

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,  
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**A INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS  
NA DURABILIDADE DOS REVESTIMENTOS DE  
FACHADA: ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE  
GOIÂNIA-GO**

**JULIANA GOMES DE FREITAS**

D0060C12

GOIÂNIA

2012

JULIANA GOMES DE FREITAS

**A INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS  
NA DURABILIDADE DOS REVESTIMENTOS DE  
FACHADA: ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE  
GOIÂNIA-GO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção de título de Mestre.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof. Dra. Helena Carasek

Co-orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo

D0060C12

GOIÂNIA

2012

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**GPT/BC/UFG mr**

F866i Freitas, Juliana Gomes.  
A influência das condições climáticas na durabilidade dos revestimentos de fachada [manuscrito]: estudo de caso na cidade de Goiânia – GO / Juliana Gomes de Freitas. – 2012.  
xv, 197 f. : il., figs, tabs.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Helena Carasek; Coorientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2012.

Bibliografia.  
Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas e tabelas.  
Apêndices.

1. Revestimento – Fachadas. 2. Revestimento – Durabilidade. I. Título.

CDU: 72.02:666.97

Autorizamos a reprodução total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa.

Goiânia, \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

Assinatura:

e-mail:

JULIANA GOMES DE FREITAS

**A INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS NA DURABILIDADE  
DOS REVESTIMENTOS DE FACHADA: ESTUDO DE CASO NA  
CIDADE DE GOIÂNIA-GO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Aprovada em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Helena Carasek  
Universidade Federal de Goiás

(Presidente)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Carolina Brandstetter  
Universidade Federal de Goiás

(Membro interno)

---

Prof. Dr. Elton Bauer  
Universidade de Brasília

(Membro externo)

*Aos meus pais, minha irmã, meu esposo e meu cunhado,  
pelo companheirismo e compreensão incondicionais.*

## **AGRADECIMENTOS**

À professora Helena Carasek e ao professor Oswaldo Cascudo, pela competente e valiosa orientação, por suas críticas e elogios, pela troca de conhecimento e experiências fundamentais para conclusão deste trabalho. Aos professores do GECON, pelo conhecimento transmitido e experiências compartilhadas. Aos professores Antônio Melo Oliveira e José Wilson Lima Nerys pelo apoio, disponibilização do termovisor e paciência no acompanhamento das medições. Aos alunos iniciação científica Lorena da Silva Alves e Plínio Pires pela ajuda dispensada na coleta e tabulação dos dados. Aos meus colegas de curso pelo companheirismo. Em especial ao amigo Marco Antônio Oliveira, servidor do Centro de Gestão do Espaço Físico da UFG, pelo apoio, disponibilização de equipamentos e pessoal para auxílio na coleta de dados. Ao professor Elton Bauer e Maria Carolina Brandstetter que aceitaram o convite para participar de minha banca examinadora e contribuíram para a melhoria da presente dissertação.

Aos meus familiares e amigos que entenderam minha ausência em tantos momentos para que eu pudesse me dedicar à elaboração deste trabalho.

Ao pesquisador Carlos Mariano Melo Júnior, pelo auxílio com informações e esclarecimentos de aspectos relacionados ao tema. Ao Sr. Dilson de Almeida Sérgio, do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, pelo apoio e promoção na obtenção de dados meteorológicos importantes para a formulação do trabalho.

Aos colegas de trabalho, em especial aos eng. Humberto, Orley e Juraci, pelo apoio e compreensão, sobretudo quando precisava de palavras amigas e em situações que necessitei me ausentar.

Ao grande amigo eng. Waldir Belisário dos Santos Júnior da Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, pelo incentivo essencial para o ingresso no mestrado, época em que eu fazia parte da coordenação da Comunidade da Construção de Goiânia.

Ao Pró-Engenharias e a CAPES pelo suporte financeiro. A todas aquelas pessoas que direta ou indiretamente colaboraram com a realização desta dissertação.

## RESUMO

A deterioração das fachadas dos edifícios está relacionada com os elementos climáticos. A compreensão da ação conjunta da chuva, vento e insolação é importante para prevenção de manifestações patológicas, garantindo, assim, a durabilidade dos revestimentos. Para tanto, torna-se essencial o conhecimento a respeito dos mecanismos de transporte de calor e umidade em materiais porosos. Os problemas relacionados a estes fenômenos são diversos, dentre eles a variação dimensional, que pode ocasionar fissuras. A orientação solar e a presença de detalhes arquitetônicos nas fachadas podem provocar a existência de pontos mais úmidos, o que favorece a deposição de poluentes e a proliferação de microorganismos, causando manchamentos. Deste modo, o presente trabalho objetiva a análise e entendimento de aspectos que visem à durabilidade dos revestimentos de fachadas a partir da compreensão da influência dos fatores climáticos em edifícios da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Goiás (UFG), na cidade de Goiânia - GO. Metodologicamente, o estudo propôs-se à: realização de uma vistoria, com o intuito de quantificar e mapear as manifestações patológicas presentes; medições de temperatura e umidade superficiais nas estações seca e chuvosa, buscando relacioná-las com as orientações cardeais; cálculo do índice de chuva dirigida direcional mensal utilizando os dados da estação meteorológica da UFG; e realização de imagens termográficas, também nos períodos seco e chuvoso. Como principais resultados, verificou-se que as fachadas estão expostas a diferentes níveis de umidade e temperatura, o que pode favorecer a maior deterioração destas. Constatou-se que a fachada Norte é a que recebe mais insolação tanto no período seco quanto no chuvoso, contribuindo para um alto índice de fissuração. A mesma orientação também é uma das mais úmidas e com maiores níveis de manchamento, informação consolidada por meio do índice de chuva dirigida direcional que, nos meses de janeiro e fevereiro de 2012, atingiu um dos valores mais altos. Observou-se também que, dentre os locais escolhidos para as medições de umidade e temperatura superficiais, o mais propício à deterioração são os detalhes arquitetônicos, pois atingiram os mais altos valores. Em relação à termografia infravermelha, constatou-se que o melhor período do ano para as inspeções era na época seca e no horário da tarde. Nestes períodos, foi possível a identificação de manifestações patológicas nas fachadas, como manchas, fissuras e *fantômes*. Um exemplo é o caso das fissuras que possuíam temperatura 1°C menor que a parte da alvenaria sem defeitos. Foi possível também a visualização de pontos úmidos, bem como dos pontos do revestimento que estavam sobre a alvenaria e a estrutura.

**Palavras-chave:** Patologia. Fachada. Chuva Dirigida. Insolação. Manchamento

## ABSTRACT

The climatic elements are related to the deterioration of the facades of buildings. Understanding the joint action of rain, wind and sunshine is important for prevention of pathological manifestations, thus ensuring the durability of coatings. Then, it becomes essential to know about the mechanisms of heat and moisture in porous materials. The problems related to this phenomenon are many, including the dimensional variation, which can cause cracks. The solar orientation and the presence of architectural details on the facades can cause the existence of the wettest spots, which favors the deposition of pollutants and microorganisms, causing stains. Thus, this paper aims at analyzing and understanding of issues that address the durability of facade coatings based on the understanding of the influence of climatic factors in buildings of the School of Engineering of the Federal University of Goiás (UFG), in Goiânia. Methodologically, the study aimed to: conducting a survey in order to quantify and map the pathological manifestations present, measurements of surface temperature and humidity in the dry and rainy seasons, trying to relate them to the cardinal orientations, creation of maps of wind-driven rain using data from the meteorological station of UFG, and conducting thermographic images, also in the rainy and dry seasons. The main results, it was found that the facades are exposed to different levels of humidity and temperature, which may favor the further deterioration of these. It was found that the north façade is the one that receives more sunlight in both the rainy and dry season, contributing to a high rate of fissuration. The same orientation is also one of the most humid and with higher levels of staining, consolidated information through wind-driven rain, that in the months of January and February 2012 reached one of the highest values. It was also observed that among the sites chosen for the measurements of surface moisture and temperature, the more prone to deterioration are the architectural details, as reached the highest values. In relation to infrared thermography, it was found that the best time of year for inspections was in the dry season and in the afternoon. In these periods, it was possible to identify pathological manifestations in the facades, such as stains, cracks and *fantômes*. An example is the case of the cracks which had a temperature 1°C lower than the part of the masonry without defects. It was also possible to visualize moist spots, as well as the lining of the points that were on the masonry and structure.

**Keywords:** Pathology. Facade. Wind-driven rain. Insolation. Staining.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama Psicométrico (REIS, 2006) .....	30
Figura 2.2 – Sucessão de modos de condensação em um poro isolado (SANTOS, 2006) .....	32
Figura 2.3 – Esquema do ângulo de molhamento (SANTOS; ROCHA; CHERIAF, 2007) .....	33
Figura 2.4 - Fatores que influenciam a penetração de umidade pelas chuvas (GARDEN, 1963) .....	36
Figura 2.5 - Índice de chuva dirigida direcional mensal (m <sup>2</sup> /s) para Goiânia no mês de janeiro no período de 2002 a 2008 (MELO JR.; CARASEK, 2011) .....	37
Figura 2.6 – Umidade superficial em função da orientação da fachada medida em diversos pavimentos (MELO JR., 2010) .....	38
Figura 2.7 – Percentuais de infiltrações nas orientações de fachada de edificações na cidade de Goiânia (MELO JR., 2010) .....	39
Figura 2.8 – Parábola formada pela chuva (COUPER, 1972 apud PETRUCCI, 2000).....	40
Figura 2.9 - Fissuras em ressalto de edifício em Goiânia que favoreceu o crescimento de microorganismos no local (fotografado em 2010).....	42
Figura 2.10 – Manchas de sujidade abaixo de peitoris em edifício na cidade de Goiânia (fotografado em 2010).....	43
Figura 2.11 - Índice de chuva dirigida direcional mensal (m <sup>2</sup> /s) para Goiânia no mês de janeiro no período de 2002 a 2008 (MELO JR., 2010) .....	45
Figura 2.12 – Fachada Sul de edificação com formação de fantômes e maior incidência em alvenarias de vedação (a) que em elementos estruturais (e) (MELO JR., 2010) .....	47
Figura 2.13 – Formação de fantômes em edifício multipavimentos (SNMI, 2010) .....	48
Figura 3.1 – Esquema de transferência de calor por condução (JOHANSSON, 2006) .....	52
Figura 3.2 – Espectro eletromagnético (SANTOS, 2006).....	53
Figura 3.3 – Radiação eletromagnética absorvida, refletida e transmitida (JOHANSSON, 2006) .....	55
Figura 3.4 – Carta Solar para latitude 16° Sul (CAVALEIRO; MALATO, 1969 apud FERNANDES, 2007) .....	59
Figura 3.5 – Carta solar simplificada para a latitude 16° Sul (CAVALEIRO; MALATO, 1969 apud FERNANDES, 2007).....	60
Figura 3.6 – Carta solar para fachada com azimute 45° - horários de insolação (FERNANDES, 2007) .....	61
Figura 3.7 – Descolamento em revestimento de argamassa sobre estrutura de concreto (CARASEK; CASCUDO, 2007).....	64
Figura 4.1 – Termocâmara utilizada por Barreira (2004).....	70
Figura 4.2 – Meterlink (disponível em <a href="http://www.extech.com/meterlink/">http://www.extech.com/meterlink/</a> ) .....	71
Figura 4.3 – Representação esquemática do experimento para a radiografia com nêutrons (ZHANG et al., 2010).....	78
Figura 4.4 – Imagens por radiografia com nêutrons até 72 horas após imersão parcial em água (ZHANG et al., 2010) .....	79
Figura 4.5 – Perfis de umidade ao longo da direção vertical da área retangular selecionada após diferentes durações de contato com a água (ZHANG et al., 2010).....	80
Figura 4.6 – Imagem de radiografia com nêutrons com a posição da barra de aço no corpo de prova de argamassa (ZHANG et al., 2010) .....	80

Figura 5.1 – Bloco A da Escola de Engenharia da UFG (fotografado em 2012) .....	83
Figura 5.2 – Bloco B da Escola de Engenharia da UFG (fotografado em 2012).....	83
Figura 5.3 – Localização dos edifícios da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Goiás, setor Leste Universitário, Goiânia – GO.....	84
Figura 5.4 – Localização da estação meteorológica no edifício da Escola de Engenharia da UFG, setor Leste Universitário, Goiânia – GO .....	85
Figura 5.5 – Estação meteorológica automática da Escola de Engenharia da UFG(fotografado em 2012) .....	85
Figura 5.6 – Exemplo da subdivisão das fachadas em áreas do Bloco A para a obtenção das fotografias .....	87
Figura 5.7 – Exemplo da confecção dos mapeamentos das manifestações patológicas da fachada Sul do Bloco A .....	88
Figura 5.8 – Fluxograma da metodologia aplicada na coleta de dados e vistoria.....	89
Figura 5.9 – Mapa das regiões e percentuais de manchamento (elaborado com base em GASPAR; BRITO, 2005; ANTUNES, 2010; MELO JÚNIOR, 2010) .....	90
Figura 5.10 - Equipamento de medida de temperatura superficial – termômetro infravermelho IncoTerm.....	91
Figura 5.11 - Equipamento de medida da umidade superficial - Moisture Meter M-T-170 .....	91
Figura 5.12 – Representação esquemática das regiões para as medições de temperatura e umidade superficial (elaborado com base em Gaspar e Brito, 2005).....	92
Figura 5.13 – Exemplo da localização da nomenclatura utilizada para fazer referência aos pontos onde se realizou as medições de umidade e temperatura superficiais .....	93
Figura 5.14 – Exemplo da localização da nomenclatura utilizada para fazer referência aos pontos onde se realizou as medições de umidade e temperatura superficiais .....	93
Figura 5.15 – Representação esquemática das regiões para as medições com termografia infravermelha .....	94
Figura 5.16 – Câmera termográfica digital FLUKE Ti10 .....	95
Figura 6.1 – Planta baixa do primeiro pavimento do Bloco A da Escola de Engenharia da UFG .....	97
Figura 6.2 – Fachada Norte do Bloco A.....	97
Figura 6.3 – Foto da fachada Leste (esquerda) e Norte (direita) do Bloco A.....	98
Figura 6.4 – Foto da fachada de parte da fachada Norte do Bloco A .....	98
Figura 6.5 – Foto da fachada Sul (esquerda) e Leste (direita) do Bloco A .....	99
Figura 6.6 – Fissuras, manchas de sujidade e fantômes na fachada Sul do Bloco A.....	99
Figura 6.7 – Foto da fachada Oeste do Bloco A.....	100
Figura 6.8 – Planta baixa do primeiro pavimento do Bloco B .....	100
Figura 6.9 – Fachada Norte do Bloco B.....	101
Figura 6.10 – Fotografia da fachada Norte do Bloco B .....	101
Figura 6.11 – Fotografias obtidas a uma distância padrão das texturas do Bloco A (esquerda) e Bloco B (direita) .....	101
Figura 6.12 – Fachada Leste do Bloco B .....	102
Figura 6.13 – Fachada Oeste do Bloco B.....	102
Figura 6.14 – Fachada Sul (esquerda) e fachada Leste (direita) do Bloco B .....	102
Figura 6.15 – Índice de chuva dirigida direcional mensal durante o período de outubro de 2011 a fevereiro de 2012 .....	103
Figura 6.16 – Somatório dos índices de chuva dirigida direcional mensal para o mês de outubro durante o período de 2002 a 2008 (MELO JÚNIOR, 2010) .....	105
Figura 6.17 – Mapeamento das manifestações patológicas da Fachada Norte do Bloco A .....	106

