

CONDENSAÇÃO EM EDIFICAÇÕES: UMA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

PIRES, Josiane Reschke³

GONZÁLEZ, Marco Aurélio Stumpf⁴

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca⁵

Data de submissão: 31/10/2021. Data de publicação: 31/12/2021.

RESUMO

A condensação superficial é um parâmetro fundamental na análise de desempenho das edificações e tem influência nos quesitos de habitabilidade e durabilidade. O objetivo deste estudo é proporcionar maior familiaridade com o tema, identificando os fatores que causam o fenômeno da condensação, aprofundando o conhecimento, através de materiais já publicados nacional e internacionalmente. Para alcançar o objetivo proposto este estudo fundamenta-se no método científico de revisão narrativa. Desta forma, pode ser classificada, em termos de natureza, como uma pesquisa básica, pois se trata de conhecimento sem a intenção de resolver lacunas teórico-práticas. Este estudo contribui para a discussão a respeito da condensação superficial e do impacto da umidade em edificações, com diferentes volumes, sistemas construtivos e climas brasileiros.

Palavras-chave: Análise higrotérmica. Condensação superficial. Umidade. Desempenho higrotérmico.

1 INTRODUÇÃO

Pouco estudada no Brasil, a condensação superficial é um parâmetro fundamental de análise de desempenho das edificações, e que influencia os quesitos de habitabilidade e durabilidade destas. (FEDORIK; HAAPALA, 2017; MEISSNER; STÖCKER; VOGELSANG, 2017; SAITO, 2017; SILVEIRA; PINTO; WESTPHAL, 2019; STARAKIEWICZ *et al.*, 2020; ZHAO; MEISSENER, 2017). A avaliação da umidade relativa interna possibilita verificar os requisitos de salubridade, qualidade do ar e durabilidade, já que a umidade afeta os sistemas construtivos e seus componentes.

³ Centro Universitário Uniftec, PPGEC

⁴ Programa de pós-graduação em engenharia civil – Unisinos, programa de pós-graduação em arquitetura – Unisinos.

⁵ Programa de pós-graduação em engenharia civil – Unisinos, programa de pós-graduação em arquitetura – Unisinos.

(BRODERICK *et al.*, 2017; GIANANGELI; DI GIUSEPPE; D’ORAZIO, 2017; GINJA *et al.*, 2012; VAN SCHIJNDEL, 2017; VASILE *et al.*, 2016).

A condensação é um fenômeno comum dentro das edificações, e está associada à umidade. Ocorre tanto pela geração excessiva de vapor de água, pelos usuários, quanto pelo clima. A condensação pode acontecer na superfície do material construtivo (condensações superficiais) ou no interior deste (condensações intersticiais).

Apesar do impacto da condensação ser menos expressivo do que outros agentes de manifestações patológicas, como as infiltrações, a umidade da condensação, a longo prazo, torna-se um problema considerável, provocando a degradação dos materiais e do desempenho térmico dos edifícios. (CAMPBELL *et al.*, 2017; NUNO *et al.*, 2018; PIHELO; KIKKAS; KALAMEES, 2016). A umidade presente dentro dos materiais aumenta a condutividade térmica destes e reduz a sua resistência térmica. Dessa forma, há uma redução do desempenho térmico dos sistemas construtivos e, em consequência, da eficiência energética da edificação. (GOMES *et al.*, 2017; SLETNES; JELLE; RISHOLT, 2017).

A condensação é consequência das escolhas de soluções construtivas inadequadas (pontes térmicas, edifícios com alta resistência térmica e altamente estanques ao ar, ou baixo isolamento térmico) e taxa de ventilação natural cada vez menor (uso do condicionamento mecânico das habitações), devendo ser analisada na fase de projeto e de construção e ao longo da vida útil da edificação.

Os estudos estrangeiros e nacionais que abordam a transferência de umidade e condensações tratam majoritariamente da análise de propriedades higrotérmicas de materiais e sistemas construtivos, do comportamento higrotérmico e de eficiência energética de edificações. Entretanto, este tema ainda é pouco estudado no Brasil.

Como a umidade proveniente do material e do meio modificam seu comportamento higrotérmico, há importância no desenvolvimento de trabalhos que possibilitem compreender o fenômeno, definir diretrizes para a elaboração e construção dos materiais e sistemas construtivos e de edificações, em vista desse agente de manifestação patológica.

A qualidade do ar interno é um fator determinante para a saúde, visto que, na maior parte do tempo, a população está em ambientes internos. Todos os grupos populacionais, especialmente os mais vulneráveis devido à idade ou ao estado de saúde, são expostos aos elementos presentes no ar interno. Um dos fatores a serem considerados é a umidade. A umidade no ambiente interno tem uma influência importante na saúde e bem-estar dos ocupantes. O nível de umidade influencia o conforto térmico e a percepção da qualidade do ar

interno, e aumenta o risco de exposição a bactérias, vírus e esporos de mofo. (EMERY *et al.*, 2019; INSTITUTE OF MEDICINE OF THE NATIONAL ACADEMIES, 2004; WHO, 2009).

A condensação é dependente de múltiplos fatores diretos e indiretos que a influenciam e que podem induzir ou reduzir o fenômeno, tais como a ventilação, produção de vapor de água e sistemas construtivos com resistência térmica alta ou resistência térmica baixa e a presença ou não de barreiras de vapor de água (ASPHAUG *et al.*, 2020; BADEMLİOĞLU; KAYNAKLI; YAMANKARADENİZ, 2018; DUARTE, 2010; SALES, 2016), além do projeto e sistemas construtivos que possuem pontes térmicas e alta estanqueidade ao ar. Assim sendo, o controle deste fenômeno apresenta dificuldades, por ser resultado de uma má escolha de sistema construtivo ou mau uso da edificação. (BARREIRA *et al.*, 2013; EMERY *et al.*, 2019; SALES, 2016). Contudo, em muitos casos, não são empregados critérios objetivos ou dados quantitativos de projeto que controlem esses fatores, sendo observado que muitos dos regulamentos internacionais são qualitativos em relação a condensação. (ASPHAUG *et al.*, 2020).

O aumento da umidade presente no material (condensação intersticial) faz com que haja um aumento da condutividade térmica, de forma que o controle da umidade é um pré-requisito para a eficiência energética. (BERARDI; NALDI, 2017). Byrne *et al.* (2016) demonstram em seu estudo que a umidade nos materiais da envolvente externa causa um maior dispêndio de energia elétrica. Portanto, é importante para o estudo da eficiência energética da edificação a análise da condensação.

Alguns trabalhos estudaram a influência da condensação nas edificações e sistemas construtivos, nos aspectos de durabilidade e habitabilidade. (FRASCA; CORNARO; SIANI, 2018; KÜNZEL, 1994; PAULA, 2017; SANTOS, 2017). Conforme estes autores, os sistemas construtivos e seus componentes são afetados pela umidade podem apresentar diversas ocorrências, como, por exemplo, a redução do isolamento térmico e o aumento da contaminação por poeira, crescimento de algas ou bolor.

O controle da umidade superficial ou intersticial de sistema construtivo é, como dito anteriormente, dependente de muitos parâmetros, principalmente do clima, projeto e composição do sistema construtivo, que variam de região para região. Por este motivo há a necessidade de desenvolver modelos higrotérmicos para a análise das variações de temperatura e umidade na envoltória das edificações (KÜNZEL; HOLM, 2009).

Os estudos realizados no Brasil que abordam o desempenho higrotérmico, publicados a partir de 2016, tratam de caracterização do desempenho higrotérmico de edificações residenciais, comerciais ou de serviços (PAULA, 2017; ZANONI *et al.*, 2020), do comportamento higrotérmico de materiais e sistemas construtivos (EYE *et al.*, 2017; SANTOS, 2017). Atualmente, não dois os trabalhos na base de dados que tratam de desenvolvimento de métodos de desempenho térmico (SILVA, 2016) e de desempenho higrotérmico, sendo que este foca em habitações de interesse social no Rio Grande do Sul e objetiva apresentar dados prescritivos para projetos (GRIGOLETTI E SATTTLER, 2010).

