

**INFLUÊNCIA DA REFLETÂNCIA E DA
EMITÂNCIA DE SUPERFÍCIES EXTERNAS NO
DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES**

Cláudia Donald Pereira

Cláudia Donald Pereira

**INFLUÊNCIA DA REFLETÂNCIA E DA
EMITÂNCIA DE SUPERFÍCIES EXTERNAS NO
DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. EneDIR Ghisi, PhD

Florianópolis
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Pereira, Cláudia Donald
Influência da refletância e da emitância de superfícies
externas no desempenho térmico de edificações / Cláudia
Donald Pereira ; orientador, Enedir Ghisi - Florianópolis,
SC, 2014.
185 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. refletância solar. 3. emitância
térmica. 4. revestimentos externos. I. Ghisi, Enedir. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Cláudia Donald Pereira

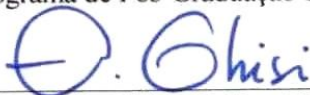
**Influência da refletância e da emitância de superfícies
externas no desempenho térmico de edificações**

Tese julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 21 de março de 2014.



Prof. Roberto Caldas Andrade Pinto, *Ph.D.*
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



Prof. Eneidir Ghisi, *Ph.D.* – UFSC
Orientador


Banca Examinadora:



Prof.ª Lucila Chebel Labaki, Dr. – UNICAMP



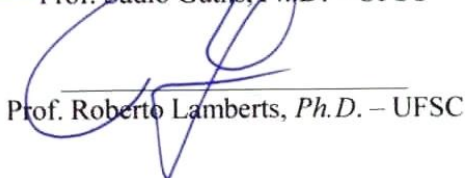
Prof. Mauricio Roriz, Dr. – UFSCAR



Prof. Martin Ordenes Mizgier, Dr. – UFSC



Prof. Saulo Güths, *Ph.D.* – UFSC



Prof. Roberto Lamberts, *Ph.D.* – UFSC

AGRADECIMENTOS

A Deus, que se fez presente a cada dia dessa longa jornada do doutorado;

Ao Gabriel, meu companheiro de vida;

Aos meus pais, meus grandes apoiadores e incentivadores;

Aos meus familiares, meus sogros e aos amigos, que me sustentaram com seu amor e com suas orações;

Aos amigos do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, cujas sugestões tiveram papel fundamental em diversas decisões desta pesquisa;

Ao Enedir, pela orientação nesta tese;

Ao Prof Saulo Güths e toda a equipe do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas, pela colaboração imprescindível na realização dos experimentos desta tese, incluindo o empréstimo de equipamentos e ajuda na execução do sistema de monitoramento;

Ao Prof André Pasa, Cristiano e Milton do Laboratório de Filmes Finos e Superfícies, pela colaboração no uso do espectrofotômetro Lambda 750;

À Equipe do Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia, por cederem o espaço para montagem da plataforma experimental, e pela concessão de dados de radiação solar.

Aos professores membros da comissão avaliadora desta tese, pela disposição em sua leitura e contribuição para sua finalização.

RESUMO

As edificações são responsáveis por muitos impactos ambientais, grande parte deles relacionados ao consumo de energia. Uma das principais parcelas desse consumo é destinada ao condicionamento de ar e poderia ser minimizada através da melhoria do desempenho térmico das edificações. As propriedades radiantes das superfícies (refletância solar e emitância térmica) do envoltório do edifício são essenciais nesse processo, pois são responsáveis pelo comportamento das superfícies com relação à radiação. Em alguns países, estão disponíveis materiais de construção indicados para favorecer a eficiência energética, como os chamados “revestimentos frios”, que possuem alta refletância e alta emitância. O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência da refletância solar e da emitância térmica de superfícies externas no desempenho térmico de edificações nos diferentes climas brasileiros. Foram realizados experimentos e simulações computacionais. Na análise experimental foram medidas e analisadas amostras de tintas com diferentes refletâncias e emitâncias ao longo de um ano. Essa análise permitiu a verificação da confiabilidade da simulação computacional e também indicou o efeito da degradação natural nas propriedades superficiais das amostras. Os resultados mostraram que a exposição às intempéries teve maior impacto sobre a refletância solar do que sobre a emitância térmica das superfícies. Nas amostras de cor branca, a exposição provocou reduções de até 15% em suas refletâncias. Verificou-se, ainda, que os impactos da exposição foram provocados principalmente pela deposição de sujeira e que com limpeza periódica é possível manter a refletância solar próxima ao valor inicial. Nas simulações computacionais, um modelo de edificação residencial, com variações nas propriedades superficiais do envoltório, foi analisado para os diferentes tipos de clima brasileiros. Tais simulações demonstraram o impacto do uso de revestimentos com diferentes valores de refletância e de emitância no desempenho termo-energético do modelo, para cidades nas diferentes zonas bioclimáticas do Brasil. Confirmou-se a indicação de revestimentos com elevada refletância solar

para quase todo o território brasileiro. Entretanto, o mesmo não ocorreu com relação à emitância térmica. Para cidades de clima temperado (especialmente nas zonas bioclimáticas de 1 a 3) as simulações indicaram a adoção de valores menores de emitância térmica na superfície externa do envoltório, para melhorar o desempenho térmico no balanço anual. Dessa forma, pode-se dizer que os materiais frios não devem ser indicados indistintamente para todas as cidades, mesmo no Brasil.

Palavras chave: refletância solar; emitância térmica; revestimentos externos.

ABSTRACT

Buildings are responsible for many environmental impacts, mostly related to energy consumption. An important part of this consumption is due to air conditioning and could be reduced by improving the thermal performance of buildings. The radiation properties of surfaces (solar reflectance and thermal emittance) of the building envelope are essential in this process, as they are responsible for the behavior of surfaces due to radiation. In some countries, there are available construction materials indicated to increase energy efficiency, as the cool materials, which have high reflectance and high emittance. The objective of this work is to analyze the influence of solar reflectance and thermal emittance of external surfaces on the thermal performance of buildings under different Brazilian climates. Experiments and computer simulations were performed. In the experimental analysis samples of paints with different reflectances and emittances were measured and analyzed during one year. This analysis allowed the verification of the computer simulation reliability and also indicated the effect of natural degradation in radiation properties of the samples. The results showed that exposure to weather had a greater impact on the solar reflectance than on the thermal emittance of surfaces. For white color samples, exposure caused reductions of up to 15% in their reflectance. It was also found that the impacts of exposure were mainly caused by the deposition of dirt; and it was possible to keep solar reflectance close to the initial value with regular cleaning. A model of residential building, with variations in radiation properties of the envelope, was analyzed for different Brazilian climates by means of computer simulation. These simulations demonstrate the impact of the use of coating with different reflectances and emittances in the thermal performance of the model for cities in different bioclimatic zones of Brazil. The results confirmed that the use of coatings with high solar reflectance is recommended for almost all Brazilian territory. However, the same cannot be said about thermal emittance. In temperate cities (especially in bioclimatic zones 1 to 3) it would be appropriate to adopt lower values of thermal emittance on the outer surface of envelope, to improve the thermal performance on the annual balance. Therefore, it can

x

be said that cool materials should not be used indiscriminately in all cities, even in Brazil.

Keywords: solar reflectance; thermal emittance; coatings.

SUMÁRIO

| | |
|--|-------------|
| LISTA DE FIGURAS | XIII |
| LISTA DE TABELAS | XIX |
| 1 INTRODUÇÃO | 2 |
| 1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA | 2 |
| 1.2 HIPÓTESES | 8 |
| 1.3 OBJETIVOS | 9 |
| 1.3.1 <i>Objetivo Geral</i> | 9 |
| 1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i> | 9 |
| 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO | 9 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA | 12 |
| 2.1 PROPRIEDADES RADIANTES DE SUPERFÍCIES OPACAS | 12 |
| 2.1.1 <i>Refletância e Absortância Solar</i> | 16 |
| 2.1.2 <i>Emitância Térmica</i> | 18 |
| 2.2 REVESTIMENTOS PARA SUPERFÍCIES EXTERNAS | 22 |
| 2.2.1 <i>Revestimentos refletivos</i> | 22 |
| 2.2.2 <i>Revestimentos frios</i> | 25 |
| 2.2.3 <i>Revestimentos com alta refletância ao infravermelho-próximo (revestimentos frios coloridos)</i> | 29 |
| 2.2.4 <i>Revestimentos termocrômicos</i> | 38 |
| 2.2.5 <i>A degradação dos revestimentos</i> | 41 |
| 2.3 ANÁLISES UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL | 45 |
| 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 47 |
| 3 MÉTODO | 52 |
| 3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 52 |
| 3.1.1 <i>Estudo de amostras</i> | 52 |
| 3.1.2 <i>Variáveis analisadas e equipamentos de medição</i> | 55 |
| 3.1.3 <i>Análise dos dados medidos</i> | 67 |
| 3.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL | 68 |
| 3.2.1 <i>Verificação da confiabilidade da simulação</i> | 68 |
| 3.2.2 <i>Análise utilizando simulação computacional</i> | 72 |
| 4 RESULTADOS | 82 |
| 4.1 MONITORAMENTO DE AMOSTRAS | 82 |
| 4.1.1 <i>Medição inicial das propriedades radiantes</i> | 82 |

| | |
|---|------------|
| 4.1.2 <i>Medições ao longo de um ano</i> | 88 |
| 4.2 VERIFICAÇÃO DA CONFIABILIDADE DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL | 105 |
| 4.3 ANÁLISES ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL | 113 |
| 4.3.1 <i>Análise individual de cobertura e paredes</i> | 124 |
| 5 CONCLUSÕES | 128 |
| 5.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO | 130 |
| 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 131 |
| REFERÊNCIAS | 134 |
| APÊNDICES | 146 |
| APÊNDICE 1 – VERIFICAÇÃO DE ERRO NAS MEDIÇÕES COM O ESPECTROFOTÔMETRO LAMBDA 750 | 146 |
| APÊNDICE 2 – COMPARAÇÃO ENTRE OS ESPECTROFOTÔMETROS LAMBDA 750 E LAMBDA 1050 | 148 |
| APÊNDICE 3 – DADOS CLIMÁTICOS DAS CIDADES ANALISADAS | 150 |
| APÊNDICE 4 – COMPLEMENTAÇÃO DE RESULTADOS REFERENTE À VERIFICAÇÃO DA CONFIABILIDADE DA SIMULAÇÃO | 157 |
| APÊNDICE 5 – COMPLEMENTAÇÃO DE RESULTADOS REFERENTE AO MÉTODO DE ANÁLISE ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL | 166 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Esquema hipotético de perfil de ilha de calor urbana. | 6 |
| Figura 2 – Espectro eletromagnético..... | 13 |
| Figura 3 – Faixas do espectro abrangendo a radiação térmica. | 14 |
| Figura 4 – Irradiação solar espectral..... | 15 |
| Figura 5 – Refletância em função do comprimento de onda: cor laranja (a); cor azul (b) | 30 |
| Figura 6 – Plataforma posicionada na cobertura de prédio da UFSC..... | 54 |
| Figura 7 – Amostras posicionadas na plataforma de medição... | 54 |
| Figura 8 – Estação Meteorológica do LabEEE..... | 56 |
| Figura 9 – Piranômetros do LEPTEN: (a) radiação global; (b) radiação difusa..... | 57 |
| Figura 10 – Esquema do sistema de monitoramento da temperatura superficial das amostras..... | 58 |
| Figura 11 – Sistema de monitoramento da temperatura superficial das amostras: (a) amostras com termopares posicionadas na plataforma; (b) multímetro e computador para aquisição e armazenamento dos dados..... | 59 |
| Figura 12 – Espectrofotômetro Lambda 750..... | 61 |
| Figura 13 – Interior do espectrofotômetro Lambda 750..... | 61 |
| Figura 14 – Espectrofotômetro Lambda 1050..... | 62 |
| Figura 15 – Interior do espectrofotômetro Lambda 1050..... | 62 |
| Figura 16 – Comprimentos de onda abrangidos na medição da Refletância..... | 63 |
| Figura 17 - Emissômetro Portátil TEMP 2000A – <i>AZ Technology</i> | 66 |
| Figura 18 – Comprimentos de onda abrangidos na medição da Emitância..... | 67 |
| Figura 19 – Modelo para as simulações..... | 73 |
| Figura 20 – Padrão de ocupação do modelo de simulação..... | 74 |
| Figura 21 – Zoneamento bioclimático brasileiro, indicando as cidades escolhidas para estudo..... | 76 |
| Figura 22 – Refletância Espectral - branco comum..... | 83 |
| Figura 23 – Amostras pequenas - tinta branco comum..... | 83 |
| Figura 24 – Refletância Espectral - branco premium..... | 84 |
| Figura 25 – Amostras pequenas - tinta branco premium..... | 84 |
| Figura 26 – Refletância Espectral - cinza metalizado..... | 85 |

| | |
|---|-----|
| Figura 27 – Amostras pequenas – tinta cinza metalizado..... | 85 |
| Figura 28 – Refletância Espectral - preto comum. | 86 |
| Figura 29 – Amostras pequenas – tinta preto comum..... | 86 |
| Figura 30 – Refletância Espectral - preto metalizado..... | 87 |
| Figura 31 – Amostras pequenas – tinta preto metalizado..... | 87 |
| Figura 32 – Refletância solar das amostras cor branco comum. | 89 |
| Figura 33 – Refletância solar das amostras cor branco premium. | 89 |
| Figura 34 – Refletância solar das amostras cor cinza metalizado. | 91 |
| Figura 35 – Refletância solar das amostras cor preto comum... .. | 91 |
| Figura 36 – Refletância solar das amostras cor preto metalizado. | 92 |
| Figura 37 – Emitância térmica das amostras nos meses de análise. | 93 |
| Figura 38 – Amostras pequenas de número 2, após mês 1. | 94 |
| Figura 39 – Amostras pequenas de número 2, após mês 5. | 95 |
| Figura 40 – Amostras pequenas de número 2, após mês 10. ... | 95 |
| Figura 41 – Refletância espectral das amostras de cor branco comum: (a) após mês 1; (b) após mês 5; (c) após mês 10..... | 97 |
| Figura 42 – Refletância espectral das amostras de cor branco premium: (a) após mês 1; (b) após mês 5; (c) após mês 10..... | 98 |
| Figura 43 – Refletância espectral das amostras de cor cinza metalizado: (a) após mês 1; (b) após mês 5; (c) após mês 10. . | 99 |
| Figura 44 – Refletância espectral das amostras de cor preto comum: (a) após mês 1; (b) após mês 5; (c) após mês 10..... | 100 |
| Figura 45 – Refletância espectral das amostras de cor preto metalizado: (a) após mês 1; (b) após mês 5; (c) após mês 10. | 101 |
| Figura 46 – Temperaturas superficiais das amostras grandes em 12 de novembro de 2012. | 104 |
| Figura 47 – Temperaturas superficiais das amostras grandes em 17 de dezembro de 2012. | 104 |
| Figura 48 – Temperaturas superficiais das amostras grandes em 9 de novembro de 2013. | 105 |
| Figura 49 – Precipitação pluviométrica obtida na estação automática do INMET (http://www.inmet.gov.br). | 106 |
| Figura 50 – Radiação solar obtida nos piranômetros do Lepten. | 106 |
| Figura 51 – Temperatura do ar obtida na estação meteorológica do LabEEE. | 107 |

| | |
|--|-----|
| Figura 52 – Temperatura do ar e temperatura superficial das amostras branco comum, monitoradas e simuladas: (a) dias 14 a 16/11/2012 e (b) dias 20 a 22/11/2012. | 108 |
| Figura 53 – Temperatura do ar e temperatura superficial das amostras preto comum, monitoradas e simuladas: (a) dias 14 a 16/11/2012 e (b) dias 20 a 22/11/2012. | 109 |
| Figura 54 - Diferenças médias entre as temperaturas superficiais medidas e simuladas: (a) dias 14 a 16/11/2012 e (b) dias 20 a 22/11/2012..... | 110 |
| Figura 55 – Correlação entre temperaturas superficiais obtidas por medição e por simulação com o algoritmo <i>Adaptive</i> | 112 |
| Figura 56 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de São Joaquim – Z1..... | 118 |
| Figura 57 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Teresópolis – Z2..... | 119 |
| Figura 58 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de São Paulo – Z3. | 121 |
| Figura 59 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Garanhuns – Z5..... | 122 |
| Figura 60 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Belém – Z8..... | 123 |
| Figura 61 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, em paredes e cobertura individualmente, para a cidade de São Joaquim – Z1..... | 125 |
| Figura 62 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, em paredes e cobertura individualmente, para a cidade de Belém – Z8..... | 126 |
| Figura 63 – Refletância solar calculada a partir dos dados medidos no espectrofotômetro Lambda 750 | 147 |
| Figura 64 – Comparação entre refletâncias espectrais medidas nos espectrofotômetros Lambda 750 e Lambda 1050. | 149 |
| Figura 65 – Temperatura e umidade relativa ao longo de um ano das cidades analisadas da Zona Bioclimática 1. | 150 |
| Figura 66 – Temperatura e umidade relativa ao longo de um ano das cidades analisadas da Zona Bioclimática 2. | 151 |

| | |
|---|-----|
| Figura 67 – Temperatura e umidade relativa ao longo de um ano das cidades analisadas da Zona Bioclimática 3. | 151 |
| Figura 68 – Temperatura e umidade relativa ao longo de um ano das cidades analisadas da Zona Bioclimática 4. | 152 |
| Figura 69 – Temperatura e umidade relativa ao longo de um ano das cidades analisadas da Zona Bioclimática 5. | 152 |
| Figura 70 – Temperatura e umidade relativa ao longo de um ano das cidades analisadas da Zona Bioclimática 6. | 153 |
| Figura 71 – Temperatura e umidade relativa ao longo de um ano das cidades analisadas da Zona Bioclimática 7. | 153 |
| Figura 72 – Temperatura e umidade relativa ao longo de um ano das cidades analisadas da Zona Bioclimática 8. | 154 |
| Figura 73 – Temperatura do ar e temperatura superficial das amostras branco premium, monitoradas e simuladas: (a) dias 14 a 16/11/2012 e (b) dias 20 a 22/11/2012. | 159 |
| Figura 74 – Temperatura do ar e temperatura superficial das amostras cinza, monitoradas e simuladas: (a) dias 14 a 16/11/2012 e (b) dias 20 a 22/11/2012. | 160 |
| Figura 75 – Temperatura do ar e temperatura superficial das amostras preto metalizado, monitoradas e simuladas: (a) dias 14 a 16/11/2012 e (b) dias 20 a 22/11/2012. | 161 |
| Figura 76 – Correlação entre temperaturas superficiais obtidas por medição e por simulação com o algoritmo <i>Simple Combined</i> | 162 |
| Figura 77 – Correlação entre temperaturas superficiais obtidas por medição e por simulação com o algoritmo MoWiTT. | 163 |
| Figura 78 – Correlação entre temperaturas superficiais obtidas por medição e por simulação com o algoritmo DOE-2. | 164 |
| Figura 79 – Correlação entre temperaturas superficiais obtidas por medição e por simulação com o algoritmo TARP. | 165 |
| Figura 80 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Campos do Jordão – Z1. | 167 |
| Figura 81 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Curitiba – Z1. | 168 |
| Figura 82 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Santa Maria – Z2. | 169 |

| | |
|---|-----|
| Figura 83 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de São João Del Rei – Z2..... | 170 |
| Figura 84 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Florianópolis – Z3..... | 171 |
| Figura 85 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Porto Alegre – Z3..... | 172 |
| Figura 86 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Brasília – Z4..... | 173 |
| Figura 87 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Pirapora – Z4..... | 174 |
| Figura 88 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de São Carlos – Z4..... | 175 |
| Figura 89 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Niterói – Z5..... | 176 |
| Figura 90 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Vitória da Conquista – Z5..... | 177 |
| Figura 91 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Campo Grande – Z6..... | 178 |
| Figura 92 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Goiânia – Z6..... | 179 |
| Figura 93 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Montes Claros – Z6..... | 180 |
| Figura 94 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Cuiabá – Z7..... | 181 |
| Figura 95 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Paulo Afonso – Z7..... | 182 |

Figura 96 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Teresina – Z7. 183

Figura 97 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Fortaleza – Z8. 184

Figura 98 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de São Luis – Z8. 185

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Faixas do espectro que abrangem a radiação térmica. | 15 |
| Tabela 2 – Refletância solar de revestimentos termocrômicos.. | 41 |
| Tabela 3 – Características dos envoltórios adotados nas simulações..... | 75 |
| Tabela 4 – Cidades escolhidas para simulação computacional. | 76 |
| Tabela 5 – Propriedades iniciais - branco comum..... | 83 |
| Tabela 6 – Propriedades iniciais - branco premium. | 84 |
| Tabela 7 – Propriedades iniciais - cinza metalizado..... | 85 |
| Tabela 8 – Propriedades iniciais - preto comum. | 86 |
| Tabela 9 – Propriedades iniciais - preto metalizado..... | 87 |
| Tabela 10 – Refletância solar das amostras número 2, antes e após limpeza. | 96 |
| Tabela 11 – Emitância das amostras número 2, antes e após limpeza. | 102 |
| Tabela 12 – Valores de emitância (ϵ) e refletância (ρ) que resultaram em menor carga térmica anual para cada modelo, em cada clima. | 114 |
| Tabela 13 – Comparação entre refletâncias solares calculadas a partir das medições com os espectrofotômetros Lambda 750 e Lambda 1050..... | 149 |
| Tabela 14 – Temperaturas do arquivo climático (um ano) das 24 cidades analisadas..... | 155 |
| Tabela 15 – Umidade relativa do arquivo climático (um ano) das 24 cidades analisadas..... | 156 |
| Tabela 16 – Diferenças mínima, máxima e média entre as temperaturas superficiais medidas e simuladas: dias 14 a 16/11/2012..... | 157 |
| Tabela 17 – Diferenças mínima, máxima e média entre as temperaturas superficiais medidas e simuladas: dias 20 a 22/11/2012..... | 158 |

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do Problema e Justificativa

A construção civil é um setor diretamente ligado e influenciado pelas questões de sustentabilidade, que têm recebido destaque mundial. Esse setor é responsável por vários impactos ambientais negativos decorrentes desde a etapa de exploração de recursos (renováveis ou não) para a produção dos materiais de construção, do processo de fabricação desses materiais, da construção e operação dos edifícios, até a sua demolição. Ao longo de todas essas etapas, mas especialmente durante o uso dos edifícios (geralmente a etapa mais longa em seu ciclo de vida), grande parte dos impactos negativos está relacionada ao consumo de energia.

O uso de energia nas edificações residenciais e comerciais corresponde a quase um quarto da energia total fornecida em todo o mundo (EIA, 2013). No Brasil, a energia elétrica é o principal tipo de energia consumido nas edificações. As edificações brasileiras (residenciais, comerciais e públicas) foram responsáveis por 47% do consumo de energia elétrica em 2012, sendo que metade desse consumo de energia deveu apenas às residências, e tal valor vem crescendo nos últimos anos (EPE, 2013). Nas edificações residenciais, o condicionamento artificial de ar já figurava entre os três principais consumidores de eletricidade desde 2005 (ELETROBRÁS; PROCEL, 2007). A parcela destinada ao condicionamento de ar poderia ser minimizada através da melhoria do desempenho térmico das edificações. Tal cenário justifica a necessidade de investimento em pesquisas voltadas ao desempenho térmico e redução do consumo de energia nas edificações.

Dentre os materiais de construção, aqueles que constituem o envoltório do edifício destacam-se como fatores essenciais no estudo do desempenho térmico. O envoltório é o elemento de separação entre ambiente interno e externo, e os materiais que o compõem interferem no fluxo de calor através dele. Sendo assim, os componentes do envoltório são determinantes do clima

interno da edificação e afetam a demanda por condicionamento artificial (MANIOGLU; YILMAZ, 2006). Para selecionar materiais que possam contribuir com o desempenho térmico e a eficiência energética das edificações é preciso conhecer suas propriedades térmicas e propriedades radiantes. As propriedades radiantes das superfícies dos materiais de revestimento são importantes, pois são responsáveis pelo comportamento da radiação com relação às superfícies.

Diversas pesquisas em todo o mundo (AKBARI et al., 1997, 1999, 2005; AKBARI, 2003; SYNNEFA et al., 2006, 2007a; SANTAMOURIS et al., 2007; SUEHRCKE et al., 2008; YU et al., 2008; MUSELLI, 2010; SHEN et al., 2011; SHI; ZHANG, 2011), inclusive no Brasil (WESTPHAL, 2007; SANTANA; GHISI, 2009; SORGATO, 2009; UEMOTO et al., 2010; BRITO FILHO et al., 2011; DORNELLES et al., 2011; MELO, 2012), têm identificado a influência das propriedades das superfícies externas do envoltório nas cargas térmicas das edificações. Santana e Ghisi (2009) analisaram, através de simulação computacional, a influência de parâmetros construtivos do envoltório no consumo de energia em edifícios de escritório. Seus resultados apontaram a absorvância das superfícies externas como um dos parâmetros mais influentes. Santamouris et al. (2007) indicam o uso de revestimentos de alta refletância como uma das principais técnicas de resfriamento passivo, capaz de diminuir a temperatura interna e favorecer o conforto em climas quentes.

O território brasileiro, em sua maior parte, está sujeito à intensa e abundante insolação durante a maior parte do ano, de forma que o Sol torna-se um elemento de extrema importância no estudo da eficiência energética na arquitetura. O impacto dessa incidência de radiação solar na carga térmica dos edifícios depende, entre outros fatores, das propriedades superficiais dos materiais de revestimento. A refletância e absorvância solar e a emitância térmica controlam os ganhos e perdas de calor por radiação e, portanto, têm papel decisivo nas trocas de calor de todo o ambiente construído.

Especialmente nos países tecnologicamente mais desenvolvidos, estão disponíveis no mercado materiais de construção inovadores, criados com características voltadas ao aumento da eficiência energética. Dentre estes produtos, podem-se citar os revestimentos frios (*cool materials*), caracterizados por apresentar alta refletância e emitância, e revestimentos

termocrômicos (*thermochromic materials*), que possuem pigmentos capazes de mudar de cor, de forma reversível. No Brasil, esta tendência ainda está em fase inicial, com grande parte das pesquisas concentradas em abordagens tradicionais de materiais. Para subsidiar a evolução das pesquisas de materiais no Brasil é preciso determinar quais as características desejadas para produtos adaptados ao clima brasileiro.

Alguns municípios brasileiros, como São Paulo e Florianópolis, propuseram a criação de lei exigindo a adoção da cor branca nos telhados das edificações, conforme noticiado em alguns jornais de alcance nacional (ESTADÃO, 2011; IG, 2011; O GLOBO, 2011). Essa iniciativa de pintar os telhados de branco, apesar de ter boa motivação, é simplista e não leva em consideração a adoção de outras soluções (como o uso de tintas coloridas de alta refletância). Ela também não discute as desvantagens dessa ação, como o aumento do consumo energético para aquecimento dos ambientes em cidades com inverno rigoroso, nem a necessidade de limpeza periódica para manter as características do material. Isso indica a necessidade de estudos mais aprofundados sobre o comportamento térmico dos materiais de revestimento no Brasil.

Em contrapartida, os regulamentos brasileiros de eficiência energética em edificações, em vigência atualmente, não destacam a relevância das propriedades radiantes. No RTQ-C (Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos) a absorvância é citada apenas nos pré-requisitos. Para obtenção da etiqueta de Nível A, por exemplo, há como pré-requisito a utilização de materiais de revestimento externo de paredes e coberturas com absorvância solar abaixo de 0,50, válido para as zonas bioclimáticas 2 a 8. Percebe-se que se trata apenas da indicação de um critério mínimo, sem bonificar aqueles que optassem por uma solução ainda melhor. Quanto à emitância, não há qualquer menção a ela nesta norma.

No caso do RTQ-R (Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais), a absorvância é mais relevante, pois é uma das variáveis no cálculo do equivalente numérico da envoltória. Também há um pré-requisito relacionado à absorvância que limita o valor de absorvância dependendo da transmitância térmica do

envoltório. Entretanto, assim como no RTQ-C, a regulamentação residencial não considera a emitância em seus critérios.

O uso de materiais frios é apontado por muitos pesquisadores como uma contribuição essencial para a redução do consumo energético para resfriamento das edificações e também para a redução do efeito de ilha de calor nos grandes centros urbanos. Revestimentos frios, definidos por apresentarem altos valores de refletância e emitância, tendem a apresentar temperaturas superficiais mais baixas (SYNNEFA et al., 2006). Com isso, edificações que utilizam tais materiais, permaneceriam menos aquecidas. No caso de edificações com condicionamento artificial, elas necessitariam de menor consumo energético para serem resfriadas. Nos Estados Unidos, por exemplo, instituições governamentais e não-governamentais têm estimulado a adoção de materiais frios nas coberturas das edificações através de campanhas públicas e de exigências nos códigos de obras estaduais.

Com relação ao espaço urbano, as propriedades superficiais dos materiais construtivos, combinadas com outras fontes térmicas, são responsáveis por uma mudança no balanço de energia das áreas urbanizadas. Com isso, a temperatura nas cidades alcança valores significativamente mais altos do que nas áreas rurais contiguas. Estudos de Akbari (2008) mostraram que, em uma tarde de verão de céu claro, a temperatura do ar em uma típica cidade nos EUA pode ser cerca de 3,0°C maior do que as áreas rurais em seu entorno (Figura 1). Esse fenômeno é conhecido como ilha de calor, e resulta no aumento do desconforto das pessoas nas áreas urbanas, especialmente durante o verão. Com isso, nos locais onde o ar condicionado está disponível, observa-se o aumento do consumo de energia. Para solucionar o problema da ilha de calor, uma solução existente é aumentar as áreas de vegetação nos centros urbanos. Entretanto, esta solução tem limites e a tendência moderna é complementá-la com o uso de revestimentos de refletância elevada, como os revestimentos frios, principalmente nas coberturas das edificações e na pavimentação das áreas públicas descobertas.

O fenômeno de ilha de calor tem crescido nas áreas urbanas, modificando o microclima e aumentando a temperatura do ar. Esse fenômeno é mais prejudicial nos locais de clima quente, como é o caso de grande parte do território brasileiro.

Com o uso de materiais frios, esses efeitos poderiam ser minimizados. Bretz et al. (1998) também afirmam que a escolha dos materiais de revestimento das edificações pode promover ao homem e ao meio ambiente os benefícios da diminuição da temperatura do ar nas áreas urbanas e redução da demanda de energia para condicionamento de ar.

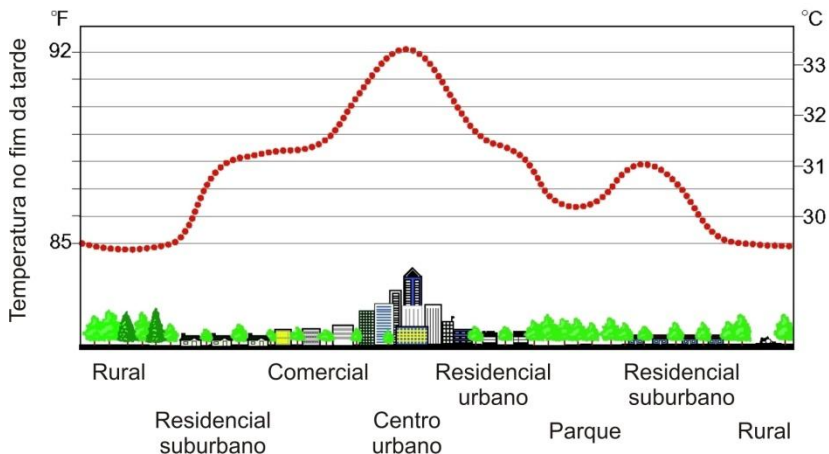


Figura 1 – Esquema hipotético de perfil de ilha de calor urbana. (Fonte: Akbari, 2008)

Apesar dos citados benefícios dos revestimentos frios (com alta refletância e emitância), eles seriam indicados apenas para locais de clima predominantemente quente, podendo algumas desvantagens de seu uso também ser apontadas. As pesquisas de Synnefa et al. (2007a) e de Halewood e Wilde (2008) demonstraram que o uso de revestimentos com alta refletância pode provocar aumento da demanda por aquecimento em regiões de clima temperado ou subtropical, com temperaturas baixas no período de inverno. Como consequência disso, surgem pesquisas a respeito de outras soluções, como os revestimentos termocrômicos, que são materiais com pigmentos capazes de mudar de cor, de forma reversível, de acordo com diferentes faixas de temperatura. Karlessi et al. (2009) estudaram e compararam as características de materiais comuns, frios e termocrômicos, e concluíram que estes últimos são capazes de

favorecer o desempenho térmico das edificações tanto em períodos de calor quanto de frio. Porém, essa solução tem limitações tais como a questão estética, já que a edificação teria seu envoltório mudando de cor de forma desigual e irregular, e também o custo mais elevado. Essa discussão demonstra a necessidade de maiores pesquisas sobre a seleção de materiais de revestimentos para edificações em clima temperados.

Percebe-se que as características superficiais ideais de um material construtivo dependem do clima onde ele será utilizado. Climas quentes e úmidos, por exemplo, exigem características diferentes de climas frios ou de climas temperados (com períodos quentes e frios). A maior parte das pesquisas busca soluções para os climas extremos, muito frio ou muito quente, não atentando aos climas temperados. O Brasil possui um território extenso, com grandes diferenciações climáticas, e parte considerável das cidades brasileiras apresenta verão com altas temperaturas e inverno com baixas temperaturas. Em geral, para essas cidades, opta-se pelo uso de materiais que favorecem apenas a uma das estações (apenas verão ou apenas inverno). Quando a opção é por minimizar o consumo para refrigeração da edificação no verão, tem-se como consequência a elevação do consumo para aquecimento no inverno, ou vice-versa. Um dos desafios nesta área é a indicação de uma solução mais adequada para o ano inteiro.

A maior parte das pesquisas envolvendo as propriedades superficiais dos revestimentos enfoca prioritariamente o papel da refletância. Quanto à emitância, existe um número menor de pesquisas que avalia especificamente essa propriedade. As pesquisas sobre os revestimentos frios tendem a focar as vantagens derivadas da alta refletância, detalhando pouco as vantagens devidas à alta emitância. Portanto, é necessário um estudo para verificar de forma mais ampla a influência de superfícies com diferentes valores de emitância para edificações em diferentes tipos de clima.

Destaca-se ainda que os estudos a respeito das propriedades superficiais dos revestimentos têm priorizado a cobertura como componente do envoltório a ser analisado. Várias pesquisas verificam a economia de energia para condicionamento artificial pela alteração da refletância da cobertura de edificações ou modelos computacionais (AKBARI et al., 2005; LEVINSON et al., 2007a; BOZONNET, 2011; BRITO

FILHO et al., 2011; KOLOKOTRONI et al., 2013; ROMEO; ZINZI, 2013; SYNNEFA; SANTAMOURIS, 2012). Porém, dependendo da tipologia construtiva da edificação e da latitude local, é possível que as paredes exerçam tanta influência quanto, ou até maior que, a cobertura. É o caso mostrado na pesquisa de Santana e Ghisi (2009), que avaliou edifícios de escritório em Florianópolis, e indicou que o impacto no consumo de energia foi maior pela alteração da absorvância das paredes do que da cobertura.

Faz-se necessária, portanto, uma investigação a respeito das melhores propriedades superficiais, com destaque para refletância e emitância, para regiões com diferentes climas, a fim de favorecer o desenvolvimento de tecnologias de materiais de revestimento adequadas à realidade brasileira. A partir deste estudo, serão determinadas características para materiais de revestimento adequados para beneficiar edificações com melhor desempenho térmico. Essa contribuição é vantajosa não só para os usuários, mas também para o meio-ambiente, pois espaços confortáveis termicamente requerem menor uso de condicionadores de ar, e, conseqüentemente, reduzem o consumo energético. A partir da indicação de soluções adequadas às variadas realidades climáticas, é possível desenvolver normas técnicas e transferir o conhecimento para o mercado.

1.2 Hipóteses

A hipótese geral, que direcionou os rumos deste trabalho, é que o uso de revestimentos frios, com elevada refletância solar e elevada emitância térmica, nas superfícies externas de edificações não é adequado para todas as cidades brasileiras.

Tal questionamento decorre de uma segunda hipótese, que é a de que já se comprovou quais são os valores de refletância e emitância mais indicados para os revestimentos externos de edificações em climas quentes e em climas frios, porém ainda é preciso estabelecer uma solução adequada aos climas temperados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência da refletância solar e da emitância térmica de superfícies externas no desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares nos diferentes climas brasileiros.

1.3.2 Objetivos Específicos

Destacam-se também os seguintes objetivos específicos a serem alcançados no decorrer do trabalho:

- Verificar o impacto da exposição natural de materiais de revestimento ao longo do tempo em suas propriedades superficiais;
- Verificar o impacto do uso de revestimentos com diferentes valores de refletância e emitância no desempenho térmico de edificações residenciais;
- Verificar se a indicação de uso dos revestimentos frios (com refletância e emitância elevadas) é benéfica para todas as regiões bioclimáticas brasileiras;
- Verificar individualmente a influência de paredes e cobertura no desempenho térmico de edificações residenciais.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução sobre o assunto, caracterizando o problema a ser estudado e descrevendo os objetivos que se espera alcançar.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica referente às propriedades radiantes das superfícies opacas, destacando a refletância solar e a emitância térmica. Descreve-se ainda sobre materiais de revestimento para edificações, com as análises de diversos pesquisadores a respeito do desempenho térmico de tais materiais. São revisadas

pesquisas referentes a esses temas, desenvolvidas por diferentes pesquisadores, em alguns lugares do mundo, incluindo o Brasil.

O terceiro capítulo descreve o método utilizado em experimentos com amostras de materiais e em análises por simulação computacional. Inicialmente, são relacionados os procedimentos de monitoramento de amostras de tintas, utilizado para analisar a confiabilidade de simulações computacionais e para verificar o efeito da degradação natural nas propriedades superficiais das amostras. Posteriormente, são detalhados os critérios adotados na realização de simulações computacionais, indicando o programa computacional escolhido, os dados de entrada e o método para tratamento dos dados de saída.

No quarto capítulo são apresentados os resultados alcançados nesta pesquisa, incluindo os obtidos pelo monitoramento de amostras e pela aplicação da simulação computacional. No quinto e último capítulo apresentam-se as conclusões verificadas a partir dos resultados, bem como as limitações e barreiras enfrentadas ao longo do trabalho, e ainda sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Propriedades radiantes de superfícies opacas

As superfícies estão em constante troca de calor, e um dos modos de transferência de calor é chamado de radiação térmica. O comportamento de determinado componente opaco com relação à radiação térmica dependerá das propriedades de sua superfície. Por isso, pode-se dizer que essas propriedades são as principais responsáveis pela temperatura de tais superfícies.

A nomenclatura utilizada para as propriedades das superfícies varia consideravelmente na literatura. Perin (2009) descreve que frequentemente questiona-se sobre o significado dos sufixos “idade” e “ância”. Alguns autores consideram que não existe significado especial relacionado a essas terminações. Porém, outros autores utilizam “idade” para propriedades intrínsecas de substâncias puras, perfeitamente polidas, e utilizam “ância” para superfícies rugosas, oxidadas, ou outras características de heterogeneidade. Já Roriz et al. (2011) consideraram o sufixo “idade” para propriedade do material e “ância” para propriedades da superfície. A ASTM E284-09a (ASTM, 2011) adota a seguinte definição para tais terminações: “ância” denota a propriedade de uma amostra e “idade” denota a propriedade do tipo de material que compõe a amostra.

Com base nas definições apresentadas, neste trabalho serão adotados os termos refletância, absortância e emitância para nomear as propriedades de superfícies e amostras. Tais termos são bem reconhecidos nas referências internacionais consultadas (*reflectance*, *absorptance* e *emittance*).

As propriedades das superfícies externas das edificações determinam qual será o impacto da radiação térmica, especialmente a radiação solar, sobre as mesmas. A radiação é uma variável essencial no estudo do desempenho térmico das edificações. A radiação térmica é a energia emitida por toda matéria com temperatura acima do zero absoluto (zero Kelvin). Ela se propaga como radiação eletromagnética na forma de ondas. Corpos com temperaturas mais elevadas emitem

radiação térmica em ondas curtas, como é o caso do Sol. Os corpos com menores temperaturas, como os existentes na superfície terrestre, emitem radiação térmica de ondas longas.

O espectro eletromagnético completo, mostrado na Figura 2, apresenta graficamente a radiação eletromagnética classificada em faixas, de acordo com o comprimento e a frequência da onda. Os limites dessas faixas, chamadas de bandas espectrais, não são precisos, havendo algumas diferenças nas indicações dos autores que pesquisam o assunto. Quanto maior o comprimento, menor a frequência da onda. Em ordem crescente de comprimento de onda¹, as bandas espectrais são: Raios Gama, Raios-X, Ultravioleta (UV), Luz Visível, Infravermelho (IV), Microondas e Ondas de Rádio.

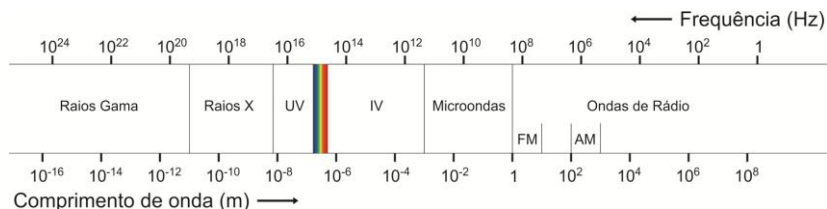


Figura 2 – Espectro eletromagnético. (Fonte: Adaptado de Ronan, 2012)

Apenas uma porção central desse espectro corresponde à radiação térmica, pois influencia e é influenciada pelo estado térmico da matéria. Essa porção abrange o infravermelho, o visível e parte do ultravioleta. Tendo em vista que, todo corpo com temperatura acima do zero absoluto emite radiação térmica, pode-se afirmar que todas as superfícies existentes em nosso ambiente estão em constante troca de calor por radiação. A radiação que atinge um determinado corpo pode ser oriunda de outras superfícies às quais ela esteja exposta ou pode ser proveniente de uma fonte especial, como o Sol (INCROPERA et al., 2011).

¹ O comprimento de onda é medido em metros, mas, devido a sua ordem de grandeza variável, é comum utilizar unidades submúltiplas do metro, como o micrômetro ($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$) e o nanômetro ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$).

A radiação emitida pelos corpos na superfície terrestre concentra-se no infravermelho, ou seja, nos comprimentos de onda mais longos da radiação térmica. Já a radiação emitida pelo Sol abrange comprimentos de onda mais curtos. A parcela da radiação eletromagnética que diz respeito à energia radiante emitida pelo Sol é chamada de radiação solar. Em termos de comprimentos de onda, a radiação solar ocupa aproximadamente a faixa espectral de 0,3 μm a 3 μm , ou seja, comprimentos de onda mais curtos da radiação térmica, conforme mostrado na Figura 3. Uma parcela da radiação solar é emitida como luz visível, que é a única capaz de sensibilizar o olho humano e é responsável pela definição das cores. O restante é emitido como radiação infravermelha (de onda curta) e ultravioleta. Segundo Steffen et al. (1996), essas três faixas do espectro são distribuídas conforme a Tabela 1.

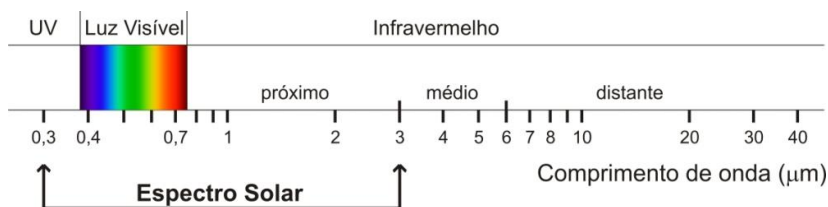


Figura 3 – Faixas do espectro abrangendo a radiação térmica.

(Fonte: Adaptado de Steffen et al., 1996)

A energia solar atravessa a atmosfera antes de incidir sobre a superfície terrestre. Nesse processo, parte da radiação é dissipada, ou seja, é absorvida pelos gases que compõem a atmosfera, como ozônio e vapores (KOENIGSBERGER et al., 1977). A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) definiu um espectro solar padrão com base em uma série de dados medidos nos Estados Unidos. A Figura 4 mostra a irradiação² solar, ou seja, a energia solar típica que chega à superfície da Terra (baseado na atmosfera dos Estados Unidos) em um dia claro de verão, segundo a norma ASTM G173-03

² A irradiação é definida como a taxa na qual a radiação incide sobre uma superfície, por unidade de área da superfície.

(ASTM, 2012). Dessa energia, cerca de 5% está na parcela ultravioleta do espectro, 43% é luz visível e 52% é energia infravermelha (USEPA, 2011).

Tabela 1 – Faixas do espectro que abrangem a radiação térmica.
(Fonte: Steffen et al., 1996)

| Faixa do Espectro | Subdivisão | Comprimento de onda (μm) |
|-------------------|--------------------|---------------------------------------|
| Ultravioleta (UV) | UV distante | 0,10 a 0,20 |
| | UV médio | 0,20 a 0,30 |
| | UV próximo | 0,30 a 0,38 |
| Luz Visível | Violeta | 0,39 a 0,45 |
| | Azul | 0,45 a 0,50 |
| | Verde | 0,50 a 0,56 |
| | Amarelo | 0,56 a 0,60 |
| | laranja | 0,60 a 0,63 |
| | Vermelho | 0,63 a 0,76 |
| | Infravermelho (IV) | IR próximo |
| IR médio | | 3,0 a 6,0 |
| IR distante | | 6,0 a 1.000 |

} Espectro solar

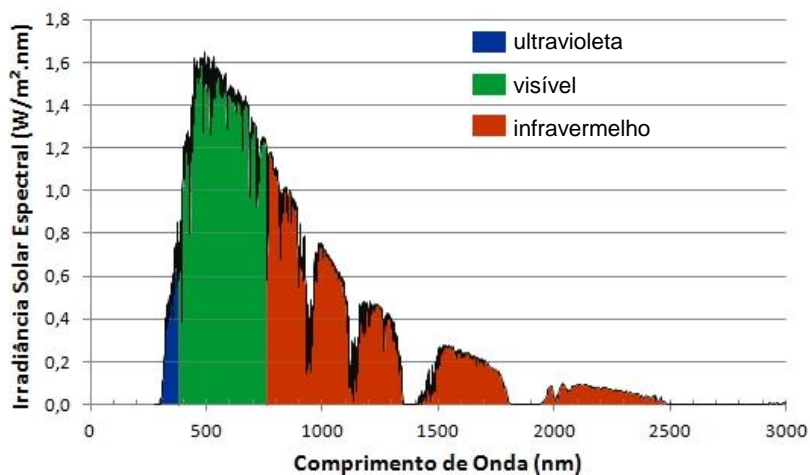


Figura 4 – Irradiação solar espectral.
(Fonte: Baseado nos dados de ASTM, 2012)

As propriedades das superfícies são fortemente dependentes da direção (dependência direcional) e do comprimento de onda (dependência espectral) da radiação. Porém, na maioria dos cálculos de interesse para a engenharia, trabalha-se com propriedades que representam médias direcionais e geralmente integradas ao longo de determinados comprimentos de onda.

Para a análise da refletância e da absorptância de superfícies de edificações, considera-se o Sol com principal fonte de radiação incidente. Por isso, costuma-se caracterizar as superfícies por sua refletância solar e absorptância solar. Tais propriedades são calculadas integradas ao longo dos comprimentos de onda abrangidos pelo espectro solar, ou seja, para radiações de onda curta.

No caso da emitância, considera-se que as superfícies das edificações emitem nos comprimentos de onda mais longos da radiação térmica, na parcela do infravermelho. Por isso, nos estudos de desempenho térmico de edificações, utilizam-se valores de emitância térmica integrados nos comprimentos de onda longa (infravermelho).

2.1.1 Refletância e Absortância Solar

A radiação que atinge uma superfície opaca (solo, pavimentos, paredes, telhados, etc.) segue dois destinos: ser refletida ou absorvida. A fração dessa radiação que será refletida depende da refletância da superfície. A fração absorvida pela superfície depende de sua absorptância. A soma dessas duas parcelas é igual ao total incidente, de forma que basta conhecer a refletância da superfície opaca para também saber sua absorptância, ou vice-versa.

Conforme já explanado, as propriedades superficiais dependem da distribuição espectral da radiação. Por isso, o valor da refletância (ou da absorptância) de uma superfície referente à radiação solar (ondas curtas) pode diferir do valor da mesma superfície referente à radiação de maiores comprimentos de onda (INCROPERA et al., 2011). Nos estudos a respeito do envoltório das edificações, considera-se a radiação solar como a parcela mais relevante.

