

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Thales da Silva Soares Pereira**

**Estudo dos macroclimas brasileiros e sua correlação na deterioração do  
concreto por carbonatação**

Juiz de Fora

2023

Estudo dos macroclimas brasileiros e sua correlação na deterioração do concreto  
por carbonatação

Thales da Silva Soares Pereira

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Coordenação do Curso de  
Engenharia Civil da Universidade Federal  
de Juiz de Fora, como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Construção Civil

Orientador: Profa. Dra. Maria Teresa Gomes Barbosa

Juiz de Fora

2023

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Pereira, Thales da Silva Soares.

Estudo dos macroclimas brasileiros e sua correlação na deterioração do concreto por carbonatação / Thales da Silva Soares Pereira. -- 2023.

61 p. : il.

Orientadora: Maria Teresa Gomes Barbosa  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2023.

1. Macroclima. 2. Território Brasileiro. 3. Carbonatação. 4. Durabilidade. I. Barbosa, Maria Teresa Gomes, orient. II. Título.

Estudo dos macroclimas brasileiros e sua correlação na deterioração do concreto  
por carbonatação

Thales da Silva Soares Pereira

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com a Resolução Nº 01/2018 do Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 16/ 03/ 2023

Por:



---

Prof.(a) Maria Teresa Gomes Barbosa, D.Sc (Orientadora)  
Universidade Federal de Juiz de Fora



---

Prof. Dr. Antônio Eduardo Polisseni  
Universidade Federal de Juiz de Fora



---

Eng. Sandilla Santana de Oliveira  
Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído  
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedico este trabalho aos meus pais (em especial minha mãe Leíse), irmãos (Víctor e Dandara) e avó Ana Maria que me inspiram e me auxiliaram na realização...

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar e sempre, a Deus que me susteve e me lembrava das razões por ter iniciado essa jornada, nos momentos em que tudo aparentava estar conspirando contra mim.

Agradeço também aos meus familiares que, cada qual a sua maneira, me auxiliaram nesses anos, em especial por continuarem acreditando em mim. Por fim, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e a professora Maria Teresa por terem me evidenciado a satisfação no adquirir, produzir e contribuir com conhecimento científico.

Todavia, muitas vezes o projeto não consegue antever as condições de exposição às quais a estrutura pode ser submetida, nem especificar os materiais adequados às condições do ambiente, nem mesmo compreender como a estrutura envelhecerá. (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019, p. 3)

## RESUMO

Considerando a importância do conceito de durabilidade é possível verificar a relevância tanto da influência ambiental do meio em que as construções estão ou serão inseridas, quanto do processo de manutenção como medida preventiva. Nesse contexto, o presente trabalho objetiva realizar uma análise crítica baseada nas diferentes condições ambientais existentes no território brasileiro e correlacionar os preceitos normativos brasileiros que visam assegurar a durabilidade das estruturas a fim de se evitar ou minimizar os efeitos da carbonatação, cujo risco aos materiais cimentícios consiste no favorecimento de outras anomalias, como a fissuração e a corrosão de armadura. Para tanto será efetuada uma extensa e objetiva revisão bibliográfica, nacional e internacional, em seguida, baseado nos dados obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) será efetuada uma avaliação do nível de agressividade em função de cada condição ambiental existente no Brasil. E, finalmente, será apresentada recomendações que visam prolongar a vida útil da estruturas de concreto pois os critérios normativos atuais não descrevem de forma adequada o risco que os macroclimas brasileiros oferecem quanto a carbonatação, sobretudo, em estados como Pará e Mato Grosso.

Palavras-chave: Macroclima. Território Brasileiro. Carbonatação. Durabilidade.

## **ABSTRACT**

Considering the importance of the concept of durability, it is possible to verify the relevance of both the environmental influence of the environment in which the buildings are or will be inserted, and the maintenance process as a preventive measure. In this context, the present work aims to carry out a critical analysis based on the different environmental conditions existing in the Brazilian territory and to correlate the Brazilian normative precepts that aim to ensure the durability of structures in order to avoid or minimize the effects of carbonation, whose risk to cementitious materials consists of favoring other anomalies, such as cracking and reinforcement corrosion. Therefore, an extensive and objective bibliographic review, national and international, will be carried out, then based on data obtained from the Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) will carry out an assessment of the level of aggressiveness depending on each environmental condition existing in Brazil. And, finally, recommendations will be presented that aim to prolong the useful life of concrete structures, since current normative criteria do not adequately describe the risk that Brazilian macroclimates offer in terms of carbonation, especially in states such as Pará and Mato Grosso.

Keywords: Macroclimate. Brazilian territory. Carbonation. Durability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 1  | – Processo simplificado de carbonatação no concreto armado .....   | 17 |
| Figura 2  | – Teste colorimétrico em concreto utilizando timolftaleína como indicador .....  | 18 |
| Figura 3  | – Teste colorimétrico em concreto utilizando fenolftaleína como indicador .....  | 19 |
| Quadro 1  | – Características do concreto/argamassa que influenciam na carbonatação .....  | 21 |
| Figura 4  | – Grau de carbonatação x umidade relativa (UR), segundo Sagués .....   | 23 |
| Figura 5  | – Grau de carbonatação x umidade relativa (UR) segundo Canovas .....   | 24 |
| Figura 6  | – Grau de carbonatação x umidade relativa (UR) segundo Venuat e Alexandre .....  | 24 |
| Figura 7  | – Risco de carbonatação x umidade relativa (UR) segundo CEB (1989) .....   | 25 |
| Figura 8  | – Influência da temperatura na umidade relativa e consequente impacto na carbonatação, considerando apenas as duas variáveis (ilustração simplificada) ..... | 26 |
| Figura 9  | – Taxa relativa de carbonatação em função da concentração de CO <sub>2</sub> no ambiente .....   | 27 |
| Quadro 2  | – Características do ambiente que influenciam na carbonatação .....  | 28 |
| Figura 10 | – Regiões político-administrativas do Brasil .....   | 32 |
| Figura 11 | – Sub-regiões do Nordeste .....  | 34 |
| Figura 12 | – Climas zonais ou genéticos do Brasil .....   | 38 |
| Figura 13 | – Modos de manifestações específicos do Climas Zonais brasileiros .....  | 39 |
| Quadro 3  | – Principais característica do Climas Zonais brasileiros .....   | 39 |
| Quadro 4  | – Manifestação específica anual dos macroclimas nos estados brasileiros: precipitação, umidade relativa e temperatura .....                                  | 40 |
| Figura 14 | – Classificação da influência isolada da temperatura na carbonatação .....   | 43 |
| Figura 15 | – Umidade relativa anual média (%) do Brasil .....   | 44 |
| Figura 16 | – Risco de carbonatação por faixa de umidade relativa do território brasileiro, em função de UR .....  | 45 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 17 | – Risco de carbonatação por estado brasileiro, em função de UR .....                                       | 46 |
| Figura 18 | – Emissão bruta de CO <sub>2</sub> por estado brasileiro, segundo SEEG (2021) ..                           | 47 |
| Quadro 5  | – Classes de agressividade ambiental (CAA) da ABNT NBR 6118:2014<br>.....                                  | 48 |
| Quadro 6  | – Classes de exposição em função das condições ambientais para<br>corrosão induzida por carbonatação ..... | 49 |

## LISTA DE TABELAS

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Tabela 1 | – Características territoriais brasileiras (áreas e população), segundo IBGE (BRASIL, 2019, 2021a, 2021b) ..... | 30 |
|----------|---|----|

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|       |  |
|-------|--|
| ABNT  | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                     |
| CAA   | Classe de agressividade ambiental  |
| CEB   | Comite Euro-International du Beton (antigo); Comité Européen du Béton (novo) |
| IBGE  | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                              |
| IE    | Instituto de Engenharia  |
| INMET | Instituto Nacional de Meteorologia   |
| IPCC  | Intergovernmental Panel on Climate Change                                    |
| NOAA  | National Oceanic and Atmospheric Administration                              |
| SEEG  | Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa                  |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                     |                                |
|---------------------|--------------------------------|
| $h_{\text{média}}$  | Precipitação total anual média |
| $T$                 | Temperatura                    |
| $T_{\text{média}}$  | Temperatura anual média        |
| $U; UR$             | Umidade relativa               |
| $UR_{\text{média}}$ | Umidade relativa anual média   |