Já os trabalhos internacionais publicados a partir de 2016, entre outros, abordam desempenho higrotérmico de materiais e sistemas construtivos (ASPHAUG *et al.*, 2020; BAGARIĆ; BANJAD PEČUR; MILOVANOVIĆ, 2020; LEE *et al.*, 2020; MOREIRA, 2020; NGUYEN *et al.*, 2019), impacto no comportamento higrotérmico da edificação no uso de vegetação para ampliação do desempenho térmico (ANTONYOVÁ; ANTONY; KORJENIC, 2017; GHOLAMI *et al.*, 2020; ZIRKELBACH *et al.*, 2017), análise da eficiência energética através de modelos de simulação higrotérmica (LI *et al.*, 2016), retrofit de edificações históricas e desempenho higrotérmico de edificações históricas (BISENIECE *et al.*, 2017; BRÁS *et al.*, 2017; CAMPBELL *et al.*, 2017; HANSEN *et al.*, 2017; HAO *et al.*, 2020; ZHAO; MEISSENER, 2017), desempenho higrotérmico de edificações vernaculares (DJEDJIG; BELARBI; BOZONNET, 2017; HOLZHUETER; ITONAGA, 2017; IOMMI, 2018), impacto do ocupante no desempenho higrotérmico (MØLLER; DE PLACE HANSEN, 2017), e modelos climáticos para a simulação, tanto na criação dos modelos quanto na utilização de modelos de clima extremos (BARREIRA *et al.*, 2017; FANG; CHEN; WU, 2020; KOČÍ; ČERNÝ, 2017; NIK, 2017; RAAMETS *et al.*, 2017).

O objetivo deste estudo é proporcionar maior familiaridade com o tema, identificando os fatores que causam o fenômeno da condensação, aprofundando o conhecimento, através de materiais já publicados nacional e internacionalmente.

2 MÉTODO

Para alcançar o objetivo proposto este estudo fundamenta-se no método científico de revisão narrativa. Desta forma, pode ser classificada, em termos de natureza, como uma pesquisa básica, pois se trata de conhecimento sem a intenção de resolver lacunas teórico-práticas.

Portanto, apresenta-se uma síntese do conhecimento sobre a condensação e sobre a normalização sobre o tema. Procurou-se, assim, determinar as relações dos parâmetros que foram analisados na pesquisa.

O artigo faz referência ao conceito e mecanismos de transmissão das condensações intersticiais e superficiais e os parâmetros arquitetônicos ou comportamentais que o influenciam. Também se apresenta as normas técnicas nacionais e internacionais sobre o comportamento térmico e higrotérmico das edificações, focado na análise de condensação, e programas computacionais que podem ser utilizados para esta análise.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A envoltória de uma edificação possui a função de abrigo às intempéries climáticas do ambiente exterior, que produzem cargas térmica e hídricas na envoltória, conforme a Figura 1: radiação solar, chuva incidente, umidade ascensional do solo, e trocas de calor e de vapor de água entre a superfície da envolvente e o ambiente. Ou seja, temperatura, teor de água e pressão parcial de vapor de água influenciam ambas as faces da envoltória. Estas cargas higrotérmicas possuem ao longo do dia variações consideráveis, e apenas uma parte delas é transmitida para a face interna da envoltória. (ANSI/ASHRAE, 2009).

Em geral, as cargas higrotérmicas completam ciclos sobrepostos, de estações, horárias (dia/noite) e climáticas (sol/chuva). Portanto, uma avaliação exata sobre a incidência e implicações destas deve ser feita antes da construção da edificação. (KÜNZEL; HOLM, 2009). Quanto as condições climáticas externas, estas possuem padrões, em geral, repetitivos, e seus impactos na edificação podem ser avaliados através de dados climáticos representativos do sítio da edificação.

O risco de condensação superficial e intersticial e do crescimento de mofo é definido tanto pelo transporte de umidade quanto pela propriedade de capacidade absorção de umidade dos diferentes materiais construtivos que compõem a edificação. (HANSEN *et al.*, 2017; MOREIRA, 2020; VANPACHTENBEKE *et al.*, 2017).

Quanto às condições internas da edificação, estas dependem do tipo de ocupação e da forma de utilização que os usuários promovem, de forma a manter o ambiente confortável e com condições de salubridade. (KÜNZEL; HOLM, 2009; PINTO; VIEGAS; FREITAS, 2017; VALDERRAMA-ULLOA *et al.*, 2020; YOUSEFI; GHOLIPOUR; YAN, 2017). As condições internas da edificação representam uma carga higrotérmica importante para a

envoltória, principalmente pela produção de umidade no interior das edificações serem altas. As condições internas das edificações sofrem influência do comportamento dos habitantes, sendo que comumente, uma família de quatro pessoas produz em torno de dez litros de água por dia. (ANTRETTTER *et al.*, 2017; JORNE, 2010; POZAS; GONZÁLEZ, 2016).

Figura 1 - Esquema das cargas higrotérmicas que agem na parede externa e suas alterações direcionais



Fonte: Adaptada de ANSI/ASHRAE(2009)

Portanto, a própria utilização das edificações e a presença de pessoas nesta resulta na produção de vapor de água. Quando a quantidade de vapor de água extrapola o valor correspondente ao ponto de saturação, irá ocorrer a condensação das quantidades em excesso, na superfície dos sistemas construtivos ou internamente aos materiais que o compõem. (BARREIRA *et al.*, 2013; ALMEIDA E FREITAS, 2016; PINHEIRO, 2013; VASILE *et al.*, 2016).

Na fase de projeto, no Brasil, os principais critérios analisados são o desempenho da edificação e a segurança e saúde dos habitantes, conforme os requisitos da norma de desempenho – ABNT NBR 15575:2013. Contudo, apesar de não analisada, a transferência de umidade através dos materiais construtivos que compõem a edificação influencia a durabilidade dos sistemas construtivos, a qualidade do ar interno, a segurança e a saúde dos habitantes, além da eficiência energética da edificação. (KARAGIOZIS; SALONVAARA, 2001; VALDERRAMA-ULLOA *et al.*, 2020).

A presença de umidade nas edificações possui origem em vários fenômenos e pode ter mais de uma causa. Estas manifestações quando não programadas influenciam na

durabilidade da edificação, pela degradação de materiais e estruturas, e contribuem na redução da resistência térmica e aumento da condutibilidade térmica dos sistemas construtivos, além do aparecimento de mofos e bolores. (FEDORIK; HAAPALA, 2017; GOMES *et al.*, 2017; MEISSNER; STÖCKER; VOGELSANG, 2017; ZHANG; YANG; GAO, 2017).

3.1 CONCEITO DE CONDENSAÇÃO

Verificam-se condensações superficiais quando o ar entra em contato com superfícies mais frias e a umidade absoluta do ar atinge o limite de saturação para a temperatura da superfície. Portanto, depende da constituição dos elementos construtivos, do clima e da forma de comportamento do ar úmido. (KÜNZEL; HOLM, 2009)

Conforme Freitas e Pinto (1998) e Pinheiro (2013), o comportamento do ar úmido é relacionado com:

- a) Umidade absoluta: temperatura e quantidade de vapor de água que o ar consegue conter;
- b) Limite de saturação: quantidade de vapor de água que uma unidade de ar pode conter; acima desse valor, o ar não possui capacidade para absorvê-lo, condensando as quantidades em excesso;
- c) Pressão parcial: vapor de água existente por volume ou massa de ar;
- d) Pressão de saturação: pressão limite da saturação;
- e) Temperatura de orvalho: temperatura limite para um volume de ar com uma quantidade de umidade absoluta para a qual o ar se encontra saturado.

Assim, o conceito de umidade relativa exprime a relação entre a quantidade de vapor de água por unidade de ar e o limite de saturação. Ou seja, a relação de equivalência entre a pressão parcial e a pressão de saturação (KÜNZEL *et al.*, 2005).

O limite de saturação não é constante, variando conforme a temperatura. Quando fria, aumenta a umidade relativa e quando quente, há uma redução da umidade relativa. Contudo, em ambos os casos a umidade absoluta se mantém constante (CUNHA, 2009; DUARTE, 2010).

