

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Thiago Martin Afonso

**Desempenho higrotérmico de edificações e procedimentos
para previsão de ocorrência de bolores em ambientes internos:
estudo de caso em habitações construídas com paredes de
concreto**

**São Paulo
2018**

Thiago Martin Afonso

Desempenho higrotérmico de edificações e procedimentos para previsão de ocorrência de bolores em ambientes internos: estudo de caso em habitações construídas com paredes de concreto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Habitação: Planejamento e Tecnologia

Data da aprovação ____/____/____

Prof^a. Dr^a. Maria Akutsu (Orientadora)
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Membros da Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Maria Akutsu (Orientadora)
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Prof. Dr. Arlindo Tribess (Membro)
USP – Universidade de São Paulo

Prof^a. Dr^a. Neide Matiko Nakata Sato (Membro)
USP – Universidade de São Paulo

Thiago Martin Afonso

Desempenho higrotérmico de edificações e procedimentos para
previsão de ocorrência de bolores em ambientes internos: estudo
de caso em habitações construídas com paredes de concreto

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas
do Estado de São Paulo - IPT, como
parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Habitação:
Planejamento e Tecnologia.

Área de Concentração: Tecnologia em
Construção de Edifícios - TCE

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Akutsu

São Paulo
Agosto/2018

Ficha Catalográfica

Elaborada pelo Departamento de Acervo e Informação Tecnológica – DAIT
do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT

A257d **Afonso, Thiago Martin**

Desempenho higrotérmico de edificações e procedimentos para previsão de ocorrência de bolores em ambientes internos: estudo de caso em habitações construídas com paredes de concreto / Thiago Martin Afonso. São Paulo, 2018.

177p.

Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Área de concentração: Tecnologia em Construção de Edifícios.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Maria Akutsu

1. Edificações 2. Micologia 3. Bolor 4. Parede de concreto 5. Desempenho higrotérmico 6. Tese I. Akutsu, Maria, orient. II. IPT. Coordenadoria de Ensino Tecnológico III. Título

19-08

CDU 69.059(043)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, por sempre me apoiar e incentivar, reconhecendo a importância da educação. E além, pelo exemplo de vida, trabalho e dedicação à família. Sem o seu apoio este trabalho não seria possível.

AGRADECIMENTOS

À Dr.^a Maria Akutsu, pela orientação plena deste trabalho. E também pelos ensinamentos e agradáveis conversas.

À Dr.^a Adriana Camargo de Brito, coorientadora, pelas suas importantes e precisas sugestões.

À Dr.^a Neide Matiko Nakata Sato e ao Dr. Arlindo Tribess, membros da banca avaliadora, pelas valorosas contribuições.

À equipe dos softwares WUFI, pelo fornecimento do WUFI-Plus®, de forma rápida e simples, incentivando a execução de pesquisas na área higrótérmica. Agradeço também pelo esclarecimento de dúvidas, em especial a Thomas Schmidt.

A todos os envolvidos no Mestrado do IPT; Mary, Adilson, Andréia, Bruno e às bibliotecárias Natalina e Ana Lúcia.

Agradeço de forma especial todos os excelentes professores do curso de mestrado do IPT. São profissionais que nos inspiram na busca incessante de conhecimento.

Por fim, agradeço à minha família, por todo o apoio e incentivo, e à Jovana, esta grande companheira que a vida me deu.

RESUMO

A ocorrência de bolores em edificações é um problema enfrentado pelo homem desde os primórdios da civilização. Não obstante, ainda hoje existe grande dificuldade no entendimento deste fenômeno. Particularmente no cenário atual brasileiro, vem se destacando a ocorrência de bolores em edificações construídas com paredes de concreto, sistema que apresenta crescente utilização, especialmente em empreendimentos habitacionais de interesse social. Como a proliferação de bolores em habitações pode acarretar danos à saúde dos moradores, além de prejuízos financeiros, é urgente a necessidade de melhor entender os mecanismos que dão causa a este problema. Neste sentido, o trabalho aborda as condições necessárias para o desenvolvimento de bolores no interior de edificações, aplicando um modelo de previsão de ocorrência a três empreendimentos construídos com paredes de concreto, que apresentam problemas com bolores em suas unidades habitacionais. Foram identificadas sob quais situações os bolores ocorrem nestes empreendimentos estudados, ou seja, como as condições de ocupação, ventilação, posição e orientação geográfica das unidades influenciam sobre o potencial de ocorrência de bolores em suas superfícies internas. Ao final, o trabalho apresenta um comparativo entre a previsão de ocorrência de bolores para o sistema com paredes de concreto, sob certas condições, e diversas outras tipologias de paredes. O correto entendimento dos fatores que influenciam a formação de bolores nas edificações poderá auxiliar futuros construtores e projetistas a evitarem este problema.

Palavras chave: Micologia das edificações; Bolor; Fungo; Parede de concreto; Desempenho higrotérmico.

ABSTRACT

Hygrothermal performance of buildings and procedures to predict the occurrence of mold indoors: a case study of dwellings built with solid concrete walls

Mould fungus formation inside dwellings is an old problem. Still today, there are many uncertainties about this phenom, and its occurrence. Particularly in the recent Brazilian construction scenario, the growing use of a construction system with solid concrete walls, especially in social housing programs, has been facing problems with the mould fungus formation on the interior surface of the envelope walls. This paper purpose is to analyze this problem, studying three real housing developments with mould problems, under the light of a proposed model in the literature for the prediction of mould growth on interior surfaces. The main goal is to identify how conditions like occupation, ventilation, position and geographic orientation determine the occurrence of the mould in the studied dwellings. After that, the potential for mould fungus formation is compared for the concrete walls system and some other walls assemblies, under determined conditions. With this analysis, this paper may help future constructors and designers to avoid mould problems in their buildings.

Keyword: Mould fungus; Concrete walls; Building mycology;; Hygrothermal performance.

Lista de ilustrações

- Figura 1:** Forma típica de uma Curva de Sorção Isotérmica, para materiais porosos, com a indicação de cada região de armazenamento de umidade. ... 28
- Figura 2:** Curvas de Sorção Isotérmica para diferentes materiais de construção, com efeito de histerese..... 28
- Figura 3:** Coeficiente de transporte líquido (sucção e redistribuição) para alguns materiais, à 20°C 34
- Figura 4:** Esquemática dos processos de transporte de umidade de acordo com seus potenciais..... 35
- Figura 5:** Demonstração do atraso e amortecimento térmico. 37
- Figura 6:** Representação do efeito do vento sobre as superfícies de um edifício. 49
- Figura 7:** Correntes de ar geradas nos ambientes internos devido as diferenças de pressão causadas pelo vento..... 50
- Figura 8:** Ventilação gerada pelo efeito chaminé..... 51
- Figura 9:** Taxa de liberação de umidade média para uma pessoa adulta, de acordo com a atividade que pratica..... 53
- Figura 10:** Ciclo de vida dos fungos filamentosos 55
- Figura 11:** Representação de bolor desenvolvido, com formação de conídeos, liberação de esporos e penetração de hifas no substrato 58
- Figura 12:** Isopletas para germinação dos esporos (à esquerda) e crescimento dos micélios (à direita), para a classe A (acima) e classes B/C (abaixo), considerando substrato classe 0 (meio de cultura ótimo). 65
- Figura 13:** À esquerda: Tempo necessário (em dias) para a germinação dos esporos; À direita: Taxa de crescimento dos micélios (em mm/dia); Ambos para a classe A (acima) e B/C (abaixo). Todos os gráficos relativos ao substrato categoria 0 (meio de cultura ótimo). 67
- Figura 14:** À esquerda: Tempo necessário (em dias) para a germinação dos esporos; À direita: Taxa de crescimento dos micélios (em mm/dia); Ambos sobre substrato classe I (acima) e substrato classe II (abaixo). Todas as curvas referentes às espécies pertencentes à classe B/C. 68
- Figura 15:** Diagrama esquemático do crescimento dos fungos ao longo do tempo, de acordo com o substrato. 69

Figura 16: Esquema ilustrativo do esporo considerado por Sedlbauer (2001), em seu modelo Bio-higrotérmico.....	70
Figura 17: Valores da resistência à difusão do septo do esporo (S_d) em dependência da umidade relativa.....	72
Figura 18: Função de armazenamento de umidade do esporo.	73
Figura 19: Obtenção da umidade relativa necessária para germinação dos esporos, em função da temperatura superficial da parede.	74
Figura 20: Obtenção do teor de umidade crítico, em função da umidade relativa.	74
Figura 21: Exemplo de interface do software WUFI-Plus®; à esquerda acima: visualização da “árvore do projeto”; à esquerda abaixo: geometria da edificação; à direita: escolha do arquivo de dados climáticos, no caso, referente ao município de Campinas-SP.	76
Figura 22: Exemplo WUFI-Plus®: detalhamento de uma parede, no caso com revestimento de 0,25 cm de textura acrílica (externa), 10 cm de concreto e outros 0,25 cm de revestimento com textura acrílica (interna).	77
Figura 23: Exemplo de entrada de dados: teor de umidade inicial dos esporos (30%) e classe de substrato (classe I).....	78
Figura 24: Exemplo de entrada de dados: umidade relativa e temperatura em determinada superfície, ao longo do tempo.	79
Figura 25: Exemplo de resultados fornecidos pelo WUFI-Bio. Acima, as curvas do teor de umidade calculado no interior esporo (azul) e do teor de umidade crítico (vermelho), acompanhadas da luz indicativa (amarela). Abaixo, o crescimento acumulado ao longo do ano, atingindo um índice de crescimento dos micélios da ordem de 0,7.	80
Figura 26: Planta baixa de apartamento tipo, empreendimento A.	83
Figura 27: Vista da edificação	84
Figura 28: Ocorrência leve de bolor em unidade habitacional	85
Figura 29: Ocorrência acentuada de bolor em parede.	85
Figura 30: Bolor em parede de dormitório	86
Figura 31: Bolor em paredes de dormitórios	86
Figura 32: Planta baixa das casas geminadas	87
Figura 33: Vista de uma casa, com duas unidades habitacionais.	88

Figura 34: Vista de rua do empreendimento	89
Figura 35: Bolor em dormitório, notar que a proliferação se espalha até o teto.	89
Figura 36: Bolor em dormitório	90
Figura 37: Bolor em dormitório	90
Figura 38: Bolor em banheiro	91
Figura 39: Bolor em canto de paredes	91
Figura 40: Planta baixa de apartamento tipo, empreendimento C.	92
Figura 41: Vista geral do empreendimento.....	93
Figura 42: Bolor em parede de dormitório, marcado por tentativas de limpeza	94
Figura 43: Bolor em dormitório	94
Figura 44: Bolor em canto de paredes	95
Figura 45: Bolor em parede de dormitório. Notar diferença entre a parede externa (direita) e interna (esquerda)	95
Figura 46: Bolor em dormitório, agravado no canto das paredes	96
Figura 47: Bolor em dormitório	96
Figura 48: Perfil de temperatura e umidade relativa do ar, ao longo do ano, para a cidade de São Paulo.	98
Figura 49: Perfil de temperatura e umidade relativa do ar, ao longo do ano, para a cidade de Campinas.	99
Figura 50: Composição esquemática da parede de blocos cerâmicos utilizada nas simulações computacionais.	100
Figura 51: Umidade média ao longo do perfil da parede de concreto, após construção em janeiro	102
Figura 52: Umidade média ao longo do perfil da parede de concreto, após construção em julho	102
Figura 53: Curva da temperatura do solo ao longo do ano.	103
Figura 54: Apartamento intermediário	106
Figura 55: Apartamento térreo	106

Figura 56: Apartamento de cobertura.....	106
Figura 57: Empreendimento A – Comparativo do índice de crescimento dos micélios.....	106
Figura 58: Apartamento intermediário	107
Figura 59: Apartamento térreo	107
Figura 60: Apartamento de cobertura.....	107
Figura 61: Empreendimento C - Índice de crescimento dos micélios.....	108
Figura 62: Orientação Norte.....	109
Figura 64: Orientação Leste.....	109
Figura 63: Orientação Sul	109
Figura 65: Orientação Oeste	109
Figura 66: Comparativo do índice de crescimento dos micélios para as quatro orientações - Empreendimento A	110
Figura 67: Orientação Norte	110
Figura 68: Orientação Sul	110
Figura 69: Orientação Leste.....	111
Figura 70: Orientação Oeste	111
Figura 71: Comparativo do índice de crescimento dos micélios para as quatro orientações - Empreendimento B	111
Figura 72: Orientação Norte.....	112
Figura 74: Orientação Leste.....	112
Figura 73: Orientação Sul	112
Figura 75: Orientação Oeste	112
Figura 76: Comparativo do índice de crescimento dos micélios para as quatro orientações - Empreendimento C.....	113
Figura 77: Ventilação 0,5/h.....	114
Figura 79: Ventilação 2/h	114
Figura 78: Ventilação 1/h	114

Figura 80: Ventilação 3/h	114
Figura 81: Ventilação 4/h	115
Figura 82: Ventilação 5/h	115
Figura 83: Ventilação "sazonal"	115
Figura 84: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com a taxa de ventilação – Empreendimento A.....	115
Figura 85: Ventilação 0,5/h	116
Figura 86: Ventilação 1/h	116
Figura 87: Ventilação 2/h	116
Figura 88: Ventilação 3/h	116
Figura 89: Ventilação 4/h	116
Figura 90: Ventilação 5/h	116
Figura 91: Empreendimento B - Ventilação "sazonal"	117
Figura 92: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com a taxa de ventilação – Empreendimento B.....	117
Figura 93: Ventilação 0,5/h	118
Figura 94: Ventilação 1/h	118
Figura 95: Ventilação 2/h	118
Figura 96: Ventilação 3/h	118
Figura 97: Ventilação 4/h	118
Figura 98: Ventilação 5/h	118
Figura 99: Ventilação "sazonal"	119
Figura 100: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com a taxa de ventilação – Empreendimento C.....	119
Figura 101: 2 ocupantes, ventilação 1/h.....	121
Figura 102: 3 ocupantes, ventilação 1/h.....	121
Figura 103: 4 ocupantes, ventilação 1/h.....	121

Figura 104: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes para ventilação de 1/h – Empreendimento A.....	122
Figura 105: 2 ocupantes, ventilação 3/h.....	122
Figura 106: 3 ocupantes, ventilação: 3/h.....	122
Figura 107: 4 ocupantes, ventilação 3h.....	123
Figura 108: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes para ventilação de 3 renovações/hora – Empreendimento A	123
Figura 109: 2 ocupantes, ventilação 5/h.....	124
Figura 110: 3 ocupantes, ventilação 5/h.....	124
Figura 111: 4 ocupantes, ventilação 5/h.....	124
Figura 112: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes para ventilação de 5 renovações/hora – Empreendimento A	124
Figura 113: 2 ocupantes, ventilação 1/h.....	125
Figura 114: 3 ocupantes, ventilação 1/h.....	125
Figura 115: 4 ocupantes, ventilação 1/h.....	125
Figura 116: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes para ventilação de 1 renovação/hora – Empreendimento B	126
Figura 117: 2 ocupantes, ventilação 3/h.....	126
Figura 118: 3 ocupantes, ventilação 3/h.....	126
Figura 119: 4 ocupantes, ventilação 3/h.....	127
Figura 120: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes para ventilação de 3 renovações/hora – Empreendimento B	127
Figura 121: 2 ocupantes, ventilação 5/h.....	128
Figura 122: 3 ocupantes, ventilação 5/h.....	128
Figura 123: 4 ocupantes, ventilação 5/h.....	128

Figura 124: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes para ventilação de 5 renovações/hora – Empreendimento B	128
Figura 125: 2 ocupantes, ventilação 1/h.....	129
Figura 126: 3 ocupantes, ventilação 1/h.....	129
Figura 127: 4 ocupantes, ventilação 1/h.....	129
Figura 128: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes para ventilação de 1 renovação/hora – Empreendimento C.	130
Figura 129: 2 ocupantes, ventilação 3/h.....	130
Figura 130: 3 ocupantes, ventilação 3/h.....	130
Figura 131: 4 ocupantes, ventilação 3/h.....	131
Figura 132: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes, para ventilação de 3 renovações/hora – Empreendimento C.	131
Figura 133: 2 ocupantes, ventilação 5/h.....	132
Figura 134: 3 ocupantes, ventilação 5/h.....	132
Figura 135: 4 ocupantes, ventilação 5/h.....	132
Figura 136: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes para ventilação de 5 renovações/hora – Empreendimento C.	132
Figura 137: Parede de concreto	134
Figura 138: Parede de concreto com camada de isolante EPS.....	134
Figura 139: Parede de blocos cerâmicos	134
Figura 140: Parede de tijolos maciços.....	134
Figura 141: Parede de concreto com aditivo incorporador de ar.	134
Figura 142: Empreendimento A, ocupação 3, ventilação 1/h - Comparativo do índice de crescimento dos micélios para os 5 diferentes sistemas de paredes	135
Figura 143: Parede de concreto	135

Figura 144: Parede de concreto com camada de isolante EPS.....	135
Figura 145: Parede de blocos cerâmicos	136
Figura 146: Parede de tijolos maciços.....	136
Figura 147: Parede de concreto com aditivo incorporador de ar.	136
Figura 148: Empreendimento B, ocupação 3, ventilação “sazonal” - Comparativo do índice de crescimento dos micélios para os 5 diferentes sistemas de paredes	136
Figura 149: Parede de concreto	137
Figura 150: Parede de concreto com camada de isolante EPS	137
Figura 151: Parede de blocos cerâmicos	137
Figura 152: Parede de tijolos maciços.....	137
Figura 153: Parede de concreto com aditivo incorporador de ar.	138
Figura 154: Empreendimento C, ocupação 4, ventilação 3/h - Comparativo do índice de crescimento dos micélios para os 5 diferentes sistemas de paredes	138
Figura 155: Condição inicial (01/janeiro): UR = 75%.	141
Figura 156: Perfil de umidade em 09/02 às 8:00h (verão, manhã).	142
Figura 157: Perfil de umidade em 09/02 às 20:00h (verão, noite)	142
Figura 158: Perfil de umidade em 07/07 às 8:00h (inverno, manhã).	143
Figura 159: Perfil de umidade em 07/07 às 20:00h (inverno, noite).....	144
Figura 160: Umidade relativa superficial interna para as paredes com concreto comum e com concreto hipotético com resistência à difusão igual à cerâmica.	145
Figura 161: Comparativo do índice de crescimento dos micélios previstos para as duas paredes analisadas.....	145
Figura 162: Temperatura superficial e ponto de orvalho ao longo do período simulado, empreendimento B, 3 ocupantes, ventilação “sazonal” e orientação sul. Não há condensação superficial.	147
Figura 163: Umidade relativa superficial interna, ao longo do período simulado: Empreendimento B, 3 ocupantes, ventilação “sazonal” e orientação sul.	148

Figura 164: Índice de crescimento dos micélios previsto, em relação à umidade inicial da parede.....	149
Figura 165: Propriedades higrotérmicas do concreto: à esquerda, condutividade térmica e coeficiente de transporte líquido em função do teor de umidade; à direita, fator de difusão de umidade e função de armazenamento de umidade.....	163
Figura 166: Propriedades higrotérmicas da textura acrílica: à esquerda, condutividade térmica e coeficiente de transporte líquido em função do teor de umidade; à direita, fator de difusão de umidade e função de armazenamento de umidade.....	164
Figura 167: Propriedades higrotérmicas da cerâmica: à esquerda, condutividade térmica e coeficiente de transporte líquido em função do teor de umidade; à direita, fator de difusão de umidade e função de armazenamento de umidade.....	165
Figura 168: Propriedades higrotérmicas do tijolo cerâmico maciço: à esquerda, condutividade térmica e coeficiente de transporte líquido em função do teor de umidade; à direita, fator de difusão de umidade e função de armazenamento de umidade.....	166
Figura 169: Propriedades higrotérmicas da argamassa: à esquerda, condutividade térmica e coeficiente de transporte líquido em função do teor de umidade; à direita, fator de difusão de umidade e função de armazenamento de umidade.....	167
Figura 170: Propriedades higrotérmicas do concreto com aditivo incorporador de ar: à esquerda, condutividade térmica e coeficiente de transporte líquido em função do teor de umidade; à direita, fator de difusão de umidade e função de armazenamento de umidade.....	168
Figura 171: Propriedades higrotérmicas do EPS: à esquerda, condutividade térmica e coeficiente de transporte líquido em função do teor de umidade; à direita, fator de difusão de umidade e função de armazenamento de umidade.....	169
Figura 172: Diagrama de fases da água	170
Figura 173: Diagrama psicométrico à 760m de altitude.....	175

Lista de tabelas

Tabela 1: Fator de resistência à difusão de vapor d'água do material (μ) para diversos materiais de construção, de acordo com a região de umidade.	31
Tabela 2: Mecanismos de transporte considerados por Kunzel (1995) e seus respectivos potenciais.....	44
Tabela 3: Mecanismos de biodeterioração por diversos microrganismos e os respectivos materiais afetados	59
Tabela 4: Resumo de condições para o desenvolvimento de fungos	63
Tabela 5: Escala do Índice de crescimento dos micélios	79
Tabela 6: Tamanho das janelas e relações com as áreas de piso.....	84
Tabela 7: Tamanho das janelas e relações com áreas de piso.	88
Tabela 8: Tamanho das janelas e relação com áreas de piso, empreendimento C.....	93
Tabela 9: Índices de crescimento dos micélios para as simulações apresentadas na seção 6.4.	139
Tabela 10: Índices de crescimento dos micélios obtidos na seção 7.5, que compara a previsão de crescimento de bolores para diferentes sistemas construtivos.....	140

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SINAT	Sistemas Nacional de Avaliações Técnicas
OMS	Organização Mundial de Saúde
DIN	<i>Deutsches Institut Für Normung</i> - Instituto Alemão de Normalização
IBP	<i>Fraunhofer Institute for Building Physics</i>
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LIM	<i>Lowest Isopleth for Mould</i> – Menor Isopleta para o mofo

Lista de Símbolos

- g_v : densidade do fluxo da difusão de vapor d'água ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
- δ : permeabilidade ao vapor d'água do ar estagnado (kg/msPa)
- μ : fator de resistência à difusão de vapor d'água do material (-)
- p : pressão parcial de vapor (Pa)
- g_w : densidade do fluxo líquido ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
- D_Φ : coeficiente de condutividade líquida (kg/m.s)
- Φ : umidade relativa (%)
- D_w : coeficiente de transporte capilar do material (m^2/s)
- T : temperatura ($^\circ\text{C}$)
- η : viscosidade da água (kg/ms)
- R_T : resistência térmica total da parede ($\text{m}^2\text{K/W}$)
- U : coeficiente global de transmissão térmica da parede ($\text{W/m}^2\text{K}$)
- R_s : resistência térmica superficial ($\text{m}^2\text{K/W}$)
- λ : condutibilidade térmica (W/mK)
- c : calor específico (J/kgK)
- ρ : densidade aparente (kg/m^3)
- e : espessura (m)
- C_T : capacidade térmica ($\text{kJ/m}^2\text{K}$)
- H : entalpia (J/m^3)
- w : teor de umidade (kg/m^3)
- w_e : conteúdo de água congelada (kg/m^3)
- c_w : calor específico da água líquida (J/kgK)
- c_e : calor específico do gelo (J/kgK)
- h_e : entalpia da fusão do gelo (J/kg)

b : suplemento de condutividade térmica (%/M.-%);

S_h : ganhos ou perdas de calor (J/m^3s)

h_v : calor latente da mudança de fase (J/kg)

q : densidade do fluxo de calor (W/m^2)

t_a : temperatura do ambiente ($^{\circ}C$)

θ : temperatura superficial ($^{\circ}C$)

α_c : coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m^2)

α_r : coeficiente de transferência de calor por radiação (W/m^2)

β_p : coeficiente de transferência de vapor d'água ($kg/m^2.s.Pa$)

α_s : coeficiente de absorção de onda curta (-)

I : radiação solar (W/m^2)

P_d : quantidade de chuva dirigida (kg/m^2s)

p_d : coeficiente de chuva dirigida (s/m)

P_n : precipitação (kg/m^2s)

v_v : velocidade do vento normal (m/s)

a_r : coeficiente de absorção da fachada (-)

q : densidade do fluxo de calor (W/m^2)

S_w : perdas ou o ganhos de umidade (kg/m^3s)

δ_p : permeabilidade ao vapor d'água do material ($kg/msPa$)

n : índice de renovação do ar (ren/h)

Q_v : fluxo de calor entre o ar interno e externo (J/s)

m_v : fluxo de massa de ar (kg/s)

V : volume (m^3)

x : teor de umidade do ar (kg/kg)

W_v : o fluxo de umidade entre o ar externo e interno (kg/s)

S_d : espessura de camada de ar com resistência à difusão equivalente (m)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Justificativa do trabalho	22
1.2	Objetivos do trabalho	23
1.3	Estrutura do trabalho	23
2	O DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DE EDIFICAÇÕES	25
2.1	Transporte e armazenamento de umidade	25
2.1.1	Armazenamento de umidade	25
2.1.2	Transporte de umidade	29
2.2	Transporte e armazenamento de calor	36
2.2.1	Efeitos higrícos sobre as propriedades térmicas dos materiais	38
2.3	Transferência de calor e umidade nas superfícies dos componentes das edificações	41
2.4	Modelo de transporte simultâneo de calor e umidade	44
2.5	Ventilação dos espaços interiores	48
2.6	Liberação interna de vapor d'água	53
3	BOLORES EM EDIFICAÇÕES	54
3.1	O bolor	54
3.2	Problemas ocasionados pelos bolores em edificações.	55
3.2.1	Danos à saúde dos usuários	55
3.2.2	Degradação dos materiais de construção	56
3.3	Modelos de previsão para a ocorrência de bolores no interior de edificações	59
3.3.1	Condições para o desenvolvimento de bolores	60
3.3.2	O modelo das Isopletras	64
3.3.3	O modelo Bio-higrotérmico	69
4	SOFTWARES UTILIZADOS	75
4.1	Software de simulação higrotérmica Wufi-Plus®	75
4.2	Software WUFI-BIO®	77
5	MÉTODO DE TRABALHO	81
5.1	Empreendimentos analisados	81
5.2	Procedimento computacional	97

6	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	105
6.1	Análise da influência da posição vertical do apartamento	105
6.1.1	Empreendimento A	105
6.1.2	Empreendimento C	107
6.2	Influência da orientação	109
6.2.1	Empreendimento A	109
6.2.2	Empreendimento B	110
6.2.3	Empreendimento C	112
6.3	Influência da ventilação	114
6.3.1	Empreendimento A	114
6.3.2	Empreendimento B	116
6.3.3	Empreendimento C	117
6.4	Influência da ocupação	120
6.4.1	Empreendimento A	121
6.4.2	Empreendimento B	125
6.4.3	Empreendimento C	129
6.5	Comparativo com outros sistemas construtivos	133
6.5.1	Empreendimento A	133
6.5.2	Empreendimento B	135
6.5.3	Empreendimento C	137
7	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	139
8	CONCLUSÃO	150
	REFERÊNCIAS	152
	ANEXOS.....	156
	APÊNDICE A: CONCEITOS DE PSICROMETRIA.....	170

1 INTRODUÇÃO

O sistema construtivo com paredes de concreto constitui-se no emprego de paredes maciças de concreto, que assumem as funções de vedação e suporte estrutural, simultaneamente, substituindo o sistema convencional composto por vigas, pilares e alvenaria de vedação. Segundo Misurelli e Massuda (2009), este sistema foi desenvolvido buscando-se a industrialização da construção, e já era mundialmente conhecido nas décadas de 70 e 80. Porém, àquela época não foi amplamente utilizado, pois sua viabilidade econômica era possível apenas para amplos empreendimentos, com grande número de unidades construídas sequencialmente.

Recentemente, o advento de programas habitacionais de interesse social viabilizou a execução de grandes empreendimentos, comumente com milhares de unidades cada. Com isto, muitas construtoras começaram a utilizar o sistema construtivo com paredes de concreto. De acordo com reportagem de Santos (2016), no segundo semestre de 2015, 52% das unidades em construção através do Programa Minha Casa Minha Vida utilizavam este sistema construtivo.

Contudo, este aumento em sua utilização acabou por evidenciar patologias possivelmente associadas a este sistema. Dentre elas, a ocorrência de bolores no interior de habitações, situação que tem causado preocupação nos órgãos de financiamento, construtoras e moradores. Com o objetivo de prevenir este problema, foi incluída na revisão 03 da diretriz SINAT nº 001 – “Diretriz para Avaliação Técnica de paredes estruturais de concreto moldadas no local” (SISTEMA NACIONAL DE AVALIAÇÕES TÉCNICAS, 2017), o critério de limitação horária da ocorrência de condensação superficial de vapor d’água nas paredes das edificações. O total de horas em que há risco de ocorrência de condensação superficial, no período de um ano, obtido por simulação computacional, não deve exceder em mais de 20% o mesmo parâmetro para outro sistema construtivo tido como referêncica, no caso, alvenaria com blocos cerâmicos de 140mm e 20mm de revestimento de argamassa em cada face. Entretanto, ainda não se sabe ao certo qual será a eficácia prática deste critério.

Neste contexto, o presente trabalho busca estudar quais são as condições necessárias ao desenvolvimento de bolores no interior de edificações. E, além, qual

a influência do desempenho higrotérmico das edificações para que estas condições sejam atingidas.

Para auxiliar no entendimento de como os bolores desenvolvem-se em edificações, foram vistoriados diversos empreendimentos habitacionais que apresentam problemas de proliferação de bolores em suas unidades, todos construídos com paredes de concreto.

Em seguida, foi aplicado um modelo de previsão de ocorrência de bolores, proposto na literatura, a três destes empreendimentos vistoriados. Isto foi feito por meio de simulações computacionais, variando-se certos parâmetros entre cada simulação (taxa de ocupação, ventilação, orientação, etc.). Desta forma, busca-se identificar situações com risco de ocorrência de bolores nestes empreendimentos, permitindo uma melhor análise deste fenômeno.

1.1 Justificativa do trabalho

Considerando o aumento na utilização do sistema construtivo com paredes de concreto, somado à recorrente ocorrência de bolores nestas edificações e a crescente preocupação com o desempenho de habitações, especialmente após a publicação da NBR 15.575 (ABNT, 2013): “Desempenho de edificações habitacionais”, têm-se a importância deste trabalho, em se estudar as condições para a formação de bolores em edificações, especialmente em habitações construídas com paredes de concreto. A esta área multidisciplinar, que estuda o desenvolvimento de microrganismos em edificações, convencionou-se o termo Micologia das Edificações. O presente trabalho busca, então, contribuir para a escassa literatura nacional acerca deste tema.

Cabe ressaltar que a ocorrência de bolores em edificações não representa apenas um problema estético, pois além do prejuízo financeiro de reparação, pode também ocasionar danos à saúde dos habitantes. Como será visto posteriormente neste trabalho, problemas de umidade e proliferação de bolores em edificações estão diretamente associados a problemas de saúde, como: asma, infecções respiratórias, rinites alérgicas, tosse, sibilância e dispneia (SEDLBAUER, 2001; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2009).

1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho é analisar criticamente o fenômeno de ocorrência de bolores no interior de edificações, especialmente em habitações construídas com paredes maciças de concreto. Visa-se identificar como condições de ocupação, ventilação, posição e orientação influenciam o risco de proliferação de bolores nestas habitações.

Para que bolores desenvolvam-se em edificações, devem ser atendidas certas condições ambientais, principalmente combinações de umidade e temperatura adequadas, ao longo de determinado período, sobre substrato propício. Sendo assim, busca-se como objetivo secundário esclarecer quais são estas condições, de acordo com um modelo de previsão de ocorrência de bolores proposto na literatura internacional, permitindo uma melhor análise do problema e auxiliando na elaboração de um critério nacional que evite a ocorrência de bolores em edificações brasileiras.

1.3 Estrutura do trabalho

No capítulo dois estão descritos conceitos de desempenho higrotérmico de edificações, notadamente mecanismos de transporte e armazenamento de umidade e sua influência sobre as propriedades térmicas dos componentes de edificações. É apresentado um modelo de transporte simultâneo de calor e massa, proposto por Kunzel (1995).

O capítulo três trata sobre o bolor, desde sua definição, consequências às edificações e habitantes, até as condições necessárias para a sua ocorrência. Neste capítulo é apresentado o modelo de previsão de ocorrência de bolores empregado no desenvolvimento deste trabalho, proposto por Sedlbauer (2001).

O capítulo quatro apresenta os softwares utilizados para a execução deste trabalho: WUFI-Plus® e WUFI-Bio®.

O capítulo cinco contém os métodos do trabalho, com o relato das vistorias realizadas em empreendimentos afetados e a descrição de como foram conduzidas as simulações computacionais e os parâmetros adotados.

No capítulo seis estão apresentadas as simulações computacionais realizadas e os respectivos resultados obtidos. Acompanhando os resultados estão comentários referentes a cada condição analisada.

O capítulo sete apresenta as análises dos resultados obtidos e simulações complementares, que permitem uma análise aprofundada do problema.

O capítulo oito encerra o trabalho, com as conclusões.

Ao final, há apêndice com conceitos de psicrometria, essenciais para o entendimento dos fenômenos higrotérmicos que ocorrem em edificações.

2 O DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

No Brasil, o conceito de desempenho térmico em edificações é bem estabelecido e amplamente estudado. Entretanto, o conceito de desempenho “higrotérmico” ainda é pouco difundido no cenário nacional.

O desempenho higrotérmico é caracterizado pelo estudo conjunto do comportamento térmico e do comportamento da umidade nas edificações e seus componentes.

Embora muitas vezes negligenciada, a umidade contida nos materiais e componentes das edificações (em forma de vapor, líquido ou sólido) pode influenciar o desempenho térmico das edificações, além de estar diretamente associada com efeitos deteriorantes das edificações, por exemplo, pelo desenvolvimento de bolores, corrosão de metais, eflorescências, movimentações higroscópicas e deterioração de pinturas e revestimentos.

Desta maneira, o estudo do desempenho higrotérmico busca analisar como as edificações comportam-se quando expostas a determinadas condições climáticas e ambientais. Ou seja, como os seus componentes, sistemas e materiais se comportam sob as condições de temperatura e umidade do ambiente, resultando em determinadas temperaturas e umidades no ar dos ambientes internos, bem como nas superfícies e no interior dos componentes das edificações.

A seguir estão apresentadas algumas propriedades que afetam o desempenho higrotérmico das edificações.

2.1 Transporte e armazenamento de umidade

A umidade pode ocorrer nas edificações em seus três estados: líquido (água), gasoso (vapor d'água) e sólido (gelo). O balanço da umidade no interior de um material poroso é descrito por meio de dois processos: o transporte e o armazenamento de umidade.

2.1.1 Armazenamento de umidade

Quando o ar úmido entra em contato com uma superfície sólida, as moléculas de vapor d'água tendem a aderir nestas superfícies, por forças de atração eletrostáticas ou de Van der Waals. Este fenômeno é chamado adsorção do vapor

d'água e ocorre nas superfícies dos sólidos, ou seja, para materiais porosos, na superfície externa e nas superfícies do interior dos poros. Assim, a quantidade de vapor d'água que um sólido adsorve está relacionada com a sua área superficial total e a umidade relativa do ar circundante. O material do qual é constituído também é relevante, pois diferentes materiais têm características intrínsecas de afinidade com a umidade. Materiais de maior afinidade com a umidade são chamados materiais higroscópicos (TRECHSEL ET AL, 2009).

O armazenamento de umidade em materiais porosos divide-se em três regiões, conforme definidas por Krus (1996):

1) Região de sorção de umidade:

Esta região é caracterizada pelo acúmulo de umidade no material por meio da sorção de vapor d'água contido no ar ambiente. Para o intervalo de temperaturas encontradas nas edificações, as alterações na função de armazenamento de umidade dos materiais, causadas pela temperatura, podem ser negligenciadas. Assim, a função de armazenamento de umidade dos materiais é representada por *Curvas de Sorção Isotérmicas*.

Dependendo da umidade contida no material e no ambiente, pode ocorrer a adsorção, ou seja, a retenção de umidade no material, ou o processo inverso, chamado dessorção, quando o material libera umidade ao ambiente mais seco. Para a maioria dos materiais de construção, as curvas de adsorção e dessorção são pouco distintas e, assim, obtém-se uma curva de sorção única, com a média entre os dois processos. Porém, certos materiais apresentam diferenças significativas entre a adsorção e a dessorção, efeito chamado histerese, que deve ser considerado.

Quando a umidade relativa do ambiente é de até 15% ocorre o recobrimento monomolecular de vapor d'água sobre as superfícies sólidas. A partir de 15% de umidade relativa do ambiente inicia-se o recobrimento multimolecular.

A partir de 50% de umidade relativa do ambiente, inicia-se o fenômeno conhecido como condensação capilar. Isto ocorre, pois, a geometria dos poros faz com que a pressão de saturação seja menor em seu interior do que ao ar livre. Quanto menor o raio do poro, menor será a pressão de saturação em seu interior. Desta maneira, a partir de 50% de umidade relativa do ar ambiente, começa a

ocorrer a condensação do vapor d'água no interior dos poros de menor raio, da ordem de 3×10^{-9} m.

2) Região de umidade capilar

Quanto maior a umidade relativa do ambiente, mais capilares começam a ser preenchidos com água de condensação. A partir de 95% de umidade relativa do ar, inicia-se a condição chamada região de umidade capilar. Nesta região os poros menores já se encontram totalmente preenchidos com água e dá-se início à condensação nos poros de maiores dimensões, até que se atinja a saturação capilar do material. A saturação capilar, também chamada de teor de umidade livre, é definida como a máxima quantidade de umidade que um material pode conter por meio da adsorção natural à pressão normal, ou seja, sem influência de forças externas. Nesta região há um aumento significativo do teor de umidade do material.

A região de umidade capilar também é atingida quando um material poroso-capilar entra em contato com a água (líquida), absorvendo-a por pressão de sucção capilar.

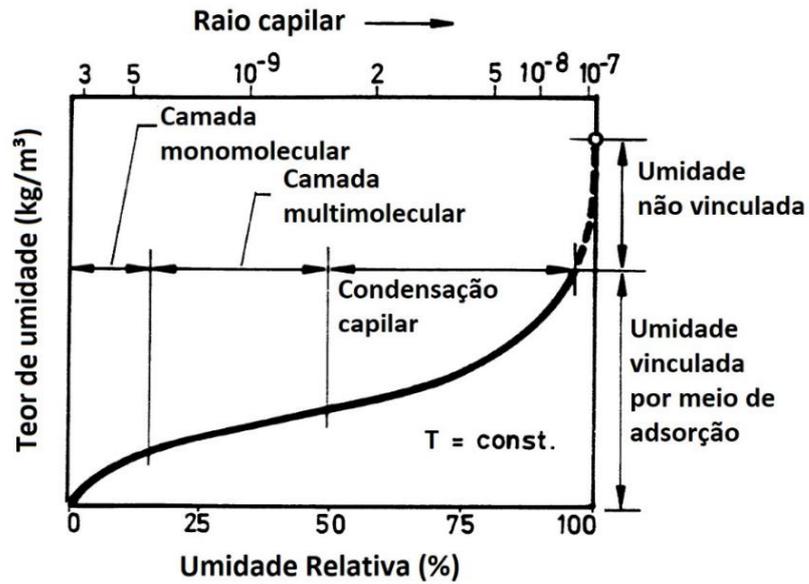
3) Região de supersaturação

Mesmo quando certo material fica exposto a uma umidade relativa do ar de 100%, até que se atinja o equilíbrio, resultando em sua saturação capilar, nem todo o volume dos seus poros é completamente preenchido com água. Isso ocorre, pois, pequenas bolhas de ar ficam aprisionadas no interior dos poros. Para que todo o volume dos poros seja preenchido com água é necessária a atuação de forças externas, que aumentam a pressão local, possibilitando a diluição ou a expulsão das bolhas de ar aprisionadas no interior do material. Quando isto acontece, atinge-se a região de supersaturação, onde todo o espaço dos poros pode ser preenchido com água.

Esta região dificilmente ocorre em materiais porosos sob as condições normais de uso de edificações.

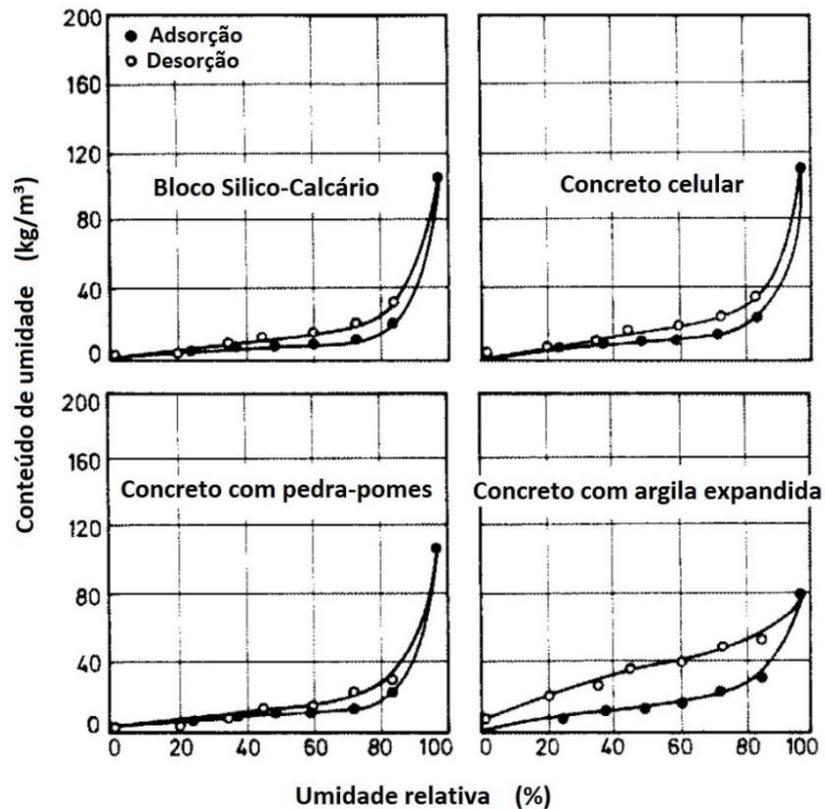
A Figura 1, apresenta um modelo típico de Curva de Sorção Isotérmica, para materiais porosos higroscópicos. Na Figura 2 são apresentadas Curvas de Sorção Isotérmicas, contendo a adsorção e a dessorção, para alguns materiais de construção que possuem o efeito de histerese.

Figura 1: Forma típica de uma Curva de Sorção Isotérmica, para materiais porosos, com a indicação de cada região de armazenamento de umidade.



Fonte: Adaptado de Krus (1996)

Figura 2: Curvas de Sorção Isotérmica para diferentes materiais de construção, com efeito de histerese.



Fonte: Adaptado de Künzel (1995)

Da observação dos gráficos da Figura 2, têm-se, por exemplo, que quando o concreto com argila expandida fica exposto a um ambiente com umidade relativa de aproximadamente 95%, até que se atinja o equilíbrio, o material conterá 80kg/m³ de umidade. Importante citar que o teor de umidade de um material se refere à quantidade de umidade contida no material independentemente de sua fase, ou seja, a soma de vapor d'água, água e gelo.

De acordo com ABCB (2016), a propriedade de armazenamento de umidade dos materiais pode ser estratégica no controle da umidade das edificações. A seleção de materiais com alta capacidade de armazenamento de umidade pode possibilitar que componentes da edificação contribuam na estabilização da umidade do ar, retendo ou liberando umidade de acordo com as condições do ambiente.

Ramos (2007) demonstrou que a inércia higroscópica dos componentes das edificações é eficaz no controle da umidade de ambientes, tanto em variações de umidade de ciclo curto (diárias), como em ciclos longos.

2.1.2 Transporte de umidade

O transporte de umidade ocorre através dos poros dos materiais e pode ser dividido entre o transporte da umidade em forma gasosa e o transporte líquido (KRUS, 1996):

- Transporte de vapor d'água

O transporte de vapor d'água é movido pela diferença de pressão parcial de vapor entre dois pontos do espaço, de forma que a umidade é transportada da região com maior pressão parcial em direção à de menor pressão parcial.

Quando o transporte da umidade em estado gasoso acontece em estruturas com poros demasiadamente pequenos, ocorre o choque entre as moléculas de vapor d'água e as paredes dos poros. Nestes casos, o processo de transporte de umidade é chamado de efusão, e ocorre em estruturas de poros com raios da ordem de 10⁻⁸ (KRUS, 1996).

Quando os poros apresentam maiores dimensões, o transporte de umidade é marcado pelo choque das moléculas de vapor d'água umas contra as outras. Nestas situações, o processo de transporte é chamado de difusão.

Como a maioria dos materiais de construção possuem um espectro de poros que possibilita a ocorrência destes dois processos, e como a força motriz para ambos é a mesma, diferença de pressão parcial de vapor, os dois processos são considerados simultaneamente, adotando-se apenas a nomenclatura 'difusão de vapor d'água'.

Para os valores de temperatura e pressão encontrados em edificações, pode ser definido um coeficiente comum, que abranja ambos os processos, e que represente a resistência do material ao transporte de vapor d'água (KÜNZEL, 1995).

O fluxo de umidade pelo transporte de vapor d'água pode ser calculado pela equação:

$$g_v = -\frac{\delta}{\mu} \nabla p \quad (2.1)$$

Onde:

g_v é a densidade do fluxo de difusão de vapor d'água (kg/m²s)

δ é a permeabilidade ao vapor d'água do ar estagnado (kg/msPa)

μ é o fator de resistência à difusão de vapor d'água do material (-)

p é a pressão parcial de vapor (Pa)

O fator de resistência à difusão de vapor d'água do material (μ), representa o fator pelo qual a resistência à difusão da camada de material supera a resistência de uma camada de ar estagnado de igual espessura.

A resistência à difusão do vapor d'água independe da temperatura. Porém, experimentos demonstram que existe uma relação entre o teor de umidade do material e o seu fator de difusão. A Tabela 1 apresenta o fator de difusão do vapor d'água para alguns materiais de construção, que é obtido em experimentos para dois diferentes intervalos de umidade relativa do ar.

Tabela 1: Fator de resistência à difusão de vapor d'água do material (μ) para diversos materiais de construção, de acordo com a região de umidade.

Material	Densidade aparente (kg/m ³)	Fator de difusão do vapor d'água (-)	
		(3%-50% UR)	(50%-93%)
Concreto celular	500	7,7	7,1
Bloco Silico-Calcáreo	1700	27	18
Tijolo maciço de argila	1600	9,5	8
Placa de gesso	900	8,3	7,3
Concreto	2250	260	210
Argamassa mista	1900	19	18
Argamassa de cal	1400	7,3	6,4

Fonte: Künzel (1995)

- Transporte líquido

O transporte líquido em materiais porosos ocorre por dois processos distintos, que dependem da região de umidade em que se encontra o material. Quando na região de sorção de umidade, o transporte da água contida no material ocorre por difusão superficial. Enquanto que na região de umidade capilar, o transporte dá-se por ação capilar, processo também conhecido como capilaridade.

- Difusão superficial

Devido à adsorção de moléculas de água, há a formação de um filme sorptivo nas paredes dos poros. Para baixas umidades relativas do ar ambiente, este filme é monomolecular. Porém, com o aumento da umidade relativa, há a formação de camadas multimoleculares, aumentando a espessura do filme, e permitindo uma maior mobilidade das moléculas.

Caso exista um gradiente de umidade relativa entre dois pontos, haverá variação na espessura do filme formado. Esta diferença gera um transporte de massa no filme aderido nas paredes dos poros, para equalizar a espessura do filme.

A difusão superficial apresenta valores mais significativos para umidades relativas superiores a 50%, podendo, inclusive, superar o transporte por difusão de vapor d'água (KRUS, 1996). A mobilidade do filme sorptivo está diretamente associada à viscosidade da água e, portanto, a difusão superficial é influenciada pela temperatura.

- Condução capilar

A condução capilar ocorre apenas quando o material se encontra na região de umidade capilar, ou seja, em umidades relativas superiores a 95% ou em contato com água líquida, por exemplo quando da ocorrência de chuva incidente sobre fachadas.

Embora seja difícil estabelecer a geometria da estrutura dos poros de um material, usualmente os poros são considerados como estruturas cilíndricas, de tamanho variável, formando uma rede conectada de capilares. No interior de um cilindro parcialmente preenchido com água ocorre a formação de um menisco superficial, côncavo ou convexo, devido à tensão superficial da água e à atração entre as moléculas da água e do sólido. Esta superfície curvada gera a chamada tensão capilar, que dependendo de sua direção pode ocasionar a ascensão ou a depressão capilar do menisco. Quanto menor o raio do cilindro (poro) maior é a sua tensão capilar. Assim, considerando a estrutura de um material poroso como uma rede conectada de cilindros, os poros menores tendem a sorver a água dos poros maiores. Apenas quando os poros menores encontram-se saturados os poros maiores começam a ser preenchidos com água.

Por este motivo, quando um material poroso-capilar úmido é posicionado em contato com um material poroso-capilar seco, este último absorve umidade do primeiro até que se atinja um estado de equilíbrio. Porém, se os dois materiais possuírem diferentes tamanhos de poros, resulta-se um equilíbrio com diferentes teores de umidade entre eles, devido às diferenças de pressão capilar.

A condução capilar ocorre, então, de duas maneiras. Por meio da sucção capilar na superfície de um material em contato com água e na redistribuição da umidade já contida no material e que apresente um gradiente de teor de umidade ao longo de seu perfil. Experimentos demonstram que a redistribuição de umidade é um processo mais lento que a sucção capilar. Assim, faz-se necessário estabelecer coeficientes diferentes para o transporte líquido em materiais porosos, em dependência da situação: sucção ou redistribuição.

Similarmente à efusão e à difusão de vapor d'água, a condução capilar e a difusão superficial também ocorrem simultaneamente.

As equações para descrever o transporte líquido nos materiais porosos são deduzidas experimentalmente, e como nos experimentos não é possível distinguir por qual processo ocorre o transporte de massa mensurado, é definido um coeficiente comum, para todo o transporte líquido que ocorre em um material poroso-capilar.

De acordo com Künzel (1995), o transporte líquido pode ser descrito considerando um modelo de fluxo, pela equação:

$$g_w = -D_\phi \cdot \nabla \phi \quad (2.2)$$

Onde:

g_w é a densidade do fluxo líquido (kg/m².s)

D_ϕ é o coeficiente de condutividade líquida (kg/m.s)

Φ é a umidade relativa (%)

O coeficiente de condutividade líquida (D_ϕ) pode ser calculado pela equação:

$$D_\phi = D_w \cdot dw/d\phi \quad (2.3)$$

Onde:

D_w é o coeficiente de transporte capilar do material (m²/s)

$dw/d\phi$ é a derivada da função de armazenamento de umidade (kg/m³)

O coeficiente de transporte capilar (D_w) é uma propriedade intrínseca ao material, porém relacionado com a viscosidade da água e a sua tensão superficial, sendo, portanto, influenciado pela temperatura.

Para o intervalo de temperatura encontrados em edificações, a alteração na tensão superficial da água pode ser desprezada, e o coeficiente de transporte capilar (D_w) calculado pela equação 2.4:

$$D_w(T) = \frac{\eta_{ref}}{\eta(T)} \cdot D_{w,ref} \quad (2.4)$$

Onde:

T é a temperatura (°C)

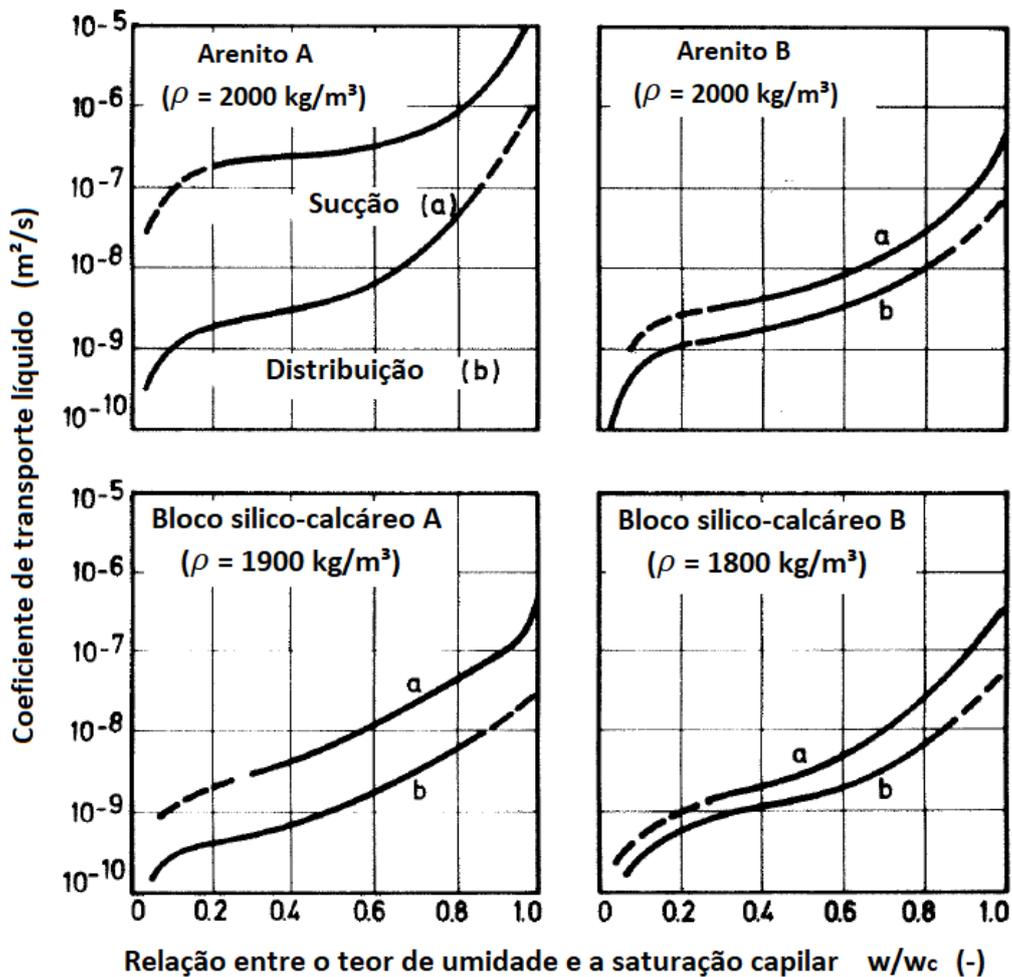
η é a viscosidade da água (kg/ms)

η_{ref} é a viscosidade da água à uma temperatura de referência (kg/m.s)

$D_{w,ref}$ é o coeficiente de transporte capilar de um material de referência (m²/s)

A Figura 3 apresenta exemplos do coeficiente de transporte líquido (D_ϕ) para alguns materiais.