A refletância à radiação solar é definida como o quociente da taxa de radiação solar refletida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície (ABNT, 2005a). Os valores de refletância variam de 0 a 1 (ou de 0 a 100%), sendo 1 (100%) o valor correspondente à superfície que reflete toda a radiação incidente.

Muitas pesquisas adotam valores de absorvância e refletância solar com base nas cores dos materiais, seguindo tabelas como as apresentadas pela norma brasileira NBR 15220-2 (ABNT, 2005b) e pelo livro de Fundamentos da ASHRAE (ASHRAE, 2005). Consagrou-se o conceito de que a refletância seria crescente na medida em que as cores fossem mais claras. Porém, pesquisas como a de Dornelles e Roriz (2007) demonstraram que este conceito está equivocado.

Os estudos de Dornelles e Roriz (2007) comprovaram que valores de refletância e absorvância apenas para a região visível do espectro solar não são confiáveis para caracterizar quais porcentagens da radiação solar são refletidas e absorvidas por uma superfície. Medições realizadas em amostras que apresentavam a mesma cor (mesma absorvância na região visível), mas com diferentes composições químicas (látex acrílica ou látex PVA, fosca ou semi-brilho) resultaram em diferentes valores de absorvância solar total. Por outro lado, algumas amostras com cores distintas apresentaram absorvâncias solares praticamente iguais, confirmando que absorvâncias e refletâncias não dependem apenas das cores.

Castro et al. (2003) consideravam fato conhecido que a cor de uma superfície forneceria boa indicação da sua capacidade de absorção da radiação solar e que quanto mais clara e brilhante, menor a absorção e maior a reflexão. Porém, sua pesquisa mostrou que esta afirmação não é completamente verdadeira. Eles realizaram medições de refletância (utilizando espectrofotômetro) em amostras pintadas com diversas cores de tinta. Os resultados de Castro et al. (2003) indicaram que a refletância das cores não é igual nas parcelas visível e infravermelho do espectro solar. Sendo assim, cores claras, com alta refletância no visível, podem apresentar baixa refletância no infravermelho, resultando em um valor total de refletância menos elevado que o esperado. Da mesma forma, algumas tintas de cor escura apresentaram refletância mais elevada na parcela do infravermelho do que no visível.

Verifica-se, portanto, que apenas a análise da cor de uma superfície não é suficiente para definir sua refletância. A refletância de uma superfície varia em função do comprimento de onda da radiação incidente. Por isso, o comportamento ótico de cada superfície pode ser representado através de um gráfico com a distribuição de suas refletâncias ao longo do espectro solar.

O mais indicado para conhecer a refletância de determinada amostra é fazer a medição dessa propriedade através de análise espectral. Para isso podem ser usados equipamentos chamados espectrofotômetros, que lançam feixes de radiação de diferentes comprimentos de onda (abrangidos pelo espectro solar) sobre a amostra estudada, e a energia refletida por ela é captada e medida. A partir dos valores de reflexão em cada comprimento de onda é possível calcular a refletância solar da amostra.

A refletância solar é uma propriedade já estudada exaustivamente por diversos pesquisadores em todo o mundo (AKBARI, 2003; AKBARI et al., 1997, 1999; DORNELLES et al., 2011, MUSELLI, 2010; SANTAMOURIS et al., 2007; SHEN et al., 2011; SUEHRCKE et al., 2008; SYNNEFA et al., 2006; YU et al., 2008). É unânime a conclusão de que, em regiões com clima quente, as edificações devem adotar preferencialmente revestimentos externos de alta refletância, a fim de favorecer seu desempenho térmico.

2.1.2 Emitância Térmica

Todos os corpos em temperatura acima do zero absoluto (zero Kelvin) emitem alguma quantidade de radiação térmica. Emitância é o termo utilizado para caracterizar a quantidade de energia emitida por uma superfície em comparação com um corpo negro ideal. A norma brasileira NBR 15220 (ABNT, 2005a) utiliza o termo emissividade para definir o quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura. Os valores de emitância podem variar de 0 a 1, sendo 1 o valor referente ao corpo negro.

Para um mesmo comprimento de onda de radiação, uma superfície apresenta o mesmo valor de emitância e absorptância

(considerando irradiação difusa ou superfície difusa). Porém, tais valores podem diferir muito quando avaliados para diferentes regiões espectrais. A emissão dos corpos que estão na superfície terrestre concentra-se no infravermelho, ou seja, nos comprimentos de onda mais longos da radiação térmica. Por isso, nos estudos relacionados ao desempenho térmico de edificações, utilizam-se valores de emitância integrados ao longo de comprimentos de onda longa (infravermelho).

Pode-se dizer que a emissão é um fenômeno de superfície. A razão para isso, segundo Incropera et al. (2011), é que na maioria dos sólidos a radiação emitida das suas moléculas internas é fortemente absorvida pelas moléculas adjacentes. Por isso, a radiação que é emitida de um sólido para seu entorno se origina das moléculas que se encontram a uma distância não superior a $1\mu\text{m}$ da superfície exposta. É possível então inferir que a emitância está diretamente relacionada ao acabamento da superfície de uma amostra.

Para os corpos compostos pelos materiais mais utilizados na construção civil, existem tabelas apresentando suas emitâncias térmicas (INCROPERA et al., 2011; ABNT, 2005b; ASHRAE, 2005). Tais tabelas indicam que os compostos de materiais de construção mais comuns (concreto, plástico, etc.) apresentam valores de emitância acima de 0,8. Emitâncias abaixo de 0,5 são apresentadas geralmente por superfícies de metal polido. Porém, parte desses valores tabelados é apenas estimado e, para uma grande quantidade de materiais, não existem sequer estimativas. Perin (2009) acredita que os valores de emitância apresentados na literatura podem não ser válidos para as superfícies reais de interesse, pois a emitância “é fortemente dependente da temperatura e das características da superfície, como rugosidade, oxidação, etc. No caso de tintas, pode-se citar a dependência ao tipo de substrato, da carga de corantes e metais, etc.”

Perin (2009) afirma que as propriedades superficiais de corpos sólidos dependem de muitas variáveis, como rugosidade superficial, grau de polimento, pureza do material, espessura do revestimento, temperatura, comprimento de onda da radiação. Por isso, existe grande dificuldade em especificar valores exatos para tais propriedades. Tais informações indicam que amostras de um mesmo material podem apresentar diferentes propriedades se tiverem diferentes acabamentos em sua

superfície. É o caso, por exemplo, de metais que podem estar polidos, foscos, oxidados, etc. Sendo assim, o mais apropriado seria medir a propriedade de uma amostra do material na forma em que será utilizado.

Avdelidis e Moropoulou (2003) também destacam que a emitância de uma amostra pode variar dependendo da sua temperatura superficial. Porém, no caso de materiais usados na construção civil, a variação de temperatura superficial não é tão elevada, se mantendo geralmente abaixo de 100°C. Outra informação a ser considerada é que os equipamentos de medição podem abranger diferentes comprimentos de onda da região infravermelha do espectro (infravermelho médio e distante) e, dependendo da faixa de medição, os resultados podem ser diferentes.

Ao contrário das pesquisas a respeito da refletância solar, não é tão elevado o número de pesquisas explorando os efeitos da emitância térmica das superfícies externas no desempenho térmico das edificações. A maior parcela das pesquisas relacionadas ao assunto avalia o uso de componentes com baixa emitância na composição da cobertura de edificações, em forros, funcionando como barreiras radiantes para diminuir o ganho de calor por radiação de onda longa (MEDINA; YOUNG, 2006; MICHELS et al., 2008; VITTORINO et al., 2003). Tais pesquisas afirmam que uma forma de reduzir os ganhos de calor pela cobertura seria reduzir a quantidade de energia térmica de onda longa irradiada para o interior dos recintos, pelo emprego de superfícies de baixa emitância.

Um número menor de pesquisadores avalia a emitância do revestimento externo das edificações. Synnefa et al. (2006), Halewood e Wilde (2008) e Gentle et al. (2011) observaram a emitância de superfícies, além de sua refletância. Eles apontaram que o uso de revestimentos com alta emitância seria indicado em climas predominantemente quentes. Nas coberturas, a emitância elevada permitiria mais facilmente a perda do calor armazenado no material, facilitando o efeito de resfriamento.

Synnefa et al. (2006) consideram que no período noturno, quando não há incidência de radiação solar, a emitância é o fator predominante no desempenho térmico dos revestimentos externos. Tais pesquisadores realizaram medições de temperatura superficial em amostras de materiais de revestimento com as cores branca (com alta refletância e

emitância) e prateada (com pigmentos de alumínio; refletância e emitância menores que as amostras brancas). Os resultados indicaram que os revestimentos prateados permaneceram mais aquecidos durante a noite e isso seria consequência da sua baixa emitância, devido à qual eles irradiam uma menor quantidade do calor absorvido durante o dia. Foi encontrada correlação entre a temperatura superficial média noturna e a emitância das amostras. Tendo isso em vista, eles concluíram que os revestimentos prateados não tinham desempenho térmico tão bom quanto os brancos.

Um dos poucos trabalhos que analisa mais detalhadamente a influência da emitância dos revestimentos externos, além da refletância, no desempenho das edificações é a pesquisa apresentada por Shi e Zhang (2011). Os pesquisadores destacam a pequena quantidade de informação disponível sobre o efeito da emitância na economia de energia dos edifícios. Eles simularam no programa EnergyPlus (versão 4.0) o modelo de uma residência condicionada artificialmente, variando a emitância e a refletância do revestimento do envoltório (envelope) de 0,1 a 0,9. Por usarem o termo envelope, pode-se concluir que os autores devem ter alterado as propriedades tanto de cobertura quanto de parede conjuntamente. As simulações utilizaram arquivos climáticos de diferentes cidades do mundo.

Como resultado, Shi e Zhang (2011) mostraram que, para diferentes características climáticas, diferentes propriedades superficiais proporcionam a maior economia de energia. No caso das cidades consideradas pelos autores como de clima tropical, a maior economia de energia ocorreu para revestimentos com maiores refletância e emitância (0,9). Para as cidades de clima frio ou montanhoso, a maior economia ocorreu para revestimentos com menores refletância e emitância (0,1). Porém, para cidades de clima temperado, os resultados foram muito variáveis. Em algumas delas a maior economia ocorreu com valores médios de refletância (entre 0,5 e 0,7) e emitância baixa (0,1). Em outras ocorreu com refletância alta (0,9) e emitância baixa (0,1).

A pesquisa de Shi e Zhang (2011) indica que não se deve generalizar o uso de materiais de revestimento de alta refletância e alta emitância sem conhecer as características climáticas do local. Confirma-se a necessidade de avaliar, para as regiões

climáticas brasileiras, quais seriam as propriedades superficiais mais adequadas.

2.2 Revestimentos para superfícies externas

Os materiais que compõem o envoltório das edificações interferem diretamente nas suas trocas de calor. Os revestimentos do envoltório são aqueles que determinam suas propriedades radiantes superficiais e, portanto, são os responsáveis pelos ganhos ou perdas de calor por radiação das edificações.

Grande parte das pesquisas a respeito de materiais de revestimento para a construção civil baseia-se na busca por materiais que proporcionem a redução da carga térmica da edificação, minimizando o desconforto por calor dos usuários e/ou reduzindo o consumo energético para resfriamento.

2.2.1 Revestimentos refletivos

Os revestimentos com alta refletância são aqueles que refletem a maior parte da radiação solar e por isso, durante o dia, ficam com temperaturas superficiais mais baixas que os demais materiais. Uma menor temperatura superficial em um componente construtivo resultaria em menor fluxo de calor transmitido ao interior de um ambiente, diminuindo a necessidade de gastos energéticos com condicionamento de ar para resfriamento. Com isso, quando utilizados em climas quentes, permitiriam a manutenção de ambientes confortáveis termicamente, resultando na melhoria do desempenho térmico das edificações. Além disso, por contribuírem com o não aquecimento do ar do seu entorno, os materiais refletivos seriam capazes de melhorar o microclima.

Muitos experimentos já foram realizados avaliando a eficiência dos materiais refletivos na redução do consumo energético para resfriamento em edificações. Akbari et al. (1997) avaliaram, em três edificações, a economia de energia para resfriamento decorrente da alteração da refletância de seus telhados. O estudo foi realizado na cidade de Sacramento, na Califórnia (EUA), nos meses de verão. Uma edificação

residencial e dois bangalôs escolares foram monitorados durante algumas semanas com a cobertura original (baixa refletância) e, posteriormente, após a pintura da cobertura com uma tinta de alta refletância, foram monitorados por mais algumas semanas (o tempo de monitoramento foi diferente em cada edificação). Os resultados indicaram que, durante toda a estação quente, a economia de energia para resfriamento poderia chegar a cerca de 80% na residência e cerca de 35% nos bangalôs escolares.

Na pesquisa de Akbari et al. (1997) também foram realizadas simulações computacionais, utilizando o programa DOE-2.1E, porém foram verificadas discrepâncias entre os valores simulados e os medidos. Eles consideraram que a economia de energia para resfriamento foi significativamente subestimada nas simulações, de forma que não puderam confiar nos resultados obtidos por simulação.

A pesquisa de Jo et al. (2010) apresenta um método que integra o uso de dados de um edifício real e a simulação computacional, a fim de analisar a economia de energia alcançada pelo uso de material refletivo na cobertura de um edifício comercial em Phoenix, Arizona. A cidade é caracterizada por altas médias de temperaturas e baixa umidade ao longo do ano. O edifício estudado passou por *retrofit* em metade do seu telhado, recebendo nessa parte da cobertura um material refletivo composto por agregado de mármore branco.

A cobertura da edificação foi monitorada por Jo et al. (2010), sendo obtidas as refletâncias e as temperaturas superficiais nas duas áreas de telhado (com e sem *retrofit*) em um período de 40 dias. Também foram medidas a temperatura do ar e a umidade relativa durante o período analisado. Dados climáticos obtidos em uma estação meteorológica, nos 40 dias de monitoramento, foram utilizados para calibrar um modelo computacional no programa EnergyPlus. As temperaturas superficiais do telhado medidas e simuladas foram comparadas e o resultado demonstrou que elas ficaram semelhantes, com diferenças consideradas aceitáveis. A análise de correlação entre temperaturas superficiais medidas e simuladas obteve coeficiente de determinação R^2 de aproximadamente 0,97.

O modelo computacional foi usado para simular a edificação em três casos: com a cobertura original, com 50% do telhado com material refletivo, com 100% do telhado com material refletivo. Os resultados de Jo et al. (2010) indicaram que

a adoção do material refletivo em 100% da cobertura reduziria o consumo anual de energia da edificação em 3,16%, correspondente a uma economia por área de 23,9 kWh/m². A economia mensal de energia para resfriamento ficaria entre 8,4% e 12,6%. O percentual de economia obtido não foi elevado talvez porque o consumo energético do edifício era muito alto e também devido ao isolamento térmico existente na cobertura. Apesar da economia pequena em termos percentuais, ela foi elevada em termos absolutos (redução de 245.120,94 kWh por ano).

Comparando os resultados dos estudos de Akbari et al. (1997) e Jo et al. (2010) verifica-se que ambos obtiveram redução do consumo de energia para resfriamento pelo uso de revestimentos de alta refletância na cobertura. Porém, tais pesquisas apontam valores muito diferentes de percentual de economia de energia obtido. Isso indica que não é possível determinar de forma generalizada o potencial de economia de energia para resfriamento pelo uso de revestimentos refletivos. Esse potencial depende de outros fatores, tais como o clima do local (quantidade de horas de desconforto por calor), a transmitância térmica e capacidade térmica do envoltório, as cargas térmicas internas da edificação, etc.

A fim de comparar o desempenho de diferentes materiais refletivos, Synnefa et al. (2006) realizaram medições de temperatura superficial em amostras de quatorze tipos de revestimentos brancos e prateados, disponíveis comercialmente para uso em edificações e no meio urbano. Também foram medidos, para comparação, um revestimento preto, telha de concreto aparente, mármore branco e cerâmica branca. Foram utilizados sensores de temperatura superficial conectados a *data-loggers* que mediam os valores a cada 10 minutos. Complementarmente, uma câmera de infravermelho foi usada para observar a distribuição térmica na superfície das amostras. A emitância e a refletância das amostras também foram medidas. Dados do ambiente foram obtidos em uma estação meteorológica localizada próxima ao local dos experimentos. As imagens termográficas (da câmera de infravermelho) mostraram que a temperatura na superfície das amostras era quase uniforme, apenas com um gradiente de temperatura nas bordas.

Synnefa et al. (2006) concluíram que, no período diurno, a temperatura superficial das amostras era influenciada principalmente por sua refletância solar. Por isso, durante o dia,

as amostras brancas (maior refletância) apresentaram menor temperatura superficial que as amostras prateadas. Já no período noturno, quando não há radiação solar, a emitância se tornava o fator predominante no desempenho térmico das amostras. Sendo assim, à noite, a amostra de maior emitância (que era também branca) tinha a menor temperatura superficial. A amostra com maiores temperaturas à noite era prateada, ou seja, a amostra com menor emitância. Para os autores, isso significou que os revestimentos brancos tiveram melhor desempenho que os prateados e que, quanto maiores os valores de refletância e emitância, mais frio o revestimento se mantém.

2.2.2 Revestimentos frios

A partir de estudos com resultados como o de Synnefa et al. (2006), os pesquisadores passaram a chamar de revestimentos frios aqueles que apresentam refletância e emitância elevadas (como por exemplo grande parte das tintas brancas). Tais materiais refletem grande parte da energia solar incidente e irradiam grande parte do calor absorvido, não aumentando consideravelmente sua temperatura superficial. Dentre as opções de materiais refletivos, basicamente apenas os revestimentos metálicos, ou com pigmentos metálicos, não poderiam ser considerados materiais frios. Nenhum dos estudos encontrados determina valores mínimos de refletância e emitância para que determinado revestimento possa ser considerado um revestimento frio, sendo esse um conceito aparentemente ainda em formação. A maior parte das pesquisas estuda a aplicação de tais materiais em coberturas ou pavimentos externos, pois estas seriam as superfícies com maior incidência de radiação solar.

Akbari et al. (2005) realizaram estudo buscando expandir a base de dados de monitoramento do desempenho de coberturas frias na Califórnia, com medições em uma escola primária, um armazém refrigerado de frutas e uma loja de varejo. Os resultados deste estudo, combinado a outros, permitiram a estimativa da economia obtida com a implementação do Programa Telhados Frios na Califórnia. A loja possuía cobertura composta por forro de madeira compensada e placas finas minerais de cor cinza. A cobertura da escola era composta por

placas finas minerais cinza sobre uma camada de isolamento térmico de 20 cm de lã de vidro. O armazém possuía um setor com cobertura metálica (sem pintura) e outro coberto com uma membrana preta.

As três edificações estudadas por Akbari et al. (2005) passaram por um *retrofit* que revestiu os telhados originais (com refletâncias entre 0,04 e 0,30) com revestimentos frios (com refletâncias entre 0,63 e 0,83). Os autores não apresentaram informações sobre a emitância dos revestimentos. Tais edificações foram monitoradas antes e após o *retrofit*, sendo medidas as temperaturas superficiais externa e interna, temperaturas do ar interna e externa, umidade relativa externa, velocidade do ar, insolação, consumo de energia com condicionamento de ar e consumo total de energia. Para estimar a economia de energia para resfriamento foram usados dados de consumo diário de energia com condicionadores e *chillers*. A economia de energia resultante do *retrofit* do telhado foi calculada pela diferença entre a média de consumo durante o período anterior e o posterior à alteração (considerando períodos de um mês). Porém, tendo em vista algumas diferenças apresentadas entre os dois períodos (diferenças nas cargas internas, na temperatura interna, nas condições operacionais e nas condições climáticas), foram realizados ajustes nos dados de consumo para resfriamento.

Os estudos de Akbari et al. (2005) apresentaram que, como resultado do *retrofit*, a maior economia na média do consumo energético com condicionamento artificial ocorreu no caso da loja: 52%. A economia obtida foi elevada mesmo nos horários de pico da demanda de condicionamento (redução de 51%). Na escola, a economia no consumo médio energético com condicionamento foi de aproximadamente 18% e, no pico da demanda, a economia média foi de 11%. No caso do armazém, a economia média no pico da demanda foi de 7%.

Além disso, Akbari et al. (2005) realizaram simulações computacionais (para a escola e a loja), utilizando modelos calibrados no programa DOE-2, a fim de extrapolar os resultados para diferentes climas da Califórnia. No caso do armazém refrigerado, a extrapolação para outros climas foi obtida a partir de correlações empíricas; a simulação não foi utilizada, pois o programa computacional apresenta limitações para simular o tipo de sistema de condicionamento presente no armazém. Os dados

medidos, juntamente com dados de simulação, foram utilizados para estimar a economia de energia pelo *retrofit* do telhado, em edificações similares, para todas as zonas climáticas da Califórnia. Esse estudo indicou que em todos os tipos de clima da Califórnia haveria economia de energia pela adoção de telhados frios nesses tipos de edificações. Essa economia seria sempre maior para a loja, provavelmente porque ela apresentava pouco isolamento na cobertura e muitas horas de uso de condicionamento artificial.

Romeo e Zinzi (2013) se propuseram a estudar o impacto da aplicação de material frio na cobertura de uma escola na Sicília, Itália. Segundo os autores, tal região apresenta edificações caracterizadas por uma alta demanda de energia para resfriamento. O telhado existente na edificação era de telha de concreto, escurecida pela sujeira acumulada ao longo dos anos, sem isolamento térmico. Tal cobertura passou por um *retrofit*, recebendo duas demãos de tinta branca com um acabamento lavável. A edificação foi monitorada, antes e após o *retrofit*, e esses dados foram utilizados na calibração de um modelo para simulação computacional no programa TRNSYS (Versão 16). Após a calibração, o modelo foi simulado com condicionamento artificial para um ano típico. Eles variaram a refletância da cobertura do modelo entre 0,25 (correspondendo à refletância antes do *retrofit*) e 0,82 (refletância depois do *retrofit*). Os valores intermediários de refletância também simulados foram 0,30; 0,45; 0,50; 0,60 e 0,70. O valor definido para a emitância foi 0,9, e tal dado não foi variado. Os autores também simularam o modelo com isolamento térmico na cobertura.

Os resultados das simulações de Romeo e Zinzi (2013) mostraram que, para o caso sem isolamento térmico na cobertura, a demanda por aquecimento foi maior que a por resfriamento. Nesse caso, a menor demanda total por condicionamento (aquecimento+ resfriamento) ocorreu para a refletância de 0,7. Isso significa que o material usado no *retrofit* não foi a melhor solução para a edificação estudada. Já para a simulação do modelo com isolamento térmico na cobertura, a demanda por resfriamento foi maior e a menor demanda total por condicionamento ocorreu para a refletância mais alta (0,82). Essa pesquisa demonstrou que, em locais com necessidade tanto de resfriamento quanto de aquecimento, não se deve

generalizar as vantagens do uso de materiais frios para qualquer edificação.

Brito Filho et al. (2011) buscaram avaliar os efeitos da refletância solar e também da emitância na temperatura superficial e no fluxo de calor de coberturas de edificações condicionadas artificialmente, para a cidade de São Paulo. As análises foram baseadas na análise do fluxo de calor da cobertura através de equações matemáticas. Foram estudadas duas configurações de cobertura (com e sem isolamento térmico) variando os valores de refletância e emitância de 0,3 a 0,9.

Os resultados de Brito Filho et al. (2011) mostraram, conforme já era esperado, que as coberturas com maior refletância apresentam melhor desempenho. As menores temperaturas superficiais foram obtidas pela cobertura sem isolamento térmico, com alta refletância e alta emitância. O menor fluxo de calor ocorreu na cobertura com isolamento, com alta refletância e alta emitância. Com isso verifica-se que a refletância e a emitância elevadas favoreceriam o desempenho térmico do caso estudado. Porém, destaca-se que os resultados demonstraram que as coberturas com menor temperatura superficial nem sempre correspondem àquelas com menor fluxo de calor para o interior. Os resultados mostraram ainda que, na cobertura sem isolamento térmico, a emitância praticamente não teve efeito sobre o fluxo de calor, apesar de ter influenciado a temperatura superficial.

Borge-Diez et al. (2013) testaram a aplicação de estratégias passivas de condicionamento para abrigos no Haiti. Um terremoto em tal país resultou em grande número de desabrigados, e na necessidade por abrigos de baixo custo. A impossibilidade do uso de resfriamento artificial faz com que a adoção de estratégias passivas seja a única opção para otimizar as condições térmicas desses ambientes, proporcionando condições dignas aos seus ocupantes. Os pesquisadores testaram três estratégias para a cobertura: uso de revestimento frio, isolamento térmico e ventilação natural. Eles realizaram simulação computacional no programa EnergyPlus, modelando a edificação (ventilada naturalmente) com as três estratégias e combinações delas. Os resultados apontaram o uso de revestimento frio e ventilação natural na cobertura (sem isolamento) como a combinação que proporcionou menores

temperaturas internas no modelo. Essa solução seria capaz de elevar o conforto térmico em até 16%.

É possível verificar que as pesquisas citadas têm em comum o fato de testarem a aplicação de revestimentos frios em coberturas de edificações. A cobertura sempre é destacada como sendo o componente do envoltório mais indicado para receber tal estratégia por estar mais exposto à radiação solar. Verifica-se ainda que a refletância é sempre a propriedade mais destacada, pois exerce maior influência sobre os resultados. Os estudos, tanto em edificações reais quanto com simulações computacionais, apontam que o uso de revestimentos com maior refletância resulta em menores temperaturas superficiais e em redução da demanda por resfriamento artificial. Isto é vantajoso no caso de edificações inseridas em climas predominantemente quentes. Porém, em regiões com clima temperado (com estação quente e estação fria) pode resultar em elevação na demanda por aquecimento.

2.2.3 Revestimentos com alta refletância ao infravermelho-próximo (revestimentos frios coloridos)

A maior parte dos materiais frios disponíveis comercialmente é branca ou de cor clara. Porém, tendo em vista a necessidade também do uso de cores escuras, em alguns países já foram desenvolvidos revestimentos de cores variadas com refletância mais elevada que os materiais convencionais. A cor do revestimento está diretamente relacionada à reflexão na parcela visível do espectro solar, porém a refletância de uma superfície depende não só da parcela visível, mas também da ultravioleta e do infravermelho-próximo (parcelas invisíveis). Sendo assim, é possível que uma superfície escura, que absorve grande parte da radiação solar visível, tenha alta reflexão na parte do infravermelho-próximo, mantendo um valor elevado de refletância total. Levinson et al. (2007b) afirmam que um revestimento que não é branco pode se tornar mais “frio” pela maximização da refletância no infravermelho-próximo, o que não afeta a sua cor.

Tais revestimentos podem ser produzidos pela adição, em sua composição, de pigmentos especiais caracterizados por apresentarem alta refletância na parcela do infravermelho-

próximo do espectro solar. Com a adição de pigmentos especiais, a refletância espectral de um revestimento pode ser controlada de forma a elevar sua refletância na parcela do infravermelho-próximo, mantendo a cor do revestimento (GONOME et al., 2014). Alguns pesquisadores têm denominado tais revestimentos como revestimentos frios coloridos.

A Figura 5 mostra dois exemplos de revestimentos de alta refletância no infravermelho-próximo comparados a revestimentos convencionais de mesma cor, pesquisados por Synnefa et al. (2007b). Verifica-se que os valores de refletância na parcela visível do espectro são muito semelhantes para os dois revestimentos de mesma cor. Isso indica que, para um observador, as duas superfícies pareceriam iguais. Porém, o revestimento chamado de frio apresenta maior refletância na parcela do infravermelho-próximo (NIR), totalizando uma maior refletância solar (ρ).

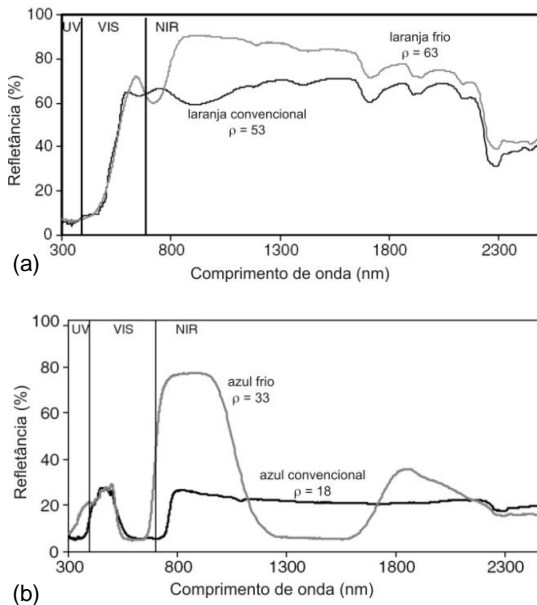


Figura 5 – Refletância em função do comprimento de onda: cor laranja (a); cor azul (b). (Fonte: Traduzido de Synnefa et al., 2007b)

Com a ajuda de um parceiro industrial, Synnefa et al. (2007b) desenvolveram revestimentos frios coloridos, usando pigmentos especiais com alta reflexão ao infravermelho. Tais revestimentos foram aplicados em azulejos de concreto brancos, criando protótipos para os experimentos. Nesse estudo foram realizadas medições de propriedades ópticas (refletância e emitância) e de temperatura superficial de dez protótipos de revestimentos frios coloridos, comparando-os com revestimentos convencionais das mesmas cores. Dados meteorológicos (temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar global e difusa) foram obtidos em uma estação próxima ao local do experimento.

As medições de Synnefa et al. (2007b), de refletância ao longo do espectro solar, mostraram que as amostras de revestimento frio e convencional, de cor correspondente, apresentaram comportamento muito similar na parte visível do espectro (comprovando que apresentavam a mesma cor), porém mostraram-se diferentes na reflexão do infravermelho. Em todos os casos, o revestimento frio apresentou refletância solar (calculada) maior que o convencional. Em geral, as cores mais escuras foram as que tiveram refletância com maior diferença entre revestimento frio e convencional. Na cor preta, o revestimento convencional apresentou refletância solar de 5% e o revestimento frio apresentou refletância solar de 27%. Já na cor azul claro a diferença foi a menor, com refletância solar de 40% no revestimento convencional e de 42% no revestimento frio. Quanto às medições de emitância, elas indicaram que todos os revestimentos tinham emitância de 0,88 (com precisão de $\pm 0,02$), de forma que se pôde concluir que os pigmentos refletivos não afetaram a emitância dos revestimentos.

As análises de desempenho térmico de Synnefa et al. (2007b) indicaram que os revestimentos com maior refletância apresentaram menores temperaturas superficiais no período diurno. Durante o dia, todos os revestimentos frios tiveram temperatura superficial menor que os revestimentos convencionais de cor correspondente. A maior diferença de temperatura (entre frio e convencional) foi de 10,2°C e ocorreu no caso da cor preta. A menor diferença de temperatura superficial entre cores correspondentes ocorreu no caso da cor verde. As medições de temperatura superficial foram realizadas em diferentes meses do ano, o que permitiu verificar que a

diferença de temperatura entre revestimento frio e convencional correspondentes diminui de agosto (verão) para dezembro (inverno), conforme diminui a radiação solar global. No inverno, essa diminuição da diferença de temperatura entre os tipos de revestimento (frio e convencional) é até desejável e se deve ao fato de que no inverno há menor intensidade de radiação solar incidente.

Com relação ao estudo de Synnefa et al. (2007b), é preciso ressaltar que, apesar dos pesquisadores chamarem de revestimentos frios a todos os revestimentos com pigmentos especiais de alta reflexão ao infravermelho, nem todos eles efetivamente apresentavam alta refletância solar. Todos apresentaram maior refletância do que o revestimento sem adição do pigmento especial, porém alguns deles continuavam com valores de refletância que podem ser considerados baixos, como 27% para os revestimentos frios das cores preta, marrom escuro e verde. Sendo assim, é preciso rever a definição conceitual de revestimentos frios.

Um outro estudo, de Synnefa et al. (2007a), teve o objetivo de avaliar, através de simulação, o potencial de economia de energia e o impacto no conforto térmico resultantes do uso de revestimentos frios em telhados, em edificações residenciais, em várias condições climáticas do mundo. Foram realizadas simulações para 27 cidades do mundo, representando diferentes condições climáticas. Os autores utilizaram o programa TRNSYS nas simulações e os dados climáticos foram obtidos na base de dados METEONORM (2011). O modelo simulado foi de uma edificação térrea, com 100m² de área de telhado (10m X 10m) e altura de 3m. Todas as paredes possuíam janela de 4m² (13,3% da área da parede). Adotou-se taxa de infiltração de ar de 0,8 trocas/hora. As simulações foram realizadas tanto sem condicionamento artificial (para avaliar condições de conforto térmico) quanto com o condicionamento (para verificar consumo de energia), sendo nesse último caso adotadas como limites de resfriamento e aquecimento as temperaturas de 26°C e 21°C, respectivamente. A emitância utilizada no modelo foi 0,9 e a refletância solar foi variada de 0,2 (caso base) para 0,6 e para 0,85.

Os resultados de Synnefa et al. (2007a), conforme já era esperado e comprovado por outras pesquisas, indicaram que o aumento da refletância teve como consequência a diminuição da

carga para resfriamento. Também se verificou que, nos locais onde a carga para resfriamento do caso base era pequena, o aumento da refletância resultou nas maiores porcentagens de redução da carga térmica, apesar de representarem os menores valores absolutos. Por exemplo, em uma das cidades (Cidade do México) a carga para resfriamento baixou de 9,0 para 2,2 kWh/m², representando uma redução de 6,8 kWh/m², que corresponde a uma diminuição de 75%. Já em outra cidade (Abu Dabi) onde a carga para resfriamento diminuiu de 265,4 para 236,0 kWh/m², ou seja, redução de 29,4 kWh/m², isso representou uma diminuição de apenas 11%. Destaca-se ainda que o potencial de economia foi maior para cidades com clima predominantemente quente, onde a necessidade de resfriamento é maior que a de aquecimento.

Para a análise de conforto térmico, Synnefa et al. (2007a) estabeleceram duas temperaturas limites superiores, 27 e 29°C, e calcularam a quantidade de horas do ano nas quais as temperaturas internas dos modelos ultrapassaram esses limites (horas de desconforto por calor). A umidade relativa do ar não foi considerada. Como resultado, eles verificaram que o aumento na refletância resultou sempre em redução nas horas de desconforto por calor. Também foram verificadas as temperaturas máximas em cada modelo, e obteve-se que o aumento na refletância resultou em diminuição nas temperaturas máximas de todos os casos.

Além disso, para apresentar resultados representativos, Synnefa et al. (2007a) escolheram cinco cidades (dentre o total de 27 cidades estudadas) com climas diferentes: Abu Dabi (Emirados Árabes Unidos), Nova Deli (Índia), Casablanca (Marrocos), Damasco (Síria) e Tóquio (Japão). Para cada uma das cinco cidades, foram realizadas análises paramétricas variando os valores de refletância e transmitância de parede e cobertura. Com essas análises paramétricas, foi possível verificar que quanto maior a transmitância da cobertura, maior o impacto do aumento da refletância na economia de energia. Verificou-se também que a influência da transmitância na economia de energia não se dá de forma linear. Outro resultado é que o aumento da refletância teve maior impacto na redução da carga de resfriamento do que no aumento da carga de aquecimento. Com isso, justificar-se-ia o uso de materiais frios mesmo em climas com período de calor e período de frio.

Ressalta-se aqui que, apesar de defender que os revestimentos frios devem apresentar alta emitância, Synnefa et al. (2007a) não procuraram comprovar esse conceito pois não variaram tal parâmetro. Sendo assim, o estudo tratou basicamente da influência da refletância e da transmitância no desempenho térmico do modelo.

Levinson et al. (2007a) também estudaram revestimentos coloridos com alta refletância no infravermelho-próximo, para uso em coberturas, destacando que muitas vezes os proprietários preferem telhas com cor diferente do branco, por questões estéticas, sendo importante a opção de materiais coloridos que favoreçam o desempenho térmico das edificações. Por isso, esses pesquisadores verificaram o desempenho de tais revestimentos, fabricados por uma indústria americana. Para a pesquisa, ocorrida na cidade de Riverside, Califórnia (EUA), foram construídos protótipos de madeira (com paredes pintadas de branco) com telhas de concreto pintadas de diferentes cores. Foram realizadas comparações de revestimentos convencionais com os revestimentos frios, medindo-se valores de temperatura superficial interna e externa das telhas, a temperatura do ambiente interno no protótipo e variáveis ambientais. Os revestimentos convencionais possuíam refletância variando entre 0,04 e 0,33, os revestimentos frios apresentavam refletância variando de 0,41 a 0,48 e todos apresentavam emitância de aproximadamente 0,90.

Como resultado, Levinson et al. (2007a) verificaram que as amostras pintadas com material frio apresentaram temperaturas superficiais sempre menores que as pintadas com material convencional (diferenças de até 14°C), concluindo que seria possível obter bom desempenho térmico utilizando materiais coloridos. O uso dos revestimentos frios resultou em reduções nas temperaturas superficiais das telhas e também nas temperaturas do ar interno. Os autores ainda estimaram a economia de energia com condicionamento artificial pelo uso dos materiais frios em residências de três cidades do estado da Califórnia. Por esses cálculos, o uso dos revestimentos frios na cobertura de uma determinada casa típica resultaria na economia da energia para resfriamento em cerca de 5% no caso da cidade de Fresno, 6% em San Bernardino e 1% em San Diego. Eles também demonstraram que quanto menor o isolamento térmico

da cobertura, maior a influência da refletância do revestimento na economia de energia.

A pesquisa de Halewood e Wilde (2008) teve como objetivo verificar a contribuição do uso de tintas frias na redução da necessidade de resfriamento em três cidades com clima temperado. Para isso foi utilizada a simulação computacional no programa EnergyPlus definindo um modelo e variando as propriedades superficiais dos revestimentos. Os valores usados para representar uma pintura convencional de cor cinza claro foram: absorvância de 0,3 (refletância de 0,7) e emitância de 0,9. Para representar a pintura fria, as propriedades usadas foram: absorvância de 0,1 (refletância de 0,9) e emitância de 0,999. É preciso observar que, de acordo com outras pesquisas onde há a medição das propriedades superficiais de tintas, a refletância de 0,7 em uma tinta convencional ocorre geralmente no caso da cor branca ou eventualmente outra cor muito clara (marfim, por exemplo). Quanto à refletância de tintas frias, em nenhum trabalho consultado houve resultado de medição de refletância igual a 0,9, mesmo no caso das tintas frias brancas. Além disso, nenhum trabalho aponta a existência de uma tinta com emitância igual a 0,999. Sendo assim, esse material simulado por Halewood e Wilde (2008) pode ser considerado fictício, apenas usado para comparação.

Os resultados de Halewood e Wilde (2008) mostraram que o modelo simulado com pintura fria obteve temperaturas inferiores ao modelo com pintura cinza no período diurno. Durante a noite, ambos obtiveram temperaturas muito semelhantes. Eles também verificaram que, além de reduzir a energia necessária para resfriamento dos modelos, o uso da pintura fria aumentou a energia para aquecimento. Dessa forma, seu uso seria benéfico apenas em cidades com predominância da necessidade de resfriamento.

Uma das pesquisas mais recentes analisando revestimentos com alta refletância na parcela do infravermelho-próximo é a de Revel et al. (2013). Os pesquisadores tinham como objetivo elevar a refletância no infravermelho-próximo de tintas e de azulejos cerâmicos, pela adição em sua composição de partículas específicas em nanoescala. Foram produzidos nove azulejos cerâmicos, de cor marrom escura, aditivados com material de alta refletância no infravermelho-próximo. Medindo e calculando a refletância de tais azulejos foi possível comprovar

que eles obtiveram maior refletância solar que azulejos convencionais de mesma cor (de 7% a 10% a mais). No caso das tintas, foram preparadas amostras de quatro tintas de cor verde, aditivadas com dois tipos de óxidos nanoestruturados. Assim como no caso dos azulejos, as tintas aditivadas obtiveram maior refletância solar que as tintas convencionais. Porém, em alguns casos (dependendo do tipo de aditivo), a tinta aditivada ficou com diferente aparência de cor (ficou mais clara) em relação à tinta original, o que não era desejado.

No Brasil, foram encontradas poucas pesquisas, e ainda em estágio inicial, a respeito de materiais frios. Destacam-se as pesquisas de Uemoto et al. (2010) e Dornelles et al. (2010a; 2010b; 2010c). Ambas analisaram amostras de tintas frias coloridas, comparadas a amostras de tintas convencionais de mesma cor. As pesquisas brasileiras têm se concentrado na caracterização de tintas frias, faltando uma análise mais detalhada sobre a eficácia de sua aplicação na variada realidade climática do Brasil.

Uemoto et al. (2010), que realizaram pesquisa em São Paulo, apresentaram estudo que analisa tintas frias coloridas. Eles compararam o desempenho de três cores de tintas convencionais e tintas frias aplicadas em telhas cimentícias. Foram realizadas medições de refletância que indicaram que as amostras de mesma cor, de material convencional e frio, possuíam refletância visível muito semelhante, porém o revestimento frio possuía maior refletância na parcela infravermelha do espectro solar.

Uemoto et al. (2010) também realizaram medições de temperaturas superficiais e temperatura do ar abaixo das amostras. Tal experimento foi realizado em laboratório (sem influência do clima externo), com as amostras expostas ao calor de lâmpadas dentro de uma caixa fechada. Foram utilizadas lâmpadas de radiação infravermelha de 250 W. As medições de temperatura indicaram que as amostras revestidas com tinta fria apresentaram temperatura superficial externa e interna sempre inferior às amostras com pintura convencional de mesma cor. No caso da temperatura do ar abaixo das amostras, os valores foram semelhantes na maior parte dos casos; apenas para a cor mais escura (marrom) houve uma diferença significativa entre a tinta fria e a convencional (5°C). Deve-se ressaltar que os pesquisadores utilizaram lâmpadas cuja radiação emitida não é

semelhante ao espectro solar. Dessa forma, os resultados obtidos nas medições de temperatura superficial relacionam-se apenas à radiação infravermelha e não correspondem totalmente ao que ocorreria no caso da exposição das amostras à radiação solar.

Dornelles et al. (2010a) analisaram tintas convencionais e tintas frias de cinco cores, comparando suas refletâncias espectrais e refletância solar. Os resultados mostraram que, no caso das cores branca, terracota e champanhe, a tinta convencional apresentou refletância solar mais alta que as tintas vendidas como sendo tintas frias. No caso das cores marrom e amarelo, a tinta “fria” apresentou refletância solar um pouco mais elevada que a tinta convencional, mas com diferença muito pequena (menos que 5% de diferença). Com tais resultados pode-se afirmar que as tintas apresentadas pelo fabricante como sendo frias, de fato não o são, pois não demonstraram ter refletância mais elevada que tintas convencionais.

Dornelles et al. (2010a) realizaram ainda simulações computacionais de um modelo representativo de uma residência unifamiliar térrea. O mesmo modelo foi simulado com diferentes valores de refletância em seu telhado, correspondendo às tintas analisadas na pesquisa. A simulação foi realizada com arquivos climáticos de duas cidades: Belém (clima quente e úmido) e São Raimundo Nonato (clima quente e seco). Conforme já seria esperado para climas quentes, os modelos com refletância mais alta na cobertura obtiveram menor consumo energético para resfriamento. Os melhores resultados foram obtidos para os casos com cobertura de cor branca e os piores resultados para os casos com cobertura de cor terracota e marrom.

Os estudos brasileiros apresentados se mostram como as primeiras iniciativas de pesquisa com materiais frios no Brasil. Porém, eles ainda não consideraram algumas questões relevantes como a emitância do revestimento, o comportamento dos materiais em ambiente real e sua degradação pela exposição às intempéries. Também não estudaram as vantagens e desvantagem do uso de revestimentos com alta refletância e emitância em cidades com climas temperados.

2.2.4 Revestimentos termocrômicos

Os estudos a respeito do uso de revestimentos frios demonstram seu potencial para redução da temperatura superficial e, conseqüentemente, manutenção de ambientes menos aquecidos, necessitando menor consumo de energia para resfriamento. Porém, algumas pesquisas (SYNNEFA et al., 2007a; HALEWOOD; WILDE, 2008) demonstraram que o uso de revestimentos com alta refletância também provoca aumento da demanda por aquecimento em regiões com temperaturas baixas no período de inverno. Por isso, algumas outras opções de materiais têm sido desenvolvidas e testadas para favorecer o desempenho térmico no período de calor, mas evitando a penalidade no período frio.

No período de verão são preferíveis os revestimentos com maior refletância, já no inverno, os de menor refletância. Por isso, Ma et al. (2001) consideraram necessário o desenvolvimento de novos tipos de revestimento, capazes de alterar sua cor reversivelmente. Isso foi possível através de pigmentos chamados termocrômicos, adicionados a materiais de revestimento.

Os materiais termocrômicos são capazes de reagir termicamente ao seu ambiente. Esses materiais possuem em sua composição pigmentos capazes de mudar de cor (de colorido para incolor), de forma reversível, de acordo com diferentes faixas de temperatura (KARLESSI et al., 2009). O fenômeno que provoca essa alteração reversível da cor do pigmento termocrômico inclui a conversão do tipo de cristalino, perda de água de algumas substâncias, equilíbrio do movimento entre elétrons, reações das moléculas e variação do pH, que são dependentes da temperatura (MA et al., 2001). Certos materiais têm sua cor alterada quando submetidos a temperaturas elevadas (superiores a 80°C no caso do índigo, por exemplo). Porém, existem pigmentos que sofrem esse fenômeno em temperaturas mais baixas, dentro da faixa de temperatura apresentada normalmente pelo ambiente (aproximadamente 20°C ou 30°C, por exemplo).

Ma et al. (2001) fizeram a combinação de alguns tipos de pigmentos termocrômicos coloridos com materiais de revestimento brancos e chamaram essa combinação de revestimentos camaleão. Quando expostos à variação natural da

temperatura, os materiais testados sofreram alteração da sua cor ao ultrapassarem aproximadamente 18°C. Ao atingirem essa temperatura, os materiais tiveram suas cores (verde, azul e rosa) alteradas para branco, sendo que, quando a temperatura voltou a um valor abaixo de 18°C, o material retornou à sua cor original. Os pesquisadores também verificaram que mesmo após a repetição desse processo natural por mais de 1000 vezes, as propriedades termocrômicas não se alteraram.

Ma et al. (2002) realizaram medições da temperatura superficial dessas mesmas amostras utilizando termografia infravermelho. Eles verificaram que, quando expostas ao sol, abaixo da temperatura de alteração de cor, as amostras com revestimento camaleão apresentaram temperatura superficial similar às com revestimento comum. Porém, quando acima da temperatura de alteração de cor, as amostras com revestimento camaleão apresentaram temperatura superficial cerca de 4°C mais baixa que as com revestimento comum. Tais resultados indicariam que os revestimentos camaleão poderiam atender de forma mais eficaz à necessidade por edificações mais confortáveis termicamente.

Ma e Zhu (2009) desenvolveram um cimento termocrômico através da combinação de pigmentos termocrômicos microencapsulados com cimento Portland. A temperatura de alteração de cor dos pigmentos era de 30°C. Os pesquisadores moldaram amostras do cimento termocrômico de 10x10x40mm, que foram submetidas à variação de temperatura em uma caixa experimental. Elas tiveram suas cores (vermelho, verde e azul) alteradas para branco apenas ao alcançarem temperaturas mais elevadas que o desejado: 58°C no caso das amostras vermelha e verde, e 42°C na amostra azul. Os autores concluíram que o fato da temperatura de alteração de cor do cimento termocrômico ter sido superior à do pigmento termocrômico deve ter sido consequência da maior capacidade térmica e menor condutividade térmica da pasta de cimento.

Posteriormente, Ma e Zhu (2009) produziram um novo cimento termocrômico, alterando o solvente da composição do pigmento termocrômico, a fim de diminuir sua temperatura de alteração de cor. Com essa nova composição, eles obtiveram o cimento termocrômico alterando de cor ao alcançar 26°C para as amostras vermelho e verde e 17°C para a amostra azul. Estes novos valores de temperatura de alteração de cor indicam um

cimento termocrômico mais adequado para o uso em edificações, pois estão mais próximos às temperaturas limites de desconforto do homem.

A pesquisa de Karlessi et al. (2009) avaliou seis cores de revestimentos termocrômicos desenvolvidos para uso em edificações, comparando-os com materiais convencionais e materiais frios das mesmas cores. A temperatura de transição da cor dos materiais termocrômicos era de 30°C, de forma que abaixo dessa temperatura o material permanecia colorido e acima dela ele se tornava mais claro (com o processo de transição durando cerca de 20 minutos). Para a comparação, os pesquisadores mediram as temperaturas superficiais dos materiais aplicados em azulejos de concreto, e calcularam a média diurna (6h – 20h), a média das máximas diurnas e a média noturna (20h - 6h).