Pode-se demonstrar as relações entre a umidade absoluta, a umidade relativa e a temperatura do ar pelo diagrama psicrométrico apresentado na Figura 2. O diagrama apresenta

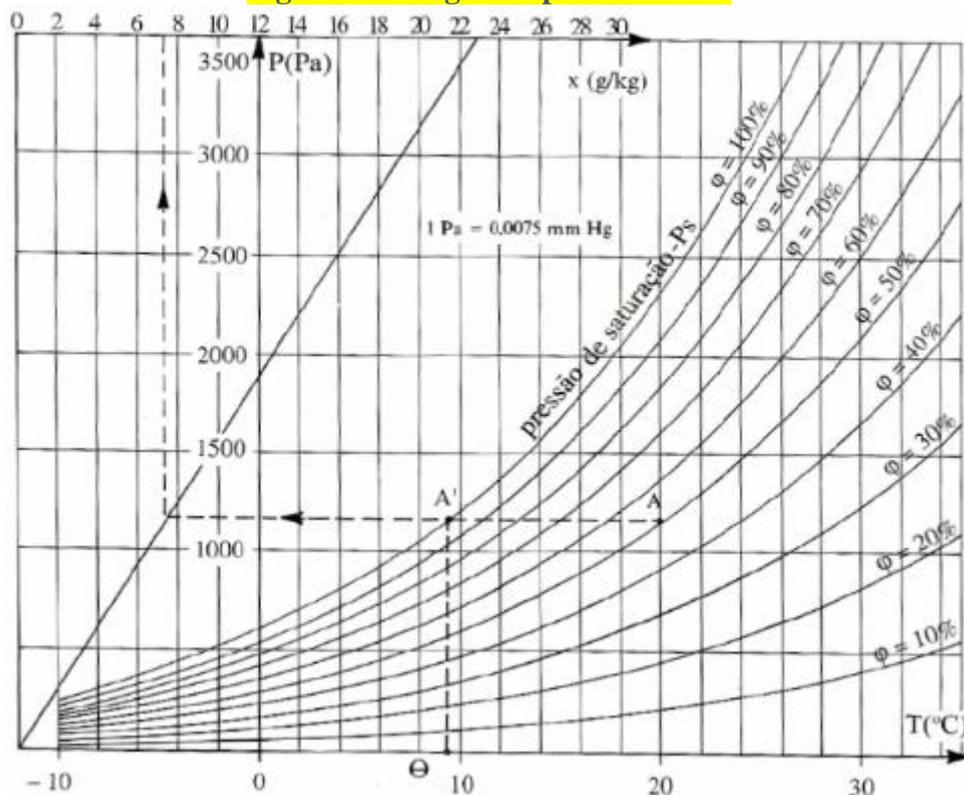
a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) nas abscissas, a umidade absoluta (g/cm^3) e da pressão de saturação (Pa) nas ordenadas e a umidade relativa (%) nas curvas (FREITAS; PINTO, 1998).

A envolvente e os sistemas internos da edificação dividem espaços com propriedades distintas e a pressão parcial de vapor de água ao longo da espessura do elemento é variável. Caso esta pressão parcial de vapor de água se iguale a pressão de saturação daquela temperatura, ocorre a condensação superficial, quando na superfície do sistema, ou condensação intersticial, se ocorre dentro do sistema construtivo (HENRIQUES, 1994).

O ar em contato com superfícies mais frias pode produzir condensação superficial, pois o valor da umidade absoluta pode exceder o limite de saturação. Sistemas construtivos com maior isolamento possuem uma baixa diferença de temperatura entre a superfície e o meio, desta forma, menor risco de condensação superficial. (BARREIRA *et al.*, 2013; ALMEIDA E FREITAS, 2016; PINHEIRO, 2013). Materiais com baixa resistência térmica tendem a apresentar maiores possibilidades de condensações superficiais, já que possuem ampla divergência entre a temperatura da superfície e o meio.

O volume da edificação também influencia no comportamento da condensação, já que, apesar da umidade externa ser a maior interferência da quantidade de umidade do ar interno, um maior volume dos ambientes dispersa melhor a umidade gerada pelo uso e usuários da edificação. (ABCB, 2014; MARTÍNEZ; SARMIENTO; URQUIETA, 2005).

Figura 2 – Diagrama psicrométrico



Fonte: Freitas e Pinto (1998)

3.1.1 Condensações superficiais

Os fatores que condicionam a umidade relativa e a difusão de vapor relacionam-se às diferentes condições climáticas no interior das edificações e, desta forma, à condensação superficial, são, segundo Pinheiro (2013), divididas em:

- a) Produção de vapor;
- b) Umidade relativa interior;
- c) Ventilação;
- d) Condições climáticas exteriores;
- e) Temperatura interior: aquecimento e orientação solar;
- f) Sistema construtivo: isolamento térmico e pontes térmicas.

A superfície interna da envolvente normalmente está a uma temperatura mais baixa que a temperatura do ambiente interno. Esta diferença de temperatura, somada a alta produção de vapor de água no interior das edificações, causa condensação superficial. O contato do ar com uma superfície mais fria aumenta a umidade relativa e ocasiona a condensação, ao atingir o limite de saturação. Sua presença será maior nos ambientes com menor isolamento térmico, como pontes térmicas, vidros e sistemas construtivos com baixa resistência térmica (HOLM; KÜNZEL; SEDLBAUER, 2003).

Em fachadas, o fenômeno depende de três fatores: (a) constituição do sistema construtivo; (b) clima local; e, (c) comportamento da umidade. Igualmente aos ambientes internos, a condensação superficial nas fachadas irá ocorrer quando o ar entra em contato com superfícies mais frias, e a umidade absoluta do ar atinge o limite de saturação. (PINHEIRO, 2013; YOU *et al.*, 2017).

3.1.2 Condensações intersticiais

A fachada das edificações constitui uma proteção contra às intempéries e uma barreira ao transporte de calor e à passagem de ar e vapor de água. A condensação intersticial em sistemas construtivos ocorre sempre que a pressão parcial do vapor de água que se transfere na parede se iguala a pressão de saturação equivale a temperatura deste ponto. Conforme as propriedades de permeabilidade ao vapor dos elementos construtivos que o vapor atravessa, a difusão acontece com maior ou menor resistência. (BARREIRA *et al.*, 2013; PINHEIRO, 2013).

Mantendo-se constantes as condições climáticas externas e internas, os fatores que atuam na condensação intersticial são as características de isolamento térmico, permeabilidade ao vapor de água dos elementos que compõem o sistema construtivo,

diferença de pressão atmosférica e fase de construção da edificação. Contudo, uma vez que os sistemas construtivos dividem ambientes com climas distintos, a difusão de vapor de água gera uma diferença de pressão parcial de vapor ao longo da espessura do material, e caso em algum dos pontos do sistema construtivo a pressão parcial de vapor igualar a pressão de saturação, acontece a condensação intersticial. (FREITAS; PINTO, 1998; KURKINEN, 2017; MØLLER *et al.*, 2017; SOUDANI *et al.*, 2016).

Normalmente, as condensações internas aos sistemas construtivos não se manifestam de forma visível, mas degradam os materiais construtivos e reduzem o desempenho térmico e eficiência energética da edificação. Como a condensação intersticial faz com que a resistência térmica dos sistemas construtivos seja reduzida e sua condutividade térmica aumentada, pode gerar ou aumentar o aparecimento de condensações superficiais. (KÜNZEL; HOLM, 2009)

3.2 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE UMIDADE

O transporte de vapor de água na fase líquida é realizado pela capilaridade, gravidade e efeito dos gradientes de pressão externos, enquanto na fase gasosa é condicionado pela difusão e convecção. Desta forma, a transferência de umidade pode ocorrer de três maneiras: (a) difusão de vapor através de uma camada de ar imóvel; (b) difusão de vapor através de materiais porosos: igual ao processo anterior, sendo que a resistência a transferência é dependente da estrutura do material; e, (c) convecção: pela pressão e temperatura o transporte de vapor de água ocorre junto ao ar (FREITAS; PINTO, 1998).