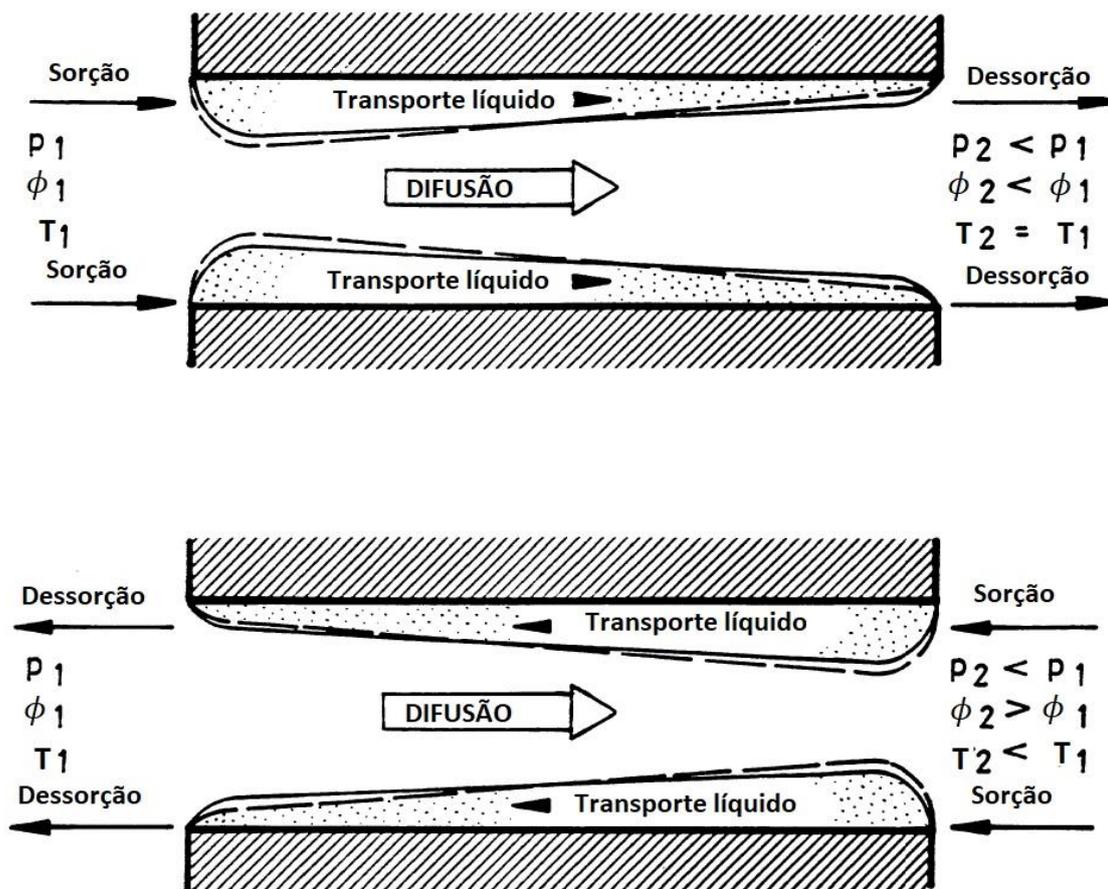
Figura 3: Coeficiente de transporte líquido (sucção e redistribuição) para alguns materiais, à 20°C



Fonte: Künzel (1995)

A Figura 4 representa a estrutura capilar de um material poroso e os processos de transporte de umidade que ocorrem através destes. Os dois mecanismos de transporte, líquido ou difusão de vapor, ocorrem por diferentes potenciais, à saber: diferenças de umidade relativa do ar (ou teor de umidade) e diferença de pressão parcial de vapor, respectivamente. A figura exemplifica a direção dos fluxos de umidade conforme as condições em cada extremidade do capilar. Nota-se que, de acordo com os potenciais, os transportes líquido e de vapor podem ocorrer em direções contrárias.

Figura 4: Esquematização dos processos de transporte de umidade de acordo com seus potenciais



Fonte: Krus (1996)

Onde:

p é a pressão parcial de vapor (Pa)

Φ é a umidade relativa (%)

T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

2.2 Transporte e armazenamento de calor

Os fenômenos térmicos que ocorrem nas edificações são brevemente abordados nesta secção. Devido à existência de farta literatura nacional acerca deste tema, não há necessidade de uma abordagem mais profunda. Dá-se maior atenção à influência da umidade contida nos materiais em suas respectivas propriedades térmicas.

Em suma, sempre que houver duas regiões do espaço com diferentes temperaturas, esta diferença de temperatura tende a desaparecer, por meio da transferência de calor de uma região à outra. Este fenômeno, chamado de transmissão de calor, ocorre por três processos distintos: convecção, radiação e condução.

A combinação destes três processos resulta, por exemplo, na transmissão de calor entre dois meios separados por uma parede, como no caso de ambientes externos e internos de uma edificação.

Nas superfícies das paredes ocorrem trocas de calor com o ar e com outros corpos, por meio de convecção e radiação, respectivamente. Enquanto que ao longo do perfil da parede ocorre transferência de calor por condução.

Este processo é influenciado basicamente por duas propriedades: a Resistência térmica e a Inércia térmica da parede.

A resistência térmica total da parede (R_t) atua de maneira a resistir à passagem de calor através da parede. É calculada de acordo com a espessura da parede (e) e a condutibilidade térmica (λ) dos seus materiais constituintes, além das resistências térmicas superficiais (R_s) interna e externa.

Normalmente é expressa pelo seu inverso, chamado Coeficiente Global de transmissão térmica (U):

$$U = \frac{1}{R_t} \quad (2.5)$$

Onde:

$$R_t = R_{si} + \frac{e}{\lambda} + R_{se} \quad (2.6)$$

Já a inércia térmica pode ser referida a ambientes ou a componentes.

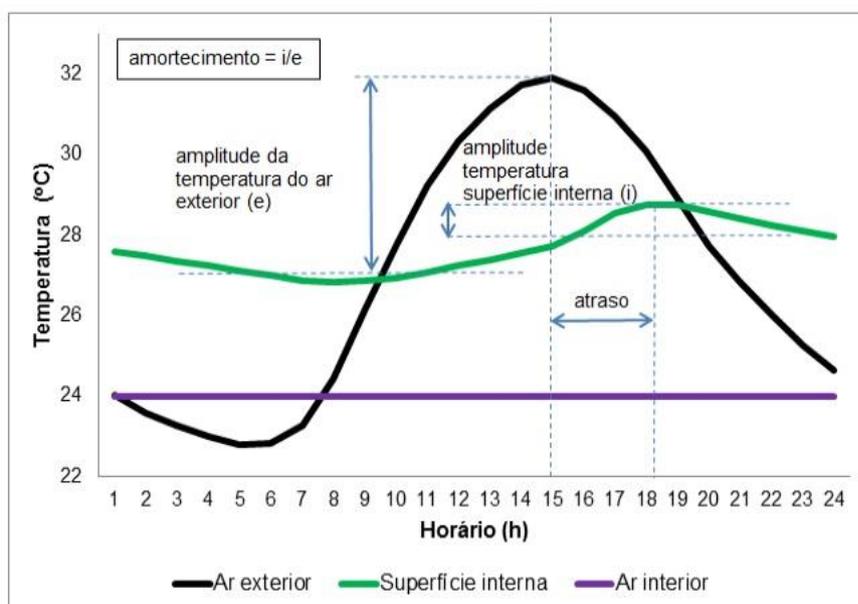
Considerando a inércia térmica de paredes, esta relaciona-se com o calor específico (c) dos materiais que a constituem, com a massa específica destes materiais e com a espessura da parede. Por definição, o calor específico equivale à quantidade de calor necessária para elevar em uma unidade a temperatura de um corpo, com uma unidade de massa. Desta maneira, quando um componente está sujeito a um fluxo de calor, parte do calor é armazenado. Isso causa dois fenômenos: o atraso e o amortecimento térmico.

Rivero (1986) descreve estes fenômenos como:

- Atraso térmico é o tempo necessário para que uma variação térmica ocorrida em um ambiente seja sentida na superfície oposta do componente de separação entre os meios, ou seja, imaginando-se que o meio externo atinja uma determinada temperatura máxima, a temperatura superficial máxima será percebida na superfície interna após decorrido o tempo do atraso térmico.

- Amortecimento térmico é a razão entre a amplitude da temperatura do ar externo e a amplitude da temperatura superficial interna. A capacidade de amortecimento é proporcional ao calor específico (c), à densidade aparente (ρ), à espessura (e) e inversamente proporcional à condutibilidade térmica (λ).

Figura 5: Demonstração do atraso e amortecimento térmico em paredes.



Fonte: Brito (2015)

Na física das construções, a inércia térmica de um componente é caracterizada por meio de sua capacidade térmica, que representa a quantidade de calor necessária para se elevar em uma unidade de temperatura uma unidade de área do determinado componente.

O Anexo 1 apresenta o Coeficiente Global de Transmissão (U) e a Capacidade térmica (Ct) para alguns sistemas construtivos usuais, conforme Morishita et al (2011).

Estes conceitos térmicos normalmente são referenciados ao material em seu estado seco. Porém, quando se considera um modelo de transporte simultâneo de calor e massa, os efeitos da umidade sobre as propriedades térmicas devem ser considerados.

2.2.1 Efeitos hídricos sobre as propriedades térmicas dos materiais

A umidade contida em um material influencia o seu comportamento térmico pois a água em seus poros possui propriedades térmicas diferentes das do ar, que preenche a totalidade dos poros quando o material se encontra em estado seco (Frota e Schiffer, 2001).

O calor armazenado nos componentes de uma edificação é dado pela sua entalpia. A entalpia de um material da edificação, em seu estado seco, é descrita por Künzel (1995) como:

$$H_s = \rho_s \cdot c_s \cdot T \quad (2.7)$$

Onde:

H_s é a entalpia do material seco (J/m³);

ρ_s é a densidade aparente do material (kg/m³);

c_s é o calor específico do material seco (J/kg.K);

T é a temperatura (°C)

No caso de materiais úmidos, deve ser adicionada a entalpia da umidade contida no material, que depende do seu estado físico, e pode ser calculada conforme a equação:

$$H_w = \left[(w - w_e)c_w + w_e c_e - h_e \frac{dw_e}{dT} \right] \cdot T \quad (2.8)$$

Onde:

H_w é a entalpia da umidade contida no material da edificação (J/m³)

w é o teor de umidade do material (kg/m³)

w_e é o conteúdo de água congelada (kg/m³)

c_w é o calor específico da água líquida (J/kgK)

c_e é o calor específico do gelo (J/kgK)

h_e é o a entalpia da fusão do gelo (J/kg)

T é a temperatura (°C)

Porém, para o caso das edificações estudadas neste trabalho, é descartado o congelamento da água no interior dos poros, o que resume o cálculo da entalpia da umidade contida nos materiais à:

$$H_w = w \cdot c_w \cdot T \quad (2.9)$$

Em relação à condutividade térmica de materiais úmidos, Künzle (1995) indica que, como a água apresenta maior condutividade térmica que o ar, a condutividade térmica de materiais que contém umidade em seus poros é aumentada. Materiais úmidos tem a sua condutividade térmica calculada da seguinte maneira:

$$\lambda_w = \lambda_0 (1 + b \cdot w / \rho_s) \quad (2.10)$$

Onde:

λ_w é a condutividade térmica do material úmido (W/mK);

λ_0 é a condutividade térmica do material seco (W/mK);

b é a suplemento de condutividade térmica (%/M.-%);

ρ_s é a densidade aparente do material (kg/m³);

w é o teor de umidade (kg/m³);

O suplemento de condutividade térmica (b) indica a porcentagem do aumento da condutividade térmica de um material, de acordo com a sua porcentagem de umidade em relação à massa. O Anexo 2 apresenta o suplemento de condutividade térmica de alguns materiais de construção.

Por fim, há ainda de ser considerado o fluxo de entalpia causado pelo transporte de massa. Este fenômeno apresenta valores de maior significância em fluxos de umidade associados à mudança de fase. Por exemplo, após a incidência de chuva sobre a fachada, com absorção de umidade por sucção capilar, esta água absorvida tenderá a evaporar, causando um transporte de vapor d'água associado à mudança de fase da água. Como a mudança de estado físico necessita de energia para ocorrer, chamada entalpia de vaporização/condensação, esta mudança de fase associada ao transporte de massa, ocorrendo no interior dos materiais porosos, cria fluxos de entalpia nos componentes da edificação. Este fenômeno é considerado como ganho ou perda de entalpia nas equações de balanço de calor de Künzle (1995):

$$S_h = h_v \nabla g_v \quad (2.11)$$

Onde:

S_h é a perda ou ganho de calor devido à condensação ou evaporação (J/m³s)

h_v é o calor latente da mudança de fase (para a água pura $h_v = 2500$ kJ/kg)

g_v é a densidade do fluxo pela difusão do vapor d'água associado à mudança de fase (kg/m²s)

2.3 Transferência de calor e umidade nas superfícies dos componentes das edificações

A interação entre a superfície dos componentes e seu ambiente circundante possui certas particularidades que devem ser consideradas.

A transferência de calor entre a superfície do componente e o ambiente deve considerar as trocas por convecção e radiação sendo calculada pela equação:

$$q = \alpha(t_a - \theta) \quad (2.12)$$

$$\text{Com} \quad \alpha = \alpha_c + \alpha_r \quad (2.13)$$

Onde:

q é a densidade do fluxo de calor (W/m^2)

t_a é a temperatura do ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

θ é temperatura da superfície do componente ($^{\circ}\text{C}$)

α_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m^2)

α_r é o coeficiente de transferência de calor por radiação (W/m^2)

A troca de umidade é definida de maneira análoga:

$$g_v = \beta_p(p_a - p_s) \quad (2.14)$$

Onde:

g_v é a densidade de fluxo de vapor d'água ($\text{kg}/\text{m}^2.\text{s}$)

β_p é o coeficiente de transferência de vapor d'água ($\text{kg}/\text{m}^2.\text{s}.\text{Pa}$), derivado do coeficiente de transferência de calor por convecção (α_c): $\beta_p = 7.10^{-9} \cdot \alpha_c$

p_s é a pressão parcial de vapor d'água na superfície do componente (Pa)

p_a é a pressão parcial de vapor d'água no ambiente (Pa)

Os ganhos pela radiação solar são considerados por meio da equação:

$$q = \alpha_s \cdot I \quad (2.15)$$

Onde:

q é o fluxo de calor devido à radiação solar (W/m²)

α_s é o coeficiente de absorção à radiação solar (-)

I é a radiação solar vertical ao componente (W/m²)

O coeficiente de absorção solar está associado com o brilho e a cor da superfície do componente. O Anexo 3 informa o coeficiente de absorção para diversos materiais empregados na construção civil.

Há ainda, em certos casos, de se considerar a incidência de chuvas sobre as fachadas. Entretanto, devido ao grande número de variáveis que podem interferir na quantidade de água lançada sobre os paramentos externos (por exemplo, a intensidade e direção dos ventos, a altura e orientação da edificação, a presença de outras estruturas no entorno e detalhes construtivos das fachadas), a sua determinação com precisão é de grande dificuldade.

Além disso, os dados disponíveis sobre chuvas, em arquivos climáticos, normalmente apresentam apenas a quantidade total de água precipitada no dia, sem especificar os intervalos de chuvas e os respectivos volumes. Isto pode levar a estimativas equivocadas, por exemplo, para superfícies de absorção mais lenta, o tempo em que a superfície se encontra molhada é determinante para a quantidade de água absorvida.

Por estes motivos, Künzle (1995) sugere que, em casos onde a determinação da incidência de chuvas sobre as fachadas seja determinante nos resultados, sejam

realizadas medições no local. Ainda assim, quando a precisão necessária é menor, ele sugere uma formulação para estimar a chuva dirigida sobre as fachadas, baseado em dados climáticos que contenham a precipitação, a direção e a velocidade média dos ventos:

$$P_d = p_d \cdot v_v \cdot P_n \quad (2.16)$$

Onde:

P_d é a quantidade de chuva dirigida sobre a fachada (kg/m²s)

p_d é coeficiente de chuva dirigida, para o local analisado (s/m)

P_n é a precipitação (kg/m²s)

v_v é a velocidade do vento normal à fachada (m/s)

O coeficiente de chuva dirigida (p_d) representa a relação entre a quantidade de chuva dirigida sobre as fachadas e a precipitação local. Depende da velocidade do vento e da altura da edificação. Sugere-se que este coeficiente seja determinado experimentalmente. Caso não seja possível, usualmente adota-se o valor padrão de 0,05 s/m.

Conhecida a quantidade de chuva dirigida, é possível calcular a quantidade de chuva absorvida pela fachada, de maneira similar à absorção solar (equação 2.15):

$$g_w = a_r \cdot P_d \quad (2.17)$$

Onde:

g_w é o fluxo líquido causado pela absorção de água precipitada sobre as fachadas (kg/m²s)

a_r é o coeficiente de absorção da fachada (-)

O coeficiente de absorção da fachada permite considerar a quantidade de precipitação que atinge a fachada e espirra de volta ao ar, sendo influenciado pela

rugosidade da fachada. Normalmente é adotado o valor padrão 0,7 para superfícies verticais.

2.4 Modelo de transporte simultâneo de calor e umidade

A partir dos princípios físicos até aqui apresentados, Künzel (1995) propôs um modelo matemático para o cálculo do transporte simultâneo de umidade e calor em componentes multicamadas de edificações. Neste modelo, ambos os mecanismos de transporte (umidade e calor) estão relacionados e devem ser resolvidos de forma conjunta. A Tabela 2 indica os mecanismos de transporte considerados por Künzel em seu modelo e os respectivos potenciais que os movem.

Tabela 2: Mecanismos de transporte considerados por Künzel (1995) e seus respectivos potenciais

	Mecanismo de transporte	Causa e potencial de transporte
Transporte de calor	Transferência de calor	Diferenças de temperatura
	Radiação solar	Radiação solar
	Fluxo de entalpia pelo transporte de umidade	Difusão de vapor associada a mudança de fase
Transporte de vapor	Difusão de vapor	Diferenças de pressão parcial de vapor (temperatura e pressão total)
	Transporte molecular (efusão)	Diferenças de pressão parcial de vapor
Transporte líquido	Condução capilar	Pressão de sucção capilar
	Difusão superficial	Diferença de umidade relativa/teor de umidade

Fonte: Künzel (1995)

O princípio do modelo é a aplicação da lei de conservação ao transporte de calor e umidade nos componentes. Ou seja, a mudança na entalpia e na umidade de certo volume é determinada pela divergência no fluxo de calor e de umidade, através das suas superfícies, e pelos ganhos e perdas.

Seguindo este princípio, estabelecem-se as seguintes equações.

- Para o calor:

O balanço de calor em determinado volume pode ser calculado pela expressão:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla \cdot q + S_h \quad (2.18)$$

Onde:

H é a entalpia total (J/m³)

q é a densidade do fluxo de calor (W/m²)

S_h são os ganhos ou perdas de calor dentro do componente (W/m³)

A entalpia total do componente da edificação consiste na soma da entalpia do material seco e da entalpia da umidade contida no material.

$$H = H_s + H_w \quad (2.19)$$

Onde:

H_s é a entalpia do material seco (J/m³)

H_w é a entalpia do material úmido (J/m³)

A densidade do fluxo de calor é proporcional à condutividade térmica do material úmido (equação 2.10) e o gradiente da temperatura:

$$q = -\lambda_w \nabla T \quad (2.20)$$

Onde:

q é a densidade do fluxo de calor (W/m²)

λ_w é a condutividade térmica do material úmido (W/m.K)

T é a temperatura (°C)

O termo S_h refere-se a perdas ou ganhos de entalpia no elemento. Conforme explicado na seção 2.1.1, apenas a difusão de vapor d'água associada à mudança de fase representa valores significativos. Desta forma, o valor de S_h pode ser calculado pela equação 2.11.

- Para a umidade:

A densidade do fluxo da difusão de vapor em determinado volume é calculada com a equação de balanço de umidade, que é descrita, analogamente à equação de balanço de calor, por:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \cdot (g_w + g_v) + S_w \quad (2.21)$$

Onde:

w é o teor de umidade da camada do material (kg/m³)

g_w é a densidade do fluxo de transporte líquido (kg/m²s)

g_v é a densidade do fluxo de difusão de vapor (kg/m²s)

S_w é a perda ou o ganho de umidade na camada (kg/m³s)

O fluxo de transporte líquido (g_w) depende do gradiente da umidade relativa, conforme equação 2.2:

$$g_w = -D_\phi \cdot \nabla \phi \quad (2.2)$$

O fluxo de difusão de vapor d'água depende do gradiente de pressão parcial, conforme equação 2.1:

$$g_v = -\frac{\delta}{\mu} \nabla p \quad (2.1)$$

O termo S_w refere-se à perda ou ganho de umidade no interior do componente. Algumas situações que representariam este termo seriam, por exemplo, um

vazamento de água em tubulação embutida na parede (ganho) ou o processo de cura do concreto (perda). Como são situações específicas, o termo S_w é desconsiderado.

As equações de balanço de calor e umidade são intimamente conectadas. A dependência da umidade para o cálculo da entalpia total e da condutibilidade térmica na equação de balanço de calor (equação 2.18) e a dependência da temperatura para o cálculo do fluxo de umidade (equação 2.21), exige que ambas as equações sejam resolvidas simultaneamente. Para que isso seja possível, deve haver apenas duas variáveis em ambas as equações. Estas duas variáveis, das quais todas as outras podem ser obtidas, são a temperatura e a umidade relativa. Desta forma, Kunzel (1995) estabeleceu as duas equações governantes do seu modelo de transporte simultâneo de calor e umidade:

$$\frac{dH}{dT} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\phi \cdot p_{sat})) \quad (2.22)$$

$$\frac{dw}{d\phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\phi \nabla \phi + \delta_p \nabla (\phi \cdot p_{sat})) \quad (2.23)$$

Onde:

$\frac{dH}{dT}$ é a capacidade de armazenamento de calor do material úmido (J/m³.K)

$\frac{dw}{d\phi}$ é a capacidade de armazenamento de umidade do material (J/m³.K)

λ é a condutividade térmica do material úmido (W/m.K)

D_ϕ é o coeficiente de condutividade líquida do material (kg/m.s)

δ_p é a permeabilidade ao vapor d'água do material (kg/msPa) = δ/μ

h_v é a entalpia de vaporização da água (J/kg)

p_{sat} é a pressão de saturação do vapor d'água (Pa)

T é a temperatura (°C)

ϕ é a umidade relativa (-)

A resolução das equações é feita através do Método dos volumes finitos. As equações são resolvidas sequencialmente, de forma alternada, atualizando-se os coeficientes conforme os resultados obtidos no passo anterior, até que a convergência dos valores atenda um patamar pré-estabelecido.

Com este método é possível calcular a temperatura e a umidade em cada elemento de volume ao longo do perfil dos componentes, incluindo suas superfícies.

O modelo apresentado por Kunzel (1995) é a base para o desenvolvimento do software WUFI (Wärme und Feucht instationär - “Calor e umidade transientes”), que é capaz de solucionar as equações governantes do modelo, realizando a simulação higrotérmica de toda a edificação e seus componentes. A descrição deste software encontra-se no capítulo 4.

2.5 Ventilação dos espaços interiores

Segundo Sedlbauer (2001), a ventilação é o método mais efetivo para eliminar o excesso de umidade de um ambiente interno. Portanto, a ventilação dos ambientes deve ser devidamente planejada, desde a fase de projeto, assim como deve ser bem utilizada pelos usuários das edificações.

O ar interior pode ser renovado, ou seja, substituído por ar exterior através da infiltração e/ou ventilação. A infiltração de ar do exterior ocorre por frestas, juntas e falhas na vedação das edificações e é mais representativa quando se espera que o edifício seja hermético. Já a ventilação ocorre de maneira proposital, através de aberturas previstas em projeto e normalmente operáveis pelos usuários.

A ventilação tem como finalidade principal controlar a pureza e o deslocamento do ar em um ambiente fechado, proporcionando condições de habitabilidade e conforto aos ocupantes. Porém, em determinadas condições, a ventilação também pode controlar a temperatura e a umidade do ar interno (COSTA, 1974). A ventilação é dividida em duas categorias:

- Natural: Ocorre por processos naturais como a ação dos ventos e diferenças de pressão.

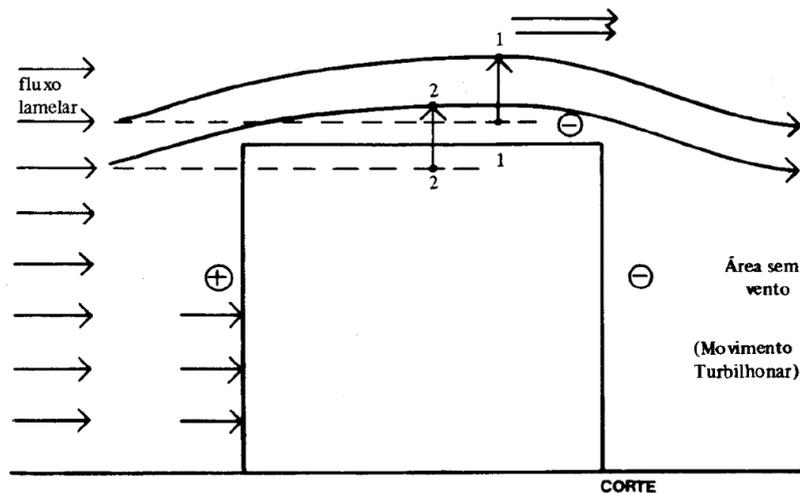
- Forçada: Obtida por meio de sistemas que retiram o ar interior e insuflam ar do exterior de maneira mecanizada.

A ventilação natural pode ocorrer por dois processos distintos: pela ação dos ventos e pelo efeito chaminé (TOLEDO, 1999):

- Ventilação pela ação dos ventos: Quando o vento incide sobre uma edificação criam-se sobrepressões ou subpressões sobre suas superfícies. Estas pressões dependem da velocidade e direção do vento, bem como das formas e dimensões da edificação.

As sobrepressões são chamadas pressões positivas e as subpressões pressões negativas. Assim, as pressões negativas e positivas representam pressões inferiores e superiores à pressão atmosférica, respectivamente. A Figura 6 representa este fenômeno.

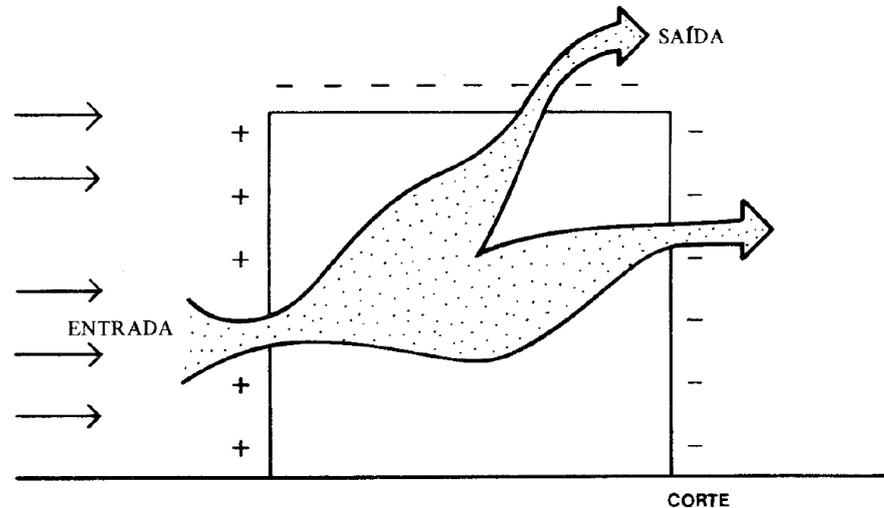
Figura 6: Representação do efeito do vento sobre as superfícies de um edifício.



Fonte: FROTA E SCHIFFER (2001)

Caso existam aberturas na edificação, estas diferenças de pressão criam correntes de ar que vão das áreas com maior pressão em direção às áreas de menor pressão, ventilando os espaços interiores, conforme o esquema da Figura 7.

Figura 7: Correntes de ar geradas nos ambientes internos devido as diferenças de pressão causadas pelo vento.

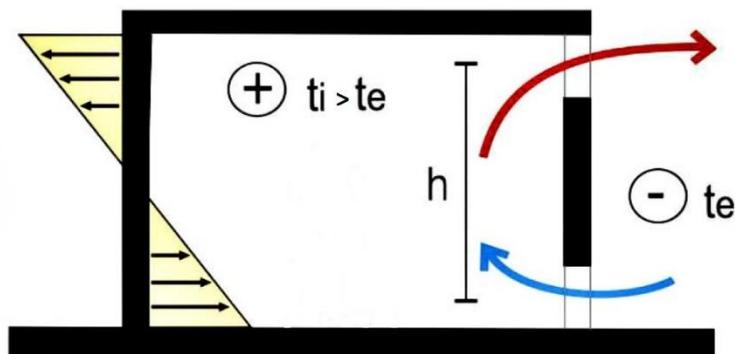


Fonte: FROTA E SCHIFFER (2001)

Como se pode observar na Figura 7, sempre que possível deverá haver uma abertura de entrada e outra de saída para o ar. Em cômodos com apenas uma janela, esta única abertura atua simultaneamente como entrada e saída, esquema que apresenta baixa eficiência.

- Ventilação pelo efeito chaminé: Diferenças de temperatura entre o ar externo e o ar interno geram diferenças de pressão entre estes ambientes, devido às diferenças de densidade do ar. Assim, caso existam aberturas na parte superior e inferior do ambiente, tende-se a criar um fluxo de ar através das aberturas, o qual é função da diferença de altura entre elas e da diferença de temperatura entre o ar interno e externo. A Figura 8 ilustra este processo.

Figura 8: Ventilação gerada pelo efeito chaminé.



Fonte: BITTENCOURT E CANDIDO (2010)

A ventilação ainda pode ocorrer pela combinação dos dois princípios: efeito chaminé e ação dos ventos. Porém, deve-se ter cuidado para os casos em que um efeito pode concorrer com o outro, trazendo resultados insatisfatórios. Sendo assim, é de extrema importância que o projetista faça uma análise detalhada de quando é vantajoso prover os dois sistemas simultaneamente.

A razão entre o volume de ar que penetra em um ambiente por meio da ventilação, por hora (V_{ar}) e o volume deste ambiente (V_a) é chamada de “índice de renovação do ar” (n):

$$n = \frac{Var \left(\frac{m^3}{h} \right)}{Va (m^3)} \quad (2.24)$$

No modelo WUFI, a ventilação é considerada nos cálculos de temperatura e umidade do ar interior. As equações seguintes (2.25 a 2.28) foram extraídas do próprio software.

O fluxo de calor devido às trocas entre ar interior e exterior é calculado conforme a equação:

$$Q_v = m_v \cdot (h_i - h_e) \quad (2.25)$$

Onde:

Q_v é o fluxo de calor entre o ar interno e externo (J/s)

m_v é o fluxo de massa de ar (kg/s)

H_i é a entalpia específica do ar interior

H_e é a entalpia específica do ar exterior

Sendo que:

$$m_v = V_v \cdot \rho_i \quad (2.26)$$

ρ_i é a densidade do ar interior (kg/m³)

V_v é o volume do fluxo de ar (m³/s)

Como apenas o ar externo, com um teor de umidade x_e , é aquecido ou resfriado, da temperatura externa (t_e) para a temperatura interna (t_i), a mudança na entalpia ($H_i - H_e$) pode ser calculada pela equação:

$$(H_i - H_e) = (1006 + x_e \cdot 1840) \cdot (t_i - t_e) \quad (2.27)$$

x_e é o teor de umidade do ar externo (kg/kg)

Por sua vez, o fluxo de umidade entre o ar interno e externo, causado pela ventilação, é descrito por:

$$W_v = (x_e - x_i) \cdot m_v \quad (2.28)$$

Onde:

W_v é o fluxo de umidade entre o ar externo e interno (kg/s)

x_i é o teor de umidade do ar interno (kg/kg)

2.6 Liberação interna de vapor d'água

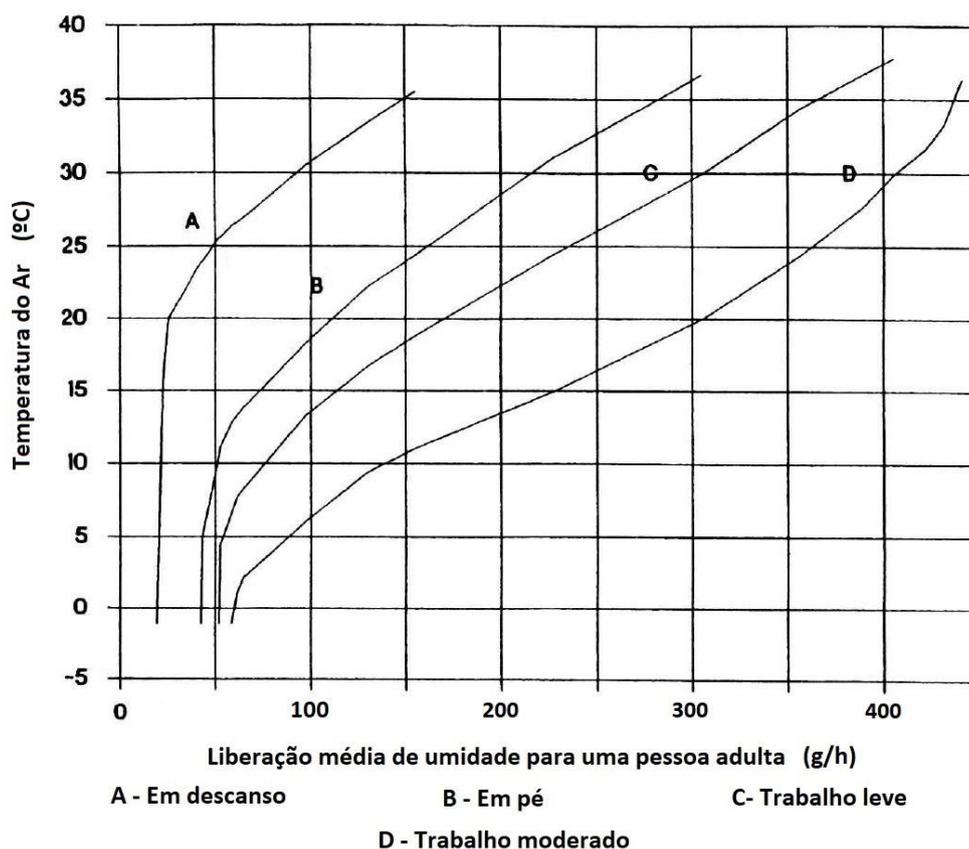
No caso das edificações, além da umidade contida no ar atmosférico local, existem também fontes internas de liberação de vapor d'água, que aumentam o conteúdo de umidade do ar interior e, conseqüentemente, a umidade nos materiais das edificações.

O organismo humano libera quantidades de vapor d'água em função do tipo da atividade que pratica e das condições ambientes, conforme apresentado na Figura 9.

Neste trabalho adotou-se a taxa de liberação média de umidade por pessoa em 45 g/h, em condição de repouso, conforme sugerido por Henriques (1994).

Além da atividade fisiológica, outros processos como: cozimento de alimentos, lavagem de ambientes, secagem de roupas, banhos, entre outros, aumentam a umidade do ar no interior da edificação. Mais valores da liberação de vapor d'água pelas atividades humanas encontram-se na tabela do Anexo 4.

Figura 9: Taxa de liberação de umidade média para uma pessoa adulta, de acordo com a atividade que pratica.



Fonte: Treschel et al (2009).

3 BOLORES EM EDIFICAÇÕES

Neste capítulo são abordados conceitos gerais sobre bolores em edificações, suas condições para desenvolvimento e suas consequências. Além disso, é apresentado um modelo existente para prever a sua ocorrência em superfícies internas de edificações.

3.1 O bolor

Inicialmente faz-se necessário esclarecer o que são os bolores. Também chamados de mofo, especialmente na literatura internacional como “*mould*” e “*mold*”, os bolores são microrganismos pertencentes ao reino dos fungos. Os fungos, entre outros detalhes, se diferenciam das plantas principalmente por não sintetizarem a clorofila e, portanto, não produzem seu próprio alimento. Desta forma, os fungos alimentam-se dos nutrientes presentes no ambiente onde vivem. Para tal, eles liberam enzimas capazes de digerir praticamente qualquer tipo de material que possua carbono (BURGE, 2009).

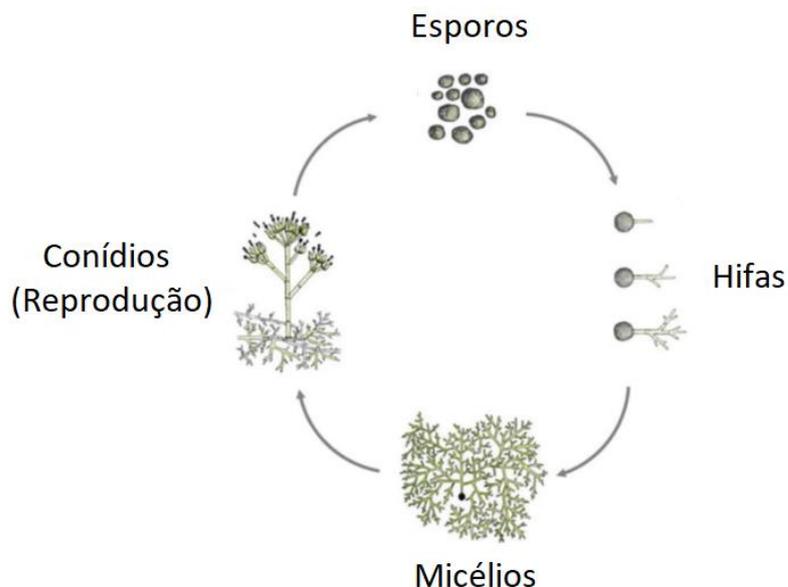
Dentro do reino dos fungos encontram-se os fungos filamentosos, as leveduras e os cogumelos. Os fungos filamentosos são os chamados bolores, os mais comuns em edificações, embora existam relatos de leveduras encontradas em materiais biodeteriorados.

Os fungos filamentosos são formados por estruturas tubulares alongadas, chamadas hifas. Ao se desenvolverem, as hifas formam uma rede emaranhada, chamada micélio. Os micélios dão o aspecto algodinoso, aveludado ou pulverulento característico dos bolores.

A reprodução dos fungos filamentosos pode ocorrer de forma sexuada ou assexuada. Em ambas as formas, após o crescimento dos micélios, desenvolvem-se estruturas especiais reprodutivas (conídios) que liberam esporos, dispersando-se no ambiente, principalmente através do ar, a fim de formar novas colônias. Os esporos de fungos são considerados ubíquos no ar ambiente.

O ciclo de vida típico dos fungos filamentosos está ilustrado na Figura 10.

Figura 10: Ciclo de vida dos fungos filamentosos



Fonte: Adaptado de Johansson (2012).

3.2 Problemas ocasionados pelos bolores em edificações.

Os bolores em edificações acarretam dois principais problemas: afetam a saúde dos ocupantes e degradam os materiais de construção, comprometendo a sua durabilidade.

3.2.1 Danos à saúde dos usuários

Em um ambiente com proliferação acentuada de bolores ocorre uma alta produção, e conseqüente alta concentração, de esporos neste ambiente. Esta alta concentração de esporos pode ser prejudicial à saúde dos ocupantes, causando reações alérgicas. Além dos esporos, os fungos também podem liberar no ambiente outras substâncias, durante o processo de decomposição dos materiais dos quais se alimentam, que podem ser tóxicas aos humanos, chamadas micotoxinas.

De acordo com Sedlbauer (2001), infestações por fungos em edificações podem causar as seguintes enfermidades em seus habitantes:

- Micoses: crescimento do fungo em hospedeiro humano. Normalmente não representam um risco fatal, mas podem haver complicações em pacientes imunodeficientes. As micoses normalmente afetam a pele, o aparelho

respiratório e os olhos. Porém, também podem atingir o coração, o fígado e os rins. Os principais fungos causadores de micoses são: *Absidia* sp., *Aspergillus* sp., *Basidiobolus ranarum*, *Cephalosporium* sp., *Cladosporium* sp., *Fusarium* sp., *Mortierella* sp., *Mucor* sp., *Penicillium* sp., *Rhizopus* sp., *Scopulariopsis* sp. and *Verticillium* sp.

- **Micotoxicoses:** intoxicações causadas por substâncias químicas liberadas pelo metabolismo dos fungos. Dentre estas substâncias se encontram: aflatoxina, ocratoxina A, patulina, citrinina, citreoviridina e esterigmatocistina. Estas toxinas podem causar diversas enfermidades nos seres humanos, dentre as quais pode-se citar o câncer de fígado, especialmente associado à aflatoxina. Dentre os fungos que produzem tais toxinas estão: *Aspergillus* sp., *Penicillium* sp., *Fusarium* sp., *Cladosporium* sp. and *Stachybotrys* sp.
- **Alergias:** reações excessivas do sistema imunológico à inalação dos esporos dos fungos. Muitos esporos possuem tamanhos de 2µm a 5µm e, portanto, conseguem chegar aos tubos bronquiais, causando asma. Já certas partículas possuem tamanhos da ordem de 10 µm, e são retidas na membrana mucosa do nariz e faringe, causando rinites alérgicas. Pode-se citar as seguintes alergias ocasionalmente causadas por fungos: conjuntivite, rinite, bronquite, bronquite asmática e eczemas (dermatites).

Por outro lado, a Organização Mundial de Saúde (OMS) concluiu que existem evidências suficientes que relacionam ambientes atacados por bolores (e outros problemas relacionados à umidade) e o desenvolvimento de asma, infecções do trato respiratório superior, tosse, sibilância e dispneia. Entretanto, a OMS afirma que ainda são necessários mais estudos para comprovar a relação entre estes ambientes contaminados e outras doenças, como micotoxicoses e disfunções hepáticas (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2009).

3.2.2 Degradação dos materiais de construção

O desenvolvimento de fungos em revestimentos prejudica o seu desempenho, inicialmente nas funções de conforto visual e higiene e, ao longo do tempo, provoca a sua deterioração. Papéis de parede, tintas, vernizes e madeira são os materiais de construção mais atacados por fungos, entretanto, os revestimentos inorgânicos

também podem ser mais ou menos vulneráveis de acordo com as suas características (SHIRAKAWA, 1999). A ação deletéria causada nos materiais pelos microrganismos é chamada biodeterioração.

Os materiais de construção civil podem sofrer biodeterioração, causada pela ocorrência de fungos filamentosos, devido a ação dos ácidos orgânicos e inorgânicos produzidos pelo processo metabólico destes fungos, e pela penetração das hifas na estrutura cristalina dos materiais, podendo alcançar profundidades de até 8 mm (PINHEIRO, 2003).

Quando ocorrem em pinturas, os fungos inicialmente alteram a coloração da tinta, devido a liberação de pigmentos, causando efeitos antiestéticos. Com o crescimento avançado, a penetração das hifas sob a superfície provoca friabilidade da camada de tinta e sua desestruturação e descolamento. Paralelamente, a liberação de enzimas digestivas e ácidos promovem a decomposição de polímeros presentes nas tintas (GARG; JAIN; MISHRA, 1995).

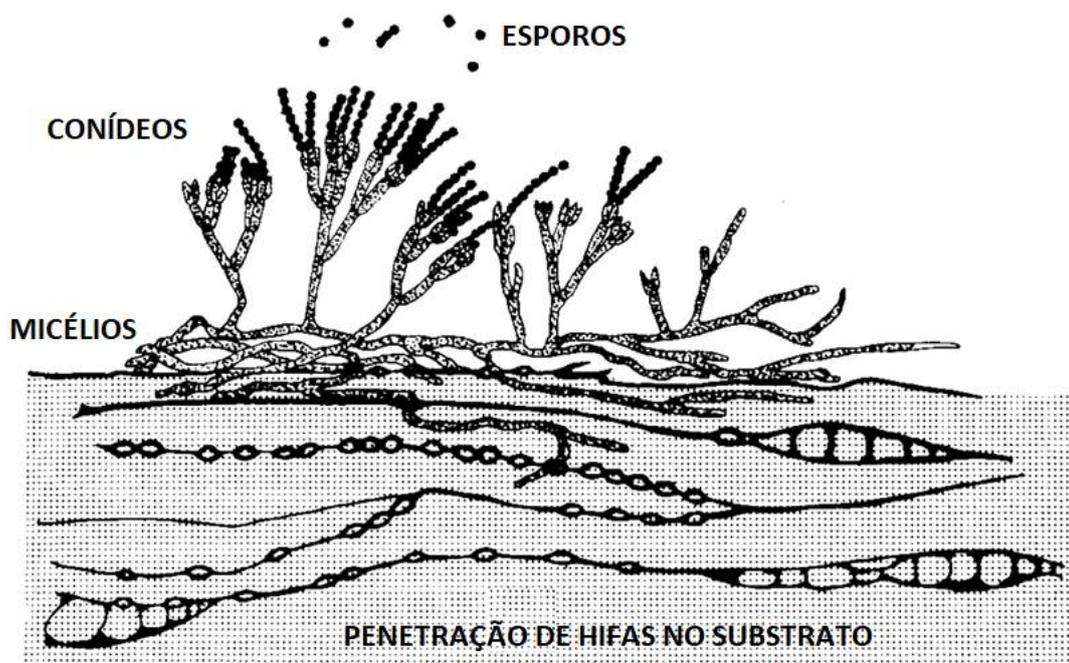
De acordo com Gaylarde (2002), os produtos metabólicos dos fungos, especialmente os ácidos orgânicos e inorgânicos, causam a biodeterioração de rochas utilizadas em construções históricas. Segundo a autora, a maioria das rochas utilizadas nestas construções, no Brasil, são silíceas ou calcáreas. Os ácidos liberados pelos fungos dissolvem os íons destas rochas, formando novos produtos, como gesso, calcita, dolomita e glauconita.

Gu et Al (1998) analisaram a biodeterioração causada pelo fungo *Fusarium sp* sobre o concreto. Após a incubação de amostras de concreto inoculadas com este fungo, foi constatado que a ação do fungo sobre o concreto resultou em perda de massa e redução das dimensões das amostras. Além disto, os autores constataram a penetração das hifas dos fungos na estrutura do concreto e a alteração de seu pH.

Todo microrganismo excreta dióxido de carbono como subproduto de seu metabolismo. Embora este seja um ácido fraco, materiais cimentícios são suscetíveis e reagem com este ácido por meio do processo de carbonatação. O resultado é a redução significativa do pH do concreto para patamares em torno de 8,5, o que elimina a passivação que a alcalinidade do concreto exerce sobre o aço de concretos armados, possibilitando o processo de corrosão da armadura (SAND, 1997).

Segundo Gaylard e Morton (1999), os fungos filamentosos são os microrganismos mais deteriorantes às madeiras. Estes fungos liberam enzimas que degradam a celulose e a hemicelulose, causando a perda de resistência mecânica da madeira. A penetração das hifas também é significativa, especialmente em madeiras mais macias.

Figura 11: Representação de bolor desenvolvido, com formação de conídios, liberação de esporos e penetração de hifas no substrato



Fonte: Adaptado de Treschel et al (2009).

Além dos efeitos causados pelos fungos filamentosos, a sua combinação com outros microrganismos também ocorre nas edificações. Segundo Sand (1997), culturas puras não existem sob condições naturais. Quando a formação de uma colônia de microrganismos se estabelece (por exemplo, de fungos) outros microrganismos tendem a se desenvolver conjuntamente, de forma sinérgica. Assim, superfícies com avançado grau de crescimento microbiológico sofrem a formação de um biofilme, composto por diversos microrganismos, como: fungos, algas, bactérias, etc. A combinação de diferentes microrganismos aumenta a biodeterioração dos materiais, pois a colônia passa a consumir uma gama maior de alimentos. Além disso, a própria formação do biofilme altera as características superficiais, pois promove o fechamento dos poros e aumenta a retenção de umidade na superfície.

A Tabela 3 informa os processos de biodeterioração causados por diferentes microrganismos sobre materiais de construções.

Tabela 3: Mecanismos de biodeterioração por diversos microrganismos e os respectivos materiais afetados

Atividade	Efeito(s)	Material	Microrganismos
Presença física	Descoloração e retenção de umidade	Todos	Todos
Presença física	Aumenta o crescimento de organismos heterotróficos	Qualquer superfície limpa	Algas e bactérias fotossintéticas
Enzimas hidrolíticas	Quebra de componentes, degradação	Madeira, superfícies pintadas, argamassas e concreto	Fungos filamentosos e bactérias
Crescimento dos filamentosos	Desagregação de material	Rochas, concreto, argamassas e madeira	Fungos filamentosos, cianobactérias e algas
Produção de ácidos	Corrosão	Rochas, concreto e argamassas	Fungos e bactérias
Mobilização de íons	Enfraquecimento e dissolução	Rochas, concreto e argamassas	Todos
Quelação de íons	Enfraquecimento e dissolução	Rochas, concreto e argamassas	Produtores de ácidos orgânicos (ex. fungos)
Absorção de íons H ⁺	Corrosão alcalina	Rochas	Algas e cianobactérias

Fonte: Gaylarde, Silva e Warscheid (2003)

3.3 Modelos de previsão para a ocorrência de bolores no interior de edificações

Existem, na literatura, diversos modelos propostos com a finalidade de prever a ocorrência de bolores no interior de edificações, de acordo com suas condições higrotérmicas. Conforme Vereecken e Roels (2012), os principais modelos existentes são: “IEA-Annex 14”, “Time-of-wetness”, “Johansson’s mould growth index”, “Fungal index”, *Isopleth models* (Ayerst, Smith and Hill; Clarke and Rowan; Hens; Sedlbauer), “Mould germination graph method”, “VTT model”, “Updated VTT model” e “Biohygrothermal model”.

Porém, ainda existem limitações de conhecimento para o desenvolvimento de um modelo absolutamente preciso. Sendo assim, algumas suposições são adotadas durante o desenvolvimento de cada modelo. Por esta razão, diferentes modelos geralmente apresentam pequenas divergências entre seus resultados.

Neste trabalho é utilizado o modelo *Biohygrothermal* (daqui em diante traduzido como “Bio-higrotérmico”) proposto por Sedlbauer (2001). Este modelo foi escolhido por ser bastante completo, considerando grande número de variáveis. Além disso, em comparação com o modelo “Updated VTT”, que também é bastante citado em outros trabalhos, o modelo Bio-higrotérmico é ligeiramente menos exigente quanto às condições de crescimento dos bolores. Assim, ao utilizar este modelo, o presente trabalho pretende ficar ao lado da segurança.

Sedlbauer (2001) propõe dois modelos: o das Isopletas e o Bio-higrotérmico. O modelo das Isopletas é baseado em diversos estudos de outros autores e relaciona as condições de umidade e temperatura necessárias à germinação e crescimento dos bolores, de acordo com o substrato. Porém, este modelo é aplicável apenas em condições de regime permanente. Já o modelo Bio-higrotérmico, que é derivado do modelo das Isopletas, é aplicável a regimes transientes de umidade e temperatura, situação compatível com os casos estudados neste trabalho. Como os dois modelos estão relacionados, faz-se necessária a apresentação de ambos para pleno entendimento das variáveis envolvidas.