Os resultados obtidos por Karlessi et al. (2009) mostraram que as temperaturas superficiais médias diurnas dos revestimentos termocrômicos foram menores do que as apresentadas pelos revestimentos convencionais e frios. As temperaturas superficiais médias noturnas apresentaram diferenças bem menos significativas do que as diurnas, pois a emitância dos revestimentos era semelhante. As emitâncias medidas nas amostras foram:

- materiais convencionais: de 0,90 a 0,91;
- materiais frios: de 0,83 a 0,88;
- materiais termocrômicos na fase colorida: de 0,88 a 0,92;
- materiais termocrômicos na fase clara: de 0,86 a 0,91.

Os valores de refletância das amostras são mostrados na Tabela 2. Comparando a refletância dos revestimentos termocrômicos em seus dois estados (colorido e descolorido), foram verificadas diferenças de mais de 30% no caso das cores mais escuras (verde, marrom, preto e cinza) e de 3,8% na cor mais clara (amarelo).

Em todos os estudos apresentados, os revestimentos não foram testados em um período frio, para verificar se o uso do material termocrômico realmente evitaria as penalidades no aquecimento, proporcionando um melhor resultado global do que o material frio. Os pesquisadores também não discutiram a questão estética do uso de um revestimento que muda de cor irregularmente.

Tabela 2 – Refletância solar de revestimentos termocrômicos
(Dados obtidos em Karlessi et al., 2009).

| Cor do revestimento | Refletância solar | | | |
|---------------------|-------------------|------------------|----------|-------|
| | Fase colorida | Fase descolorida | Aumento | |
| | | | Absoluto | % |
| Verde | 0,51 | 0,73 | 0,22 | 43,14 |
| Amarelo | 0,78 | 0,81 | 0,03 | 3,85 |
| Marrom | 0,55 | 0,76 | 0,21 | 38,18 |
| Preto | 0,40 | 0,53 | 0,13 | 32,50 |
| Azul | 0,59 | 0,71 | 0,12 | 20,34 |
| Cinza | 0,55 | 0,73 | 0,18 | 32,73 |

2.2.5 A degradação dos revestimentos

Com a exposição dos revestimentos externos às intempéries e a contaminação por partículas que aderem à sua superfície, tais revestimentos podem se deteriorar ao longo dos anos. O acúmulo de sujeira e o crescimento microbiológico na superfície podem não ser permanentes. Porém, a insolação (radiação UV), a umidade e alguns poluentes podem provocar danos permanentes aos revestimentos. Essa deterioração é percebida geralmente pelo escurecimento e perda do brilho da superfície. Alguns estudos demonstram que essa modificação não é só estética, mas também afeta as propriedades da superfície. Tais estudos se concentram principalmente em analisar alterações na refletância solar de superfícies expostas, sendo pouco analisada a influência na emitância.

Bretz e Akbari (1997) realizaram pesquisa para verificar a alteração da refletância solar ao longo do tempo, em revestimentos de coberturas expostas naturalmente às intempéries. Os pesquisadores mediram, em laboratório, a refletância de amostras de três tipos de revestimentos brancos e tais valores foram considerados como as refletâncias das superfícies sem degradação. Eles também realizaram medições em telhados, que utilizavam os revestimentos analisados, de residências nas cidades de Sacramento, Vallejo, Concord e Stockton (na Califórnia, USA). Os telhados avaliados estavam expostos (sem limpeza) por períodos que variavam de 2 meses a

6 anos. Comparando a refletância dos telhados com mesmo tipo de revestimento os pesquisadores avaliaram sua degradação ao longo do tempo.

Bretz e Akbari (1997) verificaram que o maior impacto na diminuição da refletância ocorria no primeiro ano de uso do revestimento. Em média, a refletância diminuiu 15% no primeiro ano, e continuou diminuindo de forma mais gradativa, e menos intensa, nos anos seguintes. Os pesquisadores analisaram ainda o efeito da limpeza dos telhados em sua refletância. Com isso, concluíram que lavar o telhado, na maior parte dos casos, propiciou significativo incremento na refletância. Com a limpeza regular das superfícies, a refletância poderia ser recuperada entre 90% e 100%.

A pesquisa de Synnefa et al. (2006), que realizou medições de temperatura superficial em amostras de quatorze tipos de revestimentos refletivos, considerou o efeito da degradação natural sobre as amostras expondo-as por 2,5 meses aos agentes naturais (poluição atmosférica, contaminação biológica, radiação ultravioleta, penetração de umidade, variação brusca de temperatura). Durante o período do experimento, as condições meteorológicas foram caracterizadas por céu claro, baixas velocidades do vento (<5m/s) e umidade relativa do ar variável (entre 18% e 89%) com média de aproximadamente 55%.

Os resultados de Synnefa et al. (2006) apontaram que parte das amostras teve variação da sua aparência (alteração na cor) ao longo do período de exposição, e estas amostras tiveram aumento da sua temperatura superficial no período diurno (quando comparadas à temperatura do ar). Já no período noturno, não houve alterações significativas de desempenho térmico após a exposição. Com isso, os pesquisadores concluíram que a degradação natural teve impacto direto na refletância das amostras, mas não em sua emitância.

Em outro artigo, Synnefa et al. (2007b) também verificaram o efeito da exposição natural de revestimentos às condições ambientais. Eles estudaram amostras de revestimentos frios de dez cores, comparando-os com revestimentos convencionais de mesma cor (totalizando vinte amostras). A análise foi baseada na medição da refletância solar e da emitância dos revestimentos antes e após sua exposição natural por um período de três meses.

Os resultados de Synnefa et al. (2007b) mostraram que os revestimentos com maior refletância inicial foram os que sofreram maior diminuição no valor da refletância após a exposição. O maior impacto ocorreu no revestimento frio de cor laranja, que teve sua refletância diminuída de 63% para 58%. Já o revestimento frio de cor preta não sofreu alteração no valor da refletância (12%) após os três meses. Além disso, verifica-se que os revestimentos frios sofreram maior impacto com a exposição do que os revestimentos convencionais. Das dez amostras de revestimento frio, apenas uma (preta) não sofreu alteração em sua refletância solar. Já nas amostras de revestimento convencional, sete tiveram sua refletância preservada após os três meses. Porém, os autores destacam que, mesmo após a degradação natural, os revestimentos frios continuaram apresentando refletância solar maior que os revestimentos convencionais. Quanto à emitância, os pesquisadores afirmam que as amostras tiveram o valor inicial mantido após os três meses.

A pesquisa de Synnefa et al. (2007b) verificou ainda a eficácia da limpeza do material na recuperação da sua refletância. Após o período de exposição natural, as amostras foram limpas usando água e esponja, e a refletância solar foi novamente medida. Os pesquisadores consideraram que a recuperação (aumento) do valor da refletância após a limpeza das amostras foi significativa (cerca de 93% do valor inicial). Isso indicaria que a degradação ocorrida não era permanente e sim decorrente do acúmulo de sujeira.

Ichinose et al. (2009) consideraram que existem vários estudos demonstrando os efeitos positivos do uso de revestimentos com alta refletância (conservação de energia e minimização dos efeitos de ilha de calor). Porém, eles verificaram que poucos estudos investigam as mudanças nas propriedades superficiais dos revestimentos ao longo dos anos e buscam métodos de manter o desempenho de pinturas com alta refletância. Por isso, tais pesquisadores realizaram estudo para investigar o uso de revestimentos frios, analisando o efeito do envelhecimento das pinturas com o passar do tempo.

Ichinose et al. (2009) realizaram experimentos no subúrbio de Tóquio, onde o clima é moderado e úmido. Eles prepararam amostras que foram comparadas utilizando revestimento com revestimento convencional e com revestimento de alta refletância

no infravermelho-próximo (frio), e ainda utilizando acabamento com e sem um foto-catalisador, que seria capaz de preservar a refletância da superfície. O foto-catalisador evitaria a contaminação orgânica, devido a uma capacidade de auto-limpeza, consequência de sua propriedade de hidrofílico (que atrai água). Foram realizadas medições de temperatura superficial das amostras. Verificou-se que, além dos revestimentos frios apresentarem menor temperatura que os convencionais, aqueles que receberam acabamento com foto-catalisador apresentaram temperaturas superficiais um pouco menores que os sem foto-catalisador.

Para avaliar a degradação ao longo do tempo, Ichinose et al. (2009) utilizaram como parâmetros a refletância, brilho e tonalidade das amostras. Os pesquisadores verificaram que a pintura de alta refletância com foto-catalisador foi a que melhor conservou o brilho e que teve menor queda no valor de refletância. Através dos resultados, percebe-se também que os revestimento de maior refletância inicial são os que sofreram maior diminuição de sua refletância com a exposição ao longo do tempo.

Os resultados de Ichinose et al. (2009) permitem concluir que as pinturas externas sofrem uma degradação natural que resulta na diminuição de sua refletância e, portanto, tal degradação não deve ser negligenciada. Superfícies pintadas com tintas de alta refletância no infravermelho e com foto-catalisador em seu acabamento são capazes de preservar sua refletância e, conseqüentemente, favorecem o desempenho térmico da edificação por mais tempo que a pintura comum.

Revel et al. (2013) realizaram testes com o propósito de identificar os principais fatores naturais que afetam a refletância de tintas e de azulejos. Os pesquisadores prepararam amostras de nove cores de azulejos cerâmicos e de sete cores de tintas acrílicas (aplicadas em placas de concreto), que ficaram expostas às condições climáticas (radiação solar, chuva e vento) e ao acúmulo de poeira por quatro meses. O experimento demonstrou que no caso dos azulejos, as condições climáticas tiveram pouca influência sobre as amostras. Apenas a poeira provocou redução da refletância solar dos azulejos, porém a limpeza deles seria suficiente para recuperar quase a totalidade do valor original da refletância. Já no caso das tintas, tanto a exposição ao clima quanto a poeira tiveram impacto sobre sua

refletância solar. Apenas a limpeza das superfícies pintadas não seria suficiente para recuperação de sua refletância.

2.3 Análises utilizando simulação computacional

As ferramentas computacionais de simulação têm se apresentado como importantes instrumentos para verificação e análise do comportamento termoenergético de edifícios. Mendes et al. (2005) consideram que através dos programas de simulação é possível modelar diferentes alternativas de projeto (opções do desenho arquitetônico, componentes construtivos, sistemas de iluminação e de condicionamento de ar), e avaliar o desempenho térmico e energético dessas diversas edificações em variados cenários.

Especialmente nas últimas décadas, vários países, têm realizado pesquisas relacionadas à simulação computacional e desenvolvido diferentes programas na busca por edifícios mais eficientes. O Departamento de Energia dos Estados Unidos tem disponível na Internet (DOE, 2013) uma lista onde, atualmente, constam 411 programas de simulação de edificações, para análises de eficiência energética, energias renováveis e sustentabilidade em edifícios. Essa lista inclui bancos de dados, planilhas eletrônicas, componentes e sistemas de análises e programas de simulação de desempenho energético de edificações como um todo.

Algumas das pesquisas já apresentadas, que estudaram o desempenho de materiais de revestimento, utilizaram simulação computacional em suas análises (SYNNEFA et al., 2007a; HALEWOOD e WILDE, 2008; DORNELLES et al., 2010a; JO et al., 2010; SHI e ZHANG, 2011; ROMEO e ZINZI, 2013; BORGE-DIEZ et al., 2013). O programa computacional mais empregado por tais pesquisadores foi o EnergyPlus, seguido pelo TRNSYS.

As pesquisas citadas tinham como escopo a análise de determinado modelo com diferentes opções de refletância solar. Algumas delas também realizaram variações de emitância, transmitância térmica ou ainda do tipo de ventilação. Em todos os casos o componente analisado foi a cobertura dos modelos. Apenas uma das pesquisas (SHI; ZHANG, 2011) utilizou o termo envelope, dando a entender que foram alteradas as propriedades de cobertura e paredes externas, simultaneamente.

Quanto ao parâmetro utilizado por esses pesquisadores para realizar as análises de desempenho térmico, pode-se dizer que a maior parte deles utilizou a energia para condicionamento do ar do modelo. Esses estudos realizaram a simulação de seu modelo com condicionamento de ar, estabelecendo determinadas temperaturas de *set point*. A pesquisa de Shi e Zhang (2011), por exemplo, utilizou termostato com *set point* de 26°C e 20°C para resfriamento e aquecimento, respectivamente. Tais pesquisadores obtiveram a carga anual para condicionamento do modelo e verificaram as características do envoltório que proporcionaram menor consumo energético.

Algumas pesquisas realizaram simulações com e sem condicionamento de ar e apenas dois dos estudos citados (DORNELLES et al., 2010a; BORGE-DIEZ et al., 2013) analisaram seu modelo apenas com ventilação natural e/ou infiltração de ar. As análises de modelo sem condicionamento artificial utilizaram como principal parâmetro os graus-hora de desconforto ou valores de temperatura média e máxima.

Synnefa et al. (2007a) e Shi e Zhang (2011) foram os autores que englobaram maior variedade de opções climáticas. Na primeira pesquisa foram analisadas cidades principalmente da Ásia, Europa e África; na segunda destacam-se cidades da Europa, América do Norte, Ásia e Oceania. Verifica-se que países da América do Sul, e mais especificamente o Brasil, ainda não foram avaliados de forma relevante.

As diversas variáveis que compõem um modelo computacional, quantificadas sob a influência de numerosos fatores, tornam tal modelo passível de inúmeras combinações para um mesmo caso. Essa variabilidade implica em diferentes graus de fidelidade do modelo para com o caso real, gerando imprecisões nos resultados (PEDRINI, 1997). Sendo assim, para que um programa computacional apresente resultados confiáveis, é essencial que o modelo de simulação seja corretamente calibrado. Os métodos de calibração de modelos computacionais consistem basicamente de ajustes e correções dos valores de seus dados de entrada, baseados na comparação entre resultados obtidos por simulação e dados medidos em edificações reais.

Das pesquisas já listadas, apenas duas relataram a verificação da confiabilidade de suas simulações: Jo et al. (2010) e Romeo e Zinzi (2013). Nos dois casos os autores compararam

valores de temperatura superficial obtidos por medição em uma edificação real e obtidos pela simulação de um modelo computacional representativo da mesma edificação. Ambos consideraram que os dados obtidos na simulação corresponderam de forma satisfatória às medições.

Conforme já citado, o programa de simulação de edificações mais utilizado pelos pesquisadores foi o EnergyPlus, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. O programa foi desenvolvido para estimar trocas térmicas, níveis de iluminação e consumo energético de edifícios, a partir da modelagem física do edifício e seus sistemas de ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento. O EnergyPlus realiza simulações para o clima do local de interesse do usuário, a partir de um arquivo climático com dados horários. Ele calcula temperaturas internas e trocas de calor em edifícios não condicionados artificialmente, ou, no caso de edifícios com condicionamento artificial, calcula cargas de aquecimento e resfriamento necessárias para manter a temperatura em uma faixa de conforto, verificando também o consumo de energia resultante.

2.4 Considerações finais

As propriedades térmicas dos materiais de construção se tornaram objeto de intenso estudo devido, entre outros fatores, ao crescimento da demanda por edificações mais eficientes energeticamente e, conseqüentemente, com melhor desempenho térmico. Dentre elas, as propriedades superficiais são aquelas responsáveis pelo comportamento da radiação ao incidir sobre as superfícies, sendo determinantes na temperatura superficial dos corpos.

A refletância solar é a propriedade radiante mais estudada, tanto no Brasil quanto em outros países. Diversos pesquisadores já comprovaram que o uso de revestimentos externos de alta refletância favorece o desempenho térmico de edificações em regiões com clima quente. Quanto à emitância térmica, há um número menor de pesquisas explorando a sua influência no desempenho térmico das edificações.

Os estudos a respeito de materiais frios demonstram que esse termo não trata necessariamente de novos materiais, mas

sim da classificação de determinados revestimentos (de alta refletância e emitância) dentro de um conceito. Demonstram ainda que esse conceito não está bem consolidado, pois não há uma delimitação de valores de refletância e emitância para que determinado revestimento possa ser chamado de “frio”. A questão da alta emitância mostra-se como o ponto menos discutido nas pesquisas. Os revestimentos chamados de frios nas referências analisadas diziam respeito a revestimentos brancos ou tintas coloridas de alta refletância na parcela do infravermelho-próximo do espectro solar. Estas últimas sempre apresentavam maior refletância total que as tintas convencionais de mesma cor, porém não apresentavam emitância mais elevada. Apenas com isso poder-se-ia avaliar que a vantagem no uso dos revestimentos frios está baseada em sua maior refletância, e não necessariamente em sua emitância. No Brasil, o estudo dos materiais frios ainda está em fase inicial.

Observou-se que o uso de revestimentos com alta refletância é indicado apenas para regiões de clima predominantemente quente (com maior necessidade de resfriamento), pois pode gerar uma maior necessidade de aquecimento nos locais de clima frio. Para atender a demanda de regiões com clima temperado, algumas pesquisas têm desenvolvido os materiais termocrômicos, capazes de mudar de cor, de forma reversível, de acordo com diferentes faixas de temperatura. Tais materiais ainda não estão disponíveis comercialmente para uso na construção civil e não foram encontradas pesquisas a esse respeito no Brasil.

Destaca-se ainda a importância da manutenção periódica das superfícies para a obtenção do desempenho térmico esperado. A exposição das superfícies às intempéries e à poluição atmosférica pode provocar a redução da sua refletância. Alguns fatores podem provocar uma deterioração irreversível, sendo necessário considerar a renovação do material de revestimento. Porém, as pesquisas analisadas demonstraram que a simples limpeza das superfícies foi capaz de recuperar consideravelmente sua refletância. Isso indica que a consequência mais frequente da exposição natural dos revestimentos é o acúmulo de sujeira, que escurece a superfície, e pode ser solucionado com a limpeza periódica. Por esse mesmo motivo, as superfícies mais claras foram mais impactadas pela exposição natural que as mais escuras.

Todas as pesquisas sobre degradação dos materiais relatadas nesta revisão analisaram o efeito da degradação natural na refletância das superfícies, porém apenas duas delas (SYNNEFA et al., 2006; 2007b) verificaram também a emitância. Ambas concluíram que a degradação influenciou diretamente na refletância, porém não teve impacto na emitância dos revestimentos. Nenhum dos estudos verificou a relevância da emitância no processo de degradação dos materiais, ou seja, se há diferença na intensidade da degradação de superfícies com maior ou menor emitância. Tal questionamento ocorre, pois superfícies com alta emitância seriam mais suscetíveis à condensação e, conseqüentemente, sofreriam biodeterioração mais rapidamente.

Verificou-se também que quase todos os estudos que analisaram as propriedades superficiais dos materiais em edificações, ou modelos computacionais, restringiram sua aplicação à cobertura. Apenas uma das pesquisas analisou todo o envoltório (SHI; ZHANG, 2011). Nenhuma das pesquisas analisou individualmente o impacto das propriedades superficiais dos materiais de revestimento das paredes externas.

A análise das diversas pesquisas relatadas indica que para obtenção de um melhor desempenho térmico em edificações, considerando a escolha das propriedades radiantes dos materiais de revestimento, é preciso avaliar a necessidade referente ao clima do local. Os estudos referentes ao Brasil vêm considerando prioritariamente o desconforto por calor, e muitas vezes negligenciando o desconforto por frio presente em muitas cidades. Sendo assim considera-se essencial a definição de um método para seleção dos valores de refletância solar e emitância térmica de revestimento mais indicados para edificações nas diferentes realidades climáticas brasileiras.

CAPÍTULO 3

3 MÉTODO

Esta pesquisa consistiu na realização de duas etapas de trabalho:

1. Procedimento experimental, onde foram medidas e analisadas amostras de materiais de revestimento de diferentes refletâncias e emitâncias, pelo período de um ano. Com o estudo experimental foi possível caracterizar as superfícies através de sua refletância e emitância e analisar o comportamento de revestimentos que podem ser usados no envoltório de edificações. Medições de temperatura superficial das amostras foram utilizadas para verificar a confiabilidade de simulações computacionais. O experimento também indicou o efeito da degradação natural nas propriedades superficiais das amostras, permitindo uma análise do seu desempenho a longo prazo.

2. Definição e aplicação de um método de análise por simulação computacional, onde um modelo de edificação, com variações em seus materiais de revestimento, foi analisado para os diferentes tipos de clima brasileiros. As simulações computacionais permitiram analisar o impacto do uso de revestimentos com diferentes valores de refletância e de emitância no desempenho termo-energético de um modelo de edificação.

A seguir são descritas detalhadamente essas etapas do trabalho, com os procedimentos e técnicas adotados.

3.1 Procedimento experimental

3.1.1 *Estudo de amostras*

Este experimento foi realizado para caracterizar e diferenciar o desempenho de revestimentos com diferentes propriedades superficiais, e assim permitir a verificação da confiabilidade de dados obtidos, na segunda etapa do trabalho, por simulação computacional. A fim de analisar revestimentos que pudessem apresentar diferentes propriedades radiantes, foram escolhidas as seguintes tintas:

- Tinta branca comum: tinta acrílica acabamento fosco (uso externo ou interno);
- Tinta branca premium: tinta acrílica de alta refletância no infravermelho (uso externo ou interno);
- Tinta cinza metalizada: tinta poliéster metálica (uso automotivo);
- Tinta preta comum: tinta acrílica acabamento fosco (uso externo ou interno);
- Tinta preta metalizada: tinta poliéster metálica (uso automotivo).

Optou-se por utilizar apenas tintas (e não outros tipos de revestimentos) para que todas as amostras apresentassem acabamento semelhante em suas superfícies, sem grandes diferenças de rugosidade. Isso foi considerado importante, pois a rugosidade poderia influenciar no comportamento da superfície e nas medições das propriedades radiantes.

Cada tinta foi aplicada, com três demãos, em chapas de alumínio de 30cm x 30cm (amostra grande) e de 10cm x 10cm (amostra pequena). Todas as tintas foram aplicadas utilizando spray (pulverizador), a fim de obter uma pintura homogênea e com o mínimo de rugosidade. Foram analisados cinco materiais e para cada material foram produzidas duas amostras grandes e duas pequenas. As amostras grandes foram utilizadas para medições de temperatura superficial e as amostras pequenas em medições de propriedades radiantes.

As amostras foram posicionadas sobre uma plataforma horizontal com isolamento térmico (poliestireno expandido de 10 cm de espessura) na face inferior. A plataforma foi instalada na cobertura de um dos prédios do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (Figura 6). Neste local, todas as amostras ficaram expostas ao sol e às intempéries, como vento e chuva, e também à poeira e outros resíduos provocados por aves e insetos.

Foram produzidas duas amostras de cada tamanho para cada material, de forma que uma delas foi limpa uma vez por mês, e a outra não foi limpa nenhuma vez durante todo o período de monitoramento. As amostras que permaneceram sem limpeza foram identificadas com o número 1 e as amostras que foram limpas mensalmente receberam o número 2. A limpeza foi realizada com uso apenas de água, esponja e pano limpo. O

resultado da montagem das amostras na plataforma é mostrado na Figura 7.



Figura 6 – Plataforma posicionada na cobertura de prédio da UFSC.



Figura 7 – Amostras posicionadas na plataforma de medição.

As dez amostras grandes foram utilizadas para medições de temperatura superficial, e ficaram fixadas na plataforma durante doze meses de monitoramento. Esse período

compreendeu do início de novembro de 2012 ao início de novembro de 2013. A temperatura superficial de cada amostra grande foi medida e registrada em intervalos de 10 minutos, utilizando termopares soldados no centro das amostras.

As dez amostras pequenas foram utilizadas em medições de propriedades radiantes. Foram necessárias amostras de tamanho menor para que coubessem no equipamento de medição de refletância. A refletância e a emitância inicial dessas amostras foram medidas, utilizando os equipamentos descritos na seção 3.1.2, antes delas serem expostas. Depois dessa medição inicial, as amostras foram posicionadas na plataforma, sendo retiradas uma vez por mês (ao final de cada mês de monitoramento) para novas medições de refletância e emitância. Esse procedimento ocorreu durante os doze meses de monitoramento (novembro/2012 a outubro/2013).

Tais dados foram utilizados para as seguintes avaliações:

a. Medição durante o primeiro mês:

Os dados obtidos durante o primeiro mês de monitoramento (novembro/2012) foram utilizados para permitir a análise da confiabilidade da simulação computacional, conforme descrito na seção 3.2.1.

b. Medição ao longo de um ano:

As amostras foram monitoradas ao longo de doze meses, a fim de verificar seu comportamento térmico e o efeito da exposição às intempéries nas propriedades superficiais dos materiais de revestimento. Com isso foi possível verificar possíveis alterações nas propriedades superficiais ao longo do monitoramento. Além disso, foi possível verificar a eficácia, ou não, da limpeza periódica na manutenção das propriedades superficiais das amostras.

3.1.2 Variáveis analisadas e equipamentos de medição

Os dados analisados nos experimentos, e os equipamentos utilizados para obtenção destes, são descritos a seguir.

3.1.2.1 Dados climáticos

Os dados climáticos foram obtidos através de duas estações meteorológicas instaladas na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e também de uma estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, ponto de orvalho, velocidade e direção do vento foram obtidos na estação meteorológica (Figura 8) do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), do Departamento de Engenharia Civil da UFSC, localizada a aproximadamente 350 metros do local de monitoramento das amostras. Os dados de radiação solar global, radiação solar direta e radiação solar difusa foram obtidos utilizando piranômetros (Figura 9) do Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia (LEPTEN), do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, instalados no mesmo local das amostras. Apenas os dados de precipitação foram obtidos da estação automática do INMET instalada em Florianópolis, através do site do INMET (<http://www.inmet.gov.br>).



Figura 8 – Estação Meteorológica do LabEEE.

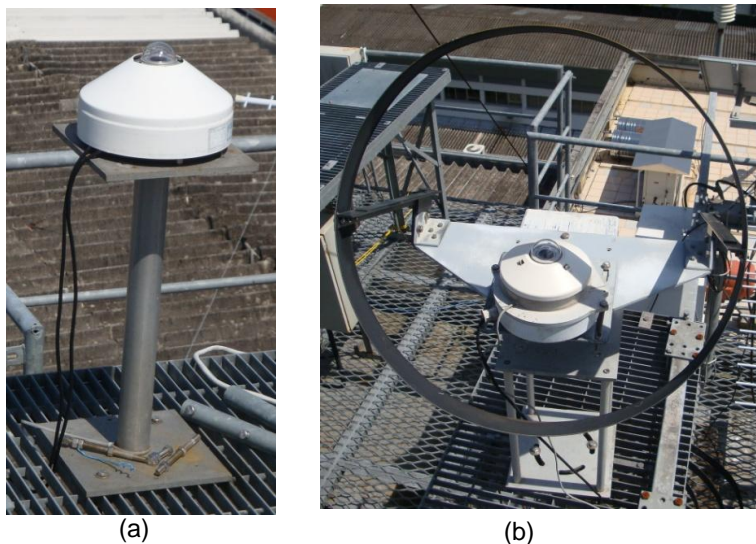


Figura 9 – Piranômetros do LEPTEN: (a) radiação global; (b) radiação difusa.

3.1.2.2 Temperatura superficial

Para medição da temperatura superficial das amostras grandes foram utilizados sensores do tipo termopar, que possibilitam o cálculo da temperatura com base na tensão elétrica gerada em um par de metais. Isso é possível graças ao fenômeno conhecido como Efeito de Seebeck, pelo qual a junção de dois metais gera uma tensão elétrica em função da diferença de temperatura das suas extremidades. Sendo assim, um termopar é constituído de dois metais distintos, unidos em suas extremidades, e conectados a um instrumento de leitura de tensão (um voltímetro ou um multímetro). Nesta pesquisa foram utilizados termopares do tipo T, que são compostos pelos metais Cobre e Constantan.

Uma das extremidades de cada termopar foi soldada na superfície inferior, próximo ao centro, de cada amostra grande. A outra extremidade dos termopares foi posicionada em um local protegido, configurando uma junta de referência com temperatura monitorada. Essa extremidade de cada termopar posicionada na junta de referência foi soldada a um fio comum, e este fio foi

ligado a um multímetro. Os dados foram adquiridos com auxílio de um multímetro da marca Agilent modelo 34970a (do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas, LMPT, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC), ligado a um computador onde os dados foram armazenados. A Figura 10 mostra um esquema desse sistema de monitoramento e a Figura 11 mostra fotos do sistema.

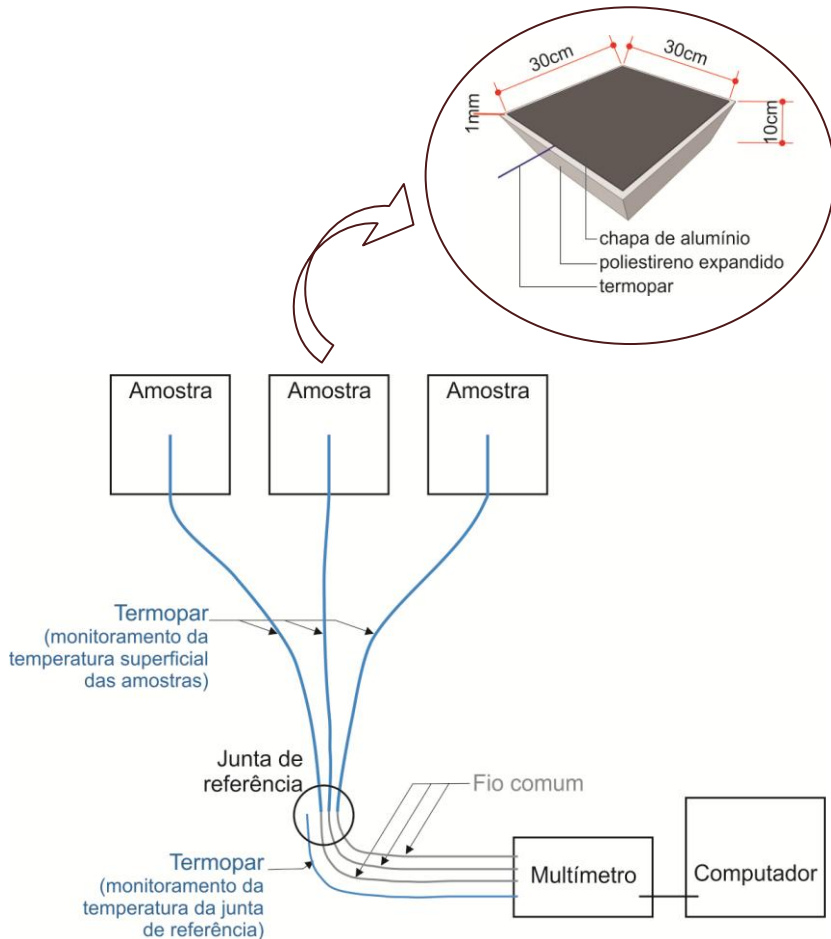


Figura 10 – Esquema do sistema de monitoramento da temperatura superficial das amostras.

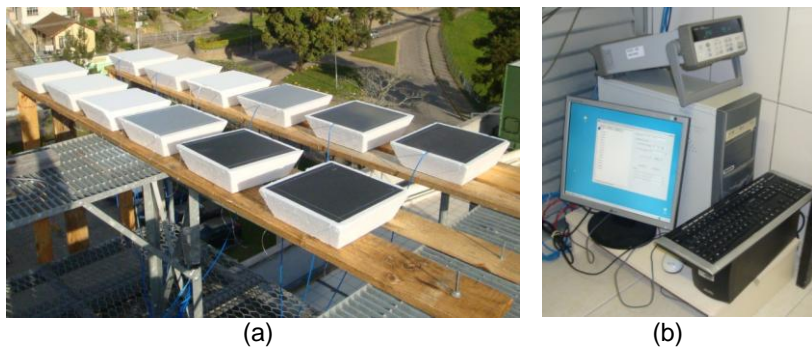


Figura 11 – Sistema de monitoramento da temperatura superficial das amostras: (a) amostras com termopares posicionadas na plataforma; (b) multímetro e computador para aquisição e armazenamento dos dados.

Os valores da temperatura da junta de referência e da variação da tensão elétrica de cada termopar são utilizados para o cálculo da temperatura superficial da amostra (temperatura verificada na extremidade do termopar soldada à amostra). Tal cálculo foi realizado conforme as Equações 1 a 3 (baseado em Calvet e Prat, 1956).

$$V_j = 0,0302 \cdot T_j^2 + 40,3099 \cdot T_j \quad \text{Equação 1}$$

Onde: V_j é a tensão elétrica correspondente à junta de referência (μV);

T_j é a temperatura da junta de referência ($^{\circ}\text{C}$), obtida na medição.

$$V_a = V_j + V_{va} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: V_a é a tensão elétrica referente ao termopar soldado na amostra (μV).

V_j é a tensão elétrica correspondente à junta de referência (μV);

V_{va} é a variação de tensão elétrica correspondente ao termopar soldado na amostra (μV), obtida na medição.

$$T_a = 8,2306 \cdot 10^{-12} \cdot V_a^3 - 4,5389 \cdot 10^{-7} \cdot V_a^2 + 2,5095 \cdot 10^{-2} \cdot V_a$$

Equação 3

Onde: T_a é a temperatura superficial da amostra ($^{\circ}\text{C}$);

V_a é a tensão elétrica referente ao termopar soldado na amostra (μV).

3.1.2.3 Refletância

A refletância espectral das amostras pequenas foi medida através de dois Espectrofotômetros: o **Lambda 750** (Figuras 12 e 13), que pertence ao Laboratório de Filmes Finos e Superfícies (LFFS) do Departamento de Física da UFSC, e o **Lambda 1050** (Figuras 14 e 15) do Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) do Departamento de Engenharia Civil da UFSC.

Os espectrofotômetros são equipamentos compostos, em geral, por uma ou mais fontes de radiação eletromagnética, um conjunto de componentes ópticos que levam esta radiação até a amostra (espelhos), um compartimento para posicionamento da amostra e um ou mais detectores que medem a intensidade da radiação refletida (DORNELLES, 2008). No caso dos espectrofotômetros utilizados, as fontes de radiação eletromagnética são lâmpadas de deutério e de tungstênio, que emitem feixes de luz em comprimentos de onda que abrangem grande parte do espectro solar. O feixe de luz incide sobre a amostra e é por ela refletido. Com auxílio de uma esfera integradora, é medida a intensidade do feixe refletido pela amostra. Cada vez que os equipamentos são utilizados é preciso inicialmente realizar um procedimento padrão, com uma amostra de referência chamada *Spectralon*®. Tal material é a referência das medições e é adotado por se tratar do material conhecido com maior refletância difusa nas regiões do ultravioleta, visível, e infravermelho-próximo. Para garantir a qualidade das medições,

os equipamentos realizam uma auto-calibração uma vez por mês. O manual dos aparelhos não informa a precisão dos valores de refletância medidos. Os resultados obtidos possuem resolução de 10^{-6} .



Figura 12 – Espectrofotômetro Lambda 750.

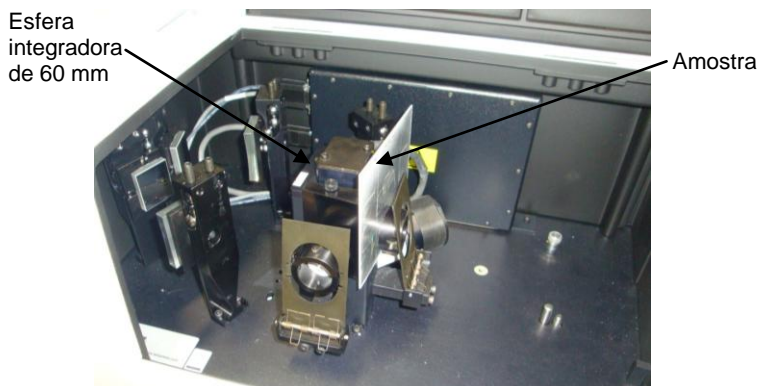


Figura 13 – Interior do espectrofotômetro Lambda 750.

O uso de dois equipamentos foi necessário em decorrência de problemas verificados ao longo dos experimentos. Nos primeiros três meses do monitoramento foi utilizado o espectrofotômetro Lambda 750. Porém, quando os dados das medições destes meses foram analisados, perceberam-se inconsistências nos resultados do segundo e terceiro mês. Após

uma verificação detalhada dos dados e do equipamento, verificou-se que o *Spectralon*® utilizado em tal equipamento teve suas propriedades alteradas por sujeira, possivelmente pelo mau uso anterior. Sendo assim, os resultados obtidos no segundo e terceiro mês tiveram que ser descartados (mais detalhes são mostrados no Apêndice 1). Como consequência disto, foi necessário utilizar outro equipamento que pudesse realizar medições confiáveis. A partir do quarto mês de monitoramento o espectrofotômetro Lambda 1050 passou a ser utilizado. A fim de garantir que não houvesse discrepâncias entre os resultados das medições nos dois espectrofotômetros, foram realizados testes comparativos. Tais experimentos são apresentados no Apêndice 2.



Figura 14 – Espectrofotômetro Lambda 1050.

Esfera integradora de 150 mm



Compartimento para amostra

Figura 15 – Interior do espectrofotômetro Lambda 1050.

Todas as medições de refletância foram realizadas nos comprimentos de 280 a 2500 nm (Figura 16), adquirindo os dados a cada 2 nm. Com os dados de refletância espectral, obtidos pela medição, foi calculada para cada amostra a refletância solar (280 a 2500 nm) e também as refletâncias para as regiões do ultravioleta (280 a 380 nm), visível (381 a 760 nm) e infravermelho (761 a 2500 nm). Esses cálculos foram feitos considerando a intensidade da radiação solar para cada comprimento de onda, obtida no espectro solar padrão da norma ASTM G173-03 (ASTM, 2012).

Tal procedimento é necessário, pois, conforme detalhado por Dorneles (2008), os dados de refletância obtidos pelo espectrofotômetro caracterizam o comportamento ótico das amostras quando expostas a uma energia constante ao longo de todo o espectro solar. Porém, a intensidade da radiação solar não é constante no espectro (conforme mostrado anteriormente na Figura 4). Dessa forma, para se obter a refletância solar das superfícies, os valores de refletância espectral obtidos para cada amostra devem ser corrigidos de acordo com a intensidade da radiação solar para cada comprimento de onda, a partir do espectro solar padrão adotado.

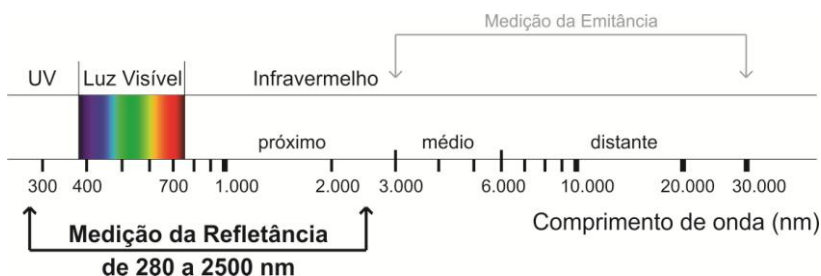


Figura 16 – Comprimentos de onda abrangidos na medição da Refletância.

O espectro padrão da ASTM G173-03 (ASTM, 2012) apresenta os valores espectrais da irradiação solar hemisférica global, em $W/m^2.nm$, (composta pela radiação direta, somada à radiação difusa que é dispersa pela atmosfera e refletida pelo solo) para uma superfície orientada ao Sul e com inclinação de 37° , em condições atmosféricas médias representativas do território dos Estados Unidos. Tais valores são apresentados

para comprimentos de onda de 280 a 4000 nm. Sabe-se que para um trabalho referente ao clima brasileiro o ideal seria obter um espectro solar padrão específico para o Brasil, a partir das condições atmosféricas observadas no país. Porém, na falta de dados específicos para o Brasil, considerou-se adequado utilizar nesta pesquisa os dados da ASTM.

A seguir descreve-se o procedimento adotado para ajuste da refletância das amostras ao espectro solar padrão, baseado nos cálculos descritos por Santos et al. (2009).

1. A refletância espectral da amostra, obtida na medição em porcentagem (%), é dividida por 100, resultando no valor adimensional.

2. Para cada comprimento de onda, a refletância espectral é multiplicada pela irradiação solar global espectral (obtida na ASTM G173-03), obtendo-se assim a irradiação do espectro solar padrão que seria refletida pela amostra, por comprimento de onda (Equação 4).

$$G_{(\lambda)refletida} = \rho_{(\lambda)} \times G_{(\lambda)} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$G_{(\lambda)refletida}$ é a Irradiação solar global espectral refletida pela amostra (W/m².nm);

$\rho_{(\lambda)}$ é a Refletância espectral da amostra (adimensional);

$G_{(\lambda)}$ é a Irradiação solar global espectral (W/m².nm).

3. A irradiação refletida pela amostra é integrada para um intervalo de comprimento de onda desejado (intervalo entre os dados medidos) por meio da **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

$$I_{(\lambda_x-y)refletida} = ((G_{(\lambda_y)refletida} + G_{(\lambda_x)refletida}) \div 2) \times (\lambda_y - \lambda_x)$$

Equação 5

Onde:

$I_{(\lambda_{x-y})refletida}$ é a Intensidade de irradiação solar global refletida pela amostra no intervalo (W/m^2);

$G_{(\lambda_x)refletida}$ é a Irradiação solar global refletida pela amostra no comprimento de onda x ($W/m^2.nm$);

$G_{(\lambda_y)refletida}$ é a Irradiação solar global refletida pela amostra no comprimento de onda y, ($W/m^2.nm$);

λ_x é o Comprimento de onda x (nm);

λ_y é o Comprimento de onda y, sendo $y > x$ (nm).

4. A irradiação solar global é integrada para um intervalo de comprimento de onda desejado (intervalo entre os dados fornecidos pela ASTM G173-03) através da Equação 6.

$$I_{(\lambda_{x-y})} = ((G_{(\lambda_y)} + G_{(\lambda_x)}) \div 2) \times (\lambda_y - \lambda_x) \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

$I_{(\lambda_{x-y})}$ é a Intensidade de irradiação solar global no intervalo (W/m^2);

$G_{(\lambda_x)}$ é a Irradiação solar global no comprimento de onda x ($W/m^2.nm$);

$G_{(\lambda_y)}$ é a Irradiação solar global no comprimento de onda y ($W/m^2.nm$);

λ_x é o Comprimento de onda x (nm);

λ_y é o Comprimento de onda y, sendo $y > x$ (nm).

5. A refletância solar³ ajustada ao espectro solar padrão é obtida calculando-se o quociente da soma das intensidades de irradiação refletida pela soma das intensidades de irradiação solar global (Equação 7).

³ Os valores calculados de refletância solar foram arredondados em duas casas decimais.

$$\rho_{solar} = \left(\frac{\sum I_{(\lambda_{x-y})\text{refletida}}}{\sum I_{(\lambda_{x-y})}} \right) \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

ρ_{solar} é a Refletância solar ajustada (%);

$I_{(\lambda_{x-y})\text{refletida}}$ é a Intensidade de irradiação solar global refletida pela amostra no intervalo (W/m^2);

$I_{(\lambda_{x-y})}$ é a Intensidade de irradiação solar global no intervalo (W/m^2).

3.1.2.4 Emitância

Para verificar a emitância das amostras pequenas foi utilizado o Emissômetro Portátil da marca *AZ Technology*, modelo TEMP 2000A, mostrado na Figura 17, que pertence ao Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E). A emitância é obtida com esse Emissômetro por comparação direta entre a amostra a ser medida e duas amostras padrão de emitâncias conhecidas (fornecidas juntamente com o equipamento).

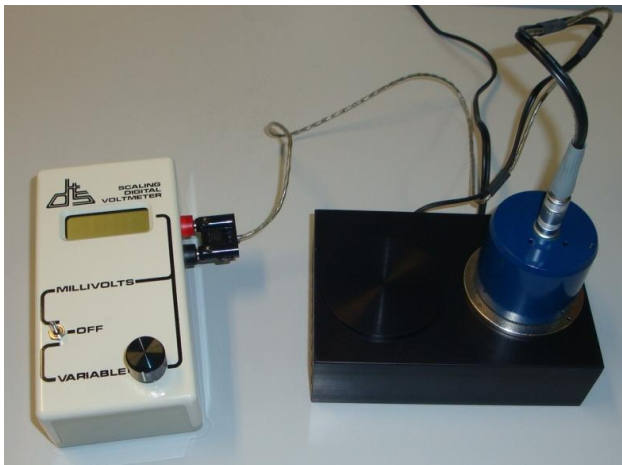


Figura 17 - Emissômetro Portátil TEMP 2000A – *AZ Technology*.

O detector de radiação é uma termopilha diferencial, com áreas de alta e baixa emitância. Essa combinação assegura uma resposta quase constante para comprimentos de onda térmica de 3 a 30 micrômetros (Figura 18). O detector do equipamento é aquecido a 82°C, de modo que a amostra a ser medida não tem que ser aquecida por outra fonte de calor. Um dissipador de calor é fornecido para manter tanto a amostra padrão quanto a amostra de emitância desconhecida à mesma temperatura.

O equipamento foi concebido para fazer uma leitura de tensão de saída que é linear com o valor da emitância. As emitâncias conhecidas das amostras padrão são utilizadas para calibrar o valor indicado no equipamento, antes de cada experimento. Dessa forma, quando a amostra desconhecida é medida com o Emissômetro, a leitura mostrada no visor do equipamento é numericamente igual à sua emitância. O equipamento possui resolução de 0,01 e precisão de $\pm 0,01$.

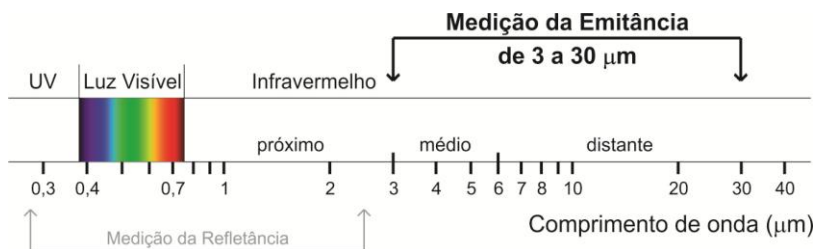


Figura 18 – Comprimentos de onda abrangidos na medição da Emitância.

3.1.3 Análise dos dados medidos

Os dados obtidos no primeiro mês de medição (novembro de 2012) foram utilizados para uma análise da confiabilidade da simulação computacional, conforme descrito na seção 3.2.1.

Os dados medidos ao longo do período de um ano de monitoramento das amostras foram utilizados para verificar o efeito da exposição natural nas propriedades das superfícies das tintas analisadas. Foram comparados os valores das refletâncias e emitâncias medidas ao longo do período de exposição, verificando as alterações em tais valores, e ainda analisando o

efeito dessas alterações nas temperaturas superficiais das amostras.

3.2 Simulação computacional

Com a finalidade de analisar os valores de refletância e emitância de revestimentos mais indicados para edificações em diferentes climas, optou-se por utilizar a simulação computacional. A simulação computacional é uma ferramenta eficaz para análises de desempenho térmico. Nesta pesquisa, a simulação foi escolhida pela possibilidade de estudar um determinado modelo de edificação variando características dos materiais construtivos e o clima de onde estaria inserida.

O programa escolhido foi o EnergyPlus (versão 8.0), por ser um dos mais utilizados no mundo atualmente, e ter atestada a confiabilidade dos seus algoritmos no que diz respeito ao comportamento termo-energético de edificações (ENERGYPLUS, 2013a). Antes das análises, foi realizada uma verificação da confiabilidade da simulação, tendo em vista a variação dos dados de entrada referentes às propriedades superficiais dos materiais.

3.2.1 Verificação da confiabilidade da simulação

Quando se faz uso da simulação computacional, deseja-se que o modelo virtual do edifício analisado represente com certa fidelidade o comportamento térmico e energético de um edifício real. A verificação da confiabilidade de modelos computacionais consiste basicamente de ajustes nos valores de seus dados de entrada, geralmente com base na comparação entre os resultados da simulação e dados de medições.

Neste trabalho, a verificação da confiabilidade foi direcionada para garantir a qualidade dos resultados obtidos na simulação de revestimentos com diferentes valores de refletância e emitância. Para isso, foram definidos, no programa computacional, modelos representando as amostras grandes descritas na seção 3.1.1. Para cada tipo de revestimento monitorado foi criado um modelo, com uma camada de alumínio de 1 mm de espessura, com as propriedades radiantes

superficiais de cada uma das cinco tintas analisadas, sobre uma camada de poliestireno expandido de 10 cm de espessura. O programa EnergyPlus permite inserir nos dados de entrada as seguintes propriedades radiantes:

- Absortância térmica, que é igual à emitância térmica da superfície;
- Absortância solar, que foi calculada a partir da refletância solar;
- Absortância visível, que foi calculada a partir da refletância visível.

Para as três propriedades foram utilizados os valores do primeiro mês de medição, fazendo a média das duas amostras de cada material.