Figura 6.18 – Mapeamento das manifestações patológicas da Fachada Sul do Bloco A.....	107
Figura 6.19 – Incidência solar nas orientações Norte e Sul durante período seco e chuvoso em Goiânia (adaptado de FERNANDES, 2007).....	108
Figura 6.20 – Mapeamento das manifestações patológicas da Fachada Leste do Bloco A.....	108
Figura 6.21 – Mapeamento das manifestações patológicas da Fachada Oeste do Bloco A.....	108
Figura 6.22 – Mapeamento das manifestações patológicas da Fachada Norte do Bloco B.....	109
Figura 6.23 – Mapeamento das manifestações patológicas da Fachada Sul do Bloco B.....	109
Figura 6.24 – Mapeamento das manifestações patológicas da Fachada Leste do Bloco B.....	109
Figura 6.25 – Mapeamento das manifestações patológicas da Fachada Oeste do Bloco B.....	109
Figura 6.26 – Mapas dos percentuais de manchamento do Bloco A.....	110
Figura 6.27 – Percentual de manchamento do Bloco A, fachadas N, S, L e O.....	111
Figura 6.28 – Mancha formada por partículas de solo na fachada Norte (a) e Sul (b).....	111
Figura 6.29 – Fotografia do peitoril em ardósia na fachada Norte (a) e granitina na fachada Sul (b) do Bloco A.....	112
Figura 6.30 – Fotografia das manchas peitoril em granitina na fachada Sul (b) do Bloco A.....	112
Figura 6.31 – Acúmulo de partículas do solo abaixo peitoril na fachada do Bloco A (seta indica quebra do peitoril e lavado limpo localizado).....	113
Figura 6.32 – Manchas na platibanda da fachada Norte do Bloco A.....	113
Figura 6.33 – Fantômes na fachada Norte do Bloco A (setas indicando as peças estruturais sobre o revestimento).....	114
Figura 6.34 – Mapas dos percentuais de manchamento do Bloco B.....	114
Figura 6.35 – Percentual de manchamento do Bloco B, fachadas N, S, L e O.....	115
Figura 6.36 – Índice de fissuração das quatro fachadas dos Blocos A e B.....	116
Figura 6.37 – Índice de fissuração da parte “cega” e com aberturas da fachada Norte do Bloco A....	117
Figura 6.38 – Valores médios de umidade superficial nos detalhes arquitetônicos do Bloco A nos períodos seco e chuvoso.....	118
Figura 6.39 – Valores médios de umidade superficial nos detalhes arquitetônicos do Bloco B nos períodos seco e chuvoso.....	119
Figura 6.40 – Fotografia com enfoque na pintura dos detalhes arquitetônicos do Bloco A (a) e do Bloco B (b).....	120
Figura 6.41 – Valores médios de umidade superficial nos pontos sobre estrutura do Bloco A nos períodos seco e chuvoso.....	121
Figura 6.42 – Valores médios de umidade superficial nos pontos sobre estrutura do Bloco B nos períodos seco e chuvoso.....	121
Figura 6.43 – Incidência de ventos acumulada (m/s) durante o mês de setembro de 2011.....	122
Figura 6.44 – Fotografia com enfoque na pintura do Bloco A nos pontos sobre a estrutura (a) e sobre os detalhes arquitetônicos (b).....	122
Figura 6.45 – Incidência de ventos acumulada (m/s) durante o mês de janeiro de 2012.....	124
Figura 6.46 – Valores médios da umidade superficial nos pontos sobre alvenaria do Bloco A nos períodos seco e chuvoso.....	126
Figura 6.47 – Valores médios da umidade superficial nos pontos sobre alvenaria do Bloco B nos períodos seco e chuvoso.....	126
Figura 6.48 – Valores médios da umidade superficial nos pontos sobre estrutura não ressaltada e alvenaria do Bloco A nos períodos seco e chuvoso.....	128
Figura 6.49 – Valores médios da umidade superficial nos pontos sobre estrutura não ressaltada e alvenaria do Bloco B nos períodos seco e chuvoso.....	129

Figura 6.50 – Valores médios da temperatura superficial nos detalhes arquitetônicos do Bloco A nos períodos seco e chuvoso (Fachada Norte) .....	130
Figura 6.51 – Valores médios da temperatura nos detalhes arquitetônicos do Bloco B nos períodos seco e chuvoso (Fachada Norte) .....	131
Figura 6.52 - Valores médios da temperatura superficial nos pontos sobre estrutura do Bloco A nos períodos seco e chuvoso.....	132
Figura 6.53 - Valores médios da temperatura superficial nos pontos sobre estrutura do Bloco B nos períodos seco e chuvoso.....	132
Figura 6.54 – Carta solar simplificada para Goiânia e fachada de azimute 105°, 195° e 285°, chamada de Oeste e Sul respectivamente neste trabalho (adaptado de CAVALEIRO; MALATO, 1969 apud FERNANDES, 2007).....	133
Figura 6.55 - Valores médios da temperatura superficial nos pontos sobre alvenaria do Bloco A nos períodos seco e chuvoso.....	134
Figura 6.56 - Valores médios da temperatura superficial nos pontos sobre alvenaria do Bloco B nos períodos seco e chuvoso.....	134
Figura 6.57 – Termografia da fachada Norte do Bloco A às 8 h durante o período seco .....	135
Figura 6.58 – Termografia da fachada Norte do Bloco A às 15 h durante o período seco.....	136
Figura 6.59 – Termografia da fachada Norte do Bloco A às 21 h durante o período seco.....	136
Figura 6.60 – Fotografia da fachada Norte do Bloco A (as fissuras horizontais foram delineadas com linhas azuis, pois a fotografia não possibilitou a visualização na impressão) .....	137
Figura 6.61 – Mapeamento das manifestações patológicas do mesmo trecho da fachada Norte do Bloco A .....	137
Figura 6.62 – Termografia da fachada Norte do Bloco A às 15 h durante o período chuvoso.....	138
Figura 6.63 – (a) Imagem térmica às 8 h durante o período seco, (b) imagem térmica às 15 h durante o período seco, (c) imagem térmica às 21 h durante o período seco e fotografia do mesmo trecho da Fachada Norte do Bloco A .....	139
Figura 6.64 – Média das medições de umidade superficial por localização e horário durante o período seco .....	140
Figura 6.65 – Termografia da fachada Norte do Bloco A às 15 h durante o período seco.....	141
Figura 6.66 – Fotografia do trecho da Figura 6.43 .....	141
Figura 6.67 – Fantômes existentes na platibanda da fachada Sul do Bloco A (a) e imagem térmica do mesmo local obtida às 15h no período seco (b).....	142
Figura 6.68 – Mapeamento das manifestações patológicas realizado no mesmo local, sem escala ....	142
Figura 6.69 – Termografia da fachada Oeste do Bloco A às 8 h (a), às 15 h (b) e às 21 h (c) .....	143
Figura 6.70 – Fotografia do mesmo trecho da Figura 6.47 .....	143
Figura 6.71 – Imagem termográfica da fachada Oeste do Bloco A às 15h (a) e o mapeamento das manifestações patológicas do mesmo local (b).....	144
Figura 6.72 – Termografia da fachada Leste do Bloco A às 15h (a) e fotografia do mesmo local (b) .....	145
Figura 6.73 – Imagem termográfica da fachada Oeste (a) da fachada Sul (b) do Bloco B às 15h .....	146
Figura 6.74 – Imagem termográfica da fachada Sul do Bloco B às 15h (a) e fotografia do mesmo local (b).....	146
Figura 6.75 – Imagem termográfica da fachada sul do bloco B às 15h (a), às 21 h (b) e fotografia do mesmo trecho (c) .....	147
Figura 6.76 – Detalhe esquemático da cimalha na platibanda do Bloco A .....	148
Figura 6.77 – Detalhe esquemático de cimalha em situação ideal.....	148
Figura 6.77 – Fotografia evidenciando as manchas da platibanda do Bloco A.....	149

Figura 6.79 – Fotografia evidenciando as manchas dos ressaltos das vigas na parte inferior da fachada Norte do Bloco A.....	149
Figura 6.80 – Fotografia evidenciando as manchas da moldura da janela e no revestimento abaixo dela da fachada Norte do Bloco A .....	150
Figura 6.81 – Médias das umidades superficiais aferidas às 15h nas fachadas Norte dos Blocos A e B (sobre estrutura e alvenaria) .....	151
Figura 6.82 – Fotografia de trecho da fachada Norte do Bloco A mostrando a diferenciação de cor dos elementos.....	152
Figura 6.83 – Temperaturas superficiais máximas às 15 h em pontos do revestimento com pintura escura e clara na fachada Norte dos Blocos A e B.....	152
Figura 6.84 – Detalhe da moldura de janela do Bloco A (a) e Bloco B (b) .....	153
Figura 6.85 – Médias das umidades superficiais aferidas nos pontos sobre os detalhes arquitetônicos na fachada Norte dos Bloco A e B, durante o período chuvoso e às 15 h.....	153
Figura A.1 – Localização dos pontos escolhidos na fachada Norte do Bloco A para medição de temperatura e umidade superficial (imagens 1 a 4) .....	167
Figura A.2 – Localização dos pontos escolhidos na fachada Sul do Bloco A para medição de temperatura e umidade superficial (imagens 5 a 7) .....	168
Figura A.3 – Localização dos pontos escolhidos na fachada Leste do Bloco A para medição de temperatura e umidade superficial (8) e a mesma informação para a fachada Oeste do Bloco A (9)..	169
Figura A.4 – Localização dos pontos escolhidos na fachada Norte do Bloco B para medição de temperatura e umidade superficial (10 a 13) .....	170
Figura A.5 – Localização dos pontos escolhidos na fachada Sul do Bloco B para medição de temperatura e umidade superficial (14 a 17) .....	171
Figura A.6 – Localização dos pontos escolhidos na fachada Leste do Bloco B para medição de temperatura e umidade superficial (18) e a mesma informação para a fachada Oeste do Bloco B (19) .....	172

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores de emissividade de diferentes materiais (adaptado de SANDIN, 1996 apud JOHANSSON, 2006; BARREIRA, 2004) .....	56
Tabela 3.2 – Valores de absorvidade de diferentes materiais (CLAESSON et al. , 1984 apud JOHANSON, 2006) .....	56
Tabela 3.3 - Absortância em função de tonalidades das cores (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997) .....	64
Tabela 3.4 – Nível de degradação dos revestimentos de fachada (Gaspar e Brito, 2005).....	65
Tabela 4.1 – Descrição das amostras e protótipos produzidos (MAROPOULOU, AVDELIDIS E KOUI, 2000).....	76
Tabela 4.2 – Coeficientes de absorção de água das amostras (MAROPOULOU; AVDELIDIS; KOUI, 2000) .....	76
Tabela 6.1 – Médias das temperaturas ambientes e umidades relativas do ar nos dias e horários de medição de umidade e temperatura superficiais, durante o período seco e chuvoso .....	118
Tabela 6.2 – Médias de umidade superficial em pontos da alvenaria abaixo de detalhes arquitetônicos e abaixo de janelas (períodos seco e chuvoso) .....	127
Tabela 6.3 – Medições individuais de umidade superficial e médias realizadas na Fachada Sul do Bloco A por localização e horário durante o período seco .....	139
Tabela A.1 – Medições de umidade superficial realizada no período seco nos detalhes arquitetônicos do Bloco A .....	174
Tabela A.2 – Medições de umidade superficial realizada no período seco nos detalhes arquitetônicos do Bloco B.....	174
Tabela A.3 – Medições de umidade superficial realizadas no período seco no revestimento sobre estrutura do Bloco A .....	175
Tabela A.4 – Medições de umidade superficial realizadas no período seco no revestimento sobre estrutura do Bloco B .....	176
Tabela A.5 – Medições de umidade superficial realizadas no período seco no revestimento sobre alvenaria do Bloco A .....	177
Tabela A.6 – Medições de umidade superficial realizadas no período seco no revestimento sobre alvenaria do Bloco B.....	178
Tabela A.7 – Medições de umidade superficial realizada no período chuvoso nos detalhes arquitetônicos do Bloco A.....	179
Tabela A.8 – Medições de umidade superficial realizada no período chuvoso nos detalhes arquitetônicos do Bloco B .....	180
Tabela A.9 – Medições de umidade superficial realizadas no período chuvoso no revestimento sobre estrutura do Bloco A .....	181
Tabela A.10 – Medições de umidade superficial realizadas no período chuvoso no revestimento sobre estrutura do Bloco B .....	182
Tabela A.11 – Medições de umidade superficial realizadas no período chuvoso no revestimento sobre alvenaria do Bloco A .....	183
Tabela A.12 – Medições de umidade superficial realizadas no período chuvoso no revestimento sobre alvenaria do Bloco B.....	184

Tabela A.13 – Medições de temperatura superficial realizadas no período seco nos detalhes arquitetônicos do Bloco A .....	185
Tabela A.14 – Medições de temperatura superficial realizadas no período seco nos detalhes arquitetônicos do Bloco B .....	185
Tabela A.15 – Medições de temperatura superficial (°C) realizadas no período seco nos pontos do revestimento sobre estrutura do Bloco A .....	186
Tabela A.16 – Medições de temperatura superficial (°C) realizadas no período seco nos pontos do revestimento sobre estrutura do Bloco B .....	187
Tabela A.17 – Medições de temperatura superficial (°C) realizadas no período seco nos pontos do revestimento sobre alvenaria do Bloco A.....	188
Tabela A.18 – Medições de temperatura superficial (°C) realizadas no período seco nos pontos do revestimento sobre alvenaria do Bloco B.....	190
Tabela A.19 – Medições de temperatura superficial (°C) realizadas no período chuvoso nos detalhes arquitetônicos do Bloco A .....	191
Tabela A.20 – Medições de temperatura superficial (°C) realizadas no período chuvoso nos detalhes arquitetônicos do Bloco B .....	191
Tabela A.21 – Medições de temperatura superficial (°C) realizadas no período chuvoso no revestimento sobre estrutura do Bloco A .....	192
Tabela A.22 – Medições de temperatura superficial (°C) realizadas no período chuvoso no revestimento sobre estrutura do Bloco B .....	193
Tabela A.23 – Medições de temperatura superficial (°C) realizadas no período chuvoso no revestimento sobre alvenaria do Bloco A.....	194
Tabela A.24 – Medições de temperatura superficial (°C) realizadas no período chuvoso no revestimento sobre alvenaria do Bloco B.....	195

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A – Área superficial

ASTM - American Society for Testing and Materials

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CEGEF – Centro de Gestão do Espaço Físico da UFG

$c_{con}$  - Coeficiente de transferência de calor por convecção

$d$  - Espessura da parede

DISME – Décimo Distrito Meteorológico

$E$  - Poder emissivo de um corpo

$E_n$  - Poder emissivo

$E_s$  - Fluxo de calor

HAM – Heat, Air and Moisture

ICD – Índice de Chuva Dirigida

ICDd-m – Índice de Chuva Dirigida Direcional – Mensal

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

$I_s$  - Radiação incidente

LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações

L – Leste

$L_s$  - Limite de saturação

MEMS – Micro-Electro-Mechanical Systems

N – Norte

NE – Nordeste

NO - Noroeste

O – Oeste

P – Precipitação

$P_{água}$  - Pressão da água

$P_{ar}$  - Pressão do ar

$P_c$  - Pressão capilar

$P_p$  - Pressão parcial

$P_s$  - Pressão de saturação

$Q_c$  - Quantidade de calor (condução)

$Q_{con}$  - Quantidade de calor (convecção)

R – Resistividade térmica

$R_x$  - Raios de curvatura principal

S – Sul

Si - Silício

SE – Sudeste

SO – Sudoeste

$T$  - Temperatura do corpo

$T_a$  - Temperatura do ar

$T_i$  - Temperatura da face interior

$T_e$  - Temperatura da face exterior

$T_s$  - Temperatura da superfície

V – Velocidade do vento

Ua - Umidade absoluta

UFG – Universidade Federal de Goiás

Ur - Umidade relativa

USP – Universidade de São Paulo

$\alpha$  – Absortividade

$\theta$  - Ângulo formado entre a radiação incidente e a superfície

$\lambda$  - Condutividade térmica

$\sigma$  - Constante de Stefan-Boltzmann

$\varepsilon$  - Emissividade

$\rho$  - Refletividade

$\tau$  - Transmissividade

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>21</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
<b>1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>21</b>
<b>1.2 OBJETIVOS</b> .....	<b>24</b>
<b>1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO</b> .....	<b>25</b>
<b>1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO</b> .....	<b>26</b>
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>28</b>
<b>DEGRADAÇÃO DE FACHADAS DEVIDO À UMIDADE</b> .....	<b>28</b>
<b>2.1 NOÇÕES DE AR ÚMIDO</b> .....	<b>28</b>
<b>2.2 MECANISMOS DE FIXAÇÃO DE UMIDADE EM MEIOS POROSOS</b> .....	<b>30</b>
<b>2.3 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE UMIDADE</b> .....	<b>33</b>
<b>2.3.1 Transporte de vapor por difusão</b> .....	<b>33</b>
<b>2.3.2 Transporte de vapor por convecção</b> .....	<b>34</b>
<b>2.3.3 Transporte de água por sucção capilar</b> .....	<b>34</b>
<b>2.3.4 Transporte de água por gravidade ou ação de pressões externas</b> .....	<b>35</b>
<b>2.4 AÇÃO DA CHUVA DIRIGIDA SOBRE AS FACHADAS DE UMA EDIFICAÇÃO</b> .....	<b>36</b>
<b>2.5 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS RELACIONADAS À UMIDADE</b> .....	<b>40</b>
<b>2.5.1 Fissuração</b> .....	<b>41</b>
<b>2.5.2 Manchas de sujidade</b> .....	<b>42</b>
<b>2.5.3 Formação de microorganismos</b> .....	<b>45</b>
<b>2.5.4 Fantômes</b> .....	<b>46</b>
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>50</b>
<b>DEGRADAÇÃO DE FACHADAS DEVIDO À TEMPERATURA</b> .....	<b>50</b>
<b>3.1 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR</b> .....	<b>50</b>
<b>3.1.1 Condução</b> .....	<b>51</b>
<b>3.1.2 Convecção</b> .....	<b>52</b>
<b>3.1.3 Radiação</b> .....	<b>53</b>
<b>3.1.3.1 Radiação térmica com comprimento de onda longo</b> .....	<b>55</b>

