo descontado (VP)	VP acumulado
0	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65
1	R\$ 558,26	-R\$ 44,74	-R\$ 42,01	-R\$ 2.230,66
2	R\$ 608,62	-R\$ 30,02	-R\$ 26,47	-R\$ 2.257,13
3	R\$ 663,51	R\$ 24,88	R\$ 20,59	-R\$ 2.236,53
4	R\$ 723,36	R\$ 84,73	R\$ 65,86	-R\$ 2.170,67
5	R\$ 788,61	R\$ 149,97	R\$ 109,46	-R\$ 2.061,21
6	R\$ 859,74	R\$ 221,11	R\$ 151,53	-R\$ 1.909,68
7	R\$ 937,29	R\$ 298,65	R\$ 192,19	-R\$ 1.717,49
8	R\$ 1.021,84	R\$ 383,20	R\$ 231,54	-R\$ 1.485,95
9	R\$ 1.114,00	R\$ 475,37	R\$ 269,70	-R\$ 1.216,25
10	R\$ 1.214,49	R\$ 575,85	R\$ 306,77	-R\$ 909,48
11	R\$ 1.324,03	R\$ 685,40	R\$ 342,84	-R\$ 566,64
12	R\$ 1.443,46	R\$ 804,83	R\$ 378,01	-R\$ 188,62
13	R\$ 1.573,66	R\$ 935,03	R\$ 412,36	R\$ 223,74
14	R\$ 1.715,61	R\$ 1.076,97	R\$ 445,97	R\$ 669,71
15	R\$ 1.870,36	R\$ 1.231,72	R\$ 478,92	R\$ 1.148,64
16	R\$ 2.039,06	R\$ 1.400,42	R\$ 511,29	R\$ 1.659,92
17	R\$ 2.222,98	R\$ 1.584,35	R\$ 543,13	R\$ 2.203,06
18	R\$ 2.423,50	R\$ 1.784,86	R\$ 574,53	R\$ 2.777,59
19	R\$ 2.642,10	R\$ 2.003,46	R\$ 605,53	R\$ 3.383,12
20	R\$ 2.880,41	R\$ 2.241,78	R\$ 636,21	R\$ 4.019,33

Fonte: Da autora (2019)

Tabela 50 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura cerâmica – Cenário 1
(consideração 2)

Ano	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica - valor anual de manutenção	Fluxo descontado (VP)	VP acumulado
0	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65
1	R\$ 558,26	R\$ 558,26	R\$ 524,19	-R\$ 1.664,46
2	R\$ 608,62	R\$ 608,62	R\$ 536,59	-R\$ 1.127,87
3	R\$ 663,51	R\$ 663,51	R\$ 549,29	-R\$ 578,58
4	R\$ 723,36	R\$ 723,36	R\$ 562,29	-R\$ 16,29
5	R\$ 788,61	R\$ 788,61	R\$ 575,59	R\$ 559,30
6	R\$ 859,74	R\$ 859,74	R\$ 589,21	R\$ 1.148,51
7	R\$ 937,29	R\$ 937,29	R\$ 603,15	R\$ 1.751,66
8	R\$ 1.021,84	R\$ 1.021,84	R\$ 617,42	R\$ 2.369,09
9	R\$ 1.114,00	R\$ 1.114,00	R\$ 632,03	R\$ 3.001,12
10	R\$ 1.214,49	R\$ 1.214,49	R\$ 646,99	R\$ 3.648,11
11	R\$ 1.324,03	R\$ 1.324,03	R\$ 662,30	R\$ 4.310,41
12	R\$ 1.443,46	R\$ 1.443,46	R\$ 677,97	R\$ 4.988,38
13	R\$ 1.573,66	R\$ 1.573,66	R\$ 694,01	R\$ 5.682,39
14	R\$ 1.715,61	R\$ 1.715,61	R\$ 710,43	R\$ 6.392,83
15	R\$ 1.870,36	R\$ 1.870,36	R\$ 727,24	R\$ 7.120,07
16	R\$ 2.039,06	R\$ 2.039,06	R\$ 744,45	R\$ 7.864,52
17	R\$ 2.222,98	R\$ 2.222,98	R\$ 762,07	R\$ 8.626,59
18	R\$ 2.423,50	R\$ 2.423,50	R\$ 780,10	R\$ 9.406,69
19	R\$ 2.642,10	R\$ 2.642,10	R\$ 798,56	R\$ 10.205,25
20	R\$ 2.880,41	R\$ 2.880,41	R\$ 817,45	R\$ 11.022,70

Fonte: Da autora (2019)

Tabela 51 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura cerâmica – Cenário 2
(consideração 1)

