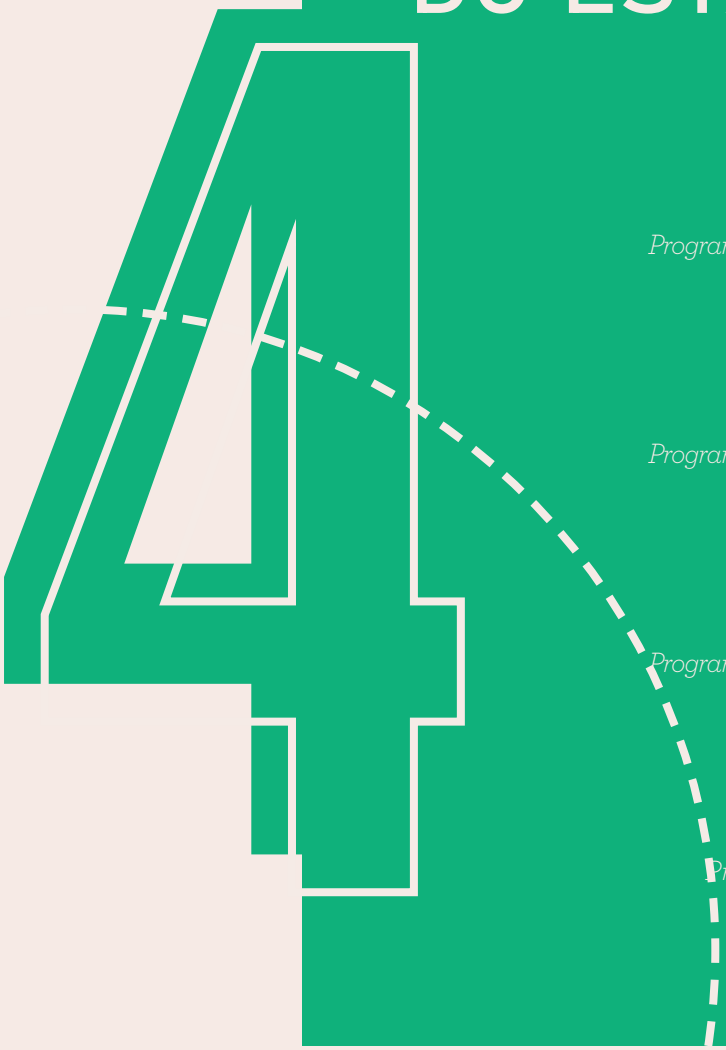
ANAIS
IV EURO ELECS
2021

ARTIGO

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES: UMA REVISÃO CRÍTICA DO ESTADO DA ARTE



LOPES, Melissa Lorrane Frazão
(melissafrazao8@gmail.com)
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC/UnB), Brasil

RODRIGUES NETO, Eduardo
(eduardo.neto@ctec.ufal.br)
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC/UnB), Brasil

CARVALHO, Michele Teresa Marques
(micheletereza@gmail.com)
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC/UnB), Brasil

CALDAS, Lucas Rosse
(lucas.caldas@fau.ufrj.br)
Programa de Engenharia Civil (PEC/COPPE/UFRJ) e FAU/UFRJ, Brasil

PALAVRAS-CHAVE:

Aquecimento global, degradação, corrosão, alvenaria, madeira.

RESUMO

Mudanças climáticas são alterações no clima ocasionadas por fatores naturais e antrópicos. Há evidências de que o clima ao redor do mundo está se modificando e interferindo no desempenho e durabilidade das construções. Desse modo, o presente artigo se propõe a realizar uma revisão do estado da arte sobre a relação das alterações climáticas com a durabilidade e os processos de degradação das construções. A partir da revisão, utilizando a plataforma de periódicos do Web of Science, restringindo a busca para os últimos 5 anos, foi possível identificar 39 artigos relevantes sobre a temática de estudo dentro de um espaço amostral de 249 artigos. Pesquisas indicam possíveis alterações de temperatura, chuvas, umidade, radiação-UV, velocidade de ventos e concentração de gases nocivos ao meio ambiente no clima futuro, podendo ocasionar problemas de durabilidade relacionados, principalmente, a risco de mofo, eflorescência, carbonatação, corrosão nas armaduras, entre outros. A pesquisa retornou um número limitado de sistemas que foram analisados, entre eles: estruturas de concreto armado, alvenaria de tijolos cerâmicos e elementos de madeira. Destaca-se que as principais pesquisas abordam estruturas de concreto armado, com foco na corrosão de armaduras ocasionada, principalmente, devido à aceleração dos processos de carbonatação e ataque por íons cloretos. O presente artigo contribui por identificar as principais variáveis que estão sendo estudadas nesta temática e quais as lacunas que precisam receber uma atenção maior dos pesquisadores. A partir dos achados deste estudo, é possível pensar em estratégias de projeto que considerem os efeitos das mudanças climáticas no processo de produção das edificações.