3.1.3.2	Radiação térmica com comprimento de onda curto: radiação solar.....	56
<b>3.2</b>	<b>INSOLAÇÃO.....</b>	<b>57</b>
3.2.1	Altura Solar e Azimute.....	58
3.2.2	Cartas solares (caso de Goiânia).....	58
<b>3.3</b>	<b>MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS RELACIONADAS À TEMPERATURA</b>	<b>62</b>
3.3.1	Fissuração.....	63
3.3.2	Descolamento.....	64
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>66</b>	<b>66</b>
<b>TÉCNICAS PARA PREVENÇÃO E DIAGNÓSTICO DA DETERIORAÇÃO EM FACHADAS.....</b>	<b>66</b>	<b>66</b>
4.1	TÉCNICAS PARA PREVENÇÃO DA DETERIORAÇÃO EM FACHADAS.....	66
4.2	TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS PARA DIAGNÓSTICO DE DETERIORAÇÃO EM FACHADAS.....	68
4.2.1	Termografia infravermelha.....	69
4.2.2	Radiografia com nêutrons térmicos.....	77
4.2.3	Sistema de Nanotecnologia/Microeletromecânica (MEMS) com sensores incorporados.....	81
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>82</b>	<b>82</b>
<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>82</b>	<b>82</b>
5.1	EDIFÍCIOS ESTUDADOS.....	82
5.2	COLETA DE INFORMAÇÕES E VISTORIA PRELIMINARES.....	83
5.3	CÁLCULO DO ÍNDICE DE CHUVA DIRIGIDA.....	84
5.4	MAPEAMENTO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS.....	86
5.4.1	Fissuras.....	89
5.4.2	Manchamentos e fantômes.....	89
5.5	MAPEAMENTO DA TEMPERATURA E UMIDADE SUPERFICIAL.....	90
5.6	TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA.....	94
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>96</b>	<b>96</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>96</b>	<b>96</b>
6.1	COLETA DE INFORMAÇÕES E VISTORIA PRELIMINAR.....	96
6.2	ÍNDICE DE CHUVA DIRIGIDA DIRECIONAL – MENSAL.....	103
6.3	MAPEAMENTO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS.....	105
6.4	MEDIÇÕES DE UMIDADE E TEMPERATURA SUPERFICIAIS.....	117

<b>6.5</b>	<b>TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA.....</b>	<b>135</b>
<b>6.6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS DETALHES ARQUITETÔNICOS.....</b>	<b>147</b>
<b>6.7</b>	<b>INFLUÊNCIA DO TIPO DE TINTA E COR.....</b>	<b>150</b>
	<b>CAPÍTULO 7.....</b>	<b>154</b>
	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>154</b>
<b>7.1</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>154</b>
<b>7.2</b>	<b>SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....</b>	<b>158</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>160</b>
	<b>APÊNDICE 1.....</b>	<b>166</b>
	<b>FOTOGRAFIAS COM NUMERAÇÃO DOS PONTOS PARA COLETA DOS DADOS DE UMIDADE E TEMPERATURA SUPERFICIAIS.....</b>	<b>166</b>
	<b>APÊNDICE 2.....</b>	<b>173</b>
	<b>DADOS COLETADOS DE UMIDADE E TEMPERATURA SUPERFICIAIS.....</b>	<b>173</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Atualmente, nos cenários nacional e internacional, a indústria da construção civil vive um crescimento acelerado, tanto no que diz respeito ao aspecto econômico como tecnológico. A cada dia, novos materiais, tecnologias construtivas e métodos de gestão são absorvidos pelo mercado e cada vez mais as obras são finalizadas com menos tempo.

As estruturas de concreto, as mais utilizadas no Brasil, sofreram mudanças circunstanciais. Aumentaram-se os vãos entre pilares, os edifícios se tornaram mais altos e esbeltos, tanto pelas exigências mercadológicas como pela evolução dos métodos de cálculo. O ritmo de produção também se alterou, necessitando que os ciclos de concretagem fossem mais curtos. Em outras palavras, a desforma acontece muitas vezes prematuramente. Esta configuração favorece altas deformações da estrutura incompatíveis com a alvenaria de vedação e, normalmente, é o revestimento que sofre com o aparecimento de defeitos. Ressalta-se que a norma brasileira de projeto de estruturas de concreto (ABNT NBR 6118, 2007) permite estas tais deformações.

Além do cenário supracitado, outro fator que contribui é o nível de conhecimento das construtoras, muitas vezes baixo, sobre o comportamento dos revestimentos de fachada. Conforme Ceotto, Banduk e Nakakura (2005), as empresas possuem deficiências técnicas e insensibilidade com a necessidade de desenvolvimento e de utilização de projetos específicos nesse serviço. Existe hoje uma tendência que a fachada é um produto decorativo e não de engenharia, elaborando um planejamento e controle de qualidade incompatível com a complexidade do problema. Há também pouca preocupação com a capacitação das equipes de produção e as argamassas são preparadas com poucos critérios técnicos e, na maioria das vezes, definidos pelos próprios operários.

A falta de conhecimento dos profissionais da cadeia produtiva também acarreta falhas. O projeto de arquitetura é fortemente responsável pela reincidência de problemas, uma vez que partem dele as soluções que não trazem bons resultados na prática. Muitas vezes, esse projeto possui inclinação somente para a questão estética da fachada, se esquecendo de implicações construtivas e tecnológicas envolvidas. A qualidade de projeto é essencial para o bom desempenho do empreendimento. Porém, no caso dos revestimentos de fachada, que no Brasil são predominantemente de argamassa e cerâmico, os projetistas nem sempre estão preparados em termos de conhecimento de técnicas construtivas para a proposta de soluções (CEOTTO; BANDUK; NAKAKURA, 2005).

Além de todos estes problemas apontados que diz respeito à cadeia produtiva, a interação dos revestimentos de fachada com fenômenos climáticos, tema do presente estudo, deve ser considerada para a garantia de sua durabilidade. Atualmente, pesquisas vêm sendo realizadas com a finalidade de delinear tais fatores que desencadeiam e aceleram os fenômenos de deterioração. No Brasil, Petrucci (2000), Resende, (2001), Vieira (2005) e Melo Jr. (2010) são alguns pesquisadores que abordam a importância deste estudo para a obtenção de subsídios que possam direcionar a prevenção de manifestações patológicas.

Ressalta-se que o edifício deve manter a capacidade funcional durante a vida útil prevista em projeto (VUP) sem sinais de desgaste, desde que realizadas as intervenções periódicas de manutenção e conservação (ABNT NBR 15575-1, 2012). Em relação aos revestimentos de fachada (aderidos ou não aderidos), inclusive molduras e demais componentes decorativos e sobre muros, a norma estabelece VUP mínima como  $\geq 20$  anos e superior como  $\geq 30$  anos.

As manifestações patológicas resultantes da influência dos fenômenos atmosféricos vão desde a perda da estética das fachadas, passando por fissuras, infiltrações e chegando até os casos nocivos à saúde do homem, como o crescimento de microorganismos.

Chuva, vento, umidade, condensação, material particulado em suspensão no ar são exemplos de elementos da natureza e do processo de urbanização que, por sua agressividade, colocam os edifícios em situações desfavoráveis, reduzindo a durabilidade das construções em virtude da falta de compreensão sistêmica destes fatores no ato de projetar.

A precipitação de chuva é uma das principais fontes de umidade e tem enfoque preocupante uma vez que age sob as leis da natureza, não sendo passíveis de eliminação. De acordo com

Choi (1999), a deterioração causada pela água da chuva nas edificações tem sido reconhecida como principal problema de manutenção.

A complexidade do fenômeno e as manifestações patológicas causadas principalmente pela umidade em excesso aumentam a dificuldade de reparação e alguns países demonstram preocupação, no sentido de estabelecer mecanismos de mensurar os efeitos da ação da água da chuva por meio de equações empíricas, medições, ensaios e simulações do fenômeno (PETRUCCI, 2000).

Gaspar e Brito (2005) identificaram que 25% dos problemas de deterioração de fachadas de edifícios revestidos com argamassa de base cimentícia e acabamento decorativo em pintura, materiais usuais no Brasil, foram decorrentes da chuva dirigida e do escoamento superficial de água na fachada.

Outra manifestação patológica muito comum nas cidades brasileiras são as manchas em fachadas. Petrucci (2000) atribui a deterioração por sujidade à geometria dos elementos presentes nas fachadas, procurando apresentar as principais características arquitetônicas e construtivas indutoras do seu surgimento. Esta autora enfoca que, para o surgimento de degradação, ou envelhecimento ocorra, faz-se necessária a presença de: fonte emissora de poluente, umidade, vento e chuva, que interagirão com os paramentos alterando a intenção estética do edifício. Este assunto também possui importante enfoque na área de manutenção, uma vez que representa parcela significativa de gastos.

Assim, a compreensão de elementos climáticos formadores do clima da região onde o edifício está localizado é uma importante ferramenta para a prevenção de problemas e mudanças na aparência das fachadas. O entendimento dos efeitos que a geometria e os arranjos das partes envolvidas causam numa fachada podem proporcionar melhorias diante dos aspectos climáticos (chuva, vento, umidade do ar e temperatura) e urbanos (poeira e poluição) e contribuir positivamente com a durabilidade da edificação.

Cabe ressaltar o papel extremamente relevante dos revestimentos para as edificações, principalmente os externos de fachada, no que tange à sua contribuição ao conforto térmico e acústico e à sua proteção contra as intempéries (auxiliando na estanqueidade à água dos paramentos externos). É preciso, portanto, que se desenvolvam revestimentos que apresentem

maior desempenho, duráveis e com custo adequado à realidade nacional, garantindo a sustentabilidade deste subsistema da construção civil.

Para tanto, é necessário reverter a carência de bibliografia que subsidie os profissionais da área de projeto a melhor localizar uma edificação frente aos pontos cardeais, bem como a especificar materiais e criar formas arquitetônicas das fachadas que visem sua durabilidade. Melo Jr. (2010) é um dos autores pioneiros nesta linha. Ele verificou que as orientações cardeais Norte, Sul, Leste e Oeste (N, S, L e O) influenciam a deterioração das fachadas de Goiânia, sendo que algumas delas tendem a possuir mais manifestações patológicas e tipos específicos delas. O pesquisador realizou estudos de caso em edificações residenciais multipavimentos, quantificando as degradações e medindo a umidade superficial em pontos específicos de um edifício.

Neste sentido, o presente trabalho presta-se a continuar a temática de Melo Jr. (2010), dentro do projeto CAPES-Pró-Engenharias, se dedicando ao estudo da “Influência dos fenômenos climáticos na durabilidade das fachadas”. Fundamenta-se basicamente em um estudo de caso que aplica técnicas de medição e diagnóstico dos fatores que acarretam as degradações, bem como de quantificação das mesmas.

Desta forma, o projetista de arquitetura terá acesso a dados que explicam porque determinadas fachadas são mais solicitadas frente à ação dos fatores climáticos e o motivo pelos quais determinados materiais ou detalhes especificados não são adequados.

Por tudo, frisa-se que é aceitável a deterioração natural dos materiais e da edificação. Porém, o envelhecimento precoce dos edifícios por quaisquer alterações de suas partes de maneira localizada e excessiva não é admissível.

## **1.2 OBJETIVOS**

O objetivo geral desta pesquisa é compreender a influência dos fatores climáticos em edifícios na cidade de Goiânia os quais interferem na durabilidade dos revestimentos de fachadas, especificamente os revestimentos de argamassa com acabamento decorativo em pintura.

Como objetivos específicos tem-se:

- Relacionar as manifestações patológicas existentes nas fachadas dos edifícios em estudo com as de variações de temperatura das superfícies dos paramentos e de umidade superficial proveniente da precipitação e da condensação;
- Verificar a presença de fachadas mais susceptíveis a deterioração pela variação de temperatura e umidade;
- Sistematizar a metodologia para inspeções de fachadas quanto ao manchamento e fissuração de revestimentos de argamassa com acabamento decorativo em pintura;
- Verificar a aplicabilidade da termografia na avaliação de manifestações patológicas relacionadas à umidade e temperatura em revestimentos de fachadas, bem como identificar o horário do dia e o período do ano mais adequados para as inspeções com o termovisor;
- Buscar correlações entre a umidade superficial com os índices de chuva dirigida, bem como entre a temperatura superficial e a insolação, no contexto das manifestações patológicas das fachadas;
- Analisar a influência dos detalhes arquitetônicos e construtivos nas condições de umidade das superfícies das fachadas, bem como nas manifestações patológicas provenientes desta umidade (manchas de sujidade).

### **1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO**

O primeiro capítulo apresenta a introdução ao tema, abordando o contexto geral, justificativa da importância, o objetivo geral e os específicos, e estruturação do trabalho e as delimitações da pesquisa.

No Capítulo 2 inicia-se a revisão bibliográfica que abrange a degradação de fachadas devido à umidade. Aborda-se as noções de ar úmido, os mecanismos de fixação de umidade em meios porosos, mecanismos de transferência de umidade (difusão, convecção, sucção capilar, gravidade ou ação de pressões externas), a ação da chuva dirigida sobre fachadas de uma edificação e as manifestações patológicas relacionadas à umidade, quais sejam a fissuração, as manchas de sujidade, formação de micro-organismos e os *fantômes*.

O Capítulo 3 continua a revisão bibliográfica, apresentando a degradação de fachadas devido à temperatura, descrevendo os mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e

radiação). Abordou-se também utilização da carta solar para a verificação dos horários em que as fachadas de uma edificação recebem a insolação nos diversos períodos do ano. As manifestações patológicas relacionadas à temperatura (fissuração e descolamento) foram relatadas ao final deste capítulo.

A terceira parte da revisão bibliográfica, no Capítulo 4, abordou as técnicas para prevenção e diagnóstico da deterioração em fachadas, apresentando a termografia infravermelha, a radiografia com nêutrons térmicos e o sistema de nanotecnologia/microeletrônica (MEMS) com sensores incorporados.

O quinto capítulo apresenta a metodologia aplicada para: coleta de informações preliminares, vistoria com inspeção e registro fotográfico das fachadas dos edifícios, mapeamento das manifestações patológicas, medições de umidade e temperatura superficiais, utilização da termografia infravermelha e o cálculo do índice de chuva dirigida direcional mensal.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos e as discussões.

O sétimo capítulo traz as considerações finais da presente pesquisa, apresentando as conclusões, assim como as sugestões para trabalhos futuros.

## **1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO**

O presente trabalho limita-se à compreensão do comportamento das fachadas de edifícios diante dos elementos do clima (vento, chuva, condensação, umidade e temperatura) e das fachadas (detalhes arquitetônicos e construtivos). De forma geral, pelas especificidades do clima de cada região e das características físicas das edificações, acredita-se que as fachadas de um mesmo edifício tendem a reagir de maneira diferenciada, isto é, apresentam níveis distintos de deterioração. Assim, pretende-se estudar, para as edificações com revestimento em argamassa e pintura na cidade de Goiânia, as seguintes manifestações patológicas: manchas de sujidade, fissuras e *fantômes*.

Não foi foco do trabalho o estudo das manifestações patológicas de descolamento de revestimentos, eflorescência, saponificação e outras.

Também não foi objetivo do trabalho analisar os materiais constituintes, o método executivo e a espessura do revestimento dos edifícios em estudo.

Ressaltam-se as especificidades quando o trabalho se trata de um estudo de caso, uma vez que a localização geográfica e as características dos edifícios interferem nos resultados obtidos.