## SUMÁRIO

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>13</b> |
| 1.1          | JUSTIFICATIVA .....  | 13        |
| 1.2          | OBJETIVOS .....  | 14        |
| 1.3          | METODOLOGIA .....  | 15        |
| 1.4          | ESTRUTURA DO TRABALHO .....                                      | 15        |
| <b>2</b>     | <b>CARBONATAÇÃO</b> .....  | <b>17</b> |
| 2.1          | CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....                                     | 17        |
| 2.2          | PROCESSO DE CARBONATAÇÃO .....                                   | 19        |
| 2.3          | FATORES QUE INFLUENCIAM .....                                    | 21        |
| <b>2.3.1</b> | <b>Características do concreto/argamassa</b> .....               | <b>21</b> |
| <b>2.3.2</b> | <b>Características do meio</b> .....                             | <b>22</b> |
| 2.3.2.1      | <i>Umidade relativa</i> .....                                    | 22        |
| 2.3.2.2      | <i>Temperatura</i> .....   | 22        |
| 2.3.2.3      | <i>Concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)</i> ..... | 27        |
| 2.3.2.4      | <i>Dinâmica climática</i> .....                                  | 28        |
| 2.3.2.5      | <i>Resumo das variáveis ambientais</i> .....                     | 28        |
| <b>3</b>     | <b>AS REGIÕES E CONDIÇÕES MACROCLIMÁTICAS DO BRASIL</b> .....    | <b>30</b> |
| 3.1          | A DIVISÃO DO TERRITÓRIO .....                                    | 30        |
| <b>3.1.1</b> | <b>Região Centro-Oeste</b> .....                                 | <b>33</b> |
| <b>3.1.2</b> | <b>Região Nordeste</b> .....                                     | <b>33</b> |
| <b>3.1.3</b> | <b>Região Norte</b> .....  | <b>35</b> |
| <b>3.1.4</b> | <b>Região Sudeste</b> .....                                      | <b>35</b> |
| <b>3.1.5</b> | <b>Região Sul</b> .....  | <b>36</b> |
| 3.2          | MACROCLIMAS BRASILEIROS .....                                    | 37        |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS E ANÁLISES</b> .....                               | <b>42</b> |
| 4.1          | MAPAS DE RISCO .....   | 42        |
| 4.2          | CONSIDERAÇÕES NORMATIVAS .....                                   | 48        |
| <b>5</b>     | <b>CONCLUSÃO</b> .....   | <b>52</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | <b>53</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) define durabilidade como sendo a “[...] capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante”. Por sua vez, ela define vida útil como

O período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor [...], bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais (ABNT, 2014, p. 15).

A partir dessas definições, é possível verificar a grande relevância tanto da influência ambiental do meio em que as construções estão ou serão inseridas, quanto a relevância do processo de manutenção como medida preventiva capaz de garantir a segurança dos usuários, economia com a necessidade de intervenções futuras em anomalias já em estado grave (CASTRO, 1994) e o prolongamento da vida útil das estruturas.

Na engenharia civil, entende-se por anomalia a irregularidade que se manifesta na estrutura ou em partes constituintes dela, seja suscitada, segundo a DT 001/13 DTPC (IE, 2013), por deficiências dos materiais, no projeto ou execução (*anomalias construtivas*) ou ainda pelo uso contínuo e degradação natural (*anomalias funcionais*) e que pode comprometer desde aspectos estéticos até a estabilidade e segurança.

As anomalias que podem surgir no material em questão são, segundo Emmons (1994), vazamentos, afundamentos (placas de concreto), deflexões, abrasão, fragmentação, desintegração, fissuras<sup>1</sup>, delaminação e descamação. Contudo, ao invés de serem caracterizadas por seus efeitos, as anormalidades são comumente classificadas de acordo com seu mecanismo de deterioração, posto que, para

---

<sup>1</sup> O termo fissura nesse trabalho foi usado de modo genérico para a manifestação patológica, sem fazer distinção de uma faixa tamanho da abertura em concretos, como pode ser encontrado na literatura técnica.

diferentes causas, as manifestações podem ser as mesmas e, somando-se a isso, o fato que a efetividade dos métodos de reparos depende dessa variável.

Em relação aos mecanismos, as anomalias para o concreto armado, é adotada uma classificação distinta, para o concreto e o aço (CEN, 2008). Para o primeiro, distinguem-se: ataque mecânico (sobrecarga, fadiga, impacto, explosão, abrasão, vibração, movimentação e afins), ataque químico (devido a agentes biológicos, sais, sulfatos, reações álcalis-agregado, etc.), ataque físico (dinâmica de congelamento e descongelamento, cristalização de sais nos poros, efeitos térmicos, erosão, entre outros) e devido a incêndio.

Para a armadura, corrosão: induzida por cloretos, favorecida por exposição direta da armação à atmosfera, induzida por lixiviação, induzida por mecanismos específicos existentes no processo de protensão, induzida por corrente elétrica parasita (caso raro, que pode ocorrer em estruturas próximas a campo elétrico com aterramento inexistente ou precário) e induzida pela carbonatação do concreto. Este último mecanismo, por ser o principal motivo de corrosão (RAUPACH; BÜTTNER, 2014) e estar intimamente relacionado com as condições ambientais do meio, será o foco desse trabalho.

## 1.2 OBJETIVOS

O trabalho possui como objetivo primário realizar uma análise crítica baseada nas diferentes condições ambientais existentes no território brasileiro e correlacionar os preceitos normativos brasileiros que visam assegurar a durabilidade das estruturas em concreto armado e pretendido a fim de evitar ou minimizar os efeitos da carbonatação.

Destaca-se como objetivos secundários:

- i) O estudo (revisão bibliográfica) dos fatores que contribuem para a carbonatação do concreto;
- ii) O levantamento das condições macroclimáticas das diferentes regiões político-administrativas do território brasileiro considerando os dados médios anuais de temperatura, umidade e precipitação;

- iii) Correlação entre preceitos normativos e as condições climáticas das diferentes macrorregiões;
- iv) O levantamento de dados acerca da emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) nas macrorregiões do território brasileiro;

### 1.3 METODOLOGIA

A fim de atingir o almejado será elaborada, segundo classificação e procedimentos expostos por Gil (2002), uma pesquisa de revisão bibliográfica em materiais de origem nacional e internacional, de modo a obter um reconhecimento geral da problemática da durabilidade bem como os limites recomendados para que esse critério seja assegurado as estruturas de concreto brasileiras. Após essa primeira etapa o trabalho assumirá um caráter documental amostral, posto que dados ambientais serão coletados de fontes como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e semelhantes; com o intuito de avaliar o nível de agressividade em função de cada condição ambiental existente no Brasil. Na produção de todos os mapas de autoria própria, será utilizado o programa computacional gratuito e de código aberto QGIS (SHERMAN et al., 2022) e o datum oficial SIRGAS 2000.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em 5 capítulos destinados a proporcionar um aprofundamento gradual na temática proposta, iniciando neste capítulo com uma breve explicação sobre o conceito e importância da durabilidade e vida útil na construção civil, introduz-se também as anomalias e a justificativa e métodos empregados para o estudo da carbonatação das estruturas no Brasil.

No segundo, apresenta-se a anomalia denominada carbonatação e as variáveis que impactam na sua manifestação, tendo como foco aquelas com relacionadas às condições ambientais.

No terceiro capítulo procura-se caracterizar o cenário brasileiro como um meio favorável ao desenvolvimento da carbonatação, com a modificação dos parâmetros apresentados no capítulo 2.

No quarto capítulo consolida, com recursos visuais, o exposto nos capítulos anteriores e discute-se a ferramenta normativa existente para assegurar a durabilidade das estruturas no território brasileiro, em relação aos riscos impostos pelo ambiente a esse material.