Desta forma, o transporte ocorre pela diferença de pressão, devido à diferença de concentração de vapor de água, permeabilidade ao vapor de água e as espessuras dos materiais. (HENRIQUES, 1994).

Define-se permeabilidade ao vapor de água como a quantidade de vapor de água que passa por unidade de tempo pela unidade de superfície do material. Já a permeância é a razão entre a permeabilidade ao vapor de água e a espessura de um material, enquanto a resistência à difusão é o inverso da permeância. (HENRIQUES, 1994).

A transferência de vapor de água pela envoltória pode ocorrer de três distintas formas: (a) transporte de vapor entre a face interna do sistema construtivo e o meio interno; (b) transporte de vapor através dos sistemas construtivos, proveniente da diferença de pressão parcial de vapor de água entre ambiente externo e o interno; (c) transporte de vapor entre a face externa do sistema construtivo e o meio externo. (FREITAS; PINTO, 1998).

A higrometria corresponde ao excesso de umidade no ambiente interno e é definida pela produção de vapor (ω), as renovações de ar horárias (n) e o volume do ambiente (V), conforme apresentado na Equação (1). Pode-se interpretar, portanto, o acréscimo da pressão do vapor de água no ambiente interno em comparação ao do ambiente externo e, portanto, o gradiente de pressão submetido à envolvente. (ISO, 2012). Logo, a diferença de vapor de água entre ambientes resulta na transferência de umidade entre o sistema construtivo.

$$\frac{\omega}{n \times V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1)$$

Vários modelos para avaliação teórica do transporte de umidade e temperatura em meios porosos não saturados têm sido analisados, empregando as leis de difusão de massa, com a fase líquida analisada pela lei de Darcy, a fase vapor pela lei de Fick, e de difusão de calor, através da lei de Fourier. Um dos métodos mais utilizados para análise teórica do risco de ocorrência de condensação intersticial no sistema construtivo e no estabelecimento de padrões de qualidade para os materiais construtivos é o método de Glaser, ainda que tenha seus limites e análise por regime permanente/estacionário. (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008).

A aplicação do método requer que a umidade se desloque somente por transferência de vapor de água pela difusão, a difusão de vapor de água deve obedecer à lei de Fick e a transferência de calor deve ocorrer exclusivamente por condução. Além disso, os materiais de construção devem ser estanques ao ar, não higroscópicos e devem ter faces planas e paralelas. Ainda, os coeficientes de permeabilidade ao vapor de água e de condutibilidade térmica não devem variar e não deve ocorrer a redistribuição do vapor de água condensado. (CUNHA, 2009; PINHEIRO, 2013).

O método de Glaser tem como regra que a pressão de saturação não é constante ao longo do material ou do sistema construtivo enquanto este estiver submetido a um gradiente de pressão e temperatura. Determinando-se a pressão de saturação ao longo das camadas, tem-se as curvas de pressão de saturação. São necessários para aplicar o método o conhecimento da temperatura e umidade interna e externa, as características e espessuras das camadas que compõem o sistema construtivo e a resistências térmicas superficiais. A vantagem deste método é que este possibilita um resultado gráfico simplificado. (CUNHA, 2009; PINHEIRO, 2013).

Já a norma EN ISO 13788:2012 (ISO, 2012) oferece métodos de cálculo para análise de risco de condensação superficial e de condensação intersticial dos sistemas construtivos devido à difusão de vapor de água. Contudo, não leva em consideração a umidade proveniente do solo, precipitação, umidade da construção do sistema e umidade por convecção.

Além disso, o método da EN ISO 13788:2012 também não considera os seguintes dados, que podem apresentar diferença de resultados: a correlação da condutibilidade térmica ao teor de umidade; a emissão e absorção do calor latente; a alteração das características dos materiais com o teor de umidade; a sucção capilar e a transferência de umidade interna aos materiais; a passagem do ar através de frestas ou espaços; a higroscopicidade dos materiais. (CUNHA, 2009; JORNE, 2010; PINHEIRO, 2013).

Contudo, estes métodos (Lei de Glaser e EN ISO 13788:2012) não são considerados adequados para análises higrotérmicas de edificações, visto que ambos tratam de análises em regime estacionário. Desta forma, foi criada a EN 15026:2007, que tem como objetivo a análise dos resultados derivados de simulações higrotérmicas. Conforme Jorne (2010), as ferramentas de simulação que seguem tal normativa devem analisar o sistema construtivo em regime não estacionário (variável), incluindo os fenômenos de transporte e armazenamento de calor e umidade (Quadro 1).

Quadro 1 - Eventos presentes nas equações de transferência de calor e umidade

Relacionados com o calor	Armazenamento de calor em materiais secos ou úmidos
	Transporte de calor com condutibilidade térmica dependente do teor de água presente nos materiais
	Transporte de calor latente por difusão de vapor de água com alteração de fase (evaporação de vapor/condensação)
Relacionados com a umidade	Armazenamento de umidade por adsorção e desadsorção de vapor de água e forças capilares
	Transferência de umidade por difusão de vapor de água
	Transferência de água líquida por difusão de superfície e condução capilar

Fonte: adaptado de EN15026:2007

3.3 PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NA UMIDADE

A temperatura, umidade absoluta e a pressão parcial de vapor de água são os principais parâmetros que influenciam a envoltória da edificação. A edificação pode ser

avaliada através da representação dos dados climáticos da localização da edificação. Já as condições climáticas internas dependem de vários fatores, como o tipo de ocupação do edifício, o comportamento dos usuários, as propriedades térmicas da envoltória, entre outros. (MOREIRA, 2020; PAULA, 2017; VALDERRAMA-ULLOA *et al.*, 2020).

3.3.1 Parâmetros externos

A variação da umidade relativa no interior da edificação depende da umidade absoluta e da temperatura interna. A umidade absoluta depende de umidade absoluta externa, troca de vapor com elementos internos, ventilação e produção de vapor de água devido ao uso da edificação. (DUARTE, 2010; SALES, 2016).

O controle da umidade absoluta permite a prevenção de problemas relativos ao conforto térmico, a qualidade do ar, saúde dos habitantes e degradação de materiais e sistemas construtivos.

Os fatores que controlam a temperatura interna da edificação são: produção de calor pelos habitantes e atividades; produção de calor ou frio pelos aparelhos de condicionamento de ar; ventilação; nível de desempenho térmico da envoltória; temperatura externa; e, ganhos solares. (DE PLACE HANSEN; MØLLER, 2017; FROTA; SCHIFFER, 2001; MØLLER; DE PLACE HANSEN, 2017; VALDERRAMA-ULLOA *et al.*, 2020). Desta forma, as edificações que não estão condicionadas mecanicamente têm sua temperatura variável, acompanhando a temperatura externa.

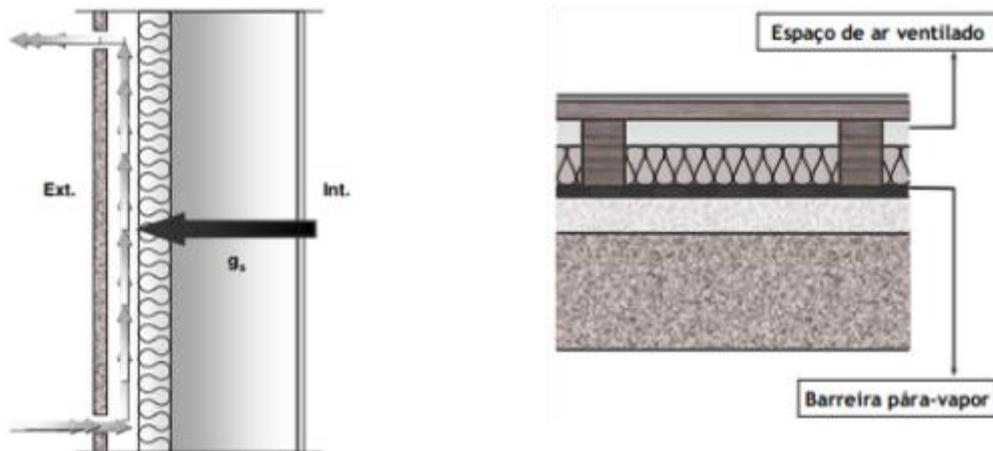
Nas edificações que possuem condicionamento ativo de ar, para gerar ambientes mais confortáveis termicamente, a edificação deve ter envoltória com alta resistência térmica e alta estanqueidade, para menor gasto de energia. Contudo, a ventilação reduzida e a umidade relativa interna levam a um maior risco de condensações superficiais. (DUARTE, 2010).