1. INTRODUÇÃO

Mudanças climáticas são alterações no clima em nível global, causadas tanto por causas naturais quanto, e principalmente, pela ação humana. São consideradas implicações passivas do aumento contínuo das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO_2) (MORTAGI e GOHSH, 2020), cuja principal fonte vem do uso excessivo de combustíveis fósseis e, em alguns casos, como no Brasil, de queimadas de florestas e atividades agropecuárias. Esses gases se acumulam na superfície terrestre, amplificando o chamado efeito estufa e, portanto, retendo grande parte do calor proveniente da radiação solar e, assim, provocando o aumento da temperatura média terrestre.

Conforme discutido por Lacasse *et al.* (2020), há evidências ao redor do mundo de que o clima está mudando muito mais drasticamente do que registrado no passado e a expectativa é que as mudanças no clima continuarão no futuro. Ainda segundo os autores, são esperadas mudanças nas seguintes variáveis climáticas: temperatura, precipitação, umidade, radiação solar e vento. As várias consequências dessas mudanças incluem eventos climáticos extremos, como nevascas extremas, ondas de calor, inundações e intensidades crescentes de ciclones tropicais, como furacões e tufões, e a frequência de tais eventos está aumentando rapidamente em todo o mundo (KIM *et al.*, 2017). Consequentemente, a durabilidade de estruturas e edificações é afetada, tanto pelas próprias mudanças nas variáveis climáticas, quanto pelos eventos climáticos extremos e, ainda, como resultado do aumento nas concentrações de CO_2 na atmosfera.

De acordo com o *Fifth Assessment Report* (AR5) (IPCC, 2013) o aumento da temperatura global da superfície até o final do século 21 deve exceder 2,6 a 4,8 °C em comparação com o período de 1986-2005 no cenário mais pessimista. Fang *et al.* (2020) afirmam que diferentes cenários de estudos indicam um aumento de 1,5°C a 6°C na temperatura média atmosférica até o ano de 2100. Neste contexto, as construções precisam ser projetadas para serem duráveis em cenários climáticos futuros. A durabilidade é a capacidade de um material de manter sua funcionalidade e suas características físicas ao longo do tempo, e os agentes climáticos possuem um papel importante na degradação dos elementos construtivos. De acordo com Lacasse (2020), os profissionais de construção têm a responsabilidade de levar em consideração as mudanças climáticas e o risco de perigos decorrentes de eventos extremos ao considerar o projeto de novos edifícios e a reabilitação de edifícios existentes. Por isso, a importância de se entender como as alterações climáticas futuras poderão atingir os sistemas construtivos para que ações possam ser tomadas para minimizar esse impacto.

Desta forma, o presente estudo tem como objetivos apresentar o estado da arte das pesquisas sobre a influência das alterações climáticas na durabilidade das construções, realizar uma revisão crítica dos estudos e identificar as lacunas existentes, para o direcionamento de pesquisas futuras. Como contribuição científica, apresenta os principais itens que devem receber atenção dos atores do setor da construção civil e algumas estratégias de projeto para a produção de construções mais duráveis no contexto das mudanças climáticas.

2. METODOLOGIA

Para obter o estado da arte em relação aos estudos que abordam a influência das mudanças climáticas na durabilidade de estruturas e edificações, foi realizada uma pesquisa de estudos publicados nos últimos cinco anos, utilizando a base de dados Web of Science. Foi utilizada a string: *("climate change" OR "global warming") AND ("durability" OR "degradation" OR "deterioration" OR "service life" OR "hygrothermal performance" OR "carbonation" OR "corrosion" OR "acid rain" OR "wind driven rain" OR "solar radiation") AND ("building" OR "concrete" OR "structure" OR "facade" OR "coating")), ("climate change" OR "global warming") AND ("durability" OR "degradation" OR "deterioration" OR "service life" OR "hygrothermal" OR "hygroscopic" OR "acid rain" OR "wind driven rain" OR "driving rain" OR "solar radiation" OR "insolation" OR "humidity" OR "moisture")* AND (*"building" OR "facade" OR "masonry" OR "coating" OR "cladding")),* sendo utilizado o *advanced search field tag* TS (topic), que busca pelos termos nos campos título, resumo e palavras-chave. Fez-se, então uma restrição da pesquisa para as áreas *Engineering Civil e Construction Building Technology*, a fim de se obter resultados mais relevantes dentro da área de pesquisa, além de uma restrição para a língua inglesa. A partir desses resultados, foi realizada uma análise dos artigos por título, palavras-chave e resumo. Chegando-se, ao final, no total de 39 artigos selecionados, foi realizada uma análise detalhada, por meio da leitura completa dos artigos, buscando entender o estado da arte dos estudos.

3. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES

3.1 PANORAMA GERAL

Por meio da revisão da literatura realizada, foi identificada uma quantidade muito pequena de artigos (aproximadamente 16% em relação ao total) que abordassem efetivamente a influência das mudanças climáticas na durabilidade das construções, sendo um campo de pesquisa a ser explorado. Em uma primeira análise, foram detectados diversos artigos que citam as mudanças climáticas como uma motivação para a realização de estudos com focos diversos, como a redução das emissões de CO_2 e a adaptação térmica e energética das edificações. No entanto, o foco deste trabalho foi identificar estudos que apresentassem análises diretas sobre os fatores climáticos futuros que impactarão na durabilidade de sistemas construtivos. Dessa forma, somente estes foram selecionados para uma análise mais detalhada. Destaca-se que, na maior parte dos artigos analisados, o foco estava voltado para a análise das influências das mudanças climáticas no sistema de concreto armado, Figura 1. Vale destacar que, na figura mencionada, o item "outros" se refere à sistemas de alvenaria utilizando pedras e, também, à materiais de construção que foram analisados isoladamente, sem estarem inseridos em um sistema.

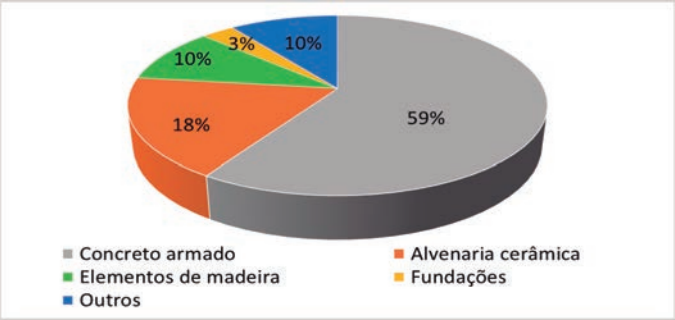


Figura 1. Quantitativo em relação aos sistemas construtivos e materiais analisados na literatura.

3.2 ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE

3.2.1 Carbonatação em estruturas de concreto armado

A maioria das pesquisas atuais sobre a influência das mudanças climáticas na durabilidade das construções são para a análise do comportamento de estruturas de concreto armado. Em boa parte desses estudos, o foco foi na análise da profundidade de carbonatação e da corrosão induzida por carbonatação. Utilizando diferentes modelos para analisar a profundidade de carbonatação em cenários futuros, grande parte das pesquisas identificou que o aumento na concentração de CO_2 na atmosfera e o aumento de temperatura serão determinantes para um aumento na profundidade de carbonatação e, consequentemente, haverá uma maior probabilidade de corrosão da armadura.

Na análise de Mizzi *et al.* (2018) foi observado um aumento na profundidade de carbonatação de até 40% até 2070, quando considerado o pior cenário climático, sendo que tanto o aumento na concentração de CO_2, quanto o aumento de temperatura contribuem para a maior degradação das estruturas. Benitez *et al.* (2019) também analisam a correlação entre dados reais de degradação e um modelo numérico de carbonatação para estruturas de concreto no Paraguai. Foi verificado que, tanto o aumento na concentração de CO_2 na atmosfera, quanto o aumento de temperatura, foram significantes para a maior profundidade de carbonatação, podendo ser esperado um aumento de 25% na carbonatação no pior cenário, em relação ao cenário de controle.

Para analisar tanto a progressão da carbonatação, quanto a vida útil de estruturas de concreto armado na África do Sul, Ekolu (2020) empregou um modelo de previsão de carbonatação natural desenvolvido por ele em um estudo anterior. Foi verificado que, para concretos de resistência normal (20-30 MPa), as profundidades de carbonatação podem aumentar em até 31%, enquanto o tempo de vida útil pode reduzir em até 24%, devido ao aumento nos níveis de CO_2 até 2100, sendo identificada também uma influência do aumento de temperatura. Segundo o autor, o uso futuro de concretos de maior resistência (maior ou igual a 40 MPa) parece

ser necessário para que esses efeitos adversos sejam evitados. Porém, essa medida precisa ser pensada cuidadosamente, pois pode promover o aumento das emissões de CO_2 devido ao maior consumo de cimento.

Wang e Lee (2019) Wang (2019a, 2019b), Lee *et al* (2019) e Wang (2020a) buscaram analisar a durabilidade de estruturas de concreto armado utilizando materiais cimentícios suplementares, como escória de alto forno e cinza volante, que possuem potencial para reduzir as emissões de CO_2. Os autores apresentam algoritmos para a escolha da mistura ideal com esses materiais, considerando modelos para resistência, durabilidade (pela profundidade de carbonatação) e trabalhabilidade, utilizando cenários climáticos futuros. No entanto, para as previsões futuras, há um aumento da profundidade de carbonatação para esses concretos compostos, tanto devido ao aumento na concentração de CO_2 na atmosfera, quanto ao aumento de temperatura, sendo necessária a utilização de uma mistura mais rica em cimento, o que representa maiores emissões de CO_2. Wang (2020b) também apresenta um estudo semelhante, mas, nesse caso, analisa tanto a profundidade de carbonatação, quanto o ingresso de íons cloreto em cenários futuros, utilizando concreto composto com escória de alto forno e cinza volante. Para a carbonatação, os resultados foram semelhantes aos demais estudos e, em relação ao ingresso de íons cloreto, houve um aumento com o aumento de temperatura em cenários futuros.