## CAPÍTULO 2

### DEGRADAÇÃO DE FACHADAS DEVIDO À UMIDADE

As propriedades higrotérmicas estão relacionadas com a transferência de calor e umidade, sendo importantes para a caracterização do comportamento dos materiais de construção no que tange à durabilidade, à estanqueidade, à degradação e ao desempenho térmico. Tratando-se do revestimento de argamassa, devido à sua estrutura porosa, quando exposta às condições climáticas é capaz de fixar e transferir umidade tanto na fase líquida como na fase de vapor. A umidade na forma de vapor é fixada nos poros da argamassa através dos processos de adsorção física e condensação capilar. Em condições isotérmicas, a água fixada é transportada para o interior do material através de mecanismos que dependem principalmente das dimensões do poro e da umidade relativa. Na fase líquida a água é transferida para o interior do material predominantemente pelo processo denominado de capilaridade, situação que ocorre, por exemplo, quando um material está exposto a prolongados períodos de chuva (SANTOS, 2006). Por esse motivo, neste capítulo, foram discutidas noções básicas de ar úmido, os mecanismos de fixação e transporte de umidade, bem como as principais manifestações patológicas advindas do excesso de água livre nas edificações.

#### 2.1 NOÇÕES DE AR ÚMIDO

O ar atmosférico é uma mistura de diferentes gases e vapor de água. O peso do vapor d'água contido em cada  $m^3$  de mistura recebe o nome de umidade absoluta do ar úmido ( $U_a$ ). A quantidade de vapor d'água que o ar pode conter não é ilimitada, mas depende da pressão de saturação do vapor ( $P_s$ ), a qual é dada em função da temperatura da mistura. Quando o ar contém o peso máximo de umidade compatível com a sua temperatura, diz-se que está saturado. Em um ar saturado de umidade, o vapor d'água encontra-se no limite de saturação ( $L_s$ ). Qualquer nova quantidade de umidade adicionada a um ar saturado aparece no estado

líquido misturada ao vapor seco, o que constitui as nuvens, a neblina e a própria chuva. A umidade absoluta de um ar saturado corresponde ao peso específico do vapor saturado seco à temperatura da mistura. A relação entre o peso do vapor d'água contida por m<sup>3</sup> de ar úmido e o peso de vapor d'água que o ar conteria caso estivesse saturado recebe o nome de umidade relativa do ar ( $U_r$ ), conforme a equação 2.1 (COSTA, 1991).

$$U_r = \frac{U_a}{L_s} \times 100 = \frac{P_p}{P_s} \times 100 \quad (\%) \quad (2.1)$$

Onde:

$U_r$  = umidade relative (%);

$U_a$  = umidade absoluta (g/m<sup>3</sup>);

$L_s$  = limite de saturação (g/m<sup>3</sup>);

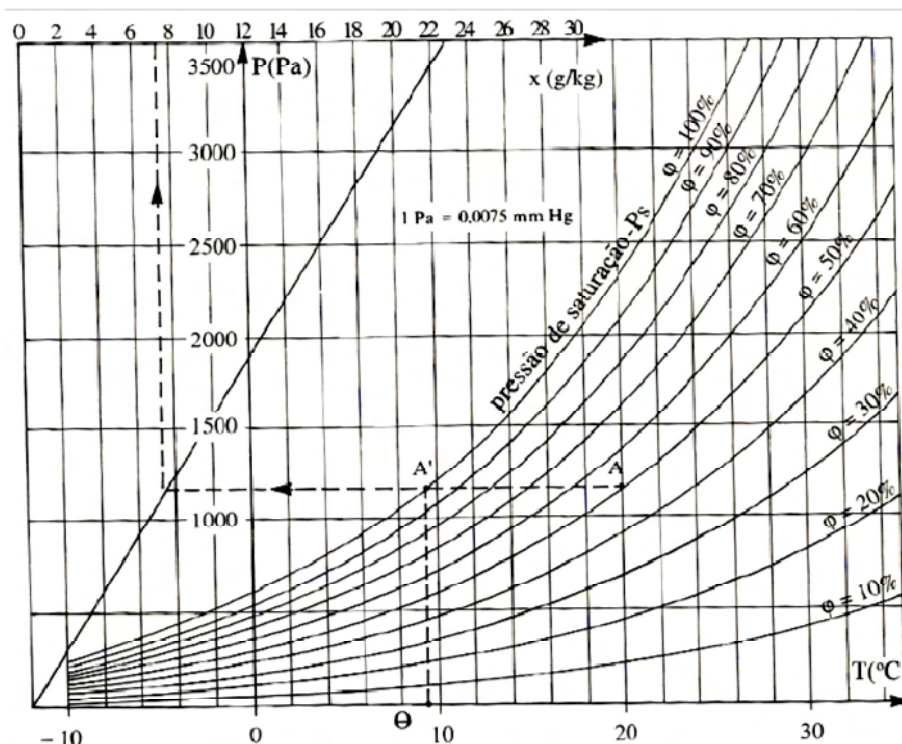
$P_p$  = pressão parcial (Pa);

$P_s$  = pressão de saturação (Pa).

O diagrama psicométrico exprime relações entre temperatura ambiente, umidades absolutas e relativas, assim como a pressão de vapor em mm de Hg, conforme Figura 2.1. Infere-se que quanto maior a temperatura do ar, maior será a sua capacidade de armazenamento de vapor de água (REIS, 2006).

Segundo Costa (1991), a linha de porcentagem de umidade igual a 100% é a linha de saturação, estando sobre ela localizados os pontos de orvalho, ou seja, as condições do ar para as quais o vapor d'água começa a condensar-se. Para a melhor compreensão, utiliza-se um exemplo que pode ser observado na Figura 2.1. Sendo a temperatura ambiente num determinado compartimento de 20°C, em que há uma umidade relativa  $U_r = 50\%$ , (ponto A), verifica-se que esta situação corresponde a uma umidade absoluta de aproximadamente 7,5 g de vapor por kg de ar seco. Se este ambiente arrefece, chegando, por exemplo, a uma temperatura de 9°C, a umidade relativa é agora de 100%, embora com a mesma quantidade de vapor (REIS, 2006), este é o ponto de orvalho.

Figura 2.1 – Diagrama Psicométrico (REIS, 2006)



Os mecanismos que regem o transporte de umidade em materiais de construção são complexos e atuam simultaneamente. Na fase vapor, tem-se a difusão e os movimentos convectivos no interior dos poros condicionam o transporte. Na fase líquida, a capilaridade, a gravidade e o efeito dos gradientes de pressão externa comandam a transferência de umidade. Sintetizando, do ponto de vista físico pode-se considerar que há três mecanismos fundamentais de fixação de umidade: adsorção, condensação e capilaridade (SANTOS, 2006). A seguir são apresentados os mecanismos de fixação e transporte de umidade nos materiais de construção.

## 2.2 MECANISMOS DE FIXAÇÃO DE UMIDADE EM MEIOS POROSOS

De acordo com Resende (2000), os mecanismos de fixação de umidade estão associados ao tipo de porosidade do material. Alguns materiais apresentam espaços vazios pelo seu interior, podendo ser de forma homogênea ou não. A classificação da porosidade é dada como aberta ou fechada. Na primeira, os poros permitem o acesso de moléculas de água e os canais devem

ser maiores que  $0,28 \times 10^{-9}$  m, para que haja deslocamento de umidade. A geometria dos canais também deve ser de maneira a interligar os poros. Com relação à porosidade fechada, existem canais capilares nos materiais não acessíveis às moléculas de água, uma vez que seus diâmetros são inferiores a  $0,28 \times 10^{-9}$  m e as redes de canais não são interligadas.

A maioria dos materiais de construção possui porosidade do tipo aberta, permitindo a fixação de umidade em seus poros, resultado da ação conjunta de três mecanismos físicos:

### **Adsorção:**

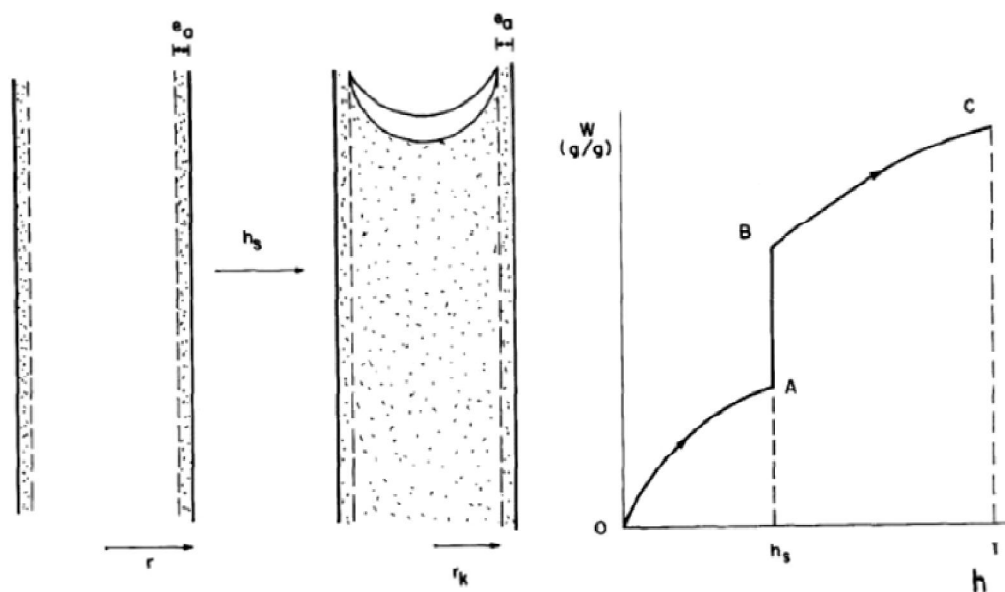
O fenômeno de adsorção abordado na presente pesquisa consiste no processo físico de ligação ou retenção de moléculas na superfície de partículas sólidas regido pelas forças de Van der Waals. Como efeito macroscópico desta adsorção, tem-se que um material poroso varia o seu conteúdo de umidade em função de uma variação da umidade relativa. Quando há um aumento do conteúdo de umidade do material trata-se do fenômeno de adsorção, quando ocorre a diminuição trata-se do fenômeno de dessorção (SANTOS, 2006; SANTOS; ROCHA; CHERIAF, 2007);

### **Condensação:**

De acordo com Santos (2006), existem dois modos de condensação da água que são: água adsorvida e água capilar. A água adsorvida é composta por camadas de moléculas que condensam sobre a superfície dos poros. Sua quantidade no equilíbrio é função da superfície específica do meio poroso, da afinidade entre o vapor de água e a matriz sólida e as condições higrotérmicas reinantes. A água capilar representa uma fase contínua de líquido que preenche totalmente certos poros do material. Existe uma descontinuidade de pressão na interface da curva que separa a água capilar da fase sólida.

Para explicar esta sucessão dos dois modos de condensação: por capilaridade e por adsorção, considera-se um poro isolado cilíndrico e com perfeita molhabilidade conforme esquematizado na Figura 2.2. Nesta figura  $r$  é o raio do poro,  $r_k$  é o raio do núcleo do centro do poro considerando a camada adsorvida,  $e_a$  é a espessura da camada adsorvida,  $W$  é o conteúdo de umidade mássico,  $h$  é a umidade relativa e  $h_s$  é a umidade limite na qual ocorre a condensação capilar.

Figura 2.2 – Sucessão de modos de condensação em um poro isolado (SANTOS, 2006)



Na Figura 2.2 tem-se que partindo-se da umidade ( $h$ ) nula (ponto O) e aumentando a progressivamente, os fenômenos ocorrerão como segue:

- Do aumento da umidade de O até A, há um aumento da camada adsorvida;
- Em A, a espessura da camada adsorvida ( $e_a$ ) é tal, que o núcleo no centro do poro de raio  $r_k$  é capaz de conter um menisco esférico, ou seja, ocorre a condensação capilar;
- De B até C ocorre o aplainamento do menisco;
- Em C, o menisco é plano e o poro está saturado ( $h=1$ ).

### Capilaridade:

Propriedade dos materiais porosos de absorverem e transportarem água através de sua rede de capilares. O fenômeno da capilaridade gera interfaces curvas entre o fluido (água) e o ar contido no interior dos poros. Na interface líquido-gás é estabelecido um gradiente de pressões designado por pressão capilar, que é função da tensão superficial líquido-gás ( $\sigma$ ), dos raios de curvatura principal ( $R_x$ ) e do ângulo de molhamento ( $\alpha$ ), conforme apresentado na equação 2.2. A capilaridade é diretamente proporcional ao cosseno do ângulo formado entre o diâmetro do poro e sua parede (Figura 2.3), e ao mesmo tempo inversamente proporcional ao raio do poro (SANTOS, 2006).

$$P_c = P_{ar} - P_{água} = \sigma \times \cos \alpha \times \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.2)$$

Onde:

$P_c$  = pressão capilar (N/m<sup>2</sup>);

$P_{ar}$  = pressão do ar (N/m<sup>2</sup>);

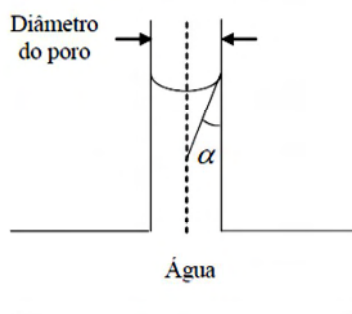
$P_{água}$  = pressão da água (N/m<sup>2</sup>);

$\sigma$  = tensão superficial líquido-gás (N/m);

$\alpha$  = ângulo de molhamento;

$R_x$  = raios de curvatura principal (m).

Figura 2.3 – Esquema do ângulo de molhamento (SANTOS; ROCHA; CHERIAF, 2007)



## 2.3 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE UMIDADE

O fluxo de umidade nos materiais é possível na fase vapor por meio da difusão e convecção ou na fase líquida por meio da gravidade, capilaridade e forças do vento. Frequentemente, o transporte de água ocorre simultaneamente em ambas as fases (FREITAS; ABRANTES; CRAUSSET, 1996; THOMAZ, 2009). A seguir serão discutidos tais mecanismos.

### 2.3.1 Transporte de vapor por difusão

Difusão de umidade é um processo em que as moléculas de água reduzem diferenças de concentração, visando ao restabelecimento do equilíbrio químico do meio. Uma vez que o fluxo de água não é contínuo, a 2ª Lei de Fick modela o fenômeno (equação 2.3); a difusão é proporcional à variação da concentração, a qual diminui com o passar do tempo, ao

coeficiente de difusividade do material e ao inverso da profundidade considerada (FREITAS; ABRANTES; CRAUSSET, 1996; MENDES, 1997; JOHANSSON, 2006):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.3)$$

Onde:

$D$ = coeficiente de difusão, também chamado de difusividade ( $m^2/s$ );

$\partial c/\partial x$ = gradiente de concentração na profundidade;

$\partial c/\partial t$ = variação da concentração com o tempo;

$c$ = concentração de íons na solução na profundidade  $x$  e no tempo  $t$  ( $kg/m^3$  ou  $moles/m^3$ );

$x$ = profundidade considerada (m).

### **2.3.2 Transporte de vapor por convecção**

O fluxo de umidade por meio da convecção envolve o vapor de água ser transportado com o fluxo de ar. As diferenças de pressão entre o ambiente interno e externo do edifício causadas pelo vento, forças térmicas e sistemas de ventilação causam fluxo de ar e vapor através do edifício. A extensão da convecção é determinada pela diferença total de pressão, o teor de umidade e a espessura do elemento da construção. Se uma corrente de ar flui de temperaturas elevadas para mais baixas, o ar será resfriado, o que pode acarretar condensação e acúmulo de umidade em uma parte do paramento. Neste processo, a convecção e a difusão agem normalmente em conjunto e isso aumenta o risco de condensação. Se uma corrente de ar flui de uma menor temperatura para uma maior, o ar será aquecido e a umidade relativa irá cair. Este tipo de convecção leva à dessecação (MENDES, 1997; JOHANSSON, 2006).

### **2.3.3 Transporte de água por sucção capilar**

Rezende (1990) relata que o transporte de água por capilaridade é a conseqüência das forças de sucção dos materiais hidrófilos. Tais forças de atração entre as moléculas de água e as paredes dos poros são grandes e são chamadas de pressões capilares, resultado da ação combinada da tensão superficial da água e forças de adsorção das moléculas pelos poros. Tal mecanismo foi apresentado no item 2.3.