3.3.1 Condições para o desenvolvimento de bolores

Inicialmente são apresentadas as condições estudadas por Sedlbauer (2001) para o desenvolvimento dos seus modelos de previsão. Segundo o autor, existem quatro principais fatores que influenciam a germinação dos esporos e o crescimento dos micélios:

- Umidade: é o principal fator para o desenvolvimento dos bolores. Os microrganismos absorvem umidade do ambiente, em forma de água ou vapor d’água. Os dados disponíveis na literatura normalmente referem-se à umidade relativa do ar em um ambiente em equilíbrio. Para a maioria dos fungos o limite mínimo de umidade relativa para o seu desenvolvimento é superior a 70% (embora algumas espécies possam ocorrer com umidades relativas de apenas 65%, elas não são comuns

em edificações). À medida que se aumenta a umidade relativa, mais espécies podem ocorrer, sendo que com umidades relativas da ordem de 80% a maioria das espécies de fungos que afetam edificações já consegue se desenvolver. A umidade ótima para o desenvolvimento dos bolores fica na faixa de 90% a 96%. Cabe ressaltar que a maioria das micotoxinas somente são produzidas pelos fungos quando ocorrem altas umidades relativas.

- Temperatura: fator também determinante, além da umidade, pois regula o metabolismo dos microrganismos. A maioria das espécies de fungos se desenvolve numa faixa de temperatura entre 0°C e 50°C, intervalo que abrange as temperaturas superficiais normalmente encontradas nas paredes das edificações. A temperatura ótima varia entre 30°C e 36°C.
- Substrato: a composição do substrato, e conseqüente quantidade de nutrientes disponível, é de primordial importância para permitir o crescimento dos bolores. Quanto maior a quantidade de nutrientes disponíveis no substrato, mais rápido se dará o crescimento dos micélios, que podem penetrar até alguns milímetros no substrato. Por este motivo, e baseando-se em diversos experimentos, Sedlbauer (2001) propôs a classificação dos substratos em 4 categorias, conforme segue:

SUBSTRATO CLASSE 0 – Meio de cultura ótimo. É o substrato de referência, no qual os bolores são cultivados em laboratório. Possuem todos os nutrientes necessários ao seu desenvolvimento.

SUBSTRATO CLASSE I – Substratos bioutilizáveis que possuem boa quantidade de matéria orgânica e são facilmente degradados pelos bolores: papéis de parede, o papel das placas de gesso acartonado, madeiras, materiais utilizados em juntas elásticas.

SUBSTRATO CLASSE II – Substratos com estrutura porosa, porém com menor quantidade de componentes orgânicos: Gesso, argamassas, materiais de construção de origem mineral.

SUBSTRATO CLASSE III – São substratos inertes, compostos por materiais que não podem ser decompostos e nem possuem nutrientes e, portanto, não propiciam o crescimento dos bolores: metais, vidro, azulejos, *foils*.

Nota-se que Sedlbauer (2001) não especifica em qual classe de substrato seriam classificadas as tintas. Embora a ocorrência de bolores seja um fenômeno inicialmente superficial, a influência da pintura no desenvolvimento dos microrganismos está estritamente relacionada ao material do substrato inferior à camada de tinta. Pinturas podem aumentar ou diminuir a susceptibilidade do substrato ao desenvolvimento do bolor, em decorrência da sua composição e propriedades higroscópicas (ADAN, 1991; NIELSEN, 2002). Assim, cabe analisar caso a caso a classificação de um substrato com aplicação de pintura. Por exemplo, tintas à base de água costumam ter maior quantidade de matéria orgânica em sua composição, favorecendo o desenvolvimento dos microrganismos. Enquanto tintas à base de solventes são, geralmente, menos higroscópicas.

Existe, ainda, a possibilidade de a superfície estar contaminada por diferentes materiais: poeira, gorduras, óleos (do toque humano ou resíduos do preparo de alimentos) e demais possíveis poluentes do ar. Nestes casos, que são corriqueiros na prática, cria-se uma fina camada abundante em nutrientes, que favorece o crescimento dos fungos, mesmo em substratos classe III, por exemplo. Apenas após certo desenvolvimento os micélios penetram no substrato real. Assim sendo, sempre que uma superfície estiver razoavelmente contaminada ela deve ser considerada como um substrato classe I.

- Tempo: O período e a frequência em que todas as condições favoráveis ao desenvolvimento dos bolores ocorrem simultaneamente é também fator determinante para a sua proliferação. Conforme será explicado adiante, as condições devem ser mantidas por determinado período até que ocorra a germinação dos esporos e o crescimento dos micélios.

Além destas quatro principais condições (umidade, temperatura, substrato e tempo) também existem outros fatores que exercem menor influência no desenvolvimento dos bolores, os quais são citados brevemente a seguir:

- pH: O valor de pH do substrato também pode influenciar no desenvolvimento dos bolores. A maioria dos fungos sobrevive em valores de pH entre 2 e 11, sendo

que o pH ótimo fica entre 5 e 7. Como exemplo, papéis de parede e pinturas possuem valores na ordem de 5 e 8, respectivamente. Ainda assim, é possível que bolores se desenvolvam sobre materiais com pH fora deste intervalo, servindo-se de uma contaminação superficial, conforme explicado anteriormente. Depois de formada a colônia, que pode iniciar em locais contaminados, os fungos possuem mecanismos para alterar o pH local, favorecendo o seu próprio desenvolvimento.

- Rugosidade da superfície: Mesmo que os fungos possam ocorrer normalmente sobre superfícies lisas, existe maior facilidade de ocorrência sobre superfícies rugosas, devido ao maior depósito de sujeira, poeira e umidade nestas superfícies.

- Luz: Diferentemente das algas, os fungos não necessitam de luz para desenvolverem-se. Existem, inclusive, algumas espécies que são intolerantes à radiação solar. Portanto uma boa incidência de iluminação pode evitar a proliferação de certas espécies de fungos. Porém, esta não é uma regra geral.

- Oxigênio: A oferta de oxigênio no interior de edificações é mais do que suficiente para o metabolismo dos fungos, que necessitam de taxas de 0,14% a 0,25% do volume do ar em oxigênio para o seu metabolismo.

A Tabela 4 mostra um resumo das condições para o surgimento de bolores:

Tabela 4: Resumo de condições para o desenvolvimento de fungos

Fator	Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo	Observações
Temperatura	Temperatura superficial do componente	°C	-8	60	Depende da espécie e do estágio de vida do fungo
Umidade	Umidade relativa na superfície do componente	%	70 ¹	100	
Substrato	Nutrientes e sais	-	-	-	Nutrientes também podem provir de sujeiras e contaminação
Tempo	horas por dia	h/d	1	-	Dependendo da temperatura e umidade
Ambiente	Valor de pH da superfície	-	2	11	Pode ser influenciado pelo fungo
Atmosfera	Taxa de oxigênio	%	0,25		Sempre ocorre

¹ algumas espécies podem ocorrer com umidades inferiores, porém não são comuns em edificações.

Fonte: SEDLBAUER (2001)

3.3.2 O modelo das Isopletas

Analisando as condições necessárias à germinação e ao crescimento dos micélios dos fungos, Sedlbauer (2001) propôs o modelo das Isopletas, com a finalidade de possibilitar a comparação das condições higrotérmicas dos ambientes de edificações e as condições necessárias para o desenvolvimento dos bolores.

Inicialmente, ele dividiu os fungos em três classes, de acordo com seu potencial de agressividade à saúde humana:

Classe A: Fungos, ou seus produtos metabólicos, que são altamente perigosos à saúde humana. Não devem ocorrer em habitações.

Classe B: Fungos, ou seus produtos metabólicos, que são perigosos apenas quando ocorrem exposições por longos períodos.

Classe C: Fungos que não são prejudiciais à saúde humana. Porém, podem acarretar prejuízos estéticos e econômicos.

Na tabela do Anexo 5, podem ser observadas as espécies de fungos consideradas por Sedlbauer (2001), divididas em classes de perigo e com as informações sobre cada espécie que o autor pôde encontrar na literatura. Na mesma tabela pode-se observar que os requisitos para a ocorrência de fungos das classes B e C são bastante próximos, e mais baixos que os da classe A. Por este motivo, o autor propôs sistemas de isopletas separados para a Classe A e para as classes combinadas B/C.

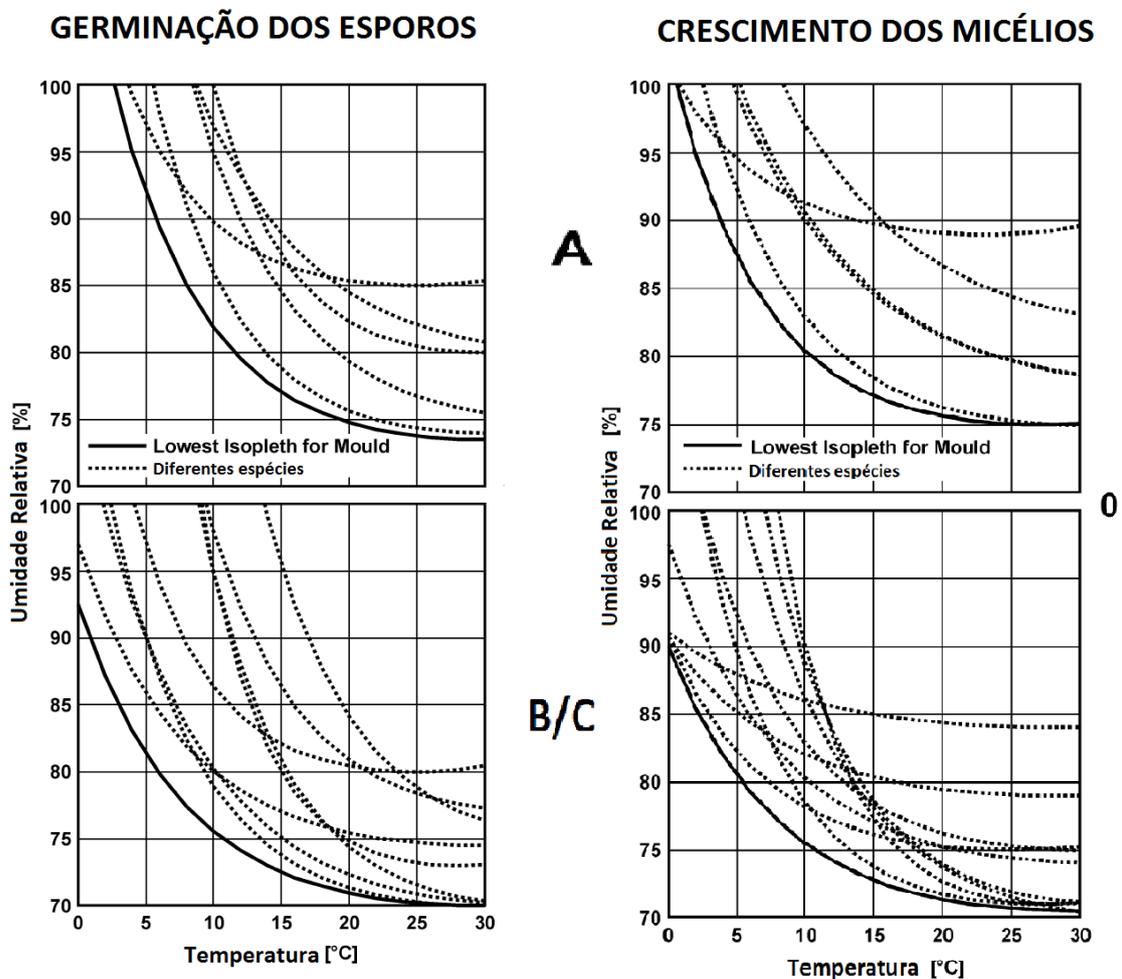
Cabe aqui uma observação; para aplicar os modelos propostos por Sedlbauer (2001) às edificações brasileiras, faz-se necessário confirmar que os gêneros de fungos filamentosos que ocorrem no Brasil são os mesmos considerados pelo autor. Para isso, buscou-se trabalhos que fizeram identificações de fungos no Brasil.

Shirakawa (1999) estudou a biodeterioração de argamassas por fungos e em seu trabalho realizou a identificação de fungos em edificações nas regiões de São Bernardo do Campo e São Paulo. Os gêneros de fungos encontrados por ela encontram-se na tabela do Anexo 6. Já Gambale (1998) isolou fungos em diversos meios de dispersão (ar, água, animais, etc). A tabela no Anexo 7 informa os gêneros em dispersão no ar atmosférico, encontrados pelo autor, em diversas cidades do país. Nota-se que os gêneros encontrados no Brasil, por ambos autores, coincidem,

quase que na totalidade, com os considerados por Sedlbauer (2001). Considera-se, portanto, aplicáveis às edificações brasileiras os modelos propostos.

Definidas as classes de perigo, plotou-se em gráficos (Figura 12) as condições necessárias de umidade e temperatura para a germinação dos esporos e para o crescimento dos micélios de várias espécies de fungos, divididas entre classes A e B/C, considerando o substrato classe 0 (meio de cultura ótimo). A linha limitante inferior resultante dos gráficos, ou seja, abaixo da qual não ocorre germinação ou crescimento dos micélios de nenhuma das espécies de fungos, é chamada de “*Lowest Isoleth for Mould*”, em tradução literal “Menor Isolepta para o mofo”, a qual será tratada daqui em diante pela abreviação LIM.

Figura 12: Isopletas para germinação dos esporos (à esquerda) e crescimento dos micélios (à direita), para a classe A (acima) e classes B/C (abaixo), considerando substrato classe 0 (meio de cultura ótimo).



Fonte: Adaptado de SEDLBAUER (2001)

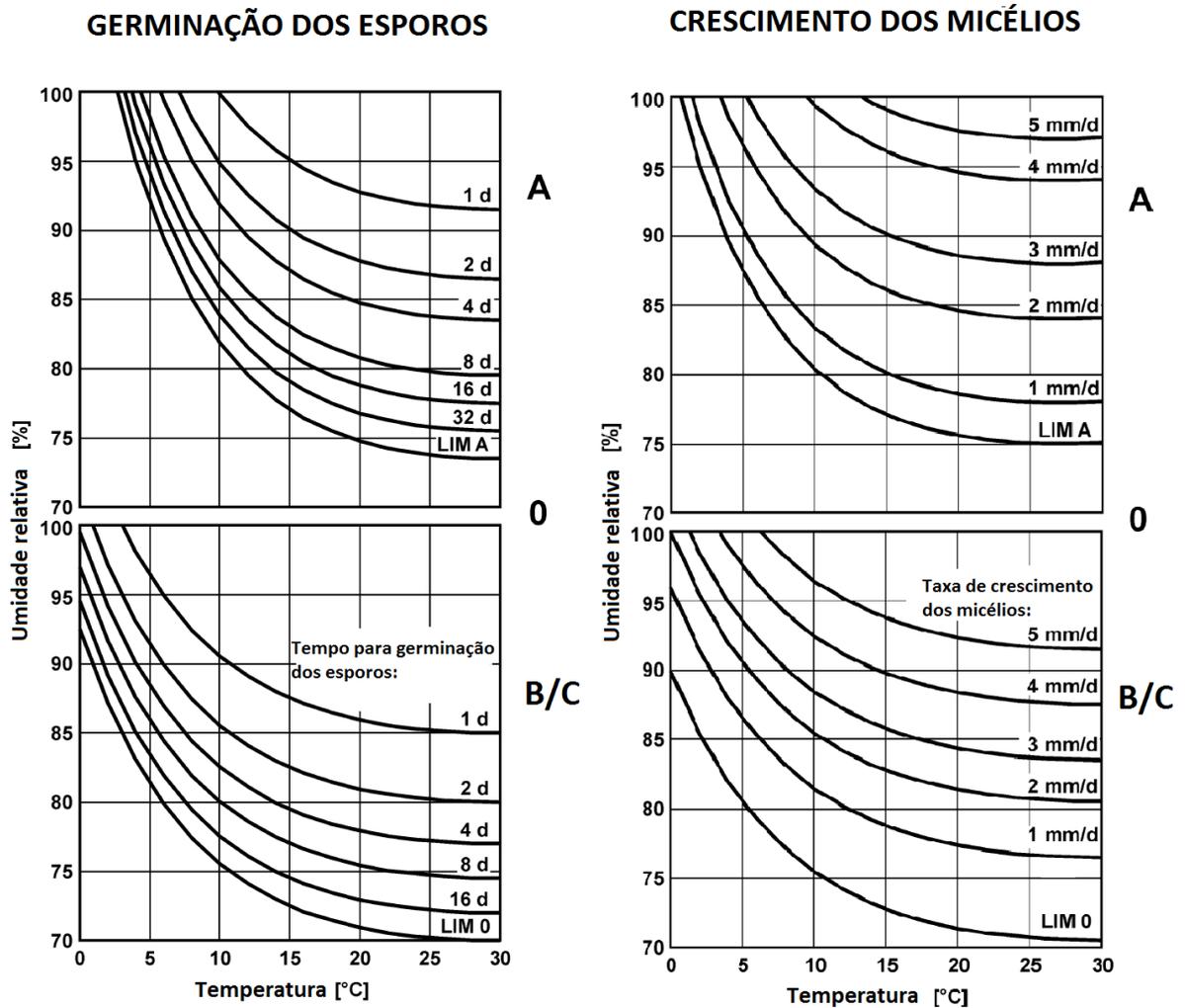
É interessante notar nos gráficos que as condições necessárias para a germinação dos esporos são ligeiramente mais elevadas do que as necessárias para o crescimento os micélios. Este é um mecanismo de sobrevivência dos fungos, pois desta forma os esporos só germinam quando condições suficientes para o crescimento são esperadas no futuro. Importante também notar que as condições necessárias ao desenvolvimento dos bolores pertencentes às classes B/C (menos nocivos à saúde) são menores do que as da classe A (mais nocivos à saúde).

Após estabelecidas as Isopleias para ambas as classes de bolores (A e B/C) referentes ao substrato categoria 0, Sedlbauer (2001) estudou o tempo necessário para a germinação dos esporos e a taxa de crescimento dos micélios, de acordo com as condições higrotérmicas. O resultado está na Figura 13.

A taxa de crescimento apresentado nas isopleias é baseada na situação onde, em uma placa de Petri (substrato classe 0) com o fungo inoculado em seu centro, ocorre um crescimento circular, que aumenta em diâmetro conforme a taxa de crescimento indicada.

Analisando os dados existentes sobre o desenvolvimento de bolores em diferentes materiais, Sedlbauer (2001) modificou as Isopleias apresentadas na Figura 13, adaptando-as para os substratos categorias I e II. Como resultado, as curvas referentes ao substrato ótimo (classe 0) foram deslocadas para cima. Isto significa que quanto menos favorável o substrato para o desenvolvimento dos bolores, mais elevadas são as condições necessárias de umidade e temperatura. Entretanto, devido à quantidade limitada de dados disponíveis, foi possível estabelecer Isopleias apenas para as classes B/C de fungos. Todavia, como esta classe de fungos requer condições mais baixas do que a classe A, estas Isopleias são suficientes quando se deseja evitar a ocorrência de qualquer espécie de bolor em edificações, independentemente de sua classe (Figura 14).

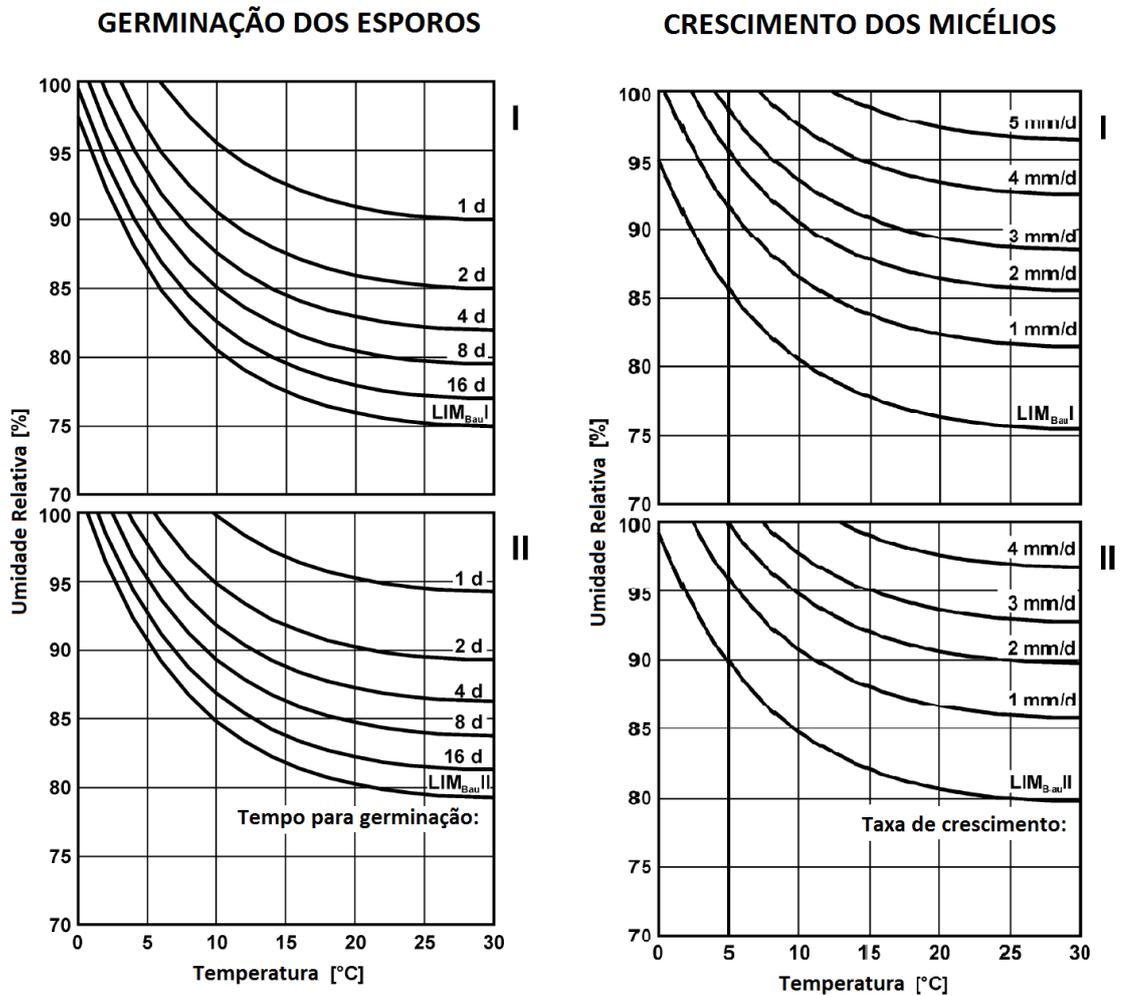
Figura 13: À esquerda: Tempo necessário (em dias) para a germinação dos esporos; À direita: Taxa de crescimento dos micélios (em mm/dia); Ambos para a classe A (acima) e B/C (abaixo). Todos os gráficos relativos ao substrato categoria 0 (meio de cultura ótimo).



Fonte: Adaptado de SEDLBAUER (2001)

Não foram elaboradas Isopletas para o substrato classe III, pois se assume que os bolores não podem crescer sobre este tipo de substrato, a menos que haja contaminação superficial. Lembrando: sempre que houver contaminação severa sobre determinada superfície, esta deve ser considerada como substrato classe I.

Figura 14: À esquerda: Tempo necessário (em dias) para a germinação dos esporos; À direita: Taxa de crescimento dos micélios (em mm/dia); Ambos sobre substrato classe I (acima) e substrato classe II (abaixo). Todas as curvas referentes às espécies pertencentes à classe B/C.



Fonte: Adaptado de SEDLBAUER (2001)

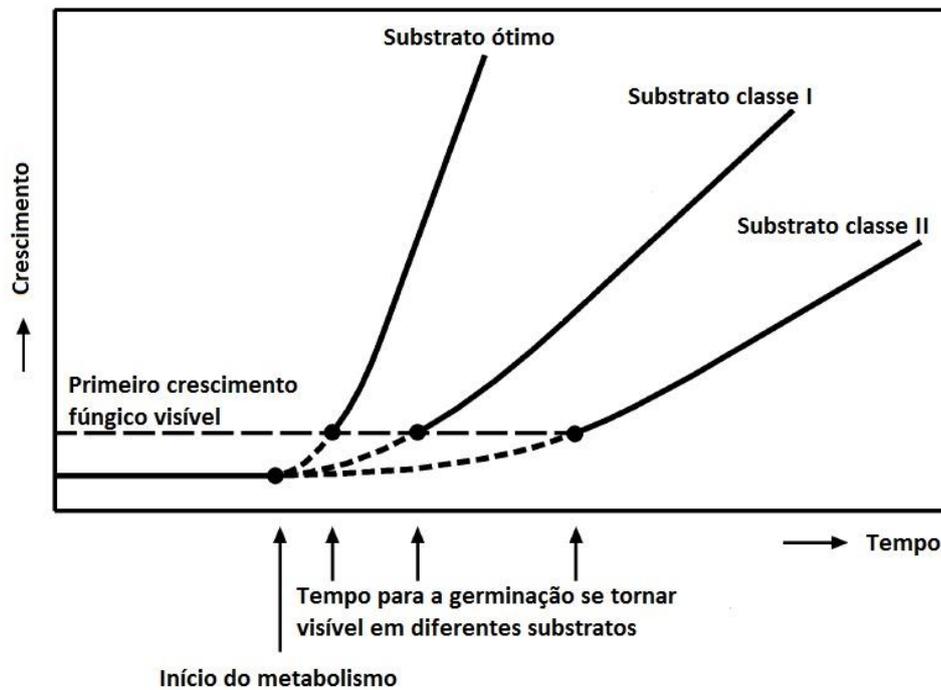
Como as Isopletas foram desenvolvidas para condições de umidade e temperatura constantes (em equilíbrio), o modelo das Isopletas é válido apenas para regimes permanentes.

A fim de desenvolver um modelo aplicável a regimes transientes, condições mais próximas da realidade de uma edificação, Sedlbauer (2001) propôs o modelo Bio-higrotérmico.

3.3.3 O modelo Bio-higrotérmico

Conforme explicado no item 3.3.2, para que ocorra a germinação dos esporos, e posteriormente o crescimento dos micélios, uma combinação de condições deve ser atendida, principalmente umidade a determinadas temperaturas. Atendidas as condições, os fungos desenvolvem-se conforme ilustra a Figura 15:

Figura 15: Diagrama esquemático do crescimento dos fungos ao longo do tempo, de acordo com o substrato.



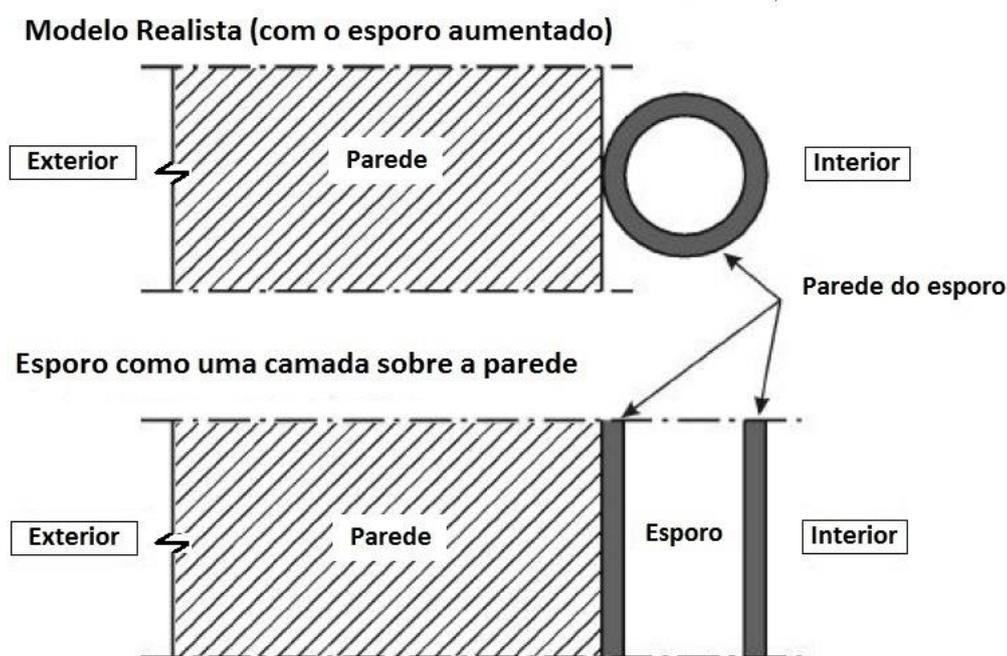
Fonte: Adaptado de SEDLBAUER(2001)

A dificuldade em se criar um modelo para situações de umidade e temperatura transientes deve-se aos dados existentes sobre o desenvolvimento dos fungos serem originários de experiências em laboratórios, com condições controladas, onde ambas as umidades, do ar e do substrato, são conhecidas. No caso de uma edificação sob regime não permanente, tanto a umidade do ar quanto a contida nos materiais estão em constante variação, e o efeito que isso provoca no desenvolvimento dos fungos ainda é desconhecido.

Ainda assim, a fim de desenvolver um modelo aplicável a situações de regime transiente, Sedlbauer (2001) propôs o modelo Bio-higrotérmico, derivado do modelo das Isopletras.

Considerando que, para a não ocorrência de fungos em edificações, deve-se evitar qualquer germinação dos esporos, a ideia deste modelo é quantificar a umidade necessária no interior dos esporos para que a germinação ocorra. Para poder calcular o balanço de umidade no interior dos esporos, o autor assumiu que os mesmos ficam distribuídos sobre as paredes, formando uma “camada biológica”, conforme Figura 16.

Figura 16: Esquema ilustrativo do esporo considerado por Sedlbauer (2001), em seu modelo Bio-higrotérmico.



Fonte: SEDLBAUER (2001)

A espessura do septo do esporo é de aproximadamente $0,5 \mu\text{m}$. O diâmetro do núcleo é da ordem de $2 \mu\text{m}$. Isto resulta em um diâmetro total de $3 \mu\text{m}$ para um esporo real. Todavia, como não seria possível inserir camadas tão pequenas em softwares de cálculo higrotérmico, as dimensões dos esporos tiveram de ser adaptadas. Os esporos do modelo possuem um diâmetro total de $1,0 \times 10^{-2} \text{ m}$.

Em seguida, Sedlbauer (2001) considerou que os esporos dos fungos absorvem umidade do ambiente através de difusão, em razão das condições do microclima na superfície das paredes. A difusão é movida por um potencial osmótico existente no interior dos esporos, e ocorre até que se atinja um teor de umidade crítico, a partir do qual se iniciará a atividade metabólica do fungo. O potencial osmótico dos

esporos é descrito por meio de duas propriedades: a **função de armazenamento de umidade do esporo** e a **resistência à difusão do septo do esporo**. Desta forma, é possível estabelecer o balanço de umidade no interior do esporo, analogamente como se faz para os componentes das edificações. A diferença é que no caso dos esporos (fixados sobre as paredes) deve-se considerar o microclima das superfícies das paredes, ou seja, a temperatura e a umidade relativa superficiais.

Conforme exposto no capítulo 2, o modelo de Kunzel (1995) permite calcular a temperatura e o teor de umidade em qualquer posição dos componentes das edificações. Assim, os dados considerados para o cálculo do balanço de umidade dos esporos são a temperatura e o teor de umidade do material, calculados para a posição exatamente na superfície dos componentes.

Como os estudos de bolores referem-se a umidades relativas, a umidade relativa superficial é obtida por meio do teor de umidade calculado na posição superficial da parede e da função de armazenamento de umidade do material da superfície.

O modelo Bio-higrotérmico assume que antes do início das atividades metabólicas os esporos absorvem umidade por difusão pura, comportando-se com propriedades físicas definidas, sem influência de atividades fisiológicas. Após o início das atividades metabólicas, os fungos conseguem regular seus próprios organismos, adaptando-se às condições do meio. Porém, segundo Sedlbauer (2001), estes processos metabólicos ainda não são bem conhecidos. Entretanto, isto é irrelevante quando se pretende apenas prever a ocorrência ou não de bolores em edificações, pois neste caso considera-se que a umidade crítica nunca deva ser atingida.

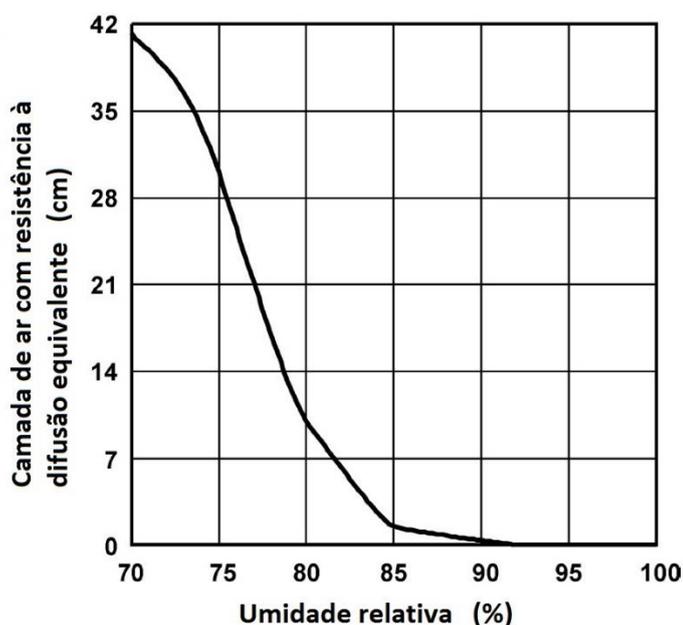
Não obstante, buscando desenvolver um modelo completo, capaz de analisar o desenvolvimento dos fungos mesmo após o início das atividades metabólicas, algumas hipóteses simplificadoras tiveram que ser adotadas, descritas abaixo:

- A absorção de umidade pelo esporo é calculada considerando-se difusão pura mesmo após o início das atividades metabólicas.

- A **resistência à difusão do septo do esporo (S_d)**, é expressa em referência a uma camada de ar equivalente, com a mesma resistência à difusão, e foi calculada de forma que o tempo para a germinação dos esporos, quando calculado através do

modelo Bio-higrotérmico para uma situação de regime permanente, seja igual ao indicado no modelo das isopletras. Os valores de S_d são influenciados pela umidade relativa e podem ser encontrados no gráfico da Figura 17.

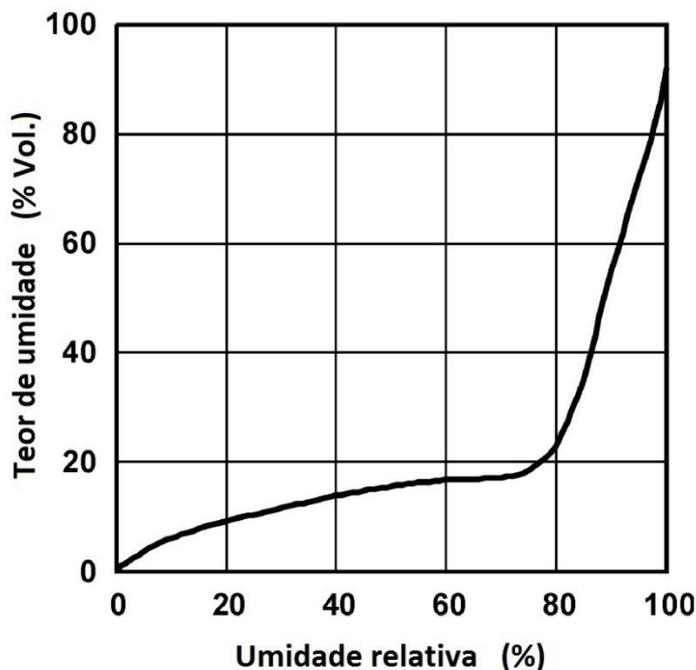
Figura 17: Valores da resistência à difusão do septo do esporo (S_d) em dependência da umidade relativa.



Fonte: SEDLBAUER (2001)

- A **função de armazenamento de umidade** indica como o esporo armazena a umidade, em dependência da umidade relativa, de maneira análoga aos materiais de construção civil, conforme explicado no capítulo 2. Foi derivada de funções estabelecidas para bactérias, as quais são possíveis de encontrar na literatura. Porém, os valores foram ajustados de forma que os cálculos conduzidos por meio do modelo Bio-higrotérmico, para situações de regime permanente, obtenham os mesmos resultados do Modelo das Isopletras (Figura 18).

Figura 18: Função de armazenamento de umidade do esporo.



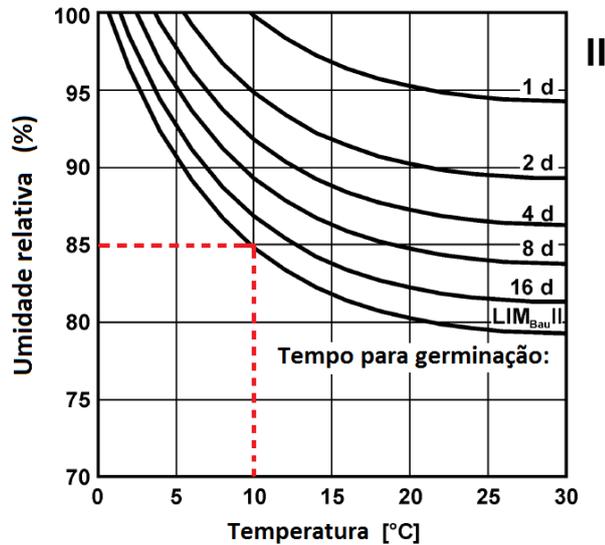
Fonte: SEDLBAUER (2001)

- O **teor de umidade crítico** corresponde ao teor de umidade de um esporo necessário para a sua germinação. É obtido por meio das Isopletas para a germinação dos esporos da seguinte maneira: de acordo com a temperatura, a umidade relativa mínima para a germinação é lida na curva LIM; com este valor, e utilizando a *função de armazenamento de umidade do esporo*, o teor crítico de umidade é obtido. Vale citar que utilizando-se a Isopleta respectiva a cada classe de substrato, a influência do substrato acaba sendo importada para o modelo Bio-higrotérmico.

Por exemplo, Imaginando-se uma situação onde a temperatura superficial de uma parede é 10°C. Por meio da LIM encontra-se a umidade relativa correspondente: 85%, conforme ilustrado na Figura 19.

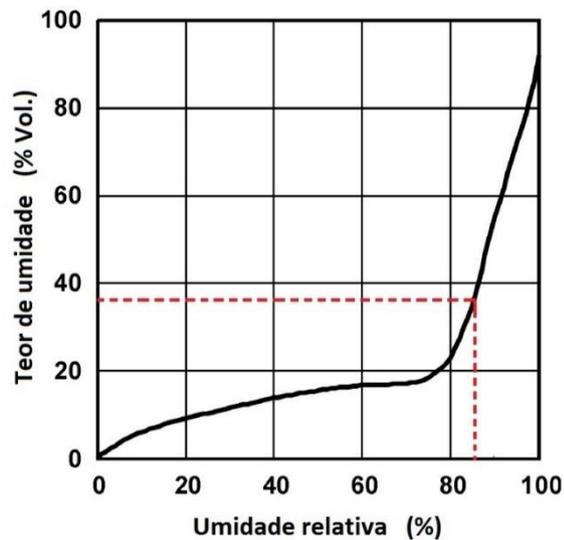
Conhecida a umidade relativa que seria necessária para a germinação do esporo do fungo, na temperatura de 10°C, encontra-se qual seria o correspondente teor de umidade volumétrico no esporo: aprox. 36%, conforme Figura 20.

Figura 19: Obtenção da umidade relativa necessária para germinação dos esporos, em função da temperatura superficial da parede.



Fonte: Autor

Figura 20: Obtenção do teor de umidade crítico, em função da umidade relativa.



Fonte: Autor

Finalmente, a aplicação do modelo é efetuada comparando-se o teor de umidade calculado no interior do esporo ao teor de umidade crítico. Sempre que o teor de umidade no interior do esporo, em determinado intervalo, for igual ou superior ao teor de umidade crítico, considera-se que os fungos estão se desenvolvendo. Assim, enquanto estas condições forem atendidas, assume-se o crescimento dos micélios, conforme as taxas indicadas na respectiva isopleta, considerando as condições de umidade e temperatura superficiais.

4 SOFTWARES UTILIZADOS

Os programas computacionais utilizados neste trabalho, denominados Wufi-Plus® e Wufi-Bio®, são apresentados a seguir.

4.1 Software de simulação higrotérmica Wufi-Plus®

Devido à complexidade dos fenômenos que envolvem o desempenho higrotérmico das edificações (e de seus componentes), faz-se necessária a utilização de programas computacionais para a execução dos cálculos envolvidos. Especificamente para o estudo da ocorrência de bolor, é fundamental determinar as umidades relativas e temperaturas superficiais das paredes, ao longo do tempo. Conforme visto, estes parâmetros dependem de grande número de variáveis, como: condições climáticas locais (umidade relativa do ar, temperatura, ventos, incidência solar), variáveis de projeto (geometria da edificação, propriedades higrotérmicas dos materiais, ventilação), uso e ocupação (liberação de calor e umidade interna, operação de janelas, etc.).

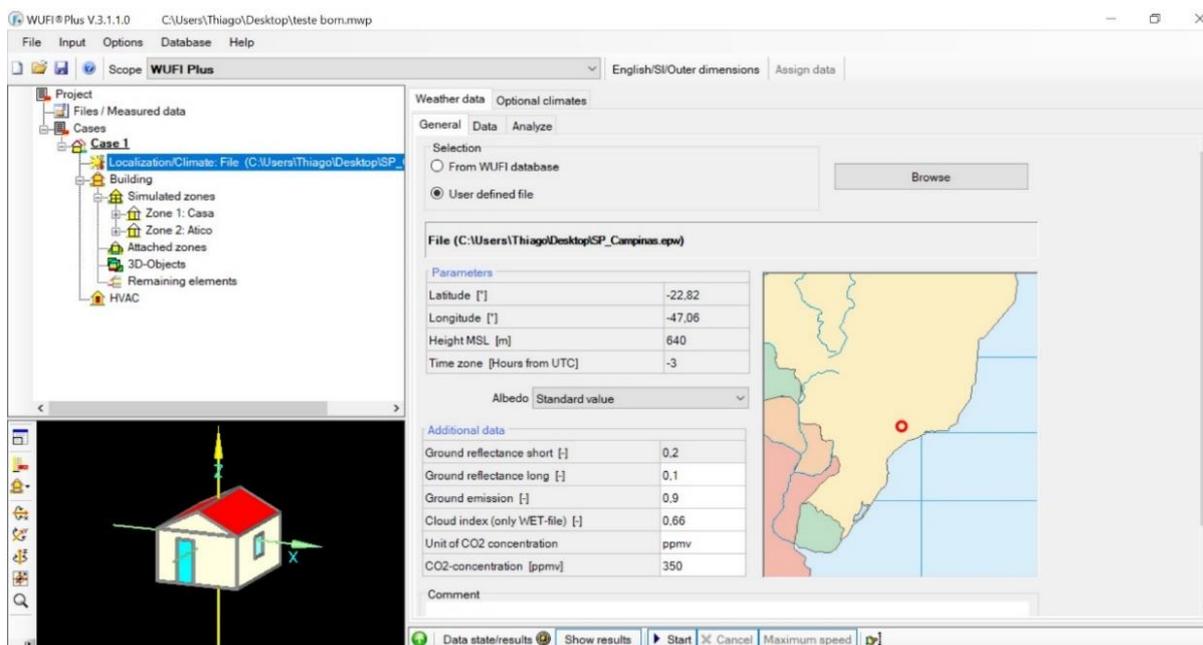
O software WUFI-Plus® Versão 3.1.1.0, desenvolvido pelo instituto de pesquisas *Fraunhofer Institute for Building Physics* (IBP), baseia-se no modelo de transporte simultâneo de calor e umidade proposto por Kunzel (1995), apresentado no capítulo 2. Quando o envelope de uma edificação é exposto a determinadas condições climáticas, ocorre o transporte de massa e calor através de seus componentes, afetando as condições ambientais no interior das edificações. Considerando também as variáveis internas como a liberação de calor e vapor d'água e a ventilação dos ambientes, o software é capaz de fazer a simulação higrotérmica da edificação completa, bem como de seus componentes.

Vale citar que, segundo Antretter et al. (2011), o software WUFI-Plus® é validado de acordo com a norma ASHRAE Standard 140 (2007), conforme também preconiza a norma NBR 15.575 (ABNT, 2013), quando se refere a simulações de desempenho térmico de habitações.

Para se utilizar o WUFI-Plus® os dados de entrada básicos são: dados climáticos do local, a geometria da edificação, a definição das zonas de simulação e os materiais constituintes de seus componentes.

A Figura 21 exemplifica a interface do software WUFI-Plus®.

Figura 21: Exemplo de interface do software WUFI-Plus®; à esquerda acima: visualização da “árvore do projeto”; à esquerda abaixo: geometria da edificação; à direita: escolha do arquivo de dados climáticos, no caso, referente ao município de Campinas-SP.

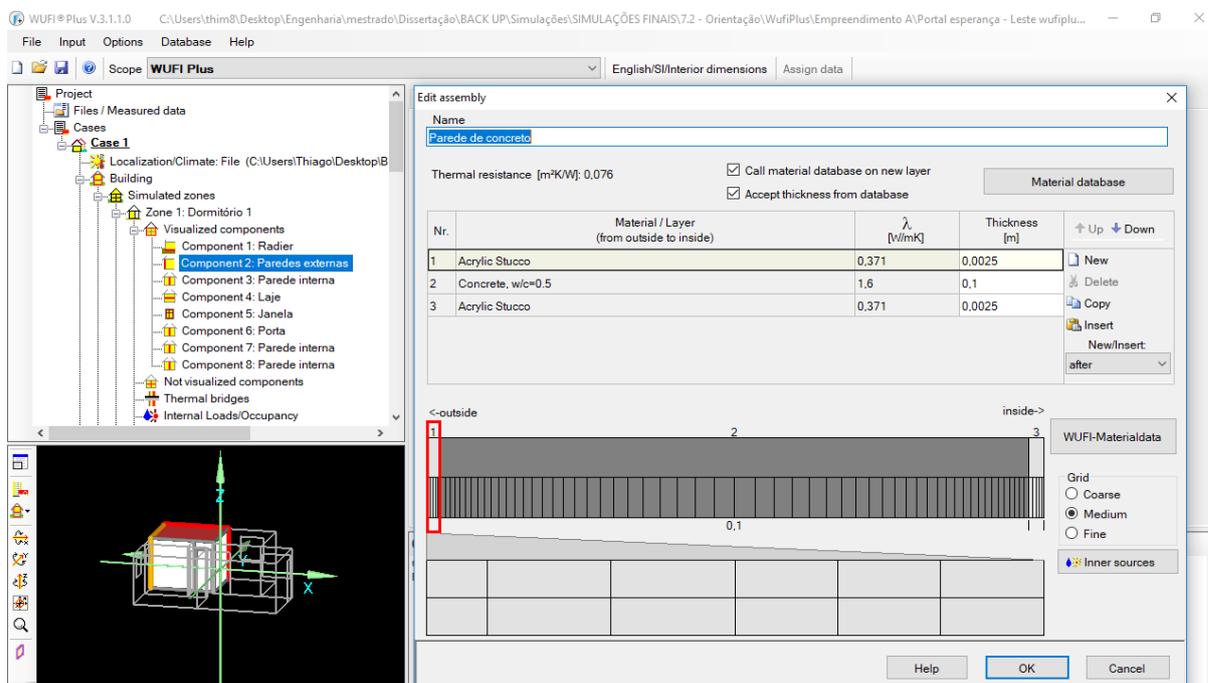


Fonte: Arquivo pessoal.

Além dos dados básicos de entrada, outros parâmetros podem ser selecionados da base de dados do programa ou inseridos pessoalmente pelo usuário. Por exemplo, o número de ocupantes e a liberação interna de vapor d'água e calor, pontes térmicas, cores das fachadas, climas personalizados (temperatura do solo, por exemplo), umidade inicial dos materiais, condições de projeto de sistemas de aquecimento/arrefecimento, entre outros. Já a taxa de ventilação dos ambientes pode ser definida pelo usuário ou calculada pelo programa, de acordo com as aberturas no envelope da edificação e o vento.

Os dados de saída incluem: a temperatura e a umidade relativa do ar interno, os perfis de temperatura e a umidade contida em cada ponto dos componentes, os fluxos de calor e umidade através dos componentes e pelas trocas de ar, o volume de ar renovado, a análise das condições internas em relação às condições de conforto dos ocupantes e a energia que seria necessária para manter certas condições arbitradas (climatização).

Figura 22: Exemplo WUFI-Plus®: detalhamento de uma parede, no caso com revestimento de 0,25 cm de textura acrílica (externa), 10 cm de concreto e outros 0,25 cm de revestimento com textura acrílica (interna).



Fonte: Arquivo pessoal.

4.2 Software WUFI-BIO®

O WUFI-Bio® é um software com o objetivo de prever a ocorrência de bolores em edificações. Também desenvolvido pelo IBP, é baseado no modelo Bio-higrotérmico proposto por Sedlbauer (2001), apresentado no capítulo 3. Para tanto, o programa permite o cálculo do balanço de umidade dos esporos, considerando a resistência à difusão do septo e a função de armazenamento de umidade, de acordo com os valores de umidade relativa e temperatura superficiais da parede analisada, que são inseridos como dados de entrada no programa através de uma interface com o programa WUFI-Plus®, ou com um arquivo personalizado de dados. São também dados de entrada a classe do substrato e o teor de umidade inicial dos esporos, correspondente ao teor de umidade dos esporos no momento de início do período simulado.

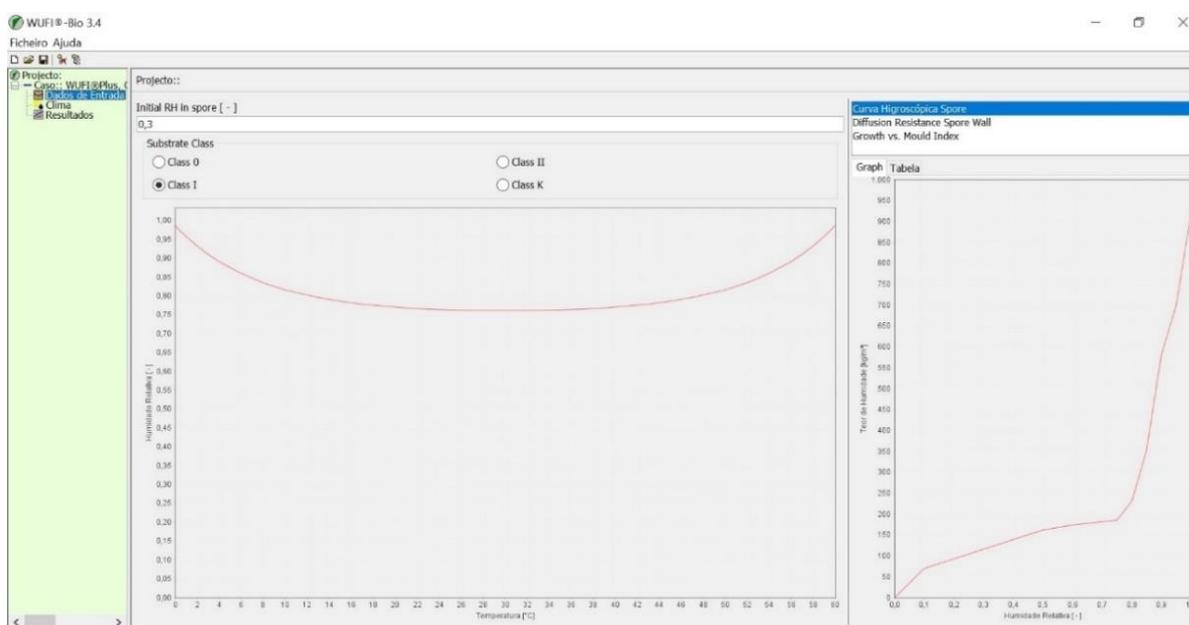
Além do balanço de umidade dos esporos, o programa calcula qual o teor de umidade crítico para a germinação dos esporos, a cada intervalo, em função da

respectiva temperatura superficial. Os resultados são apresentados em forma de gráfico, contendo duas curvas; uma representa o teor de umidade calculado no interior do esporo e a outra o teor de umidade crítico. Caso o teor de umidade do esporo seja superior ao teor de umidade crítico, em determinado intervalo, considera-se que os fungos estão em desenvolvimento e a ocorrência de bolor é esperada.

Paralelamente, enquanto o teor de umidade dos esporos for maior que o teor de umidade crítico, o software considera que há crescimento dos micélios. Este crescimento é calculado baseado nas isopletas de crescimento dos micélios, para cada classe de substrato, e de acordo com as condições de temperatura e umidade relativa superficiais. Entretanto, o próprio software alerta que a indicação do crescimento dos micélios deve ser utilizada com precaução, pois as suposições adotadas tanto pelo modelo, quanto pelo software, podem resultar em crescimentos divergentes da prática. Sendo assim, sugere-se que o principal uso do software seja apenas para avaliar o risco de ocorrência ou não do bolor, e não para calcular o seu crescimento exato.