Os modelos foram simulados utilizando os dados climáticos obtidos no primeiro mês do período de monitoramento (novembro/2012). Foi criado um arquivo climático, no formato EPW, utilizando os dados medidos de temperatura e umidade relativa do ar, ponto de orvalho, velocidade e direção do vento, radiação solar global, direta e difusa. Todos esses dados foram obtidos conforme informado na seção 3.1.2.1.

Sendo assim, nesta etapa, foram simulados cinco modelos para o período de apenas um mês. A partir da simulação de um mês, foram escolhidos seis dias representativos para a análise de confiabilidade. Para a escolha desses dias, descartaram-se os primeiros dez dias do mês, para garantir que as amostras já tivessem passado por um tempo mínimo de exposição ao clima. Foi selecionada uma sequência de três dias de sol (sem chuva e com poucas nuvens) e outra sequência de três dias de chuva. Esse critério foi definido para garantir que houvesse um período com diferenças significativas nos valores de temperatura superficial das amostras de diferentes materiais (dias de sol), e outro período com temperaturas mais semelhantes (dias de chuva). Com isso, foi possível analisar a qualidade dos dados obtidos por simulação em diferentes condições climáticas.

Para analisar a melhor forma de simular os modelos, optou-se por verificar e testar as opções de cálculo disponíveis no programa. O balanço térmico de uma superfície externa é calculado no programa EnergyPlus em função da radiação de onda curta (radiação solar direta e difusa) absorvida pela superfície, da radiação de onda longa trocada entre a superfície e seu entorno, e da troca de calor por convecção da superfície

com o ar. A soma destes três é igual ao fluxo de calor por condução da superfície para o interior do componente (ENERGYPLUS, 2013b).

O fluxo de calor por radiação de onda curta absorvida depende diretamente da radiação solar incidente (informada no arquivo climático), da inclinação da superfície e de sua absorvância (informadas na criação do modelo). Como todos os dados relacionados à radiação de onda curta foram inseridos na simulação com base no monitoramento, não foram realizados testes com tais parâmetros.

O fluxo de calor por radiação de onda longa trocada com o entorno é baseado essencialmente na inclinação da superfície e em sua emitância (informadas na criação do modelo), na temperatura do céu e do solo. No caso das amostras analisadas, que são placas planas horizontais, a temperatura do solo se torna irrelevante, sendo a temperatura do céu o fator mais importante. A temperatura do céu é calculada pelo EnergyPlus com base nos dados de entrada do modelo e arquivo climático. Seria interessante comparar o dado calculado pelo programa com um valor experimental. Entretanto, nas medições realizadas não foi possível obter a temperatura do céu. Portanto, tal parâmetro não foi analisado.

Dessa forma, a verificação de confiabilidade foi baseada na análise da convecção. No caso do fluxo de calor por convecção, um fator essencial para o cálculo é o coeficiente de convecção. Muitos métodos já foram desenvolvidos para o cálculo desse coeficiente e o programa EnergyPlus disponibiliza cinco opções para determinação desse valor. Os algoritmos de convecção externa disponíveis no programa são: *Simple Combined*, TARP, MoWITT, DOE-2 e *Adaptive Convection Algorithm*. Sendo assim, os cinco modelos, representativos das amostras monitoradas, foram simulados utilizando os cinco diferentes algoritmos de convecção externa disponíveis no EnergyPlus, a fim de verificar qual deles representaria com maior fidelidade os dados medidos.

O modelo *Simple Combined* calcula um coeficiente de transferência de calor externo em função da velocidade do vento e da rugosidade da superfície. Este método produz um coeficiente de transferência de calor combinado de convecção e radiação. Todos os outros algoritmos produzem coeficientes de transferência de calor apenas por convecção; os coeficientes de

transferência de calor por radiação são calculados automaticamente pelo programa.

O algoritmo TARP (*Thermal Analysis Research Program*) foi desenvolvido para o software TARP (um antecessor do EnergyPlus) e combina correlações de convecção natural e forçada obtidas em um laboratório de medições em placas planas.

Os algoritmos MoWITT e DOE-2 foram derivados a partir de medições em campo de uma pesquisa denominada *Mobile Window Thermal Test*. O MoWitt usa uma correlação a partir de medições em campo para superfícies verticais lisas e, portanto, é mais apropriado para janelas. O DOE-2 usa uma correlação a partir das medições em campo para superfícies rugosas. Ele é a opção padrão do programa, ou seja, se o usuário não determinar qual algoritmo deseja, o EnergyPlus simula automaticamente com o DOE-2.

O *Adaptive* é um algoritmo dinâmico que organiza os diferentes modelos de convecção e seleciona automaticamente aquele que melhor se aplica. Para isso, ele classifica as superfícies em categorias, dependendo da direção do vento e direções de fluxo de calor.

Após as simulações dos modelos com os diferentes algoritmos de convecção externa, os resultados de temperatura superficial das simulações foram comparados com as temperaturas superficiais medidas nas amostras no primeiro mês de monitoramento. As diferenças entre os valores simulados e medidos foram verificadas para cada dado horário e, então, calculadas as diferenças mínima, máxima e média, para os dois períodos analisados.

Foram também criados gráficos comparando temperatura superficial obtida por medição e por simulação com os cinco algoritmos, para cada cor analisada. Em todos os gráficos foram adicionados o coeficiente de determinação (R^2) e a linha de tendência linear com a equação de regressão linear.

O coeficiente de determinação indica o quanto duas variáveis se relacionam linearmente. Ele varia de 0 a 1 e quanto maior tal valor, maior tal relação. A equação de regressão linear (Equação 8) determina qual é a relação entre ambas as variáveis.

$$Y = \alpha + \beta \cdot X \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

Y é a variável explicada (dependente);

α é a constante que representa a interceptação da reta com o eixo vertical;

β é a constante, que representa o coeficiente angular (a inclinação) da reta;

X é a variável explicativa (independente).

3.2.2 Análise utilizando simulação computacional

Para viabilizar a definição de valores de refletância e emitância de revestimento para edificações em diferentes tipos de climas optou-se por um método baseado em simulação computacional. Tal escolha se deveu ao fato das simulações permitirem a análise do impacto do uso de revestimento com diferentes valores de refletância e de emitância, utilizando arquivos climáticos representativos de diferentes climas verificados no Brasil. A seguir descreve-se o modelo computacional utilizado para o estudo e, na sequência, detalha-se o método de análise.

3.2.2.1 Estudo de caso com modelo simplificado

Não há um modelo padrão que possa representar as edificações brasileiras, sejam elas residenciais, comerciais ou públicas. Algumas pesquisas já se detiveram nesse intento, e apontaram a necessidade de criar mais de um modelo para conseguir abranger ao menos os casos mais usuais dentre a diversidade de edificações presentes no cenário urbano nacional. É o caso, por exemplo, da pesquisa de Carlo (2008), que definiu seis modelos representativos de edificações não-residenciais (comerciais, institucionais e públicas), e da pesquisa de Tavares (2006), que criou cinco modelos para representar as edificações residenciais.

Tais pesquisas revelam a complexidade em representar com modelos computacionais a variedade de edificações

existentes. Com base nisso, optou-se por pôr em foco a definição detalhada do método para análise das propriedades radiantes de superfícies através da simulação computacional, aplicando-a a um único modelo simplificado de edificação residencial unifamiliar. Esse modelo simplificado não intenciona reproduzir alguma edificação real, mas sim ser uma ferramenta para a análise. Dessa forma, tal análise poderá ser replicada a qualquer outro modelo específico desejado.

Foi utilizado um modelo simplificado para as simulações, mostrado na Figura 19, representando uma edificação residencial. Tal modelo foi baseado nos dados apresentados por Tavares (2006), que compilou informações da Pesquisa Nacional de Amostras de Domicílio de 2002 e da Pesquisa de Sistema de Informações de Posses de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo de 1999. Ele identificou que 58% das edificações residenciais brasileiras têm aproximadamente 60m² e são ocupadas por quatro habitantes.

A partir de tais informações básicas, e procurando simplificar ao máximo o modelo, foi definida uma edificação quadrangular com uma zona térmica, com dimensões 8,0m x 8,0m, totalizando 64,0 m², e pé-direito de 3,0m. Foram inseridas janelas nas quatro fachadas, com dimensões correspondentes a 10% da área de fachada, com vidro liso incolor de 3mm. Não foram inseridos dispositivos de sombreamento nas janelas e barreiras no entorno do modelo. A intenção foi direcionar o modelo para a análise da influência do envoltório, sem adicionar outros elementos construtivos que também seriam de grande influência no desempenho do modelo, como os dispositivos de sombreamento, e que poderiam mascarar os resultados.

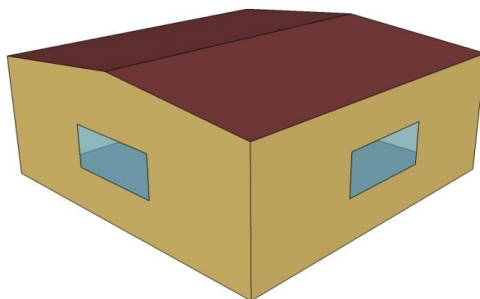


Figura 19 – Modelo para as simulações.

Com relação ao consumo de energia elétrica, sabe-se que ele tem se elevado no Brasil, e informações apresentadas por pesquisas como a de Tavares (2006), com dados de mais de dez anos atrás, não representa a realidade atual. De fato, a demanda elétrica é muito variável nas residências, dependendo diretamente do comportamento dos usuários, o que é imprevisível. Por isso, foram testadas duas opções de cargas internas de iluminação e equipamentos. O modelo foi simulado com densidade de carga internas de iluminação e de equipamentos igual a 10 W/m² (chamada de carga baixa na apresentação dos resultados) e 30 W/m² (chamada de carga alta).

O modelo foi ocupado por quatro usuários, representando uma família com um casal, que trabalha fora de casa, e dois filhos, que estudam no período da manhã. A ocupação do modelo variou conforme apresentado na Figura 20. Optou-se por desconsiderar uma diferenciação de ocupação nos feriados e períodos de férias, já que estes representam uma minoria dos dias do ano. Com relação à atividade desempenhada pelos usuários, foi considerado 110 W de calor produzido por pessoa, representando que as pessoas estariam sentadas, lendo e/ou escrevendo.

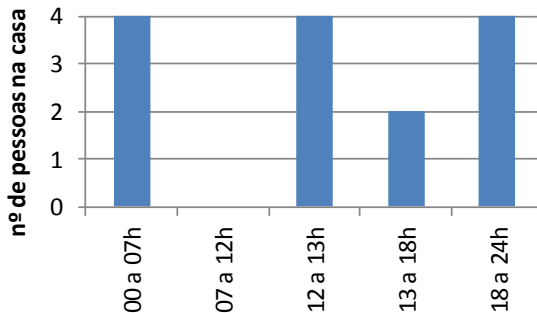


Figura 20 – Padrão de ocupação do modelo de simulação.

Definiu-se uma taxa de infiltração de ar constante, igual a 1 troca de ar por hora. Com relação aos componentes construtivos, foram simulados dois tipos de envoltório, representando envoltórios com alta e baixa resistência e capacidade térmica, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Características dos envoltórios adotados nas simulações.

| Tipo | Compo- nente | Descrição | U (W/m²K) | Ct (kJ/m²K) |
|--|-------------------------|--|---------------------------------|-----------------------------------|
| Baixa resistência e capacidade térmica | Parede | Parede de tijolos maciços aparentes. Espessura total da parede: 10,0 cm | 3,70 | 149 |
| | Cobertura | Cobertura de telha de fibro-cimento, sem forro. Espessura da telha: 0,7 cm | 4,60 | 11 |
| Alta resistência e capacidade térmica | Parede | Parede dupla de tijolos de 6 furos circulares, assentados na menor dimensão. Espessura total da parede: 26,0 cm | 1,52 | 248 |
| | Cobertura | Cobertura de telha de fibro-cimento com forro de laje mista. Espessura da telha: 0,7 cm. Espessura da laje: 12,0 cm | 1,93 | 106 |

(Obs: U = Transmitância térmica; Ct = Capacidade térmica.)

3.2.2.2 Arquivos climáticos

As simulações foram realizadas utilizando arquivos climáticos de 24 cidades brasileiras, listadas na Tabela 4. O território brasileiro é subdividido em oito zonas bioclimáticas, com características de clima semelhantes (ABNT, 2005a), conforme a Figura 21. De cada uma dessas zonas, foram escolhidas três cidades para este estudo. Dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar dos arquivos climáticos dessas cidades são mostrados no Apêndice 3. Esses arquivos climáticos, em formato EPW, estão disponíveis na página do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC (LABEEE, 2013).

Tabela 4 – Cidades escolhidas para simulação computacional.

| Zona | Cidade | Zona | Cidade |
|------|---------------------|------|-------------------------|
| Z 1 | Campos do Jordão/SP | Z 5 | Garanhuns/PE |
| | Curitiba/PR | | Niterói/RJ |
| | São Joaquim/SC | | Vitória da Conquista/BA |
| Z 2 | Santa Maria/RS | Z 6 | Campo Grande/MS |
| | São João Del Rei/MG | | Goiânia/GO |
| | Teresópolis/RJ | | Montes Claros/MG |
| Z 3 | Florianópolis/SC | Z 7 | Cuiabá/MT |
| | Porto Alegre/RS | | Paulo Afonso/BA |
| | São Paulo/SP | | Teresina/PI |
| Z 4 | Brasília/DF | Z 8 | Belém/PA |
| | Pirapora/MG | | Fortaleza/CE |
| | São Carlos/SP | | São Luis/MA |

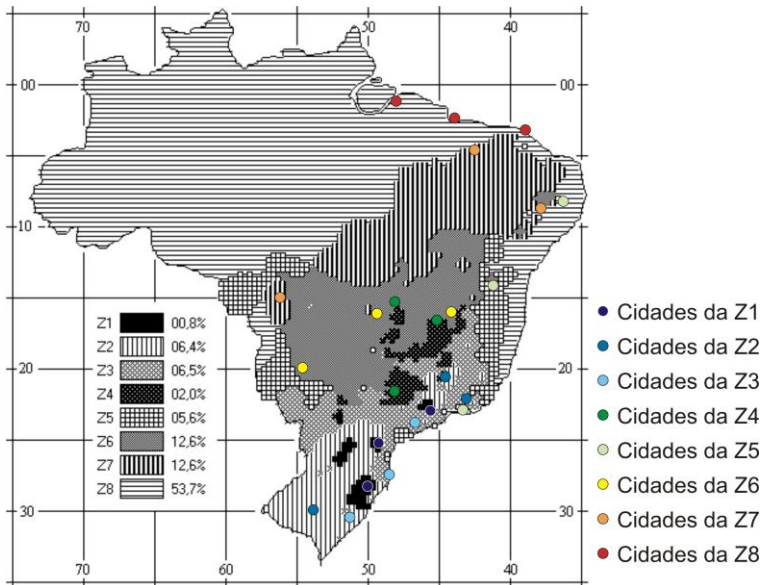


Figura 21 – Zoneamento bioclimático brasileiro, indicando as cidades escolhidas para estudo.

3.2.2.3 Análises paramétricas das propriedades radiantes

Para verificar o impacto do uso de revestimentos com diferentes valores de refletância e emitância no desempenho térmico de um modelo, propõe-se o uso de simulações paramétricas. O modelo computacional deve ser simulado com variações nas propriedades das superfícies dos materiais de revestimento do envoltório (cobertura e paredes externas). Sendo assim, a refletância e a emitância são variadas de 0,1 a 0,9, individualmente (totalizando 81 combinações). Para uma análise mais simples, os parâmetros são variados simultaneamente para parede e cobertura. Tal análise foi realizada para as 24 cidades escolhidas, nas oito zonas bioclimáticas brasileiras.

Posteriormente, para uma análise mais detalhada, propõe-se a análise individual da influência da parede e da cobertura. Para isso, foram escolhidas duas cidades, uma da zona bioclimática 8, que apresenta as maiores necessidades de refrigeração, e uma da zona bioclimática 1, que necessita maior aquecimento. Foi utilizado apenas o modelo com baixa resistência e capacidade térmica e com carga interna baixa. Nesta análise, foram fixados os valores de emitância e refletância da cobertura, e variados tais dados apenas nas paredes. Em seguida, foram fixados tais dados nas paredes, variando apenas na cobertura. Para os valores fixos de emitância e refletância foram utilizados aqueles correspondentes ao melhor resultado (menor consumo de energia para condicionamento de ar) obtido nas primeiras simulações, para as duas cidades. Com essa análise foi possível verificar qual componente do envoltório (parede ou cobertura) exerce maior influência no desempenho térmico do modelo.

3.2.2.4 Parâmetro de análise

O método proposto utiliza como parâmetro de análise a energia que seria necessária para resfriar ou aquecer uma edificação de forma a mantê-la com temperatura interna dentro de uma determinada faixa de conforto. Adotou-se uma zona de conforto com temperaturas entre 18°C e 24°C. Dessa forma, a combinação de propriedades radiantes do envoltório que resulta

em menor consumo de energia anual, é aquela considerada mais adequada. No caso das cidades com clima temperado, essa combinação de propriedades não representaria a melhor solução para o inverno nem a melhor solução para o verão. Ela significaria a melhor solução em média para o ano todo.

Para isso, o modelo foi simulado com condicionamento artificial de ar, utilizando a opção de equipamento ideal (*Ideal Loads Air System*) disponível no EnergyPlus. Esse sistema é indicado quando se deseja estudar o desempenho da edificação sem modelar um sistema de condicionamento completo. Utilizou-se essa opção, pois a intenção foi obter as cargas térmicas de resfriamento e aquecimento, e não analisar o desempenho de um sistema de condicionamento de ar. Tais cargas térmicas foram usadas como parâmetro para avaliar o desempenho térmico do modelo. As temperaturas de *setpoint* para aquecimento e resfriamento foram 18°C e 24°C, respectivamente.

A definição desse método não se baseia na ideia de que as edificações residenciais brasileiras sejam predominantemente condicionadas artificialmente. Pelo contrário, a maior parte delas ainda é ventilada naturalmente. Porém, esse cenário tem se alterado nos últimos anos, com grande crescimento do consumo de energia para condicionamento artificial em todos os setores. Sabe-se que, apesar da maioria das residências não serem condicionadas artificialmente, o consumo de energia para esse fim está entre os três principais usos desse setor. Além disso, uma análise com ventilação natural insere no modelo um número grande de variáveis de influência no desempenho térmico, que poderiam minimizar a influência do envoltório. Dentre tais variáveis pode-se citar como exemplo o critério para abertura das janelas e a grande variação de direção e velocidade do vento. Sendo assim, o uso do condicionamento artificial ideal exclui tais variáveis, e permite uma análise mais objetiva do envoltório.

3.2.2.5 Análise dos dados de simulação

A partir de cada simulação obteve-se as cargas térmicas de resfriamento e de aquecimento da edificação (em kWh) ao longo de um ano. Tais dados foram somados, totalizando a energia anual necessária para manter o modelo dentro da faixa

de conforto adotada. A opção por somar as cargas de resfriamento e aquecimento foi adotada para que fosse possível analisar o melhor envoltório para o ano inteiro, sem privilegiar apenas a estação quente ou a estação fria. Esse valor foi comparado às propriedades térmicas superficiais dos revestimentos, através de gráficos, para determinar a melhor combinação de valores de refletância e emitância que resultam em menor consumo energético do modelo, em cada tipo de clima. Tais simulações permitiram verificar o impacto e a eficácia do uso de materiais de revestimento com diferentes características superficiais no desempenho termo-energético das edificações.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS

A seguir são descritos os resultados obtidos com a aplicação das etapas metodológicas descritas no terceiro capítulo deste trabalho. Inicialmente são mostrados os resultados dos experimentos, seguidos pela análise de confiabilidade das simulações, e por fim apresenta-se a aplicação do estudo com simulação computacional.

4.1 Monitoramento de amostras

4.1.1 Medição inicial das propriedades radiantes

Antes de serem expostas às intempéries, as dez amostras pequenas foram submetidas à medição da refletância e da emitância de suas superfícies pintadas. Os resultados dessa análise inicial são apresentados nas Figuras 22 a 31 e nas Tabelas 5 a 9.

Verifica-se que, para cada tinta, as duas amostras obtiveram resultados muito semelhantes de refletância espectral. As duas amostras de preto metalizado foram as que apresentaram maior diferença entre si, porém o gráfico indica o mesmo comportamento ao longo do espectro. Os valores calculados de refletância solar indicam resultados quase iguais para as duas amostras de mesmo material. A maior diferença verificada foi de 1,2% na refletância solar das amostras de preto metalizado. Apesar do cuidado adotado durante a pintura das amostras, é possível que eventuais diferenças na espessura das demãos da tinta aplicada possam influenciar os valores medidos.

Comparando os resultados é possível verificar que as amostras brancas (comum e premium) apresentaram valor muito similar de refletância nas faixas do ultravioleta e do visível. Porém as amostras de branco premium possuem maior refletância na faixa do infravermelho-próximo: aproximadamente 87% para o branco comum e 93% para o branco premium. Com isso, as amostras de branco premium obtiveram refletância solar mais elevada que as amostras de branco comum: 90% e 87%, respectivamente. A Figura 22, referente às amostras branco

comum, mostra que a refletância é elevada na parcela visível e vai decaindo ao longo de todo o infravermelho-próximo. Já no caso das amostras branco premium (Figura 24) a refletância mantém-se elevada na parcela visível e também em grande parte do infravermelho-próximo, decaindo apenas em sua parcela final.

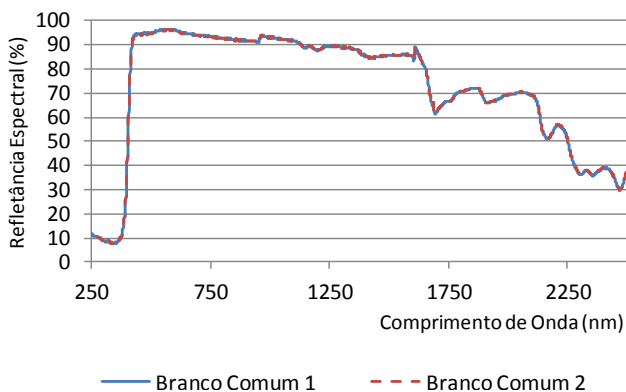


Figura 22 – Refletância Espectral - branco comum.

Tabela 5 – Propriedades iniciais - branco comum.

| Propriedade | | Branco Comum 1 | Branco Comum 2 |
|-----------------------|---------------|----------------|----------------|
| Refletância (%) | Ultravioleta | 8,91 | 8,95 |
| | Visível | 92,05 | 91,74 |
| | Infravermelho | 87,01 | 86,97 |
| Refletância Solar (%) | | 87,03 | 86,85 |
| Emitância | | 0,88 | 0,88 |



Figura 23 – Amostras pequenas - tinta branco comum.

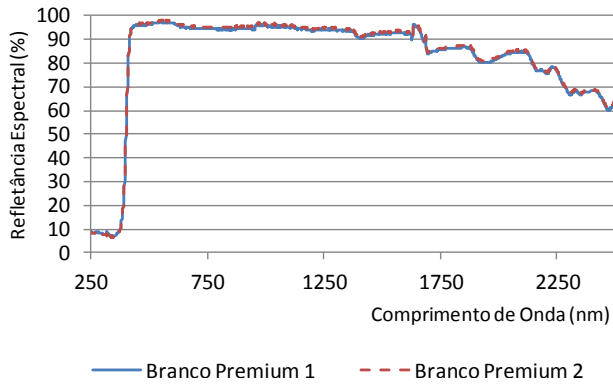


Figura 24 – Refletância Espectral - branco premium.

Tabela 6 – Propriedades iniciais - branco premium.

| Propriedade | | Branco Premium 1 | Branco Premium 2 |
|-----------------------|---------------|------------------|------------------|
| Refletância (%) | Ultravioleta | 8,16 | 8,06 |
| | Visível | 93,25 | 93,83 |
| | Infravermelho | 92,81 | 93,58 |
| Refletância Solar (%) | | 90,23 | 90,87 |
| Emitância | | 0,89 | 0,89 |



Figura 25 – Amostras pequenas - tinta branco premium.

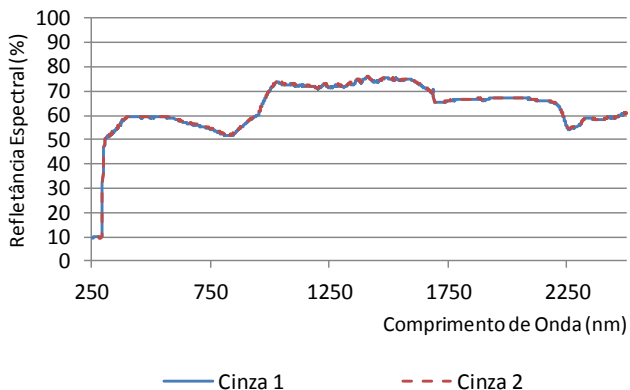


Figura 26 – Refletância Espectral - cinza metalizado.

Tabela 7 – Propriedades iniciais - cinza metalizado.

| Propriedade | Cinza Metalizado 1 | Cinza Metalizado 2 |
|-----------------------|--------------------|--------------------|
| Refletância (%) | Ultravioleta | 54,48 |
| | Visível | 58,01 |
| | Infravermelho | 64,49 |
| Refletância Solar (%) | 60,80 | 61,11 |
| Emitância | 0,79 | 0,79 |

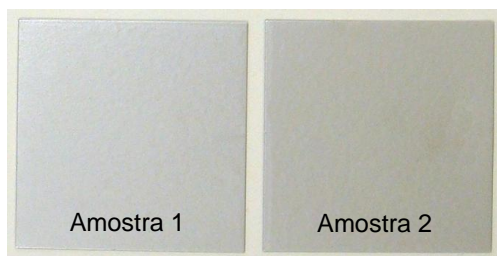


Figura 27 – Amostras pequenas – tinta cinza metalizado.

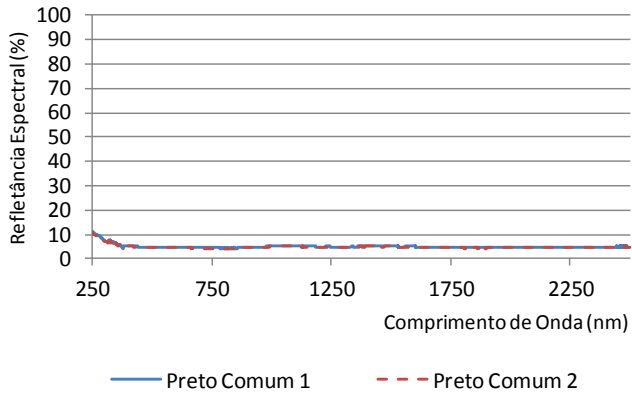


Figura 28 – Refletância Espectral - preto comum.

Tabela 8 – Propriedades iniciais - preto comum.

| Propriedade | | Preto Comum 1 | Preto Comum 2 |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|
| Refletância (%) | Ultravioleta | 6,02 | 5,92 |
| | Visível | 4,70 | 4,61 |
| | Infravermelho | 4,83 | 4,74 |
| Refletância Solar (%) | | 4,80 | 4,71 |
| Emitância | | 0,90 | 0,90 |

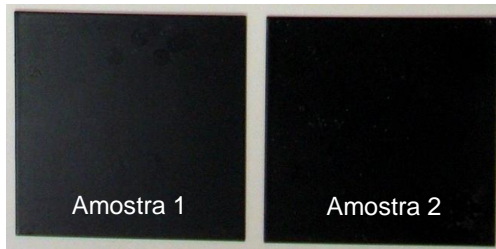


Figura 29 – Amostras pequenas – tinta preto comum.

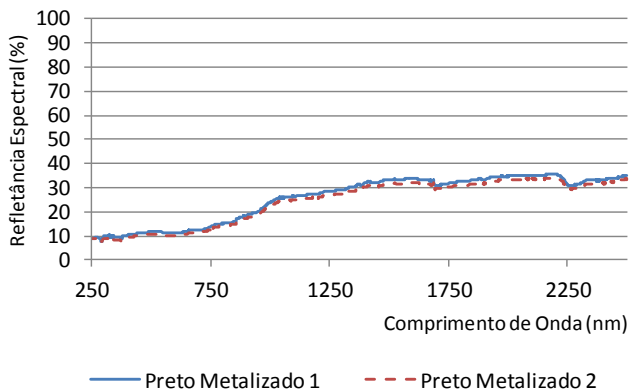


Figura 30 – Refletância Espectral - preto metalizado.

Tabela 9 – Propriedades iniciais - preto metalizado.

| Propriedade | Preto Metalizado 1 | Preto Metalizado 2 |
|-----------------------|--------------------|--------------------|
| Refletância (%) | Ultravioleta | 9,51 |
| | Visível | 11,64 |
| | Infravermelho | 24,29 |
| Refletância Solar (%) | 17,24 | 16,01 |
| Emitância | 0,84 | 0,84 |



Figura 31 – Amostras pequenas – tinta preto metalizado.

A análise de tais resultados também permite verificar que as amostras metalizadas (cinza e preto) apresentam a refletância no infravermelho-próximo mais elevada que a refletância no visível. Isso indica que algum dos pigmentos utilizados em tais

tintas metalizadas apresenta alta refletância no infravermelho-próximo. Quando se compara as amostras de preto metalizado e preto comum, a diferença entre suas refletâncias no visível é de aproximadamente 6%, porém a diferença na refletância solar é de cerca de 12%.

Quanto à emitância, todas as amostras de mesma cor apresentaram o mesmo resultado na medição inicial. O maior valor de emitância foi 0,90, medido nas amostras com preto comum. Os menores valores de emitância foram medidos nas amostras metalizadas, sendo 0,84 para preto metalizado e 0,79 para cinza metalizado.

4.1.2 Medições ao longo de um ano

Ao longo de doze meses as amostras permaneceram expostas ao ambiente externo, poeira e intempéries. Nesse período foram medidas as temperaturas superficiais das amostras grandes e as propriedades radiantes de superfícies das amostras pequenas, conforme explanado na seção 3.1.

4.1.2.1 Impacto da exposição nas propriedades radiantes

A seguir são apresentados os resultados de refletância solar obtidos ao longo dos doze meses de monitoramento das amostras pequenas. Apenas não são apresentados os dados de refletância referentes às medições após o segundo e o terceiro mês de análise, conforme justificado na seção 3.1.2.3 e no Apêndice 1.

As amostras brancas, comum (Figura 32) e premium (Figura 33), confirmaram a tendência esperada de redução da refletância ao longo do tempo. Tal redução foi extremamente mais acentuada nas amostras que não passaram por limpeza periódica (amostras número 1), nas quais a refletância baixou mais de 15%. No caso das amostras que foram limpas mensalmente (amostras número 2), houve uma redução inicial na refletância, especialmente no primeiro mês. Nos meses seguintes a refletância se manteve mais estável, sempre com pequenas oscilações de aproximadamente $\pm 1\%$.

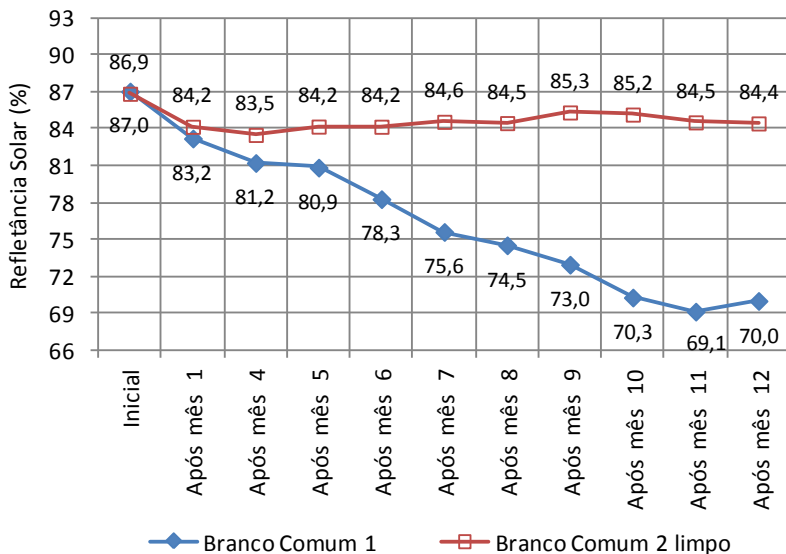


Figura 32 – Refletância solar das amostras cor branco comum.

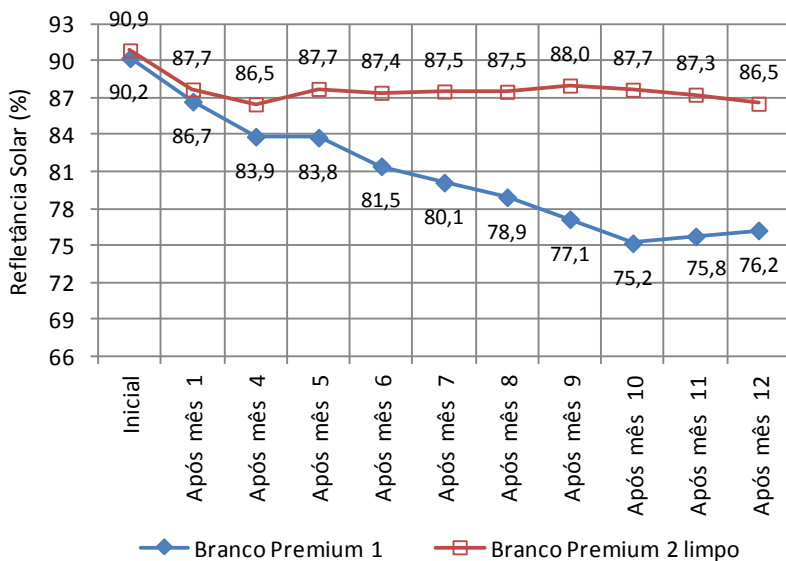


Figura 33 – Refletância solar das amostras cor branco premium.

As amostras de cinza metalizado (Figura 34) apresentaram comportamento diferenciado. A amostra cinza 1 (sem limpeza) seguiu a tendência de redução da refletância ao longo do tempo, porém em uma proporção muito menor que o ocorrido nas tintas brancas. Após os 12 meses, ela reduziu apenas 2% aproximadamente. O comportamento dessa amostra demonstra que provavelmente a tinta cinza não sofreu danos permanentes, e sim principalmente deposição de poeira. Por isso, o valor da refletância oscilou muito, de acordo com a maior ou menor quantidade de poeira depositada na amostra no dia da medição. Tal quantidade variava dependendo especialmente do volume de chuva nos dias anteriores.

A amostra cinza 2 (com limpeza periódica) teve uma redução inicial de 2% em sua refletância, porém, depois de dois meses esse valor se elevou alcançando novamente o valor da refletância inicial. Tal comportamento diferenciado pode ter ocorrido em decorrência de alguma sujeira específica, que depois de algumas limpezas foi minimizada, porém ele também pode ser consequência de uma imprecisão na medição. Avaliando os resultados de refletância da amostra cinza 2, pode-se confirmar que tal tinta não sofreu danos permanentes, mesmo após os doze meses de exposição.

No caso das amostras de preto comum (Figura 35) o efeito inicial foi o contrário do verificado nas amostras brancas: a exposição natural elevou um pouco a refletância solar nos primeiros seis meses. Isso provavelmente é consequência da exposição à radiação solar direta (mais especificamente a radiação ultravioleta), que “desbota” a tinta. A partir do sétimo mês, a refletância começou a baixar, sendo tal queda maior nas amostras sem limpeza (número 1). Ao final dos doze meses, a amostra de preto comum sem limpeza apresentou refletância com valor 1,4% menor que o inicial.

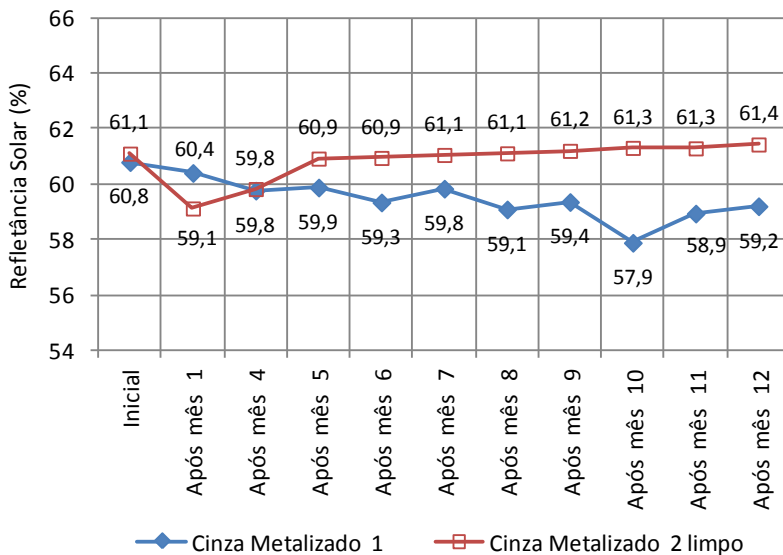


Figura 34 – Refletância solar das amostras cor cinza metalizado.

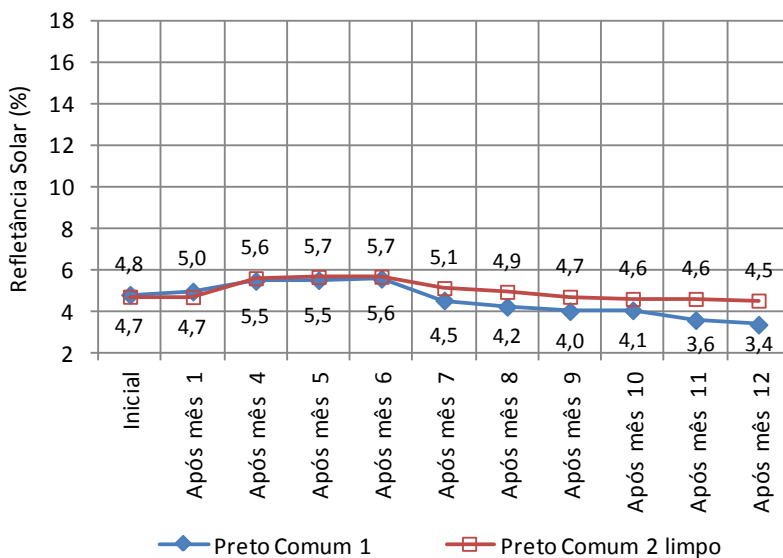


Figura 35 – Refletância solar das amostras cor preto comum.

As amostras de preto metalizado (Figura 36) apresentaram as menores diferenças entre amostra com e sem limpeza ao longo de todo o período do estudo. Elas também sofreram pequeno impacto em sua refletância pela exposição natural. Ao final dos doze meses, a refletância baixou cerca de 1,0% em tais amostras. Assim como no caso das amostras de tinta cinza metalizado, provavelmente a tinta preto metalizado não sofreu danos permanentes, e sim apenas deposição de sujeira. Tendo em vista a sua cor escura, a poeira teve pouco impacto na refletância solar.

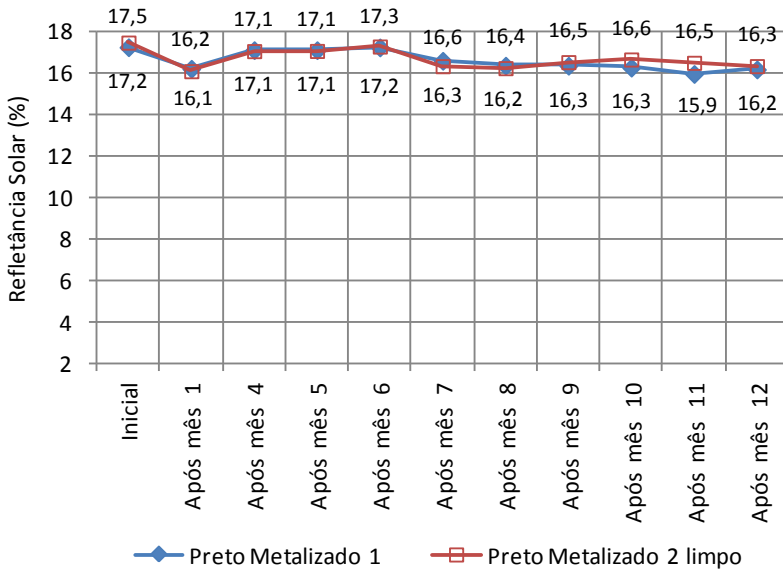


Figura 36 – Refletância solar das amostras cor preto metalizado.

Percebe-se ainda que as oscilações nos valores de refletância são distintas a cada mês e, entre outros fatores, isso é consequência das diferentes condições atmosféricas. Por exemplo, o quinto mês de monitoramento (março/2013), onde ocorreram as menores variações nas refletâncias da maior parte das amostras, foi o mês que apresentou a maior precipitação pluviométrica. Isso deve ter proporcionado o menor acúmulo de poeira e menor tempo de exposição à radiação solar.

A Figura 37 apresenta os resultados de emitância das amostras, obtidos ao longo dos doze meses de monitoramento. Por meio desses resultados é possível afirmar que a exposição natural não afetou significativamente a emitância da maior parte das superfícies analisadas. Pode-se fazer tal afirmação tendo em vista que o equipamento de medição possui precisão de $\pm 0,01$. As duas amostras cinza foram as que apresentaram alteração mais relevante na emitância, pois o valor inicial medido foi 0,79 e após os primeiros meses de exposição tal valor passou a 0,82, chegando a 0,83 nos últimos meses. Isso pode indicar que, quanto menor a emitância, maior o impacto da exposição natural sobre ela. Entretanto, seriam necessários testes com amostras de emitâncias mais baixas para comprovar tal afirmação. Além das amostras cinza, apenas a amostra branco premium 2 sofreu alteração em sua emitância (acima da precisão do equipamento), variando de 0,89 (valor inicial) a 0,87 (valor final, após os doze meses).

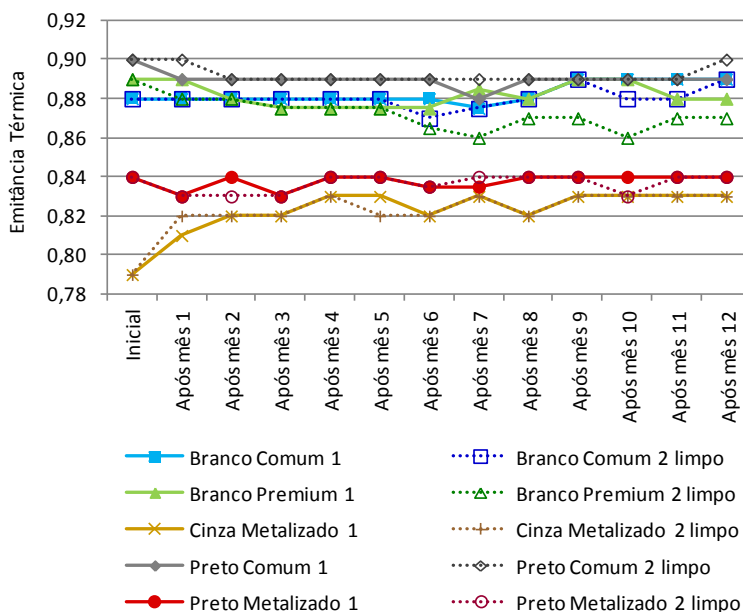


Figura 37 – Emitância térmica das amostras nos meses de análise.

4.1.2.2 Impacto da limpeza nas propriedades radiantes

Durante alguns dos meses de análise, as amostras de número 2 tiveram suas refletâncias e emitâncias medidas tanto antes quanto após a limpeza mensal (descrita no item 3.1.1). Isso ocorreu nas medições após o primeiro, o quinto e o décimo mês de monitoramento.

As Figuras 38 a 40 mostram as amostras de número 2, antes e após a limpeza mensal, nos três meses citados. É possível verificar que, antes da limpeza, as amostras pretas apresentam alguns pontos claros e as amostras brancas apresentam pontos escuros, resultado da deposição de sujeira. A amostra cinza é a que apresenta menor alteração aparente (pela simples visualização a olho nu).

Observando a Figura 38 é possível perceber que a simples limpeza com água foi capaz de remover quase totalmente a sujeira depositada nas amostras no primeiro mês. Porém, após o quinto (Figura 39) e o décimo mês (Figura 40), já é possível perceber que, nas amostras brancas, a sujeira não pôde ser totalmente removida. Isso indica que, além da sujeira, pode ter havido degradação da tinta pela exposição à radiação ultravioleta.

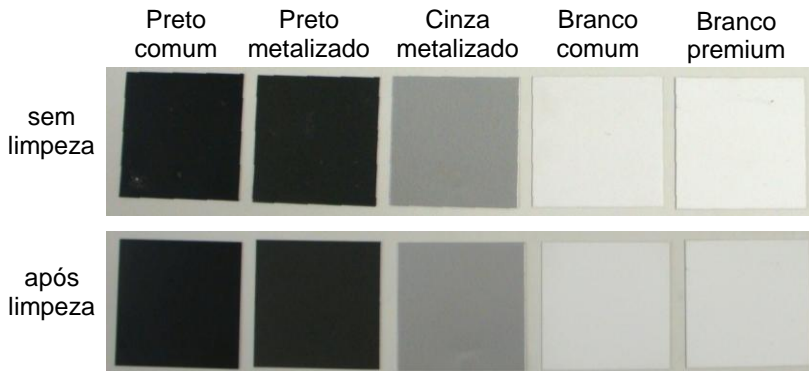


Figura 38 – Amostras pequenas de número 2, após mês 1.

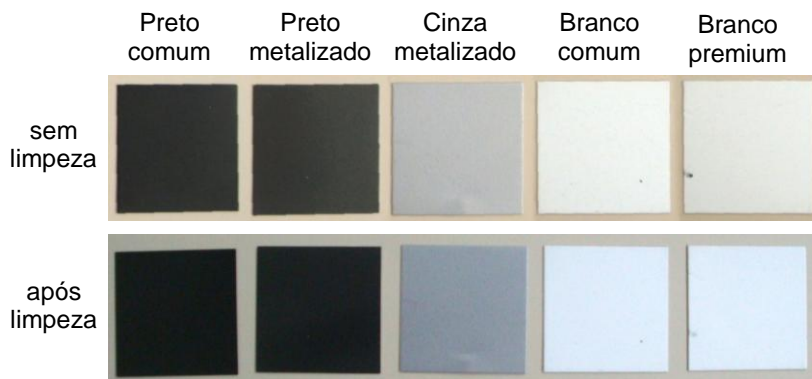


Figura 39 – Amostras pequenas de número 2, após mês 5.

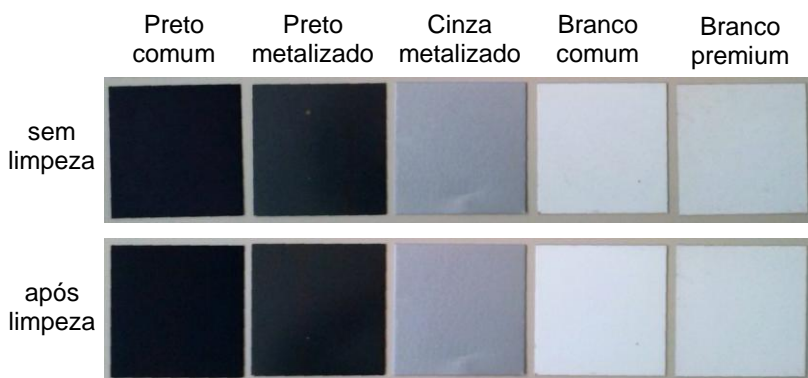


Figura 40 – Amostras pequenas de número 2, após mês 10.

A Tabela 10 mostra que, na maior parte dos casos, a limpeza provocou um pequeno aumento imediato no valor da refletância solar das amostras. Verifica-se também que esse aumento da refletância após a limpeza foi maior nas amostras mais claras (brancas e cinza) do que nas amostras escuras (pretas).

Na amostra cinza o resultado referente ao primeiro mês indica que teria havido uma redução da refletância solar com a

limpeza. Tendo em vista que a observação da amostra (Figura 38) não apontou nenhum tipo de resíduo que pudesse explicar tal resultado, e sabendo que nos meses seguintes a limpeza provocou aumento da refletância, avalia-se que tal valor negativo seja justificado por limitação de precisão da medição com o Espectrofotômetro Lambda 750.

As amostras pretas foram as que apresentaram menores diferenças na refletância antes e após limpeza. No caso da amostra de preto comum, a refletância reduziu com a limpeza no quinto e no décimo mês. Isso pode ocorrer por que as partículas de poeira acumuladas na superfície da amostra são mais refletivas do que a tinta. Porém, como as diferenças são muito pequenas, podem também estar na faixa de precisão do equipamento.