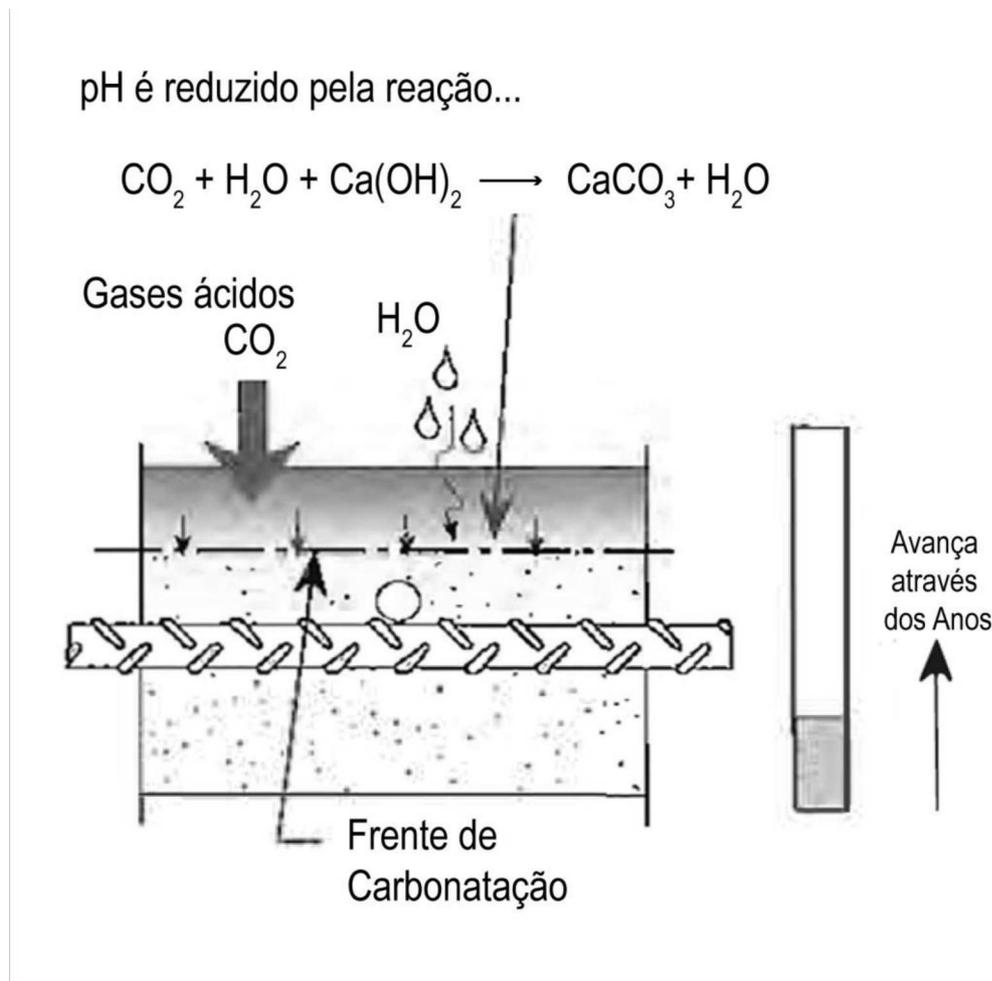
No último capítulo, sintetiza-se o discutido no decorrer do trabalho, destacando também as limitações do mesmo, além de reforçar e incentivar a aplicação prática dos resultados do capítulo 4

## 2 CARBONATAÇÃO

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A carbonatação é a reação entre os gases de características ácidas na atmosfera, a exemplo o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que penetram por difusão nos poros do concreto com o hidróxido de cálcio dissolvido em água presente nesses interstícios, conforme representado no esquema da Figura 1.

Figura 1 – Processo simplificado de carbonatação no concreto armado



Fonte: Emmons (1994).

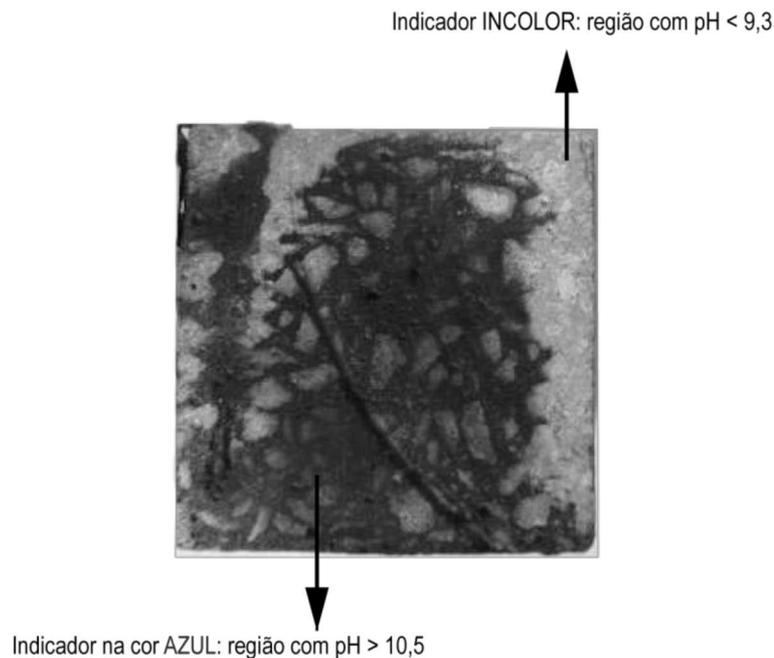
Nota: Traduzida pelo autor (2021).

Esse processo promove a redução do pH do concreto de potenciais ultrabásicos (em torno de 12,4 e 13,5 – em virtude do hidróxido de cálcio) para valores entre 11,8 e 11,5 que começam a comprometer a proteção do aço (CASCUDO, 1997), sendo crítico quando esse potencial diminui para 9, como consta na literatura.

A proteção supracitada é proveniente de um filme passivo que se forma na região próxima a armadura, na qual o nível de corrosão é praticamente imperceptível. A composição acredita-se ser de duas camadas, a externa contendo óxidos férricos e a interna contendo magnetita. A estabilidade desse filme deixa de ser garantida quando o pH do meio está abaixo de 11,5 (NAGAYAMA; COHEN, 1962, ANDRADE, 1988 *apud* MEIRA, 2017).

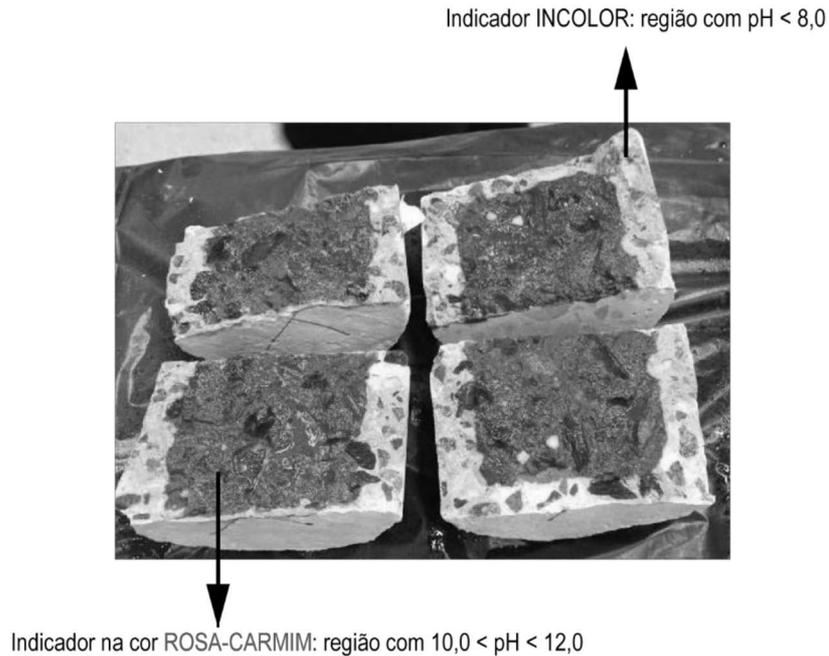
Silva (1995) cita que o avanço da carbonatação que ocorre da face exposta ao ambiente para o interior da peça (seguindo o sentido de difusão do gás), pode ser avaliado com o emprego de prismas de Nicol, para análises mais precisas ou através de soluções de timolftaleína (Figura 2) ou fenolftaleína (Figura 3), sendo essa última a mais utilizada.