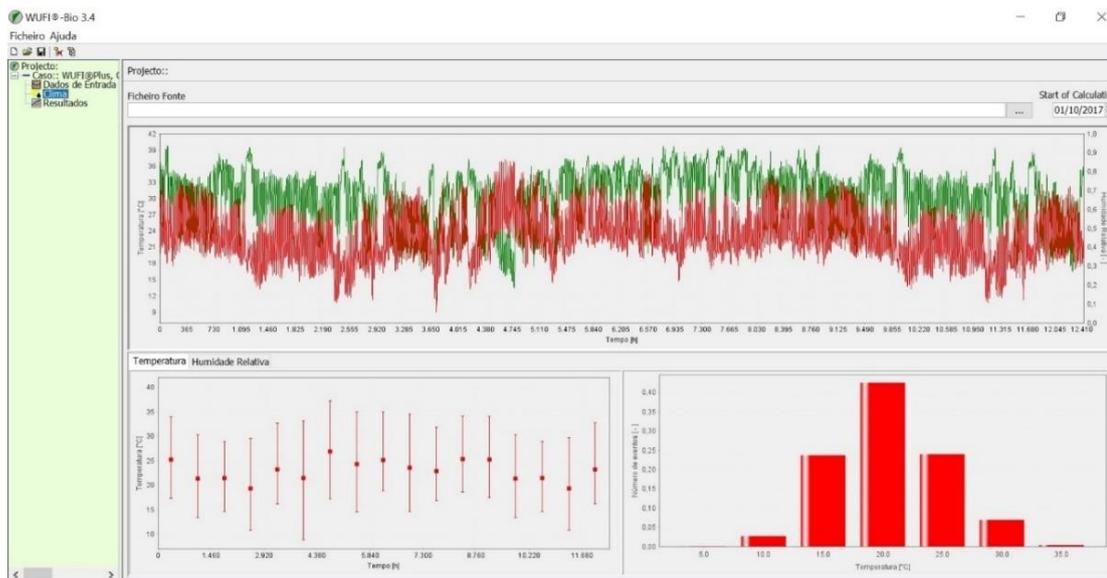
Neste trabalho foi utilizado o software Wufi-Bio® versão 3.4, disponível no website <https://wufi.de> (acessado em 12/02/2018).

Figura 23: Exemplo de entrada de dados: teor de umidade inicial dos esporos (30%) e classe de substrato (classe I).



Fonte: Autor

Figura 24: Exemplo de entrada de dados: umidade relativa e temperatura em determinada superfície, ao longo do tempo.



Fonte: Autor

A fim de simplificar a interpretação dos resultados, o software traz duas facilidades.

A primeira é que, ao invés de reportar o crescimento calculado em milímetros, conforme apresentado nas isopletras, o software também pode fornecer informações sobre o crescimento resultante dos micélios em forma de um “Índice de crescimento dos micélios”. Este índice, que na verdade foi importado e adaptado por Krus, Seidler e Sedlbauer (2010) do modelo proposto por Vittanen e Ritschkoff (1991), varia entre valores de 0 a 6 e deve sempre ser aplicado para resultados referentes a um ano de análise. A escala deste índice tem o seguinte significado, apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Escala do Índice de crescimento dos micélios

Índice	Descrição
0	Sem crescimento
1	Algum crescimento visível sob microscópio
2	Crescimento moderado visível sob microscópio, cobertura superior a 10%
3	Algum crescimento visível a olho nu
4	Cobertura visível acima de 10%
5	Cobertura maior que 50%
6	Cobertura 100%

Fonte: WUFI-Bio.

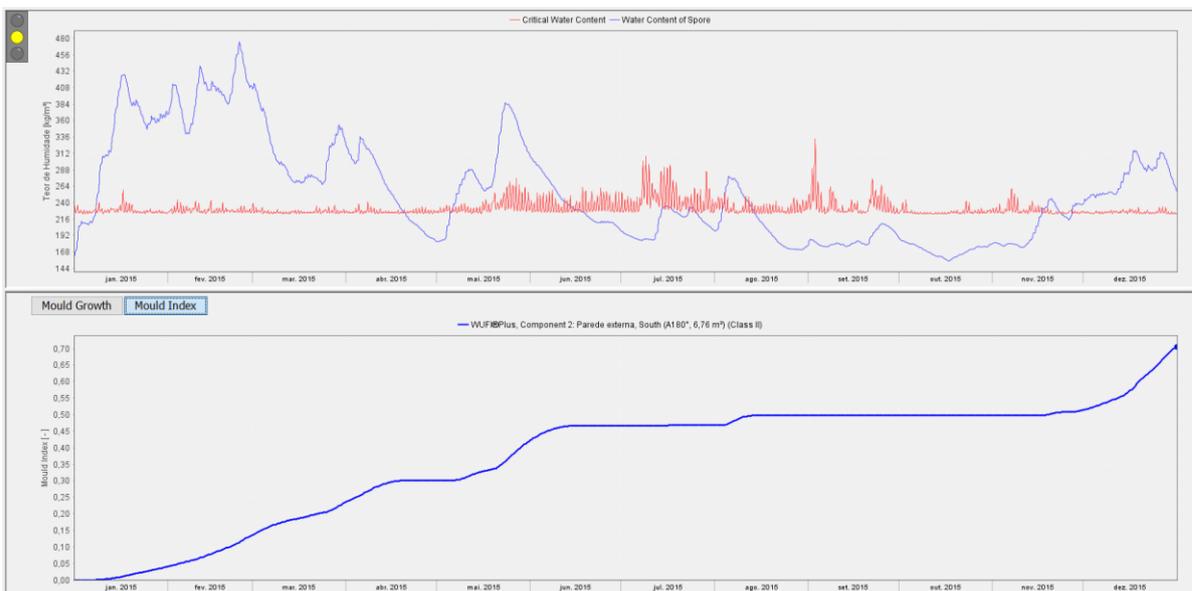
A segunda facilidade são as chamadas “luzes de semáforo” que, durante a análise das curvas do teor de umidade do esporo e teor de umidade crítico, acendem conforme as luzes de um semáforo (verde, amarelo e vermelho) para que seja possível rapidamente avaliar a gravidade do bolor esperado no caso estudado. O critério empregado pelo software para cada cor é o seguinte:

- Verde: crescimento esperado inferior a 50 mm/ano, o que corresponde a um índice de crescimento dos micélios aproximado de 0,5, normalmente aceitável.
- Amarelo: Crescimento entre 50mm/ano e 200 mm/ano, o que representa uma situação delicada, sugerindo-se mais análises para o caso.
- Vermelho: Crescimento esperado superior a 200 mm/ano, o que corresponde a um índice de crescimento dos micélios 2, normalmente não aceitável.

Alternativamente neste trabalho é adotada a seguinte interpretação:

- Verde: baixo risco de ocorrência de bolor.
- Amarelo: médio risco de ocorrência de bolor.
- Vermelho: alto risco de ocorrência de bolor.

Figura 25: Exemplo de resultados fornecidos pelo WUFI-Bio. Acima, as curvas do teor de umidade calculado no interior esporo (azul) e do teor de umidade crítico (vermelho), acompanhadas da luz indicativa (amarela). Abaixo, o crescimento acumulado ao longo do ano, atingindo um índice de crescimento dos micélios da ordem de 0,7.



Fonte: Autor

5 MÉTODO DE TRABALHO

Inicialmente, foi realizada revisão da literatura, buscando aprofundar o conhecimento dos fenômenos de transporte de calor e umidade que interferem no desempenho higrotérmico de edificações. Também foram estudadas as condições para a ocorrência de bolores em ambientes internos de edificações, conforme modelo proposto na literatura.

Após a revisão da literatura, foram realizadas vistorias em empreendimentos construídos com paredes de concreto que apresentam problemas de proliferação de bolores no interior de suas unidades habitacionais. As vistorias tiveram caráter qualitativo, ou seja, objetivou-se identificar visualmente e conceitualmente a relação entre as condições necessárias para o desenvolvimento de bolores, conforme estudado na revisão da literatura, e a ocorrência dos bolores na prática. Durante as vistorias foram colhidas informações sobre: a geometria das unidades habitacionais; a disposição, tipologia e dimensões das janelas; a taxa de ocupação; e detalhes construtivos (espessuras das paredes, pé-direito e acabamentos) conforme detalhado no item a seguir.

5.1 Empreendimentos analisados

Foram escolhidos três empreendimentos para compor os estudos deste trabalho. Devido ao grande porte destes empreendimentos, que juntos somam milhares de unidades habitacionais, não foi viável realizar levantamento estatístico das unidades afetadas. Porém, ficou explícito que grande parte das unidades destes empreendimentos sofrem com problemas de proliferação de bolor, algumas em menor grau que outras, enquanto parte das unidades não apresenta nenhum problema. Esta situação comprova o que já era esperado, que unidades idênticas podem ter diferentes graus de crescimento de bolor, influenciados por outros fatores como: orientação, posição e condições de uso e ocupação do imóvel, especialmente no que tange à liberação interna de vapor d'água (quantidade de moradores e seus hábitos) e operação da ventilação.

Nesta seção serão brevemente apresentados cada um destes empreendimentos, com fotos das vistorias realizadas e demais características pertinentes. Os nomes dos empreendimentos serão preservados, assumindo-se as

denominações A, B e C. As plantas baixas das unidades foram desenhadas por este autor, de acordo com medidas tomadas *in loco*.

De modo geral, observou-se que os bolores ocorrem nas superfícies internas das paredes externas, pois nestas superfícies ocorrem as menores temperaturas e, conseqüentemente, maiores umidades relativas superficiais. Em casos muito graves, com proliferação crônica, os bolores acabam espalhando-se também para outras superfícies, como paredes internas e tetos. Os cômodos mais afetados são os dormitórios. Isso pode ser explicado pela permanência prolongada dos ocupantes nestes espaços, no período noturno, combinando grande liberação de vapor d'água com o mesmo período em que as temperaturas superficiais das paredes atingem seus menores valores. Os banheiros também são bastantes afetados, ainda que em menor quantidade que os dormitórios, provavelmente devido à grande liberação de vapor d'água durante os banhos e pequena taxa de ventilação. Salas e cozinhas costumam ser menos atingidas, ainda assim foram observados alguns casos.

Constatou-se que a taxa de ocupação varia muito entre as unidades. Foram visitadas habitações com 1 a até 9 moradores, fato que pode causar grande diferença nas condições internas. Também notou-se ser comum o emboloramento de mobiliário, especialmente grandes guarda-roupas, posicionados juntos às paredes externas. Em situações como esta, a ventilação entre o móvel e a parede fica comprometida, criando uma camada de ar estagnado, resfriado pela parede, e com conseqüente alta umidade relativa. Soma-se o fato de o material rico em matéria orgânica do armário ser um ótimo substrato para a crescimento dos bolores (madeiras - substrato classe I).

Nas habitações pouco afetadas, os bolores costumam concentrar-se em locais críticos: atrás de móveis e nos cantos das paredes. Isto pode ser explicado, pois nestes locais as condições tendem a ser mais favoráveis aos bolores. Os cantos das paredes formam pontes térmicas geométricas, devido à área externa ser maior que a interna nestes locais. Assim, tendem a apresentar temperaturas mais baixas que o restante das paredes, em dias frios. Além disso, nos cantos dos cômodos e em locais confinados por móveis a ventilação é prejudicada.

Em todas as unidades visitadas, os moradores informaram que os problemas com bolores iniciaram logo no primeiro ano de ocupação, porém os mesmos não souberam informar com precisão o período exato. Os moradores também informam

que o bolor é recorrente, de forma que, quando realizam a limpeza com produtos à base de cloro, o bolor desaparece por algum tempo e depois retorna, tanto em épocas mais frias quanto durante o verão.

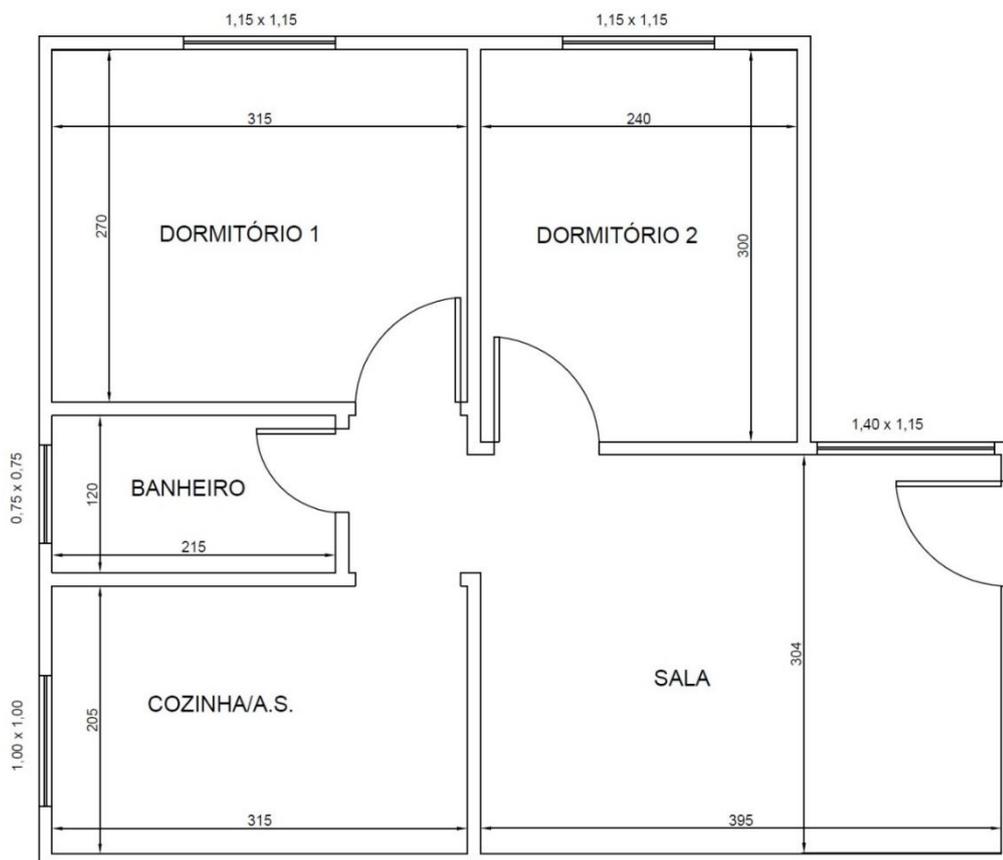
Nos três empreendimentos visitados as paredes possuem 10cm de espessura de concreto maciço. Detalhes dos acabamentos são informados na descrição de cada empreendimento.

1) Empreendimento A.

Localizado no município de Vinhedo-SP, entregue em janeiro/2013 composto por edificações em formato “H”, com quatro pavimentos cada e quatro unidades por pavimento. O revestimento das fachadas é em textura acrílica e o revestimento interno em gesso liso com pintura látex. Banheiro e cozinha contam com revestimento cerâmico até 1,5m de altura.

Na Figura 26 está representada a planta baixa das unidades. Nas Figuras 27 a 31 encontram-se fotos dos imóveis visitados.

Figura 26: Planta baixa de apartamento tipo, empreendimento A.



Fonte: Autor

Figura 27: Vista da edificação

Fonte: Autor

As dimensões das janelas e a razão entre abertura/área do piso podem ser encontradas na Tabela 6.

Tabela 6: Tamanho das janelas e relações com as áreas de piso

Cômodo	Tipo	Tamanho (m)	Abertura útil	Abertura útil/Área piso
Sala	Correr	1,40 x 1,15	0,81 m ²	6,70 %
Cozinha	Correr	1,00 x 1,00	0,50 m ²	7,74 %
Banheiro	Maxim-ar	0,75 x 0,75	0,28 m ²	10,90 %
Dormitório 1	Correr	1,15 x 1,15	0,66 m ²	7,77 %
Dormitório 2	Correr	1,15 x 1,15	0,66 m ²	9,18%

Fonte: Autor

Figura 28: Ocorrência leve de bolor em unidade habitacional



Fonte: Autor

Figura 29: Ocorrência acentuada de bolor em parede.



Fonte: Autor

Figura 30: Bolor em parede de dormitório



Fonte: Autor

Figura 31: Bolor em paredes de dormitórios



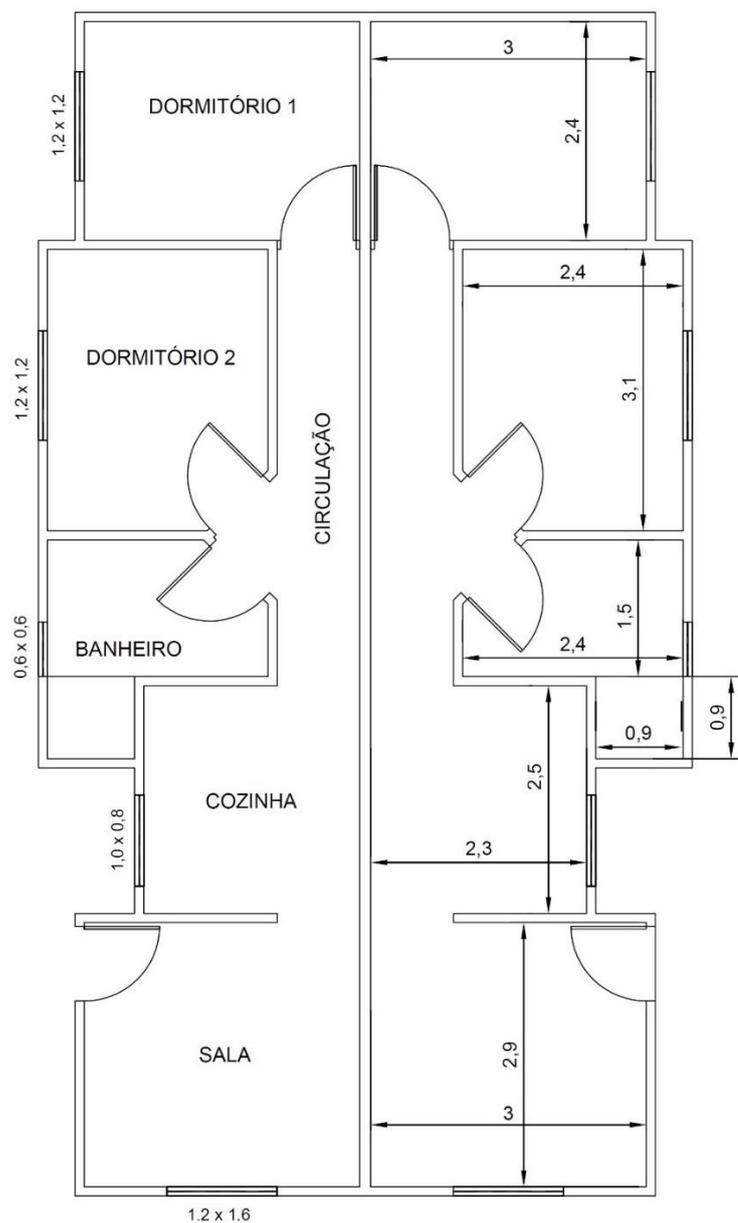
Fonte: Autor

2) Empreendimento B.

Localizado em Cajamar-SP, foi entregue em fases entre novembro/2014 e março/2015. É composto por casas térreas geminadas. Os revestimentos interno e externo são em textura acrílica, com exceção da cozinha e banheiro que possuem revestimento cerâmico até 1,5m de altura.

Na Figura 32 encontra-se a planta baixa das casas do Empreendimento B. Nas Figuras 33 a 39 estão fotos das unidades vistoriadas.

Figura 32: Planta baixa das casas geminadas



Fonte: Autor

Figura 33: Vista de uma casa, com duas unidades habitacionais.



Fonte: Autor

As dimensões das janelas e a razão entre abertura/área do piso podem ser encontradas na tabela 7.

Tabela 7: Tamanho das janelas e relações com áreas de piso.

Cômodo	Tipo	Tamanho (m)	Abertura útil	Abertura útil/Área piso
Sala	Correr e basculante	1,20 x 1,60	0,96 m ²	11,71%
Cozinha	Correr	1,00 x 0,80	0,40 m ²	6,81 %
Banheiro	Maxim-ar	0,60 x 0,60	0,18 m ²	4,28 %
Dormitórios	Correr	1,20 x 1,20	0,72 m ²	10 %

Fonte: Autor

Figura 34: Vista de rua do empreendimento



Fonte: Autor

Figura 35: Bolor em dormitório, notar que a proliferação se espalha até o teto.



Fonte: Autor

Figura 36: Bolor em dormitório



Fonte: Autor

Figura 37: Bolor em dormitório



Fonte: Autor

Figura 38: Bolor em banheiro



Fonte: Autor

Figura 39: Bolor em canto de paredes



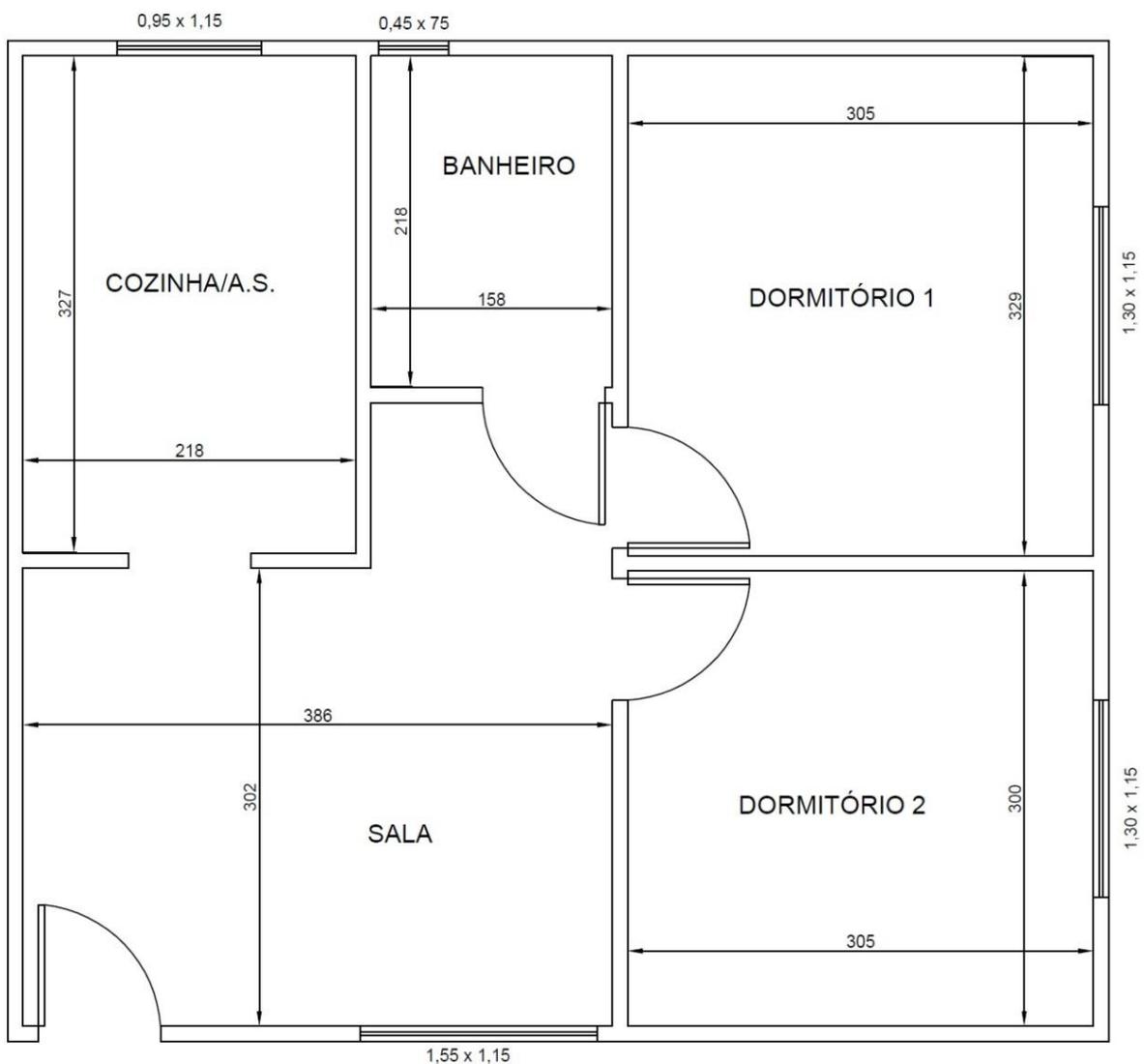
Fonte: Autor

3) Empreendimento C

Localizado em Sumaré-SP, entregue em março/2015. Composto por edificações em formato “H”, com cinco pavimentos cada e quatro apartamentos por pavimento. Os revestimentos interno e externo são em textura acrílica. No banheiro e cozinha há revestimento cerâmico até 1,5m de altura.

A Figura 40 contém a planta baixa do apartamento tipo do empreendimento C. As Figuras 41 a 47 contém fotos de unidades vistoriadas.

Figura 40: Planta baixa de apartamento tipo, empreendimento C.



Fonte: Autor

Figura 41: Vista geral do empreendimento

Fonte: Autor

As dimensões das janelas e a razão entre abertura/área do piso podem ser encontradas na Tabela 8.

Tabela 8: Tamanho das janelas e relação com áreas de piso, empreendimento C

Cômodo	Tipo	Tamanho (m)	Abertura útil	Abertura útil/Área piso
Sala	Correr	1,55 x 1,15	0,89 m ²	7,65%
Cozinha	Correr	0,95 x 1,15	0,55 m ²	7,66 %
Banheiro ¹	Maxim-ar	0,46 x 0,35	0,08 m ²	2,34 %
Dormitório 1	Correr	1,30 x 1,15	0,75 m ²	7,45 %
Dormitório 2	Correr	1,30 x 1,15	0,75 m ²	8,17%

Fonte: Autor

¹ A janela possui medidas totais de 0,46 x 0,74m, porém apenas parte dela pode ser aberta, um basculante de 0,46 x 0,35m.

Figura 42: Bolor em parede de dormitório, marcado por tentativas de limpeza



Fonte: Autor

Figura 43: Bolor em dormitório



Fonte: Autor

Figura 44: Bolor em canto de paredes



Fonte: Autor

Figura 45: Bolor em parede de dormitório. Notar diferença entre a parede externa (direita) e interna (esquerda)



Fonte: Autor

Figura 46: Bolor em dormitório, agravado no canto das paredes



Fonte: Autor

Figura 47: Bolor em dormitório



Fonte: Autor

5.2 Procedimento computacional

Após as vistorias, foram realizadas simulações computacionais baseadas nas unidades habitacionais destes empreendimentos vistoriados, tomando-se como base suas geometrias e localizações, a fim de se identificar o risco de ocorrência de bolores nestas habitações.

As simulações computacionais para obtenção das condições higrotérmicas nas superfícies das paredes (temperaturas e umidades relativas superficiais) foram realizadas com o software WUFI Plus®, enquanto que para a aplicação do modelo Bio-higrotérmico foi utilizado o software WUFI-Bio®, ambos apresentados no capítulo 4.

Entre cada simulação realizada, foram gradativamente variados certos parâmetros, com o objetivo de analisar-se a influência destes sobre o risco de ocorrência de bolores nas edificações estudadas. Buscou-se analisar a influência dos seguintes fatores: a posição vertical do apartamento (térreo, intermediário ou cobertura), a orientação geográfica, a ventilação e a ocupação (número de moradores). Ao final, foram selecionados alguns casos com resultados críticos e as respectivas simulações foram refeitas, porém adotando-se outras tipologias de paredes. Assim, objetiva-se comparar os resultados obtidos para diversos sistemas construtivos, analisando se o sistema construtivo com paredes de concreto apresenta maior potencial para a ocorrência de bolores.

Todos os resultados apresentados neste trabalho referem-se às paredes dos dormitórios nº 2, especificamente a parede que possui a janela, pois estes cômodos apresentaram-se como os mais afetados nas vistorias realizadas.

As variáveis adotadas nas simulações realizadas foram:

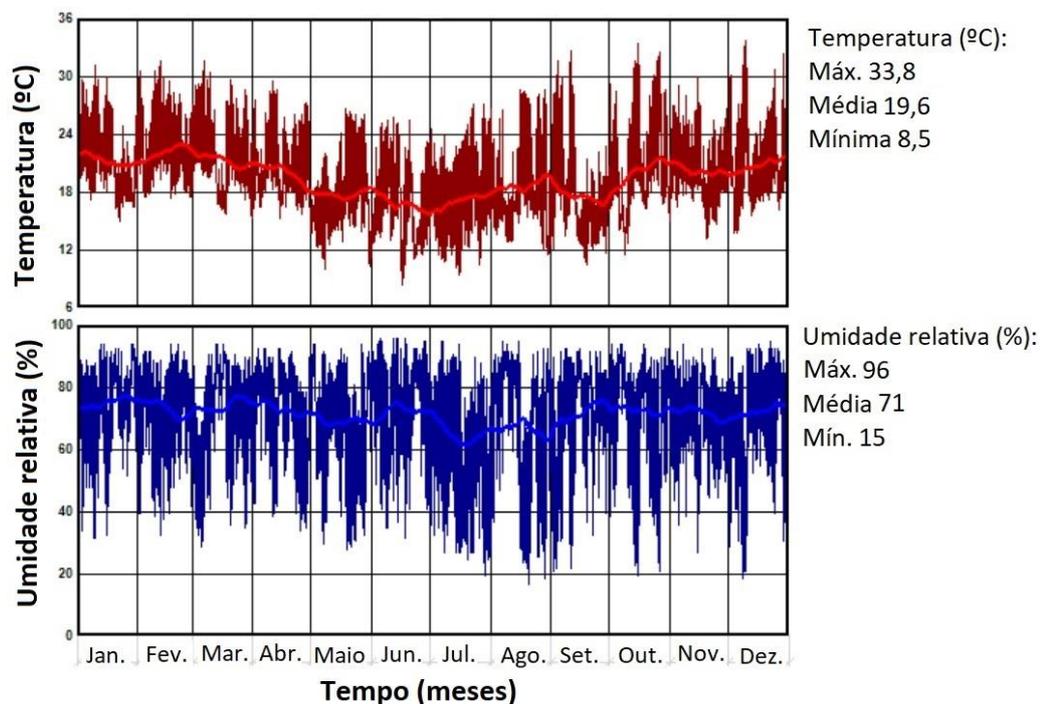
- No software Wufi-Plus:
 - Modelo de cálculo do software: foi utilizado o modelo de cálculo “higrotérmico”, que considera o transporte de massa e calor simultâneos, baseado no trabalho de Kunzel (1995). Foi escolhida precisão “alta”. Não foi considerada a absorção de água da chuva pelas fachadas, pois adotou-se a premissa de que as texturas acrílicas tem propriedade hidro-repelente, evitando a absorção de água.

- Períodos: Todas as simulações foram realizadas para períodos de um ano, com intervalos de uma hora.

- Dados climáticos: Para os empreendimentos A e B, respectivamente localizados em Vinhedo e Cajamar, foram utilizados os dados climáticos da cidade de São Paulo. Já para o empreendimento C, localizado em Sumaré, foram adotados os dados climáticos de Campinas.

Os arquivos com os dados climáticos foram obtidos do acervo do software EnergyPlus² (USDOE, 2017), sendo criados a partir de relatórios do INMET e atualizados em 2016. Nas Figuras 48 e 49 estão apresentados os perfis de temperatura e umidade relativa do ar, ao longo do ano, para as duas cidades consideradas.

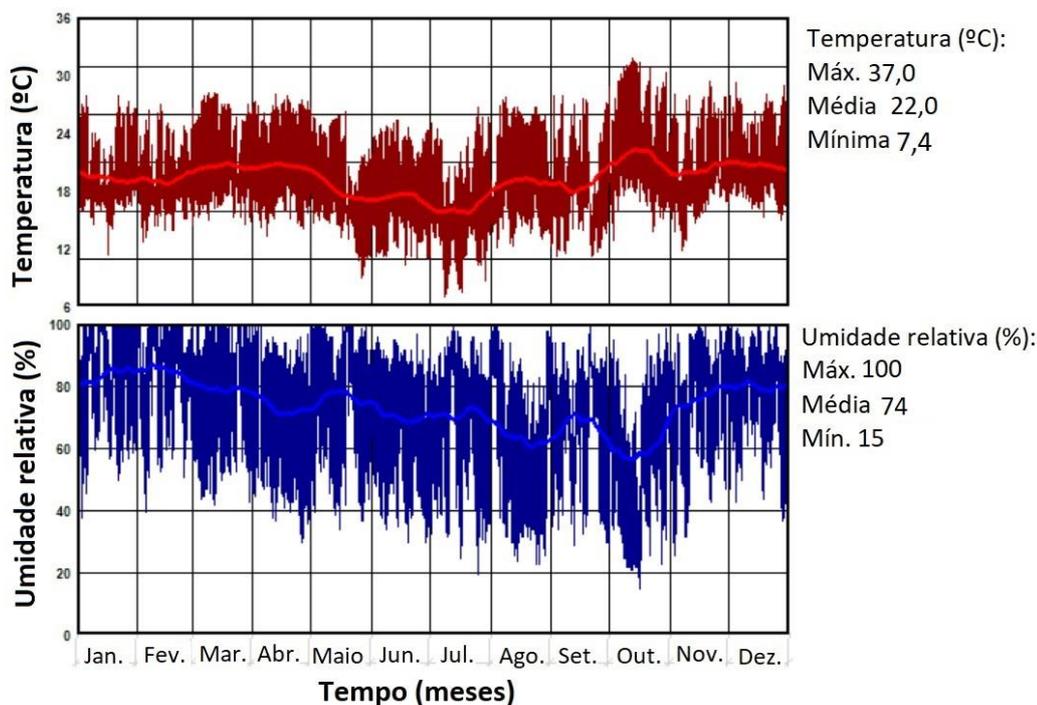
Figura 48: Perfil de temperatura e umidade relativa do ar, ao longo do ano, para a cidade de São Paulo.



Fonte: USDOE (2017). Gráfico gerado pelo software WUFI-Plus®.

² Obtidos em <https://energyplus.net/weather> (acessado em 20/01/2018).

Figura 49: Perfil de temperatura e umidade relativa do ar, ao longo do ano, para a cidade de Campinas.



Fonte: USDOE (2017). Gráfico gerado pelo software WUFI-Plus®.

- Geometria: foram consideradas as plantas baixas dos três empreendimentos visitados (A, B e C), apresentadas no item 5.1.

- Cores das fachadas: Todas as simulações foram realizadas considerando-se superfícies externas de cor média, com coeficiente de absorvância térmica de radiação solar 0,4 e emissividade 0,9.

- Ventilação: Optou-se por adotar taxas de ventilação fixas, representadas por índices de renovações horárias. Desta forma, a influência da ventilação pode ser analisada com maior clareza. A NBR 15.575 (ABNT, 2013) preconiza duas taxas de ventilação para a simulação do desempenho térmico de habitações. Dependendo da situação analisada, adota-se taxa de renovação do ar em 1/h (referente à situação com janelas fechadas) ou 5/h (referente à situação com janelas abertas). Portanto, este trabalho adotou taxas de renovação do ar variando entre estes dois valores. Adicionalmente, foi também incluída a taxa de renovação de 0,5/h que, conforme preconiza a norma alemã DIN 4108-2 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2013), é a taxa de ventilação mínima exigida em edificações para fins higiênicos.

Assim, as taxas de ventilação estudadas neste trabalho são: 0,5/h, 1/h, 2/h, 3/h, 4/h e 5/h.

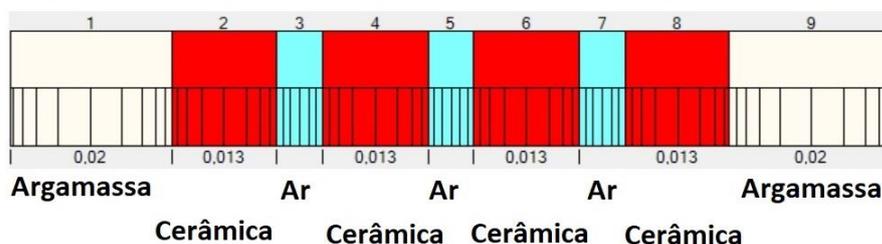
- Taxa de ocupação: variou-se o número de ocupantes dos dormitórios entre 2, 3 e 4. Foi considerada a quantidade de vapor d'água liberada por cada ocupante, em repouso nos dormitórios, em 45g/h, no período entre as 22h e 8h.

- Paredes: Nas simulações foram utilizadas as tipologias de paredes listadas abaixo, com a respectiva nomenclatura adotada:

- “Parede de concreto”: Configuração da parede comumente utilizada em empreendimentos deste sistema construtivo. Composição: 10 cm de concreto maciço revestida em ambas as faces com textura acrílica de espessura 2,5 mm. Coeficiente global de transmissão térmica $U = 4,065 \text{ W/m}^2\text{K}$, Capacidade térmica $Ct = 203 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ e Espessura da camada de ar de difusão equivalente $Sd = 18,43 \text{ m}$.

- “Parede de Blocos cerâmicos”: Parede adotada como padrão pela Diretriz SINAT nº 001, revisão 03 (SISTEMA NACIONAL DE AVALIAÇÕES TÉCNICAS, 2017) para comparação do risco de ocorrência de condensação superficial com as paredes de concreto: bloco cerâmico vazado de 14 cm e revestimento argamassado em ambas as faces com 2 cm. Devido à estrutura vazada do bloco é preciso adotar uma série de camadas que conjuntamente representam as propriedades do bloco. Foi utilizada a estrutura esquematizada na Figura 50. Coeficiente global de transmissão térmica $U = 2,01 \text{ W/m}^2\text{K}$, Capacidade térmica $Ct = 156 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ e Espessura da camada de ar de difusão equivalente $Sd = 1,27 \text{ m}$.

Figura 50: Composição esquemática da parede de blocos cerâmicos utilizada nas simulações computacionais.



Fonte: Autor.

- “Parede tijolos maciços”: Parede com tijolos cerâmicos maciços comuns, assentados na maior dimensão, resultando em uma camada de 19cm de tijolo revestido em ambas as faces por 2 cm de argamassa. Coeficiente global de transmissão térmica $U = 2,533 \text{ W/m}^2\text{K}$, Capacidade térmica $C_t = 379 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ e Espessura da camada de ar de difusão equivalente $S_d = 3,80 \text{ m}$.

- “Parede de concreto + EPS”: Baseada na parede de concreto comum, porém com adição de 3 cm de EPS posicionada externamente à camada de concreto comum, maciço, com 10cm de espessura e revestimento com 2,5 mm de textura acrílica em ambas as faces. Coeficiente global de transmissão térmica $U = 1,004 \text{ W/m}^2\text{K}$, Capacidade térmica $C_t = 204 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ e Espessura da camada de ar de difusão equivalente $S_d = 19,93 \text{ m}$.

- Parede de concreto com aditivo incorporador de ar: Devido à perda de resistência mecânica causada pela incorporação de ar no concreto, foi arbitrada camada de concreto com 25cm de espessura. O acabamento é em textura acrílica em ambas as faces com 2,5mm de espessura. Coeficiente global de transmissão térmica da parede $U = 0,508 \text{ W/m}^2\text{K}$, Capacidade térmica $C_t = 135 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ e Espessura da camada de ar de difusão equivalente $S_d = 2,51 \text{ m}$.

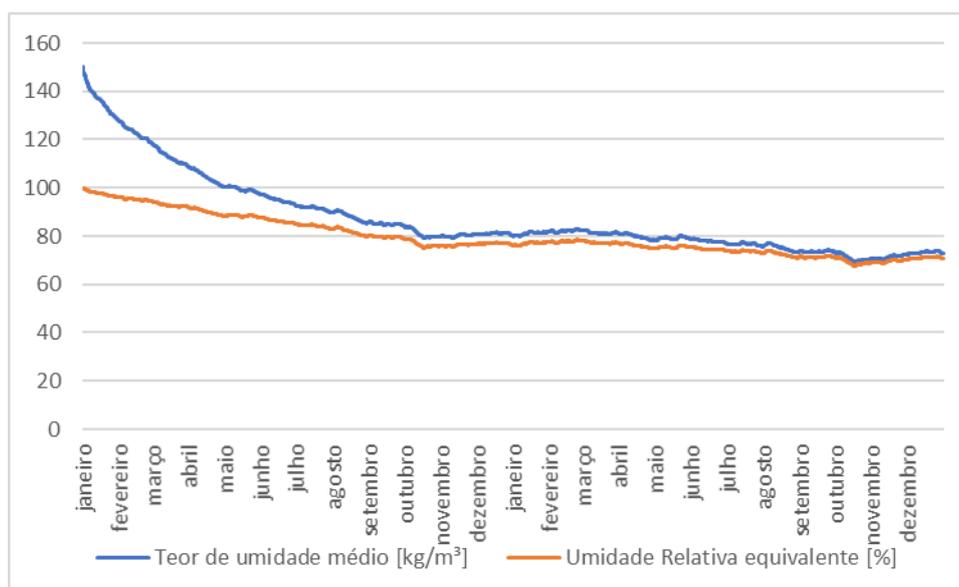
As propriedades higrotérmicas dos materiais constituintes das paredes encontram-se no Anexo 8.

- Teor de umidade inicial: Para estabelecer o teor de umidade inicial adotado nas simulações, analisou-se como o teor de umidade das paredes varia ao longo do tempo, após a construção, para o caso de uma das edificações estudadas.

Estabelecendo como umidade inicial a umidade de construção, ou seja, a umidade contida nos materiais recém-executados, que equivale 150 kg/m^3 para o concreto, por exemplo, obteve-se por meio de simulação computacional como estes teores variam quando expostos às condições ambientais naturais, sem ocupação da edificação e taxa de ventilação 5 renovações/hora, ao longo dos dois primeiros anos.

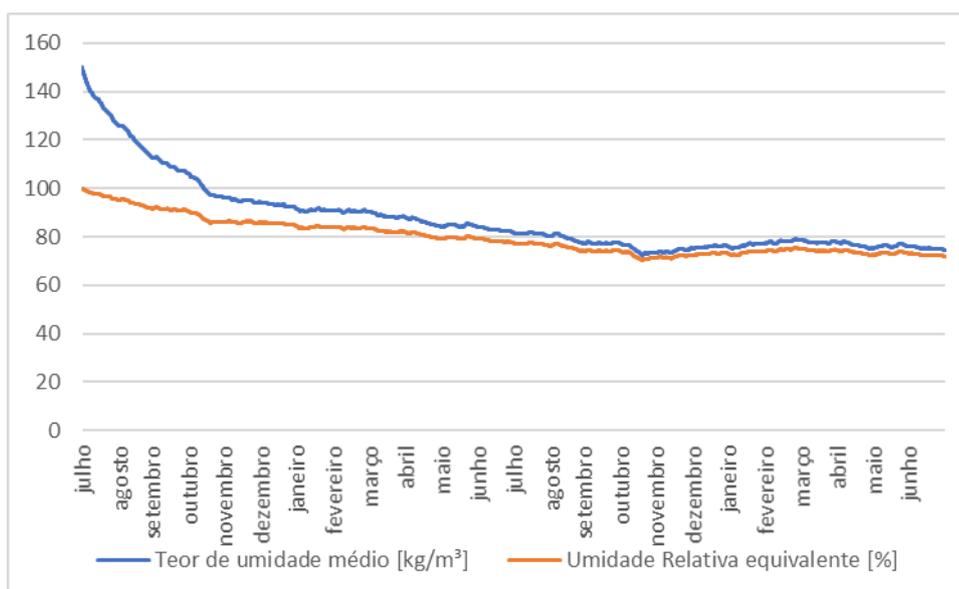
Os resultados estão nas Figuras 51 e 52. Na primeira considera-se a execução da parede em janeiro (verão) e na segunda em julho (inverno).

Figura 51: Umidade média ao longo do perfil da parede de concreto, após construção em janeiro



Fonte: Autor.

Figura 52: Umidade média ao longo do perfil da parede de concreto, após construção em julho



Fonte: Autor.

Em ambos os casos percebe-se que após um ano de execução da parede a umidade relativa média ao longo de seu perfil resultou em torno de 75%. Desta forma, nas simulações computacionais apresentadas no capítulo 6, adotou-se o teor de umidade inicial dos materiais constituintes das paredes correspondente a 75% de

umidade relativa, de forma a considerar o lapso de tempo entre a execução da parede e a ocupação das edificações em aproximadamente 1 ano. Como exemplo, para a textura acrílica e para o concreto isto equivale a teores de umidade de $89,75 \text{ kg/m}^3$ e $78,5 \text{ kg/m}^3$, respectivamente.

Este valor adotado é interessante, pois estabelece uma situação, *a priori*, não favorável ao desenvolvimento dos bolores. Ou seja, os bolores só ocorrerão caso, com o decorrer do uso da edificação, as condições superficiais das paredes convirjam para uma situação favorável ao seu desenvolvimento.

- Portas e Janelas: As janelas foram consideradas com estrutura de alumínio e vidro simples, operável, com coeficiente global de transmissão $U = 7,24 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. No caso das janelas dos dormitórios foi adotado coeficiente de sombreamento 0,5 pois, conforme observado nas vistorias, estas janelas possuem uma das folhas “cega”. Já as portas foram consideradas constituídas por madeiras leves, com coeficiente global de transmissão $U = 0,794 \text{ W/m}^2$.

- Posição vertical do apartamento: Para os empreendimentos A e C (prédios) foram simulados apartamentos localizados no térreo, na cobertura e apartamentos intermediários. O apartamento térreo foi considerado em contato com o solo, cuja temperatura foi adotada em $21,4^\circ\text{C}$ para o dia 15/fev e $17,8^\circ\text{C}$ para o dia 15/jul (USDOE, 2017), resultando numa curva senoidal com temperatura média de $19,6^\circ\text{C}$ e amplitude de $1,8^\circ\text{C}$, conforme Figura 53.

Figura 53: Curva da temperatura do solo ao longo do ano.



Fonte: USDOE (2017). Gráfico desenhado pelo software WUFI-Plus®.

Já nos apartamentos de cobertura foi adotado telhado composto por telhas cerâmicas, sistema utilizado nos três empreendimentos visitados. Propriedades das telhas: espessura = 2,5 cm, massa específica = 1720 kg/m^3 , condutibilidade térmica

= 1 W/m.K, calor específico = 920 J/kg.K, coeficiente de absorvância solar = 0,7, emissividade = 0,9.

Nos apartamentos intermediários considerou-se que ambas as lajes (de piso e superior) fazem divisa com outros ambiente idênticos, ou seja, não ocorrem transferências de calor e umidade através delas para os apartamentos limítrofes.

- No Software Wufi-Bio.

- Substrato: Em todos os casos foi considerada classe de substrato II, que corresponde a materiais de construção porosos, conforme explicado no capítulo 3. Muito embora, pôde ser observado durante as vistorias que, em muitos casos, devido à contaminação superficial das paredes, poder-se-ia adotar a classe de substrato I, o que geraria resultados de crescimento mais extenso.

- Umidade inicial dos esporos: Em todos os casos foi adotada a umidade inicial padrão proposta pelo software, correspondente a uma umidade relativa de 50%.

- Resultados: São apresentados como resultados: o balanço de umidade no interior dos esporos e a curva do teor de umidade crítico, acompanhados da luz indicativa de risco. Também é apresentado o 'Índice de crescimento dos micélios', acumulado ao final do período simulado de um ano.

O critério adotado para a interpretação dos resultados é o mesmo das luzes indicativas de risco, descritos no capítulo 4. Ou seja, luzes verdes representam baixo risco de ocorrência de bolores, e/ou crescimento previsto aceitável. Luzes amarelas e vermelhas representam, respectivamente, médio e alto risco de ocorrência, e/ou previsões de crescimento de bolores não aceitáveis.

6 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas simulações computacionais, acompanhados de comentários, separados em seções de acordo com os fatores analisados, a saber: posição vertical do apartamento, orientação geográfica da parede, ventilação do ambiente e taxa de ocupação.

Ao final do capítulo são selecionados alguns casos com resultados críticos. Os mesmos parâmetros destes casos são utilizados em outras simulações, porém com diferentes sistemas construtivos, a título de comparação dos resultados obtidos para cada sistema.

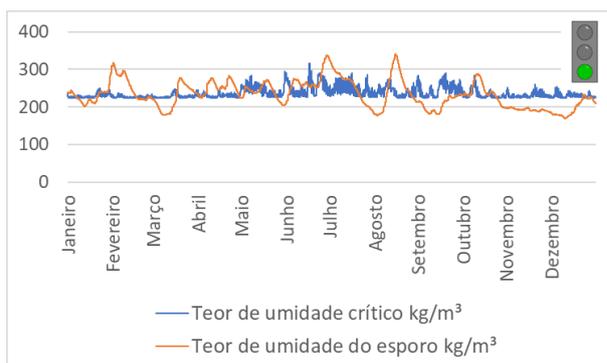
6.1 Análise da influência da posição vertical do apartamento

Nesta seção é avaliada a influência da posição vertical da unidade (térreo, apartamento intermediário ou cobertura) no risco de ocorrência de bolores. Para tanto, são apresentados os resultados das simulações para cada uma destas posições, referentes aos dois empreendimentos de prédios estudados. Nestas simulações as taxas de ventilação foram mantidas fixas em 2 renovações/hora e a parede analisada possui orientação sul. Além disso, foram considerados 3 ocupantes no dormitório, em repouso, das 22h às 8h, o que equivale a uma liberação interna de 135 g/h de vapor d'água.

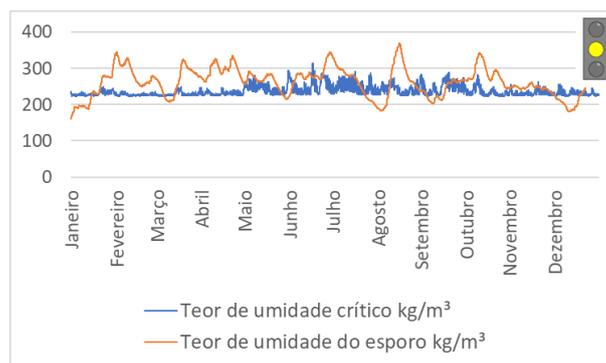
6.1.1 Empreendimento A

As Figuras 54 a 56 apresentam os perfis do teor de umidade crítico e do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano, para o empreendimento A.

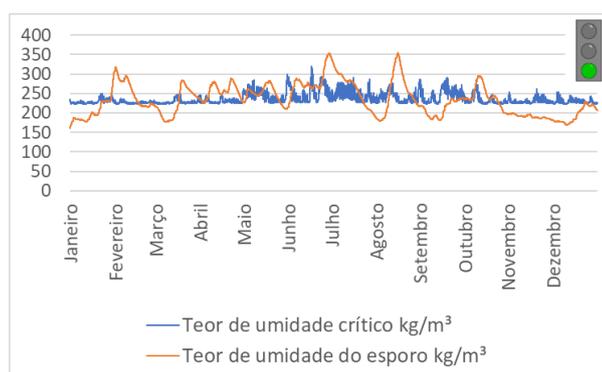
A Figura 57 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para as três posições analisadas (térreo, intermediário e cobertura).

Figura 54: Apartamento intermediário

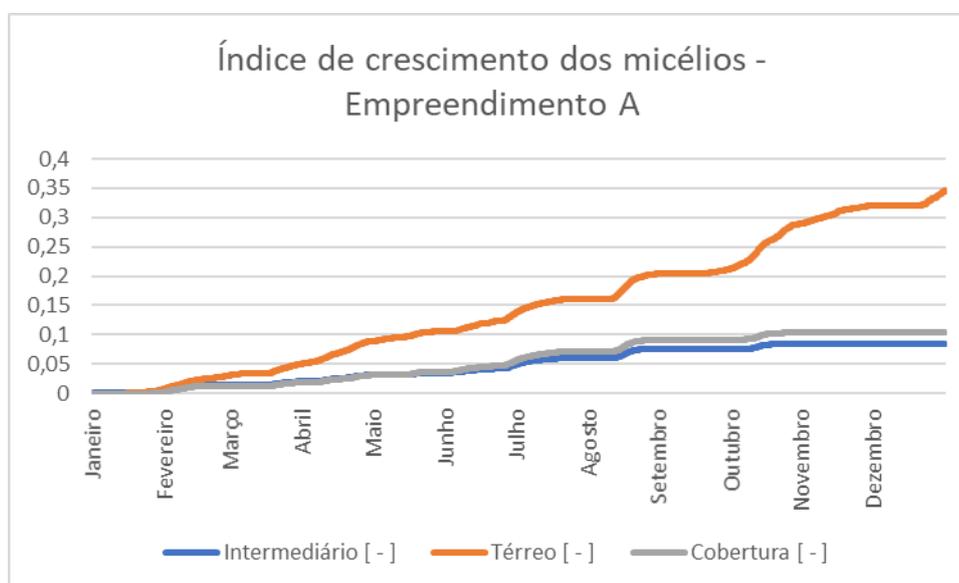
Fonte: Autor

Figura 55: Apartamento térreo

Fonte: Autor

Figura 56: Apartamento de cobertura

Fonte: Autor

Figura 57: Empreendimento A – Comparativo do índice de crescimento dos micélios

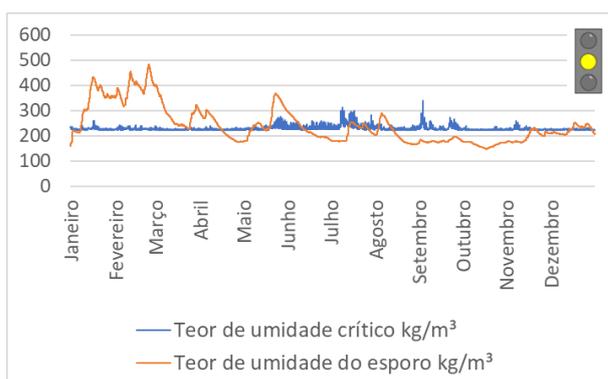
Fonte: Autor

6.1.2 Empreendimento C

As Figuras 58 a 60 apresentam os perfis do teor de umidade crítico e do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano.