Tabela 10 – Refletância solar das amostras número 2, antes e após limpeza.

| Amostra | Situação | Refletância Solar (%) | | | | | |
|------------------|----------|-----------------------|-------|------------|-------|-------------|-------|
| | | Após mês 1 | | Após mês 5 | | Após mês 10 | |
| | | M. | Dif. | M. | Dif. | M. | Dif. |
| Branco Comum 2 | Sujo | 83,50 | 0,67 | 83,72 | 0,46 | 82,53 | 2,63 |
| | Limpo | 84,17 | | 84,19 | | 85,16 | |
| Branco Premium 2 | Sujo | 87,02 | 0,67 | 86,04 | 1,71 | 83,99 | 3,69 |
| | Limpo | 87,70 | | 87,74 | | 87,68 | |
| Cinza Metaliz. 2 | Sujo | 59,34 | -0,21 | 59,22 | 1,71 | 58,95 | 2,36 |
| | Limpo | 59,13 | | 60,93 | | 61,31 | |
| Preto Comum 2 | Sujo | 4,61 | 0,08 | 5,68 | -0,02 | 4,73 | -0,12 |
| | Limpo | 4,69 | | 5,66 | | 4,60 | |
| Preto Metaliz. 2 | Sujo | 15,88 | 0,20 | 16,77 | 0,29 | 16,27 | 0,37 |
| | Limpo | 16,08 | | 17,06 | | 16,65 | |

(Obs: M. = Medido; Dif. = Diferença.)

Observando as Figuras 41 a 45 percebe-se que com o passar dos meses a limpeza passou a ser mais relevante para a manutenção da refletância nas amostras brancas e cinza. No caso das amostras pretas, a limpeza teve pouco impacto nas refletâncias. Tais Figuras também demonstram que a diferença nas refletâncias da amostra suja e limpa ocorre principalmente na faixa visível do espectro e nos menores comprimentos do infravermelho.

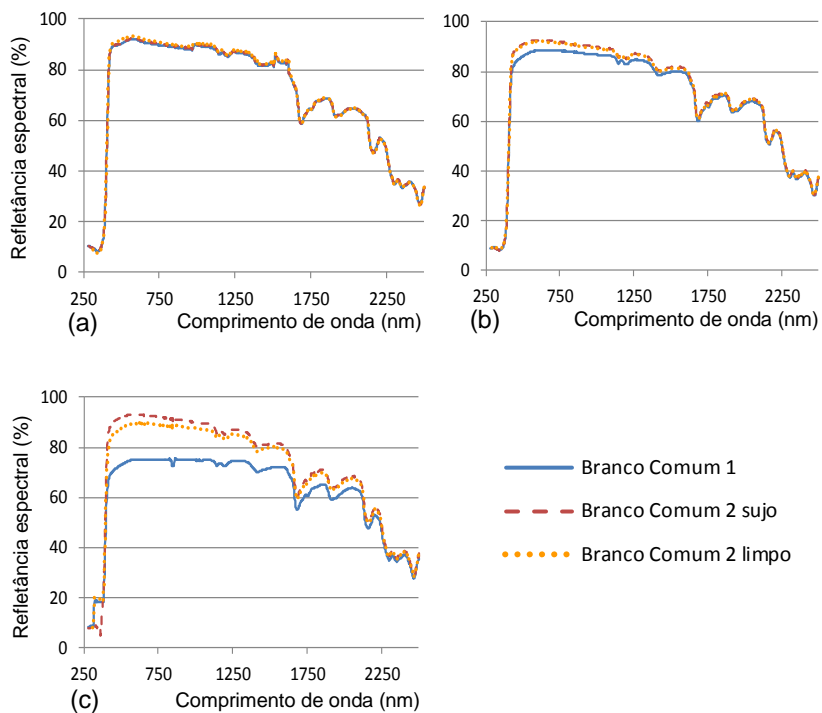


Figura 41 – Refletância espectral das amostras de cor branco comum: (a) após mês 1; (b) após mês 5; (c) após mês 10.

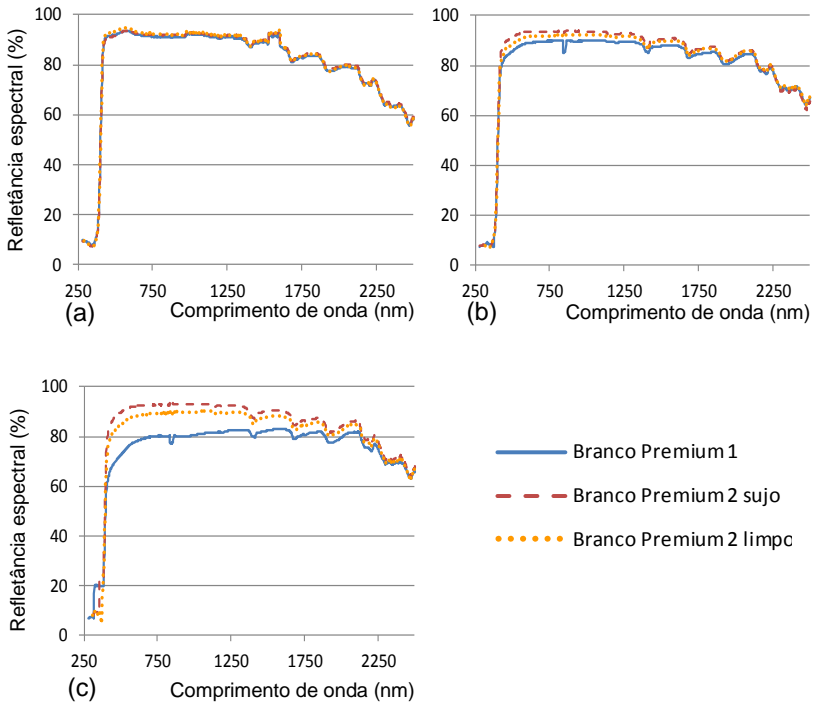


Figura 42 – Refletância espectral das amostras de cor branco premium: (a) após mês 1; (b) após mês 5; (c) após mês 10.

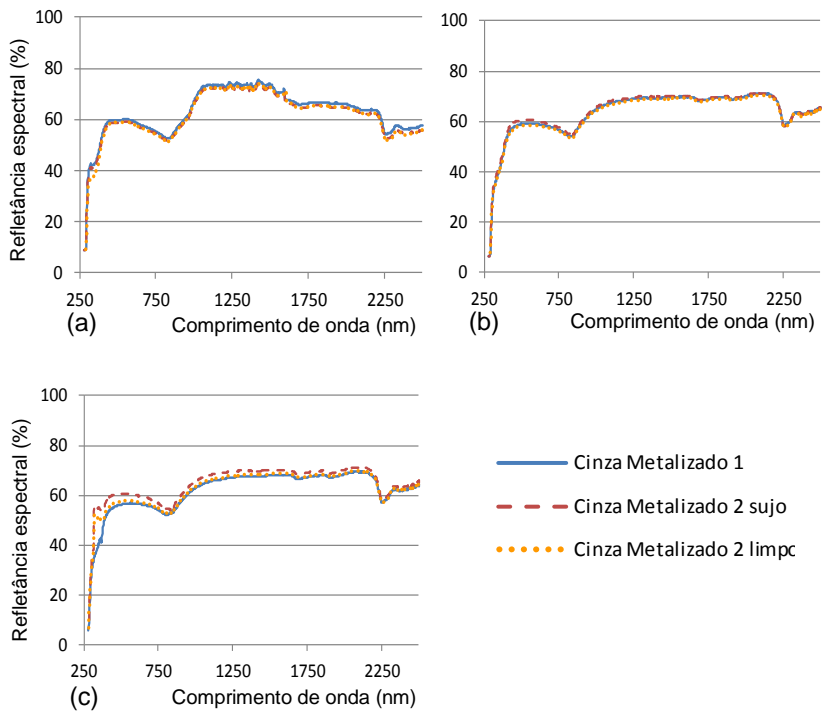


Figura 43 – Refletância espectral das amostras de cor cinza metalizado: (a) após mês 1; (b) após mês 5; (c) após mês 10.

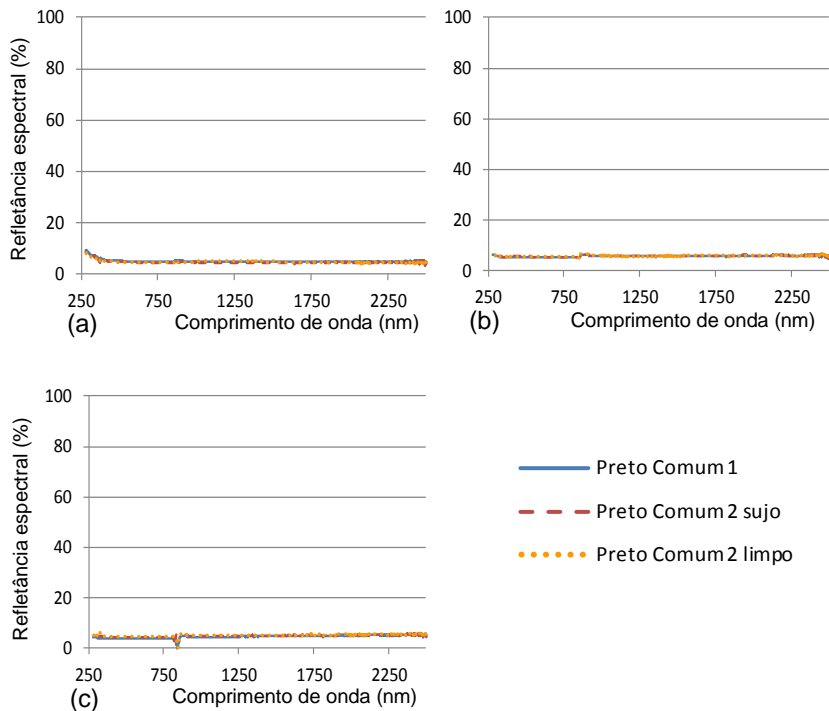


Figura 44 – Refletância espectral das amostras de cor preto comum: (a) após mês 1; (b) após mês 5; (c) após mês 10.

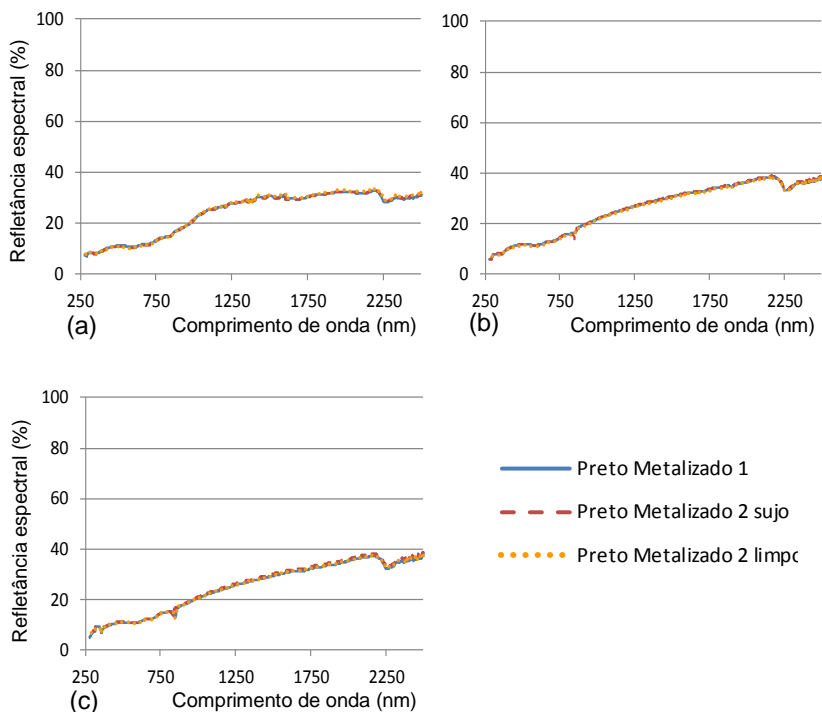


Figura 45 – Refletância espectral das amostras de cor preto metalizado: (a) após mês 1; (b) após mês 5; (c) após mês 10.

Os resultados referentes à emitância são mostrados na Tabela 11. Eles demonstram que a limpeza não provocou impactos diretos na emitância. Isso pode ser afirmado pois, apesar de haver algumas pequenas diferenças nos valores medidos antes e após a limpeza de algumas das amostras, tais diferenças correspondem à limitação de precisão do Emissômetro (precisão de $\pm 0,01$).

Tabela 11 – Emitância das amostras número 2, antes e após limpeza.

| Amostra | Situação | Emitância | | |
|--------------------|----------|---------------|---------------|----------------|
| | | Após mês 1 | Após mês 5 | Após mês 10 |
| Branco Comum 2 | Sujo | 0,88 | 0,88 | 0,88 |
| | Limpo | 0,88 | 0,88 | 0,88 |
| Branco Premium 2 | Sujo | 0,89 | 0,88 | 0,86 |
| | Limpo | 0,88 | 0,88 | 0,86 |
| Cinza Metalizado 2 | Sujo | 0,81 | 0,82 | 0,83 |
| | Limpo | 0,82 | 0,82 | 0,83 |
| Preto Comum 2 | Sujo | 0,89 | 0,89 | 0,89 |
| | Limpo | 0,90 | 0,89 | 0,89 |
| Preto Metalizado 2 | Sujo | 0,83 | 0,84 | 0,84 |
| | Limpo | 0,83 | 0,84 | 0,83 |

4.1.2.3 Impacto das alterações das propriedades radiantes nas temperaturas superficiais

Ao longo do período de um ano, as doze amostras grandes permaneceram expostas ao ambiente externo, tendo suas temperaturas superficiais monitoradas, conforme explanado na seção 3.1. Para cada cor analisada, uma das amostras permaneceu sem limpeza (amostras identificadas com o número 1) e a outra amostra foi limpa uma vez por mês (amostras de número 2).

Cabe ressaltar que as medições de refletância e emitância foram realizadas em outras amostras (amostras pequenas), que ficaram expostas às mesmas condições das amostras grandes, mas por terem dimensões diferentes não representaram fielmente o comportamento das superfícies das amostras grandes. Verificou-se, ao longo do período de análise que, após os períodos de chuva, formava-se uma lâmina d'água na superfície das amostras que demorava mais tempo para evaporar nas amostras grandes do que nas pequenas. Por isso, as superfícies das amostras grandes sofreram maior deterioração. Ainda assim, a análise visual das amostras indicava que nas amostras brancas, aquelas que passaram por limpeza mensal permaneceram mais preservadas que as sem

limpeza. Nas amostras cinzas e pretas essa análise visual não indicava grande diferenciação entre as amostras de mesma cor.

Conhecendo tais ressalvas, foram realizadas comparações das duas amostras grandes de mesma cor, ao longo do tempo, a fim de demonstrar o impacto da diferença das propriedades radiantes em suas temperaturas superficiais. A Figura 46 mostra as temperaturas superficiais das amostras grandes no dia 12 de novembro de 2012, no início do período de monitoramento. Percebe-se que as duas amostras de cada cor apresentam praticamente as mesmas temperaturas superficiais ao longo do dia. A diferença entre as temperaturas máximas das duas amostras de mesma cor não ultrapassou $0,3^{\circ}\text{C}$. No período com insolação, as temperaturas mais elevadas ocorreram nas amostras pretas e as menores temperaturas ocorreram nas amostras brancas, segundo já era previsto. No período noturno, todas as amostras apresentam temperaturas superficiais muito semelhantes. Isso se deve ao fato de que todas apresentam valores semelhantes de emitância térmica.

Entretanto, no dia 17 de dezembro de 2012, pouco mais de um mês após o início do monitoramento, as amostras de mesma cor já apresentavam diferenças em suas temperaturas superficiais no período diurno. Nesse dia, mostrado na Figura 47, as amostras de número 2 já haviam sido limpas pela primeira vez. Percebe-se que, para todas as tintas, as amostras com limpeza apresentaram menor temperatura superficial.

Na Figura 48 são apresentadas as temperaturas superficiais das amostras grandes no dia 09 de novembro de 2013, no final do período de monitoramento. Verifica-se que após um ano de exposição, já há diferenças significativas nas temperaturas das amostras que receberam tratamento diferenciado. As amostras que foram limpas periodicamente apresentaram temperaturas superficiais sempre menores que as sem limpeza, durante o dia. A maior diferença percentual ocorreu para a tinta de cor branco comum, onde a amostra 2 alcançou temperatura superficial máxima 9% menor que a amostra 1. A menor diferença ocorreu para a tinta de cor preto comum, na qual a amostra 2 obteve temperatura superficial máxima 5% menor que a amostra 1.

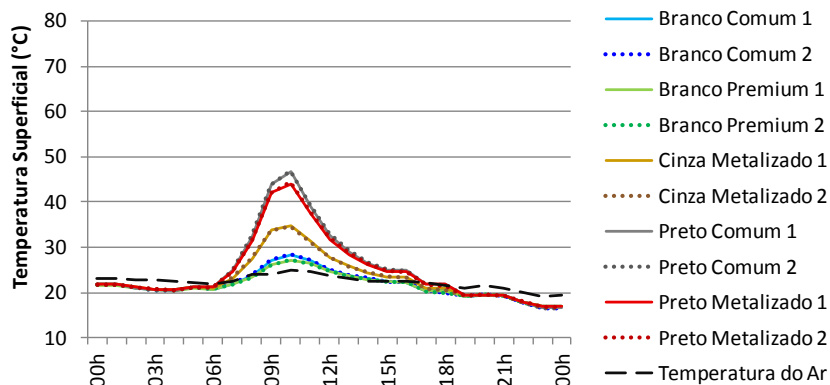


Figura 46 – Temperaturas superficiais das amostras grandes em 12 de novembro de 2012.

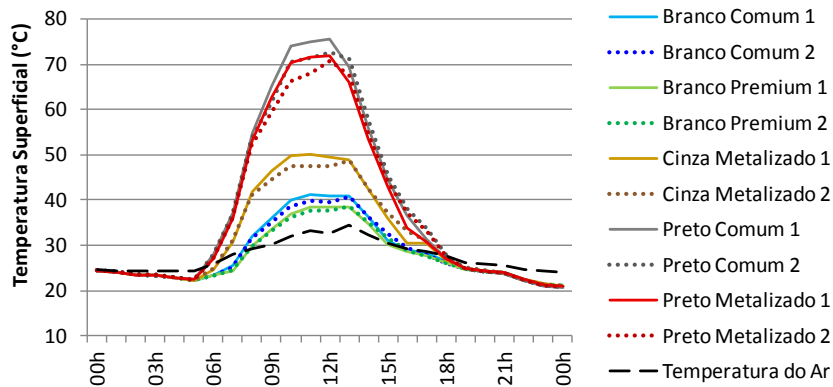


Figura 47 – Temperaturas superficiais das amostras grandes em 17 de dezembro de 2012.

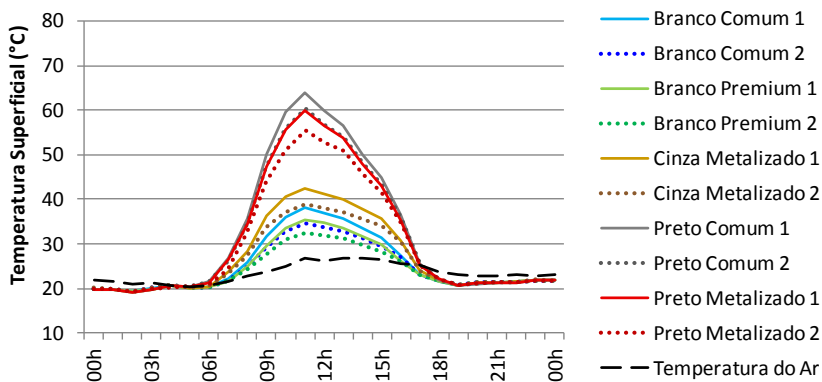


Figura 48 – Temperaturas superficiais das amostras grandes em 9 de novembro de 2013.

4.2 Verificação da confiabilidade da simulação computacional

A fim de verificar a confiabilidade dos resultados obtidos por simulação, tendo em vista a correta definição dos valores de refletância e emitância dos revestimentos a serem simulados, foram realizados testes iniciais com modelos computacionais representativos das amostras analisadas. Utilizou-se um arquivo climático com os dados meteorológicos obtidos no primeiro mês do período de monitoramento: novembro de 2012.

Para a análise de confiabilidade foram escolhidos dois períodos com características distintas: os dias 14 a 16 de novembro, e os dias 20 a 22 de novembro. Conforme mostram as Figuras 49 a 51, o primeiro período é caracterizado por predominância de nuvens, com algumas aberturas de sol, e chuvas pontuais, com temperatura máxima de 24°C. O segundo período é caracterizado por sol com pouca nebulosidade, sem chuva, e temperatura máxima de 30°C.

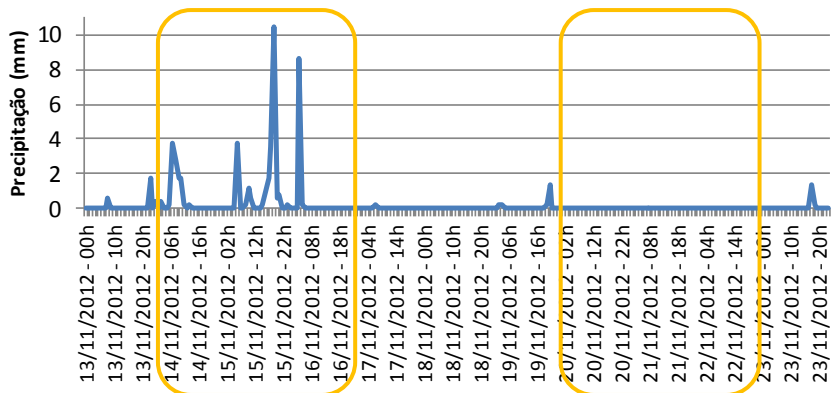


Figura 49 – Precipitação pluviométrica obtida na estação automática do INMET (<http://www.inmet.gov.br>).

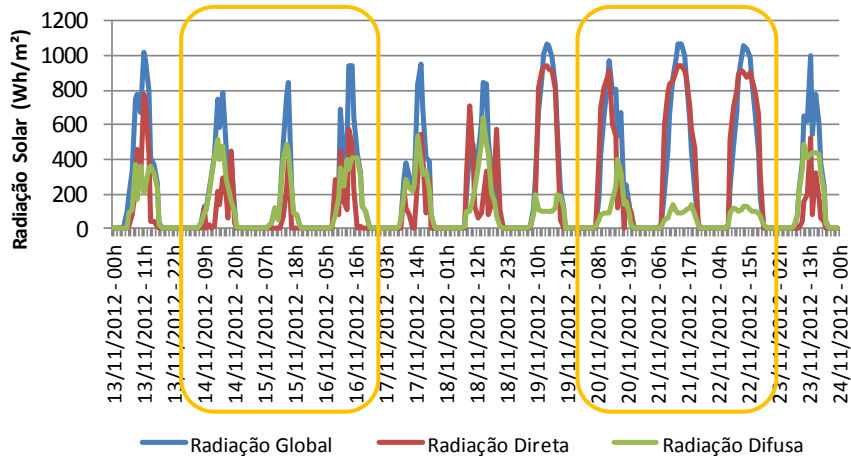


Figura 50 – Radiação solar obtida nos piranômetros do Lepten.

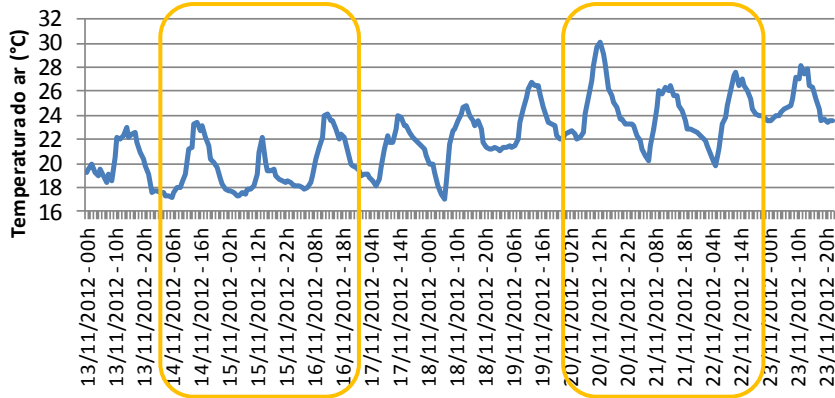


Figura 51 – Temperatura do ar obtida na estação meteorológica do LabEEE.

Os modelos, representando as amostras dos cinco revestimentos monitorados, foram simulados utilizando os diferentes algoritmos de convecção externa disponíveis no programa EnergyPlus. A Figura 52 mostra a comparação das temperaturas superficiais medidas e simuladas para a cor branco comum e a Figura 53 para a cor preto comum. Para as demais amostras as figuras estão apresentadas no Apêndice 4.

Verifica-se que a simulação utilizando o algoritmo *Simple Combined* resultou em valores de temperatura superficial sempre maiores que os medidos. Também se percebe que no período noturno tais valores são iguais à temperatura do ar, o que não é demonstrado nas medições. Sendo assim tal algoritmo demonstrou não ser indicado para as simulações. As demais simulações, utilizando os outros quatro algoritmos, apresentaram resultados mais coerentes. Entre eles, os algoritmos TARP e Adaptive foram os que resultaram em temperaturas superficiais mais semelhantes entre si, e mais aproximadas às medidas.

Observando as Figuras 52 e 53 pode-se também notar que as diferenças entre valores simulados e medidos são menores nos dias 14 a 16, quando havia menor intensidade de radiação solar (dias nublado e com chuva). Verifica-se ainda que as diferenças são maiores para as amostras pretas (menor refletância), e menores para as amostras brancas (maior refletância). Essas duas observações indicam uma possibilidade

das simulações apresentarem maior distorção nos resultados quanto maiores forem as temperaturas superficiais.

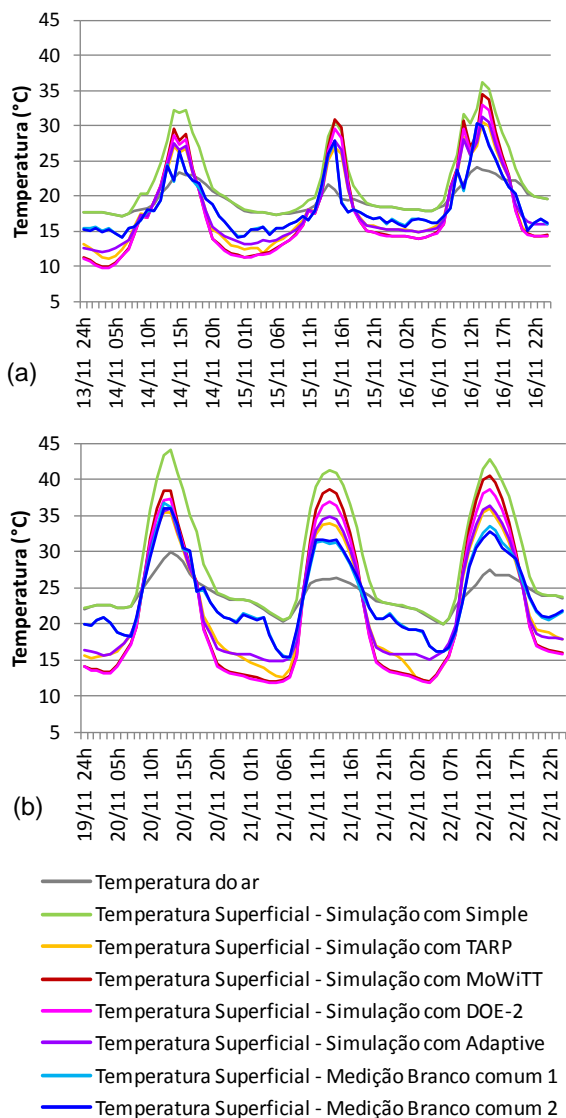


Figura 52 – Temperatura do ar e temperatura superficial das amostras branco comum, monitoradas e simuladas: (a) dias 14 a 16/11/2012 e (b) dias 20 a 22/11/2012.

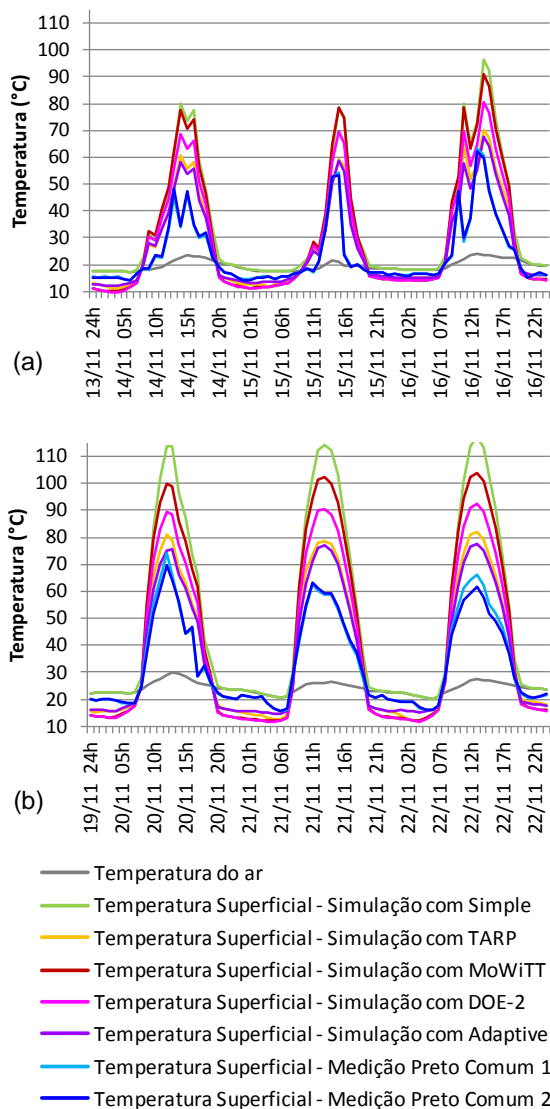


Figura 53 – Temperatura do ar e temperatura superficial das amostras preto comum, monitoradas e simuladas: (a) dias 14 a 16/11/2012 e (b) dias 20 a 22/11/2012.

Foram verificadas as diferenças entre os valores simulados e medidos para cada dado horário, e calculadas as diferenças mínima, máxima e média para os dois períodos analisados. A Figura 54 mostra as diferenças médias entre medição e simulações e as diferenças mínimas e máximas estão no Apêndice 4. É possível confirmar que no período em que a temperatura superficial é mais elevada, as diferenças médias ficam mais elevadas. Também se percebe que as diferenças médias são maiores para as amostras que apresentam maior temperatura superficial (as amostras pretas). Para todas as amostras, as menores diferenças foram obtidas no caso da simulação com o algoritmo *Adaptive*. Apesar desse algoritmo apresentar os melhores resultados, as diferenças obtidas com ele ainda são elevadas, com a diferença máxima ultrapassando 20°C no caso da amostra de cor preta.

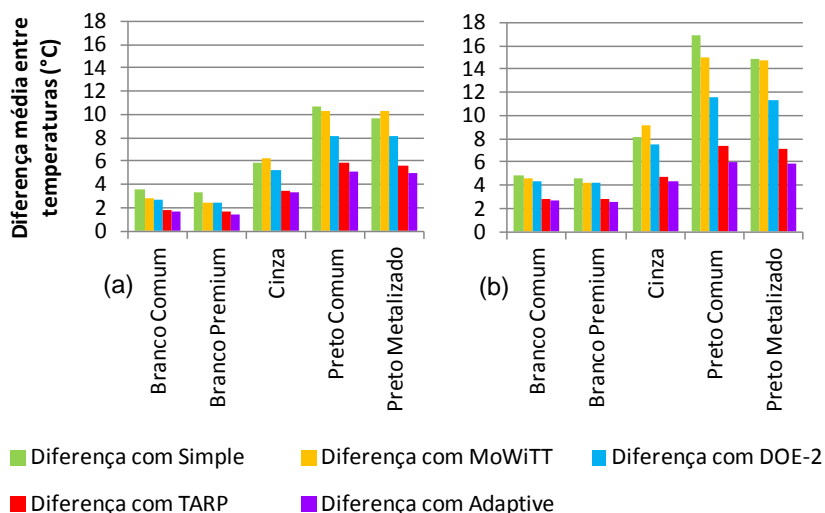


Figura 54 - Diferenças médias entre as temperaturas superficiais medidas e simuladas: (a) dias 14 a 16/11/2012 e (b) dias 20 a 22/11/2012.

Tendo em vista tais diferenças, foram criados gráficos de regressão entre temperatura superficial obtida por medição e por simulação com os cinco algoritmos, para cada cor analisada.

Para todos os casos foram adicionadas linhas de tendência linear, mostrando a equação de regressão linear e o coeficiente de determinação (R^2).

A Figura 55 mostra os resultados da regressão obtidos entre medição e simulação com o algoritmo *Adaptive* (que foi o algoritmo que resultou em menores diferenças médias com a medição). Verifica-se, em todos os casos, uma tendência linear com alto coeficiente de determinação. Percebe-se também grande semelhança nas equações de regressão linear para quase todas as amostras, com valores muito similares nas duas constantes, sendo um pouco diferenciadas apenas para a amostra cinza. Os resultados demonstram que a diferença entre os resultados obtidos por medição e por simulação com o algoritmo *Adaptive* é proporcional à variação de temperatura. Dessa forma, quanto maiores são os valores de temperatura, maiores as diferenças entre dados medidos e simulados. Mesmo sabendo que os resultados não são o ideal esperado, conhecendo suas limitações, considerou-se que a simulação pode ser utilizada no método proposto neste trabalho para análise de desempenho térmico, pois ele é baseado na comparação de desempenho de modelos, e não em valores absolutos.

Para os demais algoritmos, os gráficos de regressão (disponíveis no Apêndice 4) apontam que, apesar dos elevados valores dos coeficientes de determinação (R^2), os resultados são menos satisfatórias do que o obtido com o algoritmo *Adaptive*. A melhor relação entre as variáveis analisadas é a que resultou em uma linha de tendência mais próxima à bissetriz do gráfico.

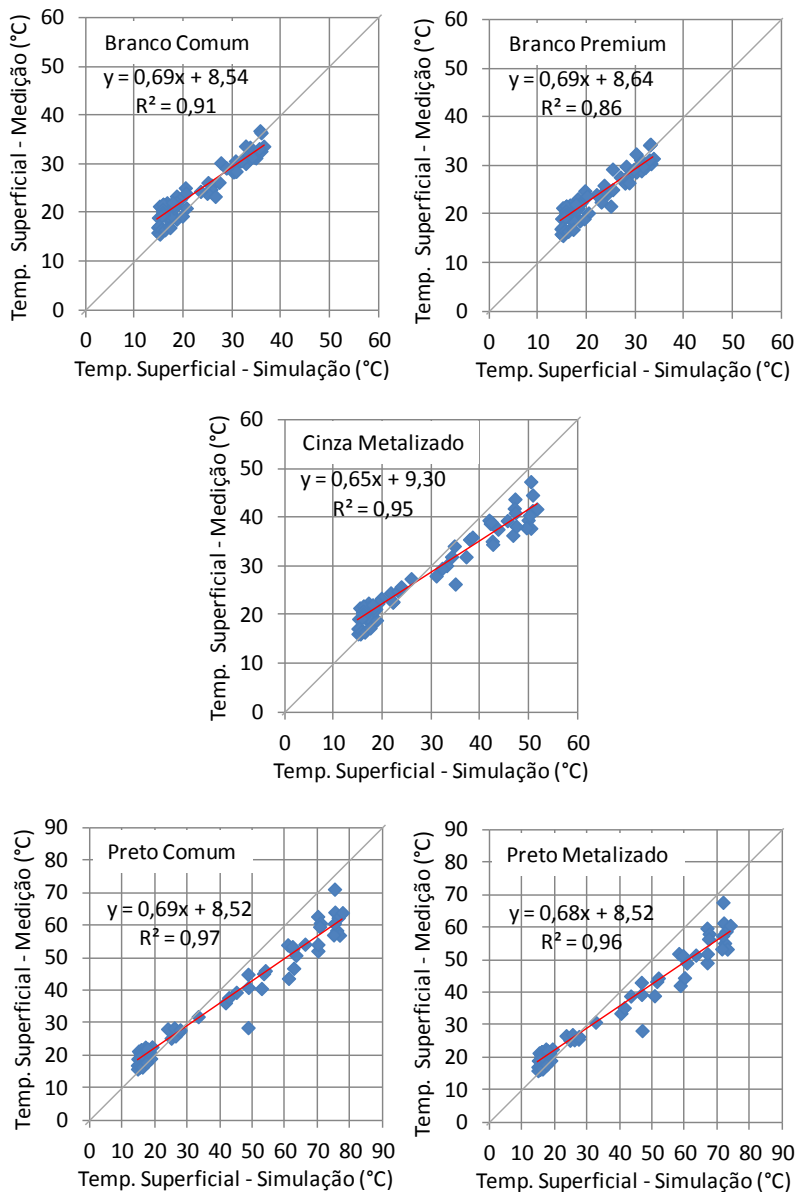


Figura 55 – Correlação entre temperaturas superficiais obtidas por medição e por simulação com o algoritmo *Adaptive*.

4.3 Análises através de simulação computacional

Foi proposto um método utilizando simulações paramétricas a fim de analisar o impacto do uso de revestimentos com diferentes valores de refletância e de emitância, utilizando arquivos climáticos representativos das diferentes condições climáticas verificadas no Brasil. Tal método foi aplicado utilizando um modelo simplificado de uma edificação residencial, com algumas variações de cargas internas e do envoltório. Conforme detalhado na seção 3.2.2.1, o modelo foi simulado com duas opções de densidade de carga interna de iluminação e de equipamentos, que na apresentação das tabelas e imagens a seguir são denominadas como carga baixa e carga alta. Com relação aos componentes construtivos foram simuladas duas opções, com diferentes valores de resistência e capacidade térmica, que nos resultados são denominadas apenas como resistência baixa e resistência alta.

A partir dessas simulações, obteve-se a carga térmica anual de aquecimento e resfriamento de cada modelo. Esse valor foi comparado às propriedades radiantes superficiais dos revestimentos, verificando-se a melhor combinação de valores de refletância e emitância, que resultaram em menor carga térmica do modelo, em cada tipo de clima. Esses resultados são apresentados na Tabela 12. Verifica-se que em quase todas as cidades analisadas a menor carga anual para condicionamento do ar foi obtida pelo uso de revestimento com o maior valor de refletância solar ($\rho = 0,9$). Apenas em duas das cidades, ambas da zona bioclimática 1, alguns modelos alcançaram melhor resultado utilizando revestimento com refletância solar um pouco mais baixa, entre 0,6 e 0,8. Isso indica que nas cidades com clima temperado, que apresentam também desconforto por frio, a simulação computacional do modelo simplificado pode indicar a melhor característica a ser adotada em uma edificação. Porém, de forma geral, em quase todo o território brasileiro, indica-se o uso de elevada refletância solar como estratégia para melhoria do desempenho térmico.

Tabela 12 – Valores de emitância (ε) e refletância (ρ) que resultaram em menor carga térmica anual para cada modelo, em cada clima.

| Zona Bioclimática - Cidade | Resistência Baixa | | | | Resistência Alta | | | |
|------------------------------|-------------------|--------|---------------|--------|------------------|--------|---------------|--------|
| | Carga baixa | | Carga alta | | Carga baixa | | Carga alta | |
| | ε | ρ | ε | ρ | ε | ρ | ε | ρ |
| Z1 - Campos do Jordão/SP | 0,1 | 0,9 | 0,1 | 0,9 | 0,1 | 0,7 | 0,1 | 0,8 |
| Z1 - Curitiba/PR | 0,1 | 0,9 | 0,1 | 0,9 | 0,1 | 0,9 | 0,1 | 0,9 |
| Z1 - São Joaquim/SC | 0,1 | 0,8 | 0,1 | 0,8 | 0,1 | 0,6 | 0,1 | 0,6 |
| Z2 - Santa Maria/RS | 0,1 | 0,9 | 0,1 | 0,9 | 0,1 | 0,9 | 0,1 | 0,9 |
| Z2 - São João Del Rei/MG | 0,2 | 0,9 | 0,3 | 0,9 | 0,1 | 0,9 | 0,3 | 0,9 |
| Z2 - Teresópolis/RJ | 0,1 | 0,9 | 0,1 | 0,9 | 0,1 | 0,9 | 0,1 | 0,9 |
| Z3 - Florianópolis/SC | 0,5 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Z3 - Porto Alegre/RS | 0,2 | 0,9 | 0,3 | 0,9 | 0,3 | 0,9 | 0,4 | 0,9 |
| Z3 - São Paulo/SP | 0,2 | 0,9 | 0,3 | 0,9 | 0,2 | 0,9 | 0,4 | 0,9 |
| Z4 - Brasília/DF | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Z4 - Pirapora/MG | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Z4 - São Carlos/SP | 0,4 | 0,9 | 0,5 | 0,9 | 0,4 | 0,9 | 0,7 | 0,9 |
| Z5 - Garanhuns/PE | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Z5 - Niterói/RJ | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Z5 - Vitória da Conquista/BA | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Z6 - Campo Grande/MS | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Z6 - Goiânia/GO | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Z6 - Montes Claros/MG | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Z7 - Cuiabá/MT | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Z7 - Paulo Afonso/BA | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Z7 - Teresina/PI | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Z8 - Belém/PA | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Z8 - Fortaleza/CE | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Z8 - São Luis/MA | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |

(Obs: Estão destacados na tabela os resultados com valor diferente de 0,9.)

Quando se analisa a emitância térmica (ϵ), os resultados da Tabela 12 indicaram uma maior variabilidade. Para todas as cidades da zona bioclimática 1 a menor carga térmica anual foi obtida no caso do uso de revestimentos com a mais baixa emitância ($\epsilon = 0,1$). Para as cidades da zona 2, os melhores resultados foram obtidos para superfícies externas com emitância entre 0,1 e 0,3. Esses resultados indicam que, nas zonas 1 e 2, melhores desempenhos seriam alcançados com o uso de revestimentos metalizados, por exemplo, que apresentam alta refletância e baixa emitância. Entende-se que esse tipo de solução é mais viável para ser aplicada em coberturas do que em paredes. Existem no mercado opções de pastilhas revestidas por películas metalizadas, porém elas são mais utilizadas em ambientes internos.

No caso da zona bioclimática 3, os valores da emitância para menor carga térmica foram um pouco maiores, mas muito variados, entre 0,2 e 0,9. Para a zona 4 os melhores resultados foram obtidos com emitância entre 0,4 e 0,9. Revestimentos com valores médios de emitância (entre 0,3 e 0,7) não são usuais, mas poderiam ser obtidos pela produção de tintas com pigmentos metalizados. Finalmente, para as demais zonas bioclimáticas (zonas 5 a 8), os revestimentos com emitâncias altas (acima de 0,7) foram os que proporcionaram menor carga térmica.

Tais resultados são muito relevantes, pois a emitância costuma ser uma propriedade desconsiderada das análises térmicas. Geralmente indica-se o uso de alta emitância para todas as regiões com predominância de clima quente, porém verifica-se que isso não é totalmente correto. Para as cidades de clima temperado, revestimentos com valores intermediários de emitância seriam capazes de proporcionar melhor desempenho térmico às edificações no balanço anual.

Os resultados são apresentados de forma mais detalhada nas Figuras 56 a 60 e no Apêndice 5. Eles demonstram que, nas cidades com maior necessidade de aquecimento (especialmente as da zona bioclimática 1), a elevação nas cargas internas (iluminação e equipamentos) do modelo proporcionou uma pequena redução na carga térmica anual. Isso ocorreu pois o calor interno foi capaz de elevar a temperatura no interior do modelo, diminuindo a carga para aquecimento. Já no caso das

idades com maior necessidade de refrigeração, a elevação das cargas internas resultou em aumento na carga térmica. Porém, percebe-se que, para todas as cidades, a variação das cargas internas não modificou consideravelmente o comportamento do modelo referente à variação das propriedades radiantes das superfícies.

Isso é uma informação relevante para o caso da aplicação deste método na simulação de uma edificação, com vistas a definir as propriedades radiantes de seu envoltório. O modelo da edificação poderia ser simulado com um valor previsto de cargas internas. Mesmo que na prática houvesse variações nessas cargas internas, o desempenho da edificação não seria prejudicado a ponto de haver necessidade de alterar o revestimento, com outros valores de emitância e refletância.

Quanto à elevação da resistência e capacidade térmicas do envoltório, em todas as cidades, para quase todas as opções do envoltório, ela provocou uma redução na carga térmica anual. Especialmente nas cidades de clima temperado, essa variação provocou uma alteração no valor da emitância do melhor caso (com menor consumo energético). Isso significa que, para a aplicação deste método na simulação de uma edificação real, seria importante conhecer as propriedades térmicas do seu envoltório (resistência e capacidade térmicas) a fim de identificar as melhores opções de emitância e refletância.

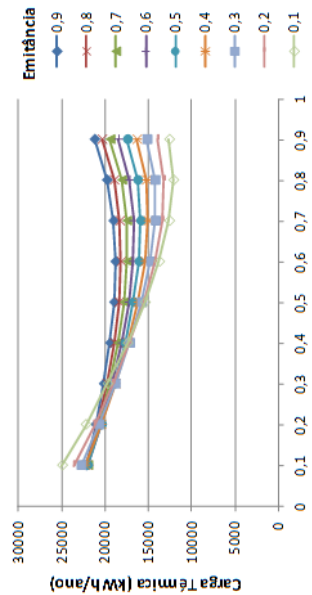
Os resultados referentes às cidades das zonas bioclimáticas 1 e 2 são os que mostram de forma mais relevante que a escolha da emitância do envoltório não deveria ser negligenciada. A Figura 56 mostra os resultados para a cidade de São Joaquim (zona 1) e a Figura 57 para Teresópolis (zona 2). Os resultados das outras cidades podem ser vistos no Apêndice 5. Percebe-se que mesmo com a adoção do melhor valor de refletância (para cada caso), a carga térmica pode ser muito variável dependendo da emitância do revestimento. Cita-se como exemplo o caso do modelo com resistência térmica baixa e carga interna baixa, em São Joaquim. Se fosse adotado o melhor valor de refletância solar (igual a 0,8), a carga para condicionamento poderia variar de 21.380 kWh/ano, com o uso de emitância 0,9, para 13.058 kWh/ano, no caso com emitância 0,1. Isso significaria uma redução de 8.322 kWh/ano, ou seja, de quase 40% na carga anual. Sendo assim, pode-se afirmar que a escolha correta da emitância é capaz de proporcionar melhoria

do desempenho térmico para edificações nas cidades das zonas bioclimáticas 1 e 2 e, conseqüentemente, uma redução relevante no consumo anual com condicionamento artificial do ar.

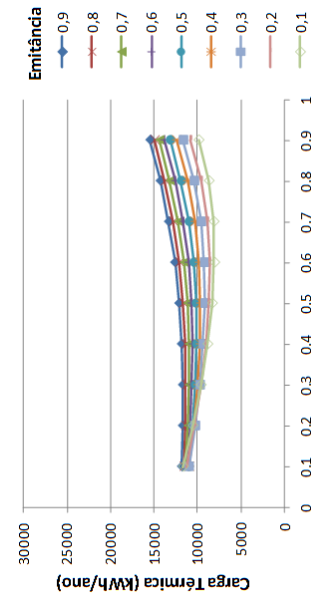
É interessante perceber que outros pesquisadores, que utilizaram a simulação com o objetivo de avaliar o potencial de economia de energia do uso de revestimentos frios em edificações, desconsideraram o papel da emitância. É o caso das pesquisas de Synnefa et al. (2007a) e de Halewood e Wilde (2008), que simularam modelos com variações da refletância solar e não da emitância térmica do envoltório. Os pesquisadores consideraram que o uso de materiais frios em algumas cidades de clima temperado seria benéfico, justificado pelo impacto na redução da carga de resfriamento (mesmo tendo conhecimento do aumento da carga de aquecimento). Entretanto não verificaram a possibilidade de uma solução mais eficiente para o balanço anual.

Outras discussões interessantes podem ser feitas a partir desses resultados. No caso da impossibilidade do uso de um material com baixa emitância, se for utilizada uma tinta com emitância igual a 0,9, por exemplo, altera-se a melhor opção de refletância solar para um valor mais baixo. Para o modelo com resistência alta e carga interna alta, em São Joaquim, o melhor caso passaria a ser com refletância solar igual a 0,3.