Kim *et al.* (2017) trazem uma discussão sobre a influência das condições de cura na durabilidade de estruturas de concreto armado em cenários climáticos futuros em Seul, na Coréia do Sul. Para o cenário futuro, foi observado um aumento na velocidade dos ventos, mas uma redução da exposição solar, devido à maior quantidade de chuva. Com o aumento da velocidade dos ventos, os autores identificaram uma maior profundidade de carbonatação, que foi atribuída à maior dificuldade de cura nessas condições, com maior evaporação de água, aumentando a porosidade do concreto e permitindo a entrada de CO_2 mais rápido e mais profundamente, ainda mais considerando a maior concentração de CO_2 na atmosfera.

Pakkala *et al.* (2019) estudam o efeito das mudanças climáticas na fase de propagação da corrosão induzida por carbonatação de elementos de concreto armado de fachadas de edificações da Finlândia, avaliando quatro diferentes fatores climáticos: chuva dirigida, temperatura, umidade relativa e radiação solar. Para o cenário futuro, foi identificado um aumento na concentração de CO_2, que contribuirá para o aumento da profundidade de carbonatação. Também foi verificado um aumento na velocidade dos ventos e nas cargas de chuva, além de ser identificada uma maior quantidade de chuva no lugar de neve durante o inverno, devido ao aumento da temperatura. Isso propiciará uma maior quantidade de chuvas dirigidas, o que contribuirá para uma maior corrosão das armaduras. Jiang *et al.* (2018) apresentaram um modelo numérico de carbonatação para concretos danificados por fadiga em pontes de concreto armado, considerando um estudo de caso para uma ponte em Xangai, na China. Verificou-se que aumentos drásticos na concentração de CO_2 e na temperatura podem aumentar as profundidades de carbonatação e reduzir a vida útil das pontes danificadas por fadiga.

Com os estudos, ficou evidenciado que o aumento na concentração de CO_2 na atmosfera e o aumento da temperatura são determinantes para o aumento da pro-

fundidade de carbonatação de estruturas de concreto armado. As pesquisas também foram diversas, considerando inclusive a utilização de materiais cimentícios suplementares e a ocorrência de fadiga em pontes de concreto armado, e em todos os estudos as conclusões foram semelhantes. Quanto à propagação da corrosão em concretos carbonatados, ainda não há um número suficiente de estudos que apresentem uma linha coerente dos fatores climáticos futuros influentes, sendo necessárias mais pesquisas nesse aspecto. Mas o aumento na velocidade dos ventos e o aumento de chuvas dirigidas e umidade parecem ter influência no aumento dessa corrosão.

3.2.2 Difusão e corrosão por íons cloreto em estruturas de concreto armado

Em relação aos estudos sobre difusão e corrosão por íons cloreto, a maioria dos autores verificou que o aumento de temperatura em cenários futuros contribuiu para maiores taxas de difusão de íons cloreto e, consequentemente, maior corrosão da armadura em estruturas de concreto armado.

Porém, alguns autores analisaram outros agentes. Por exemplo, em um estudo semelhante ao realizado por Kim *et al.* (2017) para a análise da profundidade de carbonatação, Kim *et al.* (2019) investigam a taxa de difusão de íons cloreto em estruturas de concreto em climas futuros, considerando as condições de cura. Também foi identificada uma maior difusão de íons cloreto com o aumento da velocidade dos ventos em cenários futuros, que dificulta a cura, provocando fissuração e maior porosidade, e facilitando a entrada do agente agressor.

Bastidas-Arteaga *et al.* (2020) analisaram o efeito do aumento de temperatura em cenários futuros em estruturas de concreto armado em três cidades francesas (Brest, Marselha e Estrasburgo). Foi observado um aumento de temperatura de 1,5°C e 3,5°C em dois cenários futuros diferentes, para as três cidades. As maiores temperaturas levaram à redução do tempo para o início da corrosão, variando entre 10 e 14% para o pior cenário. No entanto, no estudo, a umidade relativa não apresentou mudanças significativas para as cidades de Brest e Marselha e reduziu para Estrasburgo. Dessa forma, não foi possível relacionar esse agente climático à corrosão induzida por íons cloreto, sendo necessários mais estudos nesse aspecto.

Para analisar o comportamento de estruturas de concreto armado em ambiente marítimo na China, Guo *et al.* (2020) desenvolvem um modelo de análise de degradação, considerando o transporte bidimensional de cloreto e a não uniformidade de corrosão. A análise de sensibilidade mostrou que o aumento de 1°C em 50 anos pode levar a 2% de aumento na média da perda de seção e 2-8% de aumento na probabilidade de delaminação.