Assim, conforme Freitas e Pinto (1998) para a redução da condensação deve haver: (a) um adequado controle do clima interno dos edifícios, em relação ao aquecimento, resfriamento e ventilação dos ambientes; (b) quando o fluxo de vapor ocorre do ambiente interno para o meio externo da edificação, a resistência à difusão de vapor de água deve diminuir progressivamente, ou seja, barreiras ao vapor de água devem ser aplicadas internamente ao material de isolamento térmico (Figura 3); (c) Os espaços de ar no interior dos elementos construtivos onde pode ocorrer a acumulação de umidade devem ser ventilados

pelo lado externo das camadas de isolamento térmico e de eventuais barreiras de vapor de água (Figura 3); (d) deve-se evitar a aplicação de componentes pouco permeáveis em planos distintos do sistema construtivo, já que a secagem da umidade no meio do sistema é complicada. Conforme Li *et al.* (2016), Marincioni e Altamirano-Medina (2017), Pihelo, Kikkas e Kalamees (2016), Zhou, Derome e Carmeliet (2017) complementam que a utilização de isolantes térmicos voltados à face interna da envoltória aumenta a probabilidade de crescimento de mofo.

As condicionantes externas que se relacionam a condensação são várias e dependentes umas das outras. A influência será ampliada quanto maior for a entrada de ar externo na edificação. Segundo Marincioni e Altamirano-Medina (2017), o valor da umidade relativa interna irá baixar caso a umidade absoluta do ar externo seja menor e quando a temperatura do ar exterior seja maior que a do ar interno. Outra forma de reduzir o valor da umidade relativa do ar é usar os vãos envidraçados para aquecer o ar interno.

Figura 3 – Princípio de projeto da envoltória frente às condensações internas e superficiais



Fonte: Adaptado de Freitas e Pinto (1998)

Os fatores que afetam o nível de condensação em paredes de edificações condicionadas mecanicamente, conforme Kaczmarek e Weso (2017), em um estudo realizado em clima polonês através de simulação computacional utilizando o software WUFI® Plus com um estudo de caso em dois tipos de paredes leves, são: o tipo de material de isolamento térmico aplicado e a orientação solar e de chuva dirigida das paredes.

3.3.2 Parâmetros de uso

A produção de vapor de água interno das edificações deriva de múltiplos fatores, sendo que os relativos aos usuários são os mais importantes. Como o comportamento humano tende a ser imprevisível, há uma dificuldade na quantificação da umidade dentro de um edifício ao longo do dia. (MØLLER; DE PLACE HANSEN, 2017).

Conforme Duarte (2010), Pereira (2018), Yousefi, Gholipour e Yan (2017), a presença de pessoas, animais e plantas resulta em uma quantidade de vapor de água produzido, em relação ao número de pessoas, do tempo de permanência no ambiente e das suas atividades, como, por exemplo, o preparo de refeições, lavagem e secagem de roupa. A produção de vapor de água por atividade é apresentada no Quadro 2 e pode sofrer influência da temperatura do ambiente.

Quadro 2 – Produção de vapor de água conforme atividade

Atividade	Vapor de água (g/dia)
Pessoa	4000,00
Cozinhar (eletricidade)	2000,00
Cozinhar (gás)	3000,00
Lavar louça	400,00
Banho (por pessoa)	200,00
Lavar roupa	500,00
Secar roupa (por pessoa)	1500,00

Fonte: Duarte (2010)

A ventilação adequada do ambiente é, portanto, necessária para reduzir a quantidade de umidade absoluta e ampliar a qualidade do ar, promovendo uma umidade relativa uniforme, pois a renovação e circulação do ar realiza uma mistura de massas de ar. Os parâmetros que influenciam este processo são a umidade relativa do ar e a velocidade de circulação do ar, ambos para promover o conforto do usuário. Os ambientes e a orientação das aberturas devem ser coordenados com a direção de vento predominante. (MØLLER; DE PLACE HANSEN, 2017; MØLLER; MORELLI; HANSEN, 2019; PÉREZ, 2016; PINTO; VIEGAS; FREITAS, 2017; VASILE *et al.*, 2016).

Porém, esta estratégia não se aplica de forma igual a todas as edificações e climas, já que alguns casos, a ventilação pode acarretar um aumento do desconforto, com o aumento da umidade absoluta interna ou aquecimento da edificação. (HAGENTOFT; KALAGASIDIS,

2016; SANCHO SALAS, 2017; YOU *et al.*, 2017). Ainda, mesmo com a ventilação natural sendo realizada pelo usuário conforme requerido por regulamentos técnicos, medições indicam que ela se modifica constantemente em uma mesma edificação e em comparação com outras edificações. (MØLLER; MORELLI; HANSEN, 2019).

Conforme Duarte (2010), a ventilação deve ser permanente e ocorrer dos ambientes de permanência prolongada para os ambientes úmidos, como banheiros, cozinhas e lavanderias. No inverno, os ambientes de permanência prolongada devem ter uma renovação de ar por hora (ren/h), enquanto os demais devem ter no mínimo 4 ren/, e quando estes ambientes não estão sendo utilizados, pode ser no mínimo 2 ren/h. No verão, não há requisitos mínimos de ventilação.

A avaliação em estudo de caso em campo realizada por Pereira (2018) analisou o comportamento dos ocupantes no desempenho higrotérmico de edifícios residenciais. Os ocupantes interferem na temperatura, nível de umidade, concentração de CO₂, renovações de ar e no consumo de energia, em graus diferentes a depender da estação do ano, e que o impacto destas ações pode ficar localizadas em apenas uma região de um ambiente ou no ambiente.

3.4 SAÚDE DOS USUÁRIOS EM AMBIENTES ÚMIDOS

Conforme Emery *et al.* (2019), Institute of Medicine of the National Academies (2004) e WHO (2009), há evidências epidemiológicas suficientes para comprovar que usuários de edificações públicas e residenciais úmidas ou mofadas estão em maior risco de sintomas respiratórios, infecções respiratórias e aumento de crises asmáticas. Algumas das evidências epidemiológicas ainda sugerem ampliação do risco de rinite alérgica ou asma alérgica. Estas condições também são ampliadas com a maior quantidade de agentes microbiais em um ambiente úmido, já que estes se propagam sempre que houver água disponível.

Apesar de poucos estudos clínicos, há indícios de que a intervenção nestes ambientes para reduzir a umidade podem abrandar as reações adversas na saúde dos usuários. (EMERY *et al.*, 2019; WHO, 2009). Portanto, a seleção de uma faixa de umidade relativa do ar deve minimizar os efeitos degradantes na saúde e no conforto dos usuários enquanto reduz, tanto quanto possível, a velocidade de reações químicas e o crescimento de contaminantes biológicos (que irão impactar na qualidade da saúde e conforto dos habitantes). (ARUNDEL *et al.*, 1986; INSTITUTE OF MEDICINE OF THE NATIONAL ACADEMIES, 2004; STERLING; ARUNDEL; STERLING, 1985).

Outras evidências também sugerem que a melhor condição para a qualidade da saúde humana, para a menor quantidade de crescimento de microrganismos e a velocidade de interações

químicas, ocorrem na faixa de umidade relativa abaixo 60%, em temperatura ambiente normal. A umidade abaixo de 60% deve reduzir a maior parte de concentração de microrganismos e das concentrações no ar de formaldeído, ácido sulfúrico e dióxido de nitrogênio do ar, além de reduzir os problemas de saúde citados anteriormente. (ARUNDEL *et al.*, 1986; INSTITUTE OF MEDICINE OF THE NATIONAL ACADEMIES, 2004; STERLING; ARUNDEL; STERLING, 1985; WHO, 2009).