Ano	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica - valor anual de manutenção	Fluxo descontado (VP)	VP acumulado
0	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65
1	R\$ 127,88	-R\$ 475,12	-R\$ 446,12	-R\$ 2.634,77
2	R\$ 139,41	-R\$ 499,22	-R\$ 440,15	-R\$ 3.074,92
3	R\$ 151,99	-R\$ 486,65	-R\$ 402,87	-R\$ 3.477,79
4	R\$ 165,70	-R\$ 472,94	-R\$ 367,63	-R\$ 3.845,42
5	R\$ 180,64	-R\$ 457,99	-R\$ 334,28	-R\$ 4.179,70
6	R\$ 196,94	-R\$ 441,70	-R\$ 302,71	-R\$ 4.482,41
7	R\$ 214,70	-R\$ 423,94	-R\$ 272,81	-R\$ 4.755,22
8	R\$ 234,07	-R\$ 404,57	-R\$ 244,45	-R\$ 4.999,67
9	R\$ 255,18	-R\$ 383,46	-R\$ 217,56	-R\$ 5.217,23
10	R\$ 278,20	-R\$ 360,44	-R\$ 192,02	-R\$ 5.409,25
11	R\$ 303,29	-R\$ 335,35	-R\$ 167,74	-R\$ 5.576,99
12	R\$ 330,65	-R\$ 307,99	-R\$ 144,66	-R\$ 5.721,65
13	R\$ 360,47	-R\$ 278,17	-R\$ 122,68	-R\$ 5.844,32
14	R\$ 392,99	-R\$ 245,65	-R\$ 101,72	-R\$ 5.946,05
15	R\$ 428,43	-R\$ 210,20	-R\$ 81,73	-R\$ 6.027,78
16	R\$ 467,08	-R\$ 171,56	-R\$ 62,64	-R\$ 6.090,42
17	R\$ 509,21	-R\$ 129,43	-R\$ 44,37	-R\$ 6.134,79
18	R\$ 555,14	-R\$ 83,50	-R\$ 26,88	-R\$ 6.161,67
19	R\$ 605,21	-R\$ 33,43	-R\$ 10,10	-R\$ 6.171,77
20	R\$ 659,80	R\$ 21,16	R\$ 6,01	-R\$ 6.165,76

Fonte: Da autora (2019)

Tabela 52 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura cerâmica – Cenário 2
(consideração 2)

Ano	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica - valor anual de manutenção	Fluxo descontado (VP)	VP acumulado
0	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65
1	R\$ 127,88	R\$ 127,88	R\$ 120,07	-R\$ 2.068,58
2	R\$ 139,41	R\$ 139,41	R\$ 122,91	-R\$ 1.945,66
3	R\$ 151,99	R\$ 151,99	R\$ 125,82	-R\$ 1.819,84
4	R\$ 165,70	R\$ 165,70	R\$ 128,80	-R\$ 1.691,04
5	R\$ 180,64	R\$ 180,64	R\$ 131,85	-R\$ 1.559,19
6	R\$ 196,94	R\$ 196,94	R\$ 134,97	-R\$ 1.424,22
7	R\$ 214,70	R\$ 214,70	R\$ 138,16	-R\$ 1.286,06
8	R\$ 234,07	R\$ 234,07	R\$ 141,43	-R\$ 1.144,63
9	R\$ 255,18	R\$ 255,18	R\$ 144,78	-R\$ 999,86
10	R\$ 278,20	R\$ 278,20	R\$ 148,20	-R\$ 851,65
11	R\$ 303,29	R\$ 303,29	R\$ 151,71	-R\$ 699,94
12	R\$ 330,65	R\$ 330,65	R\$ 155,30	-R\$ 544,64
13	R\$ 360,47	R\$ 360,47	R\$ 158,97	-R\$ 385,67
14	R\$ 392,99	R\$ 392,99	R\$ 162,74	-R\$ 222,94
15	R\$ 428,43	R\$ 428,43	R\$ 166,59	-R\$ 56,35
16	R\$ 467,08	R\$ 467,08	R\$ 170,53	R\$ 114,18
17	R\$ 509,21	R\$ 509,21	R\$ 174,56	R\$ 288,74
18	R\$ 555,14	R\$ 555,14	R\$ 178,69	R\$ 467,43
19	R\$ 605,21	R\$ 605,21	R\$ 182,92	R\$ 650,36
20	R\$ 659,80	R\$ 659,80	R\$ 187,25	R\$ 837,61

Fonte: Da autora (2019)

Tabela 53 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura cerâmica – Cenário 3
(consideração 1)