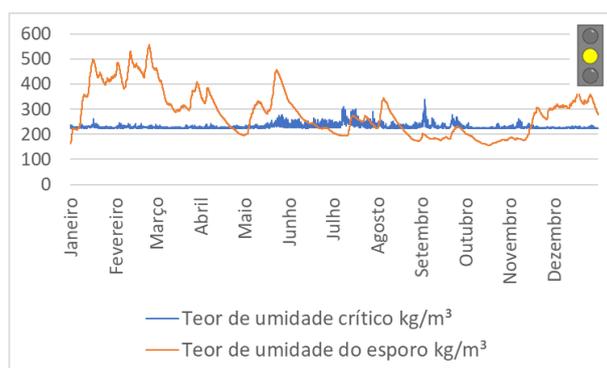
A Figura 61 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para as três posições analisadas (térreo, tipo e cobertura), referentes ao empreendimento C.

Figura 58: Apartamento intermediário



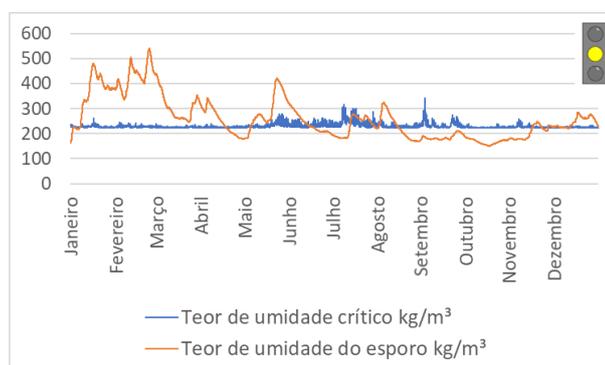
Fonte: Autor

Figura 59: Apartamento térreo

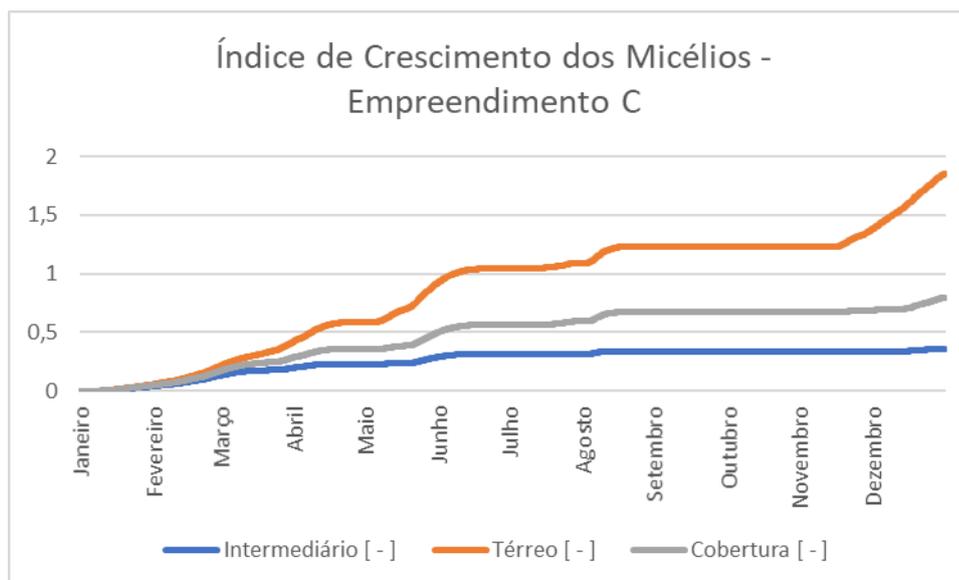


Fonte: Autor

Figura 60: Apartamento de cobertura



Fonte: Autor

Figura 61: Empreendimento C - Índice de crescimento dos micélios

Fonte: Autor

Comentários: Em ambos os empreendimentos os apartamentos térreos apresentaram resultados com crescimento mais extenso de bolores, seguidos pelos apartamentos de cobertura e, com resultados menores, restaram os apartamentos tipo. Isto pode ser explicado pelo fato de o apartamento térreo manter contato com o solo, que apresenta temperatura mais estável. Desta maneira, nos meses de verão a temperatura do solo tende a ser inferior à temperatura média do ambiente, resfriando-o e, conseqüentemente, elevando a umidade relativa do ar (e das superfícies). Esta situação justifica, por exemplo, o aumento acentuado do Índice de crescimento dos micélios observado para o apartamento térreo na Figura 61, ao final do ano, próximo aos meses de verão. No caso dos apartamentos de cobertura, embora recebam maior quantidade de calor durante o dia (insolação), a sua perda de calor durante a noite (ao fundo de céu) é maior, resultando em menores temperaturas noturnas, coincidindo com o mesmo período onde há maior liberação de umidade nos dormitórios.

Como observação adicional, considerando que ambos empreendimentos apresentam características muito próximas (geometria, dimensões, sistema construtivo e condições de uso), é possível notar que o crescimento dos bolores esperado sob o clima de Campinas é maior do que para o da cidade de São Paulo.

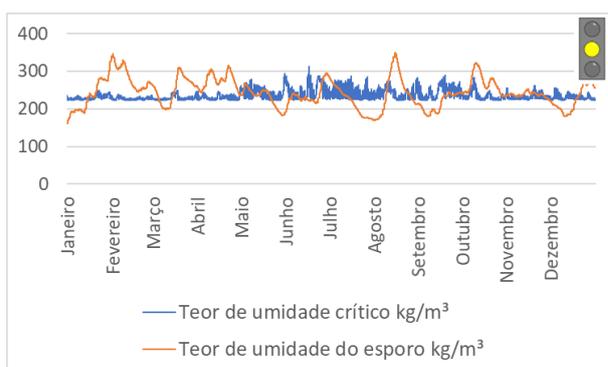
6.2 Influência da orientação

Nesta seção é analisada a influência da orientação da edificação na ocorrência dos bolores. A orientação apresentada corresponde à orientação da parede analisada, do dormitório. Em todos os casos foi considerada ocupação de 3 pessoas, em repouso das 22h às 8h, o que corresponde a uma liberação de 135g/h de vapor d'água. A ventilação foi mantida fixa em 3 renovações/hora. Nos empreendimentos A e C foram considerados apartamentos térreos.

6.2.1 Empreendimento A

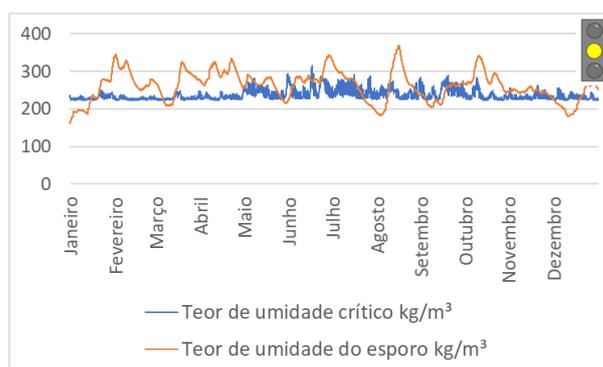
As Figuras 62 a 65 apresentam os perfis do teor de umidade crítico e do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano. A Figura 66 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para as quatro orientações analisadas (norte, sul, leste, oeste), referentes ao empreendimento A.

Figura 62: Orientação Norte



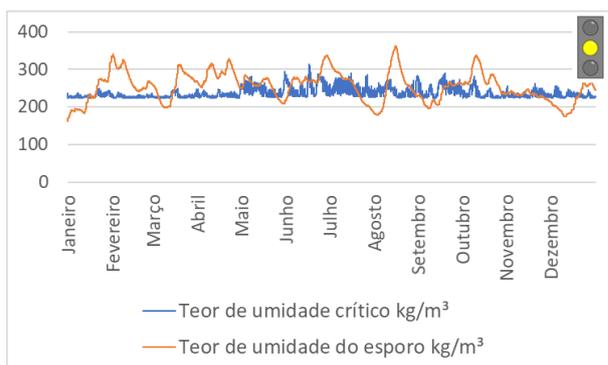
Fonte: Autor

Figura 64: Orientação Sul



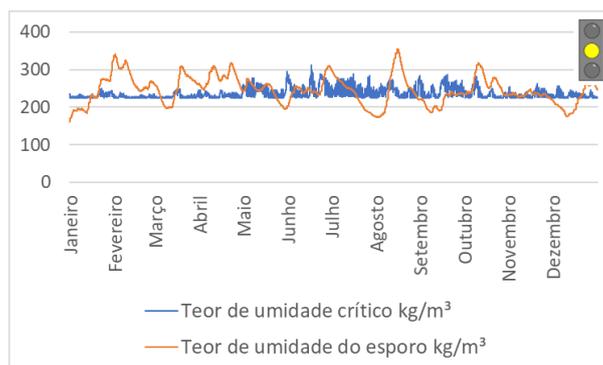
Fonte: Autor

Figura 63: Orientação Leste



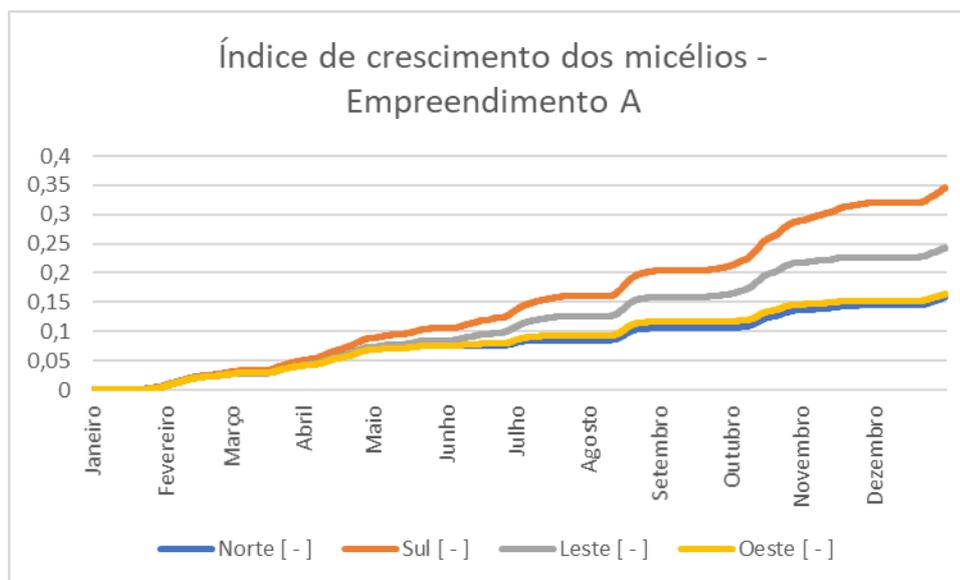
Fonte: Autor

Figura 65: Orientação Oeste



Fonte: Autor

Figura 66: Comparativo do índice de crescimento dos micélios para as quatro orientações - Empreendimento A

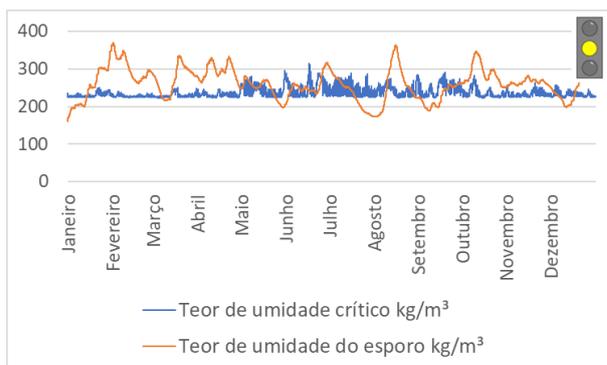


Fonte: Autor

6.2.2 Empreendimento B

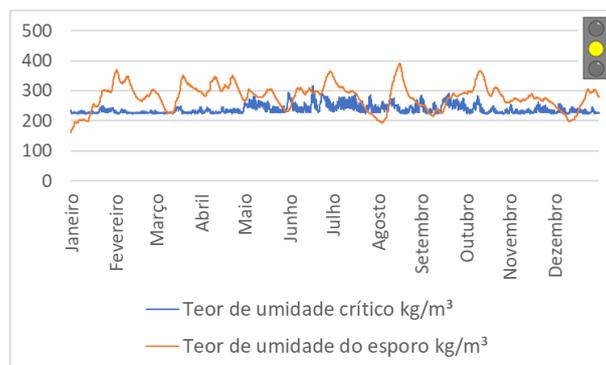
As Figuras 67 a 70 apresentam os perfis do teor de umidade crítico e do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano. A Figura 71 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para as quatro orientações analisadas (norte, sul, leste, oeste), referentes ao empreendimento B.

Figura 67: Orientação Norte



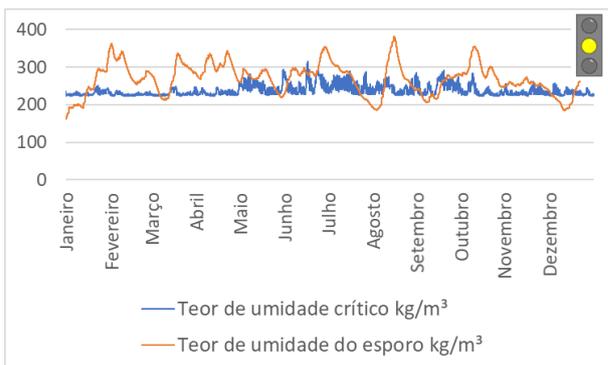
Fonte: Autor

Figura 68: Orientação Sul



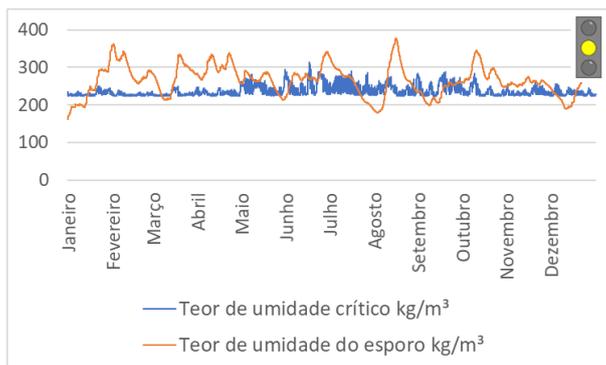
Fonte: Autor

Figura 69: Orientação Leste



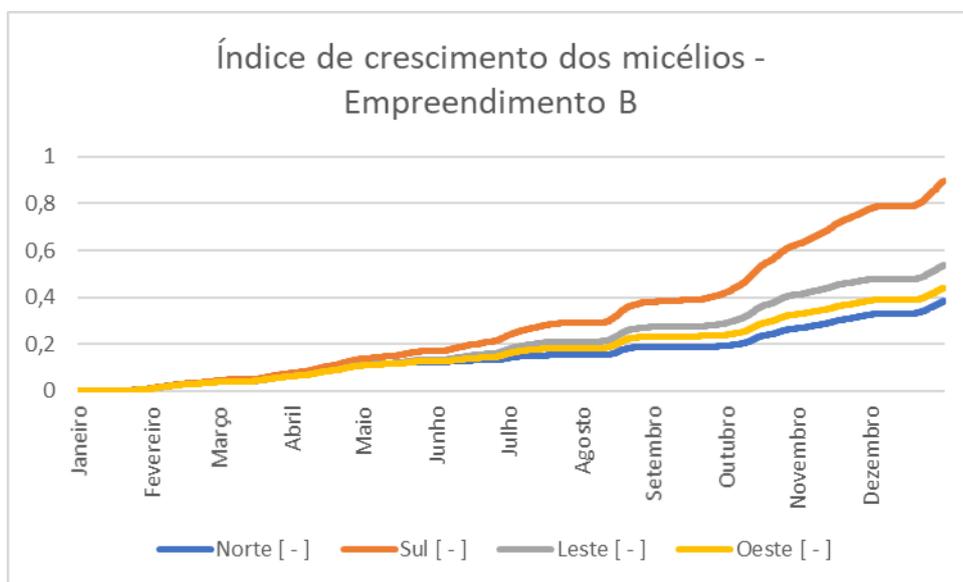
Fonte: Autor

Figura 70: Orientação Oeste



Fonte: Autor

Figura 71: Comparativo do índice de crescimento dos micélios para as quatro orientações - Empreendimento B

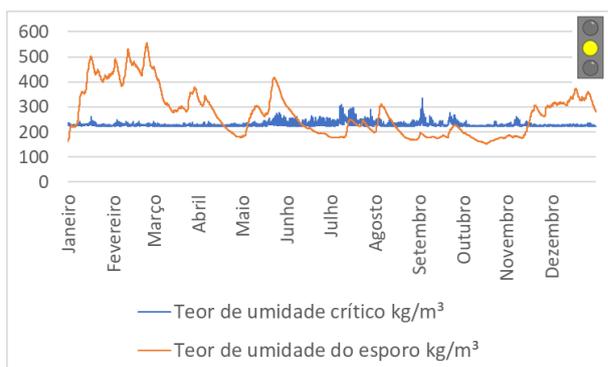


Fonte: Autor

6.2.3 Empreendimento C

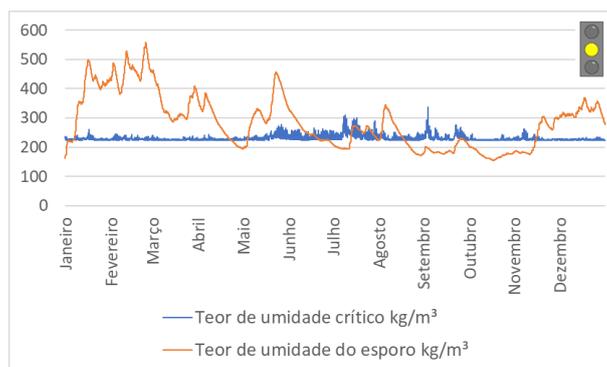
As Figuras 72 a 75 apresentam os perfis do teor de umidade crítico e do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano. A Figura 76 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para as quatro orientações analisadas (norte, sul, leste, oeste), referentes ao empreendimento C.

Figura 72: Orientação Norte



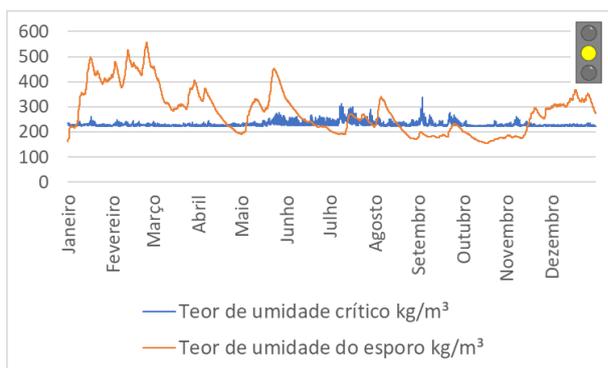
Fonte: Autor

Figura 74: Orientação Sul



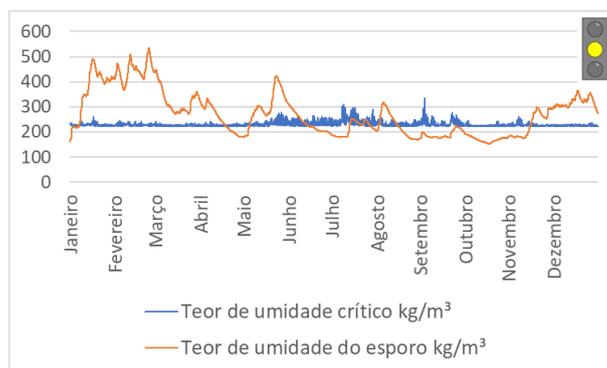
Fonte: Autor

Figura 73: Orientação Leste



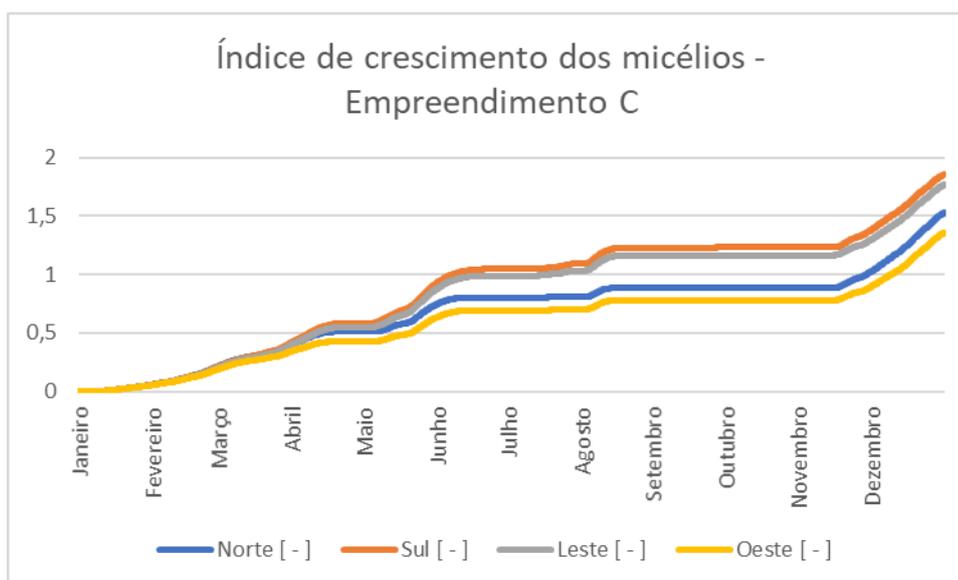
Fonte: Autor

Figura 75: Orientação Oeste



Fonte: Autor

Figura 76: Comparativo do índice de crescimento dos micélios para as quatro orientações - Empreendimento C



Fonte: Autor

Comentários: Em todos os casos as paredes voltadas à sul mostraram-se mais propícias ao crescimento dos bolores, seguidas pelas paredes orientadas para o leste. Paredes voltadas para norte e oeste apresentaram resultados aproximados, inferiores aos dois anteriores.

Neste caso, a explicação é que as paredes voltadas à sul recebem menor insolação, o que resulta em menores temperaturas superficiais e, conseqüentemente, maior umidade relativa superficial. Paredes orientadas para a direção leste recebem insolação na parte da manhã, porém ao entardecer já não recebem mais a radiação solar. Por este motivo também atingem temperaturas mais baixas no período noturno, mesmo período onde há maior liberação de umidade nos ambientes analisados.

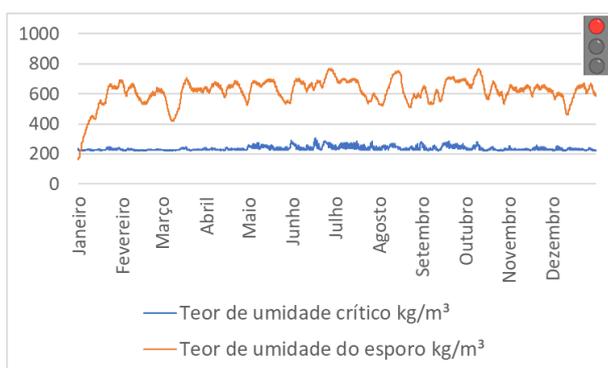
6.3 Influência da ventilação

Nesta seção é analisada a influência da ventilação no desenvolvimento de bolores nas unidades. Para tal, foram realizadas simulações considerando unidades térreas, com orientação da parede à sul e 3 ocupantes no dormitório, variando-se as taxas de ventilações entre: 0,5/h, 1/h, 2/h, 3/h, 4/h e 5/h. Também foi incluído um modelo de ventilação “sazonal” onde a ventilação durante o inverno é de 0,5/h, enquanto que no restante do ano é mantida em 3/h.

6.3.1 Empreendimento A

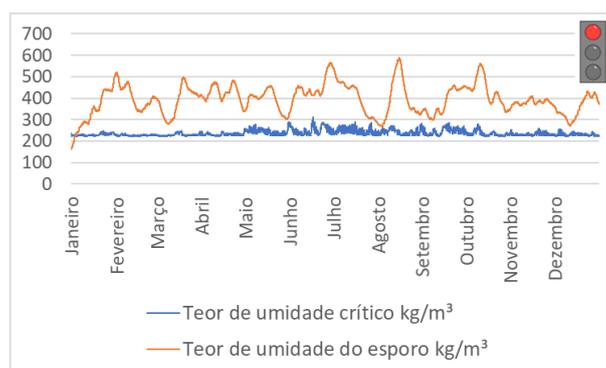
As Figuras 77 a 83 apresentam os perfis do teor de umidade crítico e do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano. A Figura 84 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para cada taxa de ventilação analisada, referentes ao empreendimento A.

Figura 77: Ventilação 0,5/h



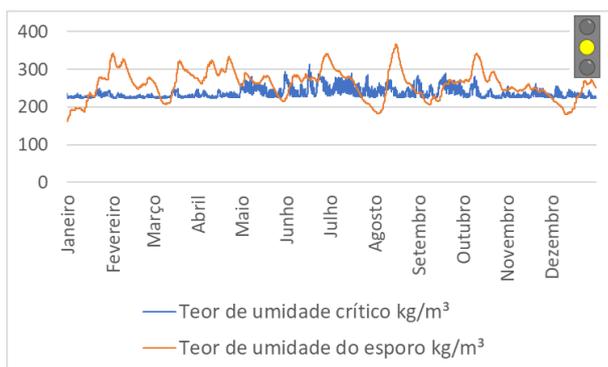
Fonte: Autor

Figura 79: Ventilação 1/h



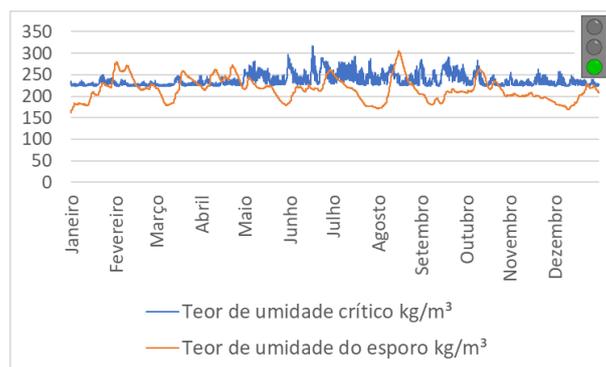
Fonte: Autor

Figura 78: Ventilação 2/h



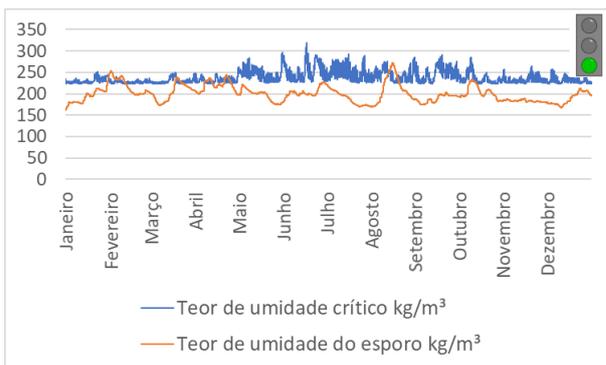
Fonte: Autor

Figura 80: Ventilação 3/h



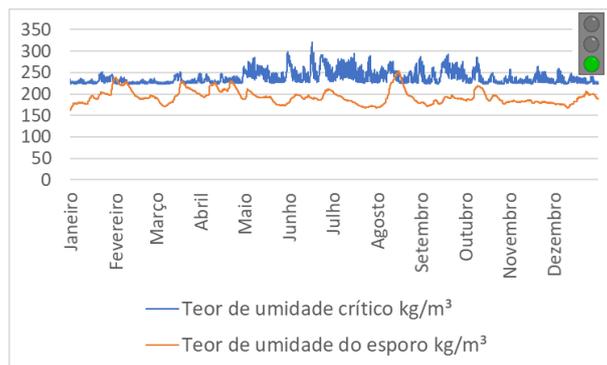
Fonte: Autor

Figura 81: Ventilação 4/h



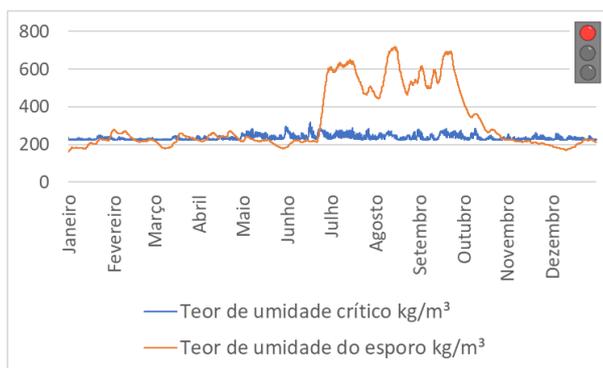
Fonte: Autor

Figura 82: Ventilação 5/h



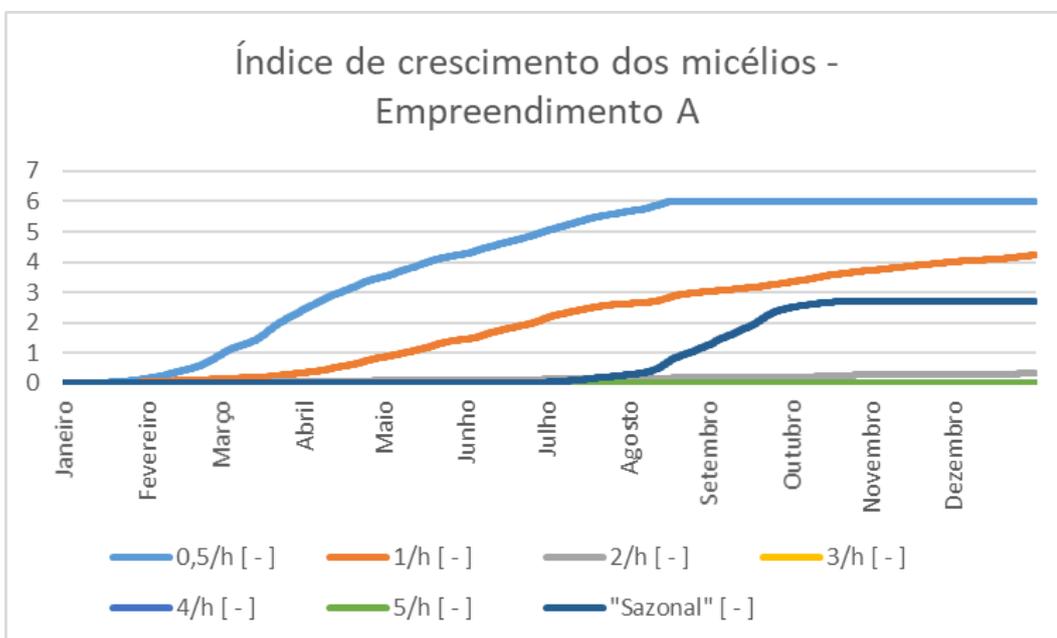
Fonte: Autor

Figura 83: Ventilação "sazonal"



Fonte: Autor

Figura 84: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com a taxa de ventilação – Empreendimento A

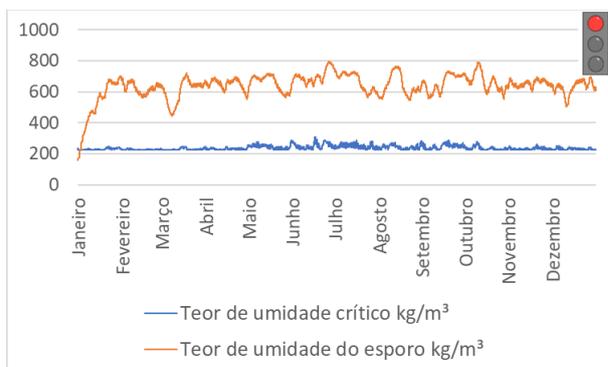


Fonte: Autor

6.3.2 Empreendimento B

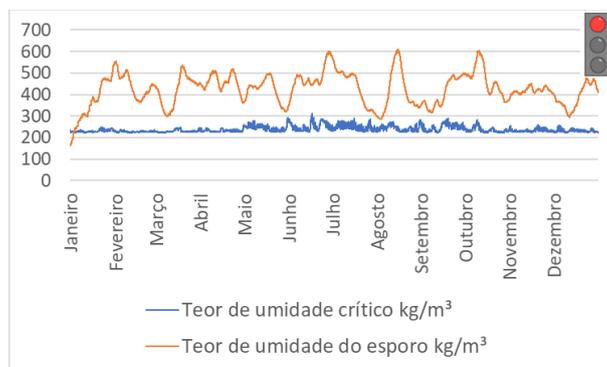
As Figuras 85 a 91 apresentam os perfis do teor de umidade crítico e do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano. A Figura 92 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para cada taxa de ventilação analisada, referentes ao empreendimento B.

Figura 85: Ventilação 0,5/h



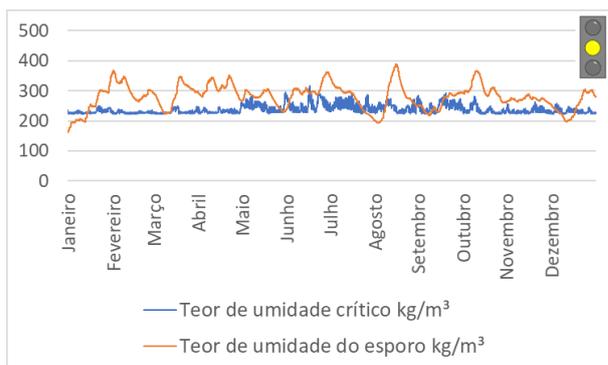
Fonte: Autor

Figura 86: Ventilação 1/h



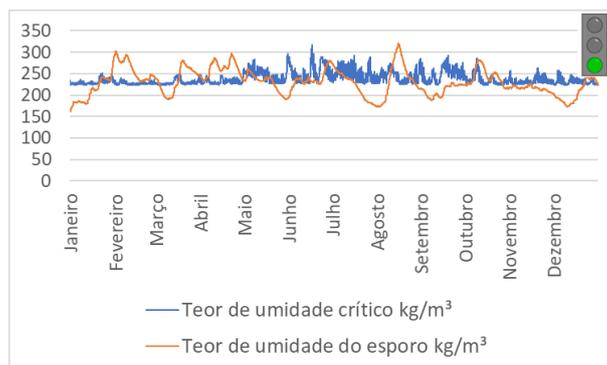
Fonte: Autor

Figura 87: Ventilação 2/h



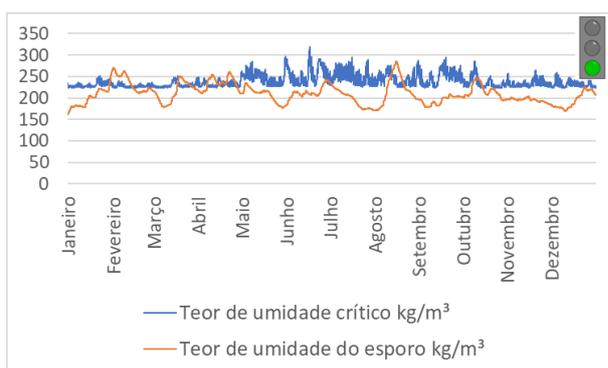
Fonte: Autor

Figura 88: Ventilação 3/h



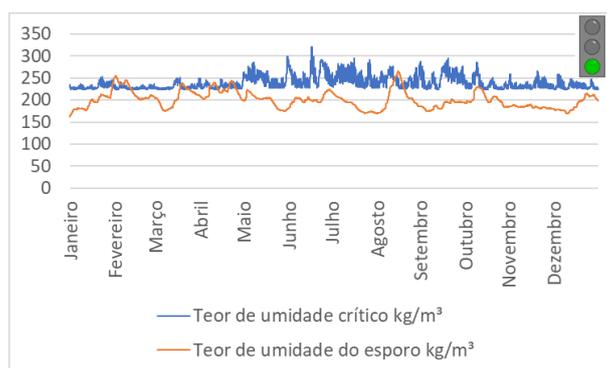
Fonte: Autor

Figura 89: Ventilação 4/h

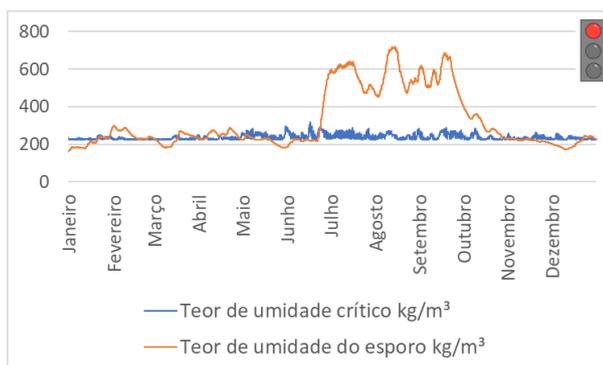


Fonte: Autor

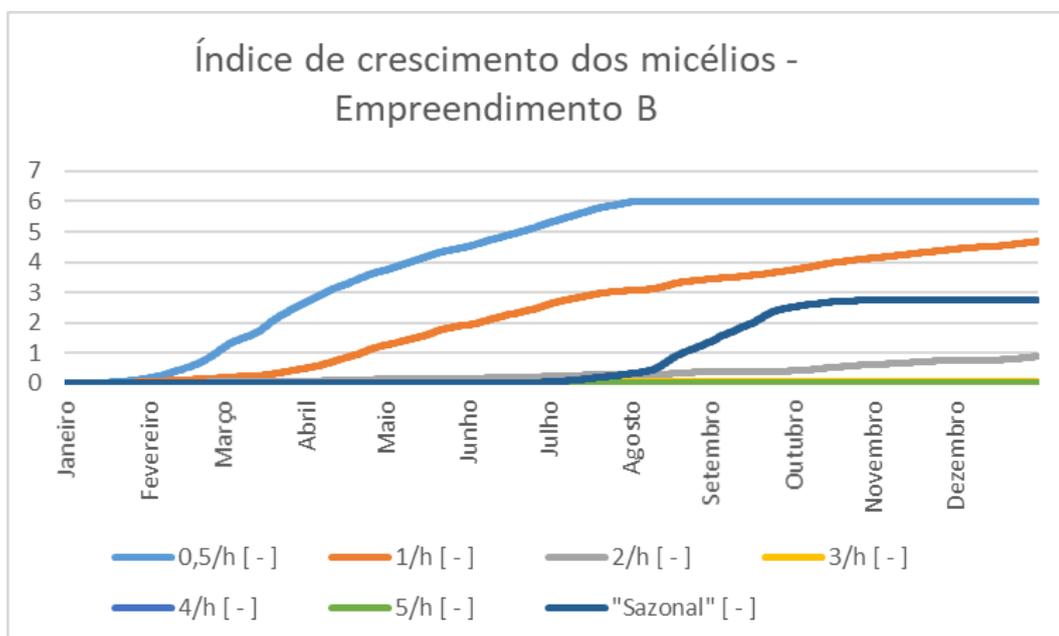
Figura 90: Ventilação 5/h



Fonte: Autor

Figura 91: Empreendimento B - Ventilação "sazonal"

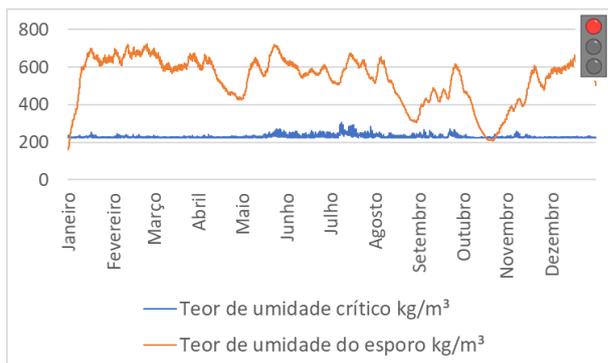
Fonte: Autor

Figura 92: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com a taxa de ventilação – Empreendimento B

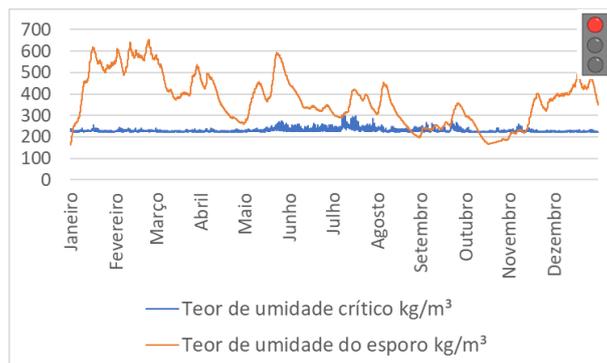
Fonte: Autor

6.3.3 Empreendimento C

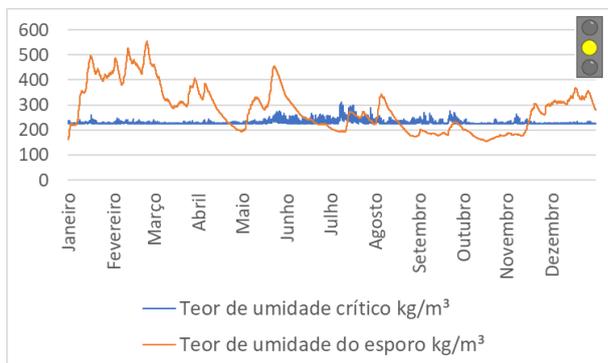
As Figuras 93 a 99 apresentam os perfis de teor de umidade crítico e teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano. A Figura 100 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para cada taxa de ventilação analisada, referentes ao empreendimento C.

Figura 93: Ventilação 0,5/h

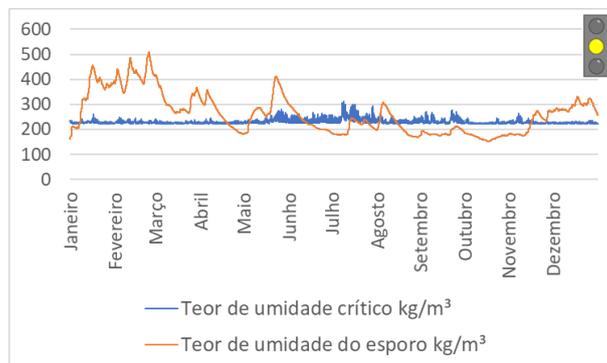
Fonte: Autor

Figura 94: Ventilação 1/h

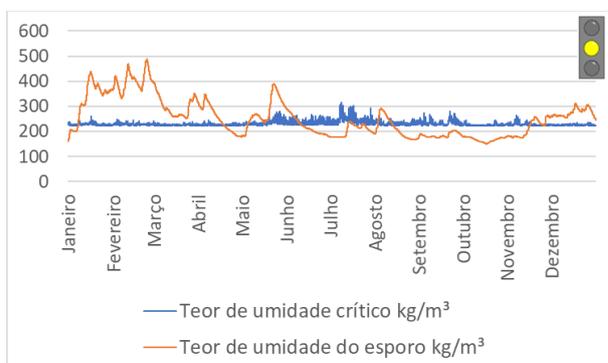
Fonte: Autor

Figura 95: Ventilação 2/h

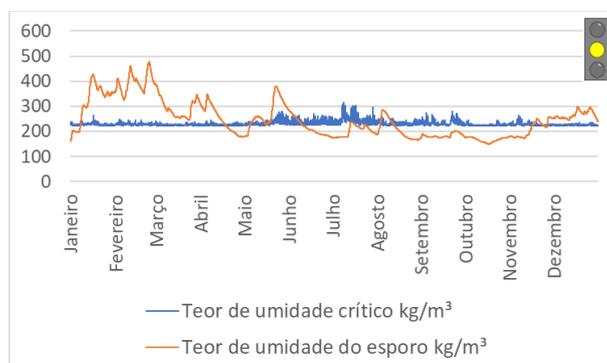
Fonte: Autor

Figura 96: Ventilação 3/h

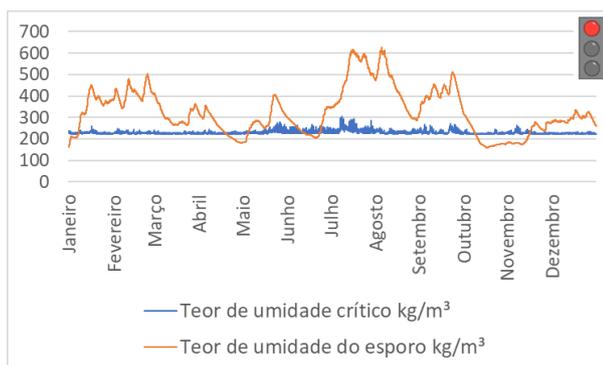
Fonte: Autor

Figura 97: Ventilação 4/h

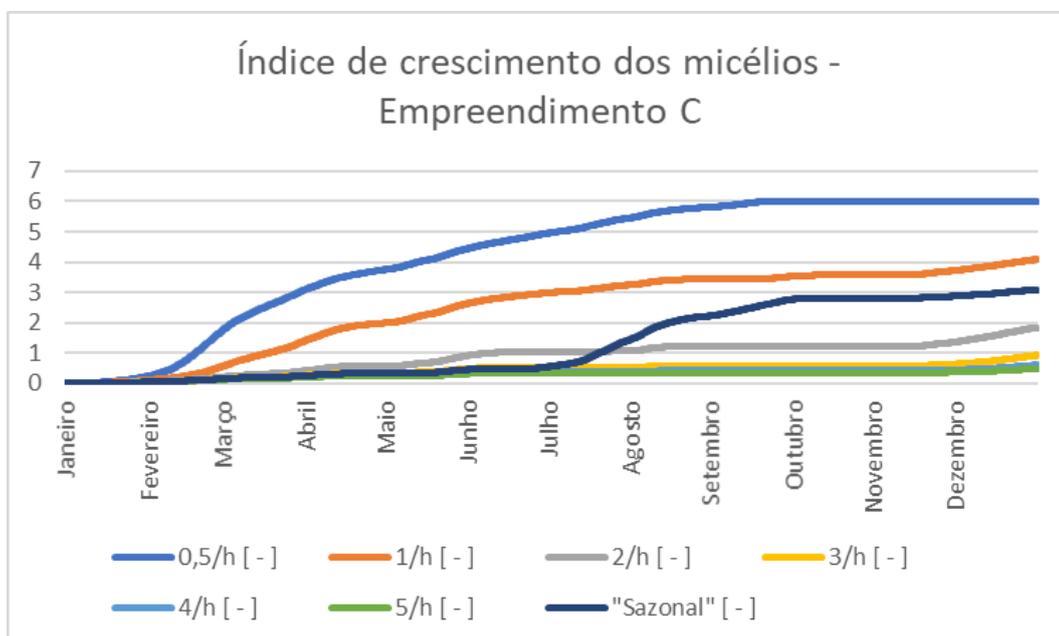
Fonte: Autor

Figura 98: Ventilação 5/h

Fonte: Autor

Figura 99: Ventilação "sazonal"

Fonte: Autor

Figura 100: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com a taxa de ventilação – Empreendimento C

Fonte: Autor

Comentários: Analisando os resultados obtidos fica claro que baixas taxas de ventilação, da ordem de 0,5/h a 1/h, acarretam em resultados acentuados em todos os casos analisados. Conforme aumenta-se a ventilação, a quantidade de bolor prevista é menor. Taxas de renovação da ordem de 3/h são suficientes para se obter resultados satisfatórios nos empreendimentos A e B. Já no empreendimento C,

mesmo taxas de ventilação da ordem de 4/h ainda apresentam resultados intermediários, resultando em um índice de crescimento de bolor de 0,6.

Em todos os casos a ventilação “sazonal” resulta em crescimento elevado dos bolores, com índices de 2,72, 2,75 e 3,1, respectivamente para os empreendimentos A, B e C.

Estes resultados encontrados são explicados pelo fato de a ventilação estar intimamente relacionada com a remoção do excesso de umidade liberado no ambiente, renovando o ar interno e diminuindo a quantidade de umidade que migra para as paredes.

6.4 Influência da ocupação

Nesta seção é analisada a influência da ocupação sobre a proliferação de bolores no interior das habitações. Como a taxa de ocupação influencia a quantidade de vapor d'água liberada nos espaços internos, este pode ser um fator determinante na ocorrência de bolores.

Os dormitórios (cômodos em análise) são especialmente afetados pela taxa de ocupação, pois nestes espaços ocorre uma longa permanência dos habitantes, no período noturno, durante o descanso, mesmo período em que as paredes apresentam suas temperaturas superficiais mais baixas.

Foi considerada a mesma taxa de liberação de umidade, por ocupante, dos casos anteriores, 45g/h, das 22h às 8h. Serão analisados casos com 2, 3 e 4 ocupantes, que correspondem a liberações de vapor d'água de 90 g/h, 135 g/h e 180 g/h, respectivamente.

Objetivando uma análise mais completa, a influência da ocupação é analisada para três diferentes taxas de ventilação, fixas e contínuas: 1/h, 3/h e 5/h.

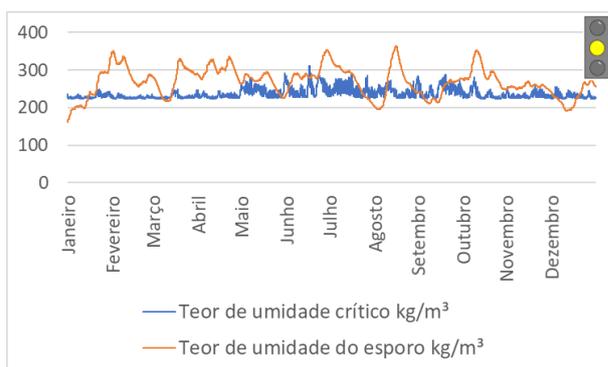
Para os empreendimentos A e C foram considerados apartamentos térreos. Em todos os casos foi considerada orientação sul.

6.4.1 Empreendimento A

- **Ventilação 1/h**

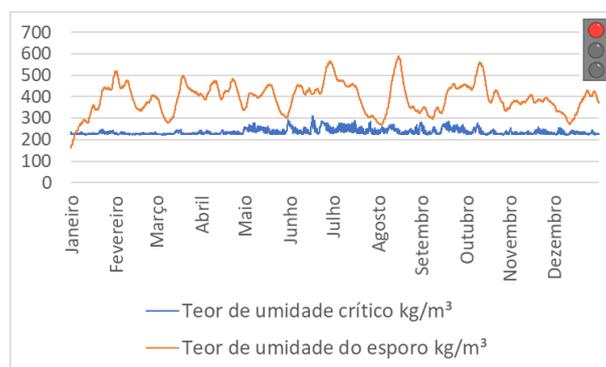
As Figuras 101 a 103 apresentam os perfis do teor de umidade crítico e teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano, considerando taxa de ventilação 1/h. A Figura 104 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para cada taxa de ocupação analisada (2, 3 e 4 ocupantes), referentes ao empreendimento A.

Figura 101: 2 ocupantes, ventilação 1/h.



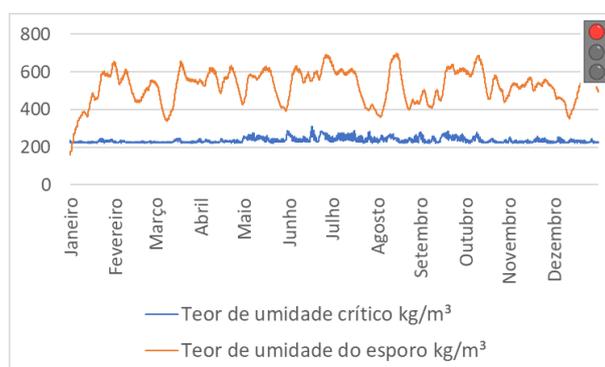
Fonte: Autor

Figura 102: 3 ocupantes, ventilação 1/h.



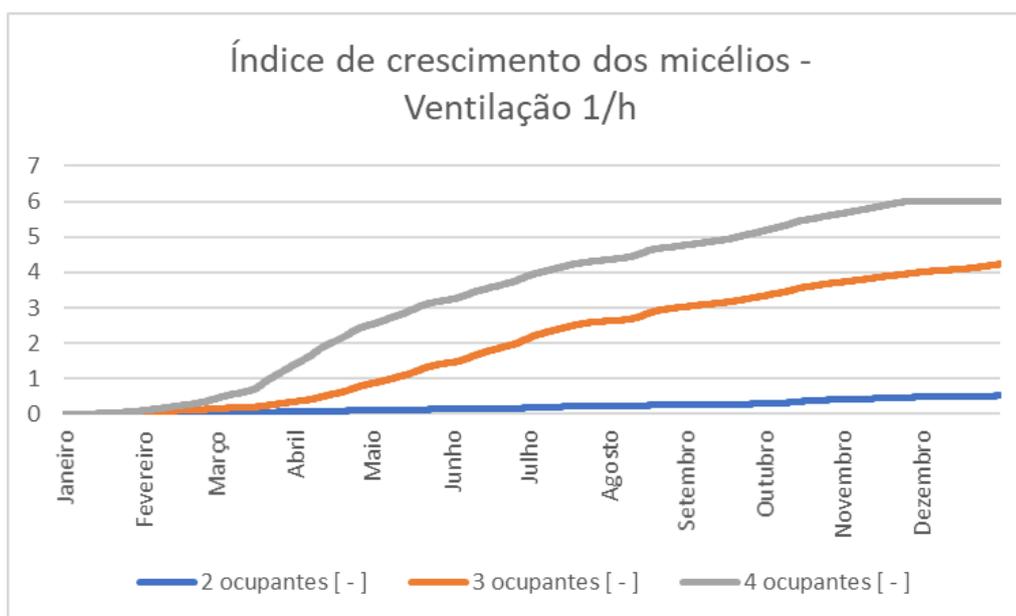
Fonte: Autor

Figura 103: 4 ocupantes, ventilação 1/h.