Xie *et al.* (2018) analisam o agravamento da corrosão por íons cloreto, devido ao aquecimento global, em pontes de concreto armado em ambiente marítimo na China. Foi verificado que o aumento da temperatura em climas futuros acelera a taxa de difusão de íons cloreto no concreto, favorecendo a corrosão do aço. Guest *et al.* (2020), Shirkhani *et al.* (2020) e Zhang *et al.* (2020) utilizam diferentes mo-

delos para analisar o tempo para iniciação da corrosão induzida por íons cloreto, considerando diversos cenários de mudanças climáticas. Shirkhani *et al.* (2020) também analisam a taxa de difusão do cloreto, o que não é abordado por Guest *et al.* (2020), pela dificuldade que esses autores tiveram de encontrar modelos para a difusão de íons cloreto em asfalto, utilizando como cobertura para os conveses de concreto armado analisados. Zhang *et al.* (2020) também não analisam a difusão de íons cloreto, mas abordam tanto a iniciação, quanto a propagação da corrosão. Nos três estudos, os autores verificaram que o aumento de temperatura em cenários futuros aumenta a deterioração das pontes de concreto armado. Guest *et al.* (2020) também identificaram a influência da umidade no início da corrosão, e Zhang *et al.* (2020) verificaram que o aumento de chuvas também foi determinante para a corrosão dos conveses.

Bastidas-Arteaga (2018) propõem um modelo estocástico que considera os efeitos combinados da corrosão induzida por cloreto, mudanças climáticas e carregamento cíclico em pontes de concreto armado. Em cenários futuros, foi observado um aumento de temperatura e um pequeno aumento de umidade relativa, o que contribuiu para o aumento da corrosão induzida por cloreto, sendo que as mudanças climáticas tiveram mais influência no ambiente marítimo. A combinação da ação dos íons cloreto com o carregamento cíclico reduziu ainda mais a vida útil das estruturas. Mortagi e Ghosh (2020) avaliam a fragilidade sísmica de pontes rodoviárias, considerando as mudanças climáticas. Os autores também verificaram que o aumento de temperatura e de umidade relativa em cenários futuros aumenta a penetração e a corrosão induzida por íons cloreto. Isso pode levar a uma redução da seção e expansão da armadura dos pilares de concreto armado, aumentando a vulnerabilidade sísmica das pontes.

Os diversos estudos sobre o ingresso e a corrosão induzida por íons cloreto, em sua maioria, identificam o aumento da temperatura em cenários futuros como fator determinante para o aumento da difusão de íons cloreto em estruturas de concreto armado. Alguns estudos também demonstraram que o aumento da umidade relativa e da quantidade de chuvas podem influenciar no aumento da propagação da corrosão. Ainda faltam mais análises sobre como as condições de cura podem influenciar para o maior ingresso de íons cloreto, como sugerido por Kim *et al.* (2019).

3.2.3 Outros sistemas construtivos e agentes de degradação

Diferente das estruturas de concreto armado, outros sistemas construtivos ainda foram pouco estudados. Os estudos existentes abordam principalmente elementos de madeira e alvenarias históricas, analisando o comportamento higrotérmico desses componentes das envoltórias de edificações em cenários futuros.

Também foi identificado um estudo (ZHOU *et al.*, 2020) que investiga sistemas de alvenaria de tijolos comum (não histórica) com isolamento térmico interno, na Suíça, considerando o risco de danos por gelo-degelo em duas cidades com climas diferentes (Zurique e Davos). Nos cenários futuros, foi identificado um aumento de temperatura e de precipitação que, quando ocorre no período frio, aumenta o risco

de ciclos gelo-degelo em Davos, cujas temperaturas no inverno estão quase sempre abaixo de 0°C. Além disso, a maior ocorrência de precipitação significa uma maior carga de chuvas dirigidas na superfície das paredes. Por outro lado, em Zurique, em que a temperatura no inverno é quase sempre acima de 0°C, o aumento de temperatura reduzirá o risco de ciclos de gelo-degelo. Portanto, o risco de danos por gelo-degelo em cenários futuros irá variar dependendo do clima de cada local.

Ainda em relação a esse tipo de deterioração, Vandemeulebroucke *et al.* (2019) e Vandemeulebroucke *et al.* (2021) analisaram alvenarias de tijolos de edificações históricas da Europa, buscando identificar se as mudanças climáticas poderiam reduzir a gravidade da ação gelo-degelo a partir de análises higrotérmicas. Vandemeulebroucke *et al.* (2019) verificaram que, em geral, o risco de gelo-degelo reduziu devido ao aumento de temperatura. Porém, em locais onde haverá aumento de chuvas dirigidas, haverá também um aumento dos ciclos de gelo-degelo. Por outro lado, Vandemeulebroucke *et al.* (2021) identificaram que a ocorrência de ciclos gelo-degelo permanecerá constante em cenários futuros para a cidade de Bruxelas (Bélgica), em que foi verificado tanto o aumento de temperatura, quando o aumento de chuvas dirigidas. No entanto, com as mudanças climáticas, os autores observaram, ainda, o aumento do crescimento de mofo e de decomposição da madeira utilizada como isolamento térmico nas paredes. Jeong e Cannon (2020) e Fang *et al.* (2020) também analisaram o aparecimento de mofo em alvenarias de tijolos devido ao aumento da umidade relativa e mostraram que o risco de deterioração é ainda mais agravado devido a porosidade intrínseca do material analisado.