Deve-se considerar, entretanto, que há necessidade de que ocorra condensação superficial nas superfícies dos sistemas construtivos e móveis para estes microrganismos propagar, já que estes não se desenvolvem no ar. Portanto, para o controle do crescimento destes microrganismos as superfícies devem permanecer secas. A única exceção é a contaminação por ácaros, onde seu crescimento está diretamente relacionado a umidade relativa do ar acima de 70% dentro do seu habitat – milímetros acima de superfícies horizontais. (BAUGHMAN; ARENS, 1996).

3.5 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ASSOCIADAS À UMIDADE

Geralmente, parte das manifestações patológicas das edificações podem ser relacionadas a umidade, por condensações superficiais e intersticiais, higroscopicidade, umidade de construção, ascensional, canalizações e provenientes da água da chuva. Apesar do impacto da condensação ser menos expressivo, como das infiltrações, a umidade da condensação, a longo prazo, torna-se um problema considerável, provocando a degradação dos materiais. (CAMPBELL *et al.*, 2017; NUNO *et al.*, 2018; NASCIMENTO *et al.*, 2016; ORTOLAN *et al.*, 2015; PIHELO; KIKKAS; KALAMEES, 2016; STARAKIEWICZ *et al.*, 2020).

Conforme Henriques (1994), a umidade pode dissolver sais que eventualmente existem nas envoltórias, de fechamento dos poros dos materiais construtivos, reduzindo a permeabilidade ao vapor de água e causando o efeito de higroscopicidade. Também pode dar origem a formação de eflorescências e ou de criptoflorescências, fissuras e erosões nos revestimentos. Os sais que dão origem às eflorescências podem dar origem a fenômenos de degradação, resultantes dos aumentos de volume que acompanham sua cristalização. (FEDORIK; HAAPALA, 2017; MEISSNER; STÖCKER; VOGELSANG, 2017; SAITO, 2017; ZHAO; MEISSNER, 2017).

A condensação intersticial pode provocar o apodrecimento de materiais orgânicos, corrosão dos metais, destaque de materiais, crescimento de fungos e mofos. Portanto, o controle de umidade e análise do risco e quantidade de condensação permite impedir o surgimento de manifestações patológicas nas envoltivas e, assim, evitar posterior

necessidade de reabilitação nos edifícios já construídos. (BRÁS *et al.*, 2017; KOČÍ; ČERNÝ, 2017; SILVEIRA; PINTO; WESTPHAL, 2019).

Há alguns trabalhos que estudaram a influência da condensação nas edificações e sistemas construtivos nos aspectos de durabilidade e habitabilidade. (FANG; CHEN; WU, 2020; KÜNZEL, 1994; PAULA, 2017; SANTOS, 2017; SILVEIRA; PINTO; WESTPHAL, 2019). Conforme estes autores, os sistemas construtivos e seus componentes são afetados pela umidade podem, ainda, apresentar as ocorrências de redução do isolamento térmico, que influencia no desempenho térmico e eficiência energética da edificação, além da condensação superficial, o que irá ampliar a possibilidade de contaminação por poeira, crescimento de algas, fungos e mofo, impactando na qualidade do ar e saúde dos habitantes. Acarretam também a hidratação incompleta por secagem muito rápida e a cura retardada da cobertura de pavimentação por causa da secagem.

4 CONCLUSÃO

Ainda há poucos estudos de condensação superficial em território brasileiro, mas este é um parâmetro fundamental de análise de desempenho das edificações, influenciando a habitabilidade e durabilidade destas.

A condensação superficial é dependente de múltiplos fatores diretos e indiretos que a influenciam e que podem induzir ou reduzir o fenômeno, tais como a ventilação natural, produção de vapor de água, sistemas construtivos e projeto arquitetônico.

Por fim, o território brasileiro carece de mais estudos a respeito da influência do seu clima, das suas construções e sistemas construtivos e de seus usuários no desempenho higrotérmico e na condensação das edificações para que se possa propor uma normatização quantitativa e qualitativa da umidade.

REFERÊNCIAS

AUSTRALIAN BUILDING CODES BOARD (ABCB). **Condensation in buildings Handbook**. Canberra: ABCB, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220-1: Desempenho térmico de edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a. _____ **NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

_____. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de

Janeiro: ABNT, 2005c.

_____. **NBR 15575 - Edificações habitacionais — Desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ALMEIDA, R. M. S. F.; DE FREITAS, V. P. An insulation thickness optimization methodology for school buildings rehabilitation combining artificial neural networks and life cycle cost. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 22, n. 7, p. 915-923, 12 Jul. 2016.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **Handbook of Fundamentals**. Atlanta: ANSI/ASHRAE, 2009.

ANTONYOVÁ, A.; ANTONY, P.; KORJENIC, A. Evaluation the hygrothermal effects of integration the vegetation into the building envelope. **Energy & Buildings**, v. 136, p. 121–138, 2017.

ANTRETTTER, F. *et al.* **WUFI ® Plus 3.1 Manual**. Holzkirchen: Fraunhofer Institut für Bauphysik, 2017.

ARUNDEL, A. V. *et al.* Indirect health effects of relative humidity in indoor environments. **Environmental Health Perspectives**, v. VOL. 65, n. 3, p. 351–361, 1986.

ASPHAUG, S. K. *et al.* Moisture control strategies of habitable basements in cold climates. **Building and Environment**, v. 169, n. June 2019, 2020.

BADEMLİOĞLU, A. H.; KAYNAKLI, Ö.; YAMANKARADENİZ, N. The effect of water vapor diffusion resistance factor of insulation materials for outer walls on condensation. **Isi Bilimi Ve Teknigi Dergisi/ Journal of Thermal Science and Technology**, v. 38, n. 2, p. 15–23, 2018.

BAGARIĆ, M.; BANJAD PEČUR, I.; MILOVANOVIĆ, B. Hygrothermal performance of ventilated prefabricated sandwich wall panel from recycled construction and demolition waste – A case study. **Energy and Buildings**, 109573, v. 206, 2020.

BARREIRA, E.J.M.P.Q. *et al.* Exterior condensations on façades: numerical simulation of the undercooling phenomenon. **Journal of Building Performance Simulation**, v.6, n. 5, p. 337-345, 2013.

BARREIRA, E. *et al.* Procedures in the construction of a test reference year for Porto-Portugal and implications for hygrothermal simulation. **Sustainable Cities and Society**, v. 32, n. March, p. 397–410, 2017.

BAUGHMAN, A. V.; ARENS, E. A. Indoor humidity and human health - Part I: Literature review of health effects of humidity-influenced indoor pollutants. **ASHRAE Transactions**, v. 102, n. 1, p. 193–211, 1996.

BERARDI, U.; NALDI, M. The impact of the temperature dependent thermal conductivity of insulating materials on the effective building envelope performance. **Energy & Buildings**, v. 144, p. 262–275, 2017.

BISENIECE, E. E. *et al.* Thermal performance of internally insulated historic brick building in cold climate: A long term case study. **Energy and Buildings**, v. 152, p. 577–586, 2017.

BRÁS, A. *et al.* Performance-based methods for masonry building rehabilitation using innovative leaching and hygrothermal risk analyses. **Sustainable Cities and Society**, v. 28, p. 321–331, 2017.

BRODERICK, Á. *et al.* A pre and post evaluation of indoor air quality, ventilation, and thermal comfort in retrofitted co-operative social housing. **Building and Environment**, v. 122, p. 126–133, 2017.

BRITISH STANDARD (BS). **BS 5250 - Code of practice for control of condensation in buildings**. Londres: BSI, 2016

BYRNE, A. *et al.* Case studies of cavity and external wall insulation retrofitted under the Irish Home Energy Saving Scheme : Technical analysis and occupant perspectives. **Energy & Buildings**, v. 130, p. 420–433, 2016.