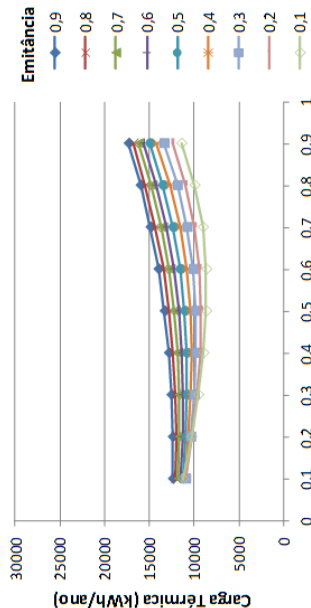
Os resultados mostram ainda que em todas as cidades das zonas bioclimáticas 1 e 2 (e também algumas da zona 3) há um ponto de inflexão no gráfico. Isso só ocorre nas cidades de clima temperado, onde há elevada carga térmica de aquecimento, além da carga de resfriamento. Tal ponto advém de que as melhores soluções de refletância e emitância são opostas para a redução das cargas de aquecimento e de resfriamento. De forma geral, para reduzir a necessidade de aquecimento o ideal é o uso de refletância e emitância baixas (0,1) e para reduzir o resfriamento indica-se o uso de refletância e emitância altas (0,9). O ponto de inflexão indica quando há uma inversão da melhor solução de emitância para reduzir a soma das cargas térmicas.



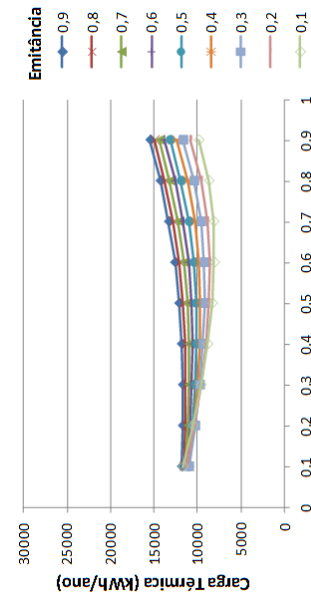
(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



(b) Resistência Baixa / Carga Alta



(c) Resistência Alta / Carga Baixa



(d) Resistência Alta / Carga Alta

Figura 56 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de São Joaquim – Z1.

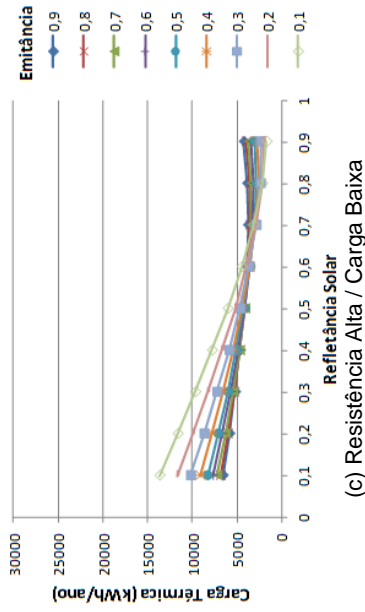
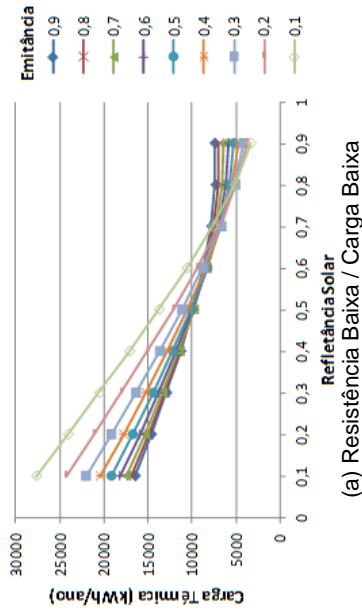
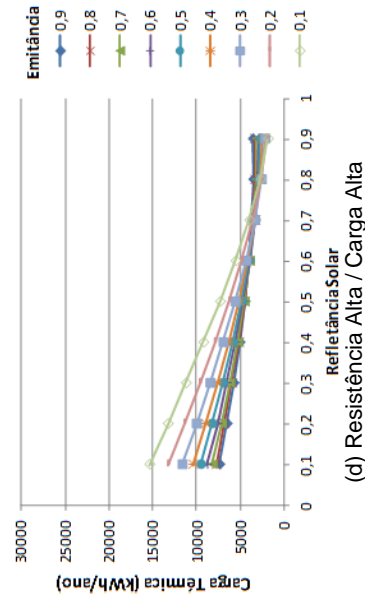
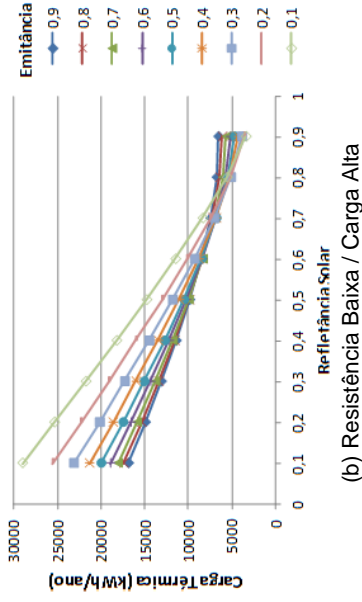


Figura 57 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de **Teresópolis** – Z2.

Analisando os resultados para as zonas bioclimáticas 3, 4 e 5 percebe-se uma grande variabilidade nos valores de emitância (entre 0,2 e 0,9) que resultam em melhor desempenho térmico (com menor carga térmica para condicionamento) para cada modelo. Porém, percebe-se que, apesar dessa variabilidade do melhor caso, quando se adota o melhor valor de refletância (que nessas cidades é sempre igual a 0,9), para todos os modelos a carga térmica é pouco variável com relação à emitância do revestimento. Ou seja, nessas cidades, se o envoltório da edificação possuir refletância solar de 0,9, a escolha da emitância tem um menor impacto em seu desempenho térmico.

Os resultados mostrados na Figura 58, para a cidade de São Paulo (zona 3), e na Figura 59, para a cidade de Garanhuns (zona 5), demonstram isso. No modelo de São Paulo com resistência térmica alta e carga interna alta, por exemplo, a carga poderia variar de 2.406 kWh/ano, com o uso de emitância 0,9, para 2.168 kWh/ano, com emitância 0,4 (para refletância solar igual a 0,9). Essa diferença é de apenas 238 kWh/ano e representa uma redução de 10% no consumo anual. Porém, essa baixa influência da emitância só se verifica no caso da adoção de elevada refletância. Para os demais valores de refletância, é crescente a influência da emitância.

Para as zonas bioclimáticas 6 a 8, a menor carga térmica foi obtida para os revestimentos com refletância solar igual a 0,9 e emitância térmica de 0,9. Pode-se dizer que, nessas zonas, quanto mais quente a cidade (maior carga para resfriamento), mais relevante é a escolha tanto da refletância solar quanto da emitância térmica. É o caso da cidade de Belém, cujos resultados são mostrados na Figura 60.

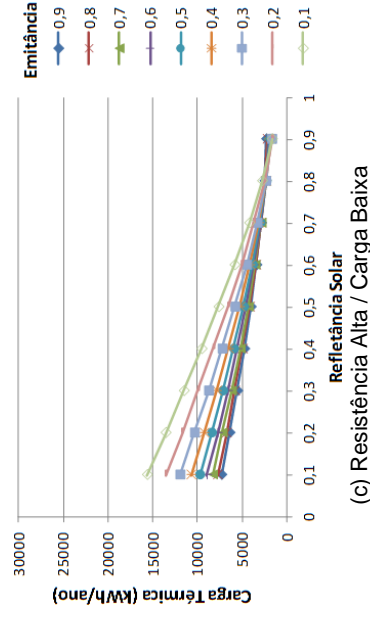
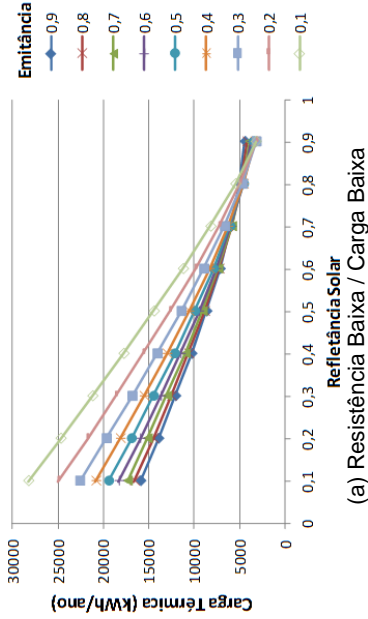
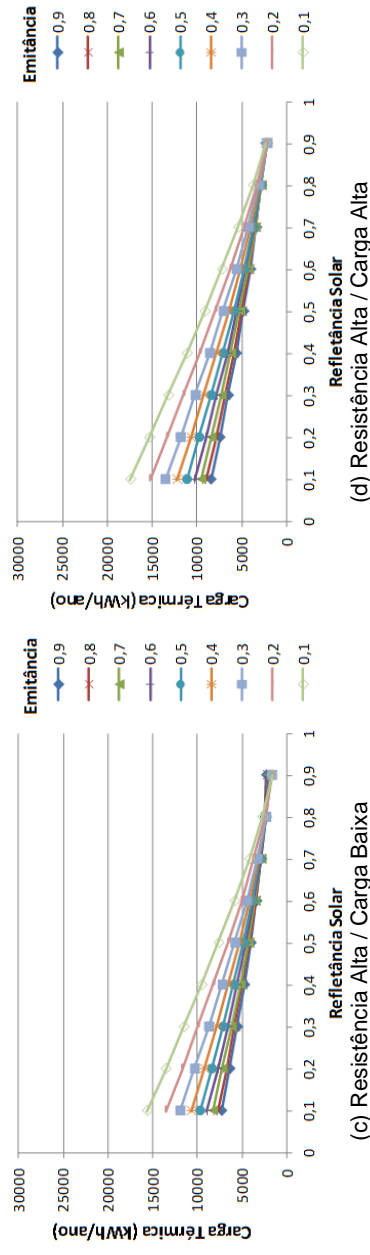
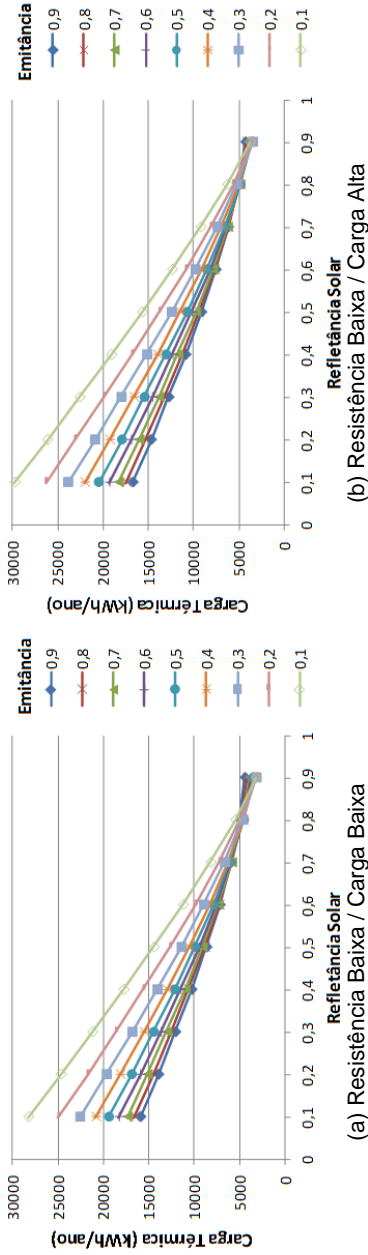


Figura 58 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de São Paulo – Z3.

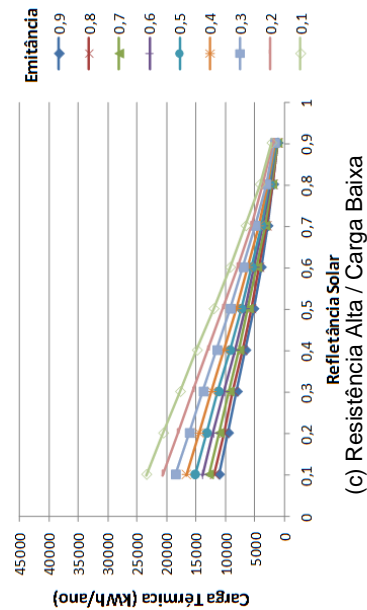
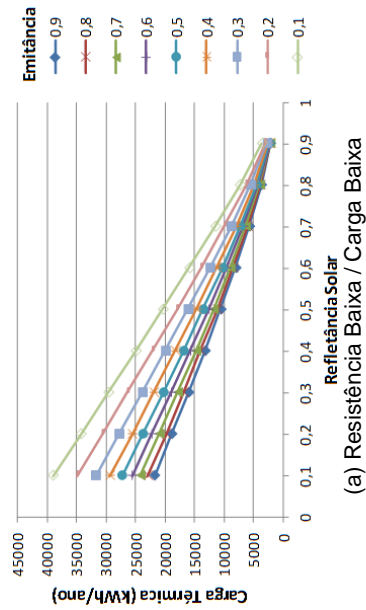
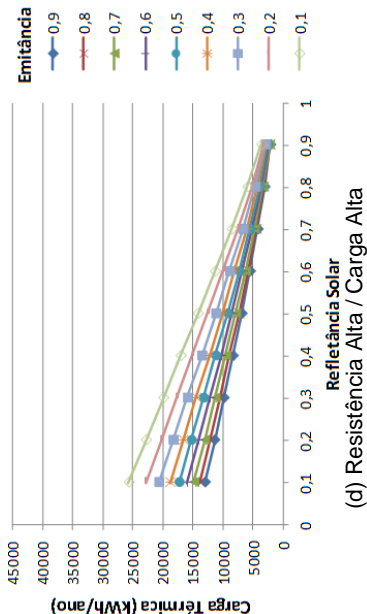
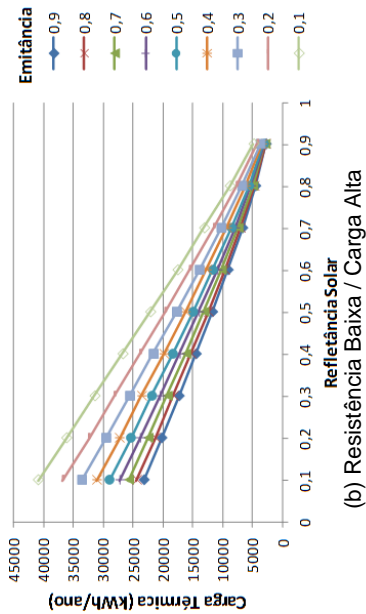


Figura 59 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Garanhuns – Z5.

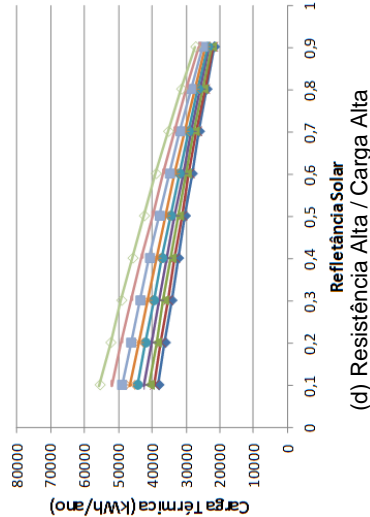
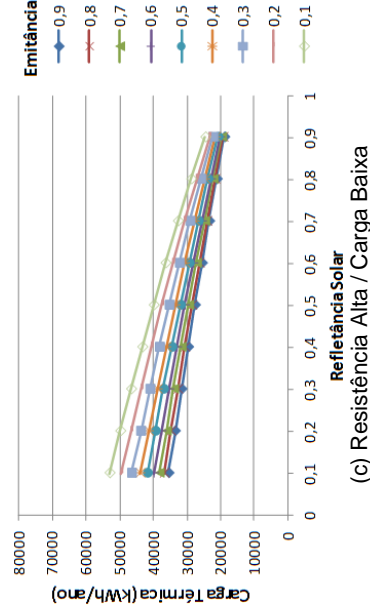
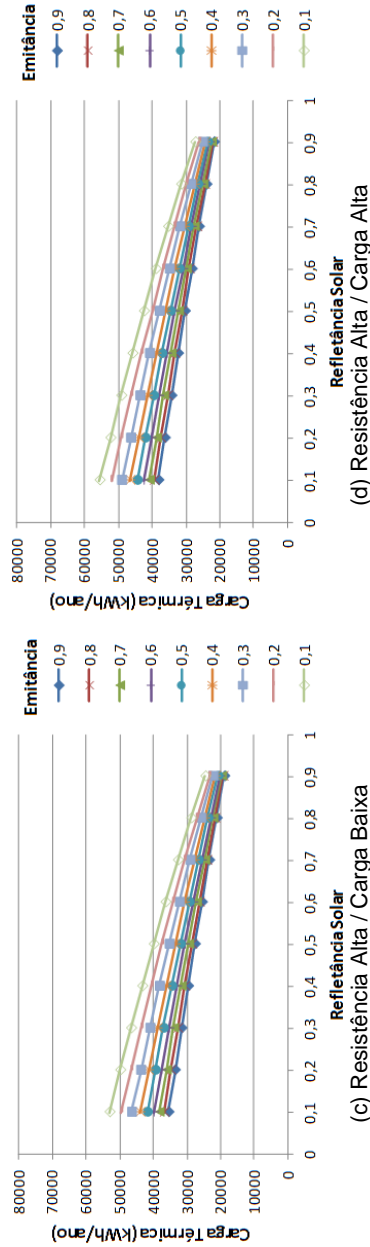
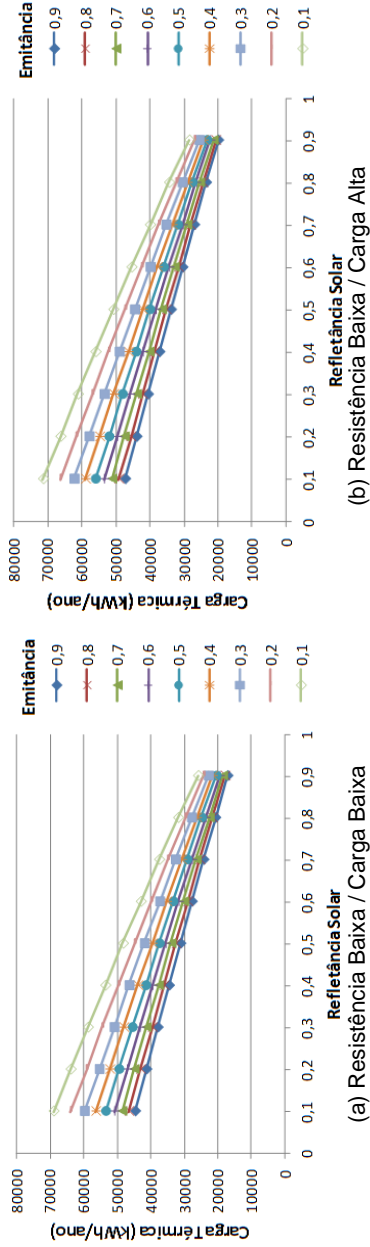


Figura 60 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Belém – Z8.

4.3.1 Análise individual de cobertura e paredes

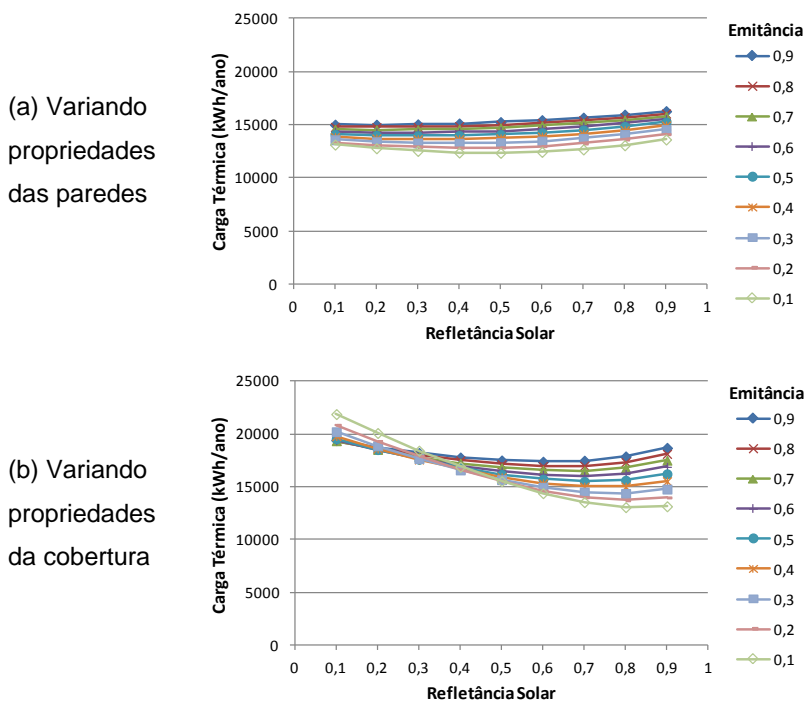
Além das análises paramétricas onde as propriedades refletivas superficiais foram variadas simultaneamente para parede e cobertura, realizaram-se simulações com análise individual da parede e da cobertura. Para isso, foram escolhidas duas cidades, sendo uma a cidade da zona bioclimática 1 com maior necessidade de aquecimento e uma da zona bioclimática 8 com maior necessidade de refrigeração. Com base nesse critério, as cidades escolhidas foram São Joaquim (zona 1) e Belém (zona 8).

Nesta análise foi utilizado apenas o modelo com baixa resistência e capacidade térmica e com carga interna baixa. Inicialmente foram fixados os valores de emitância e refletância da cobertura, e variados tais dados apenas nas paredes. Em seguida, foram fixados tais dados nas paredes, variando apenas na cobertura. No caso da análise para São Joaquim os valores fixos das propriedades radiantes utilizados foram 0,8 de refletância e 0,1 de emitância. Para a análise de Belém, foram fixados os valores 0,9 de refletância e 0,9 de emitância.

Os resultados para a cidade de São Joaquim são mostrados na Figura 61. Verifica-se que quando foram fixadas as melhores propriedades para a cobertura, variando-as apenas na parede, obteve-se, de uma forma geral, menores cargas térmicas do que as obtidas nos modelos com propriedades fixas nas paredes. Isso indica que, para o modelo de edificação analisado, a cobertura proporciona maior influência no desempenho térmico do que as paredes. Ainda assim, a adoção das melhores propriedades também nas paredes proporciona uma melhoria adicional ao desempenho do modelo.

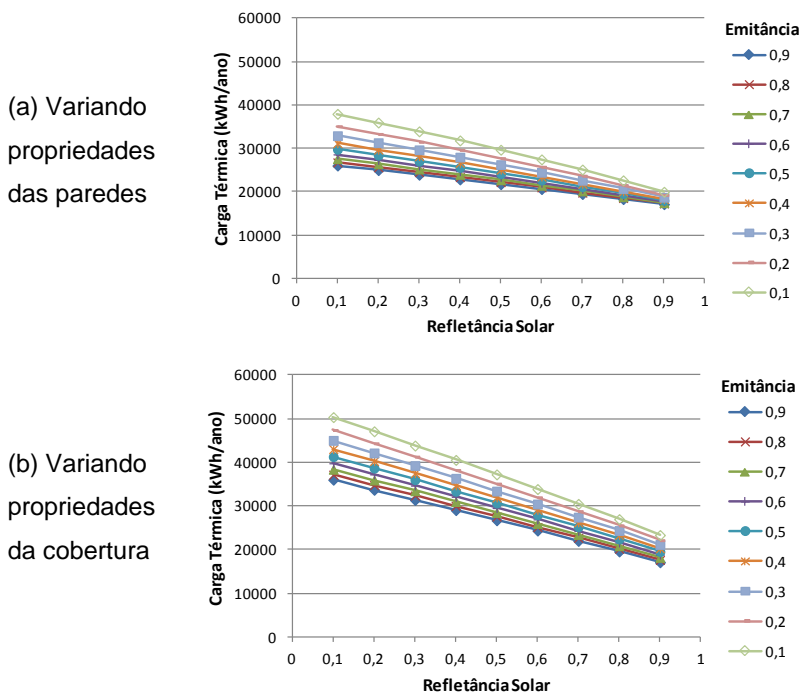
Nos resultados de São Joaquim é interessante também verificar que, no caso das propriedades radiantes das paredes, a emitância é mais influente que a refletância. Observando a Figura 61a vê-se que, se nas paredes for utilizado o melhor valor de emitância, que é igual a 0,1, a variação da refletância solar de 0,9 (pior caso) para 0,5 (melhor caso) resulta em redução de 1.257 kWh na carga térmica anual, que corresponde a uma redução de 9%. Entretanto, se for utilizado o melhor valor de refletância (0,5), a variação da emitância de 0,9 (pior caso) para 0,1 (melhor caso) resulta em uma diferença de 2.887 kWh na carga térmica anual, correspondendo a uma redução de 19%.

O mesmo não pode ser dito no caso das propriedades da cobertura. Nesse caso, a escolha da melhor refletância solar provoca maior impacto que da emitância. Isso é observado na Figura 61b. Se na cobertura for utilizado o melhor valor de emitância (0,1), a variação da refletância solar de 0,1 (pior caso) para 0,8 (melhor caso) resulta em redução de 8.827 kWh na carga térmica anual, que corresponde a uma redução de 40%. Já no caso do uso do melhor valor de refletância (0,8), a variação da emitância de 0,9 (pior caso) para 0,1 (melhor caso) resulta em uma diferença de 4.808 kWh na carga térmica anual, correspondendo a uma redução de 27%.



Na Figura 62 podem ser vistos os resultados para a cidade de Belém. Verifica-se que, também para o modelo em Belém, a

cobertura proporciona maior influência no desempenho térmico do que as paredes. Isso é dito pois, quando foram fixadas as melhores propriedades radiantes para a cobertura obteve-se, de uma forma geral, menores consumos de energia do que os obtidos com as propriedades fixas nas paredes. Porém é possível alcançar melhores resultados pela adoção das melhores propriedades também nas paredes.



A Figura 62 demonstra que, assim como em São Joaquim, aqui a refletância solar é mais influente na cobertura do que nas paredes. A emitância é muito influente tanto na cobertura quanto nas paredes.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa foi desenvolvida a fim de analisar a influência das propriedades radiantes de superfícies externas no desempenho térmico de edificações residenciais, e assim definir uma estratégia para escolha dos valores de refletância solar e emitância térmica mais indicados para edificações nos diferentes climas brasileiros. Adotou-se um método baseado na simulação computacional. A fim de verificar a confiabilidade de simulações computacionais, tendo em vista a variação de valores de refletância e emitância dos revestimentos a serem simulados, foram realizados alguns testes. Nesses testes foram comparados resultados de temperatura superficial de medições em amostras e de simulação destas mesmas amostras.

O teste de confiabilidade das simulações demonstrou que para a obtenção dos melhores resultados seria melhor utilizar o algoritmo *Adaptive*. Mesmo com esse algoritmo, as simulações não tiveram resultados sempre similares aos medidos, porém eles mantiveram uma proporção. Quando se verificava uma elevação nos valores de temperatura medidos, por exemplo, constatava-se também uma elevação nos valores de temperatura simulados. Além disso, quanto maiores eram os valores de temperatura, maiores as diferenças entre dados medidos e simulados. Dessa forma, os valores absolutos obtidos nas simulações poderiam ser considerados ruins, porém as diferenças proporcionais entre os resultados de cada modelo poderia ser considerada correta. Tendo em vista que o método de análise de desempenho térmico proposto era baseado na comparação de desempenho de modelos, e não em valores absolutos, considerou-se possível a sua aplicação.

Além do teste de confiabilidade, o monitoramento de amostras foi utilizado para analisar o desempenho de materiais de revestimento expostos à degradação natural. Essa análise teve a intenção de verificar quanto a exposição natural poderia interferir nas propriedades radiantes das superfícies dos materiais, e como isso influenciaria em suas temperaturas superficiais.

A análise a partir dos experimentos mostrou que a exposição às intempéries tem maior impacto sobre a refletância solar do que sobre a emitância térmica das superfícies. Entretanto, seriam necessários testes com amostras de emitâncias mais baixas para complementar tal análise. Nas amostras de cor branca, a exposição provocou reduções de até 15% em suas refletâncias. No caso das amostras escuras, o mesmo não ocorreu. Os resultados dos experimentos apontam que os impactos da exposição são provocados principalmente pela deposição de sujeira. Isso pode ser dito em primeiro lugar porque as amostras escuras não sofreram alteração considerável em suas refletâncias. Em segundo lugar, porque se demonstrou que com a limpeza periódica as amostras claras conseguiram manter suas refletâncias próximas ao valor inicial.

Com relação às análises utilizando simulação computacional, demonstrou-se o grande impacto das propriedades radiantes das superfícies externas no desempenho térmico de edificações. Todos os resultados demonstram que, no que diz respeito à refletância solar, confirma-se o que já se sabia a partir das diversas pesquisas já realizadas para estudo desta propriedade. Sendo assim, em quase todo o território brasileiro indica-se o uso de revestimentos com elevada refletância solar. Entretanto, os resultados também mostram que não é correta a negligência das pesquisas com relação à emitância térmica. A adoção dos valores mais elevados de emitância, para todas as edificações e cidades brasileiras, não é a melhor alternativa de otimização do desempenho térmico. Nas cidades onde há também a estação fria, algumas edificações alcançam melhor desempenho com a adoção de valores menores de emitância térmica nos revestimentos do envoltório.

Dessa forma, pode-se dizer que os materiais frios não devem ser indicados indistintamente para todas as cidades, mesmo que com clima predominantemente quente, pois isso pode penalizar o desempenho nas cidades onde também há necessidade de aquecimento no inverno. O uso da simulação computacional com um modelo simplificado pode ser utilizado como uma ferramenta para determinação de valores mais apropriados para as propriedades radiantes de materiais de revestimento para edificações em diferentes climas.

As análises com simulação computacional também permitiram concluir que a refletância e a emitância tanto das

paredes quanto das coberturas influenciam de forma relevante no desempenho térmico de edificações residenciais térreas. Grande parte das pesquisas atuais considera apenas as propriedades radiantes das coberturas, e isso deveria ser revisto. Realmente verificou-se que, para o modelo de edificação analisado, a cobertura proporcionou maior influência no desempenho térmico do que as paredes. Ainda assim, a adoção das melhores propriedades também nas paredes resultou em uma melhoria adicional ao desempenho do modelo.

5.1 Limitações do trabalho

O presente trabalho apresenta limitações que devem ser consideradas. Na análise experimental não foram medidas amostras com valores baixos de emitância. As amostras com menores valores apresentaram emitância inicial igual a 0,79 (amostras de cor cinza metalizado).

Os resultados finais desta tese são baseados em análises por simulação computacional. A verificação da confiabilidade da simulação indicou resultados de temperatura superficial diferentes nas simulações e nas medições. Entretanto eles apresentam uma proporção entre si. Por isso os resultados de consumo de energia dos modelos devem ser analisados apenas comparativamente, e não considerando os valores absolutos individualmente.

Na verificação da confiabilidade da simulação não foram comparados dados de temperatura de céu, parâmetro que influencia diretamente o fluxo de calor por radiação de onda longa e, conseqüentemente, influencia a temperatura superficial.

Optou-se por simular um único modelo de edificação, representando uma tipologia básica de edificação residencial unifamiliar. Sabe-se que, para outras tipologias construtivas, seria possível verificar outros resultados, especialmente quanto à maior ou menor influência de paredes e coberturas no desempenho térmico da edificação.

As simulações foram realizadas adotando o condicionamento artificial de ar, sendo feitas as devidas considerações sobre o fato de que a maior parte das edificações residenciais brasileiras ainda é ventilada naturalmente. Dessa

forma deve-se considerar tal limitador nos resultados e conclusões da pesquisa.

Sobre os resultados das análises de desempenho térmico, obteve-se que, para as zonas bioclimáticas 1 e 2, seria indicado o uso de revestimentos com alta refletância solar e baixa emitância térmica. Entende-se que esse tipo de solução é mais viável para coberturas do que paredes, pela adoção de revestimentos metálicos, por exemplo. As opções que existem no mercado para ser empregadas em paredes são mais utilizadas em ambientes internos, como pastilhas revestidas por películas metalizadas.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para futuros trabalhos relacionados ao tema, recomenda-se:

- Realizar a análise experimental com amostras de materiais que apresentem baixa emitância térmica;
- Realizar as simulações computacionais com ventilação natural, a fim de verificar se nesse caso altera-se a relevância das propriedades radiantes no desempenho térmico;
- Realizar as simulações computacionais para outras tipologias construtivas, especialmente para edificações comerciais e públicas;
- Estudar possibilidade de alteração dos regulamentos técnicos da qualidade para o nível de eficiência energética de edificações, tanto residenciais quanto comerciais, a fim de melhorar os critérios de absorvância indicados atualmente, e inserir critérios de emitância.
- Desenvolver um espectro solar padrão com valores espectrais da irradiação solar hemisférica global em condições atmosféricas médias representativas do território brasileiro, ou ainda para cada região do país. Atualmente os pesquisadores brasileiros têm utilizado o espectro padrão da ASTM G173-03 (ASTM, 2012),

que apresenta os valores espectrais da irradiação solar hemisférica global em condições representativas do território dos Estados Unidos. Isso ocorre pela falta de um espectro padrão para o Brasil.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. **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 edificações. Rio de Janeiro, 2005b.

AKBARI, H. Measured energy savings from the application of reflective roofs in two small non-residential buildings. **Energy**, v.28, n.9, p.953–967, 2003.

AKBARI, H. **Opportunities for saving energy and improving air quality in urban heat island**. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008. Disponível em: <<http://escholarship.org/uc/item/628198x2>>.

AKBARI, H.; BRETZ, S.; KURN, D. M.; HANFORD, J. Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs. **Energy and Buildings**, v.25, n.2, p.117–126, 1997.

AKBARI, H.; KONOPACKI, S.; POMERANTZ, M. Cooling energy savings potential of reflective roofs for residential and commercial buildings in the United States. **Energy**, v.24, n.5, p.391–407, 1999.

AKBARI, H.; LEVINSON, R.; RAINER, L. Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings. **Energy and Buildings**, v.37, n.10, p.1007–1016, 2005.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **2005 ASHRAE Handbook – Fundamentals**. Capítulo 29: Residential Cooling and Heating Load Calculations. Atlanta, 2005.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E284-09a**: Standard terminology of appearance. Disponível em: <<http://www.astm.org/Standards/E284>>. Acesso em: 08 dez. 2011.

_____. **ASTM G173-03 (Reapproved 2012)**: Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface. Disponível em: <http://enterprise.astm.org/filtrexx40.cgi?+REDLINE_PAGES/G173.htm>. Acesso em: 10 dez. 2012.

AVDELIDIS, N. P.; MOROPOULOU, A. Emissivity considerations in building thermography. **Energy and Buildings**, v.35, n.7, p.663–667, 2003.

BORGE-DIEZ, D.; COLMENAR-SANTOS, A.; PÉREZ-MOLINA, C.; CASTRO-GIL, M. Passive climatization using a cool roof and natural ventilation for internally displaced persons in hot climates: Case study for Haiti. **Building and Environment**, v.59, n., p.116-126, 2013.

BOZONNET, E.; DOYA, M.; ALLARD, F. Cool roofs impact on building thermal response: A French case study. **Energy and Buildings**, v.43, n.11, p.3006–3012, 2011.

BRETZ, S. E.; AKBARI, H.; Long-term performance of high-albedo roof coatings. **Energy and Buildings**, v.25, n.2, p. 159-167, 1997.

BRETZ, S.; AKBARI, H.; ROSENFELD, A. Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. **Atmospheric Environment**, v.32, n.1, p. 95-101, 1998.

BRITO FILHO, J. P.; HENRIQUEZ, J. R.; DUTRA, J. C. 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, n.2-3, p.440–445, 2011.

CALVET, E.; PRAT, H. **Les Effets Thermoélectriques**. Microcalorimètrie, França: Ed. Masson, pp. 13-20, 1956.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de metodologia de avaliação da eficiência energética do envoltório de edificações não-residenciais**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Tese de Doutorado. Florianópolis, 2008.

CASTRO, A. P. A. S.; LABAKI, L. C.; CARAM, R. M.; BASSO, A.; FERNANDES, M. R. Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 69-73, 2003.

DOE – U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Building Energy Software Tools Directory**. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/>. Acesso em: 02 dez. 2013.

DORNELLES, K. A. **Absortância Solar de Superfícies Opacas: Métodos de Determinação e Base de Dados para Tintas Látex Acrílica e PVA**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas. Tese de Doutorado. Campinas, 2008.

DORNELLES, K. A.; CARAM, R. M.; RORIZ, M.; RORIZ, V. Thermal performance of cool paints produced in Brazil for roof paint and their effect on buildings designed for hot climates. In: III PALENC, 2010, Rhodes Island, Grécia. **Proceedings...** Rhodes Island: PALENC, 2010a.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. A ilusão das cores na identificação da absortância solar de superfícies opacas. In: IX Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2007, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: ANTAC, 2007. p. 590-599.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, V.; RORIZ, M.; CARAM, R. M. Spectral behavior cool paints produced in Brazil for roof paint and their impact on the thermal comfort and energy use in buildings designed for hot climates. In: VI Windsor Conference, 2010, Windsor. **Proceedings...** Windsor: NCEUB, 2010b.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M.; RORIZ, V.; CARAM, R. M. Cool paints produced in Brazil for roof paint: spectral behaviour and the influence on the energy use and thermal building performance. In: 10th REHVA World Congress – CLIMA 2010, Antalya, Turquia. **Proceedings...** Antalya: REHVA, 2010c.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M.; RORIZ, V.; CARAM, R. Desempenho térmico de tintas brancas com microesferas cerâmicas para uso em coberturas de edifícios. In: XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2011, Búzios. **Anais...** Búzios: ANTAC, 2011.

EIA – U.S. Energy Information Administration. **International Energy Outlook 2013**. Disponível em: <<http://www.eia.gov/forecasts/ieo/world.cfm>>. Acesso em: 10 nov. 2013.

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.; PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso – Ano Base 2005 – Classe Residencial – Relatório Brasil**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS/PROCEL, 2007.

EnergyPlus. **EnergyPlus Energy Simulation Software - Testing and Validation**. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_testing.cfm>. Acesso em: 10 set. 2013a.

EnergyPlus. **EnergyPlus Engineering Reference – The Reference to EnergyPlus Calculations**. Version 8.0 Documentation, 2013. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2013b.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balço Energético Nacional 2013: Ano base 2012**. Rio de Janeiro: EPE, 2013.

ESTADÃO. **SP debate adoção de telhados brancos**. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/impreso,sp->

debate-adocao-de-telhados-brancos,783069,0.htm>. Acesso em: 10 dez. 2011.

GENTLE, A. R.; AGUILAR, J. L. C.; SMITH, G.B. Optimized cool roofs: Integrating albedo and thermal emittance with R-value. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v.95, n.12, p. 3207–3215, 2011.

GONOME, H.; BANESHI, M.; OKAJIMA, J.; KOMIYA, A.; MARUYAMA, S. Controlling the radiative properties of cool black-color coatings pigmented with CuO submicron particles. **Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer**, v.132, n. especial, 2014.

HALEWOOD, J.; WILDE, P. Simulation-based assessment of the prospects of cool paints in the built environment in the UK. In: XXV Conference on Passive and Low Energy Architecture, 2008, Dublin. **Anais...** Dublin: PLEA, 2008. Paper n. 125.

ICHINOSE, M.; INOUE, T.; SAKAMOTO, Y. Long-term performance of high-reflectivity exterior panels. **Building and Environment**, v. 44, n.8, p. 1601-1608, 2009.

IG. **Lei do telhado branco custará cerca de R\$ 380 milhões a São Paulo**. Disponível em: <<http://economia.ig.com.br/lei-do-telhado-branco-custara-cerca-de-r-380-milhoes-a-sao-paulo/n1597009588177.html>>. Acesso em: 10 dez. 2011.

INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Tradução Eduardo M. Queiroz, Fernando L. P. Pessoa. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

JO, J. H.; CARLSON, J. D.; GOLDEN, J. S.; BRYAN, H. An integrated empirical and modeling methodology for analyzing solar reflective roof technologies on commercial buildings. **Building and Environment**, v.45, n.2, p.453-460, 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, n.4, p. 538-551, 2009.

KOENIGSBERGER, O. H.; INGERSOLL, T.G.; MAYHEW, A.; SZOKOLAY, S.V. **Vivendas y edificios en zonas cálidas y tropicales**. Madrid: Paraninfo S.A., 1977.

KOLOKOTRONI, M.; GOWREESUNKER, B.L.; GIRIDHARAN, R. Cool roof technology in London: An experimental and modelling study. **Energy and Buildings**, v. 67, n.1 p.658-667, 2013.

LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos climáticos em formato EPW**. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw>>. Acesso em: 10 mai. 2013.

LEVINSON, R.; AKBARI, H; REILLY, J. Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings. **Building and Environment**, v. 42, n.7, p. 2591-2605, 2007a.

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

MA, Y.; ZHANG, X.; ZHU, B.; WU, K. Research on reversible effects and mechanism between the energy-absorbing and energy-reflecting states of chameleon-type building coatings. **Solar Energy**, v.72, n.6, p. 511-520, 2002.

MA, Y.; ZHU, B. Research on the preparation of reversibly thermochromic cement based materials at normal temperature. **Cement and Concrete Research**, v.39, n.2, p. 90-94, 2009.

MA, Y.; ZHU, B.; WU, K. Preparation and solar reflectance spectra of chameleon-type building coatings. **Solar Energy**, v.70, n.5, p. 417-422, 2001.

MANIOGLU, G.; YILMAZ, Z. Economic evaluation of the building envelope and operation period of heating system in terms of thermal comfort. **Energy and Buildings**, v.38, n.3, p. 266-272,

2006.

MEDINA, M. A.; YOUNG, B. A perspective on the effect of climate and local environmental variables on the performance of attic radiant barriers in the United States. **Building and Environment**, v.41, n.12, p.1767-1778, 2006.

MELO, A. P. **Desenvolvimento de um modelo simplificado para estimar o consumo de energia de edificações comerciais através da aplicação de redes neurais**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Tese de Doutorado. Florianópolis, 2012.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; NETO, J. A. B. C. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.5, n.4, p. 47-68, out./dez. 2005.

METEONORM. **Meteonorm - Global meteorological database**. Disponível em: <<http://meteonorm.com>>. Acesso em: 10 set. 2011.

MICHELS, C.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. Evaluation of heat flux reduction provided by the use of radiant barriers in clay tile roofs. **Energy and Buildings**, v.40, n.4, p. 445-451, 2008.

MUSELLI, M. Passive cooling for air-conditioning energy savings with new radiative low-cost coatings. **Energy and Buildings**, v.42, n.6, p.945–954, 2010.

O GLOBO. **Telhado branco, que visa a reduzir a temperatura das cidades, ganha adesões**. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/economia/imoveis/teelhado-branco-que-visa-reduzir-temperatura-das-cidades-ganha-adesoes-2828247>>. Acesso em: 10 dez. 2011.

PERIN, A. L. **Desenvolvimento de um equipamento para medição de emissividade**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de

Mestrado. Porto Alegre, 2009.

REVEL, G. M.; MARTARELLI, M.; BENGOCHEA, M. Á.; GOZALBO, A.; ORTS, M. J.; GAKI, A.; GREGOU, M.; TAXIARCHOU, M.; BIANCHIN, A.; EMILIANI, M. Nanobased coatings with improved NIR reflecting properties for building envelope materials: Development and natural aging effect measurement. **Cement & Concrete Composites**, v.36, n. especial, p.128–135, 2013.

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, n.1, p.647–657, 2013.

RONAN, P. **EM Spectrum**. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:EM_spectrum.svg>. Acesso em: 04 set. 2012.

RORIZ, V.F.; CARAM, R. M.; RORIZ, M. Absortâncias e emitâncias efetivas de superfícies: Um método para estimá-las e exemplos de suas importâncias. In: XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2011, Búzios. **Anais...** Búzios: ANTAC, 2011.

SANTAMOURIS, M.; PAVLOU, K.; SYNNEFA, A.; NIACHOU, K.; KOLOKOTSA, D. Recent progress on passive cooling techniques – Advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households. **Energy and Buildings**, v.39, n.7, p.859–866, 2007.

SANTANA, M. V.; GHISI, E. Influência de parâmetros construtivos relacionados ao envelope no consumo de energia em edifícios de escritório da cidade de Florianópolis. In: X Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2009, Natal. **Anais...** Natal: ANTAC, 2009.

SANTOS, E. I.; MARINOSKI, D. L. ; LAMBERTS, R. Influência do ambiente de medição sobre a verificação da absortância de superfícies opacas utilizando um espectrômetro portátil. In: X Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2009,

Natal. **Anais...** Natal: ANTAC, 2009.

SHEN, H.; TAN, H.; TZEMPELIKOS, A. The effect of reflective coatings on building surface temperatures, indoor environment and energy consumption – An experimental study. **Energy and Buildings**, v.43, n.2-3, p.573–580, 2011.

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, n.1, p.28–37, 2011.

SORGATO, M. J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 2009.

STEFFEN, C. A.; MORAES, E. C.; GAMA, F. F. Radiometria óptica Espectral – Tutorial. In: VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1996, Salvador. **Anais...** Salvador: INPE, 1996.

SUEHRCKE, H.; PETERSON, E. L.; SELBY, N. Effect of roof solar reflectance on the building heat gain in a hot climate. **Energy and Buildings**, v.40, n.12, p.2224–2235, 2008.

SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M. Advances on technical, policy and market aspects of cool roof technology in Europe: The Cool Roofs project. **Energy and Buildings**, v.55, n.1, p.35–41, 2012.

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, n.11, p. 1167-1174, 2007a.

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, n.4, p.488–497, 2007b.

SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; LIVADA, I. A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. **Solar Energy**, v.80, n.8, p. 968-981, 2006.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Tese de Doutorado. Florianópolis, 2006.

UEMOTO, K. L.; SATO, N. M. N.; JOHN, V. M. Estimating thermal performance of cool colored paints. **Energy and Buildings**, v.42, n.1, p.17-22, 2010.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies – Cool Roofs**. Disponível em:
<<http://www.epa.gov/heatisd/resources/compendium.htm>>.
Acesso em: 01 ago. 2011.

VITTORINO, F.; SATO, N. M. N.; AKUTSU, M. Desempenho térmico de isolantes refletivos e barreiras radiantes aplicados em coberturas. In: VII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ANTAC, 2003.

WESTPHAL, F. S. **Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Tese de Doutorado. Florianópolis, 2007.

YU, B.; CHEN, Z.; SHANG, P.; YANG, J. Study on the influence of albedo on building heat environment in a year-round. **Energy and Buildings**, v.40, n.5, p.945–951, 2008.

APÊNDICES

APÊNDICES

Apêndice 1 – Verificação de erro nas medições com o espectrofotômetro Lambda 750

O espectrofotômetro Lambda 750 foi utilizado nos primeiros três meses do monitoramento de amostras de tintas. Os resultados do segundo e terceiro mês, especialmente das tintas bancas, demonstraram incoerência (Figura 63). Após a exposição das amostras, com a deposição de sujeira, esperava-se a diminuição da refletância das tintas bancas, porém os dados indicaram aumento da refletância. Isso gerou a desconfiança sobre tais resultados. Posteriormente, verificou-se que o *Spectralon*® utilizado em tal equipamento estava sujo, provocando tais erros. Sendo assim, os resultados obtidos no segundo e terceiro mês foram descartados.