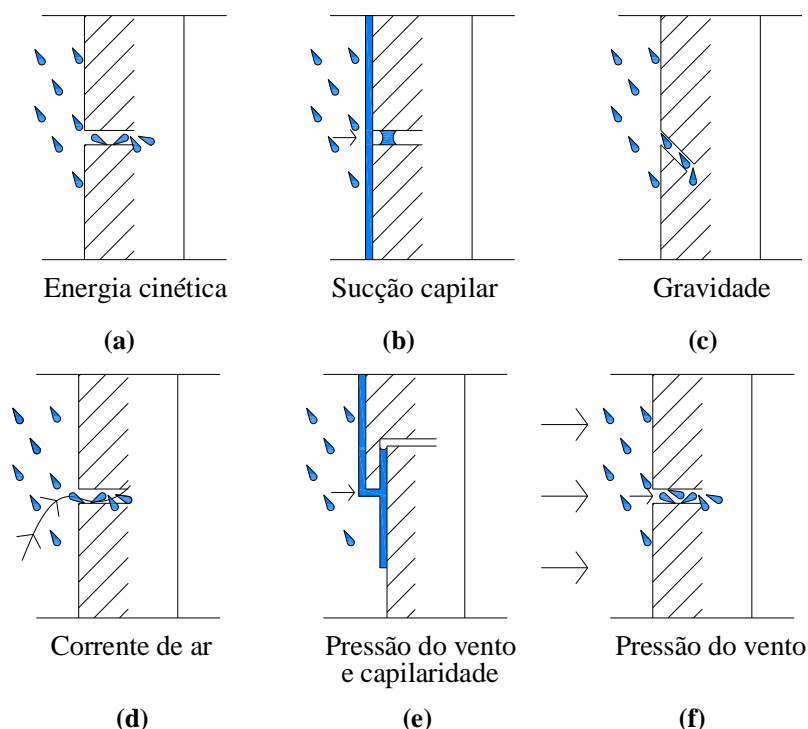
### **2.3.4 Transporte de água por gravidade ou ação de pressões externas**

Bauer (1987) relata que em muitos casos a penetração de água dá-se pela presença de fissuras. A presença de água e a existência de fissuras não são suficientes para a ocorrência de infiltração, sendo necessária a presença de forças para induzir à passagem. Deste modo, aponta a pressão do vento - além da energia cinética, da sucção capilar, da gravidade e da diferença de pressão - como a componente essencial para a ocorrência do fenômeno (GARDEN, 1963). A partir deste mesmo pensamento Grimm (1982) inclui a pressão do vento como sendo aspecto indutor para ocorrência das infiltrações.

Sob a influência do vento as gotas vão de encontro à fachada com velocidade considerável e pela energia cinética penetram nas aberturas presentes na fachada, conforme ilustrado na Figura 2.4 (a). A sucção capilar só apresentará influência sob superfícies porosas cobertas de lâminas de água resultantes do escoamento, como ilustrado na Figura 2.4 (b). Quando um material torna-se saturado, a sucção aproxima-se de zero. A pressão de ar diferencial pode fazer com que esta água saia dos materiais saturados para o exterior, dependendo dos tamanhos dos capilares.

A ação da gravidade, atuando sobre a água em superfícies de paredes ou em grandes capilares, atuará induzindo a passagem para baixo e para dentro da edificação, como visto na Figura 2.4 (c). A água também pode ser pressionada a passar por aberturas presentes nas fachadas por fortes correntes de ar e causar a penetração, como ilustrado na Figura 2.3 (d). A umidade pode ser elevada a distâncias consideráveis e conduzida para dentro de paredes quando a pressão de ar for adicionada à sucção capilar, Figura 2.3 (e). Assim, observa-se que vários são os aspectos que irão influir na entrada de umidade no edifício, mas a velocidade de vento demonstra-se uma componente sempre relevante.

Figura 2.4 - Fatores que influenciam a penetração de umidade pelas chuvas  
(GARDEN, 1963)



Além das fissuras, outros pontos que são susceptíveis a penetração de água são aqueles nas juntas de assentamento dos blocos da alvenaria e em juntas de movimentação mal vedadas.

## 2.4 AÇÃO DA CHUVA DIRIGIDA SOBRE AS FACHADAS DE UMA EDIFICAÇÃO

Straube (2002) afirma que o efeito da chuva sobre as edificações tem sido um tema estimulante para estudos e pesquisas com o intuito de garantir a durabilidade, uma vez que a água em excesso é o agente principal da degradação de elementos das edificações, especialmente das fachadas que sofrem a ação direta da chuva.

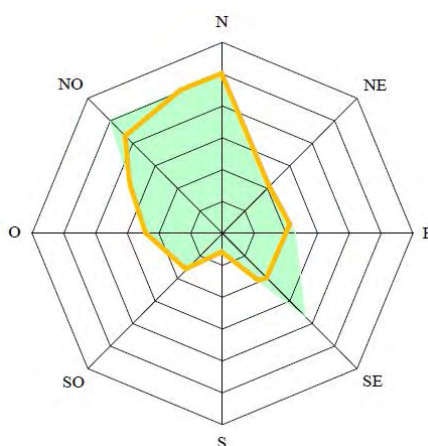
Sendo somente uma das fontes de umidade para a edificação, pode-se compreender a gravidade do problema da chuva dirigida quando se observa um levantamento realizado por Gaspar e Brito (2005) em 150 edificações em Portugal, o qual apontou que 25% dos problemas relacionados à deterioração das fachadas com revestimentos à base de cimento são devidos à chuva dirigida.

As fachadas de uma mesma edificação estão sujeitas a diferentes porções de umidade proveniente da chuva. Tal fato se deve a incidência de chuva carregada por um vento dominante. Desta forma, as fachadas voltadas aos ventos dominantes de uma determinada região receberão maior quantidade de chuva.

Melo Jr. (2010) realizou uma pesquisa cujo objetivo foi verificar a influência da chuva dirigida na durabilidade dos revestimentos de fachada dos edifícios da cidade de Goiânia. Para tanto, baseou-se em método semi-empírico para calcular o índice de chuva dirigida (ICD), que se fundamenta nas médias da velocidade do vento e do total de precipitação (BLOCKEN; CARMELIET, 2004). O cálculo deste índice pode ser apresentado de diversas formas: ICD anual, ICD mensal, ICD sazonal e ICD direcional. O ICD direcional permite a criação de gráficos tipo rosetas que facilitam a compreensão e análise da direção no que diz respeito à exposição da fachada (GIONGO, 2007).

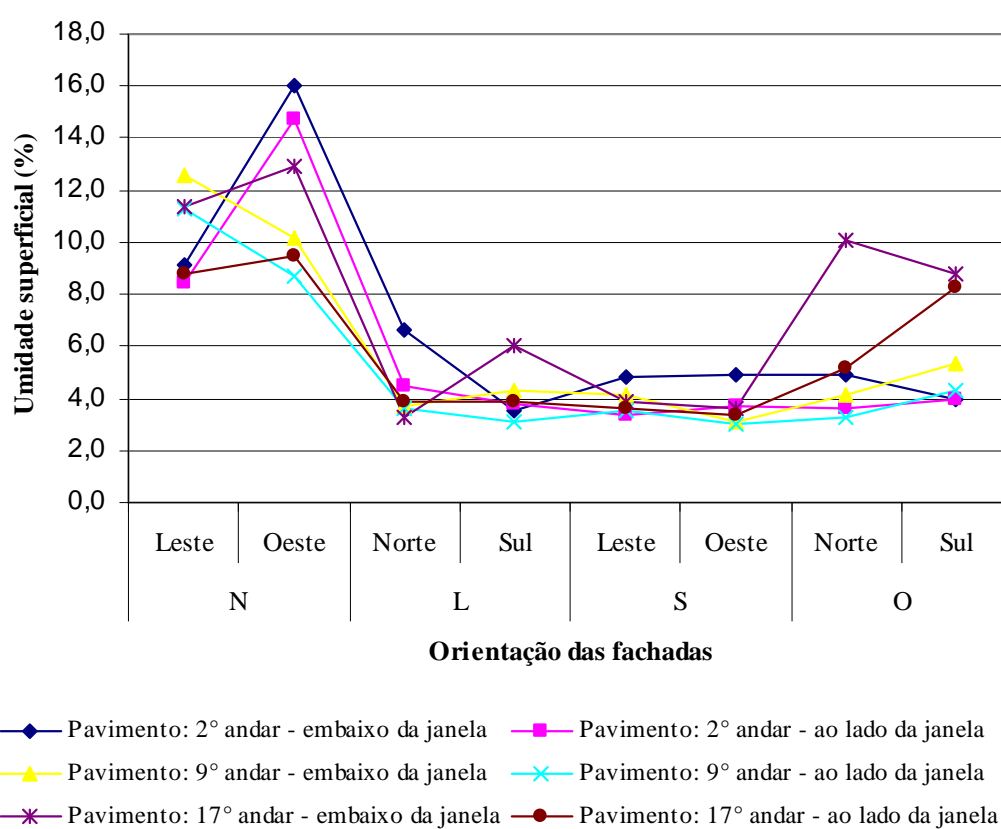
Os resultados de Melo Jr. (2010) demonstraram que as fachadas de edifícios da cidade de Goiânia estão expostas a níveis diferentes de umidade oriunda da chuva devida à predominância dos ventos Norte (N) e Noroeste (NO) no período chuvoso. O autor obteve informações de uma estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) dos anos de 2002 a 2008. A Figura 2.5 representa a intersecção da média do índice de chuva dirigida direcional mensal para os meses de janeiro desses anos com os valores de umidade superficial das fachadas medidos no mesmo mês, também obtidos pelo autor em uma edificação multipavimentos. Verifica-se que os dados possuem uma boa correlação.

Figura 2.5 - Índice de chuva dirigida direcional mensal ( $m^2/s$ ) para Goiânia no mês de janeiro no período de 2002 a 2008 (MELO JR.; CARASEK, 2011)



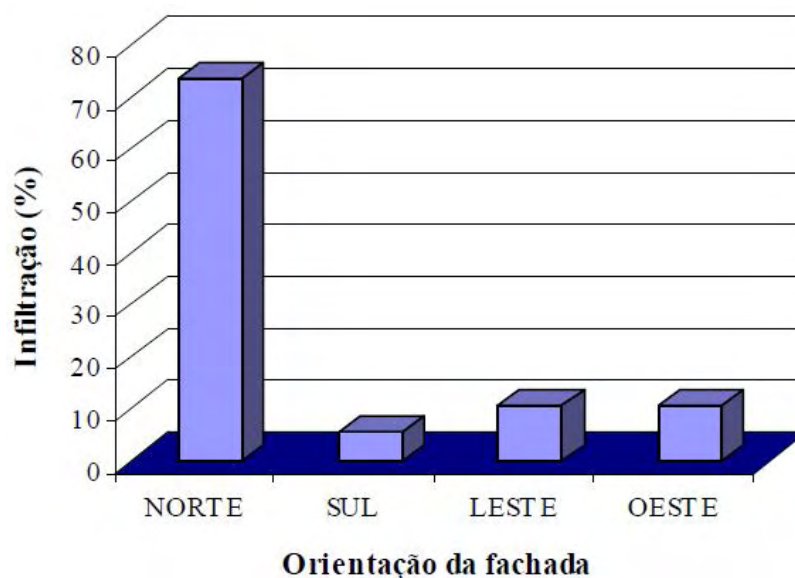
As medidas de umidade superficial foram obtidas em diferentes pontos, pavimentos e orientações cardeais. Os resultados confirmaram a tendência de a fachada Norte receber maior umidade, conforme Figura 2.6. Outro fato observado é que a altura da edificação também influenciou as medições. Constatou-se que o último pavimento teve os maiores valores percentuais de umidade, assim como as superfícies logo abaixo das janelas em relação às laterais também apresentaram umidade superior.

Figura 2.6 – Umidade superficial em função da orientação da fachada medida em diversos pavimentos (MELO JR., 2010)



Melo Júnior (2010) levantou os dados sobre infiltrações em fachadas em decorrência da chuva, utilizando informações das assistências técnicas de nove edificações multipavimentos de cinco construtoras da cidade de Goiânia. A Figura 2.7 mostra o percentual de infiltrações em relação às orientações N, S, L e O. Observa-se que a predominância dos casos ocorreu nas fachadas voltadas para N, remetendo aos dados anteriores de chuva dirigida e umidade superficial.

Figura 2.7 – Percentuais de infiltrações nas orientações de fachada de edificações na cidade de Goiânia (MELO JR., 2010)

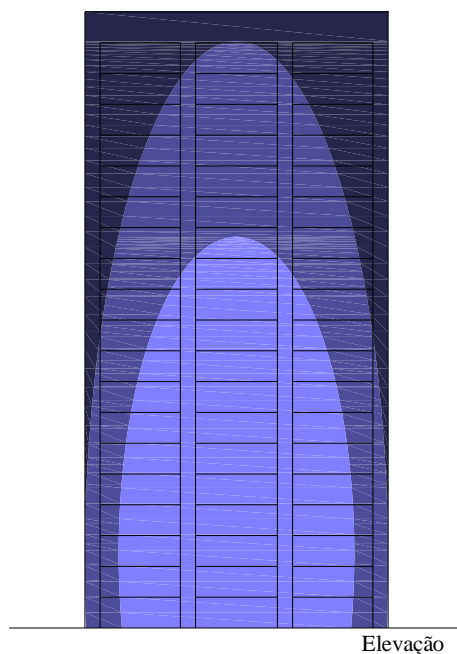


Além da orientação cardinal a localidade do ponto no plano da fachada, há que considerar a localização do edifício na cidade, podendo haver barreiras à incidência de chuva, como outros edifícios e vegetação, podendo protegê-lo. Se for considerada uma edificação livre de obstáculos, a chuva golpeia principalmente a parte superior e os cantos extremos devido à ação do vento (VALLEJO, 1990).

Outro fato importante de ser ressaltado é o padrão de umedecimento característico em forma de parábola, comprovado por pesquisas experimentais e de campo, utilizando, no primeiro caso, modelos reduzidos de edificações e túneis de vento e, no segundo caso, observações em edifícios reais (COUPER<sup>1</sup>, 1972 *apud* PETRUCCI, 2000). A Figura 2.8 representa o padrão de umedecimento no momento de uma chuva. As partes mais escuras mostram os pontos que recebem maior quantidade de água da chuva, enquanto que, nas mais claras, haverá o umedecimento pelo escoamento da água pelas superfícies já saturadas.

<sup>1</sup> COUPER, R. R. Drainage from vertical surfaces. In: WIND-DRIVEN RAIN AND THE MULTI STOREY BUILDING, 1972, Austrália. Division of Building Research CSIRO.

Figura 2.8 – Parábola formada pela chuva (COUPER, 1972 *apud* PETRUCCI, 2000)



## **2.5 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS RELACIONADAS À UMIDADE**

Dentre os problemas relacionados com a presença de água em abundância nas fachadas estão o manchamento, descoloração, fissuração (provocada pela variação dimensional), eflorescência, criptoflorescência, lixiviação, proliferação de microorganismos, redução da resistência térmica, entre outros. Carasek (2010) ressalta que a distinção dos processos deve ser encarada como didática, uma vez que na prática, acontecem ao mesmo tempo, devendo se considerar a interação entre eles.

Um aspecto importante de se ressaltar diz respeito ao aumento da transmissão de calor no revestimento com acúmulo de umidade, frequentemente em locais como platibandas e detalhes arquitetônicos. Chand e Bargava (2002) abordam a perda de resistência térmica, tornando o revestimento mais susceptível ao fluxo de calor, podendo ocasionar fenômenos desencadeadores de outras patologias.

Os processos de deterioração evoluem com o tempo, uma vez que os diversos ataques que o revestimento sofre os tornam mais porosos e permeáveis. Outro fator que aumenta a

susceptibilidade é a falta ou ineficiência de manutenção, bem como a dificuldade de acesso em certos pontos das edificações.

Dentre as formas de acesso da água às edificações estão a umidade do solo, da chuva, da condensação e de componentes hidráulicos defeituosos. Neste trabalho, serão tratados os casos de umidade proveniente da chuva e da condensação, uma vez que são os tipos relacionados aos fatores climáticos.

Além da chuva e da condensação, este item fez referência ao vento e material particulado em suspensão no ar, elementos climáticos ou advindos dos processos de urbanização que colocam os edifícios em situações desfavoráveis, resultando em manifestações patológicas, quais sejam, fissuração, manchas de sujidade, formação de microorganismos e *fantômes*.

### **2.5.1 Fissuração**

As fissuras em edificações são manifestações patológicas decorrentes dos mecanismos de alívio de tensões pelas alterações dimensionais, deslocamentos e variações de volume ao longo do período em serviço, podendo ser decorrentes de processos físico-mecânicos ou químicos (MEDEIROS; FRANCO, 1999; CARASEK, 2010).