Figura 2 – Teste colorimétrico em concreto utilizando timolftaleína como indicador



Fonte: Adaptado (2022) de Ribeiro, Meira, Ferreira e Barbosa (2010).

Figura 3 – Teste colorimétrico em concreto utilizando fenolftaleína como indicador



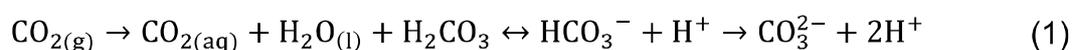
Fonte: Adaptado (2022) de Nardino, Valdés, Medeiros e Pieralisi (2019).

Segundo Emmons (1994), o processo tende a ser mais lento em concretos de boa qualidade, correspondendo a um avanço de 1 mm por ano. Ademais, para a formação da frente de carbonatação (faixa correspondente a profundidade carbonatada), é necessário a alternância entre o estado seco e úmido no material, logo, peças submersas não estão sujeitas a essa manifestação patológica.

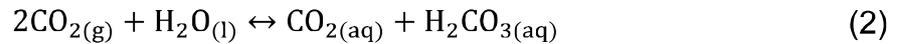
## 2.2 PROCESSO DE CARBONATAÇÃO

O processo de carbonatação pode ser simplificado, segundo Tuutti *apud* Montemor, Cunha, Ferreira e Simões (2002) e Ribeiro (2014), nas seguintes etapas:

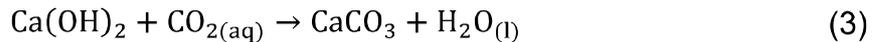
- 1) Difusão do dióxido de carbono do ambiente para o interior do concreto e dissolução na água presente nos poros, com formação do ácido carbônico -  $H_2CO_3$  (Equação 1);



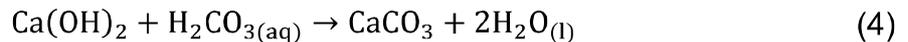
Ou, de forma resumida:



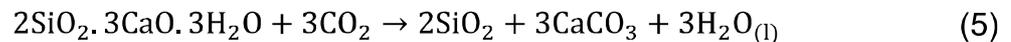
- 2)  $\text{CO}_2$  dissolvido reage com o hidróxido de cálcio (Portlandita), precipitando carbonato de cálcio, responsável pela redução do pH, conforme Equação 3;



Um modo alternativo de representar a reação acima é explicitando a ação do ácido carbônico, proposta por Dyer (2014):



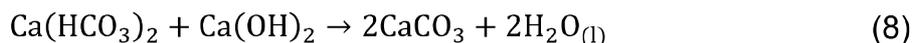
- 3) Reações com silicatos de cálcio hidratados, de acordo com a Equação 5 e aluminatos de cálcio hidratados (Equação 6);



- 4) Reação adicional que ocorre apenas na condição de presença de água e  $\text{CO}_2$  estando este em abundância (Equação 7). Caso essa etapa da degradação inicie no concreto, o pH do material é praticamente neutralizado devido a formação do bicarbonato de cálcio, logo, instaura-se um cenário de corrosão catastrófico (GONZALEZ, ALONSO, ANDRADE *apud* MONTEMOR; CUNHA; FERREIRA; SIMÕES, 2002).



Esse risco se deve ao fato dessa reação ser um processo cíclico com a Equação 8, que deve encerra-se apenas quando a cal ( $\text{CaCO}_3$ ), em sua totalidade, for consumida (CASCUDO; CARASEK, 2014).



## 2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM

Conforme Barbosa, Fontanella, Pereira e Salzani (2022) as variáveis que influenciam o surgimento, desenvolvimento e velocidade das reações da carbonatação são as características do concreto, as características do meio e o tempo.

### 2.3.1 Características do concreto/argamassa

Por características do concreto/argamassa entende-se os aspectos envolvendo todo o ciclo de projeto do mesmo, desde a concepção, seleção de materiais, execução até a manutenção. A exemplo citam-se o tipo de cimento, a relação água/cimento, tamanho dos agregados, permeabilidade e cura. Tais características e sua forma de impacto na carbonatação se encontram no Quadro 1.

Quadro 1 – Características do concreto/argamassa que influenciam na carbonatação

(continua)

| Variável                   | Modo de influência na carbonatação  |
|----------------------------|---|
| Tipo de cimento            | <ul style="list-style-type: none"> <li>cimentos sem adições e com maior teor de clínquer na composição (como CP I e CP V) previnem o desenvolvimento da anomalia, sendo que adições à mistura (a exemplo da sílica ativa e metacaulim) não interferem no comportamento frente a carbonatação (MEDEIROS; ISAIA, 2011, BARBOSA; FONTANELLA; PEREIRA; SALZANI, 2022).</li> </ul> |
| Relação água/cimento (a/c) | <ul style="list-style-type: none"> <li>para maiores valores de a/c a densidade da mistura é reduzida, favorecendo sua segregação e, como consequência, favorece a difusão do CO<sub>2</sub> (BARBOSA; FONTANELLA; PEREIRA; SALZANI, 2022).</li> </ul>   |
| Tamanho dos agregados      | <ul style="list-style-type: none"> <li>agregados com maiores dimensões favorecem a fissuração devido a maior heterogeneidade da matriz, logo, favorece a difusão do CO<sub>2</sub> (BARBOSA; SÁNCHEZ, 2015, PU <i>et al.</i>, 2021).</li> </ul>   |
| Permeabilidade             | <ul style="list-style-type: none"> <li>concretos e argamassas permeáveis possuem mais poros e interligações, facilitando assim o ingresso e difusão de água e CO<sub>2</sub>, logo, o avanço da frente de carbonatação.</li> <li>misturas permeáveis são resultado de elevados valores de a/c ou de ar incorporado, por exemplo.</li> </ul>                                   |

(conclusão)

| Variável | Modo de influência na carbonatação  |
|----------|---|
| Cura     | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ impacta na velocidade e profundidade de carbonatação. Processo de cura mal feito ou por curtos períodos de tempo promove a fissuração precoce e, conseqüentemente, favorece a admissão de CO<sub>2</sub> e maior avanço da frente de carbonatação (SILVA, 1995).</li> <li>▪ cura úmida, em especial a com formação de lâmina d'água (GEBAUER, 1987 <i>apud</i> SILVA, 1995), previne a carbonatação nas idades iniciais posto que satura os poros do material, impedindo a difusão do dióxido de carbono.</li> </ul> |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

### 2.3.2 Características do meio

Por sua vez, agrupam-se nas características do meio a umidade relativa, a temperatura do ar, a disponibilidade de dióxido de carbono na atmosfera e a dinâmica climática. Essas variáveis, diferente do que ocorre para as características do concreto/argamassa, possuem relação direta com a região geográfica e, normalmente, o projetista e o dono do empreendimento possuem pouco ou nenhum controle sobre elas. Logo, exige-se o conhecimento de seu impacto na durabilidade de modo que esse seja minimizado.