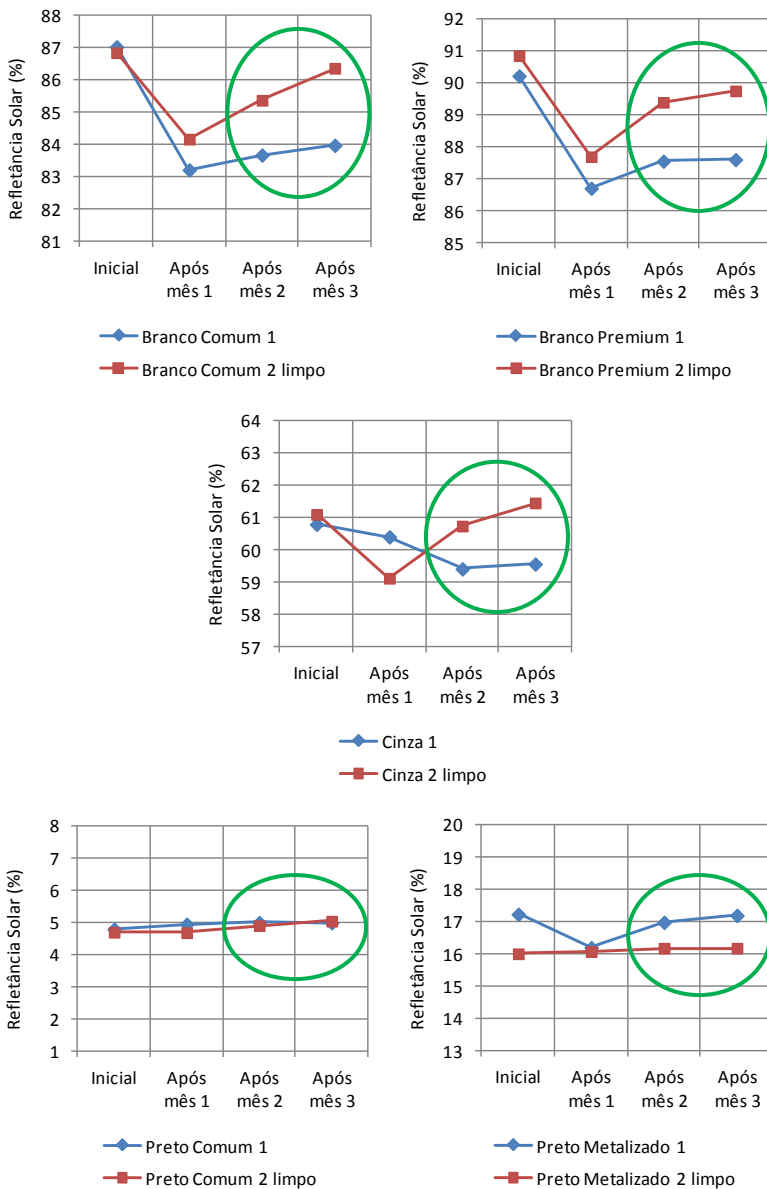


Figura 63 – Refletância solar calculada a partir dos dados medidos no espectrofotômetro Lambda 750

Apêndice 2 – Comparação entre os espectrofotômetros Lambda 750 e Lambda 1050

Conforme apresentado no Apêndice 1, durante a realização dos experimentos verificou-se um erro nas medições com o espectrofotômetro Lambda 750. Tendo em vista que, nesse mesmo período, o Lambda 1050 foi adquirido pelo Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações, considerou-se como melhor opção a utilização do novo equipamento na continuação dos experimentos. Dessa forma, os dados iniciais e do primeiro mês de análise foram medidos em equipamento diferente dos demais dados.

Para garantir que não houvesse discrepâncias entre os resultados das medições nos dois espectrofotômetros, foram realizados testes comparativos. Foram realizadas medições de amostras de três materiais, utilizando a mesma amostra de *Spectralon*® como referência nos dois equipamentos. Para cada uma das três amostras foram realizadas três medições consecutivas em cada equipamento. Calculou-se a média aritmética das refletâncias espectrais das três medições de cada amostra (em cada equipamento) e, a partir de tais valores, calculou-se a refletância solar.

Foram elaborados gráficos das médias das refletâncias espectrais de cada amostra em função do comprimento de onda, considerando o intervalo de 280 a 2500 nm (Figura 64). É possível observar um comportamento das curvas semelhante em grande parte do espectro para as amostras de cada cor. Porém, o comportamento das curvas do espectrofotômetro Lambda 750 se distingue do comportamento apresentado pelo Lambda 1050 na parte inicial do infravermelho. Caracteriza-se uma espécie de ruído nos resultados do intervalo de comprimento de onda de 1000 a 1600 nm aproximadamente. Como o fato se repete para as três amostras, é possível que esse efeito seja consequência de algum problema no sensor do Lambda 750.

Apesar disso, os valores calculados de refletância solar, mostrados na Tabela 13, indicam grande semelhança na comparação entre os dois equipamentos. Percebe-se que as diferenças em parte dos valores de refletância espectral não foram tão relevantes a ponto de resultar em valores divergentes

de refletância solar. Por isso, considerou-se adequado utilizar os resultados adquiridos com os dois equipamentos.

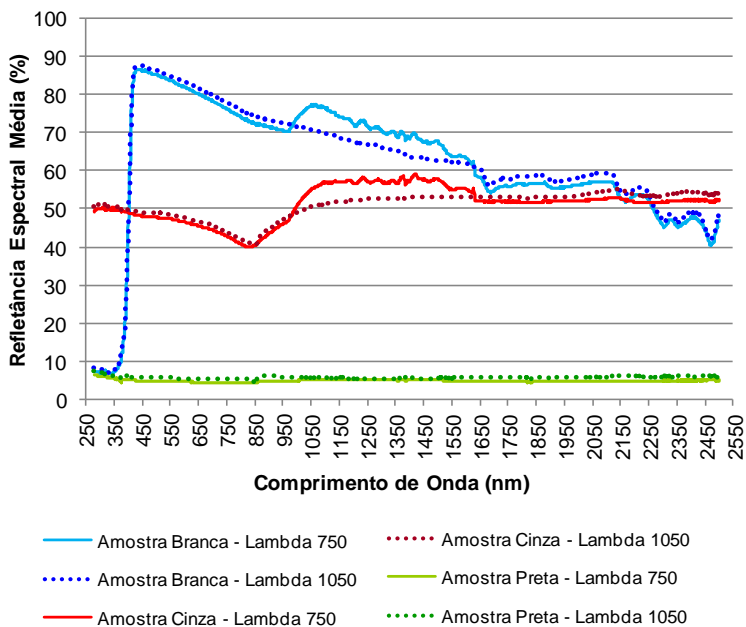


Figura 64 – Comparação entre refletâncias espectrais medidas nos espectrofotômetros Lambda 750 e Lambda 1050.

Tabela 13 – Comparação entre refletâncias solares calculadas a partir das medições com os espectrofotômetros Lambda 750 e Lambda 1050.

| Amostra | Refletância Solar (%) | | Diferença |
|---------|---------------------------------|----------------------------------|-----------|
| | Espectrofotômetro Lambda 750 | Espectrofotômetro Lambda 1050 | |
| Branca | 73,12 | 73,35 | 0,23 |
| Cinza | 48,10 | 48,13 | 0,03 |
| Preta | 4,70 | 5,57 | 0,87 |

Apêndice 3 – Dados climáticos das cidades analisadas

No método proposto com simulação computacional foram utilizados arquivos climáticos de 24 cidades brasileiras. As Figuras 65 a 72 e as Tabelas 14 e 15 mostram dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar dos arquivos climáticos dessas cidades.

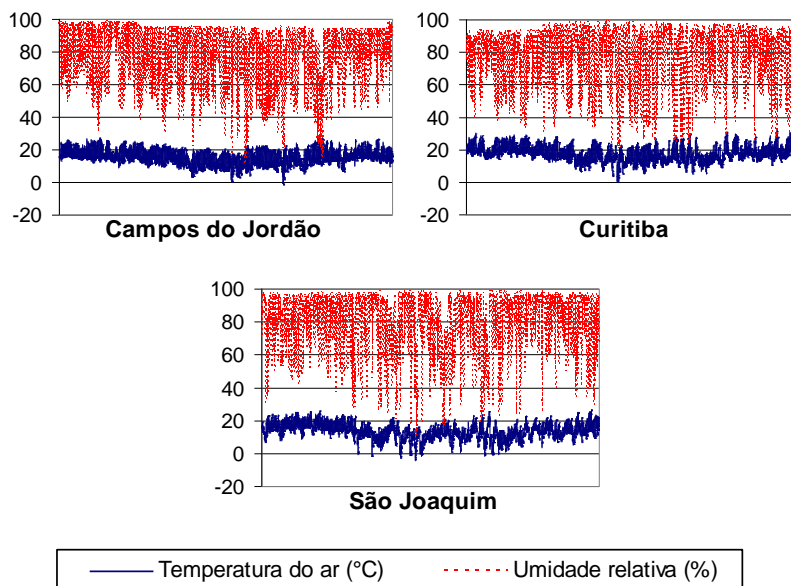


Figura 65 – Temperatura e umidade relativa ao longo de um ano das cidades analisadas da Zona Bioclimática 1.

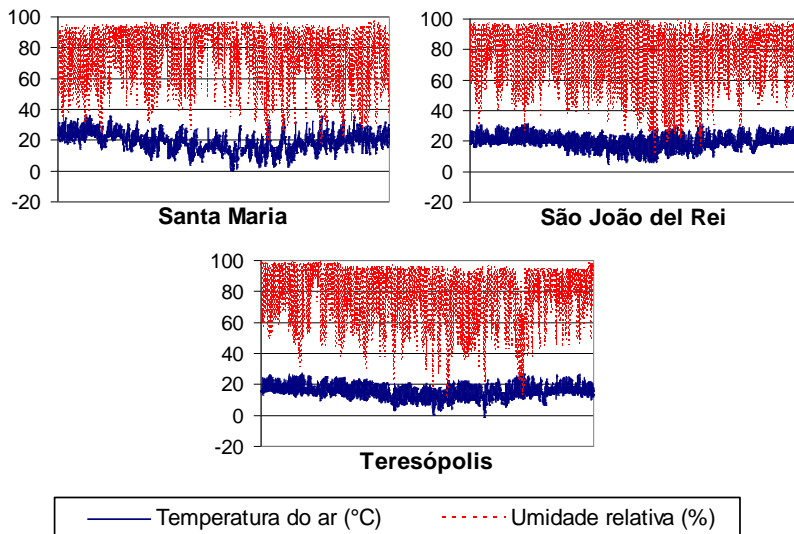


Figura 66 – Temperatura e umidade relativa ao longo de um ano das cidades analisadas da Zona Bioclimática 2.

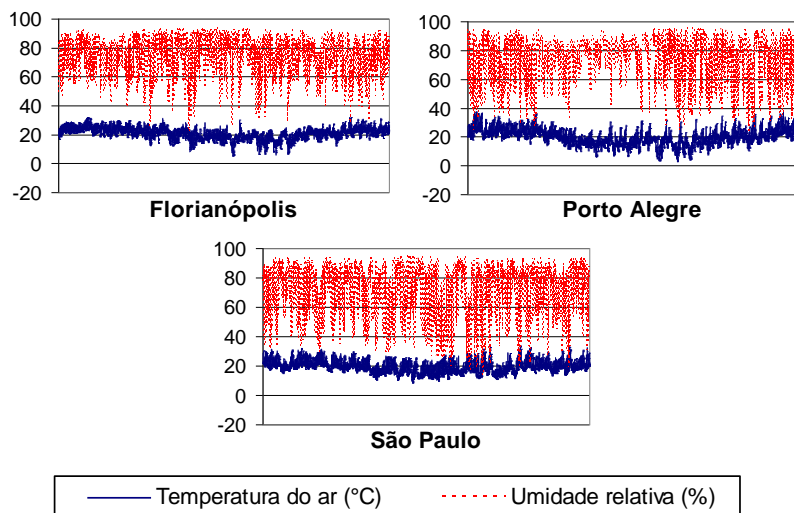


Figura 67 – Temperatura e umidade relativa ao longo de um ano das cidades analisadas da Zona Bioclimática 3.

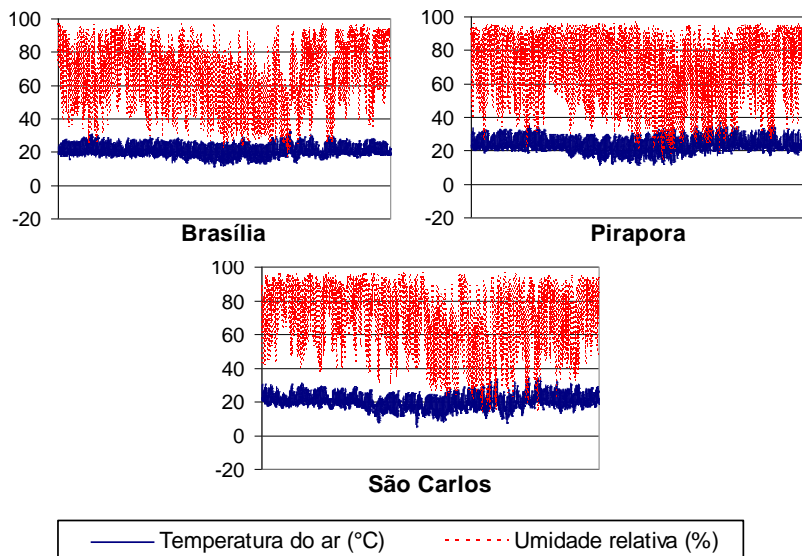


Figura 68 – Temperatura e umidade relativa ao longo de um ano das cidades analisadas da Zona Bioclimática 4.

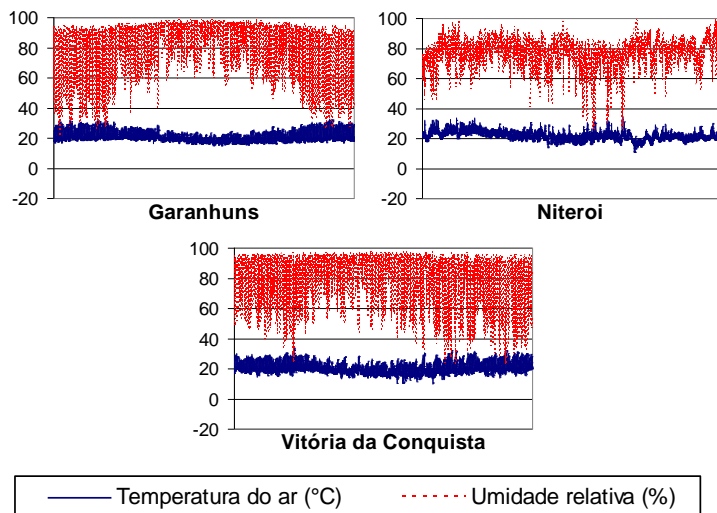


Figura 69 – Temperatura e umidade relativa ao longo de um ano das cidades analisadas da Zona Bioclimática 5.

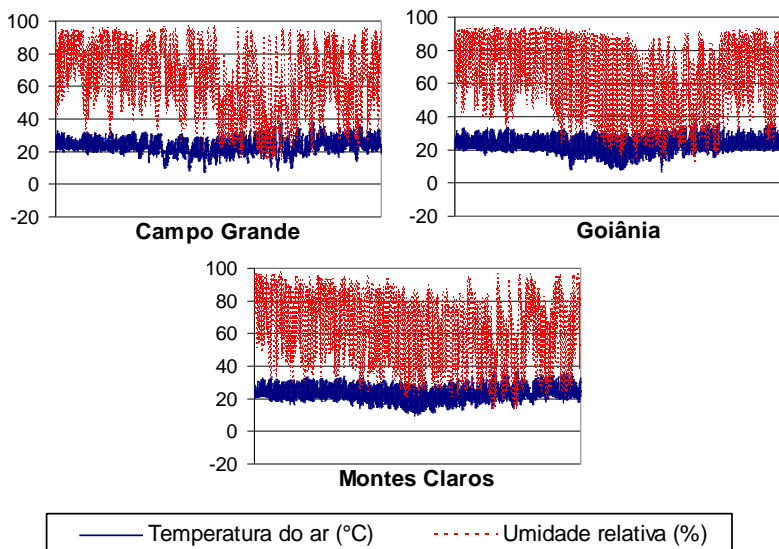


Figura 70 – Temperatura e umidade relativa ao longo de um ano das cidades analisadas da Zona Bioclimática 6.

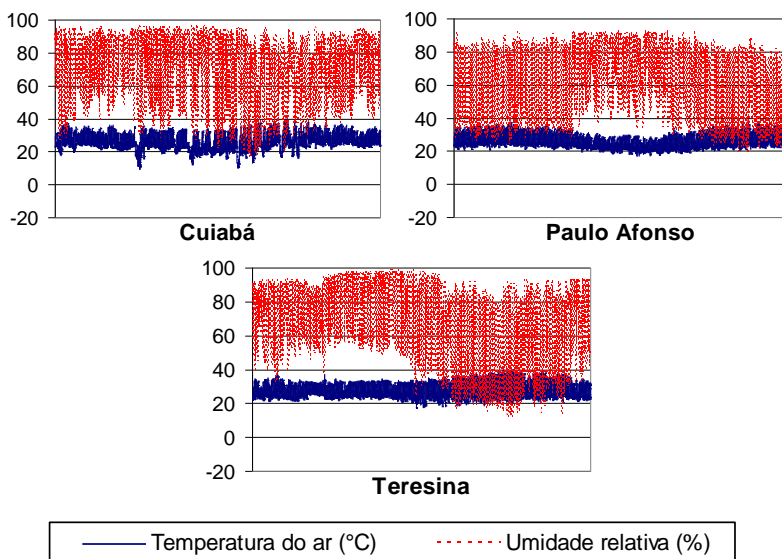


Figura 71 – Temperatura e umidade relativa ao longo de um ano das cidades analisadas da Zona Bioclimática 7.

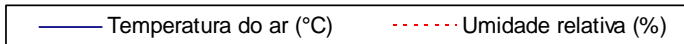
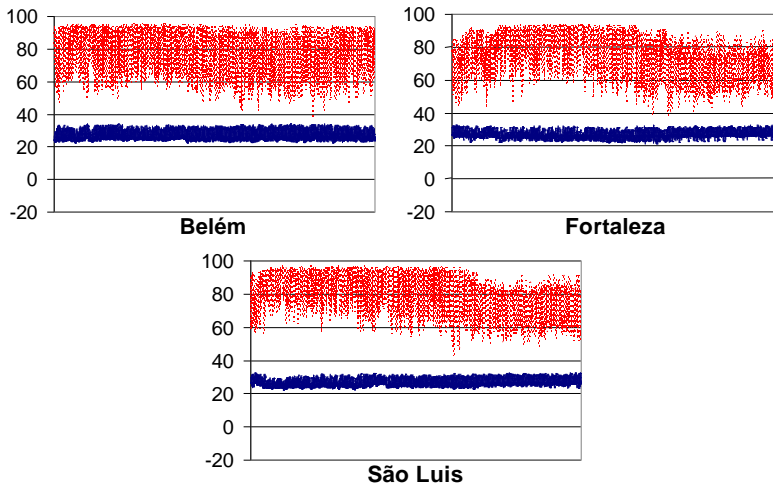


Figura 72 – Temperatura e umidade relativa ao longo de um ano das cidades analisadas da Zona Bioclimática 8.

Tabela 14 – Temperaturas do arquivo climático (um ano) das 24 cidades analisadas. (Fonte: Dados obtidos nos arquivos climáticos disponíveis em LABEEE, 2013)

| ZB | Cidade | Temperatura do ar (°C) | | | Amplitude diária (°C) | | |
|----|----------------------|---------------------------|------|------|--------------------------|------|------|
| | | Média | Max. | Mín. | Média | Max. | Mín. |
| Z1 | Campos do Jordão | 15,27 | 28,0 | -1,5 | 10,0 | 21,2 | 1,6 |
| | Curitiba | 17,29 | 32,2 | -0,1 | 9,0 | 19,2 | 1,2 |
| | São Joaquim | 13,21 | 26,6 | -4,1 | 8,3 | 20,3 | 1,7 |
| Z2 | Santa Maria | 18,96 | 38,3 | -0,3 | 10,3 | 22,6 | 1,2 |
| | São João Del Rei | 19,36 | 31,9 | 4,7 | 10,6 | 21,9 | 2,2 |
| | Teresópolis | 17,84 | 29,8 | 5,6 | 7,9 | 15,9 | 1,0 |
| Z3 | Florianópolis | 20,89 | 31,9 | 5,1 | 7,2 | 14,9 | 1,2 |
| | Porto Alegre | 19,94 | 37,4 | 2,8 | 9,1 | 19,2 | 1,6 |
| | São Paulo | 19,57 | 33,8 | 8,5 | 8,3 | 16,7 | 1,0 |
| Z4 | Brasília | 21,08 | 32,7 | 11,2 | 9,3 | 14,2 | 2,0 |
| | Pirapora | 23,72 | 36,7 | 11,4 | 11,4 | 20,3 | 1,8 |
| | São Carlos | 20,29 | 34,6 | 4,9 | 10,2 | 17,1 | 1,8 |
| Z5 | Garanhuns | 21,04 | 32,7 | 14,9 | 7,7 | 13,7 | 1,5 |
| | Niterói | 21,95 | 34,8 | 10,8 | 5,6 | 14,4 | 0,7 |
| | Vitória da Conquista | 20,60 | 33,7 | 9,9 | 9,2 | 15,8 | 2,5 |
| Z6 | Campo Grande | 23,42 | 37,9 | 7,0 | 10,5 | 18,5 | 2,2 |
| | Goiânia | 23,23 | 37,8 | 6,7 | 12,7 | 24,6 | 4,4 |
| | Montes Claros | 23,67 | 36,8 | 9,0 | 12,2 | 20,4 | 3,9 |
| Z7 | Cuiabá | 26,27 | 40,0 | 9,6 | 10,7 | 19,8 | 2,6 |
| | Paulo Afonso | 26,32 | 38,2 | 17,0 | 10,2 | 15,6 | 2,9 |
| | Teresina | 27,69 | 39,9 | 17,4 | 11,5 | 18,2 | 4,4 |
| Z8 | Belém | 27,16 | 34,4 | 22,1 | 8,3 | 11,3 | 2,4 |
| | Fortaleza | 26,65 | 32,4 | 21,0 | 6,2 | 10,8 | 2,3 |
| | São Luis | 26,76 | 32,8 | 22,1 | 6,3 | 9,6 | 1,8 |

Tabela 15 – Umidade relativa do arquivo climático (um ano) das 24 cidades analisadas. (Fonte: Dados obtidos nos arquivos climáticos disponíveis em LABEEE, 2013)

| ZB | Cidade | Umidade relativa do ar (%) | | |
|----|----------------------|----------------------------|------|------|
| | | Média | Max. | Mín. |
| Z1 | Campos do Jordão | 79 | 99 | 11 |
| | Curitiba | 78 | 99 | 21 |
| | São Joaquim | 80 | 99 | 10 |
| Z2 | Santa Maria | 76 | 98 | 18 |
| | São João Del Rei | 78 | 99 | 11 |
| | Teresópolis | 84 | 99 | 15 |
| Z3 | Florianópolis | 75 | 94 | 22 |
| | Porto Alegre | 74 | 96 | 23 |
| | São Paulo | 72 | 96 | 14 |
| Z4 | Brasília | 66 | 97 | 17 |
| | Pirapora | 70 | 97 | 14 |
| | São Carlos | 71 | 97 | 14 |
| Z5 | Garanhuns | 82 | 98 | 21 |
| | Niterói | 78 | 99 | 26 |
| | Vitória da Conquista | 80 | 98 | 23 |
| Z6 | Campo Grande | 66 | 97 | 14 |
| | Goiânia | 66 | 95 | 12 |
| | Montes Claros | 62 | 98 | 13 |
| Z7 | Cuiabá | 71 | 97 | 16 |
| | Paulo Afonso | 63 | 93 | 18 |
| | Teresina | 68 | 99 | 12 |
| Z8 | Belém | 80 | 96 | 37 |
| | Fortaleza | 76 | 94 | 38 |
| | São Luis | 82 | 97 | 42 |

Apêndice 4 – Complementação de resultados referente à verificação da confiabilidade da simulação

Para analisar a confiabilidade da simulação computacional foram realizadas comparações dos valores de temperatura superficial obtidas por simulação e por medição das amostras. A seguir são apresentados alguns resultados complementares aos mostrados na seção 4.2.

Tabela 16 – Diferenças mínima, máxima e média entre as temperaturas superficiais medidas e simuladas: dias 14 a 16/11/2012.

| Amostra | Diferença | Simulação com Simple | Simulação com TARP | Simulação com MoWITT | Simulação com DOE-2 | Simulação com Adaptive |
|------------------|-----------|----------------------|--------------------|----------------------|---------------------|------------------------|
| Branco Comum | Média | 3,58 | 1,83 | 2,77 | 2,67 | 1,64 |
| | Máxima | 10,95 | 7,61 | 10,62 | 9,09 | 7,33 |
| | Mínima | 1,29 | 0,00 | 0,17 | 0,10 | 0,08 |
| Branco Premium | Média | 3,32 | 1,67 | 2,43 | 2,41 | 1,46 |
| | Máxima | 9,31 | 5,95 | 7,97 | 6,92 | 5,80 |
| | Mínima | 1,28 | 0,10 | 0,04 | 0,01 | 0,02 |
| Cinza | Média | 5,88 | 3,50 | 6,18 | 5,23 | 3,30 |
| | Máxima | 23,13 | 18,37 | 26,20 | 21,41 | 15,89 |
| | Mínima | 1,28 | 0,22 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Preto Comum | Média | 10,62 | 5,86 | 10,36 | 8,18 | 5,13 |
| | Máxima | 51,65 | 36,14 | 50,15 | 41,15 | 30,27 |
| | Mínima | 1,29 | 0,13 | 0,06 | 0,26 | 0,01 |
| Preto Metalizado | Média | 9,69 | 5,65 | 10,26 | 8,12 | 4,97 |
| | Máxima | 45,32 | 33,59 | 47,28 | 38,42 | 27,88 |
| | Mínima | 1,27 | 0,25 | 0,01 | 0,09 | 0,00 |

Tabela 17 – Diferenças mínima, máxima e média entre as temperaturas superficiais medidas e simuladas: dias 20 a 22/11/2012.

| Amostra | Diferença | Simulação com <i>Simple</i> | Simulação com TARP | Simulação com MoWITT | Simulação com DOE-2 | Simulação com <i>Adaptive</i> |
|------------------|-----------|-----------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|-------------------------------|
| Branco Comum | Média | 4,84 | 2,86 | 4,63 | 4,37 | 2,64 |
| | Máxima | 10,20 | 7,00 | 8,75 | 9,00 | 5,87 |
| | Mínima | 1,19 | 0,00 | 0,27 | 0,05 | 0,04 |
| Branco Premium | Média | 4,57 | 2,84 | 4,23 | 4,18 | 2,62 |
| | Máxima | 8,67 | 7,03 | 8,78 | 9,02 | 5,90 |
| | Mínima | 1,20 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,07 |
| Cinza | Média | 8,19 | 4,76 | 9,19 | 7,56 | 4,27 |
| | Máxima | 25,55 | 12,66 | 26,61 | 20,21 | 13,16 |
| | Mínima | 1,11 | 0,15 | 0,11 | 0,48 | 0,03 |
| Preto Comum | Média | 16,92 | 7,43 | 15,00 | 11,54 | 5,93 |
| | Máxima | 55,97 | 21,99 | 43,81 | 32,18 | 20,38 |
| | Mínima | 1,01 | 0,03 | 0,08 | 0,17 | 0,01 |
| Preto Metalizado | Média | 14,91 | 7,19 | 14,69 | 11,28 | 5,82 |
| | Máxima | 49,44 | 20,32 | 43,62 | 32,04 | 18,93 |
| | Mínima | 1,15 | 0,06 | 0,32 | 0,55 | 0,16 |

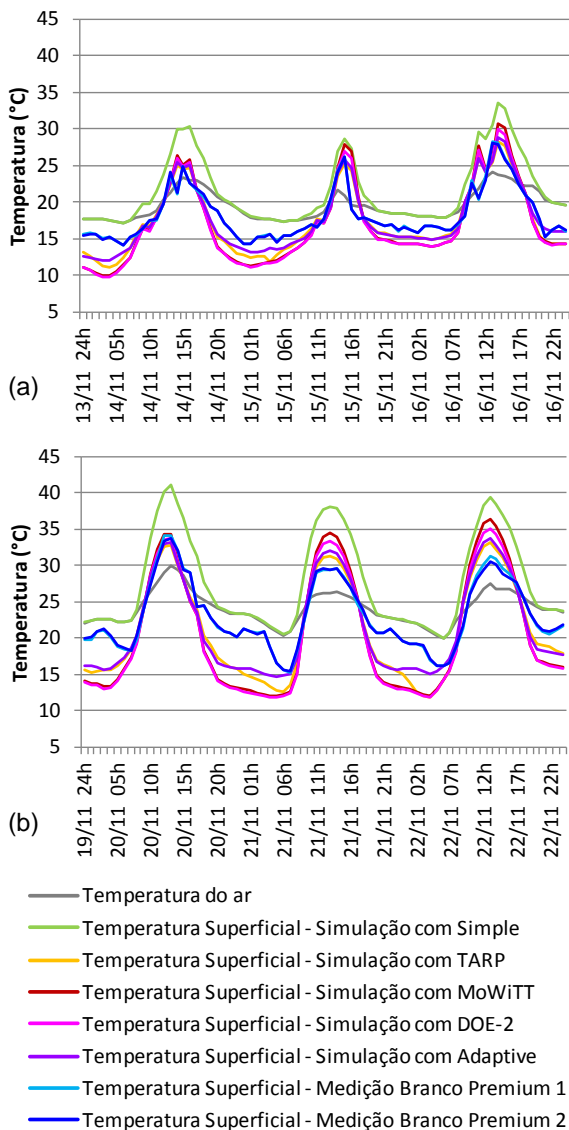


Figura 73 – Temperatura do ar e temperatura superficial das amostras branco premium, monitoradas e simuladas: (a) dias 14 a 16/11/2012 e (b) dias 20 a 22/11/2012.

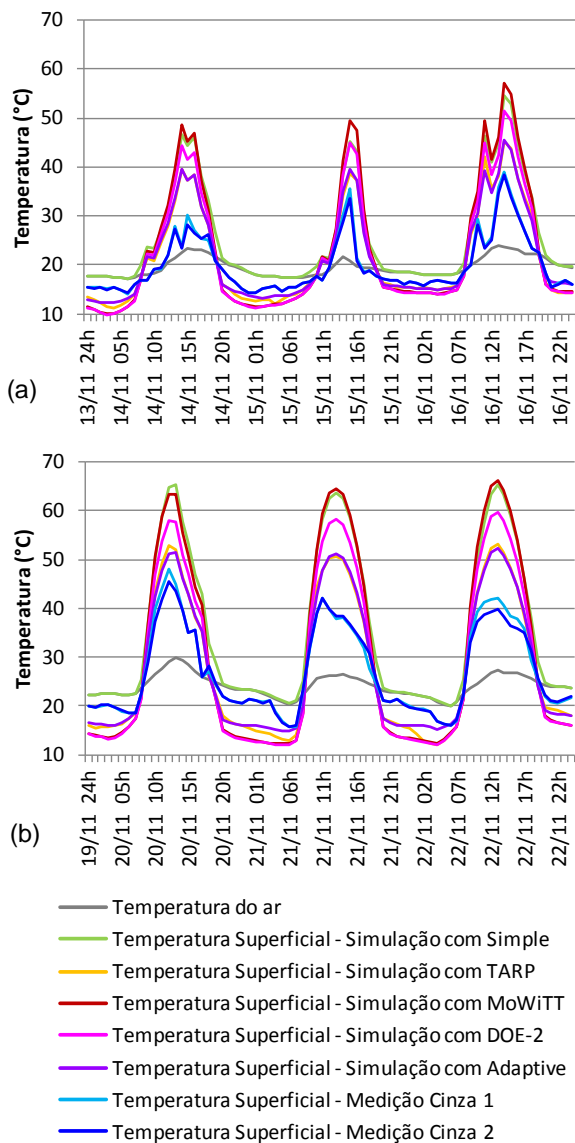


Figura 74 – Temperatura do ar e temperatura superficial das amostras cinza, monitoradas e simuladas: (a) dias 14 a 16/11/2012 e (b) dias 20 a 22/11/2012.

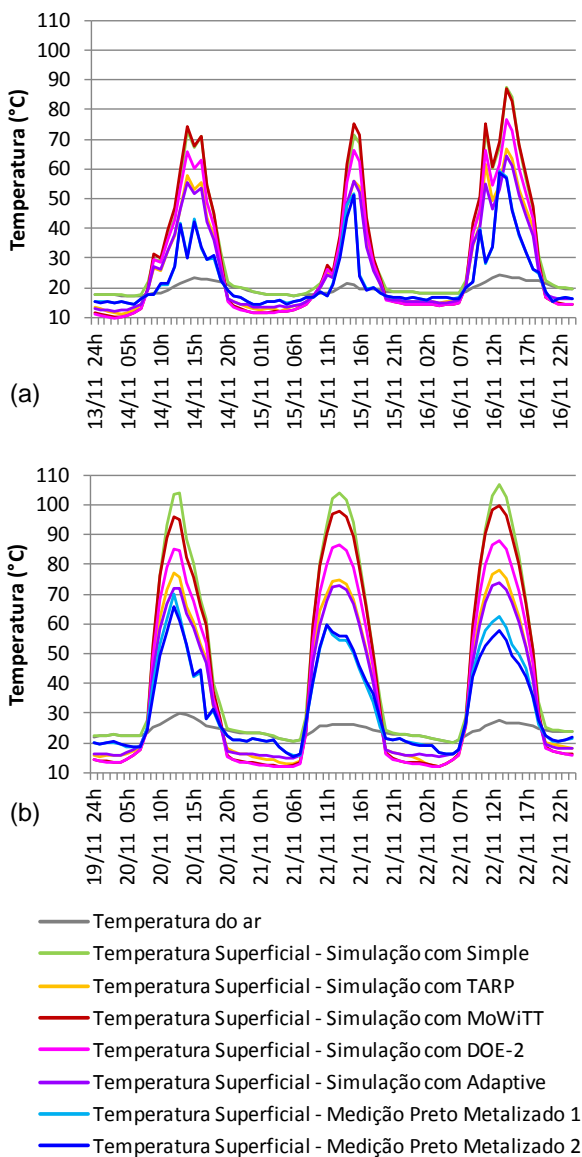


Figura 75 – Temperatura do ar e temperatura superficial das amostras preto metalizado, monitoradas e simuladas: (a) dias 14 a 16/11/2012 e (b) dias 20 a 22/11/2012.

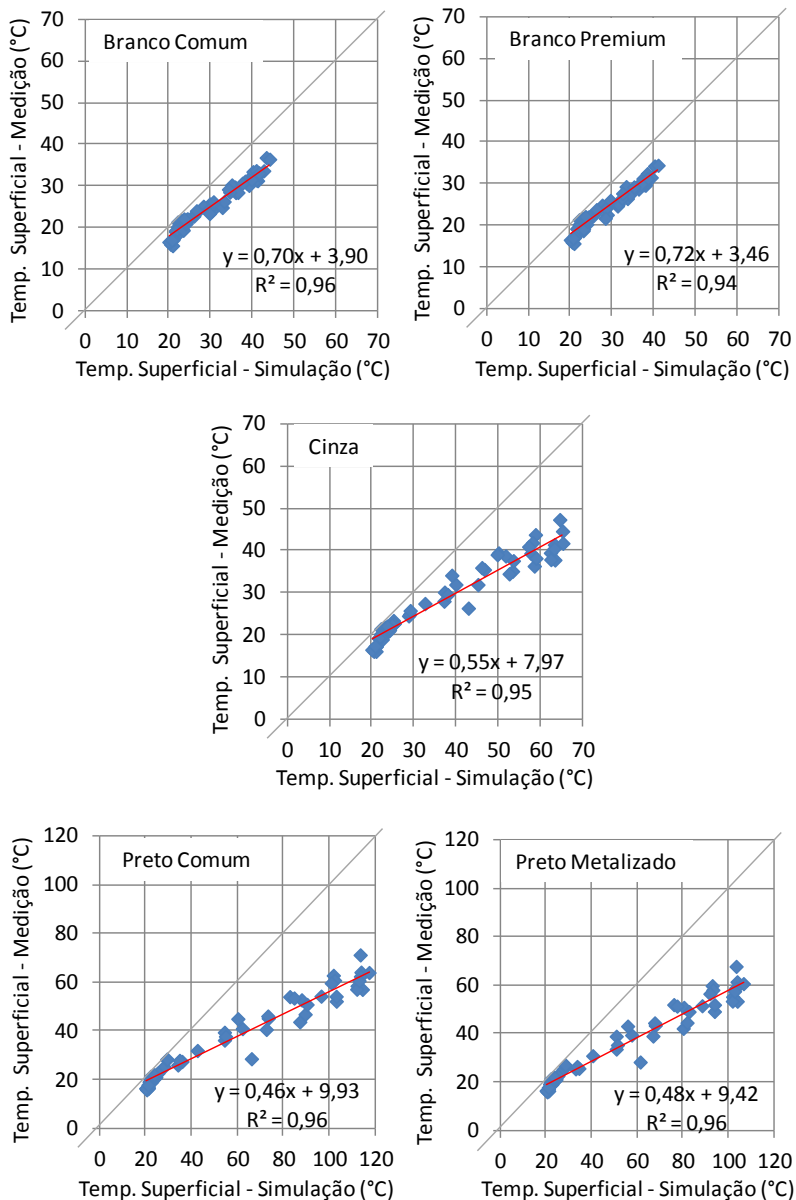


Figura 76 – Correlação entre temperaturas superficiais obtidas por medição e por simulação com o algoritmo *Simple Combined*.

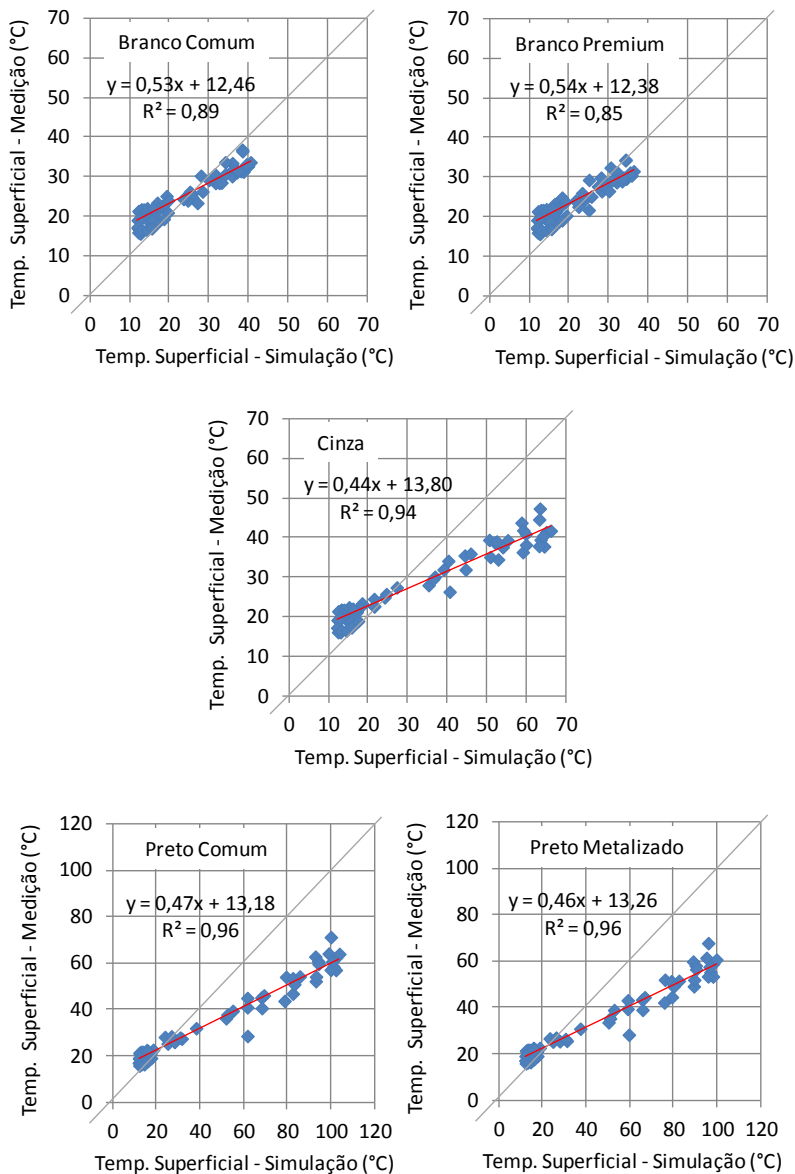


Figura 77 – Correlação entre temperaturas superficiais obtidas por medição e por simulação com o algoritmo MoWiTT.

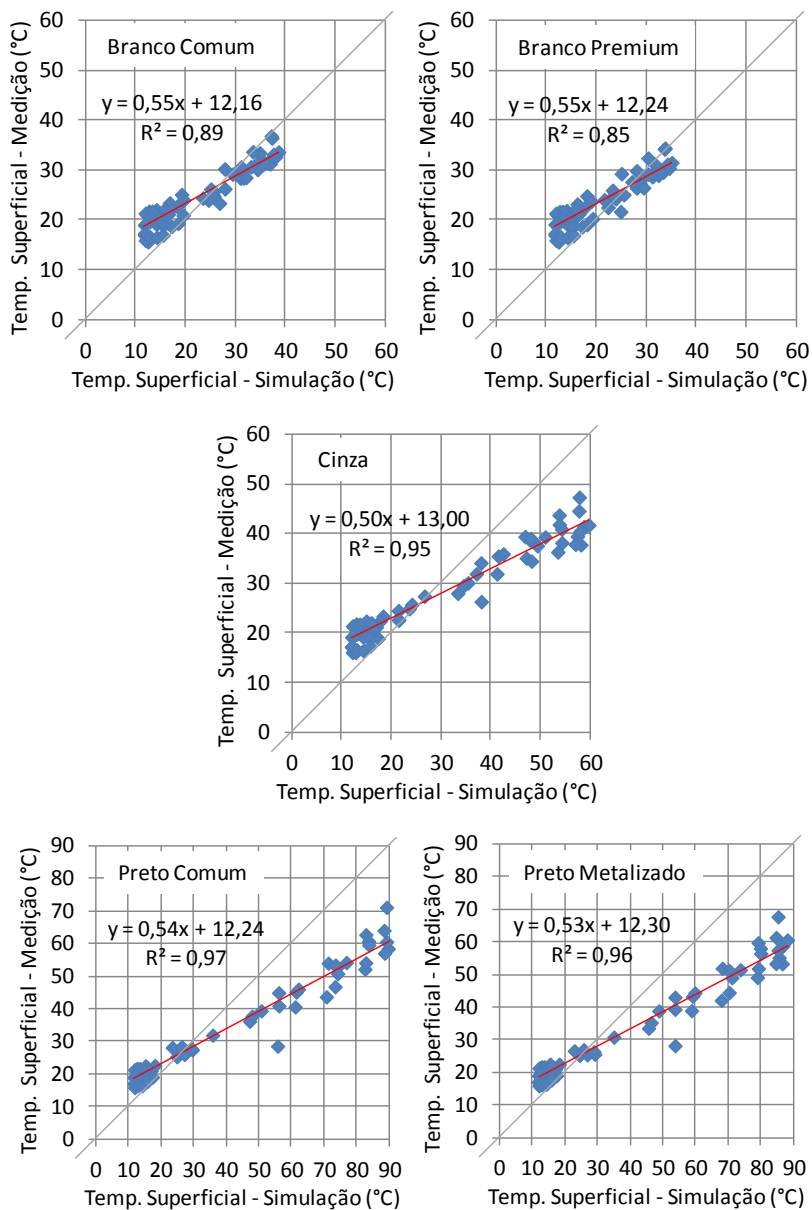


Figura 78 – Correlação entre temperaturas superficiais obtidas por medição e por simulação com o algoritmo DOE-2.

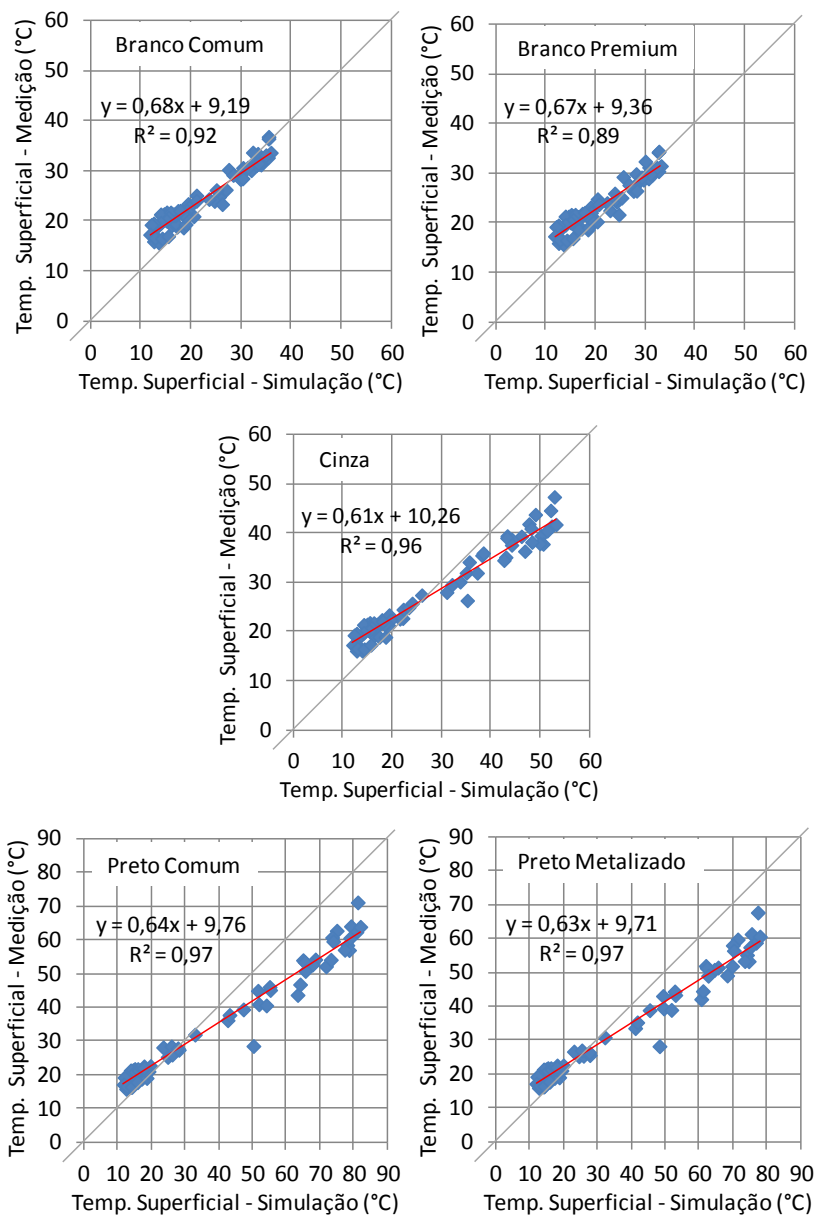
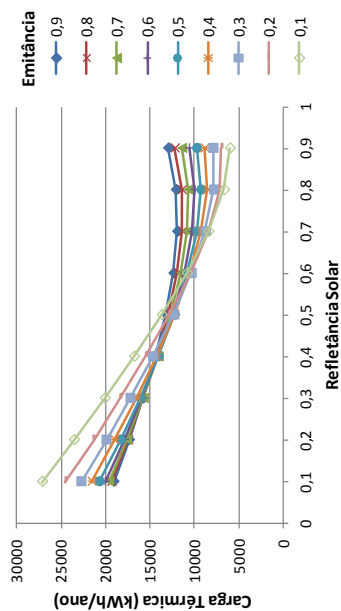


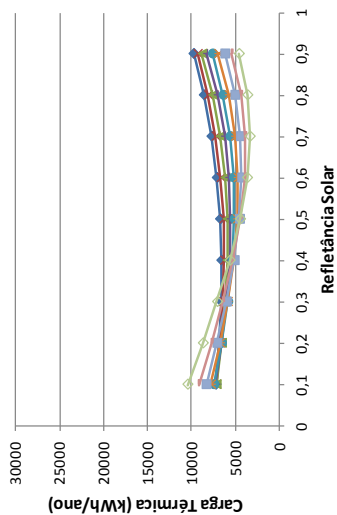
Figura 79 – Correlação entre temperaturas superficiais obtidas por medição e por simulação com o algoritmo TARP.

Apêndice 5 – Complementação de resultados referente ao método de análise através de simulação computacional

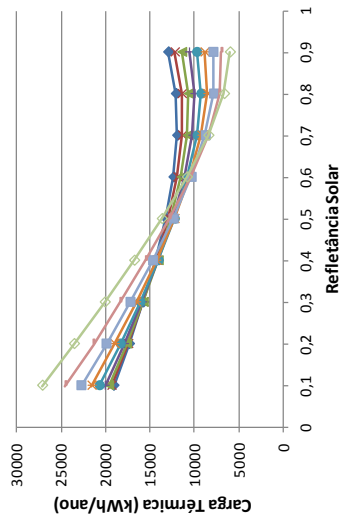
Nas Figuras 80 a 98 são apresentados alguns resultados complementares aos mostrados na seção 4.3.