Fonte: Autor

Figura 104: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes para ventilação de 1/h – Empreendimento A

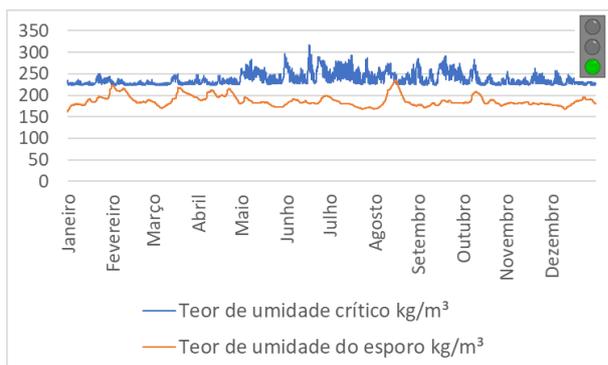


Fonte: Autor

- **Ventilação 3/h**

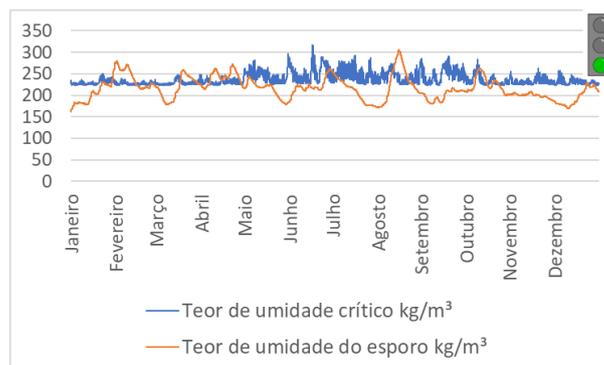
As Figuras 105 a 107 apresentam os perfis do teor de umidade crítico em do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano, considerando taxa de ventilação 3/h. A Figura 108 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para cada taxa de ocupação analisada (2, 3 e 4 ocupantes), referentes ao empreendimento A.

Figura 105: 2 ocupantes, ventilação 3/h.

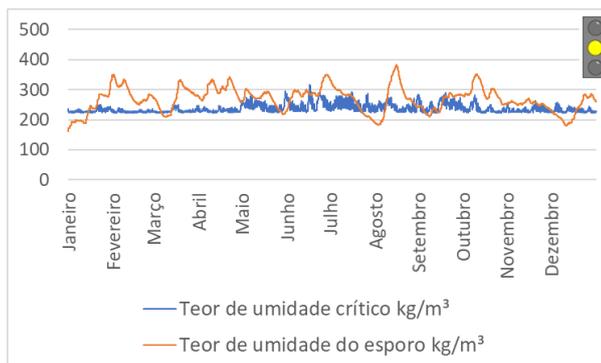


Fonte: Autor

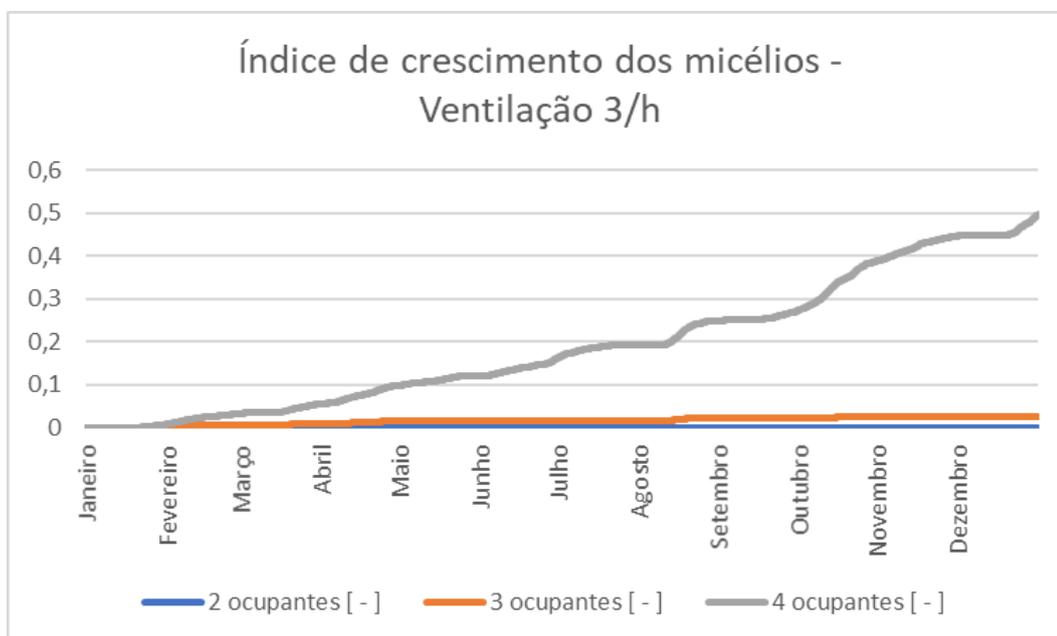
Figura 106: 3 ocupantes, ventilação: 3/h.



Fonte: Autor

Figura 107: 4 ocupantes, ventilação 3h

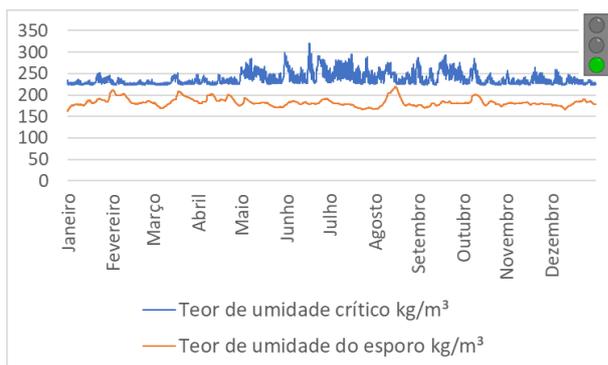
Fonte: Autor

Figura 108: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes para ventilação de 3 renovações/hora – Empreendimento A

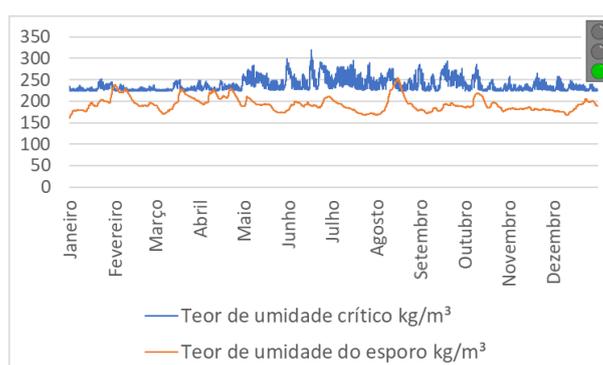
Fonte: Autor

- **Ventilação 5/h:**

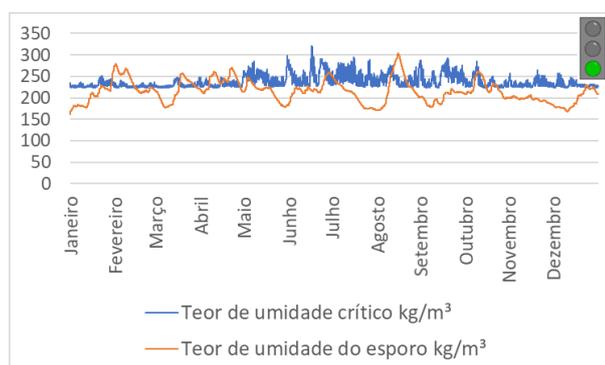
As Figuras 109 a 111 apresentam os perfis do teor de umidade crítico e do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano, considerando taxa de ventilação 5/h. A Figura 112 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para cada taxa de ocupação analisada (2, 3 e 4 ocupantes), referentes ao empreendimento A.

Figura 109: 2 ocupantes, ventilação 5/h.

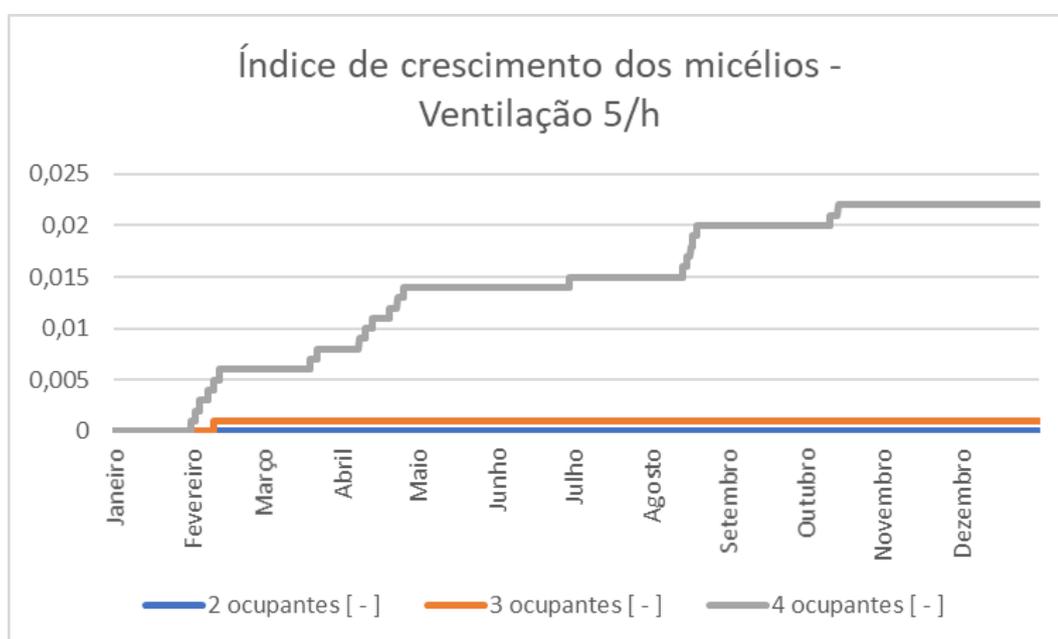
Fonte: Autor

Figura 110: 3 ocupantes, ventilação 5/h.

Fonte: Autor

Figura 111: 4 ocupantes, ventilação 5/h.

Fonte: Autor

Figura 112: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes para ventilação de 5 renovações/hora – Empreendimento A

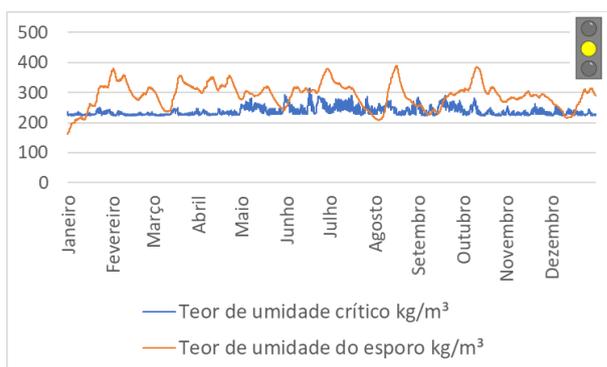
Fonte: Autor

6.4.2 Empreendimento B

- **Ventilação 1/h**

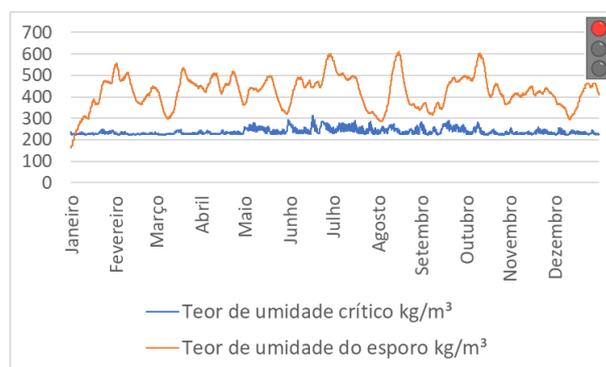
As Figuras 113 a 115 apresentam os perfis do teor de umidade crítico e do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano, considerando taxa de ventilação 1/h. A Figura 116 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para cada taxa de ocupação analisada (2, 3 e 4 ocupantes), referentes ao empreendimento B.

Figura 113: 2 ocupantes, ventilação 1/h.



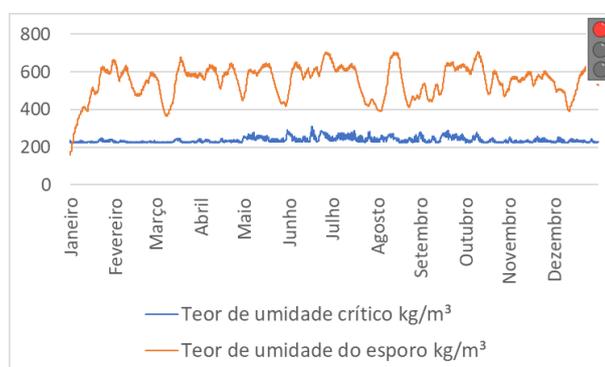
Fonte: Autor

Figura 114: 3 ocupantes, ventilação 1/h.



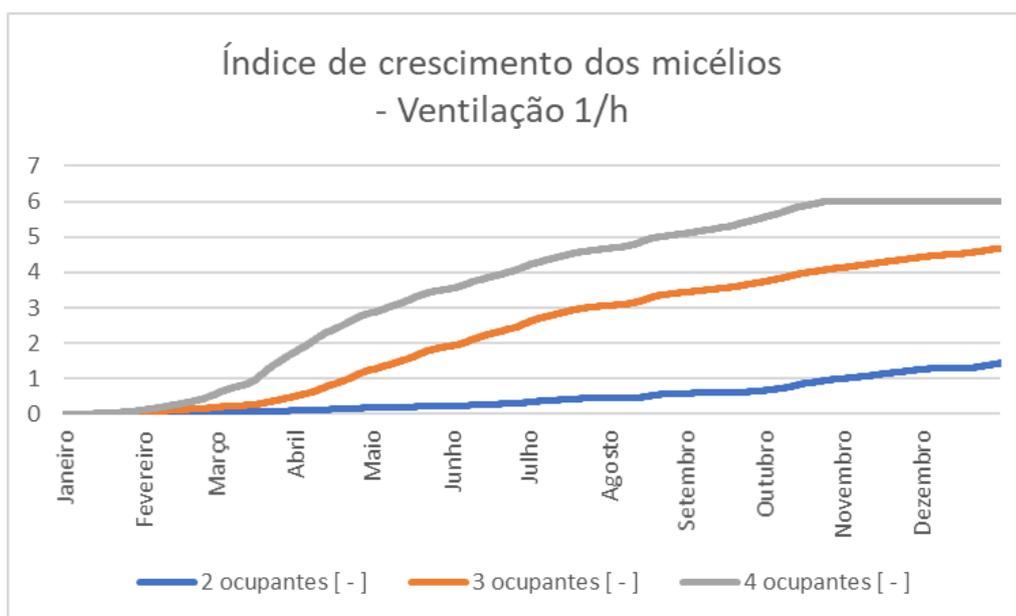
Fonte: Autor

Figura 115: 4 ocupantes, ventilação 1/h.



Fonte: Autor

Figura 116: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes para ventilação de 1 renovação/hora – Empreendimento B

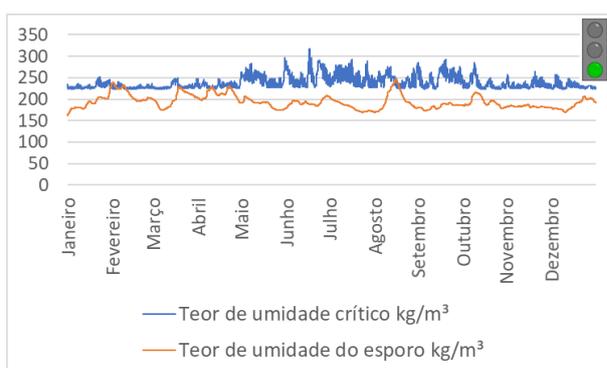


Fonte: Autor

- **Ventilação 3/h**

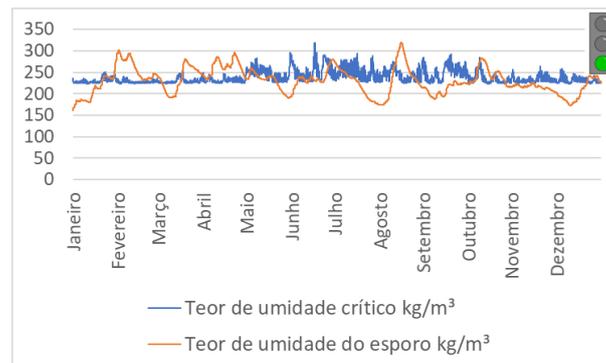
As Figuras 117 a 119 apresentam os perfis do teor de umidade crítico e do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano, considerando taxa de ventilação 3/h. A Figura 120 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para cada taxa de ocupação analisada (2, 3 e 4 ocupantes), referentes ao empreendimento B.

Figura 117: 2 ocupantes, ventilação 3/h

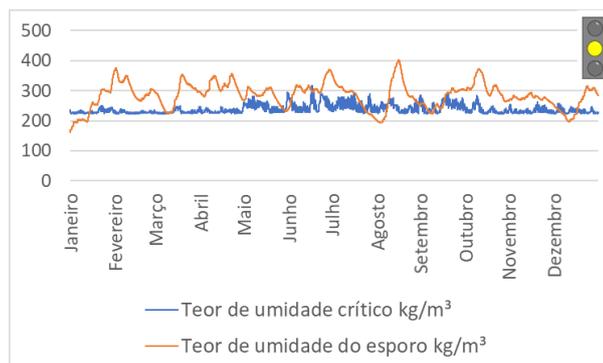


Fonte: Autor

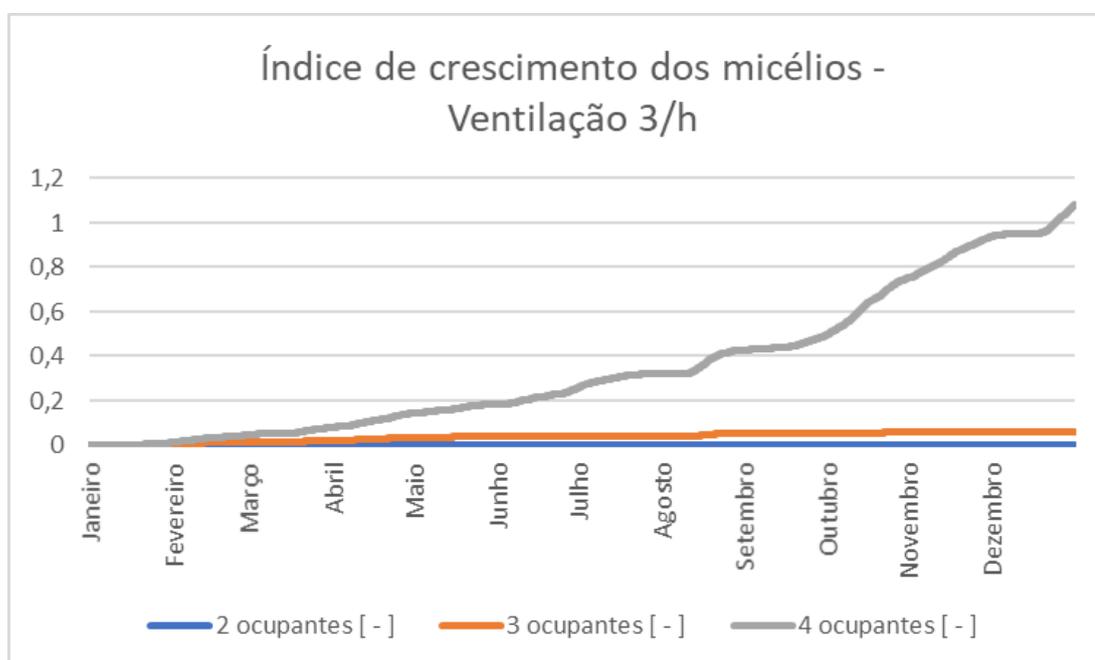
Figura 118: 3 ocupantes, ventilação 3/h.



Fonte: Autor

Figura 119: 4 ocupantes, ventilação 3/h.

Fonte: Autor

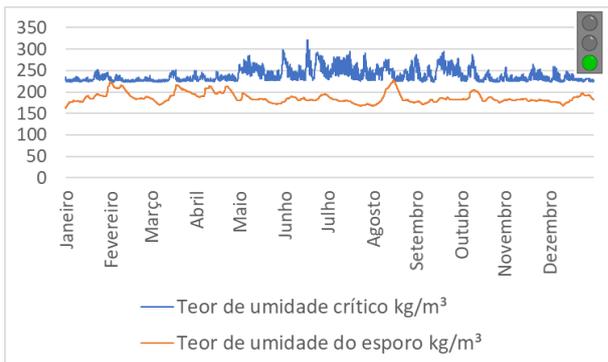
Figura 120: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes para ventilação de 3 renovações/hora – Empreendimento B

Fonte: Autor

- **Ventilação 5/h:**

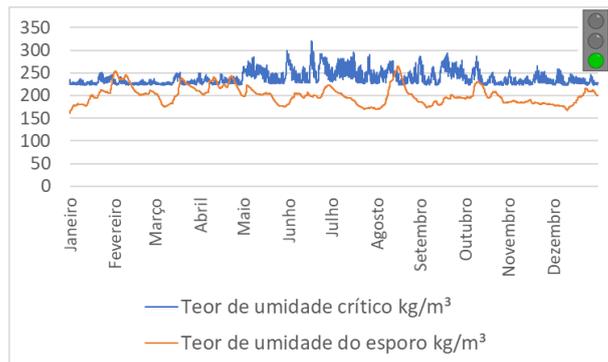
As Figuras 121 a 123 apresentam os perfis do teor de umidade crítico e do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano, considerando taxa de ventilação 5/h. A Figura 124 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para cada taxa de ocupação analisada (2, 3 e 4 ocupantes), referentes ao empreendimento B.

Figura 121: 2 ocupantes, ventilação 5/h.



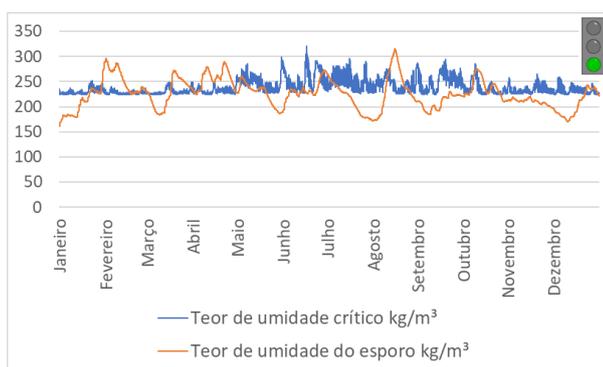
Fonte: Autor

Figura 122: 3 ocupantes, ventilação 5/h.



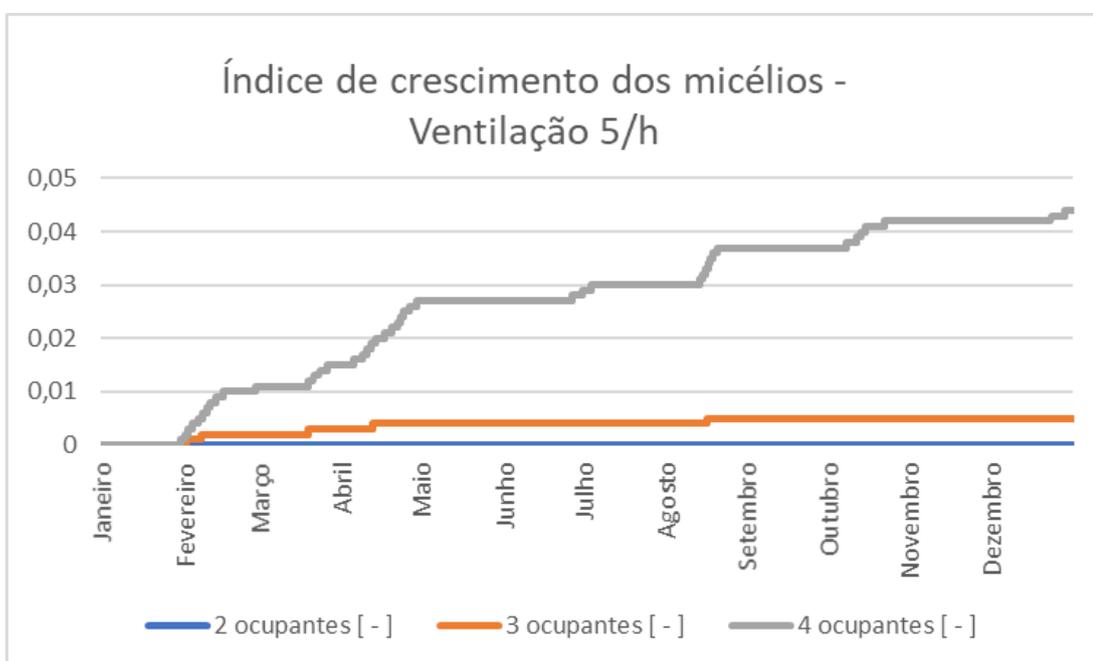
Fonte: Autor

Figura 123: 4 ocupantes, ventilação 5/h.



Fonte: Autor

Figura 124: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes para ventilação de 5 renovações/hora – Empreendimento B



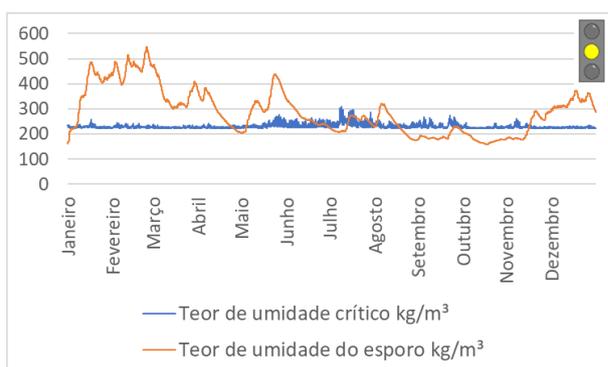
Fonte: Autor

6.4.3 Empreendimento C

- **Ventilação 1/h:**

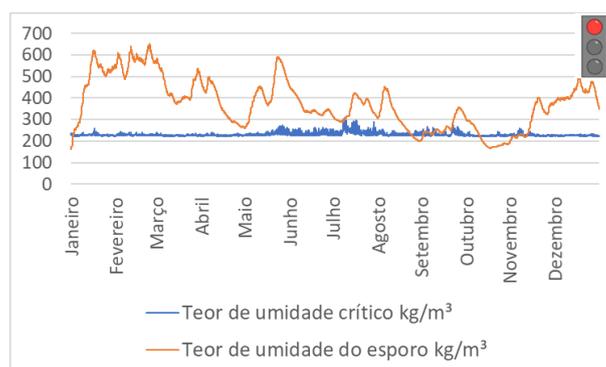
As Figuras 125 a 127 apresentam os perfis do teor de umidade crítico e do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano, considerando taxa de ventilação 1/h. A Figura 128 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para cada taxa de ocupação analisada (2, 3 e 4 ocupantes), referentes ao empreendimento C.

Figura 125: 2 ocupantes, ventilação 1/h.



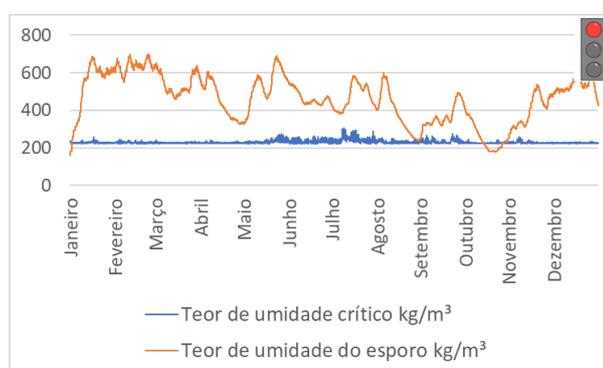
Fonte: Autor

Figura 126: 3 ocupantes, ventilação 1/h.



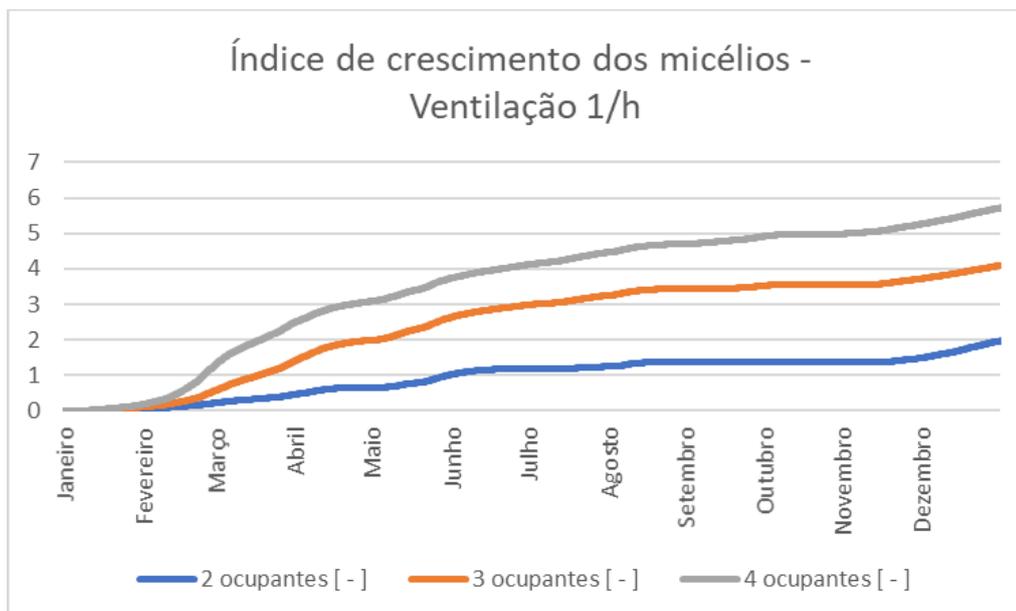
Fonte: Autor

Figura 127: 4 ocupantes, ventilação 1/h.



Fonte: Autor

Figura 128: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes para ventilação de 1 renovação/hora – Empreendimento C.

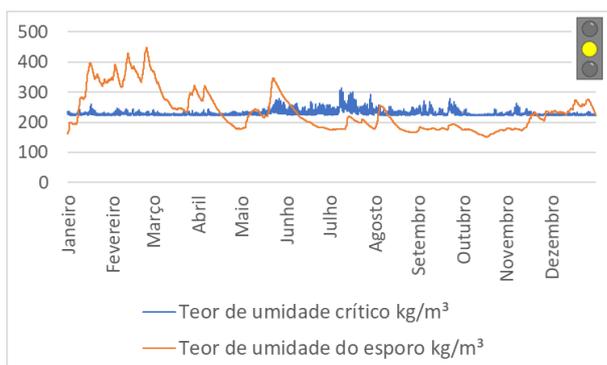


Fonte: Autor

- Ventilação 3/h:

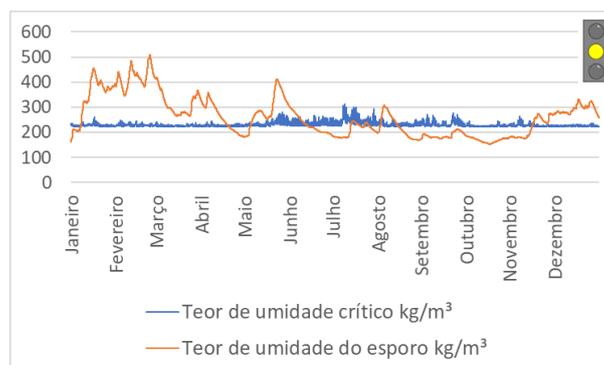
As Figuras 129 a 131 apresentam os perfis do teor de umidade crítico e do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano, considerando taxa de ventilação 3/h. A Figura 132 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para cada taxa de ocupação analisada (2, 3 e 4 ocupantes), referentes ao empreendimento C.

Figura 129: 2 ocupantes, ventilação 3/h.

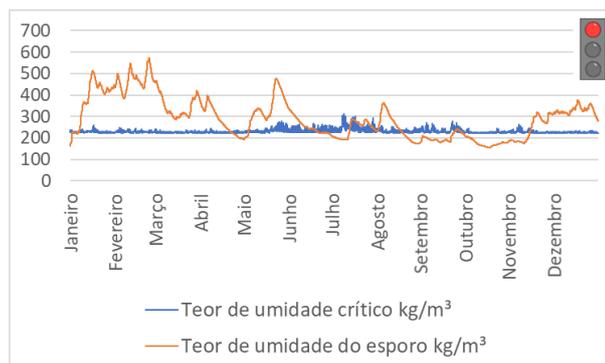


Fonte: Autor

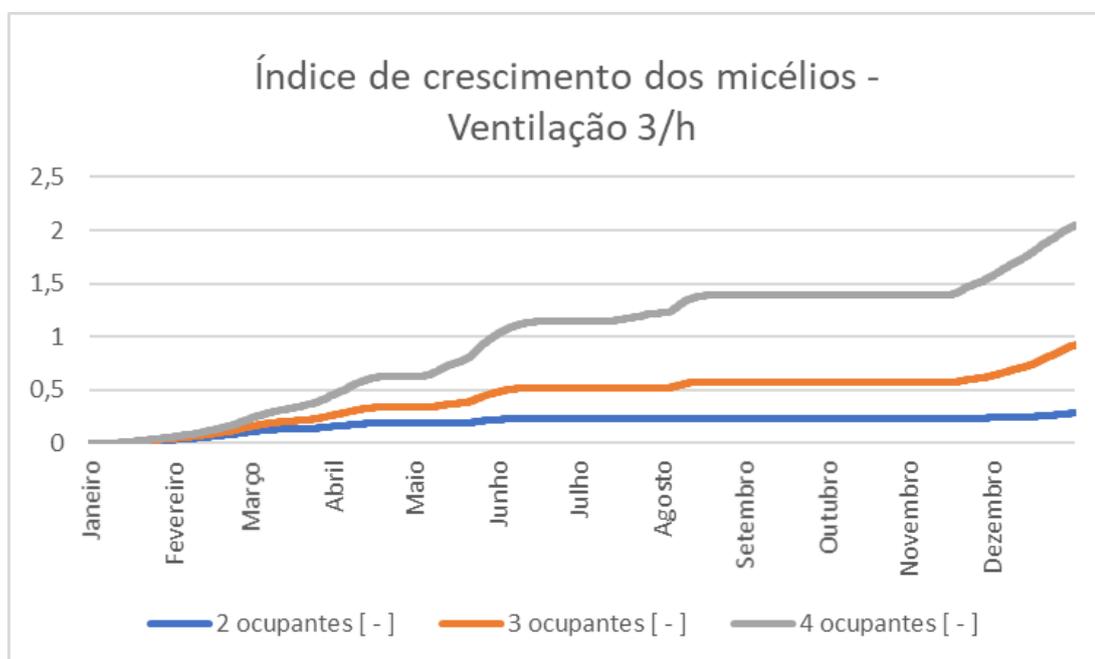
Figura 130: 3 ocupantes, ventilação 3/h.



Fonte: Autor

Figura 131: 4 ocupantes, ventilação 3/h.

Fonte: Autor

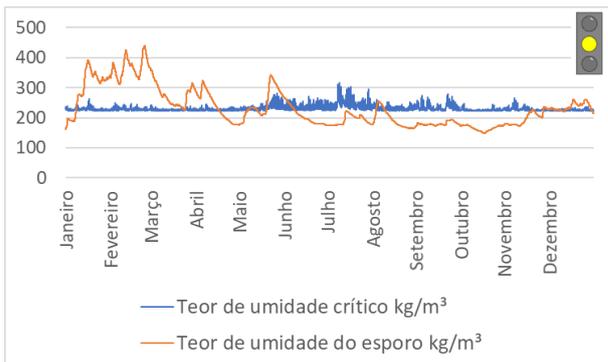
Figura 132: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes, para ventilação de 3 renovações/hora – Empreendimento C.

Fonte: Autor

- **Ventilação 5/h:**

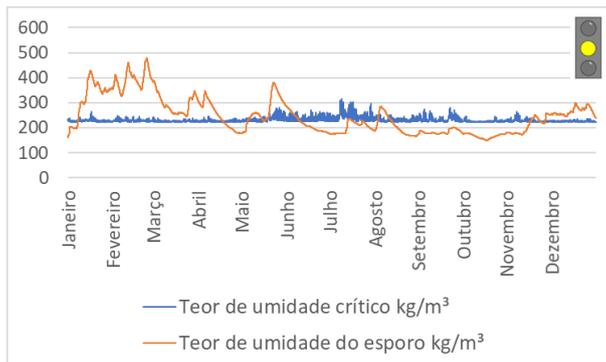
As Figuras 133 a 135 apresentam os perfis do teor de umidade crítico e do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano, considerando taxa de ventilação 5/h. A Figura 136 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para cada taxa de ocupação analisada (2, 3 e 4 ocupantes), referentes ao empreendimento C.

Figura 133: 2 ocupantes, ventilação 5/h



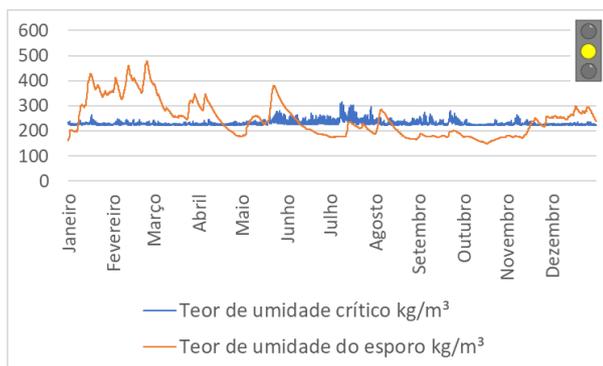
Fonte: Autor

Figura 134: 3 ocupantes, ventilação 5/h



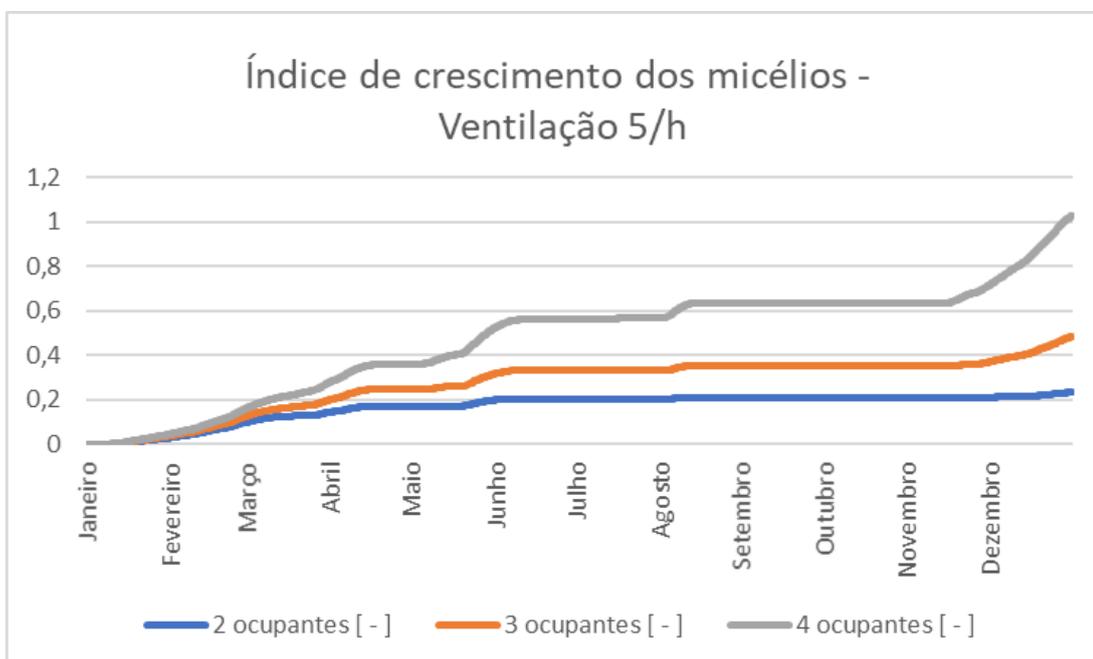
Fonte: Autor

Figura 135: 4 ocupantes, ventilação 5/h.



Fonte: Autor

Figura 136: Comparativo do índice de crescimento dos micélios de acordo com o número de ocupantes para ventilação de 5 renovações/hora – Empreendimento C.



Fonte: Autor

Comentários: A taxa de ocupação dos ambientes repercute em diferenças significativas nos resultados, pois o número de ocupantes está diretamente relacionado à quantidade de vapor d'água liberada no interior da edificação e, conseqüentemente, à umidade do ambiente e de seus componentes. Observando-se, por exemplo no empreendimento A, para a taxa de ventilação de 1 renovação por hora, os índices de crescimento resultantes variam de 0,52, 4,23 e 6, respectivamente para 2, 3 e 4 ocupantes.

Nota-se também que a influência da ocupação está intimamente relacionada com a ventilação, responsável pela renovação do ar. Conforme esperado, quanto maior o número de ocupantes, maior deve ser a taxa de ventilação do ambiente.

6.5 Comparativo com outros sistemas construtivos

Para comparar a influência do sistema construtivo sobre a ocorrência de bolores no interior das edificações, foram escolhidos três casos críticos, porém plausíveis de ocorrer na realidade dos empreendimentos estudados. Dentre os casos apresentados anteriormente, foi selecionado um caso para cada empreendimento, submetendo-o a novas simulações, porém com diferentes composições de paredes. As tipologias de paredes escolhidas foram: paredes com blocos cerâmicos, paredes com tijolos maciços, paredes de concreto acrescidas de EPS e paredes de concreto com aditivo incorporador de ar, conforme descritas no capítulo 5.

A seguir serão apresentados os casos escolhidos e, na sequência, os resultados obtidos:

6.5.1 Empreendimento A

Para o empreendimento A foi selecionado o caso de um apartamento térreo, com orientação sul, taxa de ocupação 3 e taxa de ventilação 1/h.

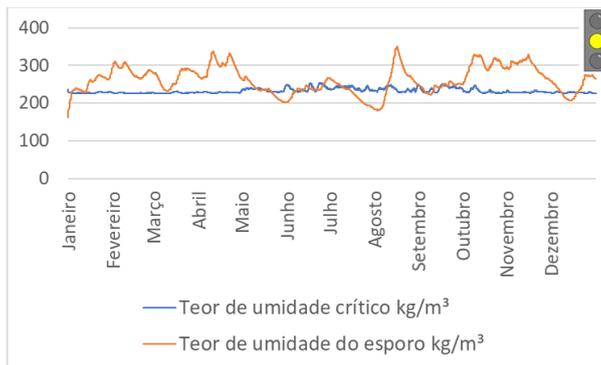
As Figuras 137 a 141 apresentam os perfis do teor de umidade crítico e do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano. A Figura 142 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para cada sistema construtivo considerado.

Figura 137: Parede de concreto



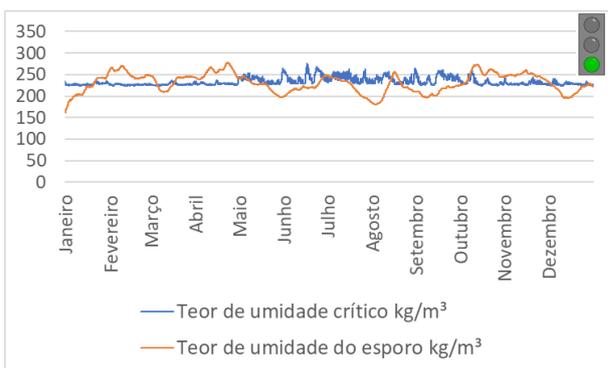
Fonte: Autor

Figura 138: Parede de concreto com camada de isolante EPS



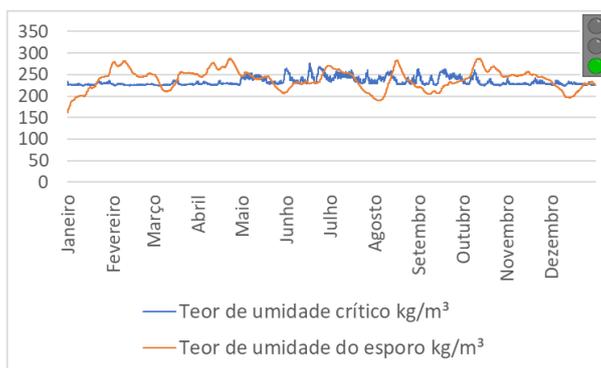
Fonte: Autor

Figura 139: Parede de blocos cerâmicos



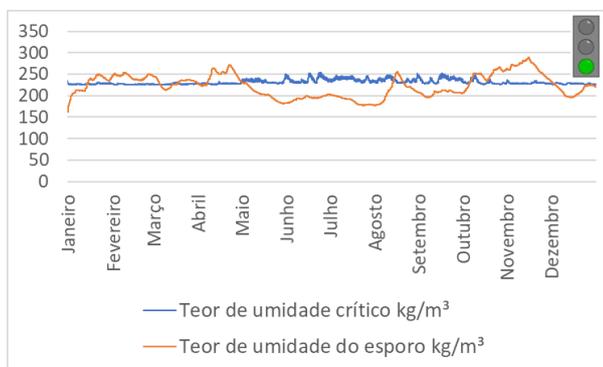
Fonte: Autor

Figura 140: Parede de tijolos maciços



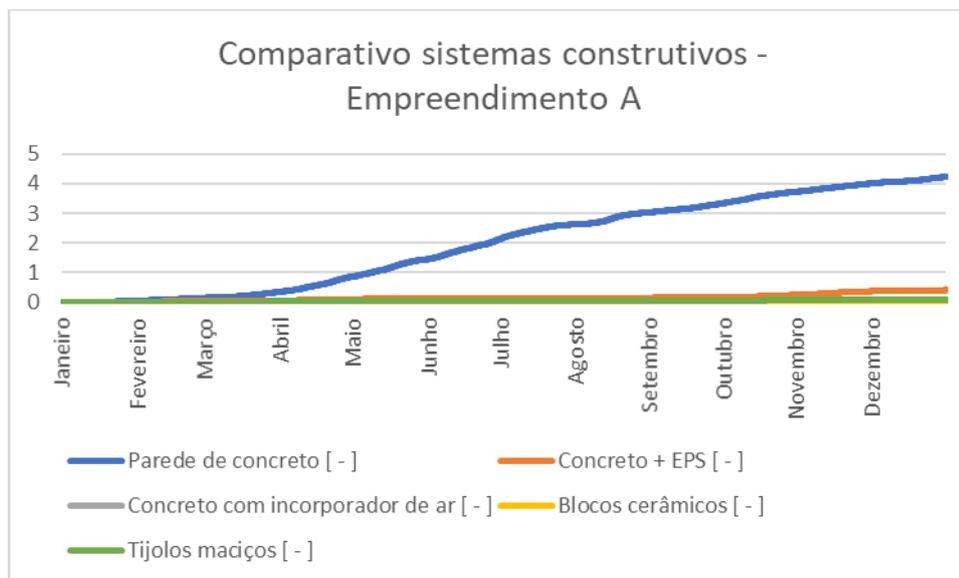
Fonte: Autor

Figura 141: Parede de concreto com aditivo incorporador de ar.



Fonte: Autor

Figura 142: Empreendimento A, ocupação 3, ventilação 1/h - Comparativo do índice de crescimento dos micélios para os 5 diferentes sistemas de paredes



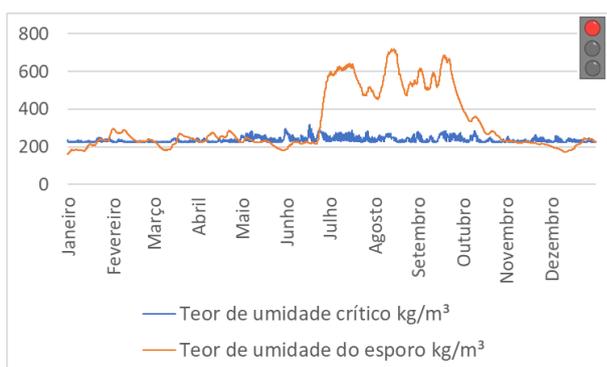
Fonte: Autor

6.5.2 Empreendimento B

Para o empreendimento B foi escolhido o caso de dormitórios orientados para sul, taxa de ocupação 3 e modelo de ventilação “sazonal”, ou seja, 0,5 renovações/hora nos meses de inverno e 3 renovações por hora no restante do ano.

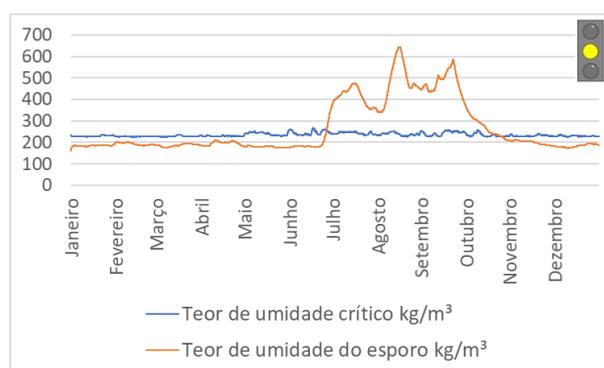
As Figuras 143 a 147 apresentam os perfis do teor de umidade crítica e do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano. A Figura 148 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para cada sistema construtivo considerado.

Figura 143: Parede de concreto



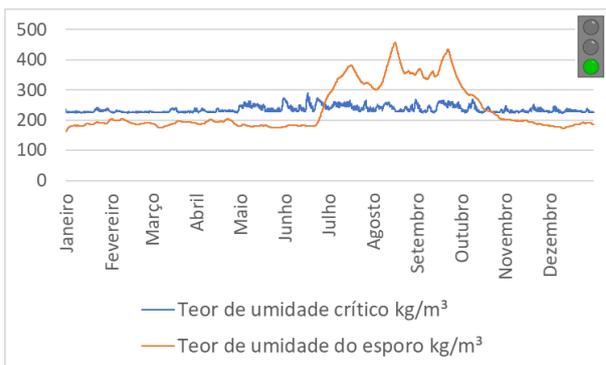
Fonte: Autor

Figura 144: Parede de concreto com camada de isolante EPS



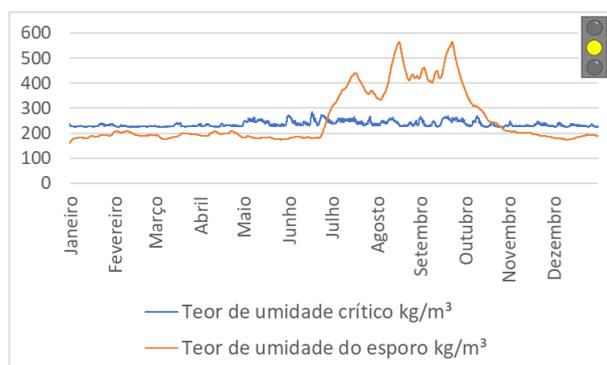
Fonte: Autor

Figura 145: Parede de blocos cerâmicos



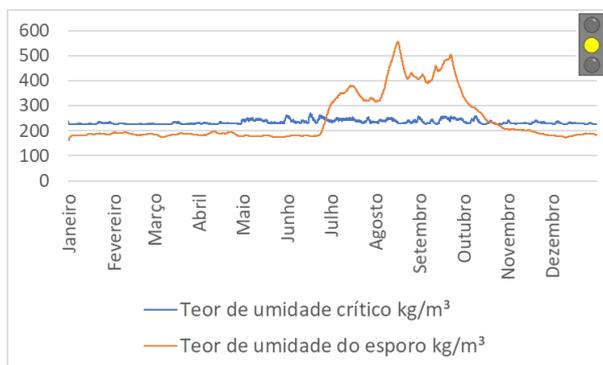
Fonte: Autor

Figura 146: Parede de tijolos maciços



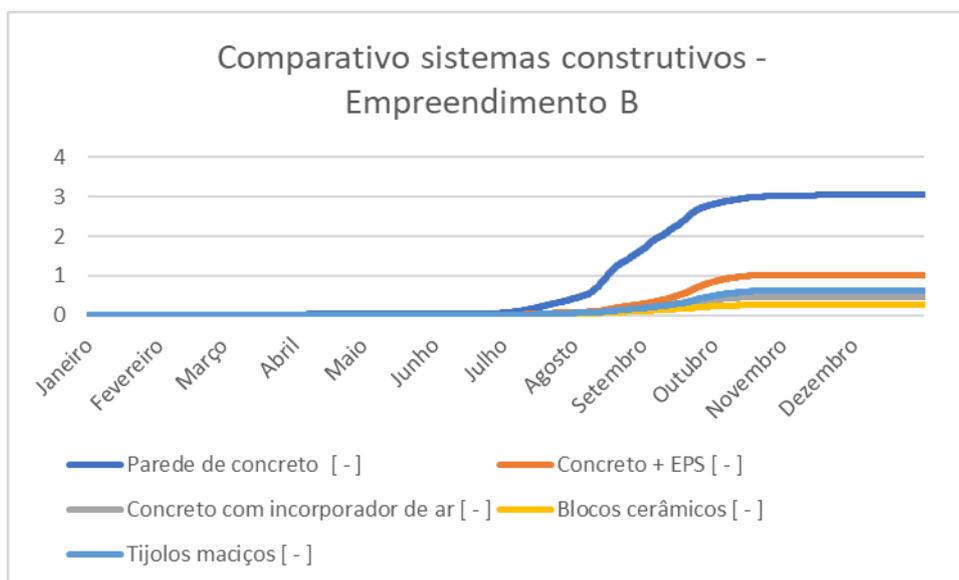
Fonte: Autor

Figura 147: Parede de concreto com aditivo incorporador de ar.