Cavalagli *et al.* (2019) também estudam a deterioração de edificações históricas em climas futuros, mas dessa vez é analisada uma edificação em alvenaria de pedra calcária na Itália. Os autores verificaram que o aumento de temperatura e, principalmente, o aumento de chuva ao longo dos anos tem aumentado a escamação das pedras das fachadas. E, além disso, a tendência é de que os processos de percolação e incrustação, além do crescimento de agentes biológicos, como fungos, vegetações e crostas sobre a superfície das pedras, continuem aumentando em cenários futuros.

Outro estudo relacionado a edificações históricas é o de Hao *et al.* (2020), que buscam analisar a influência das mudanças climáticas no desempenho higrotérmico de edifícios históricos em Tirol do Sul, na Itália, após a realização de *retrofit* com o acréscimo de isolamento térmico às paredes. Foram consideradas paredes de alvenaria de pedra (granito ou arenito), com revestimento em cal, e paredes de madeira. Com a simulação higrotérmica, foi verificado que, em cenários futuros, haverá um aumento do risco de mofo em paredes de granito com painéis isolantes de fibra de madeira e em paredes de madeira com qualquer um dos três tipos de isolamento considerados. E, além disso, haverá um maior risco de danos por congelamento em paredes de arenito e no revestimento externo em cal. Conforme identificado pelos autores, o acréscimo de isolamento térmico dificulta a capacidade de secagem das paredes e, com o acréscimo de chuvas em climas futuros, há um aumento da deterioração.

Quanto aos estudos sobre a degradação de elementos de madeira, Choids *et al.* (2020) analisam uma edificação histórica da Noruega com paredes em tora de

madeira e Defo e Lacasse (2021) avaliam paredes maciças de madeira em cinco cidades do Canadá, ambos utilizando simulação higrotérmica. Os autores identificaram que, em cenários futuros, o aumento de temperatura e da quantidade de chuvas terão impacto sobre um maior risco de mofo nas paredes de madeira.

Lacasse *et al.* (2020) apresentam uma análise mais geral sobre a durabilidade de edificações, considerando as mudanças climáticas no Canadá, e relatam a necessidade de que os projetos especifiquem materiais que se adequem às maiores temperaturas e maiores quantidades de chuvas dirigidas em climas futuros. Em relação aos componentes de envoltória das edificações, percebe-se que os estudos foram realizados considerando apenas países de clima frio, sendo urgente a análise de construções em climas tropicais, que possuem comportamento climático e sistemas construtivos bastante diferentes. As considerações sobre o risco de danos por gelo-degelo evidenciam a necessidade de análises realizadas localmente para a avaliação do comportamento das construções em climas futuros. Para as edificações em madeira, é interessante que sejam realizados mais estudos, levando em consideração os cenários climáticos apresentados pelo IPCC (2013). Além disso, a maioria dos estudos está voltada para a avaliação de edificações históricas, sendo necessárias mais pesquisas envolvendo sistemas construtivos de edificações atuais, considerando, por exemplo, revestimentos cerâmicos.

Finalmente, com base na literatura pesquisada, foi elaborado a estrutura apresentada na Figura 2, que resume, de forma simplificada, o efeito das mudanças climáticas relacionada à degradação e à durabilidade das construções e como é possível pensar em estratégias de projeto.

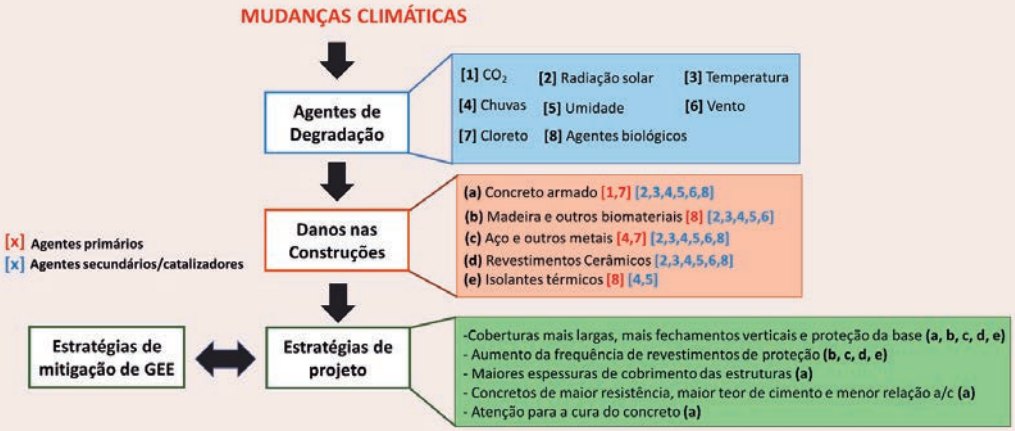


Figura 2. Efeito das mudanças climáticas na durabilidade das construções e estratégias de projeto.

A figura 2 ressalta os principais agentes de degradação e a relação com os danos nas construções, com base nos principais materiais encontrados. Os agentes foram divididos em dois grupos: primários (os principais responsáveis pela degradação) e secundários ou catalizadores, que aceleram o processo. A partir dessa associação, é possível pensar em estratégias de projeto que devem estar alinhadas a soluções de baixo carbono, para auxiliar na mitigação das emissões de GEE. Percebe-se que uma estratégia relativamente simples e bastante difundida no ensino de arquitetu-

ra e de projeto de edificações é uma boa proteção da edificação, incluindo a cobertura (beirais largos), fechamentos verticais (peles, elementos de sombreamento, etc.), esquadrias (uso de peitoris, pingadeiras) e da base e fundação (com atenção especial para a impermeabilização). Todas as questões levantadas precisam começar a ser incorporadas e receber uma maior atenção das normas técnicas e dos códigos de construção.