#### 2.3.2.1 Umidade relativa

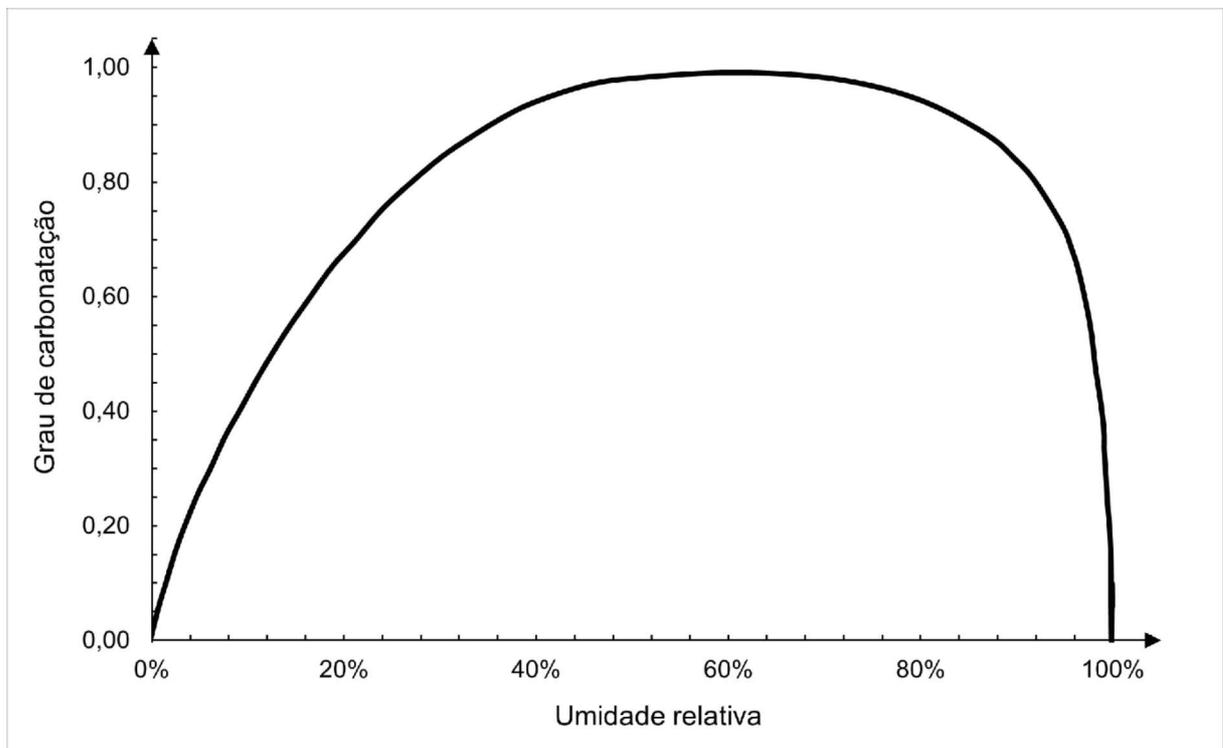
A umidade relativa (variável expressa pela letra U ou UR) é um parâmetro climatológico, expresso em porcentagem, utilizado para quantificar o teor de vapor d'água existente no ar resultante da razão, para uma dada temperatura, entre a pressão parcial do vapor e a pressão de saturação do mesmo. Tal relação entre pressões é maior à medida que a temperatura se reduz (VAREJÃO-SILVA, 2006).

No estudo da carbonatação, a umidade é um constituinte obrigatório, atuando na difusão do dióxido de carbono, contudo, possui um comportamento duplo uma vez que pode tanto promover quanto inibir o desenvolvimento da anomalia. Dyer (2014) explica que a UR como inibidor é consequência de dois fatores: valores reduzidos de UR limitam a extensão das reações de carbonatação visto que a formação do ácido carbônico depende da água (conforme visto nas Equações 1 e 2); por sua vez, para

elevados razões de UR, a quantidade de água condensada nos poros aumenta reduzindo o volume de CO<sub>2</sub> nos mesmos, dificultando a difusão e, conseqüentemente a disponibilidade do gás para as reações químicas.

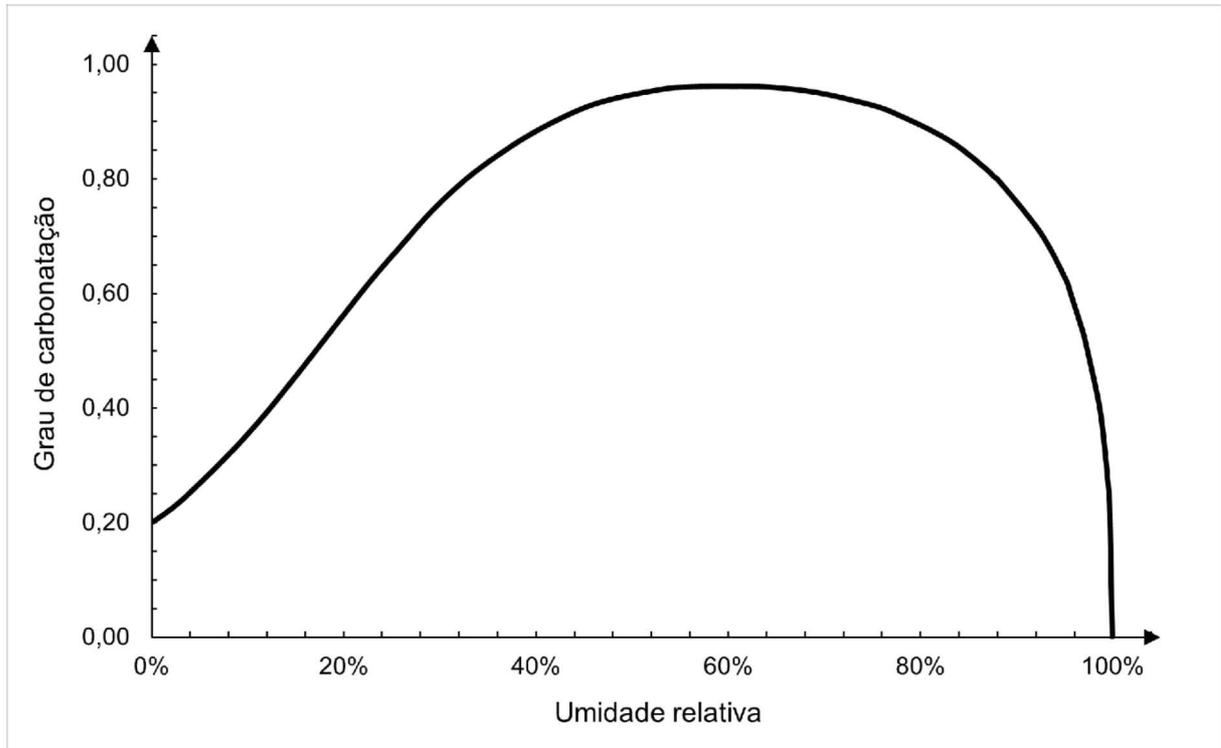
Considerando o exposto, autores pesquisaram esse fenômeno da umidade relativa em busca dos seus valores limites em relação a carbonatação, elaborando modelos que apresentam o grau de carbonatação em função da UR. Entre eles citam-se Sagués (1987 *apud* CASCUDO, 1997), cujo gráfico se encontra na Figura 4, Canovas (1977 *apud* SILVA 1995) – Figura 5 – e Venuat e Alexandre (1969 *apud* FIGUEIREDO; MEIRA, 2013) – Figura 6.