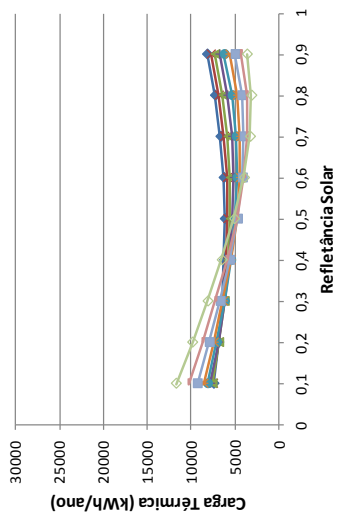
(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



(c) Resistência Alta / Carga Baixa

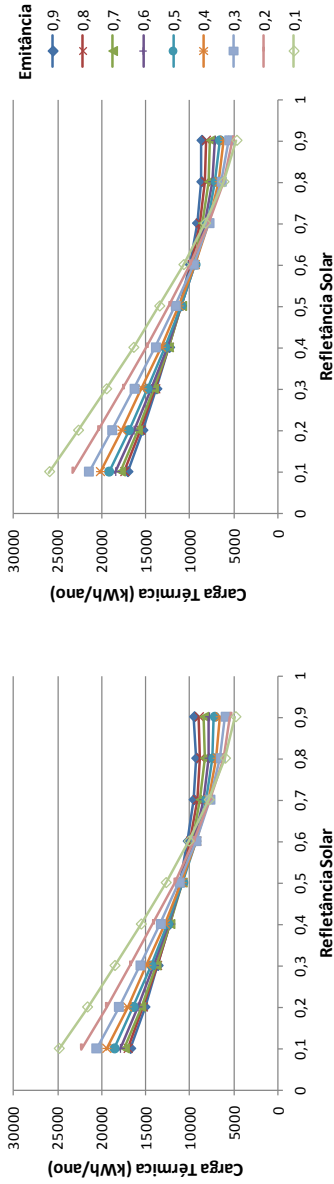


(b) Resistência Baixa / Carga Alta

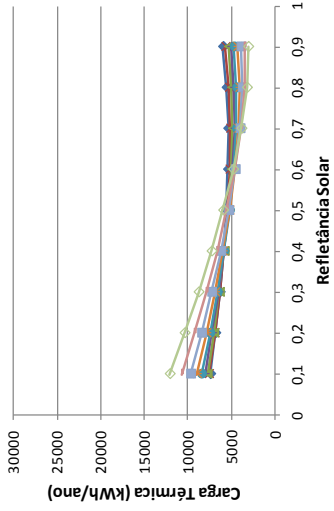


(d) Resistência Alta / Carga Alta

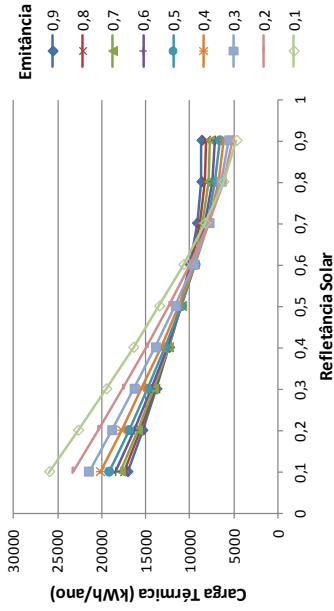
Figura 80 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de **Campos do Jordão – Z1**.



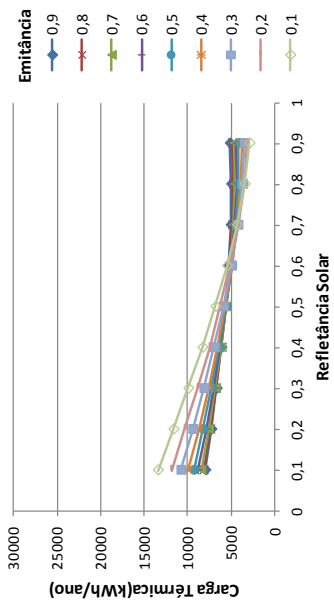
(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



(c) Resistência Alta / Carga Baixa

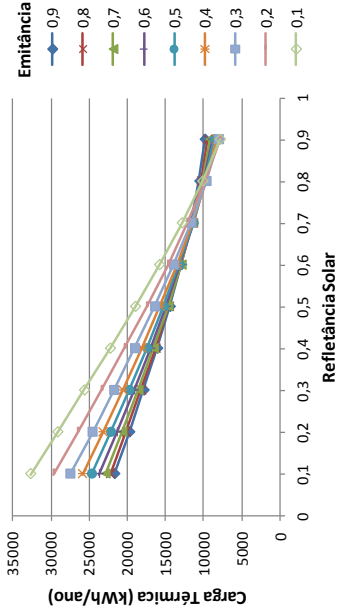


(b) Resistência Baixa / Carga Alta

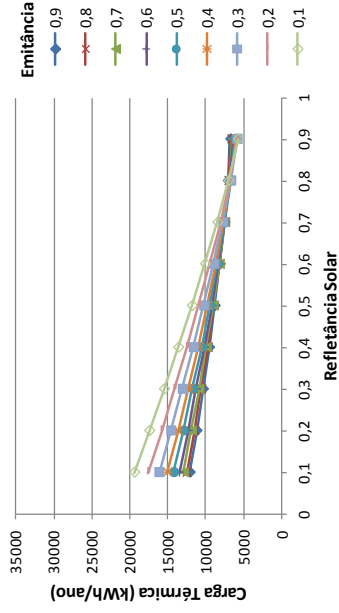


(d) Resistência Alta / Carga Alta

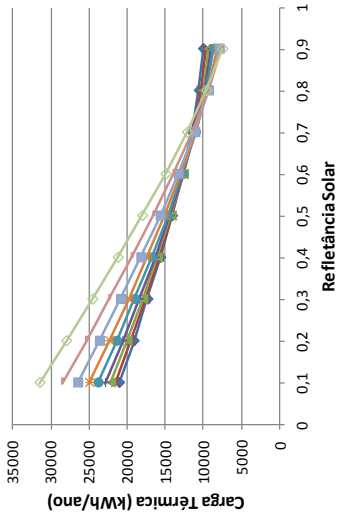
Figura 81 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Curitiba – Z1.



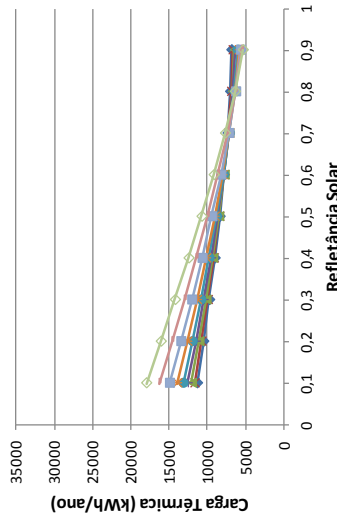
(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



(b) Resistência Baixa / Carga Alta

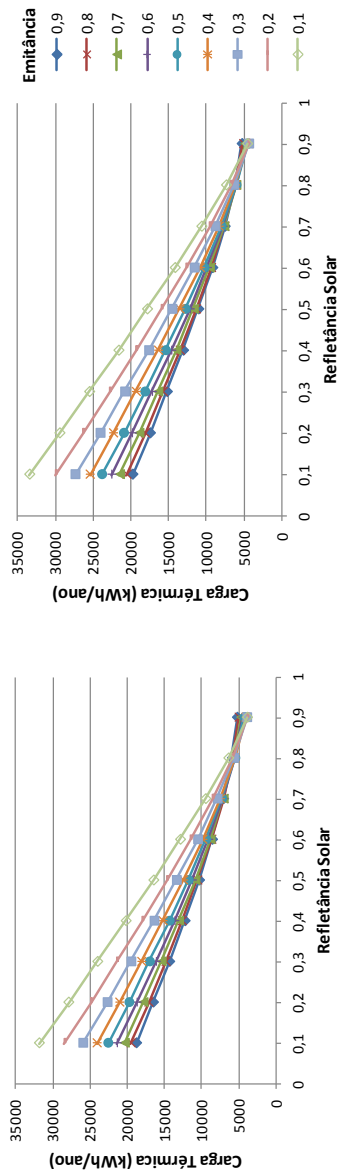


(c) Resistência Alta / Carga Baixa

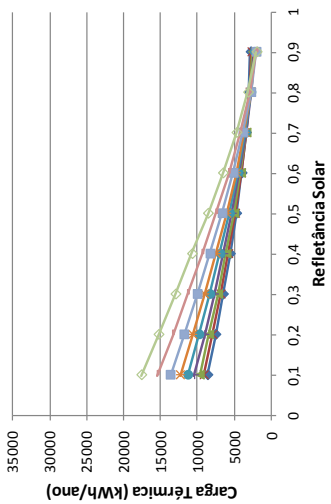


(d) Resistência Alta / Carga Alta

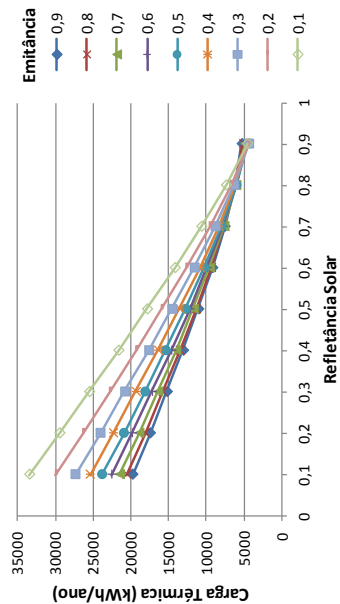
Figura 82 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de **Santa Maria – Z2**.



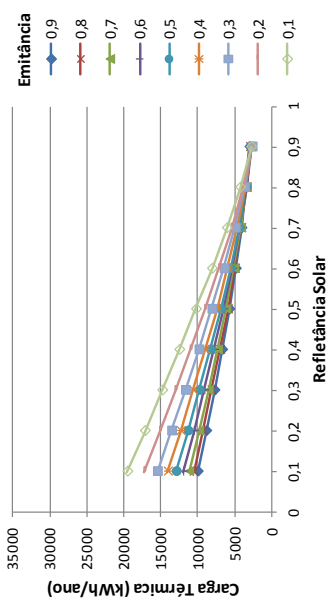
(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



(c) Resistência Alta / Carga Baixa

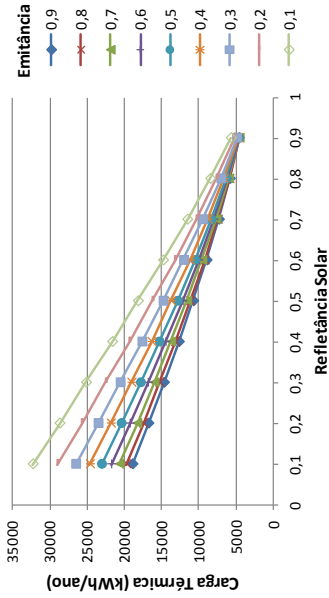


(b) Resistência Baixa / Carga Alta

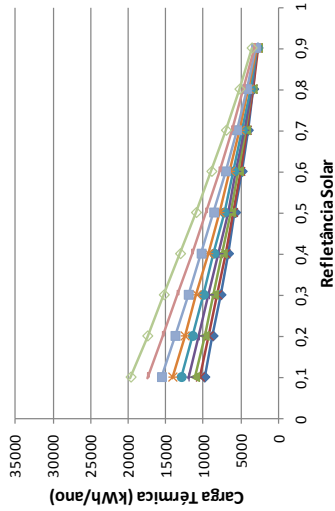


(d) Resistência Alta / Carga Alta

Figura 83 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de São João Del Rei – Z2.

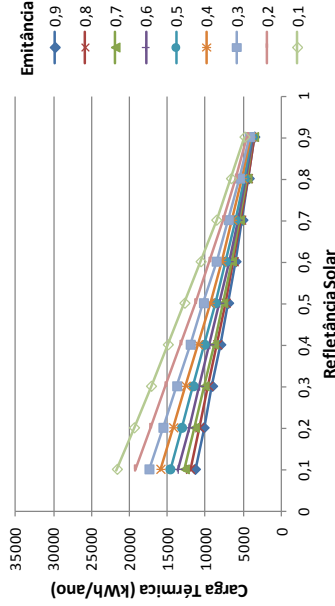


(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



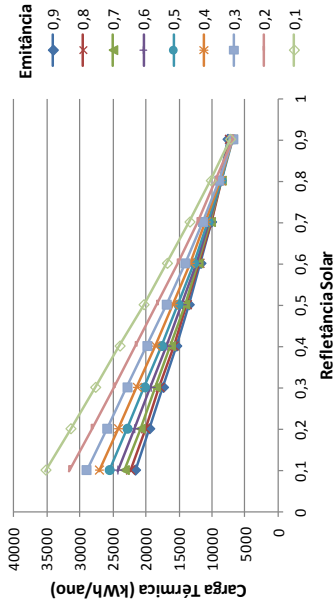
(c) Resistência Alta / Carga Baixa

(b) Resistência Baixa / Carga Alta

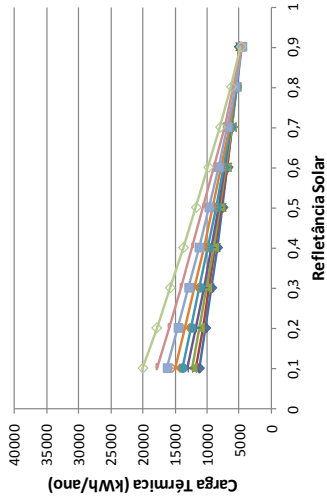


(d) Resistência Alta / Carga Alta

Figura 84 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Florianópolis – Z3.

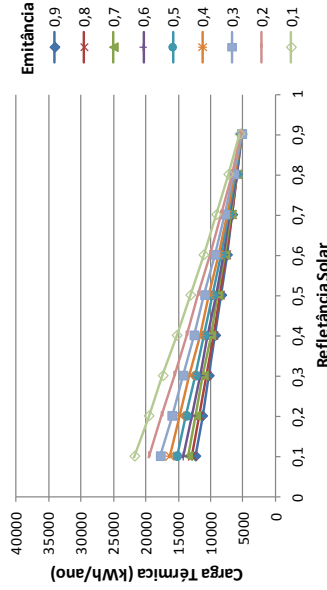


(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



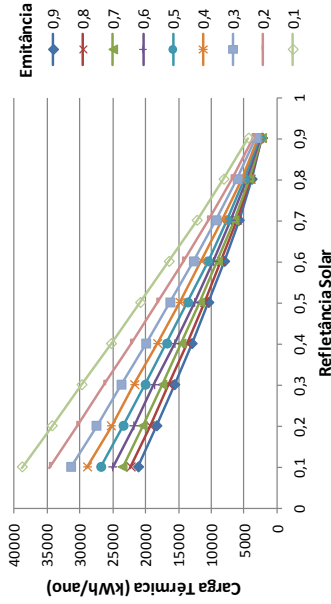
(c) Resistência Alta / Carga Baixa

(b) Resistência Baixa / Carga Alta

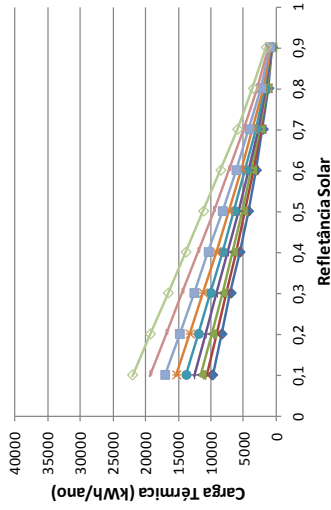


(d) Resistência Alta / Carga Alta

Figura 85 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Porto Alegre – Z3.

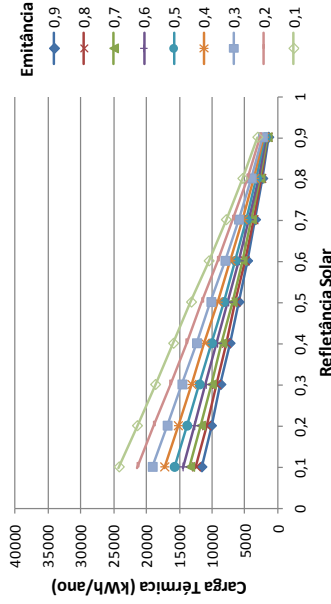


(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



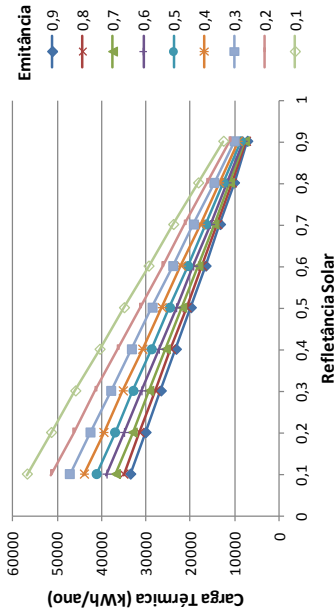
(c) Resistência Alta / Carga Baixa

(b) Resistência Baixa / Carga Alta

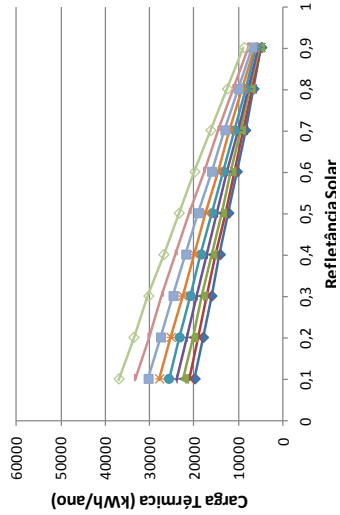


(d) Resistência Alta / Carga Alta

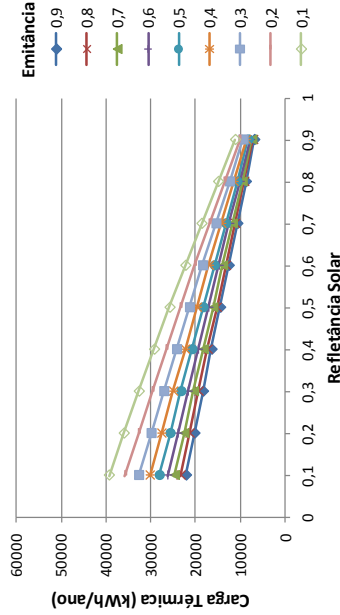
Figura 86 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Brasília – Z4.



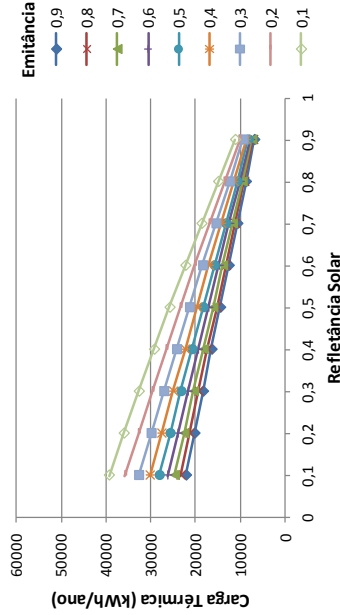
(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



(b) Resistência Baixa / Carga Alta

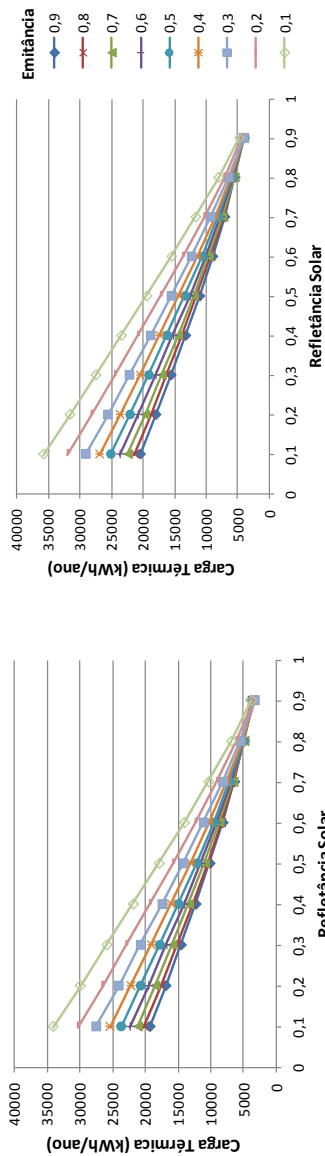


(c) Resistência Alta / Carga Baixa

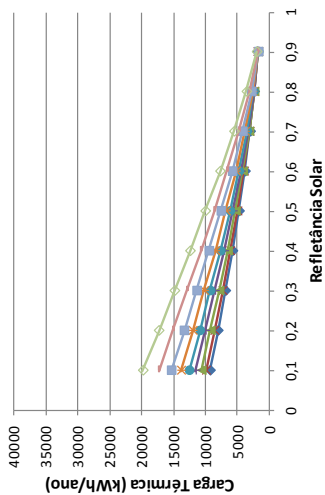


(d) Resistência Alta / Carga Alta

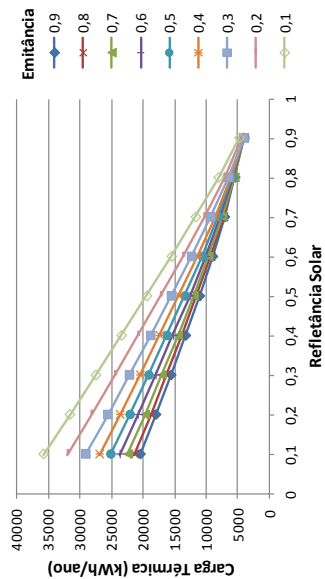
Figura 87 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Pirapora – Z4.



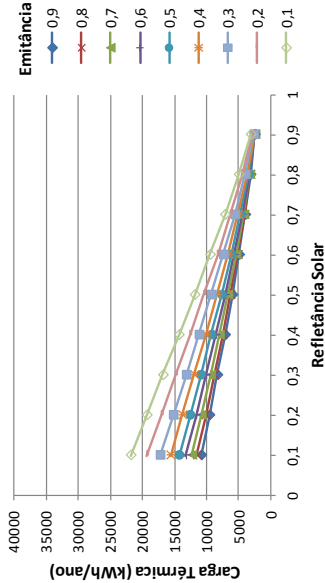
(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



(c) Resistência Alta / Carga Baixa

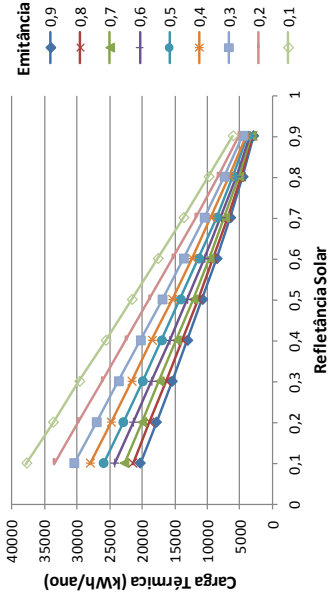


(b) Resistência Baixa / Carga Alta

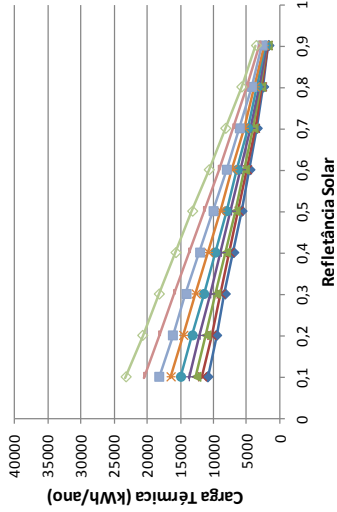


(d) Resistência Alta / Carga Alta

Figura 88 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de São Carlos – Z4.

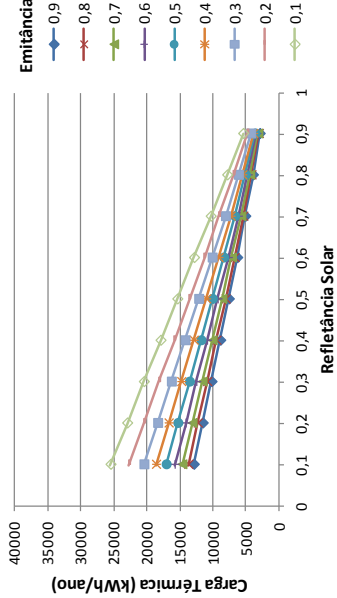


(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



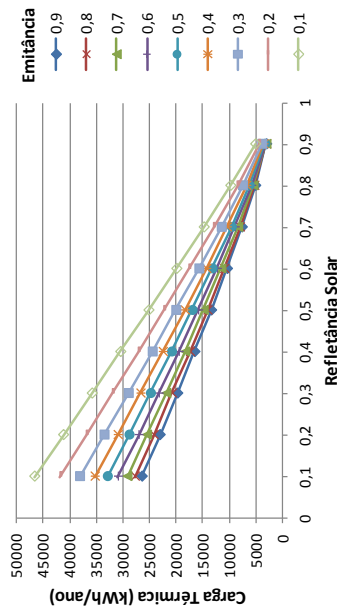
(b) Resistência Baixa / Carga Alta

(c) Resistência Alta / Carga Baixa

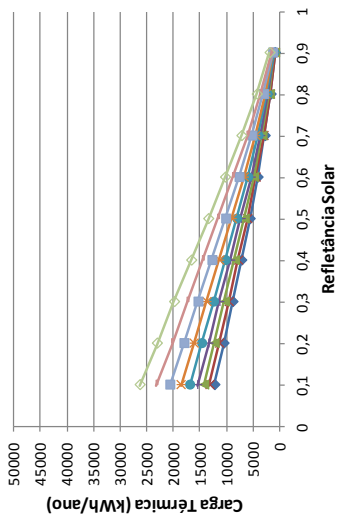


(d) Resistência Alta / Carga Alta

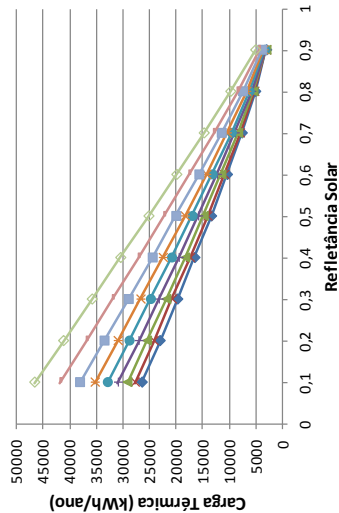
Figura 89 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Niterói – Z5.



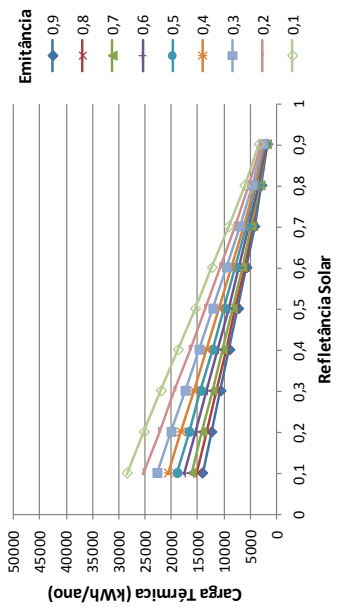
(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



(c) Resistência Alta / Carga Baixa

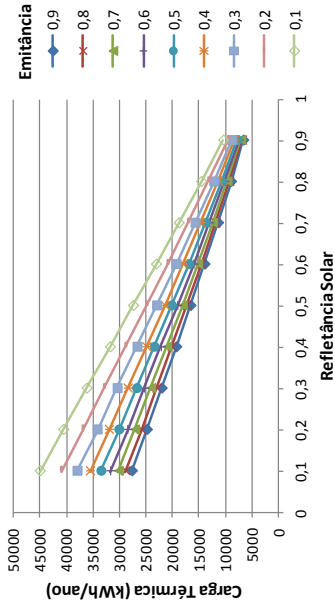


(b) Resistência Baixa / Carga Alta

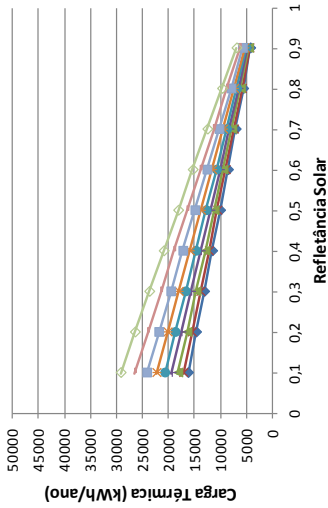


(d) Resistência Alta / Carga Alta

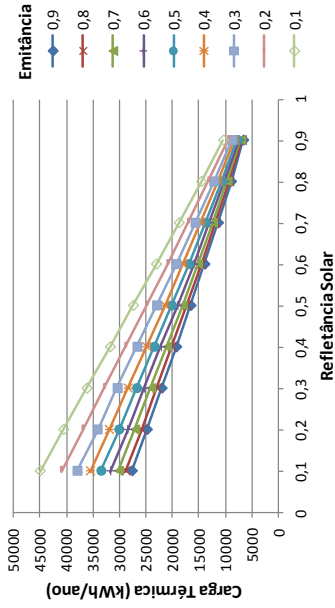
Figura 90 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Vitória da Conquista – Z5.



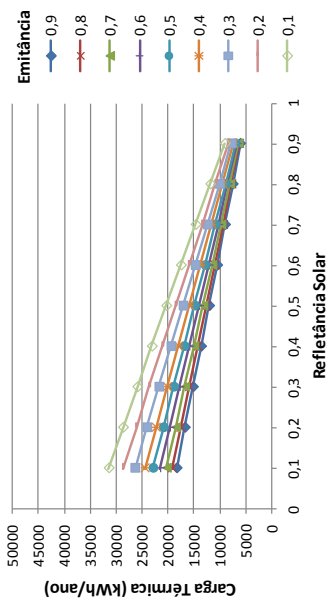
(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



(b) Resistência Baixa / Carga Alta



(c) Resistência Alta / Carga Baixa



(d) Resistência Alta / Carga Alta

Figura 91 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de **Campo Grande – Z6**.

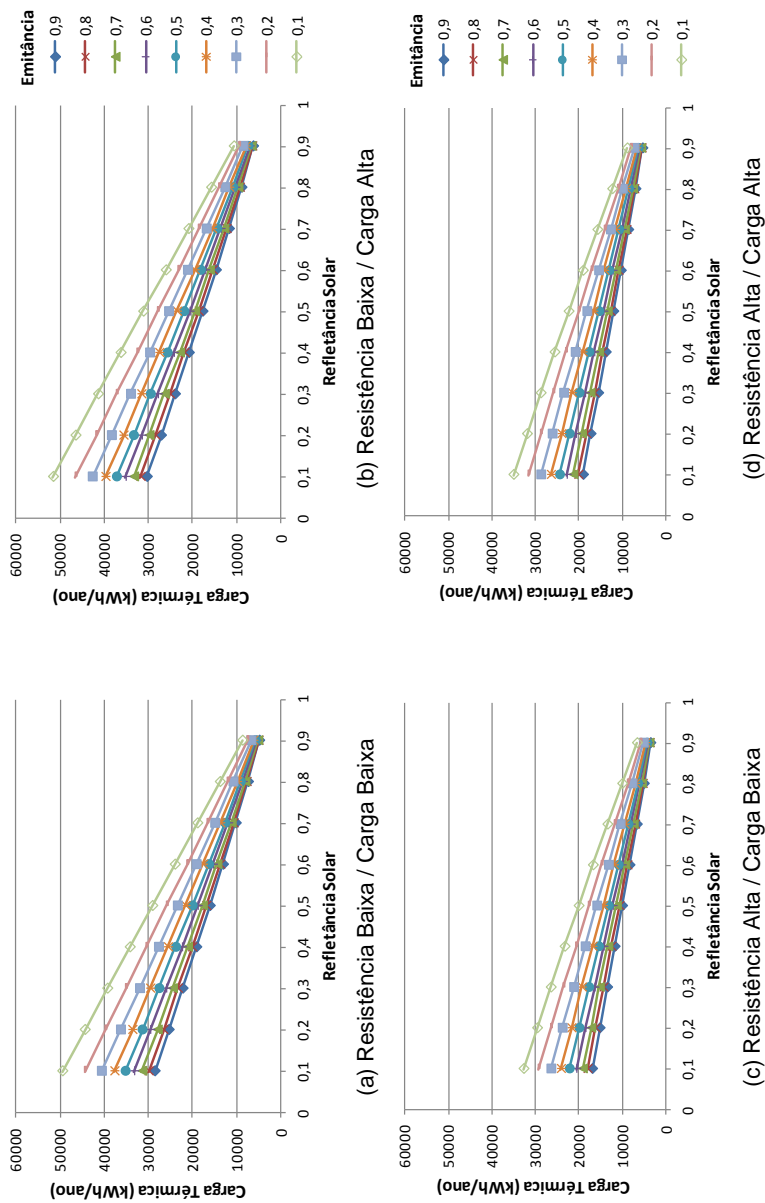
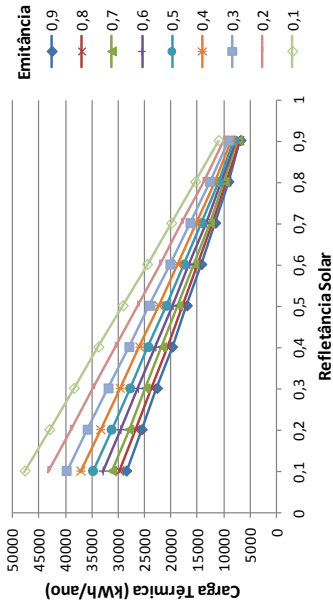
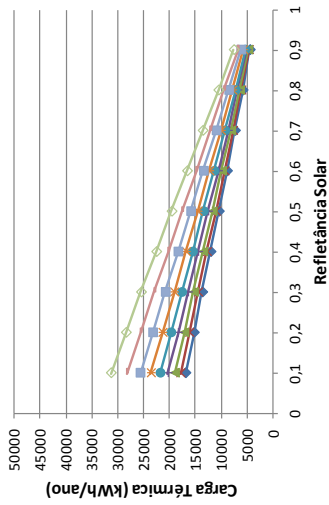


Figura 92 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Goiânia – Z6.

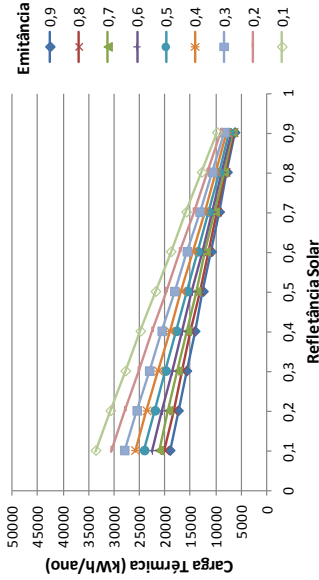


(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



(c) Resistência Alta / Carga Baixa

(b) Resistência Baixa / Carga Alta



(d) Resistência Alta / Carga Alta

Figura 93 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de **Montes Claros – Z6**.

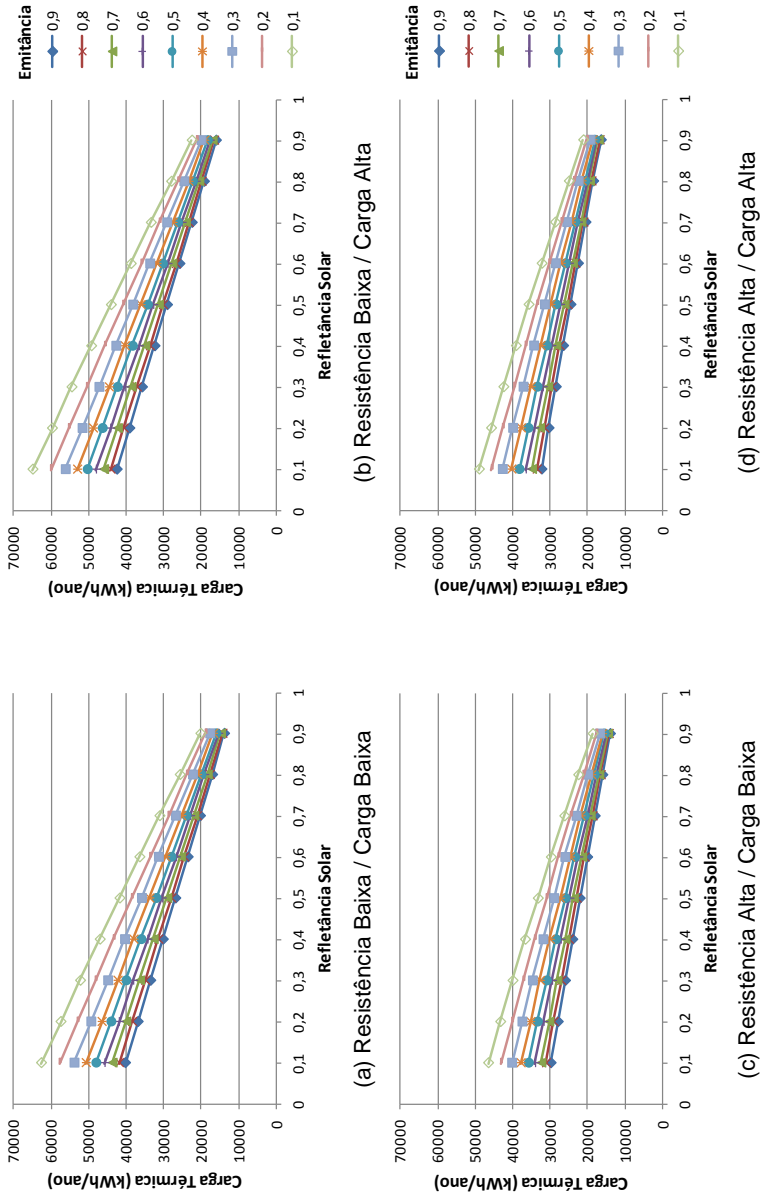
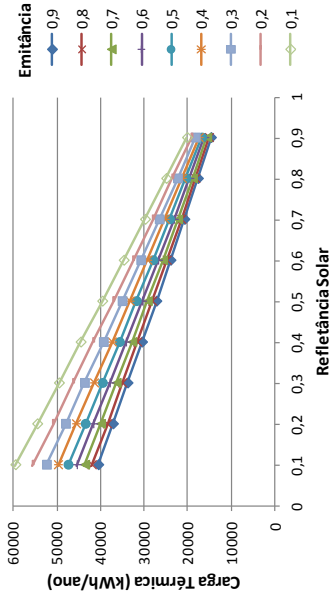
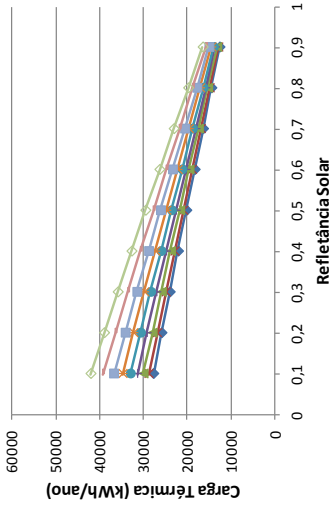


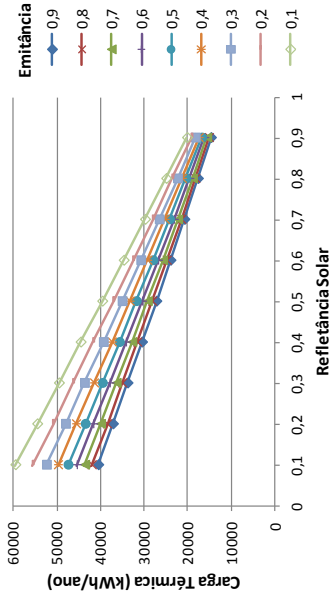
Figura 94 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Cuiabá – Z7.



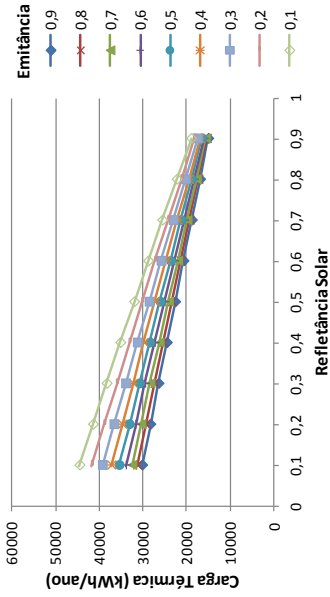
(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



(b) Resistência Baixa / Carga Alta

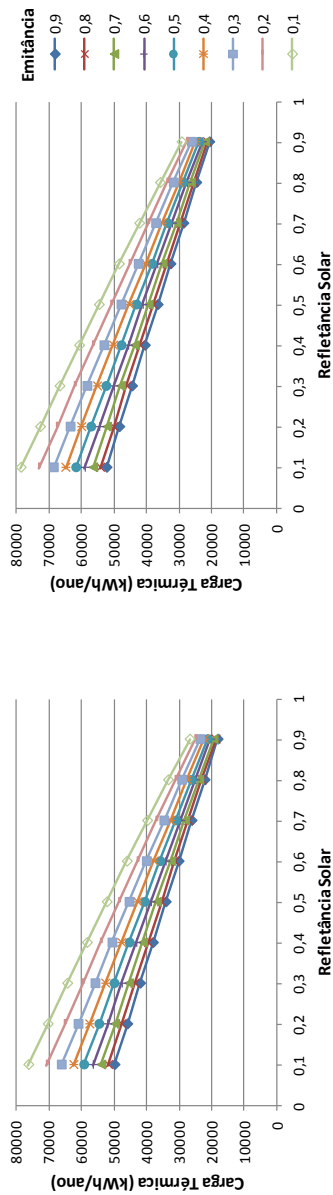


(c) Resistência Alta / Carga Baixa

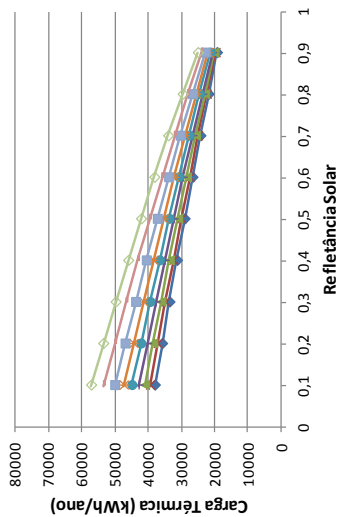


(d) Resistência Alta / Carga Alta

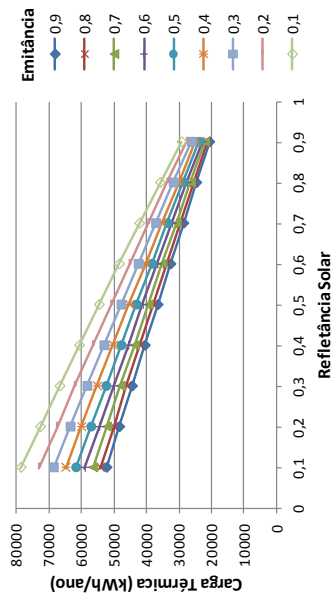
Figura 95 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Paulo Afonso – Z7.



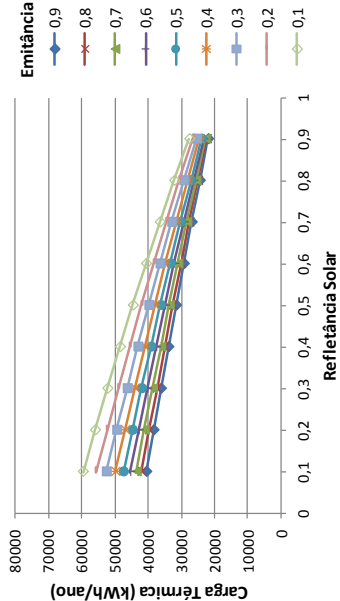
(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



(c) Resistência Alta / Carga Baixa

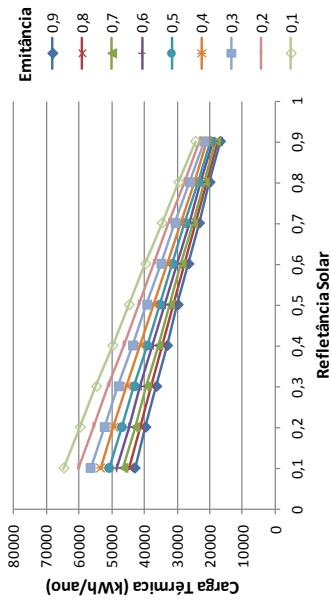


(b) Resistência Baixa / Carga Alta

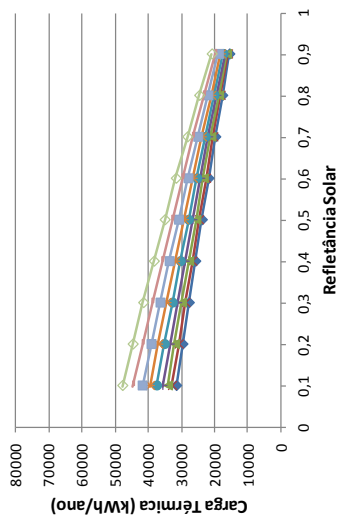


(d) Resistência Alta / Carga Alta

Figura 96 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Teresina – Zr.

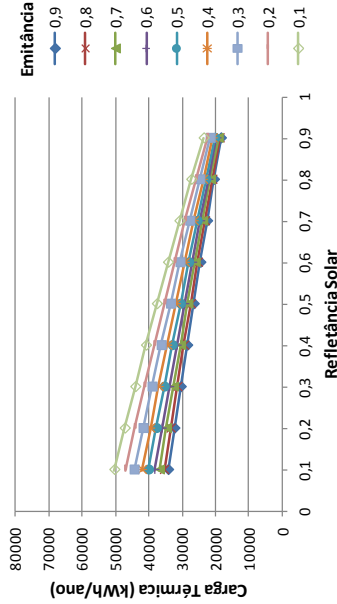


(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



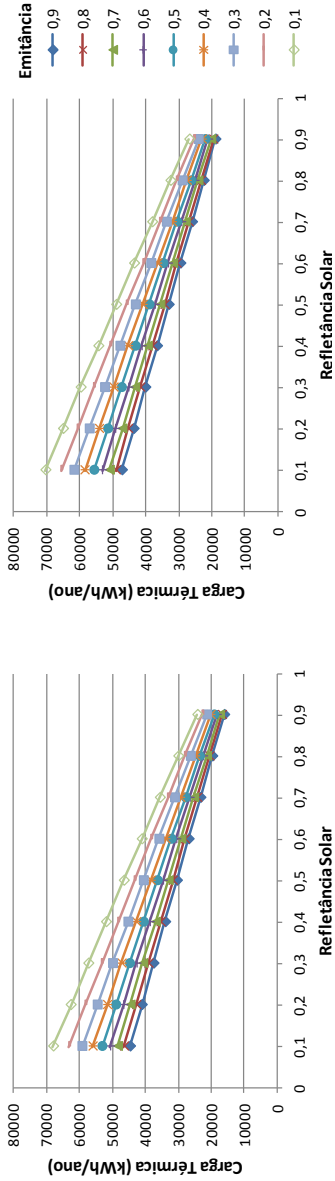
(c) Resistência Baixa / Carga Baixa

(b) Resistência Baixa / Carga Alta

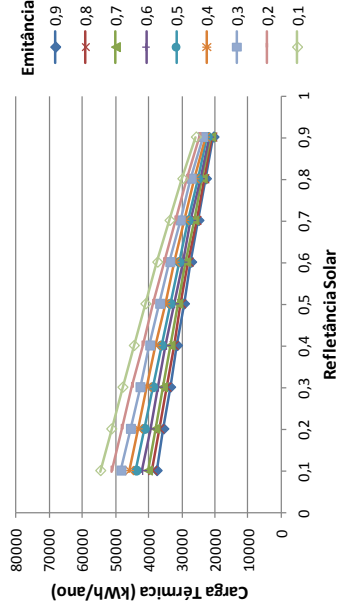


(d) Resistência Alta / Carga Alta

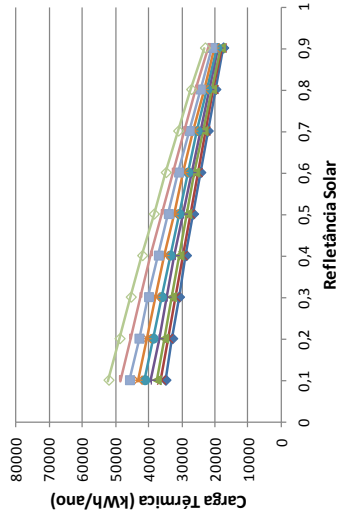
Figura 97 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de Fortaleza – Z8.



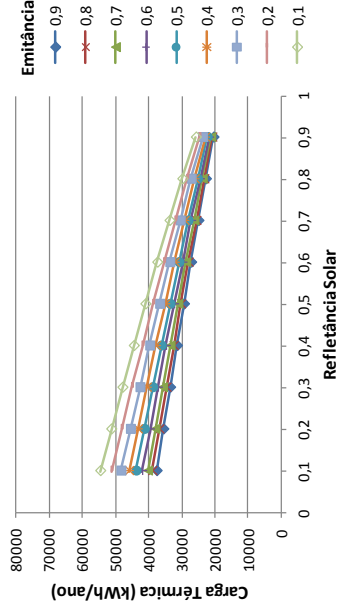
(a) Resistência Baixa / Carga Baixa



(b) Resistência Baixa / Carga Alta



(c) Resistência Alta / Carga Baixa



(d) Resistência Alta / Carga Alta

Figura 98 – Carga térmica para modelos com diferentes valores de refletância solar e emitância térmica, para a cidade de São Luis – Z8.