CAMPBELL, N. *et al.* Monitoring the hygrothermal and ventilation performance of retrofitted clay brick solid wall houses with internal insulation: Two UK case studies. **Case Studies in Construction Materials**, v. 7, n. nov. 2016, p. 163–179, 2017.

CUNHA, A. L. A. da. **Simulação Numérica do Comportamento Higrotérmico de Edifícios: Aplicação à Avaliação de Risco de Condições Internas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2009.

DE PLACE HANSEN, E. J.; MØLLER, E. B. Moisture supply in Danish single-family houses – the influence of building style. **Energy Procedia**, v. 132, p. 147–152, 2017.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **DIN 4108 – Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Ge-bäuden**. Berlin: DIN, 2013.

_____. **DIN 1946-4 – Raumluftechnik – Teil 4: Raumluftechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens**. Berlin: DIN, 2016.

DJEDJIG, R.; BELARBI, R.; BOZONNET, E. Experimental study of green walls impacts on buildings in summer and winter under an oceanic climate. **Energy & Buildings**, v. 150, p. 403–411, 2017.

DUARTE, J. P. S. R. F. **Condensações superficiais interiores: Avaliação do Risco**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2010.

EMERY, T. *et al.* **Toitū te kāinga toitū te ora toitū te tangata - Healthy homes, healthy people**. 1. ed. Rotorua: Toi Ohomai Institute of Technology, 2019. *E-book*.

EUROPEAN STANDARD (EN). **EN 15251 - Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics**. Brussels: EN, 2007a.

_____. **EN 15026 - Hygrothermal performance of building components and building elements. Assessment of moisture transfer by numerical simulation**. Pilsen: EN, 2007b.

EYE, F. Von *et al.* Quantificação da ação do clima na degradação de fachadas em argamassa empregando a simulação higrotérmica. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, XII, 2017, São Paulo. Anais [...]*. São Paulo: SBTA, 2017

FANG, A.; CHEN, Y.; WU, L. Transient simulation of coupled heat and moisture transfer through

multi-layer walls exposed to future climate in the hot and humid southern China area. **Sustainable Cities and Society**, v. 52, n. February 2019, p. 101812, 2020.

FEDORIK, F.; HAAPALA, A. Impact of Air-gap Design to Hygro-thermal Properties and Mould Growth Risk between Concrete Foundation and CLT Frame. **Energy Procedia**, v. 132, p. 117–122, 2017.

FRASCA, F.; CORNARO, C.; SIANI, A. M. Performance assessment of a heat and moisture dynamic simulation model in IDA ICE by the comparison with WUFI Plus. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 364, n. 012024, 2018.

FREITAS, V. P. de; PINTO, P. da S. **Permeabilidade ao vapor de materiais de construção - condensações internas**. 2. ed. LFC: FCT, 1998.

FREITAS, V. P. de; TORRES, M. I.; GUIMARÃES, A. S. **Humidade Ascensional**. Lisboa: FEUP, 2008.

FREITAS, J. M. R. *et al.* Análise da influência das pontes térmicas na simulação de eficiência energética nas paredes de edificações residenciais. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 5, n. 2, p. 24–41, 2016.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GHOLAMI, M. *et al.* A comparison of energy and thermal performance of rooftop greenhouses and green roofs in Mediterranean climate: A hygrothermal assessment in WuFi. **Energies**, v. 13, n. 8, p. 15, 2020.

GIANANGELI, A.; DI GIUSEPPE, E.; D’ORAZIO, M. Design and performance assessment of building counter-walls integrating Moisture Buffering “active” devices. **Energy Procedia**, v. 132, p. 105–110, 2017.

GINJA, J. *et al.* Qualidade do ar interior nas habitações Portuguesas. *In*: CONGRESS OF INNOVATION ON SUSTAINABLE CONSTRUCTION, 12, 2012, Aveiro. **Anais [...]**. Aveiro: CINCOs’ 12, 2012.

GOMES, M. G. *et al.* The influence of moisture content on the thermal conductivity of external thermal mortars. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 279–286, 2017.

GRIGOLETTI, G. de C.; SATTLER, M. A. Método de avaliação global de desempenho higrotérmico de habitações de interesse social para Porto Alegre - RS. **Ambiente Construído** (Online), v. 10, p. 101/8460-114, 2010.

HAGENTOFT, C.; KALAGASIDIS, A. S. Drying potential of cold attic using natural and controlled ventilation in different Swedish climates. **Procedia Engineering**, v. 146, p. 2–7, 2016.

HANSEN, T. *et al.* Material characterization models and test methods for historic building materials. **Energy Procedia**, v. 132, p. 315–320, 2017.

HAO, L. *et al.* Assessing the impact of climate change on energy retrofit of alpine historic buildings: Consequences for the hygrothermal performance. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 410, n. 1, 2020.

HENRIQUES, F. M. A. **Humidade em Paredes**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994.

HOLM, A.; KÜNZEL, H. M.; SEDLBAUER, K. the Hygrothermal Behaviour of Rooms : Combining Thermal Building Simulation and Hygrothermal Envelope Calculation. *In: (E. I. I. Conference, Org.) 2003, Eindhoven. **Building Simulation***. Eindhoven: Eighth International IBPSA Conference, 2003. p. 499–506.

HOLZHUETER, K.; ITONAGA, K. An Evaluation of WUFI-Bio to Predict Mold Growth in Straw Bale Walls in Japan. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 362, p. 357–362, 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012.

INSTITUTE OF MEDICINE OF THE NATIONAL ACADEMIES. **Damp indoor spaces and health**. 1. ed. Washington: IMNA, 2004. .

IOMMI, M. The mediterranean smart adaptive wall. An experimental design of a smart and adaptive facade module for the mediterranean climate. **Energy & Buildings**, v. 158, p. 1450–1460, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 13788:2012 - Hygrothermal performance of building components and building elements -- Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation -- Calculation methods**. Geneva: ISO, 2012.

_____. **Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. Geneva: ISO, 2005.

JORNE, F. J. F. **Análise Do Comportamento Higrotérmico De Soluções Construtivas De Paredes Em Regime Variável**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

KACZMAREK, A.; WESO, M. Factors affecting humidity conditions of a face wall layer of a heated building. **Procedia Engineering**, v. 193, p. 205–210, 2017.

KARAGIOZIS, A.; SALONVAARA, M. Hygrothermal system-performance of a whole building. **Building and Environment**, v. 36, n. 6, p. 779–787, 2001.

KOČÍ, J.; ČERNÝ, R. Effect of Weather Data Selection on Simulated Moisture and Temperature Fields in Building Envelopes in Central Europe. **Energy Procedia**, v. 132, p. 514–519, 2017.

KORJENIC, A.; ZACH, J.; HROUDOVÁ, J. The use of insulating materials based on natural fibers in combination with plant facades in building constructions. **Energy & Buildings**, v. 116, p. 45–58, 2016.

KÜNZEL, H. M. **Verfahren zur ein-und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme-und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten**. 1994. These (Doktor-Ingenieurs) – Fakultät Bauingenieur, Universität Stuttgart, Stuttgart, 1994.