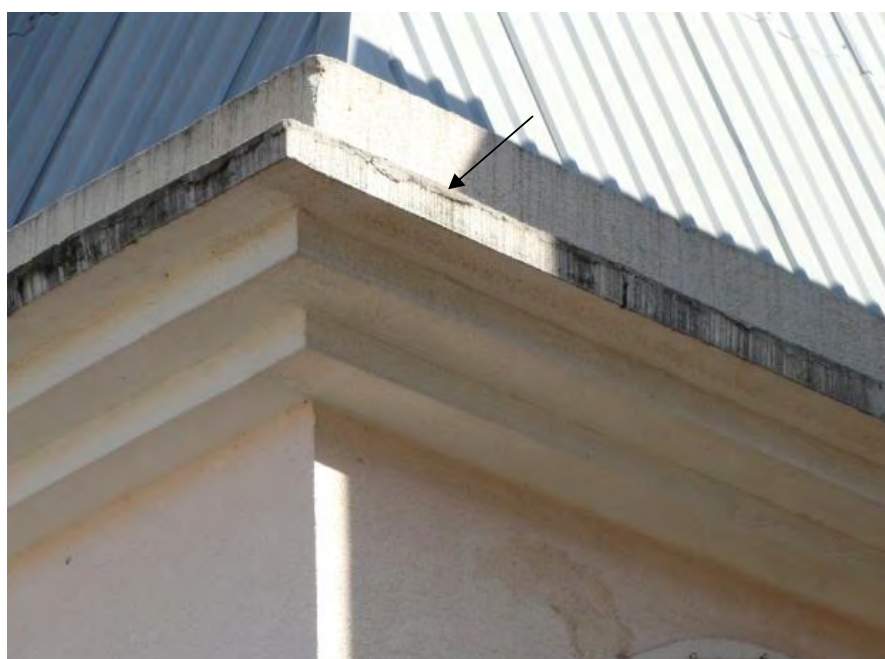
As principais causas tratadas na literatura sobre o surgimento de fissuras são as movimentações térmicas e higroscópicas, atuação de sobrecargas, deformabilidade das estruturas de concreto armado, recalques de fundação, retração dos produtos à base de cimento e as alterações químicas dos materiais de construção (THOMAZ, 1989).

Para meios porosos como os revestimentos de argamassa, uma das causas de fissuração em revestimentos de argamassa é a ocorrência de ciclos de molhagem e secagem provenientes da exposição à chuva e insolação, o que provoca o inchamento e retração do revestimento. A restrição à movimentação higroscópica acarreta a fissuração.

As fissuras, isoladamente, não seriam tão prejudiciais se não fossem os mecanismos de deterioração que podem ser originados a partir delas. Através das fissuras pode haver a penetração de água que, além de ser considerada uma manifestação patológica, pode trazer também outros problemas para os edifícios e suas partes, como a formação de microorganismos.

Outro aspecto importante de ser ressaltado são as regiões que recebem uma maior incidência de água, causando maior deterioração. São os casos de elementos arquitetônicos e construtivos (platibandas, peitoris, ressaltos, cimalthas e outros) que possuem o objetivo de interromper o fluxo de água e defletí-lo para distante da edificação, mas que quando mal projetados ou executados podem causar problemas pontuais na fachada, como ilustrado na Figura 2.9.

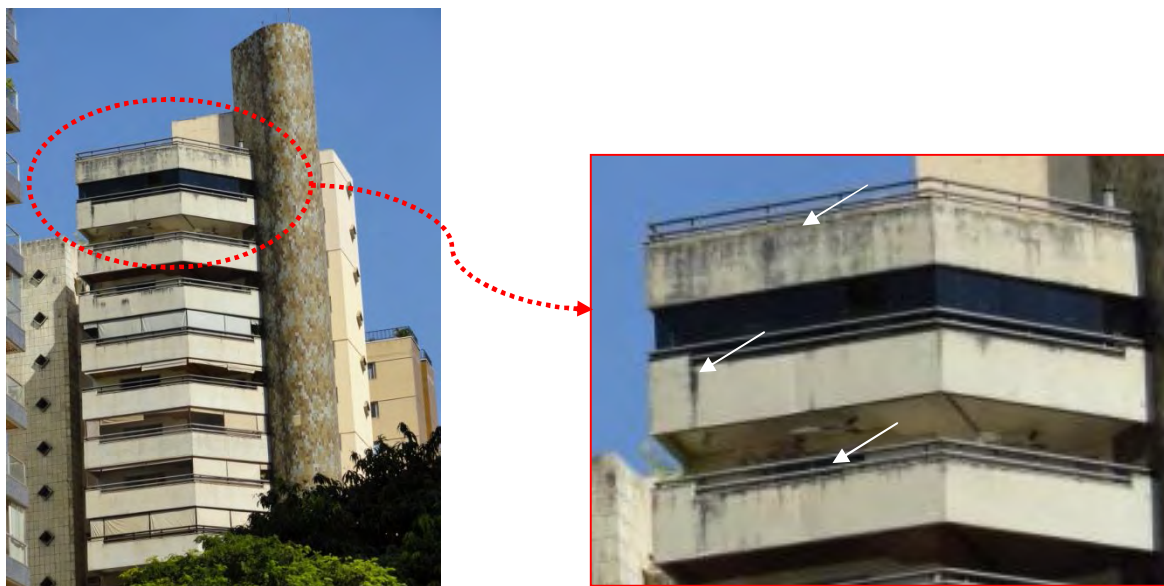
Figura 2.9 - Fissuras em ressalto de edifício em Goiânia que favoreceu o crescimento de microorganismos no local (fotografado em 2010)



### **2.5.2 Manchas de sujidade**

A formação de manchas de sujidade pode ser descrita como o comportamento dos elementos das fachadas de servir de suporte para deposição de poluentes atmosféricos e que, pela ação da chuva, são transportados para superfícies verticais, tornando visíveis, conforme ilustrado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Manchas de sujeira abaixo de peitoris em edifício na cidade de Goiânia (fotografado em 2010)



Segundo Chew e Tan (2003), trata-se de um tema abordado por muitas pesquisas nos últimos anos, uma vez que os custos com manutenção têm porcentagem significativa na indústria da construção. Os fatores que contribuem para a deterioração de fachadas são diversos, tais como material, exposição, cor, absorção de água, retenção de sujeira, textura e solubilidade. Manchas se formam pelo fluxo de água da chuva que carrega partículas de sujeira pela superfície das fachadas. Havendo a interrupção do fluxo, a sujeira fica retida no material que compõe a fachada.

Este mecanismo supõe a presença de poluentes atmosféricos no ar, sua deposição e adesão em paramentos das edificações. O primeiro depende do núcleo urbano em questão, sendo que as grandes cidades possuem mais poluentes. Carrié e Morel (1975) consideram que estas partículas normalmente possuem velocidade de queda constante e se sedimentam por gravidade nas fachadas dos edifícios e, principalmente, em planos horizontais ou inclinados.

De acordo com o mesmo autor, o tamanho e a forma das partículas poluentes podem interferir na velocidade de deposição e nas forças de ancoragem. As partículas menores, de mesma ordem de grandeza das moléculas gasosas, ficam em suspensão no ar. Já as com dimensões maiores são atingidas com mais intensidade pelas moléculas gasosas, porém a trajetória descendente é fracamente atingida e as partículas descendem lentamente. As partículas cujo tamanho proporciona a não interferência dos choques das moléculas gasosas sedimentam rapidamente. Com relação à forma das partículas, o mesmo autor refere-se às partículas

esféricas como as que possuem maior velocidade de queda, uma vez que elas possuem maior densidade.

Com relação à adesão são dois os mecanismos envolvidos, a gravidade e a tensão superficial que envolve a presença de umidade adsorvida no paramento. O processo de adesão e formação da mancha abrange também vários aspectos que dependem do material empregado na fachada da edificação (porosidade, textura e outros), do clima da região (chuva, vento, temperatura, umidade, condensação), características dos paramentos (existência de elementos que favorecem a formação da sujidade) e da possível proteção oferecida por outros edifícios e pela vegetação.

Destaca-se o papel da chuva neste fenômeno, uma vez que sua intensidade é fundamental para a formação do manchamento. Em núcleos urbanos, esta intensidade é quase sempre baixa, funcionando mais como colaboradora de incremento de sujidades do que de realizar a limpeza das superfícies com sujeira (VALLEJO, 1990).

Dois tipos de ação ocorrem, a ação do lavado limpo e a do lavado sujo. Quando o volume de água da chuva é superior à quantidade absorvida por capilaridade pelos poros dos materiais, ou quando estes estão saturados, são formadas lâminas de água que começam a seguir a trajetória descendente pela ação da gravidade em direção aos níveis inferiores da edificação. Se houver quantidade de água suficiente para a lâmina atingir tais níveis, ocorre o lavado limpo.

A velocidade destas lâminas de água pode sofrer redução na medida em que descem devido ao aumento da viscosidade da água que carrega partículas de sujeira em sua trajetória, pelo encontro com irregularidades ou detalhes e pela redução da quantidade de água, ou seja, o volume de água é insuficiente para que a lâmina de água atinja o ponto final da fachada. Desta forma, ocorre o lavado sujo.

Melo Jr. (2010) acrescenta ainda que a presença de umidade por condensação permite a maior adesão da sujeira. Quando ocorre o escoamento nestas superfícies há o lavado sujo, uma vez que a água arrasta grande quantidade de partículas e as deposita em planos verticais e inclinados.

Observa-se também que os andares inferiores possuem maior predisposição ao acúmulo de sujeira, tanto pela proximidade do solo, onde existe maior quantidade de partículas no ar, como pela menor exposição à chuva dirigida. Há também maior susceptibilidade na formação de manchas de acordo com a orientação solar. Tal fato pode ser explicado pela variação de incidência de chuva dirigida nas fachadas de uma mesma edificação. Em Goiânia, por exemplo, Melo Jr. (2010) atestou que para manchas formadas em platibandas, as fachadas com orientação N foram as que apresentaram maiores percentuais.

A poeira atmosférica também pode ter origem animal e vegetal, como: algas, fungos, líquenes e musgos e sobre as regiões de fachada que possuem condições propícias para o crescimento, causando degradação superficial da pintura e do revestimento de argamassa.

Melo Jr. (2010) constatou que as manchas tratadas na literatura como provenientes de partículas de sujeira também continham microorganismos. A seguir, serão discutidos os principais tipos de microorganismos que se proliferam nas edificações.

### **2.5.3 Formação de microorganismos**

O crescimento de microorganismos é um fenômeno freqüente nas fachadas de edifícios. O estudo desta formação torna-se essencial, uma vez que causa manchamentos e desagregação devido à produção de ácidos orgânicos que atacam os aglomerantes da argamassa, como visto na Figura 2.11 (CARASEK, 2010; SHIRAKAWA, 2009).

Figura 2.11 – Crescimento de microorganismos em detalhe arquitetônico (fotografado em 2010)



Johansson (2006) relata que o crescimento de microorganismos depende de diferentes fatores bióticos e abióticos. O mais importante abiótico refere-se à presença de umidade, sendo que estes organismos devem ser capazes de tolerar a falta de água. Para tanto, há duas formas, quais sejam, a estocagem de água para a manutenção dos processos biológicos em taxas normais, ou a tolerância à dessecação, caso dos microorganismos que se desenvolvem nas fachadas. Durante a dessecação, os processos biológicos são paralisados, mas eles podem ser rapidamente iniciados quando houver água disponível novamente.

A comunidade de organismos que se encontra em fachadas é um acúmulo de microorganismos formando um biofilme. Este é um ecossistema microbiológico extremamente complexo que pode conter diferentes tipos de microorganismos com uma matriz de nutrientes orgânicos e inorgânicos e substâncias secretadas pelas células (KEMMLING *et al.*, 2004).

A formação do biofilme normalmente é iniciada com o ataque de fototróficos à superfície da fachada. Estes primeiros microorganismos aderem à superfície por uma ligação fraca e reversível, as forças de *van der Waals*, mas a aderência pode ser definitiva, caso as ligações não forem quebradas. Estes primeiros organismos facilitam a chegada de outros pela construção de uma matriz que une o biofilme.

Não obstante, a biodeterioração é definida como uma mudança das propriedades dos materiais indesejável, causada pela atividade de qualquer tipo de organismo (MORTON; SURMAN, 1994). Os mecanismos envolvem a produção de ácidos, alteração da superfície, da absorção de calor e aumento da retenção de água (JOHANSSON, 2006).

#### **2.5.4 Fantômes**

Os *fantômes*, termo francês utilizado para referir-se a uma manifestação patológica, são descritos por Logeais (1989) como manchas que se formam nos revestimentos de argamassa desenhando as juntas de assentamento da alvenaria devido à *termoforese*, que é a diferença de temperatura superficial dos materiais que compõem o revestimento. Estas manchas são resultado da adesão de material particulado e do desenvolvimento de microorganismos.

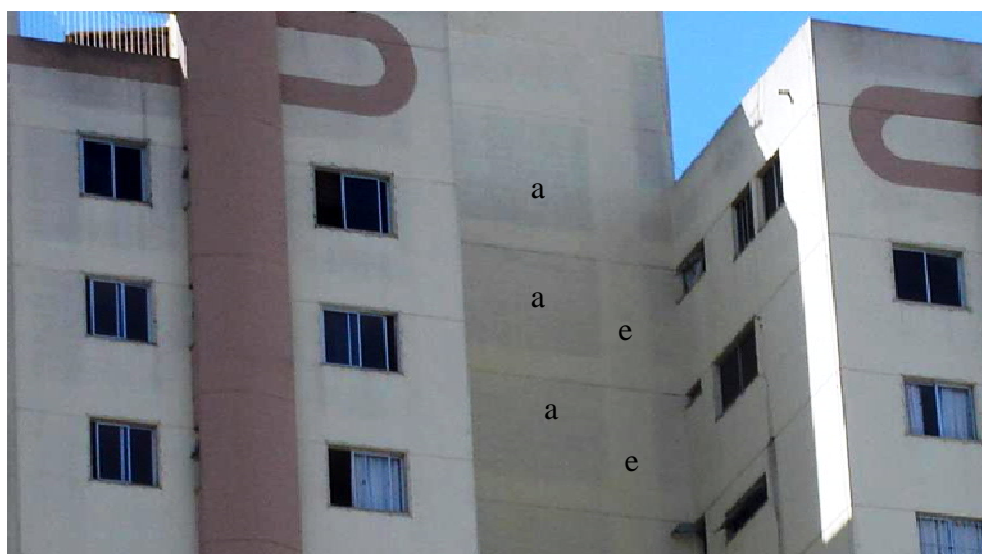
Segundo o autor, este fenômeno ocorre uma vez que a diferença de condutividade térmica dos materiais que compõem a argamassa influencia a condensação. Além disso, as diferentes

características dos materiais afetam a absorção, transporte e armazenamento de umidade, sendo que os mais porosos absorvem mais água e demoram a perdê-la. Tendo em vista que a adesão de partículas é facilitada pela umidade e que os microorganismos necessitam de água para seu desenvolvimento, pode-se explicar a menor incidência dos *fantômes* em elementos estruturais.

Por outro lado, pelo fato de o bloco cerâmico apresentar maior porosidade e, conseqüentemente, maior absorção de umidade, justifica-se a maior formação de *fantômes* nos elementos de vedação, como visto na Figura 2.12.

Há uma orientação preferencial para a formação dos *fantômes*, uma vez que superfícies mais frias ou que recebem menor radiação solar favorecem a condensação. Melo Jr. (2010) comprovou tal afirmação quando em levantamento verificou que houve maior presença dessa patologia em fachada com a orientação Sul.