Figura 4 – Grau de carbonatação x umidade relativa (UR), segundo Sagués



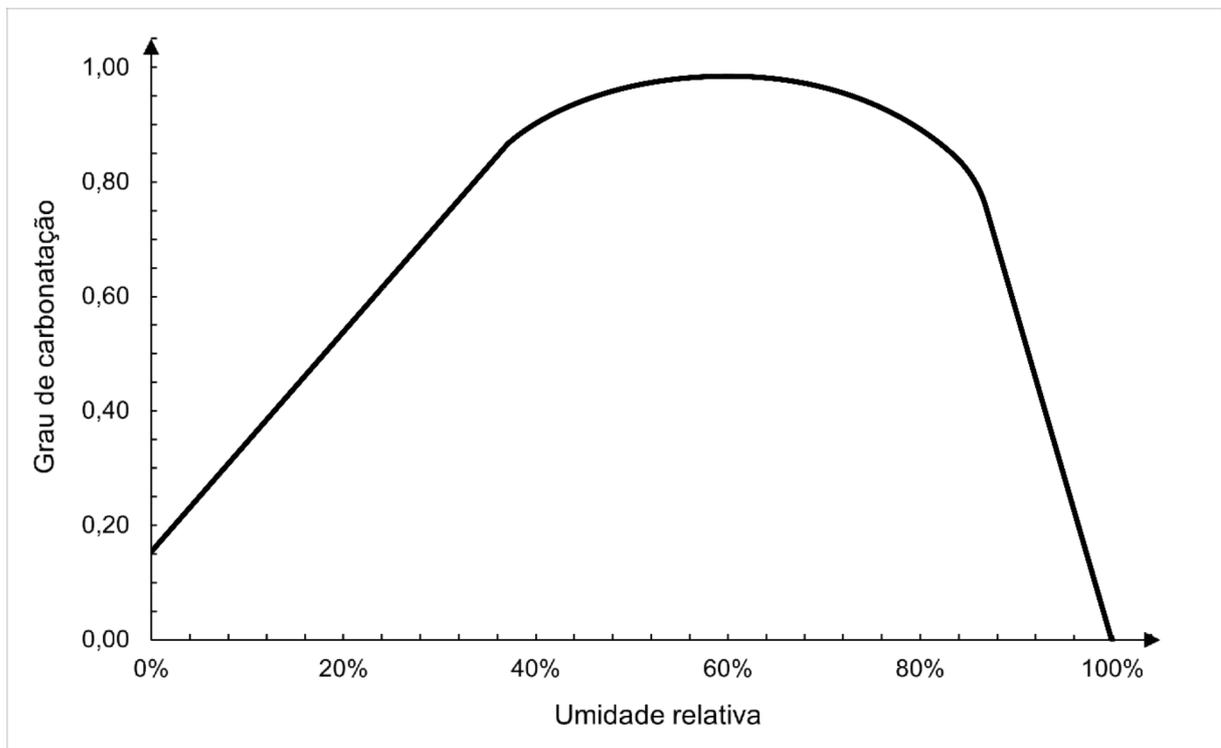
Fonte: Adaptado (2022) de Sagués (1987 *apud* CASCUDO, 1997).

Figura 5 – Grau de carbonatação x umidade relativa (UR) segundo Canovas



Fonte: Adaptado (2022) de Canovas (1977 *apud* SILVA 1995).

Figura 6 – Grau de carbonatação x umidade relativa (UR) segundo Venuat e Alexandre

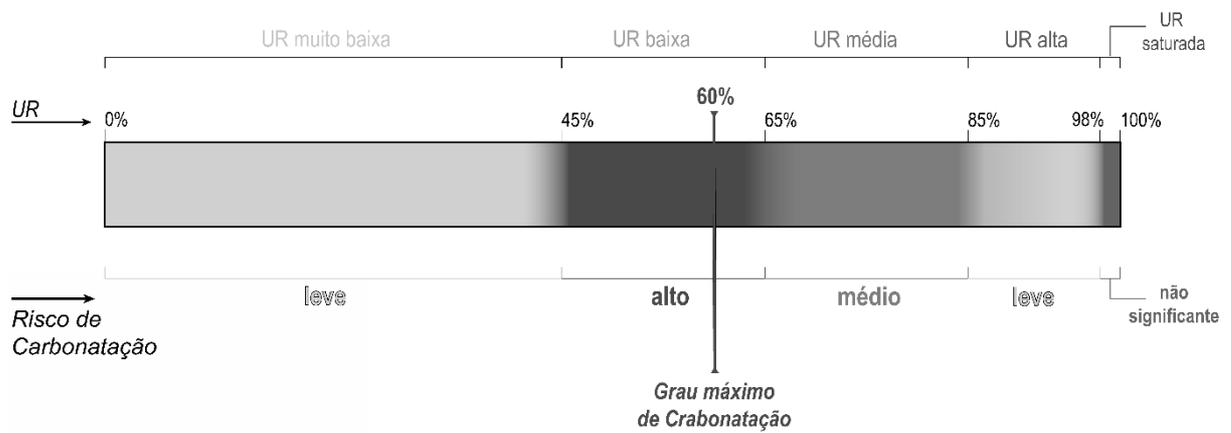


Fonte: Adaptado (2022) de Venuat e Alexandre (1969 *apud* FIGUEIREDO; MEIRA, 2013).

Embora haja divergência nos modelos, em especial no grau de carbonatação para ambientes com umidade muito baixa, nota-se que consentem no fato de o grau de carbonatação é máximo quando UR atinge a marca de 60%.

Outra forma de relacionar a anomalia com a umidade é através do risco de carbonatação. O Comitê Euro-International Du Béton – CEB (1989) apresenta uma proposta qualitativa para tal relação, a qual foi adaptada na forma visual da Figura 7.

Figura 7 – Risco de carbonatação x umidade relativa (UR) segundo CEB (1989)

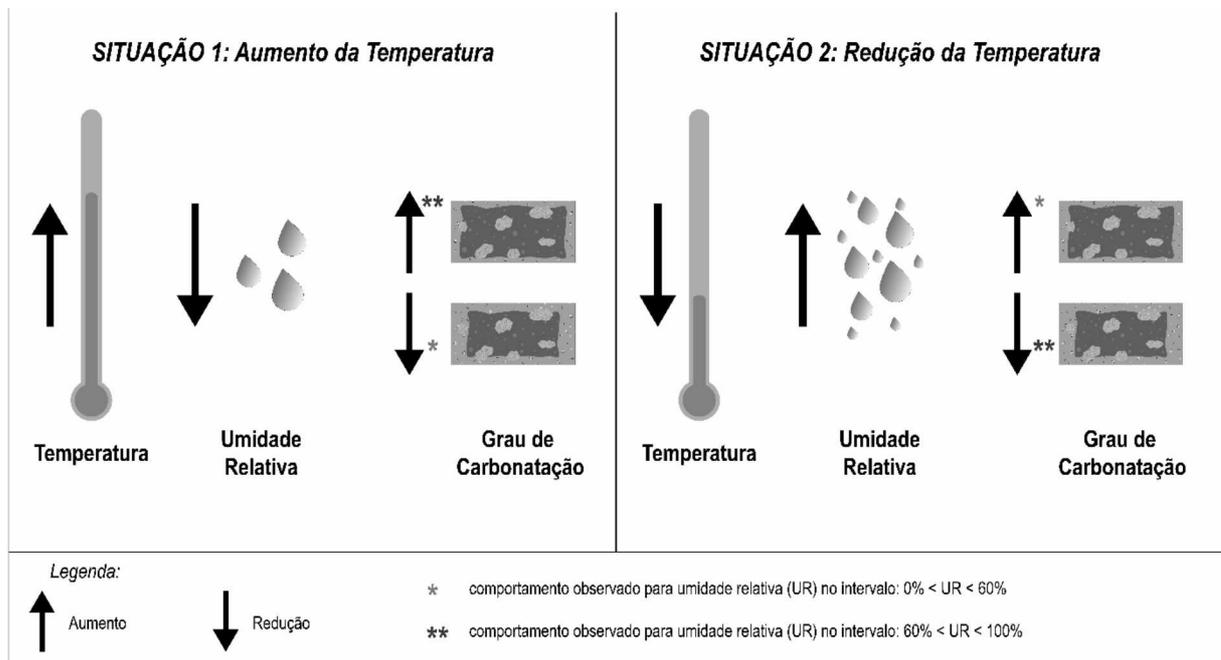


Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

### 2.3.2.2 Temperatura

A temperatura do ambiente, conforme exposto na seção anterior, influencia a umidade relativa que, por sua vez tem sua participação característica no desenvolvimento da carbonatação. Essa interação temperatura e UR pode ser revista de forma resumida na Figura 8.

Figura 8 – Influência da temperatura na umidade relativa e consequente impacto na carbonatação, considerando apenas as duas variáveis (ilustração simplificada)



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Além de afetar um dos fatores necessários a anomalia, a temperatura influi na velocidade de difusão do dióxido de carbono e na velocidade de transferência do cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) para a zona de precipitação. Em ambos os casos o processo é acelerado pelo aumento na temperatura, segundo Xu *et al.* (2022), embora incrementos nessa variável também implique na redução da solubilidade do  $\text{CO}_2$  na solução dos poros do concreto (GLASSER; PEDERSEN; GOLDTHORPE; ATKINS, 2005), logo, retarda o desenvolvimento da carbonatação.