Fonte: Autor

Figura 148: Empreendimento B, ocupação 3, ventilação “sazonal” - Comparativo do índice de crescimento dos micélios para os 5 diferentes sistemas de paredes



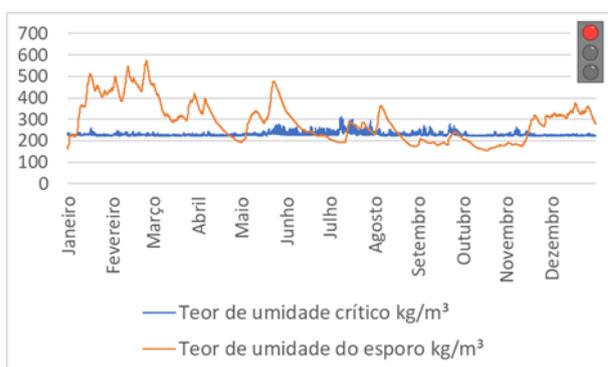
Fonte: Autor

6.5.3 Empreendimento C

Para o empreendimento C foi selecionado o caso de um apartamento térreo, com orientação sul, taxa de ocupação 4 e taxa de ventilação 3/h.

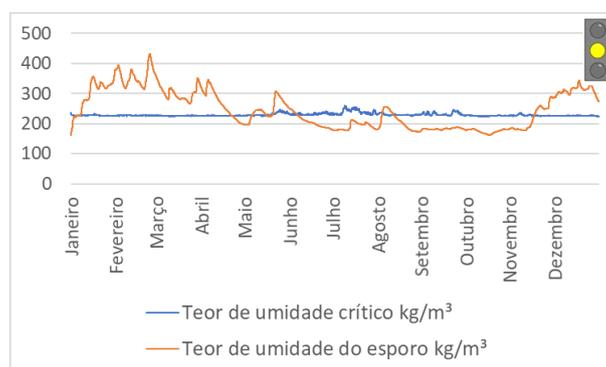
As Figuras 149 a 153 apresentam os perfis do teor de umidade crítico e do teor de umidade no interior do esporo, calculados ao longo de um ano. A Figura 154 apresenta o comparativo dos índices de crescimento dos micélios acumulados, para cada sistema construtivo considerado.

Figura 149: Parede de concreto



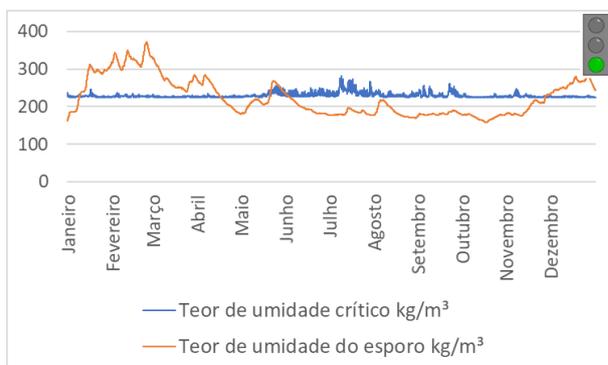
Fonte: Autor

Figura 150: Parede de concreto com camada de isolante EPS



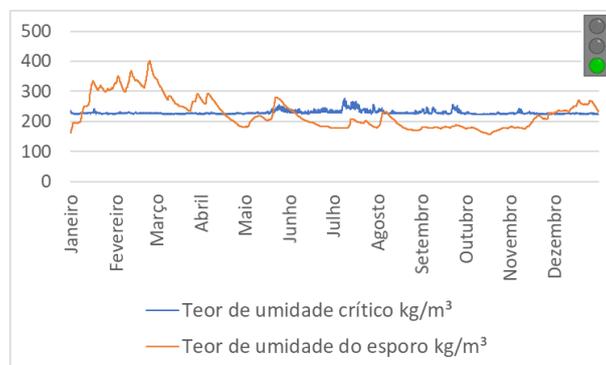
Fonte: Autor

Figura 151: Parede de blocos cerâmicos

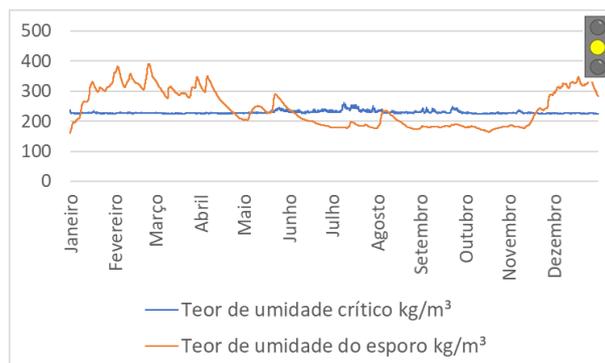


Fonte: Autor

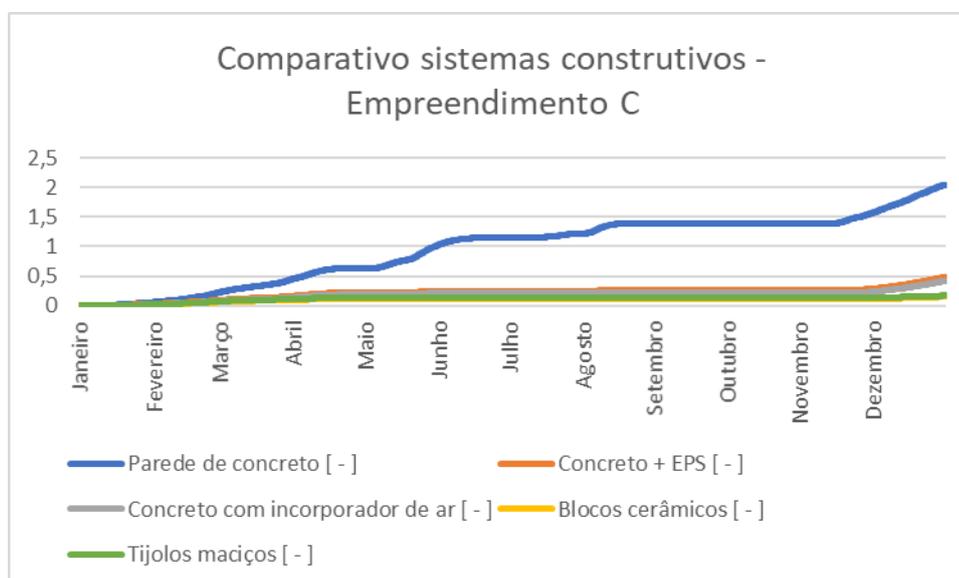
Figura 152: Parede de tijolos maciços



Fonte: Autor

Figura 153: Parede de concreto com aditivo incorporador de ar.

Fonte: Autor

Figura 154: Empreendimento C, ocupação 4, ventilação 3/h - Comparativo do índice de crescimento dos micélios para os 5 diferentes sistemas de paredes

Fonte: Autor

Comentários: Foi constatado que, sob as condições dos casos analisados, as paredes de concreto apresentam maior potencial para a ocorrência de bolores. Os motivos que levam a tal situação serão melhor explorados no capítulo 7, a seguir.

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

De acordo com os resultados apresentados no capítulo anterior, observa-se que as unidades com maior potencial de desenvolvimento de bolores são as unidades térreas e com orientação sul, porém não limitado a estas. Nota-se que baixas taxas de ventilação, da ordem de 0,5/h a 1/h, invariavelmente resultam em grande crescimento de bolores nos empreendimentos estudados. Além disso, a taxa de ocupação também é determinante, visto que diferenças significativas no índice de crescimento dos micélios podem ser encontradas entre casos com a mesma taxa de ventilação, porém com diferentes taxas de ocupação. Na tabela 9 estão os resultados da seção 6.4, apresentados de forma a se visualizar a influência tanto da ocupação quanto da ventilação.

Tabela 9: Índices de crescimento dos micélios para as simulações apresentadas na seção 6.4.

		Ventilação 1/h	Ventilação 3/h	Ventilação 5/h
Empreendimento A	2 ocupantes	0,521	0	0
	3 ocupantes	4,231	0,025	0,001
	4 ocupantes	6	0,497	0,022
Empreendimento B	2 ocupantes	1,437	0,001	0
	3 ocupantes	4,682	0,059	0,005
	4 ocupantes	6	1,083	0,044
Empreendimento C	2 ocupantes	1,967	0,281	0,232
	3 ocupantes	4,088	0,922	0,483
	4 ocupantes	5,716	2,045	1,029

Fonte: Autor

Com relação ao modelo utilizado (Bio-higrotérmico), constatou-se que os resultados obtidos foram condizentes com as situações observadas nos empreendimentos reais. Durante as vistorias empreendidas, foram observadas unidades sem nenhum problema de desenvolvimento de bolores, assim como observou-se unidades em situação crítica, com paredes completamente cobertas por fungos. Ambas as situações também foram obtidas nas simulações. Por exemplo, no caso apresentado na Figura 115, referente ao empreendimento B, orientação Sul, 4 ocupantes e taxa de ventilação 1/h, obteve-se um índice de crescimento dos micélios igual a 6, ou seja, 100% da parede coberta por bolores visíveis a olho nu, assim como se observa nas Figuras 35 e 36, do próprio empreendimento B. Já no caso apresentado na Figura 121, para o mesmo empreendimento B e orientação sul,

porém com 2 ocupantes e taxa de ventilação 5/h, não é esperado nenhum crescimento de bolor (índice 0). Ou seja, para o mesmo empreendimento, é possível que duas unidades, com mesma posição e orientação, apresentem resultados muito diferentes, dependendo apenas das condições de ocupação e de ventilação.

Na sequência, a previsão de ocorrência de bolores foi comparada para diversas tipologias de paredes. Os resultados indicam um maior potencial de ocorrência de bolores em edificações construídas com paredes de concreto, sob as condições analisadas. Isto ocorre devido às propriedades higrotérmicas destas paredes, em especial ao seu baixo isolamento térmico e à alta resistência à difusão de vapor d'água. Estas propriedades tornam esta tipologia de parede mais propícia a apresentar maiores valores de umidade relativa superficial. Enquanto uma menor temperatura superficial aumenta o gradiente potencial de transporte de vapor d'água do ar ambiente à superfície da parede (diferença da pressão parcial de vapor), a alta resistência à difusão dificulta o transporte de vapor para maiores profundidades da parede, retendo a umidade mais próxima à superfície. A tabela 10 apresenta os resultados obtidos na seção 7.5, que compara a previsão de crescimento dos bolores para diferentes sistemas construtivos, sob certas condições consideradas críticas.

Tabela 10: Índices de crescimento dos micélios obtidos na seção 7.5, que compara a previsão de crescimento de bolores para diferentes sistemas construtivos

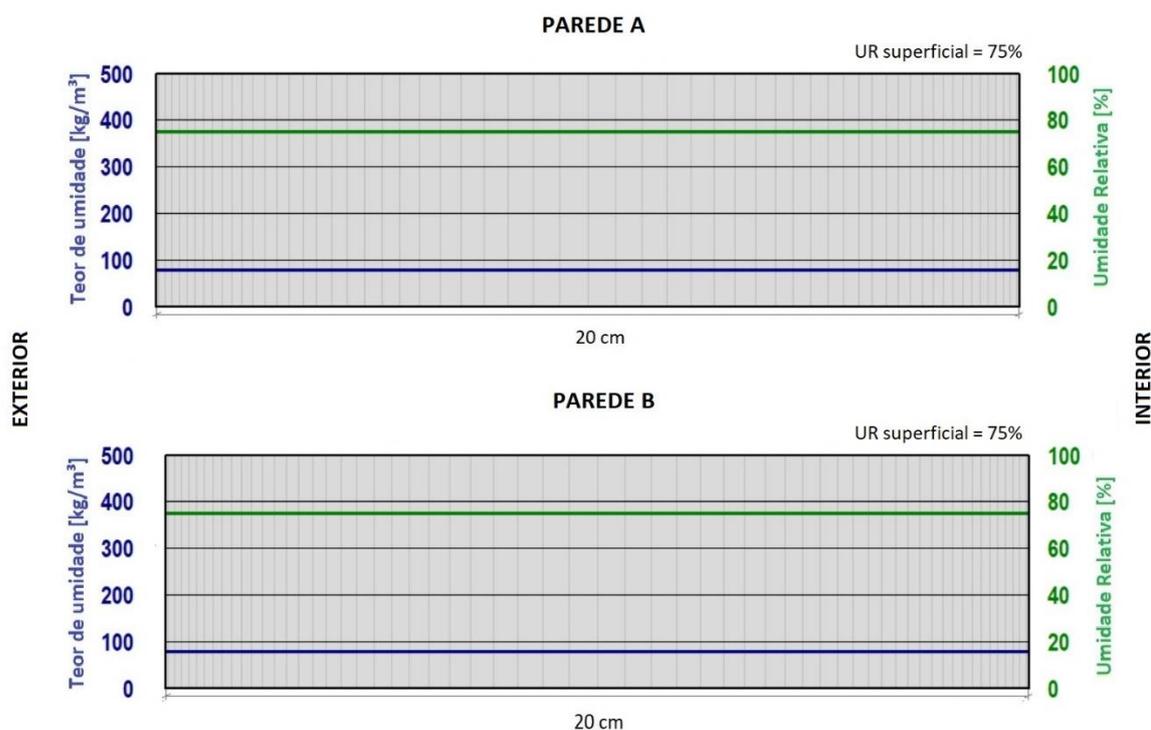
	Parede de concreto	Concreto + EPS	Blocos cerâmicos	Tijolos maciços	Concreto com aditivo incorporador de ar
Empreendimento A - térreo	4,231	0,412	0,057	0,088	0,054
3 ocupantes					
Ventilação 1/h Orientação Sul					
Empreendimento B	3,053	1,011	0,257	0,614	0,46
3 ocupantes					
Ventilação "Sazonal" Orientação Sul					
Empreendimento C - térreo	2,045	0,482	0	0,169	0,42
4 ocupantes					
Ventilação 3/h Orientação Sul					

Fonte: Autor

Para ilustrar a influência das propriedades higroscópicas das paredes de concreto sobre o risco de ocorrência de bolores, simulou-se um caso com as mesmas condições de posição, orientação, ocupação e ventilação daquele apresentado na Figura 78, ou seja, empreendimento A, apartamento térreo, orientação sul, 3 ocupantes e taxa de ventilação 1/h. As simulações foram feitas para duas configurações de paredes. A primeira, uma parede comum de concreto maciço, porém sem revestimento e com 20 cm de espessura, denominada “parede A”. O aumento da espessura melhora o isolamento térmico da parede, que apresenta $U= 3,39 \text{ W/m}^2\text{K}$. Na segunda parede, manteve-se a mesma configuração, modificando-se apenas, de forma hipotética, a resistência à difusão do concreto, atribuindo os valores do tijolo cerâmico maciço ($S_d= 16\text{m}$, Anexo 8). Esta segunda denominada “parede B”.

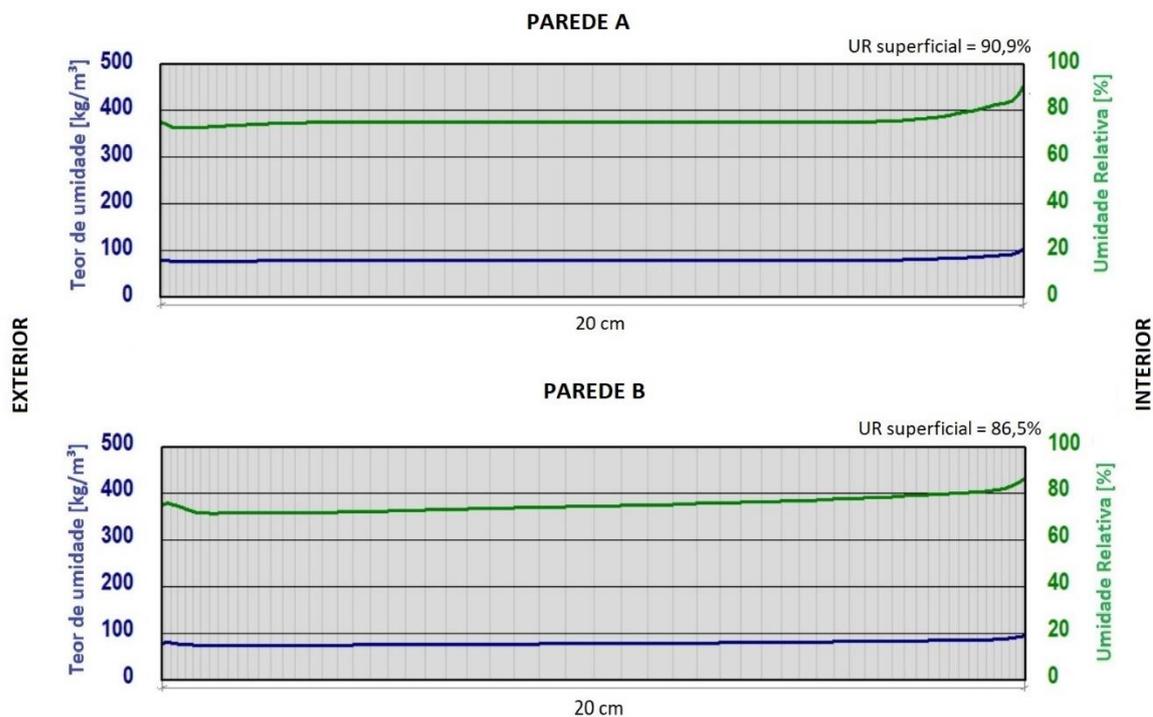
As figuras 155 a 159 apresentam a evolução do perfil de umidade destas paredes ao longo do período simulado.

Figura 155: Condição inicial (01/janeiro): UR = 75%.



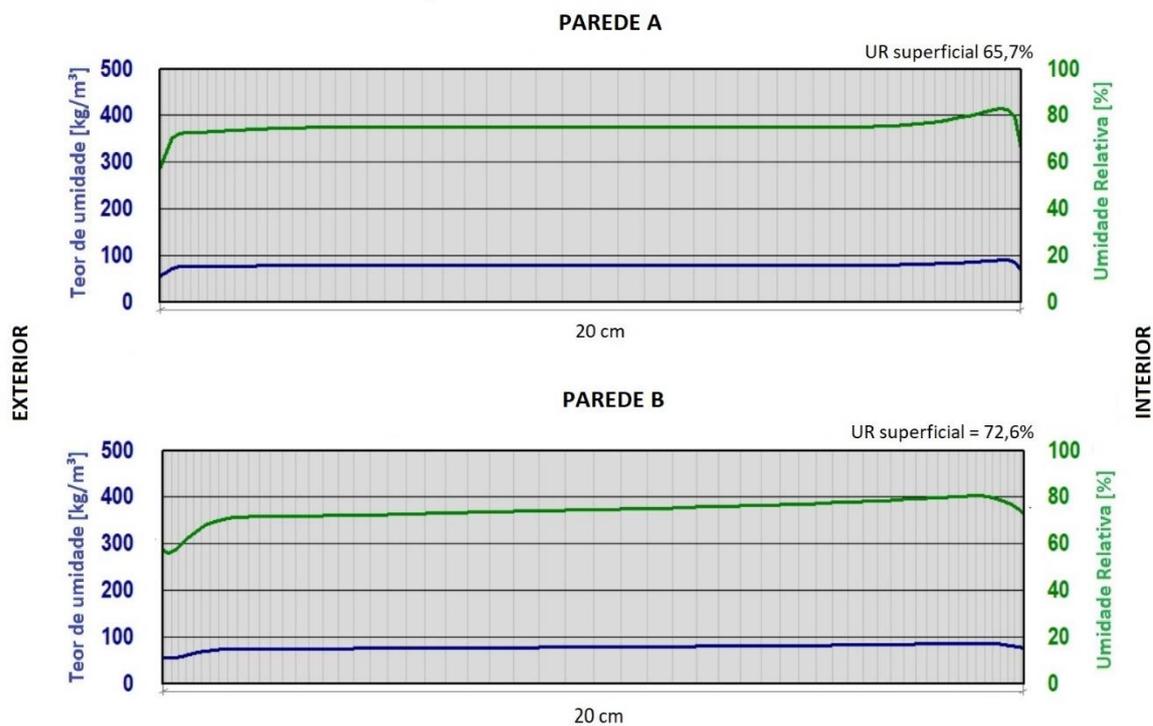
Fonte: Autor

Figura 156: Perfil de umidade em 09/02 às 8:00h (verão, manhã).



Fonte: Autor

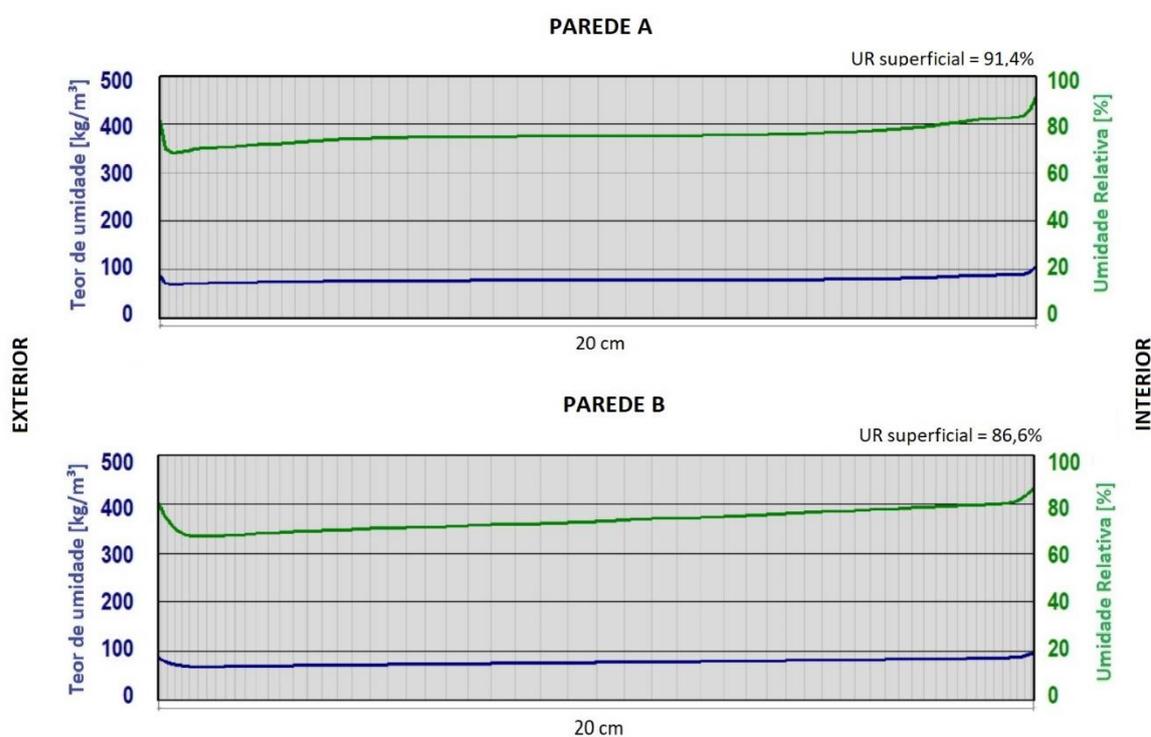
Figura 157: Perfil de umidade em 09/02 às 20:00h (verão, noite)



Fonte: Autor

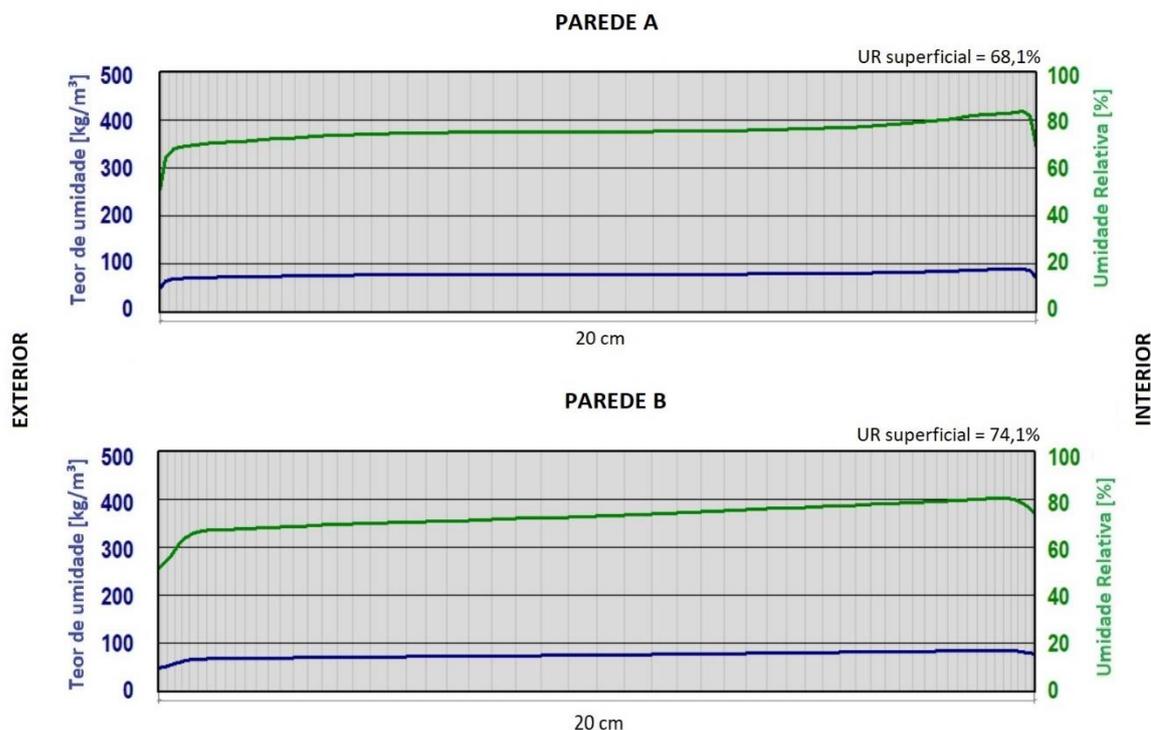
É possível notar que no caso da parede A (concreto comum, com maior resistência à difusão) os valores superficiais de umidade apresentam maior amplitude, enquanto que em maiores profundidade da parede praticamente não há alteração em relação à condição inicial. Já na parede B (com resistência à difusão do tijolo cerâmico) a umidade possui maior facilidade de transporte através da parede, resultando em menor amplitude dos valores de umidade relativa superficial, e em alterações do teor de umidade ao longo de todo o perfil da parede.

Figura 158: Perfil de umidade em 07/07 às 8:00h (inverno, manhã).



Fonte: Autor

Figura 159: Perfil de umidade em 07/07 às 20:00h (inverno, noite).



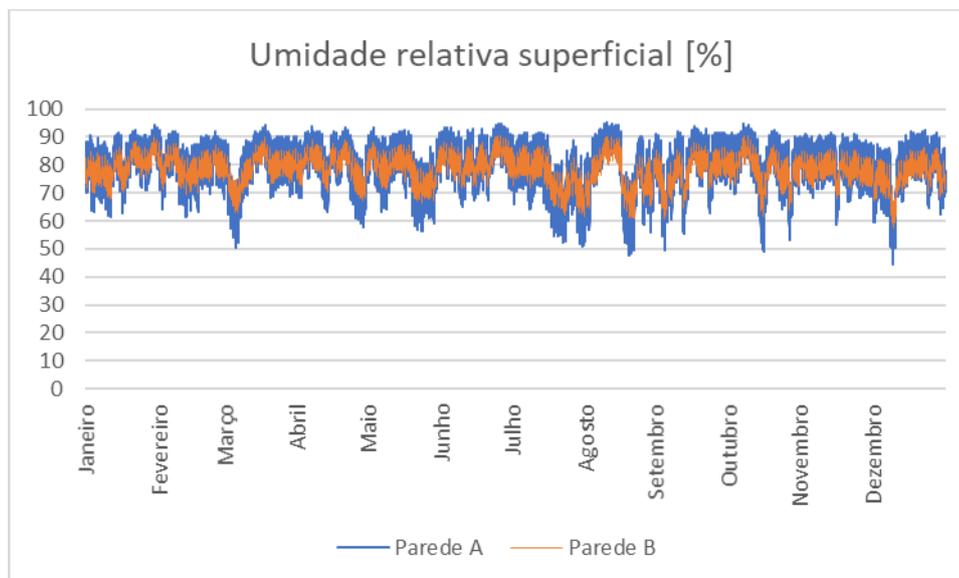
Fonte: Autor

No inverno observa-se o mesmo comportamento, com menor amplitude da umidade relativa superficial na parede com menor resistência à difusão do vapor d'água.

A Figura 160 apresenta a umidade relativa superficial interna para ambas as paredes, ao longo de um ano. Nota-se que para o concreto comum a umidade relativa superficial alcança patamares superiores a 90%, recorrentemente.

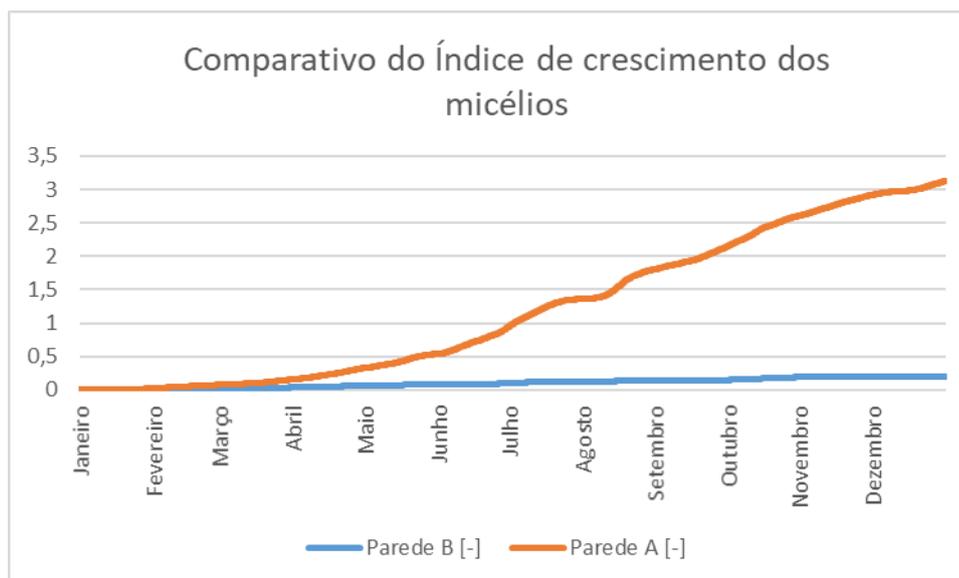
Por fim, na Figura 161 são apresentados os resultados de previsão de crescimento dos micélios para ambas as paredes.

Figura 160: Umidade relativa superficial interna para as paredes com concreto comum e com concreto hipotético com resistência à difusão igual à cerâmica.



Fonte: Autor

Figura 161: Comparativo do índice de crescimento dos micélios previstos para as duas paredes analisadas



Fonte: Autor

Conclui-se que as propriedades higroscópicas do concreto também são determinantes para os problemas encontrados nos empreendimentos estudados.

Embora tenha se demonstrado apenas a influência da resistência à difusão do vapor d'água, evidentemente as demais propriedades higroscópicas (coeficiente de transporte líquido e função de armazenamento de umidade) também influenciam os resultados. De forma geral, para paredes em contato com o ar úmido, quanto menor a resistência ao transporte de umidade, menor será a amplitude da umidade relativa superficial, devido à maior mobilidade da umidade para alcançar maiores profundidades da parede ou retornar ao ambiente. Por outro lado, a função de armazenamento de umidade está estritamente relacionada com a inércia higroscópica dos componentes, pois determina quanto de umidade absoluta o material pode conter em relação à umidade relativa.

- Comentários sobre o critério SINAT

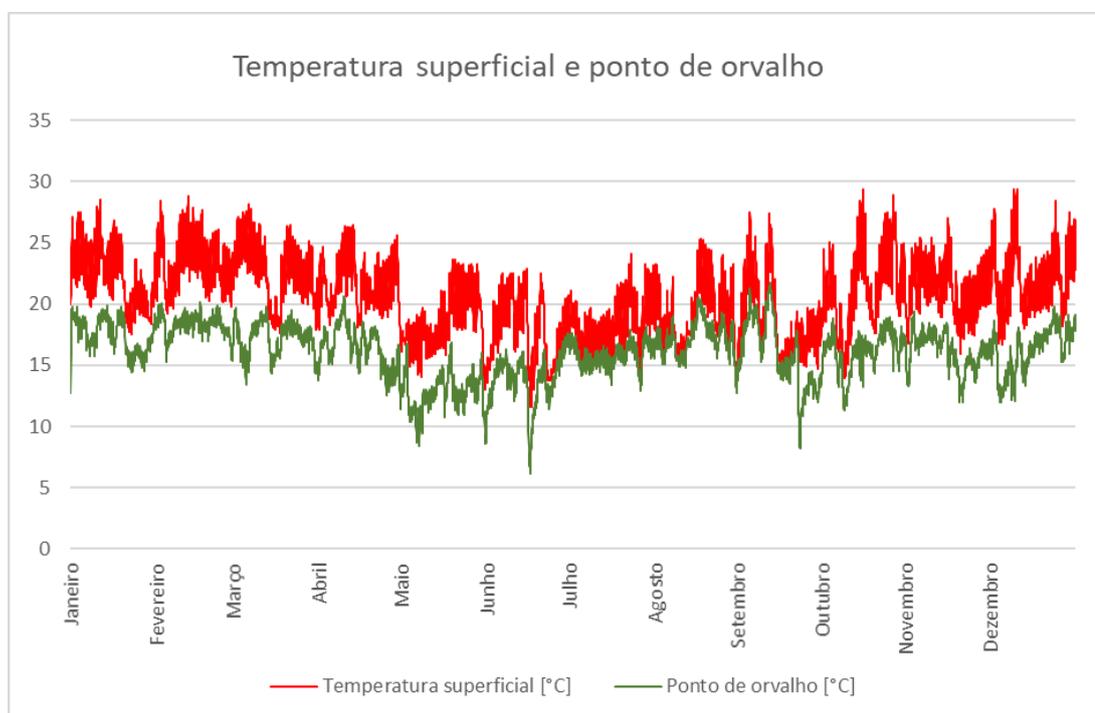
A terceira revisão da Diretriz SINAT nº 001 (SISTEMA NACIONAL DE AVALIAÇÕES TÉCNICAS, 2017) propõe critério para analisar o potencial surgimento de problemas relacionados a umidade nas edificações construídas com paredes de concreto. Conforme já discorrido ao longo do trabalho, o critério baseia-se no comparativo entre a quantidade de horas em que é esperada a ocorrência de condensação superficial sobre a parede analisada e outra tipologia de parede tida como referência.

Porém, conforme exposto no capítulo 3, para que bolores desenvolvam-se em edificações não é necessária a ocorrência de condensação superficial. Assim, conceitualmente pode-se dizer que o critério proposto pela diretriz SINAT adota parâmetros inadequados. Como exemplo, analisou-se a ocorrência de condensação superficial para o caso do empreendimento B apresentado na Tabela 10. Naquelas condições de ocupação, ventilação e orientação obteve-se um índice de crescimento dos micélios previsto igual a 3,053, valor considerado crítico. Entretanto, não é esperada nenhuma ocorrência de condensação superficial para este caso. Ou seja, mesmo sem nenhuma ocorrência anual de condensação superficial, pode-se obter elevado crescimento de fungos. A Figura 162 apresenta a temperatura superficial e o ponto de orvalho calculados para o

período simulado, enquanto que o gráfico na Figura 163 mostra a umidade relativa superficial interna ao longo do ano.

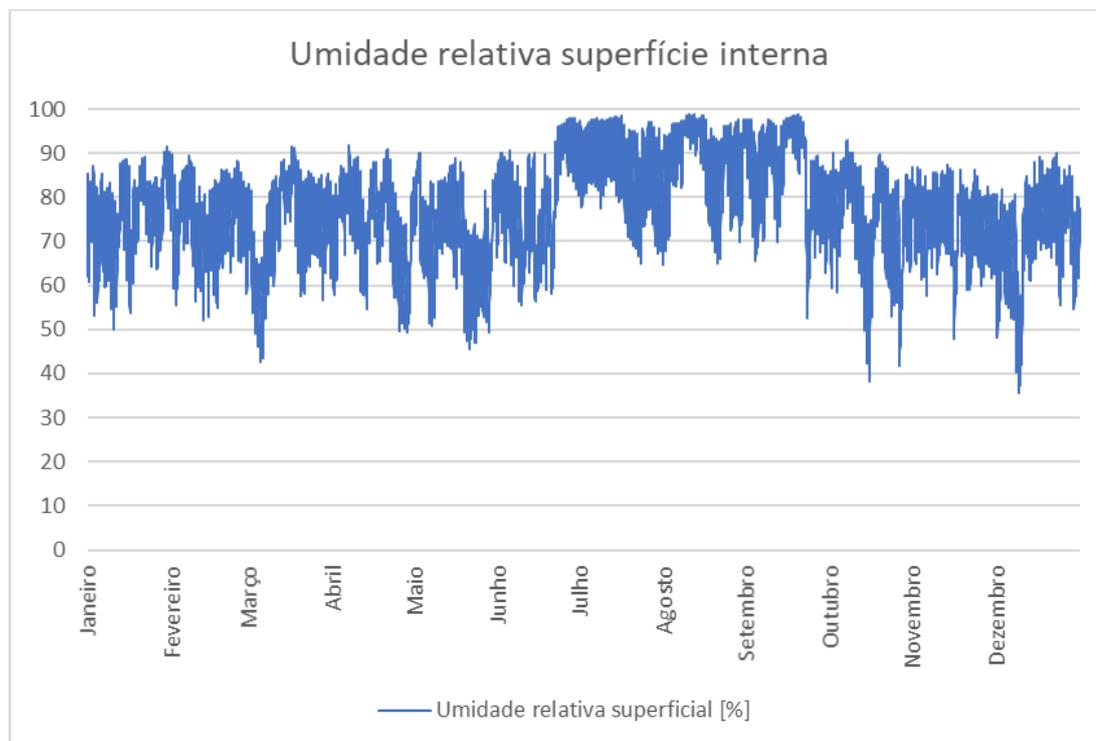
Diante desta análise, sugere-se que possíveis normalizações nacionais não adotem como critério a ocorrência de condensação superficial. O parâmetro ideal a ser analisado é a umidade relativa superficial, seus valores e recorrências. Como exemplo, a norma alemã DIN 4108-8 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2010) propõe critério onde considera que bolores podem ocorrer em edificações caso, em pelo menos cinco dias consecutivos, a umidade relativa superficial atinja valores superiores a 80% durante pelo menos 12 horas/dia.

Figura 162: Temperatura superficial e ponto de orvalho ao longo do período simulado, empreendimento B, 3 ocupantes, ventilação “sazonal” e orientação sul. Não há condensação superficial.



Fonte: Autor

Figura 163: Umidade relativa superficial interna, ao longo do período simulado: Empreendimento B, 3 ocupantes, ventilação “sazonal” e orientação sul.

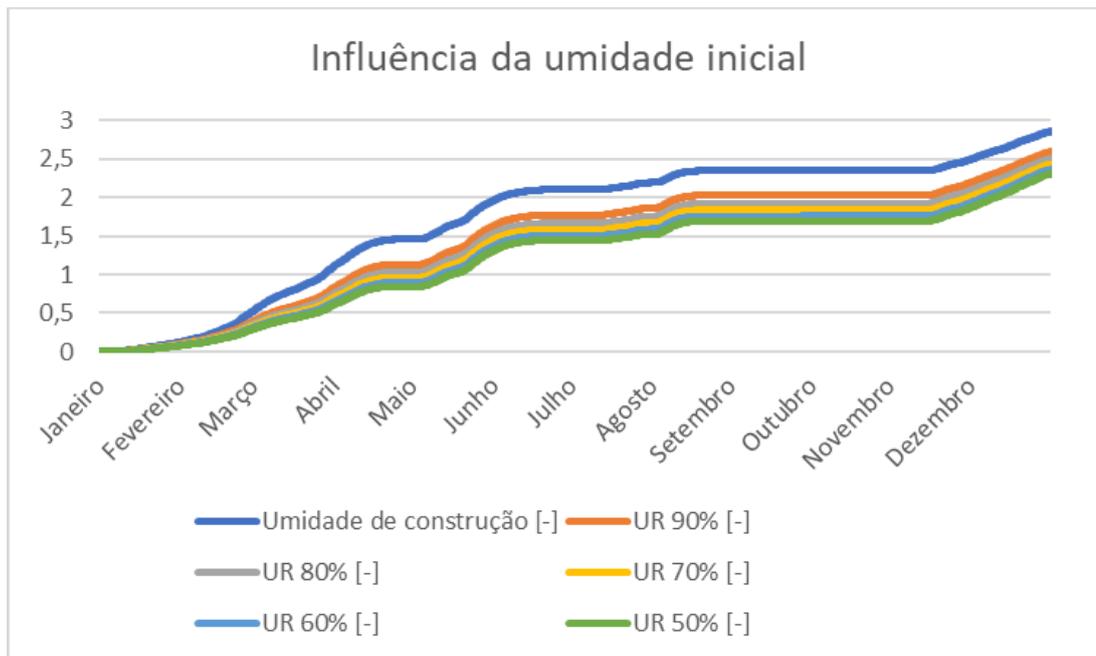


Fonte: Autor

- Influência da umidade inicial da parede

Conforme descrito no capítulo 5, para as simulações deste trabalho adotou-se como umidade inicial contida nos materiais constituintes das paredes um teor de umidade equivalente a 75% de umidade relativa. Entretanto, em situações reais, este valor pode variar de acordo com o lapso de tempo entre a construção e a ocupação da edificação. Para analisar se esta situação pode influenciar os resultados, foram realizadas simulações complementares, variando-se a umidade inicial entre a umidade de construção e umidades relativas de 90%, 80%, 70%, 60% e 50%, para o caso estudado no item 6.5.3. Os resultados estão na Figura 164.

Figura 164: Índice de crescimento dos micélios previsto, em relação à umidade inicial da parede.



Fonte: Autor

Nota-se que, com exceção do caso da umidade de construção, não há grande influência da umidade inicial para as demais faixas de umidade analisadas. A umidade realmente determinante para os resultados é aquela contida no ar interior da edificação, que interage com a superfície dos componentes, e que nos casos estudados pode apresentar altas concentrações, devido à alta ocupação das edificações, pequenos ambientes e baixas taxas de ventilação.

8 CONCLUSÃO

O sistema construtivo com paredes de concreto usualmente é composto por paredes maciças de concreto, com 10 cm de espessura, revestidas com textura acrílica ou gesso liso e pintura. Porém, este sistema construtivo tem apresentando problemas de proliferação de bolores, especialmente nas superfícies internas das paredes externas de unidades habitacionais.

Para que os bolores ocorram em edificações, certas condições devem ser atendidas. Entretanto, pode-se afirmar que a principal delas é a umidade. A faixa de temperatura em que os bolores ocorrem, a oferta de oxigênio, a presença de nutrientes nos substratos, o pH das superfícies, entre outros fatores necessários para o desenvolvimento dos bolores, são facilmente atendidos nas condições normais de uso das edificações. Desta forma, a umidade torna-se o fator determinante para a ocorrência de bolores em edificações.

Desconsiderando eventos específicos, como infiltrações de umidade pelas fachadas, vazamentos em tubulações ou ascensão de umidade do solo, a única fonte de umidade que sempre ocorre nas edificações é a umidade contida no ar. Por este motivo, é fundamental entender como os componentes das edificações comportam-se quando expostos às condições ambientais de temperatura e umidade, conceito chamado desempenho higrotérmico. As propriedades higrotérmicas dos materiais constituintes das paredes, expostos às condições ambientais, determinam o microclima na superfície das paredes, expresso pela temperatura e umidade relativa superficiais, utilizado para os estudos de ocorrência de bolores.

No caso específico das paredes de concreto, concluiu-se que este sistema construtivo apresenta maior potencial de ocorrência de bolor, sob as condições estudadas. A baixa resistência térmica destas paredes (coeficiente global de condutância térmica da ordem de $4,065 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), inclusive não atendendo o critério simplificado de desempenho térmico da Norma de Desempenho (NBR 15.575, ABNT 2013), faz com que, em dias frios, a temperatura superficial da parede seja demasiadamente baixa. Esta situação tende a elevar a umidade relativa superficial, em função do gradiente de pressão parcial de vapor entre a superfície da parede e o ar. Aliado a isto, a alta resistência à difusão de vapor d'água do concreto diminui o

transporte de vapor através da parede, retendo a umidade próxima da superfície em contato com o ar úmido.

Quando se associam estes fatos acima a determinadas situações de posição, orientação, ocupação e ventilação das habitações, resultam-se condições propícias à proliferação de bolores nas superfícies internas do envelope destas edificações. A taxa de ocupação dos ambientes é determinante pois reflete diretamente na quantidade de vapor d'água liberada nos espaços internos. A taxa de ventilação é decisiva pois ela é responsável pela renovação do ar interior, retirando seu excesso de umidade. Considerando o perfil dos empreendimentos onde este sistema tem sido comumente empregado, empreendimentos de interesse social, com ambientes pequenos, ventilação precária e alta ocupação, é de se esperar que estas condições sejam atendidas com frequência, favorecendo a proliferação de bolores, conforme observado nas vistorias realizadas.

Finalmente, conclui-se que a incidência de bolores em edificações ocorre através de uma causalidade complexa, influenciada por diversos fatores, sendo impossível apontar uma única causa para a proliferação de bolores em edificações. Ainda assim, a fim de evitar este problema, vários cuidados devem ser tomados, como: projeto arquitetônico e sistema construtivo com propriedades que resultem em baixas umidades relativas superficiais; atentar para a ventilação dos ambientes, desde a fase de projeto (posição, tipologia e dimensões das janelas, topografia, direção dos ventos, etc), bem como no correto uso e operação das janelas por parte dos moradores; manter as superfícies sempre limpas, evitando contaminações que favoreçam o crescimento de bolores; evitar mobiliários adjacentes às paredes externas, prejudicando a ventilação nestes locais; e preferir por acabamentos menos rugosos e com menor biorreceptividade, ou seja, mais resistentes à ocorrência de microrganismos.

REFERÊNCIAS

ABCB. **Condensation in buildings: Handbook**. 2. ed. Canberra: Australian Government And States And Territories Of Australia, 2016. 130 p.

ADAN, Olaf Clemens Gerardus. **On the fungal defacement of interior finishes**. 224 f. Ph.D. Thesis Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 1994.

AMARAL, Manuel António Pinto da Silva. **Sistemas de Ventilação Natural e Mistos em Edifícios de Habitação**. 2008. 317 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2008.

ANTRETTTER, Florian et al. **Validation Of A Hygrothermal Whole Building Simulation Software**. In: 12th Conference Of International Building Performance Simulation Association, Sydney. Proceedings of Building Simulation, 2011. p. 1694 - 1701.

ASHRAE- American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. **Standard 140: Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs**. Atlanta, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16055: Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações - Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2012.

BEKKER, Mirjam. **Growth of Penicillium rubens after desiccation**. 150 f. Tese - Department Of Applied Physics, Eindhoven University Of Technology, Eindhoven, 2014.

BELL, David W.. **Physical Chemistry**. Pacific Grove: Brooks/cole - Thomson Learning, 2003. 839 p.

BITTENCOURT, Leonardo; CANDIDO, Christina. **Ventilação Natural em Edificações**. Rio de Janeiro: Procel Edifica, 2010. 101 p.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 5925: Code of Practice for Design of Buildings: Ventilation Principles and Designing for Natural Ventilation**. London, 1991.

BRITO, Adriana Camargo de. **Contribuição da inércia térmica na eficiência energética de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo**. 241 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

BURGE, Harriet A.. Moisture, Organisms, and Health Effects. In: TRECHSEL, Heinz R et al. **Moisture control in buildings: The key factor in mould prevention**. 2. ed. West Conshohocken, Pa: Astm International, 2009. Cap. 5. p. 80-86. (ASTM manual series).

COSTA, Ennio Cruz da. **Física Aplicada à Construção: Conforto Térmico**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1974. 258 p.

CROISSET, M. **L'higrothermique dans le bâtiment**. Paris: Eyrolles Éditions, 1972.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden**. Berlin, 2013.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 4108-8: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden**. Berlin, 2010.

FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. **Manual de conforto térmico**. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001. 243 p.

GAMBALE, Walderez. Fungos Contaminantes. In: ZAITZ, Clarisse. **Compêndio de micologia medica**. Rio de Janeiro: Medsi, 1998. Cap. 10. p. 113-121.

GARG, K.I.; JAIN, Kamal K.; MISHRA, A. K.. Role of fungi in the deterioration of wall paintings. **The Science Of The Total Environment**, v. 167, p.255-271, 1995.

GAYLARDE, Christine C.. OS FUNGOS COMO ORGANISMOS DETERIOGÊNICOS EM PRÉDIOS HISTÓRICOS CONSTRUÍDOS DE PEDRA. In: JIMÉNEZ, Cesáreo Sáiz; VIDELA, Héctor A.. **BIODETERIORO DE MONUMENTOS DE IBEROAMÉRICA**. España: Rtxv-e Cytel, 2002. p. 33-43.

GAYLARDE, Christine; SILVA, M. Ribas; WARSCHEID, Thomas. Microbial impact on building materials: an overview. **Materials And Structures**, v. 36, p.342-152, June 2003.

GAYLARDE,C.C; MORTON, G.L.H. **Deteriogenic biofilms on building and their control: a review**. **Biofouling**, v.14, p.59-74, 1999.

GU, J.D. *et al.* Biodeterioration of concrete by fungus *Fusarium*. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 41, p. 101-109, 1998.

HENRIQUES, Fernando M. A.. **Humidade em paredes**. Lisboa: LNEC, 1994. 168 p. (Conservação e Reabilitação).

JOHANSSON, Pernilla. **Critical Moisture Conditions for Mould Growth on Building Materials**. 2012. 119 f. Tese, Lund University, 2012.

KRUS, Martin. **Moisture transport and storage coefficients of porous mineral building materials: Theoretical principles and new test methods**. 1996. 88 f., Fraunhofer Institute Of Building Physics, Holzkirchen, 1996.

KRUS, Martin; SEIDLER, Michael; SEDLBAUER, Klaus. Comparative evaluation of the predictions of two established mould growth models. **ASHRAE Transactions**, Atlanta, v. 116, part 2, 2010.

KÜNZEL, Hartwig M.. **Simultaneous heat and moisture transport in building components: One- and two-dimensional calculation using simple parameters**. Stuttgart: Fraunhofer Institute Of Building Physics, 1995. 64 p.

MISURELLI, Hugo; MASSUDA, Clovis. Paredes de concreto. **Téchne**, São Paulo, v. 147, p.74-80, jun. 2009. Mensal. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/147/artigo285766-1.aspx>>. Acesso em: 20 dez. 2017.

MOON, Hyeun Jun. **Assessing Mold Risks in Buildings under Uncertainty**. 2005. 224 f. Tese (Doutorado) - Curso de Degree Doctor Of Philosophy In The College Of Architecture, Georgia Institute Of Technology, Atlanta, 2005. Disponível em: <<https://smartech.gatech.edu/handle/1853/7279>>. Acesso em: 14 jul. 2017.

MORAIS, Juliana Magna da Silva Costa. **Ventilação Natural em Edifícios Multifamiliares do "Programa Minha casa Minha vida"**. 211 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura, Tecnologia e Cidade, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

MOREIRA, José R. Simões. **Fundamentos e Aplicações da Psicometria**. São Paulo: Rpa Editorial, 1999. 194 p.

MORISHITA, Claudia et al. **Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas**: (v.5). Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. 14 p. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/catalogo_propriedades_termicas_parede_e_cobertura_out2011_2.pdf>. Acesso em: 16 maio 2017.

NIELSEN, Kristian Fog. **Mould growth on building materials: Secondary metabolites, mycotoxins and biomarkers**. 120 f. Ph.D. Thesis. Danish Building And Urban Research, Aalborg University, Aalborg, 2002.

PINHEIRO, Sayonara Maria de Moraes. **IMPACTO DA COLONIZAÇÃO DO FUNGO Cladosporium sphaerospermum SOBRE A ARGAMASSA DO CONCRETO**. 2003. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2003.

RAMOS, Nuno Manuel Monteiro. **A IMPORTÂNCIA DA INÉRCIA HIGROSCÓPICA NO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE EDIFÍCIOS**. 2007. 485 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2007.

RODRIGUES, António Moret; PIEDADE, António Canha da; BRAGA, Ana Marta. **Térmica de edifícios**. Amadora: Edições Orion, 2009. 673 p.