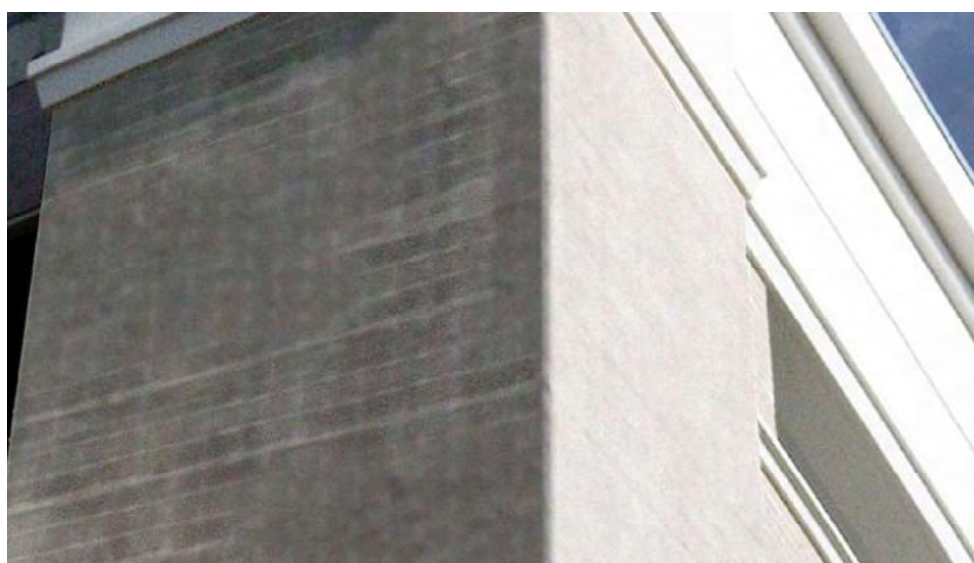
Figura 2.12 – Fachada Sul de edificação com formação de *fantômes* e maior incidência em alvenarias de vedação (a) que em elementos estruturais (e) (MELO JR., 2010)



Já conforme SNMI (2010), esta manifestação patológica, também denominada em francês *spectres* (Figura 2.13), trata-se de um fenômeno físico que pode ser temporário ou permanente. Pode ser classificado em dois tipos de fenômeno:

- Aparecimento imediatamente após a execução do revestimento, sendo devido a uma diferença de absorção de umidade entre os blocos que compõem a alvenaria e a argamassa de assentamento. Sua causa também pode ter origem construtiva, devido às deficiências de assentamento da alvenaria, gerando diferenciação das espessuras do revestimento ou à execução de espessura insuficiente do revestimento. No caso da execução de um revestimento com diferentes espessuras, as variações locais de absorção da alvenaria resultam diferenças na pega e no endurecimento do revestimento que provoca variações na coloração e, eventualmente, diferenças nas características do revestimento. Estes *fantômes* são geralmente permanentes.
- O aparecimento após um período de tempo mais longo possui causas mais complexas que dependem da constituição da parede e, particularmente, da heterogeneidade dos materiais que a compõem. Estão relacionados aos mecanismos de transporte de calor e umidade através do revestimento. As diferenças das características térmicas entre os materiais provocam micro pontes térmicas que podem acarretar a condensação, causando a diferença na cor entre as juntas de assentamento e os blocos da alvenaria. Estes *fantômes* são geralmente temporários. Por outro lado, este diferencial de condensação pode favorecer a deposição de partículas de sujeira, provocando o aparecimento de manchas permanentes.

Figura 2.13 – Formação de *fantômes* em edifício multipavimentos (SNMI, 2010)



Ainda de acordo com publicação de SNMI (2010), pode-se prevenir o aparecimento dos *fantômes*, executando juntas de assentamento com espessura adequada e com uma argamassa dosada para ser menos porosa bem como com uma resistência mecânica comparável ao bloco da alvenaria; no momento da execução, umedecer uniformemente a alvenaria, sem formar um filme de água em sua superfície; além disto, deve-se garantir uma espessura do revestimento suficiente e uniforme, sem variações locais.

Para corrigir o aparecimento do problema, deve-se aplicar uma camada de argamassa complementar para aumentar a espessura do revestimento, assegurando a boa aderência entre as camadas. Além disto, deve-se aplicar hidrofugantes na superfície do revestimento, o que reduz sensivelmente o fenômeno em tempos de chuva ou alta umidade relativa do ar (SNMI, 2010).

Os riscos do aparecimento dos *fantômes* nos elementos da alvenaria são reduzidos com a execução do revestimento em multicamadas, respeitando o tempo de endurecimento de cada camada. Os *spectres* podem ser também causados ou acentuados pela presença de fissuras no nível das juntas de assentamento da alvenaria, ocorrendo absorção de água capilar nessas fissuras (AFNOR NF DTU 26.1 P1-1, 2008).

## CAPÍTULO 3

### DEGRADAÇÃO DE FACHADAS DEVIDO À TEMPERATURA

Resende, Barros e Medeiros (2001) afirmam que a temperatura é um dos principais fatores de degradação que atuam nos revestimentos de fachada de edifícios e pode causar comportamentos diversos nos materiais, provocando variações físicas e/ou químicas. Uma das principais alterações físicas provocadas pela temperatura é a variação dimensional (dilatação ou contração). Esta variação causa o aparecimento de tensões que podem levar a deformações ou ruptura, particularmente de componentes ou partes do edifício composto de diferentes materiais.

Guimarães *et al.* (2002) constataram na cidade de Goiânia temperaturas de até 55°C em uma fachada com orientação Norte e pintura escura, enquanto que a temperatura ambiente girava em torno dos 35°C. Esse fato causa um gradiente de temperatura entre o revestimento e a base que pode ocasionar distorções estéticas e até a ruptura dos componentes. Em relação à variação química, a temperatura pode atuar como catalisadora de reações químicas que diminuem a durabilidade do revestimento.

Para a melhor compreensão dos fenômenos de deterioração das fachadas ocasionadas pela temperatura, foram abordados neste capítulo os mecanismos de transferência de calor, quais sejam, condução, convecção e radiação, sendo esta última fortemente relacionada à insolação. Por último, foram apontadas as manifestações patológicas típicas ocasionadas pela variação dimensional provocada pelas diferenças de temperatura.

#### 3.1 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O transporte ou transmissão de calor pode ocorrer por meio da condução, convecção ou radiação e simultaneamente ao transporte de umidade. Em materiais porosos e sem transparência, como os metais, somente a condução acontece. Se o material é transparente, como o vidro, a energia térmica também será conduzida por meio da radiação. A convecção

irá influenciar o transporte de calor se materiais como gases e líquidos estão em movimento. Em materiais porosos todos os mecanismos de transporte podem acontecer.

### 3.1.1 Condução

A condução é a transferência de energia térmica em sólidos ou fluidos em repouso. Costa (1991) define-a como a passagem de calor de uma zona para outra de um mesmo corpo ou de corpos distintos em íntimo contato, sem que se verifiquem deslocamentos materiais no sistema considerado. Santos (2006) resume o mecanismo como a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas menos energéticas. A fonte de calor excita diretamente as partículas que transferem parte de sua energia a partículas vizinhas e assim sucessivamente. Em um material sólido homogêneo com área superficial ( $A$ ) e espessura ( $d$ ) e com diferença de temperatura em cada lado do material, a quantidade de calor ( $Q$ ) é dada pela lei de Fourier, apresentada na equação 3.1.

$$Q_c = -\lambda A \frac{T_i - T_e}{\Delta d} \quad (3.1)$$

Onde:

$Q_c$  = quantidade de calor (condução) (W);

$\lambda$  = condutividade térmica (W/m.K);

$A$  = área superficial (m<sup>2</sup>);

$T_i$  = temperatura da face interior (K);

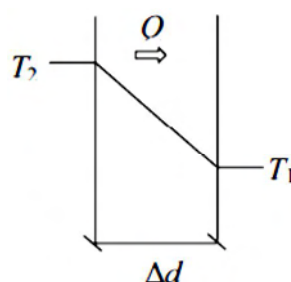
$T_e$  = temperatura da face exterior (K);

$d$  = espessura da parede (m).

A condutividade térmica ( $\lambda$ ) é uma propriedade dos materiais que indica como ocorre a condução de energia térmica. Quanto maior o seu valor, melhor são as habilidades de condução do material. Deve-se lembrar que a condutividade térmica varia com a temperatura e umidade, mas em casos práticos, em que as diferenças de temperatura são pequenas, a influência da temperatura é desprezada.

A transferência de calor em um sólido em condições estacionárias dá origem a um gradiente de temperatura linear da maior para a menor temperatura, conforme Figura 3.1.

Figura 3.1 – Esquema de transferência de calor por condução (JOHANSSON, 2006)



O quociente de  $\lambda/d$  origina o conceito de resistividade térmica ( $R$ ) do material, inverso da condutividade térmica. Para uma parede externa, como muitas camadas entre o ambiente interno ( $T_i$ ) e externo ( $T_e$ ), tem-se:

$$Q_c = \frac{(T_e - T_i)}{\sum R} \quad (3.2)$$

Onde:

$Q_c$  = quantidade de calor (condução) (W);

$T_i$  = temperatura da face interior (K);

$T_e$  = temperatura da face exterior (K);

$\sum R$  = resistividade térmica ( $m^2 \cdot K/W$ ).

### 3.1.2 Convecção

A transferência de calor por convecção é o mecanismo pelo qual a energia térmica é transferida entre a superfície de um sólido e um fluido em movimento. Difere-se da condução pela grandeza das partículas que, dotadas de movimento, transportam o calor (COSTA, 1991). Os movimentos podem ser causados por diferenças de densidade do ar, ocasionadas pelas diferenças de temperatura (convecção natural), bem como pelo vento ou sistemas de ventilação (convecção forçada). O fluxo de calor por convecção é calculado pela equação 3.3.

$$Q_{con} = c_{con} \times (T_s - T_a) \quad (W) \quad (3.3)$$

Onde:

$Q_{con}$  = quantidade de calor (convecção) (W);

$c_{con}$  = coeficiente de transferência de calor por convecção (W/K);

$T_s$  = temperatura da superfície (K);

$T_{ar}$  = temperatura do ar (K).

O coeficiente de transferência de calor por convecção não é uma propriedade térmica como a condutividade térmica e não é um valor tabelado. O valor depende das circunstâncias da convecção natural ou forçada na superfície. A fachada está na maioria das vezes exposta a diferentes condições de vento ( $u$ ) e o valor pode ser determinado da seguinte maneira:

- A barlavento e velocidade do vento  $\leq 10$  m/s:  $c_{con} = 5 + 4.5u - 0.14u^2$  (3.4)

- A sotavento e velocidade do vento  $\leq 8$  m/s:  $c_{con} = 5 + 1.5u$  (3.5)

- Condições de tempo calmo:  $c_{con}=5$

### 3.1.3 Radiação

Diferentemente da condução e convecção, a radiação não necessita de um meio para se propagar. Isto se deve ao fato da energia térmica ser transportada por ondas eletromagnéticas que são conduzidas no vácuo. Todos os materiais com temperatura acima do zero absoluto (0 K) irradiam energia térmica continuamente, em forma de radiação eletromagnética a partir de sua superfície, com diferentes comprimentos de onda. O espectro eletromagnético cobre uma enorme gama de comprimentos de onda ( $\lambda$ ), como visto na Figura 3.2. Vale lembrar que a luz visível faz parte do espectro eletromagnético.

Figura 3.2 – Espectro eletromagnético (SANTOS, 2006)



A termografia, tratada no item 4.2.1, detecta a radiação infravermelha emitida pelo objeto inspecionado, que é invisível ao olho humano, e a transforma em imagens térmicas visíveis, com a possibilidade de convertê-la em leituras de temperatura (MALDAGUE; MOORE, 2001<sup>2</sup> *apud* SANTOS, 2006).

Em casos práticos, divide-se a radiação térmica em dois tipos:

- Radiação proveniente do sol (com pequeno comprimento de onda e altas temperaturas – 6000K); e
- Radiação proveniente de outras superfícies (com comprimentos de onda mais longos e temperaturas de -100°C a 100°C).

A quantidade máxima de radiação, também chamado de poder emissivo, que um material pode emitir é calculada pela equação 3.6.

$$E_n = \sigma \times T^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (3.6)$$

Onde:

$E_n$  = poder emissivo (W/m<sup>2</sup>);

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann (W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>);

$T$  = temperatura do corpo (K).

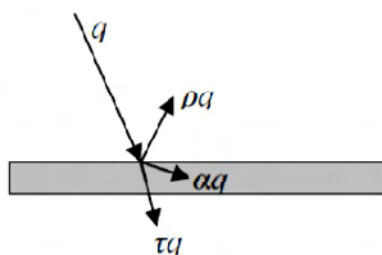
Um material que absorve toda a radiação eletromagnética do seu entorno é chamada de corpo negro. Como visto, o poder emissivo de um corpo negro é proporcional à temperatura do corpo elevado à quarta potência e, portanto, não possui uma relação linear como a condução e a convecção para transferência de calor. Isto significa que a radiação pode ser bastante dominante no mecanismo de transferência se altas temperaturas estiverem envolvidas. Como nenhum corpo é “negro” em absoluto, quando a radiação eletromagnética atinge a superfície de um material, diferentes frações serão absorvidas, refletidas ou transmitidas, dependendo do material, do comprimento de onda e da direção da radiação eletromagnética. Denominam-se absorvidade ( $\alpha$ ), refletividade ( $\rho$ ) e transmissividade ( $\tau$ ) as porções de radiação térmica que são absorvidas, refletidas e transmitidas, respectivamente. De acordo com a primeira lei da

<sup>2</sup> MALDAGUE, X. P. V; MOORE, P. O. Infrared and Thermal Testing. v. 3, ASNT (American Society for Nondestructive Testing), 2001.

termodinâmica (conservação de energia), a radiação ( $q$ ) que atinge uma superfície deve ser igual à radiação absorvida, refletida e transmitida (JOHANSSON, 2006), conforme equação 3.7 e figura 3.3.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (3.7)$$

Figura 3.3 – Radiação eletromagnética absorvida, refletida e transmitida (JOHANSSON, 2006)



### 3.1.3.1 Radiação térmica com comprimento de onda longo

A propriedade de radiação que possibilita a comparação de um material com um corpo negro é denominada emissividade ( $\varepsilon$ ), como visto na equação 3.8. A emissividade representa a maior ou menor tendência que um determinado material tem em emitir radiação térmica.

$$\varepsilon = \frac{E}{E_n} \quad (3.8)$$

Onde:

$\varepsilon$  = emissividade;

$E$  = poder emissivo de um corpo ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

$E_n$  = poder emissivo de um corpo negro ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Considera-se como radiação térmica com longo comprimento de onda a emitida por todos os outros materiais a não ser o sol. Alguns valores de emissividade de diferentes materiais de construção podem ser vistos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Valores de emissividade de diferentes materiais (adaptado de SANDIN, 1996<sup>3</sup> apud JOHANSSON, 2006; BARREIRA, 2004)

<b>Material</b>	<b><math>\epsilon</math></b>
Alumínio polido	0,05
Aço polido	0,27
Aço oxidado	0,61
Pintura branca	0,85
Cerâmica	0,93
Madeira	0,90
Vidro	0,92
Argamassa	0,93

### 3.1.3.2 Radiação térmica com comprimento de onda curto: radiação solar

A maior fonte de radiação eletromagnética ( $E_s$ ) captada pelo planeta Terra é o Sol, responsável por mais de 99% de toda radiação incidente. Absortividade ( $A$ ) ou poder de absorção é a fração de radiação absorvida quando ela incide sobre uma superfície. Alguns valores de absortividade ( $A$ ) da radiação solar podem ser vistos na Tabela 3.2. Estes valores correspondem ao conceito de superfícies claras e escuras (JOHANSSON, 2006).

Tabela 3.2 – Valores de absortividade de diferentes materiais (CLAESSON *et al.*, 1984<sup>4</sup> apud JOHANSON, 2006)

<b>Material</b>	<b><math>A</math></b>
Superfície caiada	0,20
Blocos cerâmicos	0,75
Concreto	0,60 – 0,70
Asfalto	0,93

O fluxo de calor proveniente da radiação com comprimento de onda curto é dado pela equação 3.9:

<sup>3</sup> SANDIN, K. **Värme och fukt. kompendium i byggnadsfysik.** Lunds Tekniska Högskola, Lund, 1996.

<sup>4</sup> CLAESSON, J.; NEVANDER, L.E.; SANDIN, K. **Värme.** Institutionen för byggnadsteknik, Lund, 1986.

$$E_s = A \times I_s \times \cos \theta \quad (3.9)$$

Em que:

$E_s$  = fluxo de calor (W/m<sup>2</sup>);

$A$  = absorptividade;

$I_s$  = radiação incidente (W/m<sup>2</sup>);

$\theta$  = ângulo formado entre a radiação incidente e a superfície (rad);

A radiação do sol pode causar altas temperaturas superficiais, sendo que a cor da superfície é decisiva para tanto. Se uma fachada for branca, por exemplo, em vez de vermelha a absorção da radiação solar irá diminuir em dois terços, e a temperatura superficial também irá diminuir.

### **3.2 INSOLAÇÃO**

A radiação solar varia de acordo com os seguintes parâmetros:

- Latitude (muita radiação perto do equador e pouca nas altas latitudes);
- Horário do dia;
- Estações do ano;
- Altitude; e
- Nebulosidade (céu encoberto – radiação difusa; céu aberto – radiação direta; e variações intermediárias).

No que tange à absorção desta radiação pelos edifícios, sua orientação solar é decisiva. Além dos aspectos relacionados ao conforto térmico estudados pela arquitetura bioclimática (LAMBERT *et al.*, 1997), a orientação solar, como observado por Melo Jr. (2010) influencia para a formação de manifestações patológicas. Portanto, o projeto arquitetônico pode ter influência nos mecanismos de deterioração das fachadas, eis que a forma do edifício e sua implantação são responsáveis pelo formato geométrico e o posicionamento das fachadas.