Mais um modo de influência da temperatura é através dos processos de contração e dilatação térmica proporcionadas seja pelo processo de hidratação do cimento ou pelas condições do meio. Com o aquecimento e resfriamento do material, o elemento por ele composto tende a expandir e contrair, respectivamente. Esses movimentos, em situações práticas de aplicação do concreto, são restringidos pelos vínculos que possui com outros materiais e ou elementos da estrutura em sua totalidade (THOMAZ, 1989). Logo, tensões superiores a capacidade resistente se desenvolve e essas, por sua vez, ocasionam a aumento dos poros e na fissuração favorecendo o ingresso dos agentes promotores da carbonatação.

Conforme aponta Drouet, Poyet, Bescop, Torrenti e Bourbon (2019), a estimativa do efeito da temperatura na carbonatação é complexo, uma vez que

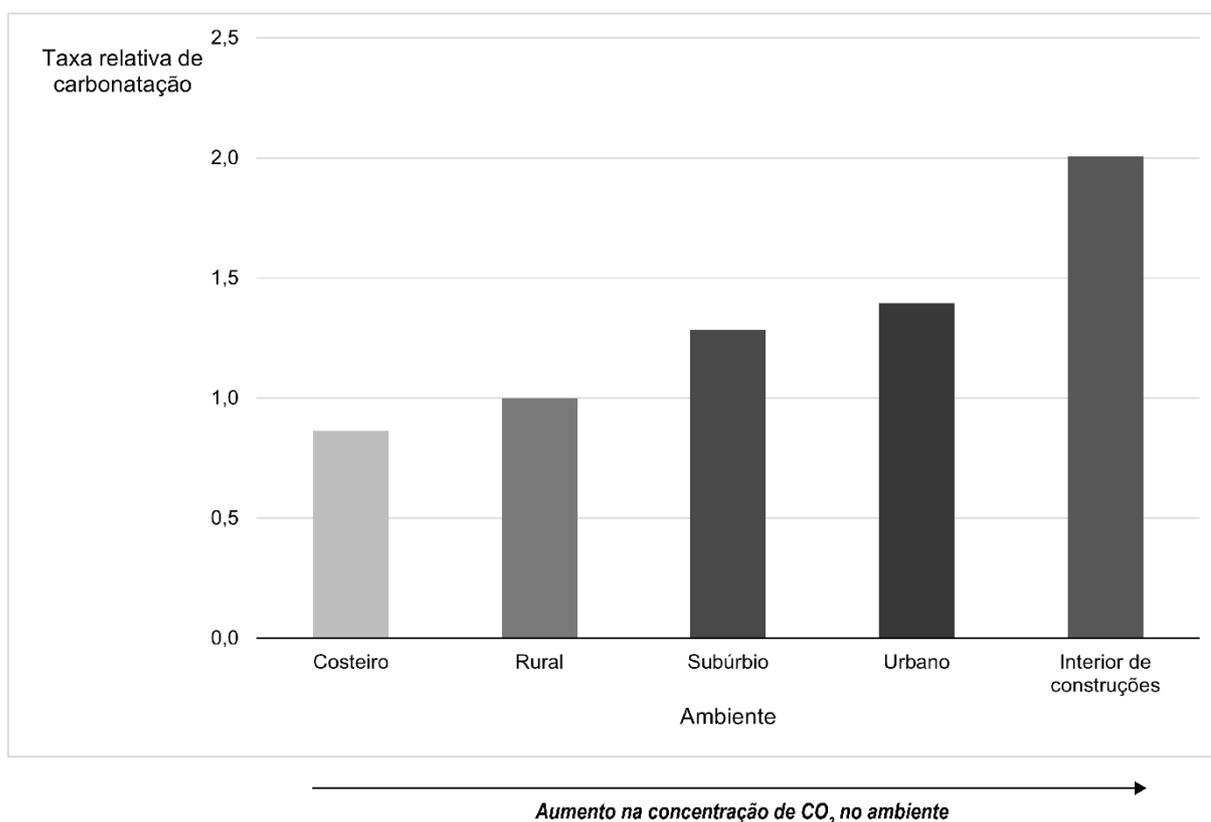
mecanismos distintos e contraditórios estão envolvidos, porém, é possível simplificar: segundo Barbosa, Fontanella, Pereira e Salzani (2022), para temperaturas entre 20 e 40 °C, a influência dessa variável na anomalia é insignificante.

### 2.3.2.3 Concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

Dado que o gás carbônico é um elemento necessário a carbonatação entende-se que, considerando essa variável de modo isolado, à medida que sua concentração no ambiente aumenta, a taxa de carbonatação no concreto também aumenta (RICHARDSON, 2002, CUI; TANG; LIU; DONG; XING, 2015).

Estudos afirmam que a influência da concentração do CO<sub>2</sub> depende de outros fatores. Para Ekolu (2016) a dependência é da resistência a compressão: em seu estudo, concluiu que para resistência superior a 60 MPa, a concentração do gás tem influência insignificante na carbonatação. Por seu lado, Richardson (1988) realiza a associação concentração de CO<sub>2</sub>, taxa de carbonatação e ambiente, conforme Figura 9.

Figura 9 – Taxa relativa de carbonatação em função da concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente



Fonte: Adaptado (2023) de Richardson (1988).

#### 2.3.2.4 Dinâmica climática

Segundo Mendonça e Danni-Oliveira (2007), o clima é composto pela interação dos fatores temperatura, umidade e pressão que variam conforme influência da altitude, latitude, maritimidade, continentalidade, vegetação e as atividades humanas.

Através dessa definição, justifica-se o porquê de esse ser parâmetro mais importante e de interesse para a presente obra na medida que agrega as outras variáveis até aqui mencionadas com mais um fator: a localização geográfica. Devido essa especificidade, o modo de impacto do clima na carbonatação, para o território brasileiro, será discorrido nos próximos capítulos.

#### 2.3.2.5 Resumo das variáveis ambientais

Sintetiza-se as variáveis ambientais e seu modo de impacto na carbonatação através do Quadro 2.

Quadro 2 – Características do ambiente que influenciam na carbonatação

(continua)

| Variável              | Modo de influência na carbonatação   |
|-----------------------|--|
| Umidade relativa (UR) | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ favorece ou inibe o desenvolvimento da anomalia de acordo com o percentual presente na atmosfera:</li> <li>▪ <math>0\% \leq UR &lt; 45\%</math>: risco leve de carbonatação.</li> <li>▪ <math>45\% \leq UR \leq 65\%</math>: risco alto de carbonatação.</li> <li>▪ <math>65\% &lt; UR \leq 85\%</math>: risco médio de carbonatação.</li> <li>▪ <math>85\% &lt; UR \leq 98\%</math>: risco leve de carbonatação.</li> <li>▪ <math>98\% &lt; UR \leq 100\%</math>: risco insignificante de carbonatação.</li> <li>▪ <math>UR = 60\%</math>: grau máximo de carbonatação.</li> </ul> |

(conclusão)

| Variável                        | Modo de influência na carbonatação   |
|---------------------------------|--|
| Temperatura (T)                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ altera a UR do ambiente de modo inversamente proporcional (VAREJÃO-SILVA, 2006), logo, o grau de carbonatação conforme item anterior.</li> <li>▪ altera a velocidade em que as reações químicas da carbonatação acontecem. Dependendo da etapa do processo, o aumento ou redução nessa variável pode acelerar ou reduzir a velocidade, não havendo um padrão global definido (GLASSER; PEDERSEN; GOLDTHORPE; ATKINS, 2005, XU <i>et al.</i>, 2022).</li> <li>▪ a variação desse fator e o gradiente térmico promove a fissuração e aumento na porosidade do concreto/argamassa, conseqüentemente, favorece a carbonatação através do ingresso de CO<sub>2</sub> e da umidade do meio.</li> <li>▪ a influência da temperatura pode ser considerada insignificante no desenvolvimento global da anomalia <math>20\text{ °C} &lt; T &lt; 40\text{ °C}</math> (BARBOSA; FONTANELLA; PEREIRA; SALZANI, 2022).</li> </ul> |
| Concentração de CO <sub>2</sub> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ maior concentração eleva a taxa de carbonatação em relação a ambientes com concentração menor (RICHARDSON, 2002, CUI; TANG; LIU; DONG; XING, 2015).</li> <li>▪ a concentração varia com o tipo do ambiente. Segundo Richardson (1988): Interior de construções &gt; ambiente urbano &gt; subúrbio &gt; ambiente rural &gt; área litorânea.</li> <li>▪ para concretos/argamassas com resistência superior a 60 MPa a concentração tem influência insignificante na carbonatação (EKOLU, 2016).</li> </ul>  |
| Clima                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ combina todas as variáveis ambientais anterior, tendo a proporção de cada uma alterada, logo, o risco e grau de carbonatação, de acordo com a localização geográfica do elemento de concreto/argamassa.</li> </ul>  |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

### 3 AS REGIÕES E CONDIÇÕES MACROCLIMÁTICAS DO BRASIL

#### 3.1 A DIVISÃO DO TERRITÓRIO

O Brasil é um país de proporções continentais localizado na América do Sul, cuja extensão territorial de 8.510.345,540 km<sup>2</sup> (BRASIL, 2022a) confere a colocação de 5º maior país do mundo (WORLDMETER, [20--]). A distribuição da área total e da população pode ser consultada na Tabela 1.