3.3 IDENTIFICAÇÃO DE LACUNAS

A partir do estudo realizado, foi possível identificar e pontuar aspectos que necessitam ser mais trabalhados e aprofundados, de modo a trazer contribuições científicas e técnicas no que se refere à relação das alterações climáticas com a durabilidade dos sistemas construtivos. Pode-se citar:

- Verificar o comportamento climático futuro em climas tropicais e seus efeitos na durabilidade das edificações;
- Abordar a durabilidade de fachadas em revestimento cerâmico sob a influência das alterações climáticas em diferentes ambientes;
- Estudar os efeitos que mudanças na taxa de temperatura, chuva, velocidade do vento e gases atmosféricos podem provocar nos materiais de construção que compõem os sistemas;
- Necessidade de explorar mais nas pesquisas a modelação numérica em relação ao comportamento dos sistemas em climas futuros;
- Abordar como alterações no vento, temperatura, exposição a raios – UV e gases tóxicos influenciam na durabilidade de concretos com diferentes condições de cura;
- Considerar nas pesquisas os cenários atuais apresentados pelo Painel Governamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2013);
- Necessidade de mais estudos sobre como as condições de cura podem afetar a carbonatação e o ingresso de íons cloreto em estruturas de concreto armado;
- Abordar a durabilidade de metais e tintas sob influência das alterações futuras do clima;
- Focar em questões relacionadas a estratégias de prevenir e corrigir os eventuais processos de degradação acelerada;
- Pensar em estratégias de intervenção e adaptação alinhadas com diretrizes de mitigação dos GEE (evitando o aumento desses gases na atmosfera);
- Maior relação dos achados científicos com a implementação prática na forma de normas técnicas e códigos de construção.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a pesquisa realizada, foi possível observar uma maior tendência de estudo da durabilidade de estruturas de concreto armado em climas futuros, incluindo elementos de concreto armado de pontes. Essa preocupação é justificável, levando em consideração que o concreto armado é um dos materiais mais utilizados no mundo e a degradação nesses sistemas pode levar ao colapso de toda a construção.

No entanto, também há uma necessidade de se entender o comportamento de elementos da envoltória de edificações em climas futuros, que também estão diretamente expostas aos agentes climáticos. Nesse aspecto, os estudos ainda são limitados, abordando principalmente alvenarias de edificações históricas e elementos de madeira, sendo necessárias mais pesquisas em outros sistemas construtivos utilizados atualmente. Particularmente, foi identificada a ausência de estudos em países de clima tropical, onde existe um grande déficit habitacional e seria interessante que os projetos das novas construções já considerassem questões relativas às mudanças climáticas.

Avançar nessa temática de estudo faz-se necessário, tendo em vista a possibilidade de melhorar os projetos, especificações e técnicas construtivas, e fazer escolhas corretas dos materiais utilizados, de modo a prolongar a vida útil das edificações. Além disso, permite refletir em como as ações antrópicas estão influenciando nas mudanças climáticas que, por consequência, afetam a durabilidade dos sistemas e a qualidade de vida dos usuários dessas construções.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bastidas-Arteaga, E. (2018). Reliability of Reinforced Concrete Structures Subjected to Corrosion-Fatigue and Climate Change. Int. J. Concr. Struct. Mater., v. 12, n. 10.

Bastidas-Arteaga, E.; Soueidy, C.; Amiri, O. (2020). Polynomial chaos expansion for lifetime assessment and sensitivity analysis of reinforced concrete structures subjected to chloride ingress and climate change. Structural Concrete, v. 21, p. 1396-1407.

Benitez, P.; Rodrigues, F.; Talukdar, S.; Gavilán, S.; Varum, H. (2019). Analysis of correlation between real degradation data and a carbonation model for concrete structures. Cement and Concrete Composites, v. 95, p. 247-259.

Cavalagli, N.; Kita, A.; Castaldo, M. L.; Pisello, A. L.; Ubertini, F. (2019). Hierarchical environmental risk mapping of material degradation in historic masonry buildings: An integrated approach considering climate change and structural damage. Construction and Building Materials, v. 215, p. 998–1014.

Choids, P.; Tsikaloudaki, K.; Kraniotis, D. (2020). Hygrothermal performance of log walls in a building of 18th century and prediction of climate change impact on biological Deterioration. E3S Web of Conferences, v. 172.

Defo, M.; Lacasse, M. A. (2021). Effects of Climate Change on the Moisture Performance of Tallwood Building Envelope. Buildings, v. 11, n. 35.

Ekolu, S. O. (2020). Implications of global CO_2 emissions on natural carbonation and service lifespan of concrete infrastructures – Reliability analysis. Cement and Concrete Composites, v. 114.