RORIZ, Maurício. **Psicrom 1.0** (software). Universidade Federal de São Carlos. Disponível em: <http://www.roriz.eng.br/download_6.html>. Acesso em: 10 abril 2017.

SAND, W.; BOCK, E. **Biodeterioration of mineral materials by microorganisms – biogenic sulfuric and nitric acid corrosion of concrete and natural stone**. *Geomicrobiology Journal*, UK, v.9, p. 129-138, 1991a.

SANTOS, Altair. **Paredes de concreto já dominam Minha Casa Minha Vida**. 2016. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/paredes-de-concreto-minha-casa-minha-vida/>>. Acesso em: 20 dez. 2017.

SEDLBAUER, K. **Prediction of Mould Fungus Formation on the Surface of and Inside Building Components**. Holzkirchen: Fraunhofer Institute for Building Physics, 2001.

SEIFFERT, Karl. **DAMP DIFFUSION AND BUILDINGS: Prevention of Damp Diffusion Damage in Building Design**. Amsterdam: Elsevier Publishing Company Limited, 1970. 209 p.

SHIRAKAWA, M.A. **Biodeterioração de argamassas por fungos – Desenvolvimento de teste acelerado para avaliação da biorreceptividade**. 139 f. Tese (Doutorado em Microbiologia) – Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

SISTEMA NACIONAL DE AVALIAÇÕES TÉCNICAS. **Diretriz para Avaliação Técnica de sistemas construtivos em paredes de concreto armado moldadas no local. Nº 001**. Revisão 03. Brasília, 2017.

TOLEDO, Eustáquio. **Ventilação natural das habitações**. Maceió: Edufal, 1999. 170 p.

TRECHSEL, Heinz R. et al. **Moisture control in buildings: The key factor in mould prevention**. 2. ed. West Conshohocken, Pa: Astm International, 2009. 611 p. (ASTM manual series).

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY - USDOE. **Energy Plus Simulation Software**, 2017.

VERECKEN, Evy; ROELS, Staf. **Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation**. Elsevier. Leuven, p. 296-310. maio 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132311003830?via=ihub>>. Acesso em: 15 jul. 2017.

VIITANEN, H.; RITSCHKOFF, A. C.. **Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature**. Uppsala: Swedish University Of Agricultural Sciences, 1991. 40 p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO guidelines for indoor air quality : dampness and mould**. Copenhagen: Who Regional Office For Europe, 2009. 228 p. Disponível em: <http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0017/43325/E92645.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2017.

ANEXOS

Anexo 1: Coeficiente de global de transmissão (U) e capacidade térmica (Ct) para alguns sistemas construtivos de paredes, em estado seco.

Descrição do componente	U (W/(m ² K))	Ct (kJ/m ² K)
Argamassa externa (2,5cm) - Bloco de concreto (9,0cm) - Gesso liso interno (2,0cm)	2,72	178
Argamassa externa (2,5cm) - Bloco de concreto (14,0cm) - Gesso liso interno (2,0cm)	2,64	241
Argamassa externa (2,5cm) - Bloco cerâmico (9,0cm) - Gesso liso interno (2,0cm)	2,37	150
Argamassa externa (2,5cm) - Bloco cerâmico (14,0cm) - Gesso liso interno (2,0cm)	1,85	105
Parede de tijolo maciço (10cm) - sem revestimento	3,65	158
Parede de concreto maciço (10cm) - sem revestimento	4,4	240
Parede de concreto maciço (12cm) - sem revestimento	4,19	288
Placa de alumínio composto - câmara de ar (>5cm) - argamassa externa (2,5cm) - Bloco de concreto (14cm) - argamassa interna (2,5cm)	0,69	224
Placa cimentícia (1cm) - Lã de rocha (7,5cm) - Placa de gesso (1,25cm)	0,53	32
Placa de alumínio composto - Poliestireno (8cm) - argamassa externa (2,5cm) - Bloco cerâmico (9,0cm) - argamassa interna (2,5cm)	0,31	106

Fonte: MORISHITA et al. (2011)

Anexo 2: Suplemento de condutividade térmica (b)

Material	Densidade aparente (kg/m³)	Condutividade térmica (W/mK)	Suplemento de umidade (b) (%/M.-%)
Concreto celular	400-800	0,09-0,19	4
Bloco silico-calcáreo	1800	0,7	8
Concreto com argila expandida	1400-1800	0,5-1,0	4
Concreto leve com suplemento de EPS	300-900	0,07-0,28	3
Concreto comum	2300	1,3-1,5	8
Madeira	400-700	0,08-0,15	1,5
Espuma de poliestireno expandido (EPM)	15-30	0,04	0,05
Espuma de poliestireno extrudado (XPS)	28-40	0,03	0,1
Espuma de poliuretano	40-80	0,03	0,4

Fonte: Künzel (1995)

Anexo 3: Coeficiente de absorção solar

Material	Absorção para radiação solar (α)
Preto fosco	0,85-0,95
Tijolo ou pedra ou telha cor vermelha	0,65-0,80
Tijolo ou pedra cor amarela, couro	0,50-0,70
Tijolo ou pedra ou telha cor amarela	0,30-0,5
Vidro da janela	transparente
Alumínio, outro, bronze (brilhantes)	0,30-0,5
Latão, alumínio fosco, aço galvanizado	0,4-0,65
Latão, cobre (polidos)	0,30-0,50
Alumínio, cromo (polidos)	0,10-0,40

Anexo 4: Valores médios de geração de umidade em residências.

Fonte de umidade	Umidade gerada em média (L)
Banho:	
Banheira (exclui toalhas e derramamento de água)	0,06/banheira tamanho médio
Chuveiro (exclui toalhas e derramamento de água)	0,25/5 min
Secagem de roupas em ambientes internos	2,2 a 2,92/carga média
Cozinhar:	
Café da manhã (4 pessoas, em média)	0,17 (+0,28 para fogão a gás)
Almoço (4 pessoas, em média)	0,25 (+0,32 para fogão a gás)
Jantar (4 pessoas, em média)	0,58 (+0,75 para fogão a gás)
Cozinhar a fogo baixo - 95°C, 10min, panela média (mais gás)	< 0,005 se tampada/ 0,06 se destampada
Água fervendo - 10min, panela média (mais gás)	0,23 se tampada/ 0,27 se destampada
Lavar a louça:	
Café da manhã (4 pessoas, em média)	0,1
Almoço (4 pessoas, em média)	0,08
Jantar (4 pessoas, em média)	0,32
Esfregar o chão	0,15/m ²
Geladeira	1,3/dia
Vasos de plantas (5 a 7 unidades, em média)	0,41 a 0,45/dia
Umidificador	2,08/h
Ocupantes (valor médio):	
Em atividade leve	0,03 a 0,06/h
Em atividade média	0,12 a 0,2/h
Em atividade pesada	0,2 a 0,3/h

Fonte: Treschel et al (2009)

Anexo 5: Espécies de fungos consideradas por Sedlbauer em seu trabalho, divididas em classe de perigo e com as respectivas condições de ocorrência.

Espécie	Classe de perigo	Temperatura (°C)						Umidade relativa (%)			
		Germinação dos esporos			Crescimento dos micélios			Germinação dos esporos		Crescimentos dos micélios	
		min.	ótimo	max.	min.	ótimo	max.	min.	ótimo	min.	ótimo
Asp. flavus	A	10	30	45	6	40	45	80	100	78	98
Asp. Fumigatus	A	10	40	50	10	43	57	80	97	82	97
Asp. nidulans	A	10	37	50	6	40	48	75	95	78	97
Asp. niger	A	10	35	50	6	37	47	77	98	76	98
Asp. penicillioides	A				5	25	37				
Asp. versicolor	A	8	30	42	4	30	40	74	91	75	95
Stachybotrys atra	A	5	25	40	2	23	37	85	97	89	98
Classe de perigo A	A	5	33	50	2	40	57	74	96	75	97
Absidia corymbifera	B					35	45				
Absidia glauca	B				-8	30	43			70	
Alternaria alternata	B	3	35	37	-2	30	32	84		85	98
Asp. amstelodami	B	5	35	43	7	33	42	70	90	71	100
Asp. Candidus	B	10	35	45	3	32	57	70	95	74	90
Asp. ochraceus	B					32				77	95
Asp. Parasiticus	B				10	37				82	
Asp. restrictus	B	10	28		10	28		73	95	71	90
Asp. ruber	B	5	30	42	4	27	38	70	90	71	93
Asp. Terreus	B	14	40	50	11	40	47	75	99	77	97
Aureobasidium pullulans	B				2	25	35			88	
Botrytis cinera	B				-3	21	36			93	
Cla. cladosporioides	B				-5	28	32	85		84	96
Eurotium herbariorum	B					30	40	73		75	96
Fusarium culmorum	B	3	25	37	0	25	31	87		90	
Fusarium oxysporum	B				5	30	37			90	
Fusarium solani	B									90	
Mucor plumbeus	B				4	25	35	93		93	98
Pen. brevicompactum	B	5	25	32	-2	25	30	78		75	96
Pen. chrysogenum	B				-4	28	38	78		79	98
Pen. cyclopium	B	5	25	33	2	25	37	80	97	80	98
Pen. Expansum	B	<0			-3	26	35	82		82	95
Scopulariopsis breviaustralis	B				5	30	37			85	94
Trichoderma viride	B				0	28	37				99
Classe de perigo B	B	3	31	50	-8	29	57	70	94	70	96
Chaetomium globosum	C					35					
Chrysosporium fastidium	C							69	93	72	92
Cla. sphaerosperum	C					25				81,5	
Paecilomyces lilachinus	C					35	60	84		84	
Pen. citrinum	C							84		80	
Rhizopus stolonifer	C	1,5	28	33	10	26	37	84		92	98
Trichothecium roseum	C	5			15	25	35	90		86	96
Ulocladium sp.	C									89	
Wallemia sebi	C		30		5	30	40	69		70	
Classe de perigo C	C	2	29	33	5	29	60	69		70	95

Fonte: Sedlbauer (2001)

Anexo 6: Gêneros de fungos identificados por Shirakawa (1999) em edificações nas cidades de São Paulo e São Bernardo do Campo

Gênero de fungos isolados	Frequência observada - edificações em São Paulo	Frequência observada - edificações em São Bernardo do Campo
Cladosporium	79 %	82 %
Penicillium	37 %	45 %
Aspergillus	21 %	18 %
Trichoderma	10 %	22 %
M.sterilia (escuro)	10 %	14 %
Phialophora	0 %	5 %
Fusarium	5 %	5 %
Rhizopus	0 %	5 %
Mucor	5 %	0 %
Helminthosporium	5 %	0 %
Família Dematiaceae	21 %	54 %

Fonte: Shirakawa (1999)

Anexo 7: Frequência de gêneros de fungos encontrados por Gambale (1998) em dispersão no ar, em diversas cidades brasileiras.

Gênero	SP	RE	BH	BE	RJ	BS	PI	PA	CO	PP	MA
Cladosporium	65	21	90	18	15	49	50	-	33	74	14
Epicoccum	52	-	31	-	-	24	-	-	15	16	-
Rhodotorula	49	7	28	8	10	-	13	-	-	22	38
Penicillium	41	42	65	37	20	51	62	-	43	18	38
Aspergillus	23	59	59	64	10	24	44	47	43	56	29
Aureobasidium	20	11	32	-	-	16	-	-	7	37	31
Phoma	18	19	30	-	-	9	-	-	-	14	-
Alternaria	17	-	21	-	-	7	-	-	11	16	17
Candida	15	31	17	7	-	-	31	-	5	21	55
Fusarium	14	20	-	15	-	17	-	-	5	27	-
Trichoderma	11	8	6	15	-	-	-	-	-	24	24
Cephalosporium	11	6	-	-	-	6	-	-	11	-	29
Curvularia	8	19	-	68	-	11	-	-	-	10	9
Helminthosporium	9	6	19	7	-	6	-	-	-	-	-
Mucor	-	-	-	27	-	-	-	-	-	17	64
Paecilomyces	-	6	8	10	-	-	-	-	-	-	12
Rhizopus	-	8	6	-	-	10	18	-	11	27	29
Monilia	-	13	-	9	-	12	21	-	29	36	-
Pestalotia	-	6	-	-	-	6	-	-	-	-	-
Geotrichum	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Nigrospora	8	8	-	-	-	-	-	-	5	-	-
Verticillium	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-
Trichocladium	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-
Hyalopus	-	-	-	11	-	-	-	-	-	-	-
Sirodemium	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-
Absidia	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	21
Monascus	-	-	-	-	-	-	-	-	6	44	-
Botrytis	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-
Trichotecium	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-
Cryptococcus	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-
Gliocladium	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	4
Neurospora	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	17
Não-esporulados	68	1	-	13	-	33	-	-	-	-	-

Legenda: SP-São Paulo; RE-Recife; BH-Belo Horizonte; BE-Belém; RJ-Rio de Janeiro; BS-Baixada Santista; PI-Piracicaba; PA-Porto Alegre; CO-Curitiba; PP- Presidente Prudente; MA-Manaus.

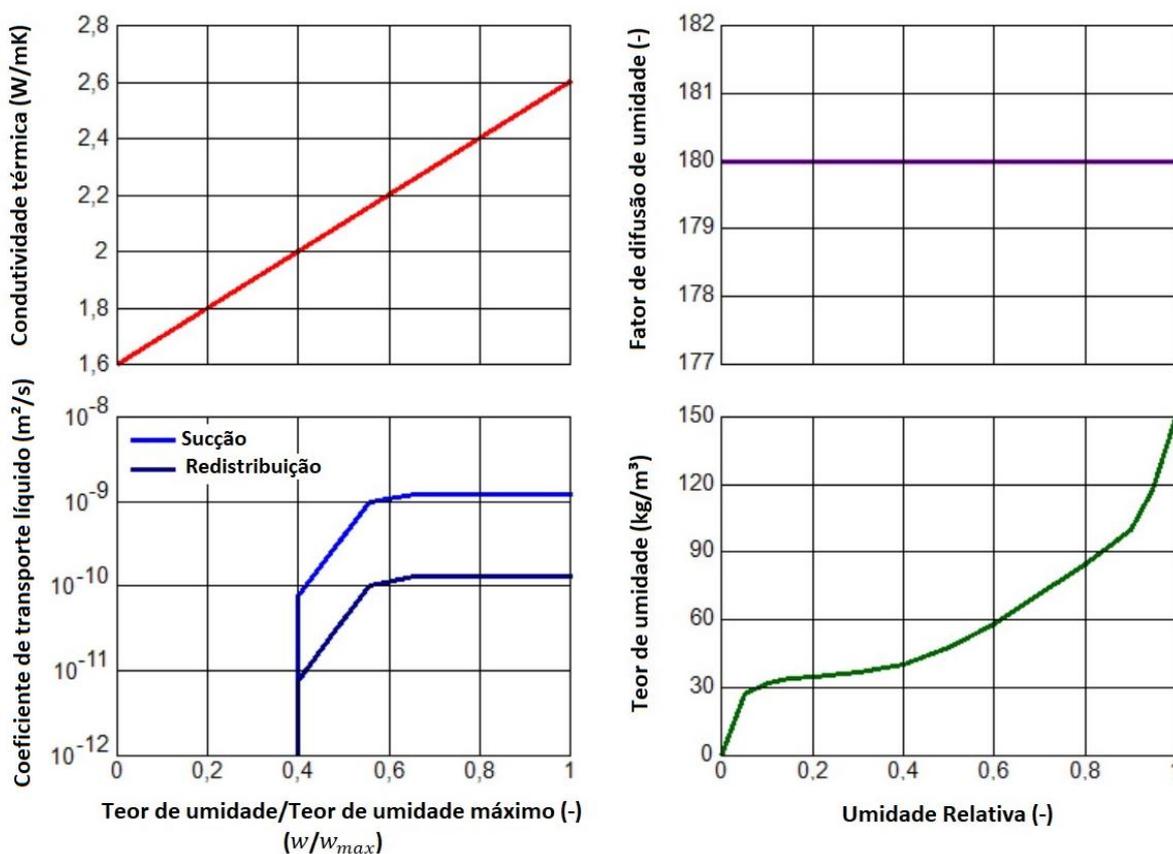
Fonte: Gambale (1998)

Anexo 8: Propriedades higrotérmicas adotadas para os materiais utilizados nas simulações.

1) Concreto

Propriedades básicas	
Densidade aparente (kg/m ³)	2300
Porosidade (-)	0,18
Calor específico (J/kg.K)	850
Condutividade térmica (estado seco) (W/mK)	1,6
Fator de difusão do vapor d'água (-)	180
Suplemento de condutividade térmica (%/M-%)	8

Figura 165: Propriedades higrotérmicas do concreto: à esquerda, condutividade térmica e coeficiente de transporte líquido em função do teor de umidade; à direita, fator de difusão de umidade e função de armazenamento de umidade.

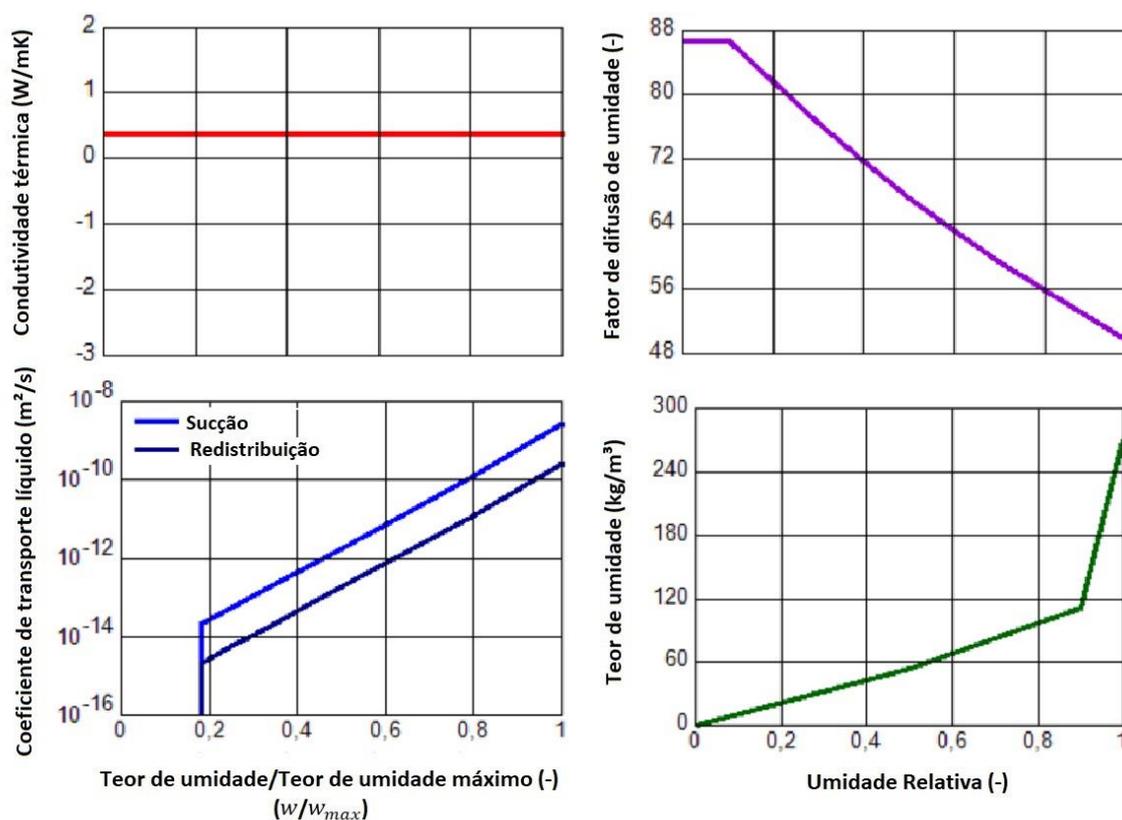


Fonte: Base de dados do software WUFI-Plus®

2) Textura acrílica

Propriedades básicas	
Densidade aparente (kg/m ³)	1795
Porosidade (-)	0,275
Calor específico (J/kg.K)	840
Condutividade térmica (estado seco) (W/mK)	0,371
Fator de difusão do vapor d'água (-)	86,7

Figura 166: Propriedades higrotérmicas da textura acrílica: à esquerda, condutividade térmica e coeficiente de transporte líquido em função do teor de umidade; à direita, fator de difusão de umidade e função de armazenamento de umidade.

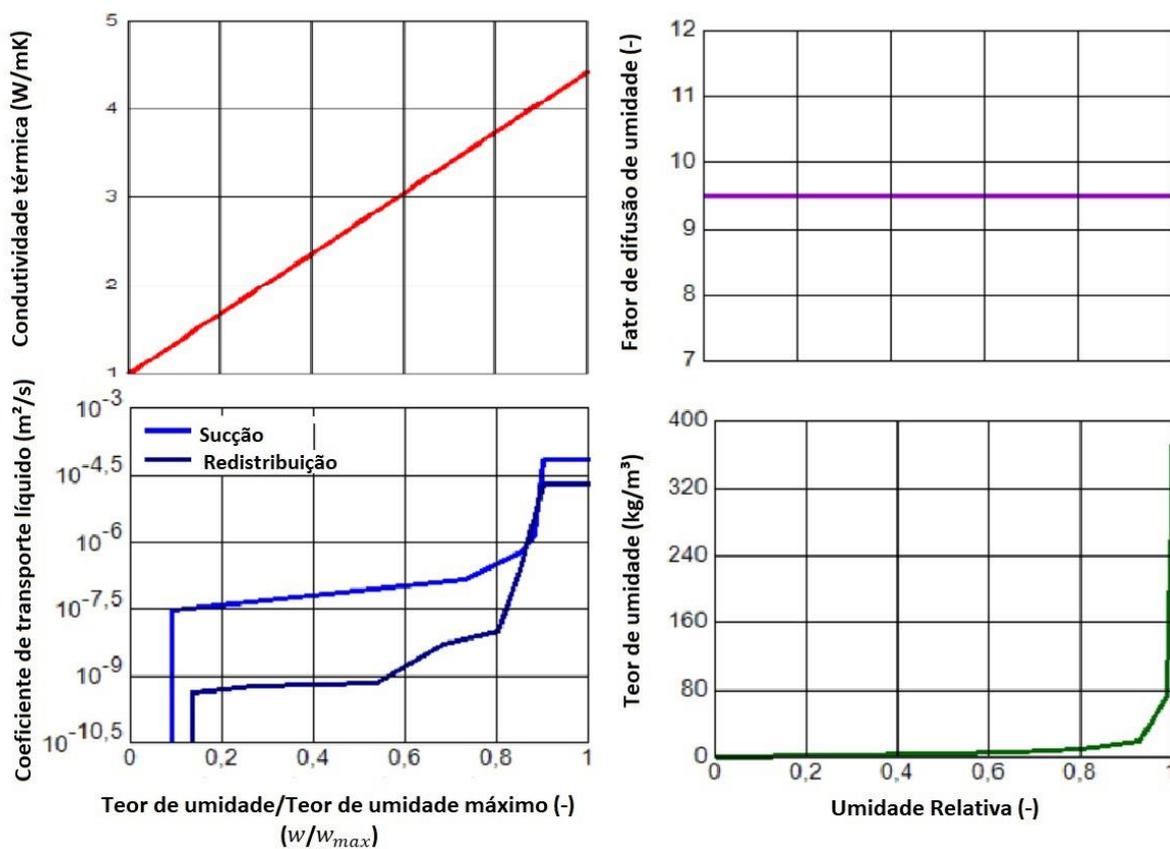


Fonte: Base de dados do software WUFI-Plus®

3) Cerâmica (bloco cerâmico)

Propriedades básicas	
Densidade aparente (kg/m ³)	1800
Porosidade (-)	0,41
Calor específico (J/kg.K)	900
Condutividade térmica (estado seco) (W/mK)	1
Fator de difusão do vapor d'água (-)	9,5
Suplemento de condutividade térmica (%/M-%)	15

Figura 167: Propriedades higrotérmicas da cerâmica: à esquerda, condutividade térmica e coeficiente de transporte líquido em função do teor de umidade; à direita, fator de difusão de umidade e função de armazenamento de umidade.

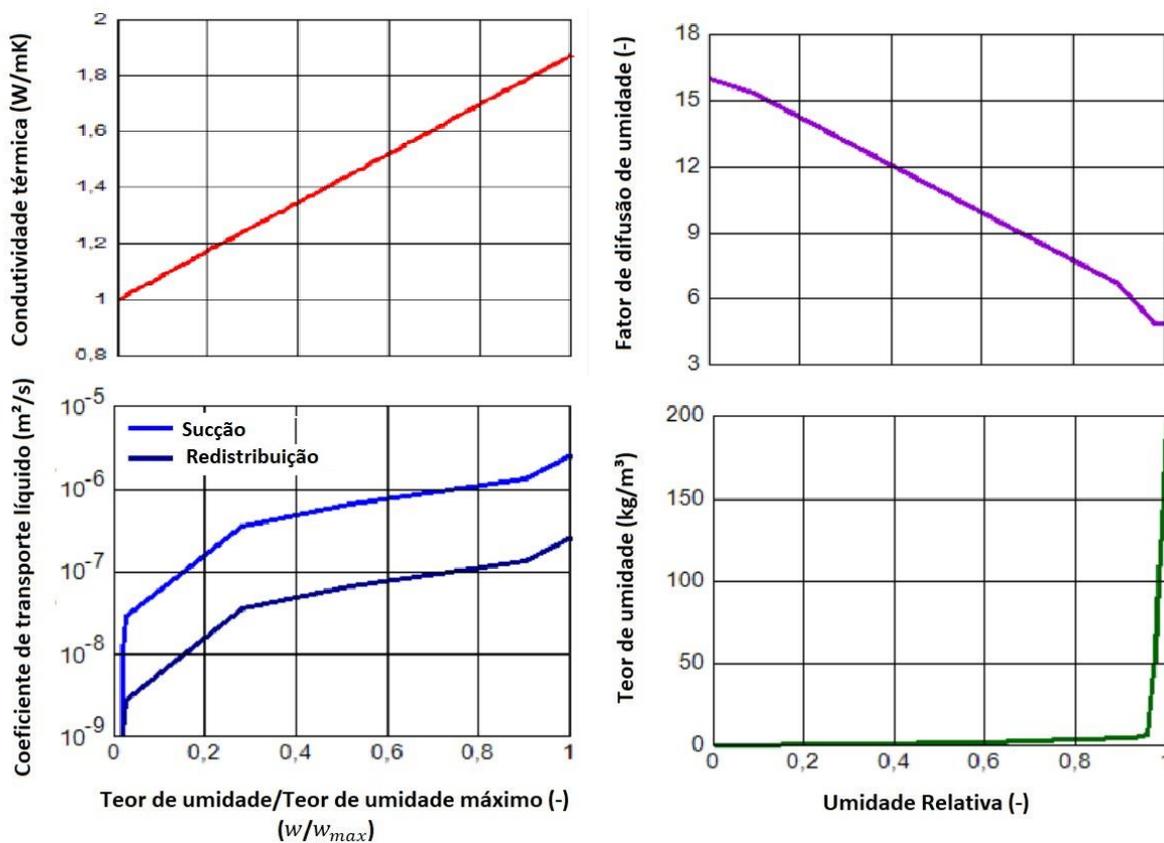


Fonte: Base de dados do software WUFI-Plus®

4) Tijolo cerâmico maciço

Propriedades básicas	
Densidade aparente (kg/m ³)	1800
Porosidade (-)	0,196
Calor específico (J/kg.K)	900
Condutividade térmica (estado seco) (W/mK)	1
Fator de difusão do vapor d'água (-)	16
Suplemento de condutividade térmica (%/M-%)	8

Figura 168: Propriedades higrotérmicas do tijolo cerâmico maciço: à esquerda, condutividade térmica e coeficiente de transporte líquido em função do teor de umidade; à direita, fator de difusão de umidade e função de armazenamento de umidade.

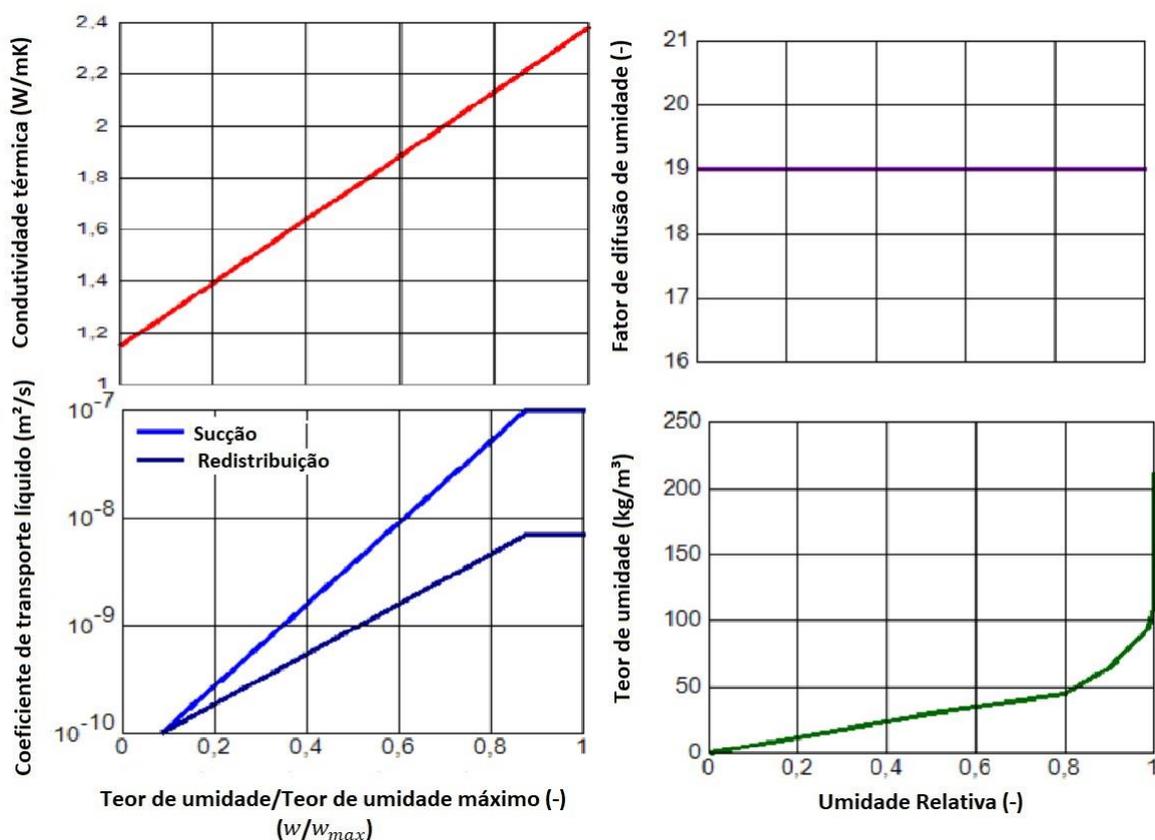


Fonte: Base de dados do software WUFI-Plus®

5) Argamassa

Propriedades básicas	
Densidade aparente (kg/m ³)	1800
Porosidade (-)	0,24
Calor específico (J/kg.K)	1000
Condutividade térmica (estado seco) (W/mK)	1,15
Fator de difusão do vapor d'água (-)	19
Suplemento de condutividade térmica (%/M-%)	8

Figura 169: Propriedades higrótérmicas da argamassa: à esquerda, condutividade térmica e coeficiente de transporte líquido em função do teor de umidade; à direita, fator de difusão de umidade e função de armazenamento de umidade.

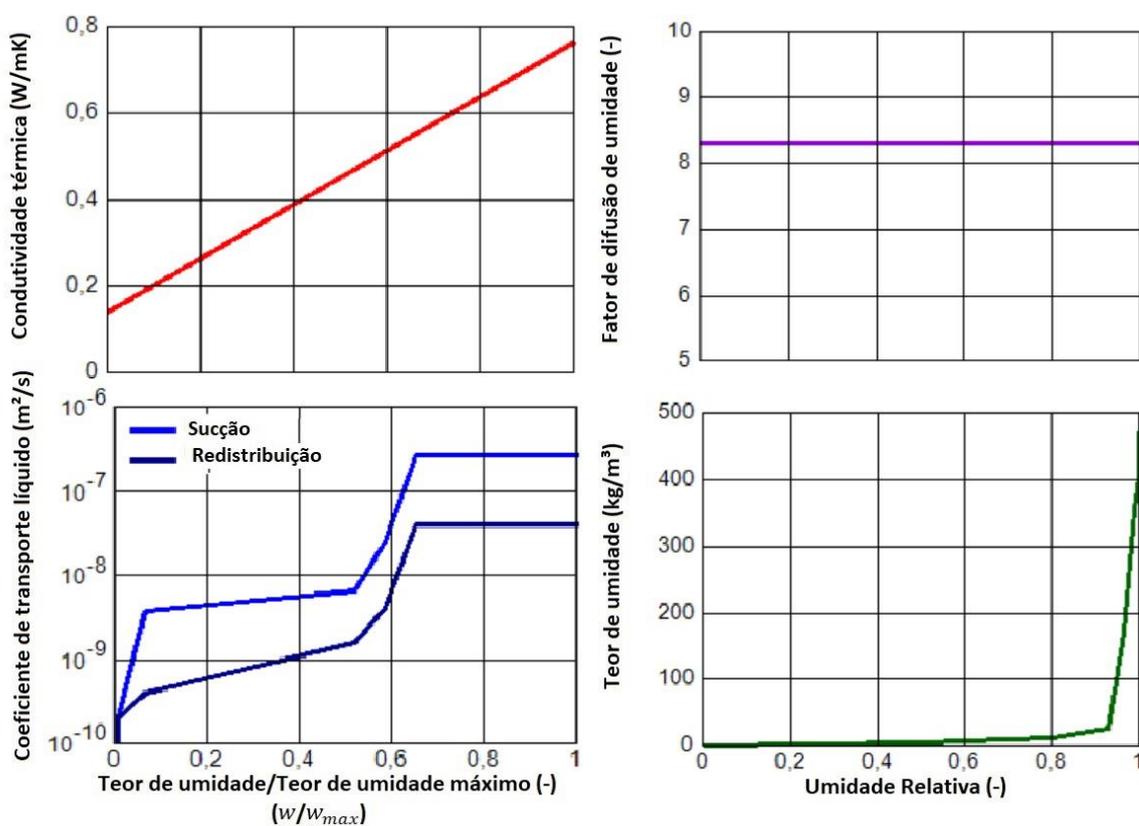


Fonte: Base de dados do software WUFI-Plus®

6) Concreto com aditivo incorporador de ar

Propriedades básicas	
Densidade aparente (kg/m ³)	600
Porosidade (-)	0,72
Calor específico (J/kg.K)	850
Condutividade térmica (estado seco) (W/mK)	0,14
Fator de difusão do vapor d'água (-)	8,3
Suplemento de condutividade térmica (%/M-%)	3,7

Figura 170: Propriedades higrótérmicas do concreto com aditivo incorporador de ar: à esquerda, condutividade térmica e coeficiente de transporte líquido em função do teor de umidade; à direita, fator de difusão de umidade e função de armazenamento de umidade.

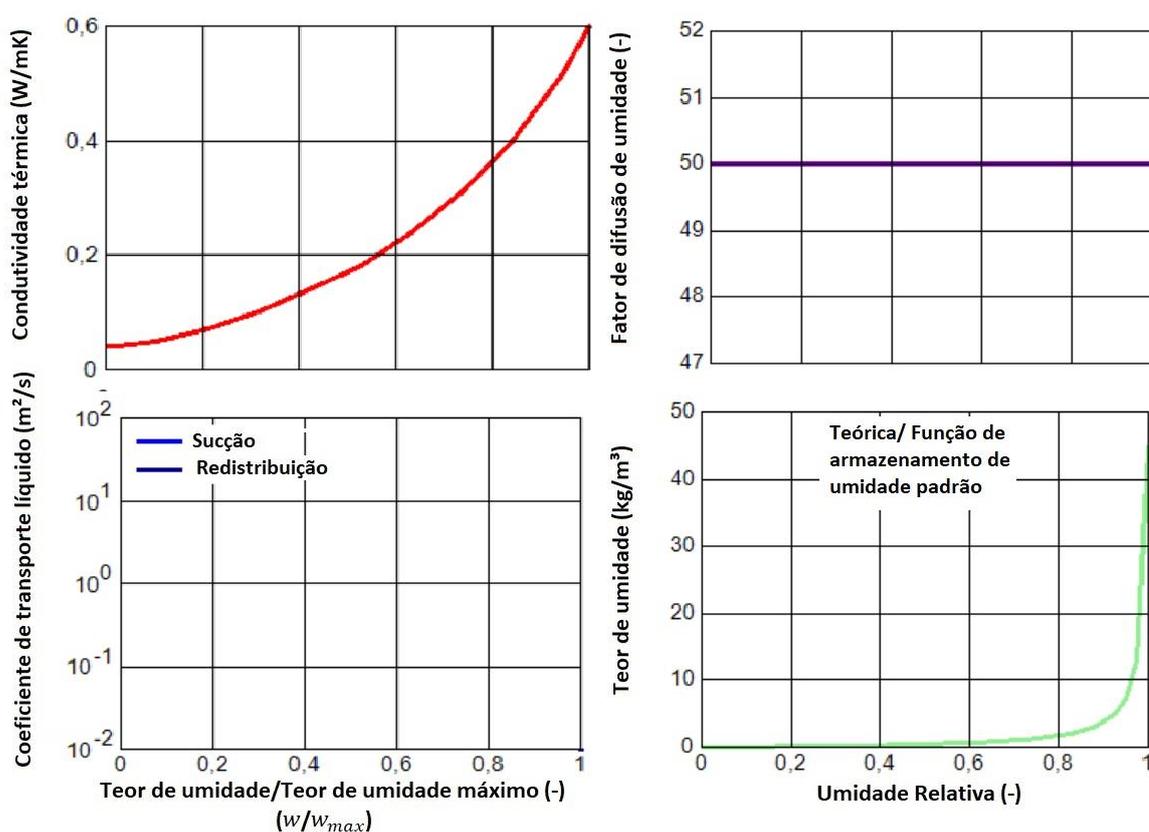


Fonte: Base de dados do software WUFI-Plus®

7) EPS

Propriedades básicas	
Densidade aparente (kg/m ³)	30
Porosidade (-)	0,95
Calor específico (J/kg.K)	1500
Condutividade térmica (estado seco) (W/mK)	0,04
Fator de difusão do vapor d'água (-)	50

Figura 171: Propriedades higrotérmicas do EPS: à esquerda, condutividade térmica e coeficiente de transporte líquido em função do teor de umidade; à direita, fator de difusão de umidade e função de armazenamento de umidade.



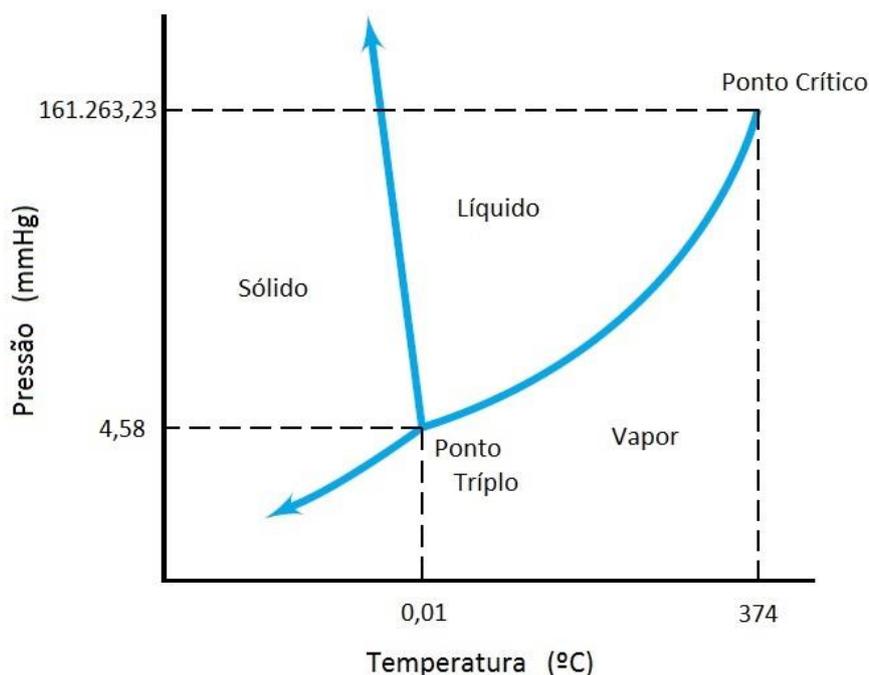
Fonte: Base de dados do software WUFI-Plus®

Apêndice A: CONCEITOS DE PSICROMETRIA

Neste apêndice são apresentados parâmetros físicos do ar atmosférico, cujo entendimento é de fundamental importância para a compreensão dos fenômenos higrotérmicos que ocorrem nas edificações.

A água pode existir e coexistir nas três fases: sólida, líquida e vapor, ou em suas combinações. Por exemplo, mistura líquido-vapor. A fase em que a água se encontra é função de sua temperatura e pressão, conforme representado no diagrama abaixo.

Figura 172: Diagrama de fases da água



Fonte: Adaptado de BELL (2003).

O ar atmosférico sempre possui determinada quantidade de vapor d'água, formando-se assim uma mistura gasosa entre o vapor d'água e o ar seco, chamada ar úmido. Esta quantidade de água difundida no ar varia de acordo com as condições meteorológicas.

Enquanto não ocorram condensações, o ar úmido comporta-se como um gás perfeito, isto significa que a lei de Dalton é aplicável: a pressão total de uma mistura de gases é igual à soma das pressões parciais de seus componentes:

$$p_x = \rho_x R_x T$$

$$p_v = \rho_v R_v T$$

$$p = p_x + p_v$$

Onde:

- p é a pressão parcial do gás (em Pa)
- ρ é a densidade do gás (em kg/m³)
- R é a constante própria do gás ($R_x = 287$ J/kg.K e $R_v = 461$ J/kg.K)
- Os índices x e v correspondem, respectivamente, ao ar seco e ao vapor d'água.

A pressão parcial, por sua vez, é a pressão que determinado componente exerceria caso ocupasse todo o volume da mistura, na mesma condição de temperatura, que pode ser calculada através da equação:

$$pV = mRT$$

Onde, m (kg) é a massa contida em determinado volume V (m³); e T (K) é a temperatura absoluta da mistura.

Entretanto, o ar só pode conter quantidade limitada de vapor d'água, conhecido como limite de saturação. A pressão parcial de vapor d'água (p_v) quando se atinge esta quantidade máxima de vapor d'água que o ar pode conter é chamada de pressão de saturação (p_s).

A pressão de saturação (p_s) é função exclusiva da temperatura. Desta forma, a pressão de saturação do vapor d'água pode ser expressa em função da temperatura da mistura, conforme representado na Tabela A.1.

A seguir são explicados os principais conceitos relativos à umidade presente no ar.

- Umidade absoluta

A umidade absoluta (ω) é definida como a relação entre a massa de vapor d'água (m_v) e o volume de determinada massa de ar (V):

$$\omega = \frac{m_v}{V} \quad \left(\frac{\text{kg vapor}}{\text{m}^3} \right)$$

A umidade absoluta também pode ser descrita em termos da pressão parcial de vapor (p_v) quando a temperatura da mistura (t) é conhecida, em graus Celsius:

$$\omega = \frac{p_v}{461(273,15+t)} \quad \left(\frac{\text{kg vapor}}{\text{m}^3} \right)$$

- Teor de umidade

Também chamado de taxa de umidade, o teor de umidade (w) é a razão entre a massa do vapor d'água (m_v) e a massa de ar seco (m_s), presentes em determinada mistura:

$$x = \frac{m_v}{m_x} \quad \left(\frac{\text{kg vapor}}{\text{kg ar seco}} \right)$$

O teor de umidade também pode ser expresso em função da pressão parcial de vapor d'água (p_v) e a pressão total da mistura (P), conforme abaixo:

$$x = 0,62198 \frac{P_v}{P - P_v} \quad \left(\frac{\text{kg vapor}}{\text{kg ar seco}} \right)$$

- Limite de saturação

A quantidade máxima de vapor d'água que o ar pode conter, chamado de limite de saturação (w_s), é função da pressão de saturação e, conseqüentemente, da temperatura em que se encontra determinada massa de ar. Quando se atinge o limite de saturação, diz-se que o ar está saturado, portanto qualquer acréscimo de umidade se dará no estado líquido. A Tabela A.2 apresenta as quantidades máximas de vapor d'água que o ar pode conter de acordo com temperatura da mistura.

- Umidade relativa

A umidade relativa (ϕ) é a relação entre a quantidade de vapor d'água presente no ar (umidade absoluta – ω) e a quantidade máxima que o ar poderia conter (limite de saturação – W_s) em determinada temperatura:

$$\phi = \frac{\omega}{W_s} \times 100 \quad (\%)$$

A umidade relativa também pode ser expressa pela razão entre a pressão parcial de vapor d'água na mistura (p_v) e a pressão de saturação (p_s):

$$\phi = \frac{P_v}{P_s} \times 100 \quad (\%)$$

Por meio desta formulação fica claro que, para determinada quantidade de vapor d'água presente em uma massa de ar, a umidade relativa diminui com o aumento da temperatura (que conseqüentemente aumenta o limite de saturação) e, de maneira inversa, aumenta com o decréscimo da temperatura. Quando o ar está saturado, a umidade relativa é 100%. O valor da umidade relativa do ar nunca poderá exceder 100%.

Como exemplo, baseando-se nos dados da Tabela A.2, considera-se uma massa de ar com umidade absoluta de 10 g/m³ a uma temperatura de 20°C. Nestas condições sua umidade relativa será:

$$\phi = \frac{10}{17,3} \times 100 = 57,8 \%$$

Se esta mesma massa de ar for resfriada para 11°C, sem que se altere sua umidade absoluta, a nova umidade relativa será:

$$\phi = \frac{10}{10} \times 100 = 100 \%$$

Ou seja, o ar estaria saturado.

Caso a temperatura continuasse a baixar, além dos 11°C, o excesso de umidade no ar condensaria. Como exemplo deste fenômeno pode-se citar a formação de neblina e das nuvens.

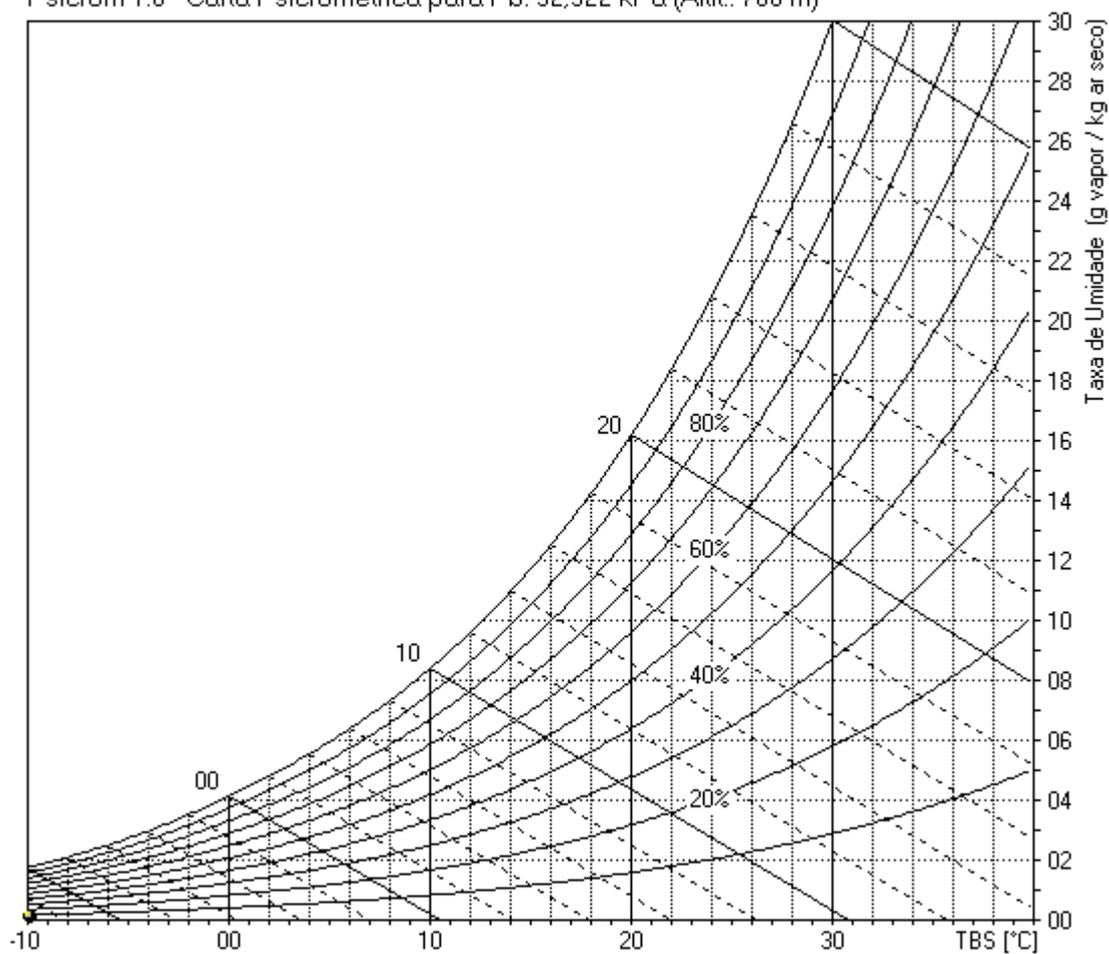
Esta temperatura limite, onde o ar encontra-se saturado, e a partir da qual ocorre condensação de umidade caso haja acréscimo de umidade do ar ou redução da temperatura, é chamada de temperatura de orvalho.

- Diagrama psicométrico

As relações entre a taxa de umidade, umidade relativa e temperatura do ar podem ser expressas por meio de um “diagrama psicométrico”. Como a taxa de umidade varia de acordo com a pressão atmosférica, locais de diferentes altitudes possuem diferentes diagramas psicométricos. Na Figura 173 está ilustrado o diagrama psicométrico à altitude 760m, correspondente à cidade de São Paulo-SP. O eixo das abcissas corresponde à temperatura do ar ambiente, o eixo das ordenadas corresponde ao teor de umidade (w), e o conjunto de curvas descreve as umidades relativas do ar (Φ) em determinadas condições.

Figura 173: Diagrama psicométrico à 760m de altitude.

Psicrom 1.0 - Carta Psicrométrica para Pb: 92,522 kPa (Altit: 760 m)



Fonte: Psicrom Software

Tabela A.1: Pressão de saturação do vapor d'água de acordo com a temperatura da mistura.

Dado de entrada: Temperatura		Dado de entrada: Pressão	
Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	Pressão (kPa)	Temperatura (°C)
0,01	0,6113	0,6113	0,01
5	0,8721	1	6,98
10	1,2276	2	17,5
15	1,7051	3	24,08
20	2,339	4	28,96
25	3,169	5	32,88
30	4,246	10	45,81
35	5,628	15	53,97
40	7,384	20	60,06
45	9,593	30	69,1
50	12,349	40	75,87
55	15,758	50	81,33
60	19,94	100	99,63
65	25,03	101,325	100
70	31,19	150	111,37
75	38,58	200	120,23
80	47,39	250	127,44
85	57,83	300	133,55
90	70,14	350	138,88
95	84,55	400	143,63
100	101,325	450	147,93

Fonte: MOREIRA (1999, p. 164;165)

Tabela A.2: Teor de saturação de acordo com a temperatura do ar.

t (°C)	Ws (g/m ³)						
-20	0,9	10	9,4	40	51,15	70	198,1
-19	0,99	11	10	41	53,8	71	206,3
-18	1,08	12	10,65	42	56,7	72	214,8
-17	1,18	13	11,35	43	59,6	73	223,6
-16	1,29	14	12,1	44	62,5	74	232,6
-15	1,405	15	12,85	45	65,4	75	241,8
-14	1,53	16	13,65	46	68,5	76	251,5
-13	1,67	17	14,5	47	71,8	77	261,5
-12	1,82	18	15,4	48	75,3	78	271,8
-11	1,98	19	16,3	49	79	79	282,4
-10	2,15	20	17,3	50	83	80	293,3
-9	2,34	21	18,35	51	87	81	304,4
-8	2,55	22	19,4	52	91	82	315,8
-7	2,77	23	20,55	53	95,2	83	327,9
-6	3,005	24	21,8	54	99,6	84	340,4
-5	3,26	25	23,05	55	104,3	85	353,4
-4	3,53	26	24,35	56	109,3	86	366,8
-3	3,82	27	25,75	57	114,4	87	380,5
-2	4,14	28	27,2	58	119,6	88	394,5
-1	4,475	29	28,7	59	124,9	89	408,8
0	4,84	30	30,35	60	130,2	90	423,5
1	5,205	31	32,05	61	135,9	91	438,8
2	5,59	32	33,85	62	141,9	92	454,6
3	5,985	33	35,7	63	148,1	93	470,8
4	6,395	34	37,65	64	154,5	94	487,4
5	6,825	35	39,6	65	161,1	95	504,5
6	7,28	36	41,7	66	167,9	96	522,1
7	7,76	37	43,9	67	175	97	540,2
8	8,27	38	46,2	68	182,4	98	558,8
9	8,82	39	48,6	69	190,1	99	578

Fonte: SEIFFERT (1970, p. 4)