- KÜNZEL, H. M. *et al.* Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope. **Solar Energy**, v. 78, n. 4, p. 554–561, 2005.
- KÜNZEL, H. M.; HOLM, A. H. Moisture Control and problem analysis of heritage constructions. *In: Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios*, 3, 2009, Porto. **Anais [...]**. Porto: PATORREB2009, 2009. p. 85–102.
- KURKINEN, K. Case Study of a Cold Attic in a Pitched Roof with Minimal Ventilation. **Energy Procedia**, v. 132, p. 466–471, 2017.
- LEE, J. *et al.* Prediction evaluating of moisture problems in light-weight wood structure: Perspectives on regional climates and building materials. **Building and Environment**, v. 168, p. 106521, 2020.
- LI, Y. *et al.* Towards energy-Efficient homes: Evaluating the hygrothermal performance of different wall assemblies through long-term field monitoring. **Energy & Buildings**, v. 121, p. 43–56, 2016.
- MARINCIONI, V.; ALTAMIRANO-MEDINA, H. Analysis of the suitability of mould growth models for the risk assessment of woodfibre internal wall insulation. **Energy Procedia**, v. 132, p. 183–188, 2017.
- MARTÍNEZ, P.; SARMIENTO, P.; URQUIETA, W. Evaluación de la humedad por condensación al interior de viviendas sociales. **Revista INVI**, v. 20, n. 55, p. 154–165, 2005.
- MEISSNER, F.; STÖCKER, E.; VOGELSANG, S. Approaches for the boundary envelope design of an enhanced façade test facility. **Energy Procedia**, v. 132, p. 369–374, 2017.
- MØLLER, E. B. *et al.* Conditions for mould growth on typical interior surfaces. **Energy Procedia**, v. 132, p. 171–176, 2017.
- MØLLER, E. B.; DE PLACE HANSEN, E. J. Moisture supply in Danish single-family houses - The influence of occupant behavior and type of room. **Energy Procedia**, v. 132, p. 141–146, 2017.
- MØLLER, E. B.; MORELLI, M.; HANSEN, T. Air change rate in ventilated attics – reality and input for simulations. *In: MATEC 2019, Prague. MATEC Web of Conferences. Prague: CESBP 2019, 2019. p. 6. Anais... . Prague: CESBP, 2019.*
- MOREIRA, L. D. N. **Avaliação de soluções cobertura: comportamento à humidade e ACV**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2020.
- NASCIMENTO, M. L. M. *et al.* Wind-driven rain incidence parameters obtained by hygrothermal simulation. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, p. 5, 2016.
- NGUYEN, C.-K. *et al.* A full-scale experimental study concerning the moisture condensation on building glazing surface. **Building and Environment**, v. 156, p. 215–224, 2019.
- NIK, V. M. Application of typical and extreme weather data sets in the hygrothermal simulation of building components for future climate – A case study for a wooden frame wall. **Energy & Buildings**, v. 154, p. 30–45, 2017.
- NUNO, M.M.R. *et al.* Indoor hygrothermal conditions and quality of life in social housing: A

comparison between two neighbourhoods. **Sustainable Cities and Society**, v. 38, p. 80-90, 2018.

ORTOLAN, V. K. *et al.* Análise da possibilidade de condensação em paredes de concreto revestidas ou não com perfis de PVC - Estudo de caso. *In*: CONPAT 2015. Lisboa: CONPAT, 2015. p. 1–8. **Anais...** Lisboa: CONPAT, 2015.

PAULA, P. R. F. de. **Avaliação Do Desempenho Higrotérmico De Casas De Gesso No Brasil**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2017.

PEREIRA, F. P. F. **Avaliação do comportamento dos ocupantes no desempenho higrotérmico em edifícios residenciais**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2018.

PÉREZ, C. A. F. Calificación ambiental de la vivienda . Estrategias de adaptabilidad higrotérmica. **Revista Electrónica Nova Scientia**, v. 8, n. 16, p. 278–312, 2016.

PIHELO, P.; KIKKAS, H.; KALAMEES, T. Hygrothermal Performance of Highly Insulated Timber-frame External Wall. **Energy Procedia**, v. 96, n. out., p. 685–695, 2016.

PINHEIRO, J. A. **Importância Do Clima Exterior E Interior Na Quantificação Do Desempenho Higrotérmico Dos Edifícios**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.

PINTO, M.; VIEGAS, J.; FREITAS, V. Performance sensitivity study of mixed ventilation systems in multifamily residential buildings in Portugal. **Energy & Buildings**, v. 152, p. 534–546, 2017.

PIRES, J. R. **Investigação da viabilidade da redução do consumo de energia elétrica em edificações residenciais através da aplicação de soluções de conforto ambiental passivo**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

POZAS, B. M.; GONZÁLEZ, F. J. N. Hygrothermal behaviour and thermal comfort of the vernacular housings in the Jerte Valley (Central System , Spain). **Energy & Buildings**, v. 130, p. 219–227, 2016.

RAAMETS, J. *et al.* Determination of hygrothermal performance of clay-sand plaster: Influence of covering on sorption and water vapour permeability. **Energy Procedia**, v. 132, p. 267–272, 2017.

SAITO, H. Application of the Wood Degradation Model to an Actual Roof Assembly subjected to Rain Penetration. **Energy Procedia**, v. 132, p. 399–404, 2017.

SALES, P. N. D. S. **Avaliação do Risco de Desenvolvimento de Bolores Simulação Numérica**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2016.

SANCHO SALAS, A. La simulación digital como herramienta para el reacondicionamiento bioclimático de edificios. **Anales de Edificación**, v. 3, n. 1, p. 32–43, 2017.

SANTOS, A. do N. dos. **Comportamento Higrotérmico De Paredes Em Gesso – Avaliação Da Adequabilidade a Zonas Climáticas Do Brasil**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –

Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2017.

SILVA, A. S. **Desenvolvimento de um método para avaliação do desempenho térmico e energético de edificações aplicando análise de incertezas e sensibilidade**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SILVEIRA, V. D. C.; PINTO, M. M.; WESTPHAL, F. S. Influence of environmental factors favorable to the development and proliferation of mold in residential buildings in tropical climates. **Building and Environment**, v. 166, p. 106421, 2019.

SLETNES, M.; JELLE, B. P.; RISHOLT, B. Feasibility study of novel integrated aerogel solutions. **Energy Procedia**, v. 132, p. 327–332, 2017.

SOUDANI, L. *et al.* Assessment of the validity of some common assumptions in hygrothermal modeling of earth based materials. **Energy & Buildings**, [S. l.], v. 116, p. 498–511, 2016.

STARAKIEWICZ, A. *et al.* Methods for determining mold development and condensation on the surface of building barriers. **Buildings**, [S. l.], v. 10, n. 1, 2020.

STERLING, E. M.; ARUNDEL, A.; STERLING, T. D. Criteria for Human Exposure To Humidity in Occupied Buildings. **ASHRAE Transactions**, v. 91, p. 611–622, 1985.

VALDERRAMA-ULLOA, C. *et al.* Indoor environmental quality in latin american buildings: A systematic literature review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 2, p. 1–19, 2020.

VAN SCHIJNDEL, A. W. M. Combining three main modeling methodologies for heat, air, moisture and pollution modeling. **Energy Procedia**, v. 132, p. 195–200, 2017.

VANPACHTENBEKE, M. *et al.* Hygrothermal behaviour of timber frame walls finished with a brick veneer cladding. **Energy Procedia**, v. 132, p. 363–368, 2017.

VASILE, V. *et al.* Indoor air quality – a key element of the energy performance of the buildings. **Energy Procedia**, v. 96, p. 277–284, 2016.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **WHO guidelines for IAQ - Dampness and Mold**. Germany: Druckpartner Moser, 2009.

YOU, S. *et al.* Study on moisture condensation on the interior surface of buildings in high humidity climate. **Building and Environment**, v. 125, p. 39–48, 2017.

YOUSEFI, F.; GHOLIPOUR, Y.; YAN, W. A study of the impact of occupant behaviors on energy performance of building envelopes using occupants ' data. **Energy & Buildings**, v. 148, p. 182–198, 2017.

ZANONI, V. A. G. *et al.* Estudo higrotérmico na autoconstrução: simulação computacional e medições em campo. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 3, p. 109–120, 2020.

ZHANG, Q.; YANG, Z.; GAO, Y. The multi-goal optimal analysis of stand-alone gas engine heat pump system with energy storage (ESGEHP) system. **Energy & Buildings**, v. 139, p. 525–534, 2017.



ZHAO, J.; MEISSENER, F. Experimental investigation of moisture properties of historic building material with hydrophobization treatment. **Energy Procedia**, v. 132, p. 261–266, 2017.

ZHOU, X.; DEROME, D.; CARMELIET, J. Hygrothermal modeling and evaluation of freeze-thaw damage risk of masonry walls retrofitted with internal insulation. **Building and Environment**, v. 125, p. 285–298, 2017.

ZIRKELBACH, D. *et al.* A hygrothermal green roof model to simulate moisture and energy performance of building components. **Energy & Buildings**, v. 145, p. 79–91, 2017.