Ano	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica - valor anual de manutenção	Fluxo descontado (VP)	VP acumulado
0	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65
1	R\$ 369,26	-R\$ 233,74	-R\$ 219,47	-R\$ 2.408,12
2	R\$ 402,57	-R\$ 236,07	-R\$ 208,13	-R\$ 2.616,26
3	R\$ 438,88	-R\$ 199,76	-R\$ 165,37	-R\$ 2.781,63
4	R\$ 478,47	-R\$ 160,17	-R\$ 124,51	-R\$ 2.906,13
5	R\$ 521,62	-R\$ 117,01	-R\$ 85,41	-R\$ 2.991,54
6	R\$ 568,67	-R\$ 69,96	-R\$ 47,95	-R\$ 3.039,49
7	R\$ 619,97	-R\$ 18,67	-R\$ 12,01	-R\$ 3.051,50
8	R\$ 675,89	R\$ 37,25	R\$ 22,51	-R\$ 3.029,00
9	R\$ 736,85	R\$ 98,22	R\$ 55,72	-R\$ 2.973,27
10	R\$ 803,32	R\$ 164,68	R\$ 87,73	-R\$ 2.885,54
11	R\$ 875,78	R\$ 237,14	R\$ 118,62	-R\$ 2.766,92
12	R\$ 954,77	R\$ 316,13	R\$ 148,48	-R\$ 2.618,44
13	R\$ 1.040,89	R\$ 402,26	R\$ 177,40	-R\$ 2.441,04
14	R\$ 1.134,78	R\$ 496,14	R\$ 205,45	-R\$ 2.235,59
15	R\$ 1.237,14	R\$ 598,50	R\$ 232,71	-R\$ 2.002,87
16	R\$ 1.348,73	R\$ 710,09	R\$ 259,25	-R\$ 1.743,62
17	R\$ 1.470,38	R\$ 831,75	R\$ 285,13	-R\$ 1.458,49
18	R\$ 1.603,01	R\$ 964,37	R\$ 310,42	-R\$ 1.148,07
19	R\$ 1.747,60	R\$ 1.108,97	R\$ 335,18	-R\$ 812,89
20	R\$ 1.905,24	R\$ 1.266,60	R\$ 359,46	-R\$ 453,43

Fonte: Da autora (2019)

Tabela 54 – Fluxo de caixa e Valor Presente para a cobertura cerâmica – Cenário 3
(consideração 2)

Ano	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica	Fluxo de caixa com reajuste anual da tarifa de energia elétrica - valor anual de manutenção	Fluxo descontado (VP)	VP acumulado
0	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65	-R\$ 2.188,65
1	R\$ 369,26	R\$ 369,26	R\$ 346,72	-R\$ 1.841,93
2	R\$ 402,57	R\$ 402,57	R\$ 354,93	-R\$ 1.487,00
3	R\$ 438,88	R\$ 438,88	R\$ 363,32	-R\$ 1.123,68
4	R\$ 478,47	R\$ 478,47	R\$ 371,92	-R\$ 751,75
5	R\$ 521,62	R\$ 521,62	R\$ 380,72	-R\$ 371,03
6	R\$ 568,67	R\$ 568,67	R\$ 389,73	R\$ 18,70
7	R\$ 619,97	R\$ 619,97	R\$ 398,95	R\$ 417,65
8	R\$ 675,89	R\$ 675,89	R\$ 408,39	R\$ 826,05
9	R\$ 736,85	R\$ 736,85	R\$ 418,06	R\$ 1.244,10
10	R\$ 803,32	R\$ 803,32	R\$ 427,95	R\$ 1.672,05
11	R\$ 875,78	R\$ 875,78	R\$ 438,07	R\$ 2.110,12
12	R\$ 954,77	R\$ 954,77	R\$ 448,44	R\$ 2.558,56
13	R\$ 1.040,89	R\$ 1.040,89	R\$ 459,05	R\$ 3.017,61
14	R\$ 1.134,78	R\$ 1.134,78	R\$ 469,91	R\$ 3.487,53
15	R\$ 1.237,14	R\$ 1.237,14	R\$ 481,03	R\$ 3.968,56
16	R\$ 1.348,73	R\$ 1.348,73	R\$ 492,41	R\$ 4.460,97
17	R\$ 1.470,38	R\$ 1.470,38	R\$ 504,07	R\$ 4.965,04
18	R\$ 1.603,01	R\$ 1.603,01	R\$ 515,99	R\$ 5.481,03
19	R\$ 1.747,60	R\$ 1.747,60	R\$ 528,20	R\$ 6.009,24
20	R\$ 1.905,24	R\$ 1.905,24	R\$ 540,70	R\$ 6.549,94

Fonte: Da autora (2019)