O primeiro registro sobre adaptação climática da arquitetura que se tem conhecimento é o tratado de Vitruvius escrito no século I a.C. Trata-se de uma reflexão abrangente sobre

arquitetura, considerando diferentes tipologias de edificação, assim como a relação de cada uma delas com o todo.

Vitrúvio (2002) aduz que a arquitetura não deve ser a mesma em regiões com características climáticas diferentes, tendo em vista que elas assumem características díspares de acordo com o curso do sol.

Os primeiros estudos sobre insolação no Brasil, conduzidos pela vertente de higiene das habitações, ocorreram simultaneamente ao início do desenvolvimento de conceitos de arquitetura moderna no país. Le Corbusier<sup>5</sup> no início do século XX vislumbrou o sol como o protagonista do salubrismo.

Um importante manual italiano sobre racionalidade das construções foi escrito por Griffini<sup>6</sup> em 1930 que, baseado nos mapas solares de Howard Fisher estabelece recomendações sobre a orientação mais adequada para a latitude 45°, onde estão situadas as cidades de Milão, Turín e Veneza (RAHAL, 2006).

### **3.2.1 Altura Solar e Azimute**

Bittencourt (2004) explica que a altura solar é o ângulo formado pelo sol e pelo plano horizontal do observador, enquanto que azimute é o ângulo formado pela projeção horizontal do raio solar com uma direção estabelecida, normalmente o Norte geográfico. Esses ângulos são coordenadas que localizam qualquer posição do sol na abóboda celeste. O mesmo autor exemplifica que as alturas solares são mais baixas ao nascer e ao por do sol, e mais altas são em torno do meio dia. A altura solar e o azimute de um local em determinado dia e hora podem ser obtidos com o auxílio das cartas solares, como pode ser visto no item 3.2.2.

### **3.2.2 Cartas solares (caso de Goiânia)**

Conforme relata Bittencourt (2004), a elaboração de cartas ou diagramas solares ocorre por meio de projeção do percurso do sol ao longo do ano e nos diversos horários do dia, em um plano horizontal.

---

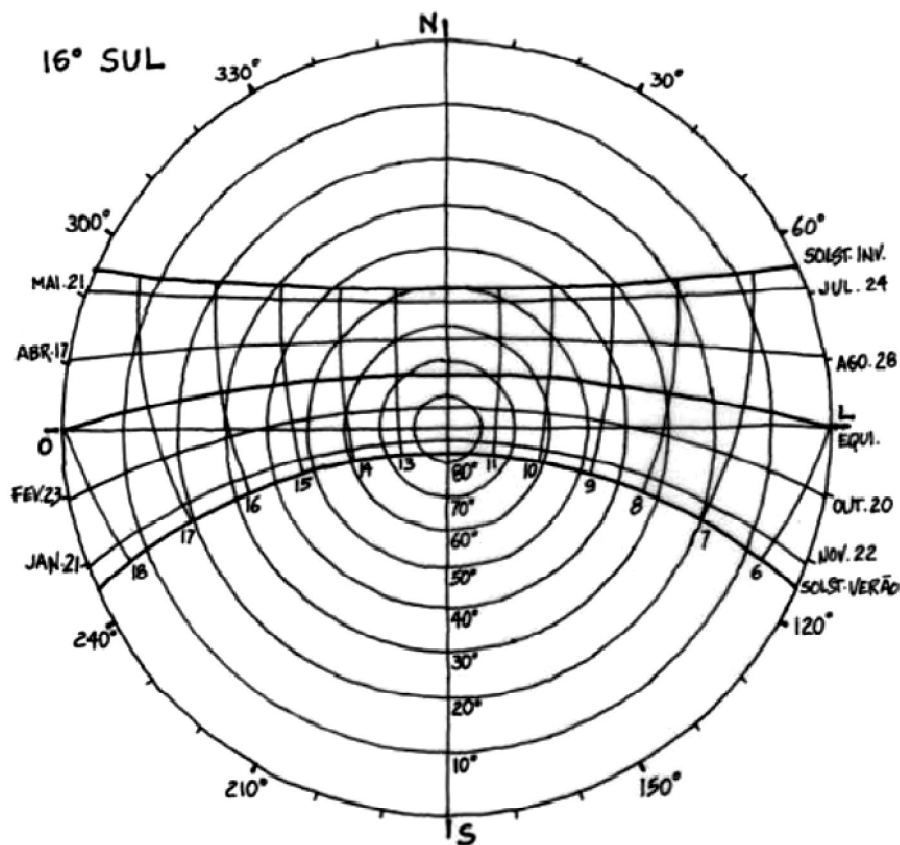
<sup>5</sup> Charles-Edouard Jeanneret-Gris, mais conhecido pelo pseudônimo de Le Corbusier, foi um arquiteto, urbanista e pintor francês de origem suíça, considerado juntamente com Frank Lloyd Wright, Alvar Aalto, Mies van der Rohe e Oscar Niemeyer, um dos mais importantes arquitectos do século XX.

<sup>6</sup> GRIFFINI, E. A. **Costruzione razionale della casa**. 4 ed. Milão: Ulrico Hoepli, 1950.

A latitude de um local é representada pela distância deste ao Equador, medida em ângulos. À medida que um ponto vai se afastando do Equador sua latitude aumenta. Desta forma, as maiores latitudes estão próximas aos pólos e as menores, ao Equador.

Segundo Fernandes (2007), para o estudo da insolação das fachadas é utilizado o tradicional sistema da carta solar segundo projeção estereográfica horizontal. É um sistema de projeção única, que consegue mostrar as variações anuais e diárias do caminho aparente do sol. O desenho característico da carta solar apresenta as projeções das trajetórias aparentes do sol de mês em mês. A Figura 3.4 representa a carta solar para a região de Goiânia (latitude 16° Sul).

Figura 3.4 – Carta Solar para latitude 16° Sul (CAVALEIRO; MALATO, 1969<sup>7</sup> apud FERNANDES, 2007)



O mesmo autor informa que são sete linhas em arco de circunferência, sendo que as cinco curvas intermediárias representam, cada uma, dois meses do ano – é um movimento pendular – e as duas curvas extremas, os dois meses limites do movimento solar, os solstícios<sup>8</sup>, isto é, o

<sup>7</sup> CAVALEIRO, A. S.; MALATO, J. J. **Geometria da insolação de edifícios**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, 1969.

<sup>8</sup> Solstício (do latim sol + sistere, que não se mexe) é o momento em que o Sol, durante seu movimento aparente na esfera celeste, atinge a maior declinação em latitude, medida a partir da linha do equador. Os solstícios ocorrem duas vezes por ano. Quando ocorre no verão significa que a duração do dia é a mais longa do ano. Analogamente, quando ocorre no inverno, significa que a duração da noite é a mais longa do ano.

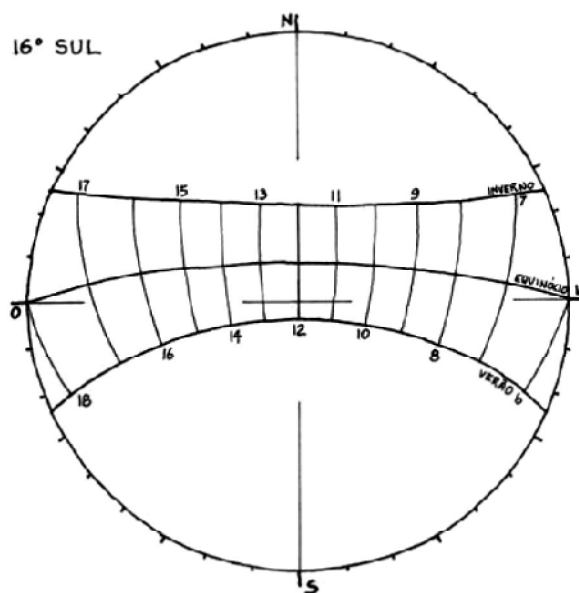
solstício de verão e o solstício de inverno. A curva central representa os momentos intermediários, os equinócios<sup>9</sup>, o equinócio de outono e o equinócio da primavera.

As projeções são entrecortadas por segmentos curvos, também arcos de circunferência, que representam as horas do dia. O segmento central, que representa o meio dia, é um segmento reto na direção norte-sul. Aparecem também, em quase todas as cartas, as circunferências concêntricas, que identificam alturas constantes, a partir da linha do horizonte, de dez em dez graus.

O sistema de projeção única – a carta solar – proporciona uma informação simultânea dos movimentos anuais e diários que nenhum outro procedimento oferece e é absolutamente necessária para uma visão panorâmica da relação espaço-tempo do caminho aparente do sol.

Embora as cartas solares disponíveis em livros ofereçam as informações gráficas descritas, Fernandes (2007) utilizou em seu estudo um desenho mais simplificado, onde são identificadas apenas as três linhas básicas: a do solstício de verão, do solstício de inverno e a dos equinócios de março e setembro e ainda as linhas, de hora em hora, do movimento diário do sol como se pode constatar na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Carta solar simplificada para a latitude 16° Sul (CAVALEIRO; MALATO, 1969<sup>10</sup> apud FERNANDES, 2007)



<sup>9</sup> A palavra equinócio vem do latim, *aequus* (igual) e *nox* (noite), e significa noites iguais, ocasiões em que o dia e a noite duram o mesmo tempo.

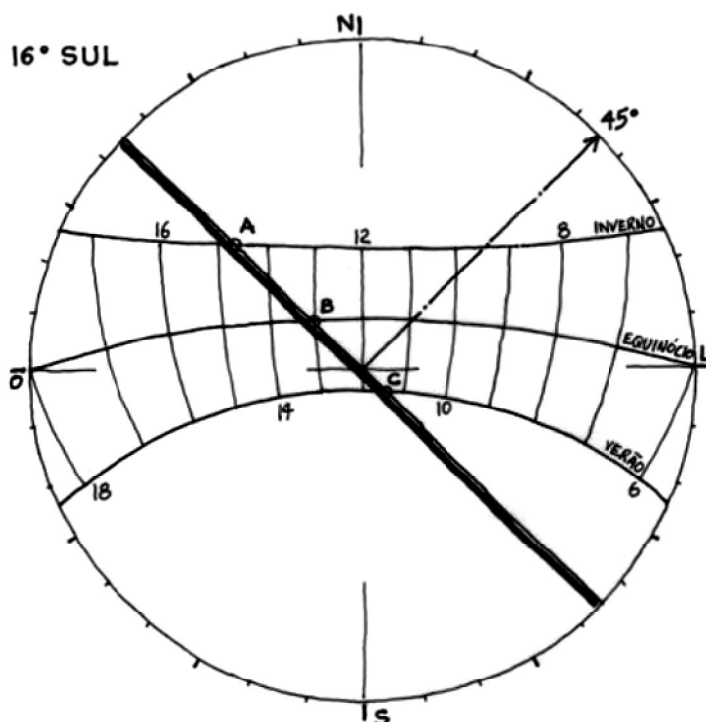
<sup>10</sup> CAVALEIRO, A. S.; MALATO, J. J. **Geometria da insolação de edifícios**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, 1969.

O autor relata que essa simplificação facilita o uso e manuseio da carta, eliminando eventuais confusões provocadas por excesso de informação. Para a definição da insolação de uma determinada fachada, isto é, uma fachada que tenha sua orientação definida em termos de seu azimute, procede-se da seguinte forma: identifica-se o ângulo referente ao azimute; liga-se esse ponto ao centro da carta, definindo-se a normal à fachada; a seguir, traça-se, pelo centro, uma reta perpendicular à anterior, que constitui a linha-base da fachada.

Esta linha-base interceptará as projeções do caminho aparente do sol identificando-se, a partir daí, por interpolação, e em cada data do ano – solstícios e equinócios, os horários até os quais ou após os quais ocorre a insolação.

Para ilustrar, Fernandes (2007) mostrou a linha-base de uma fachada com azimute  $45^\circ$  (Figura 3.6). O encontro da linha-base com as linhas curvas (pontos A, B e C) que representam as projeções do caminho aparente do sol determina os horários de insolação dessa fachada. Repare-se, no caso, que a fachada tem insolação até às 14:30 (ponto A) no solstício de inverno, até às 13:00 (ponto B) nos equinócios e até às 11:30 horas (ponto C) no solstício de verão.

Figura 3.6 – Carta solar para fachada com azimute  $45^\circ$  - horários de insolação (FERNANDES, 2007)



Além da determinação dos horários, pode-se proceder também uma avaliação qualitativa, qual seja, perceber e identificar de que forma essa insolação atinge a fachada, se provém da região baixa ou alta do céu, se vem frontal ou lateralmente (BITTENCOURT, 2004).

Essa avaliação é muito importante para o projetista e pode ser feita com uma observação visual mais acurada da própria carta. Desta forma, para uma determinada orientação solar, deixando de lado a nebulosidade, podem-se averiguar quais os horários que mais desfavoreceriam, teoricamente, as fachadas quanto à absorção de radiação solar. Pensando neste mecanismo isoladamente, na expansão provocada nos materiais, não haveria maiores problemas se não houvesse dissipação do calor absorvido, na medida em que a temperatura ambiente cai. Vislumbrando estes dois momentos, verifica-se a possibilidade de se realizar medições de temperatura superficial das fachadas nestes horários.

Rahal (2006) relata que o engenheiro Paulo Sá foi um dos precursores de estudos neste sentido analisando qual seria a orientação adequada para os edifícios em oito cidades brasileiras. Para tanto, calculou a quantidade total de calor recebido por paredes orientadas a norte, sul, leste e oeste nestas cidades, realizados no solstício de inverno, solstício de verão e nos equinócios, considerando os ventos dominantes.

Constata-se, portanto, que os recursos proporcionados pela arquitetura bioclimática são essenciais no ato de projetar. Os profissionais, quando não levam em consideração todas estas informações, podem estar colocando as edificações em situações extremamente desfavoráveis do ponto de vista de absorção da radiação solar e, conseqüentemente, se tornando susceptíveis aos problemas que podem ser ocasionados pela variação de temperatura dos materiais constituintes das fachadas.

### **3.3 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS RELACIONADAS À TEMPERATURA**

Os ciclos de temperatura podem ocasionar deterioração dos materiais componentes das edificações. A movimentação térmica ocorre devido às oscilações da temperatura ambiente e à radiação solar sobre os revestimentos externos e caracteriza-se por variações dimensionais. As variações dimensionais de expansão levam a tensões de compressão, ao passo que as de retração, a tensões de tração (CINCOTTO; SILVA; CARASEK, 1995).

As fissuras em argamassa de revestimento oriundas da movimentação térmica da base estão relacionadas ao módulo de deformação da argamassa. O descolamento do revestimento de argamassa e cerâmico dá-se em razão de uma deficiência de aderência com a base. Ocorre quando a tensão de tração gerada pela variação térmica excede sua resistência de aderência. Em relação ao revestimento cerâmico, vários são os estudos que tratam deste assunto, Silva *et al.* (1998), por exemplo, estimaram tensões através de modelagem numérica em elementos finitos e concluíram que gradientes de temperatura da ordem de 45°C podem gerar tensões de tração da ordem de 0,5 MPa, na interface do revestimento cerâmico com a argamassa colante, podendo levar ao descolamento das peças.

Saraiva (1998) estudou um sistema composto por emboço, argamassa colante, placas cerâmicas, sob efeito de um perfil térmico específico da região de Brasília. Utilizando um modelo numérico de elementos finitos, ela analisou a variação das tensões devidas à mudança na rigidez da argamassa colante, espessura do emboço, coeficiente de absorção térmica as cerâmicas e tipo do rejunte. Por meio da análise dos resultados, verificou-se que a espessura do emboço não influenciou o estado de tensão, contudo espessuras maiores provocam aumento nas tensões de cisalhamento na interface argamassa colante e emboço. A rigidez do rejunte alterou substancialmente as tensões, sendo que a utilização do rejunte com menor módulo de elasticidade produziu um alívio de tensões de compressão nas camadas do sistema do revestimento, porém há um aumento significativo das tensões nos pontos de interface da argamassa colante e o emboço, havendo maior tendência de descolamento entre a argamassa colante e o emboço. O uso de cerâmicas em elevado coeficiente de absorção (cor escura) gerou tensões elevadas (aumento em torno de 60%). Por fim, o uso de argamassa colante com menor módulo de elasticidade produz tensões menores.

### **3.3.1 Fissuração**

As superfícies de vedação de edificações estão sujeitas às variações sazonais de temperatura que promovem uma variação dimensional dos materiais de construção, onde os movimentos de dilatação e contração são limitados por causa das interfaces que constituem os sistemas e em decorrência desta limitação de movimentos surgem as tensões que provocam fissuras. As movimentações térmicas também estão voltadas às propriedades físicas dos materiais, já que a origem de fissuras pode ocorrer devido a movimentações diferenciadas entre componentes de