Fang, A.; Chen, Y.; Wu, L. (2020). 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.

Guest, G.; Zhang, J.; Atadero, R.; Shirkhani, H. (2020). Incorporating the Effects of Climate Change into Bridge Deterioration Modeling: The Case of Slab-on-Girder Highway Bridge Deck Designs across Canada. J. Mater. Civ. Eng., v. 32, n. 7.

Guo, H.; Dong, Y.; Gu, X. (2020). Durability assessment of reinforced concrete structures considering global warming: A performance-based engineering and experimental approach. Construction and Building Materials, v. 233.

Hao, L. Herrera, D.; Troi, A.; Petitta, M.; Matiu, M.; Del Pero, C. (2020). Assessing the impact of climate change on energy retrofit of alpine historic buildings: consequences for the hygrothermal Performance. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, v. 410.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2013). Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Jeong, D.; Cannon, A. J. (2020). Projected changes to moisture loads for design and management of building exteriors over Canada. Building and Environment, v. 170.

Jiang, C.; Gu, X.; Huang, Q.; Zhang, W. (2018). Carbonation depth predictions in concrete bridges under changing climate conditions and increasing traffic loads. Cement and Concrete Composites, v. 93, p. 140-154.

Kim, T.; Choi, S.; Choi, J.; Kim, J. J. (2019). Prediction of Chloride Penetration Depth Rate and Diffusion Coefficient Rate of Concrete from Curing Condition Variations due to Climate Change Effect. Int. J. Concr. Struct. Mater., v. 13: 15.

Kim, T.; Choi, S.; Kim, J. J.; Chu, Y.; Yu, E. (2017). Performance Based Evaluation of Carbonation Resistance of Concrete According to Various Curing Conditions from Climate Change Effect. International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 11, n. 4, p. 687–700.

Lacasse, M. A.; Gaur, A.; Moore, T. V. (2020). Durability and Climate Change—Implications for Service Life Prediction and the Maintainability of Buildings. Buildings, v. 10, n. 53.

Lee, H.; Lim, S.; Wang, X. (2019). Optimal Mixture Design of Low-CO_2 High-Volume Slag Concrete Considering Climate Change and CO_2 Uptake. Int. J. Concr. Struct. Mater., v. 13:56.

Mizzi, B.; Wang, Y.; Borg, R. P. (2018). Effects of climate change on structures; analysis of carbonation-induced corrosion in Reinforced Concrete Structures in Malta. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, v. 442.

Mortagi, M.; Ghosh, J. (2020). Climate Change Considerations for Seismic Vulnerability Assessment of Aging Highway Bridges. ASCE-ASME J. Risk Uncertainty Eng. Syst., v. 6, n. 1.

Pakkala, T. A.; Kolio, A.; Lahdensivu, J.; Pentti, M. (2019). Predicted corrosion rate on outdoor exposed concrete structures. International Journal of Building Pathology and Adaptation, v. 37, n. 5, p. 679-698.

Shirkhani, H.; Zhang, J.; Lounis, Z. (2020). Ensemble Analysis of Climate-Change Impacts on Design-Service Life of Reinforced Concrete Bridge Decks across Canada. Nat. Hazards Rev., v. 21, n. 3.

Vandemeulebroucke, I.; Calle, K.; Caluwaerts, S.; De Kock, T. (2019). Does historic construction suffer or benefit from the urban heat island effect in Ghent and global warming across Europe? Can. J. Civ. Eng., v. 46, p. 1032–1042.

Vandemeulebroucke, I.; Caluwaerts, S.; Van Den Bossche, N. (2021). Factorial Study on the Impact of Climate Change on Freeze-Thaw Damage, Mould Growth and Wood Decay in Solid Masonry Walls in Brussels. Buildings, v. 11, 134.

Wang, X. (2020a). Optimal mix design of low-CO_2 blended concrete with limestone powder. Construction and Building Materials, v. 263.

Wang, X. (2020b). Impacts of climate change on optimal mixture design of blended concrete considering carbonation and chloride ingress. Front. Struct. Civ. Eng. v. 14, n. 2, p. 473-486.

Wang, X.; Lee, H. (2019). Effect of global warming on the proportional design of low CO_2 slag-blended concrete. Construction and Building Materials, v. 225, p. 1140-1151.

Xie, H.; Wang, Y.; Gong, J.; Liu, M.; Yang, X. (2018). Effect of Global Warming on Chloride Ion Erosion Risks for Offshore RC Bridges in China. KSCE Journal of Civil Engineering, v. 22, n. 9.

Zhang, Y.; Chouinard, L. E.; Power, G. J.; Tandja, C. D.; Bastien, J. (2020). Flexible decision analysis procedures for optimizing the sustainability of ageing infrastructure under climate change. Sustainable and Resilient Infrastructure, v. 5.

Zhou, X.; Carmeliet, J.; Derome, D. (2020). Assessment of risk of freeze-thaw damage in internally insulated masonry in a changing climate. Building and Environment, v. 175.

AGRADECIMENTO

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa de estudos e auxílio financeiro.