Internamente, o território possui 5570 municípios (BRASIL, 2022b) distribuídos em 27 estados (considerando o Distrito Federal), estes agrupados em 5 regiões político-administrativas (Figura 10), reunindo províncias com clima, vegetação, relevo e condições socioeconômicas similares (FRANCISCO, [20--?]).

Tabela 1 – Características territoriais brasileiras (áreas e população), segundo IBGE (BRASIL, 2019, 2021a, 2021b)

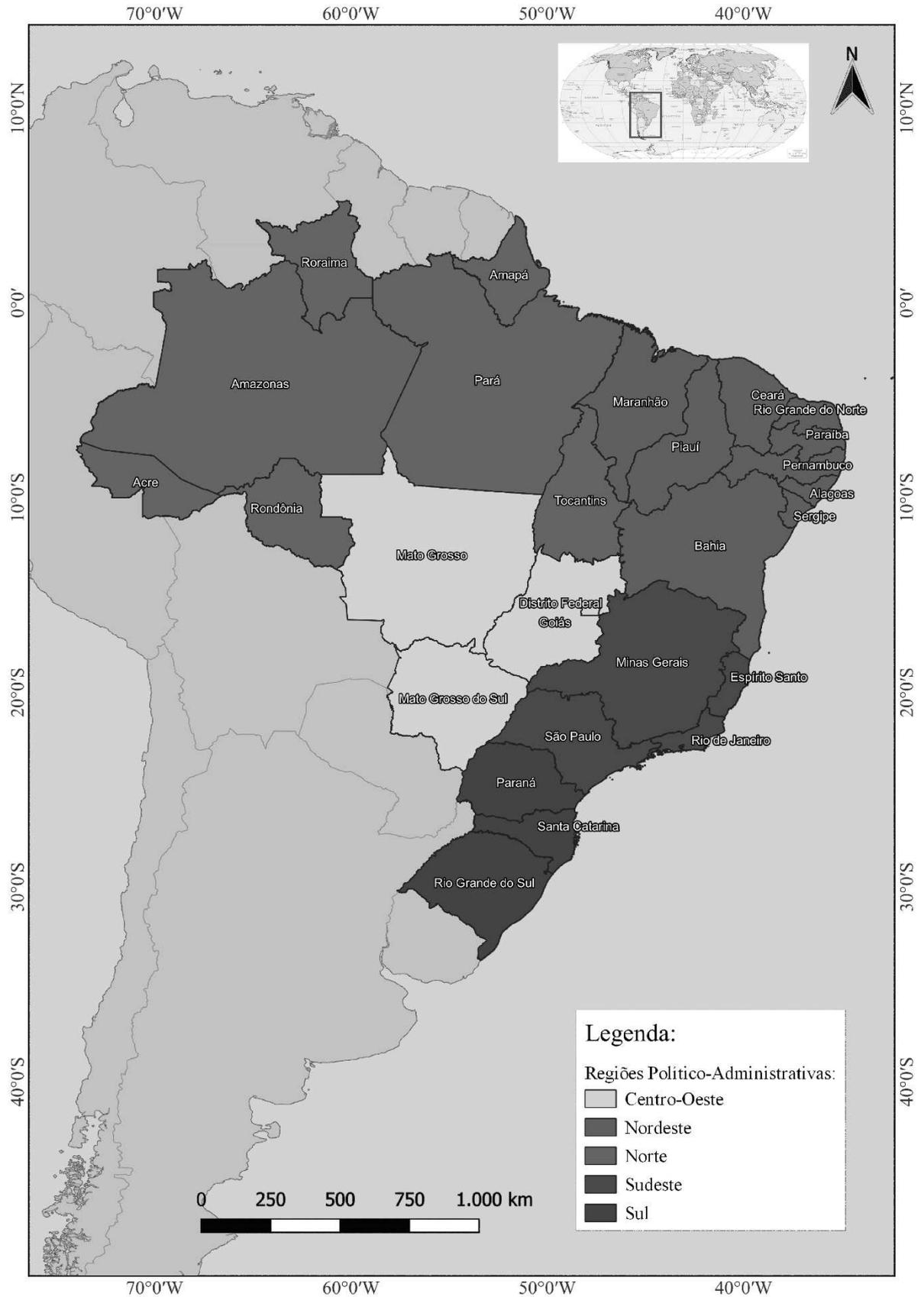
| Unidade territorial | Áreas urbanizadas densas (km <sup>2</sup> ) | Áreas urbanizadas pouco densas (km <sup>2</sup> ) | Total de áreas urbanizadas (km <sup>2</sup> ) | Loteamentos vazios (km <sup>2</sup> ) | Área total da unidade territorial (km <sup>2</sup> ) | População total (hab.) |
|---------------------|---|---|---|---------------------------------------|--|------------------------|
| Região Centro-Oeste | 3.735,560                                   | 945,970   | 4.681,530                                     | 256,860                               | 1.606.358,682  | 16.707.336             |
| Região Nordeste     | 8.218,070                                   | 2.596,680   | 10.814,750                                    | 826,190                               | 1.552.175,420  | 57.667.842             |
| Região Norte        | 2.810,760                                   | 1.286,830   | 4.097,590                                     | 194,240                               | 3.850.516,275  | 18.906.962             |
| Sudeste             | 13.968,690                                  | 2.901,270   | 16.869,960                                    | 646,180                               | 924.558,341  | 89.632.912             |
| Sul                 | 8.033,190                                   | 1.447,190   | 9.480,380                                     | 184,490                               | 576.736,822  | 30.402.587             |
| <b>BRASIL:</b>      | <b>36.766,270</b>                           | <b>9.177,940</b>                                  | <b>45.944,210</b>                             | <b>2.107,960</b>                      | <b>8.510.345,540</b>                                 | <b>213.317.639</b>     |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A seguir, uma breve descrição de cada uma das regiões citadas na Tabela 1 e na Figura 10 será fornecida, com foco nas atividades econômicas, em virtude do

impacto que possuem na alteração da concentração de dióxido de carbono na atmosfera.

Figura 10 – Regiões político-administrativas do Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

### 3.1.1 Região Centro-Oeste

A região Centro-Oeste é formada por 4 estados, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul e o Distrito Federal, este último contendo a atual capital do país, Brasília; com área total de 1.606.358,682 km<sup>2</sup> e sem contato com a faixa costeira (única região com tal configuração), detém cerca de 18,88% do território nacional, mas, abriga apenas 7,83% da população brasileira (16.707.336 habitantes dos 213.317.639 distribuídos pelo Brasil).

As principais atividades desenvolvidas pertencem ao setor primário da economia (extração de matéria-prima), a exemplo da agricultura (soja, milho, algodão, arroz, cana-de-açúcar, entre outros), pecuária extensiva (utiliza vasta área e caracterizada por baixa produtividade) e extrativismo (garimpo de ouro, diamante, nióbio, ferro, manganês, látex, madeira, etc.). As três atividades contribuem de modo significativo com emissão de CO<sub>2</sub> na região.

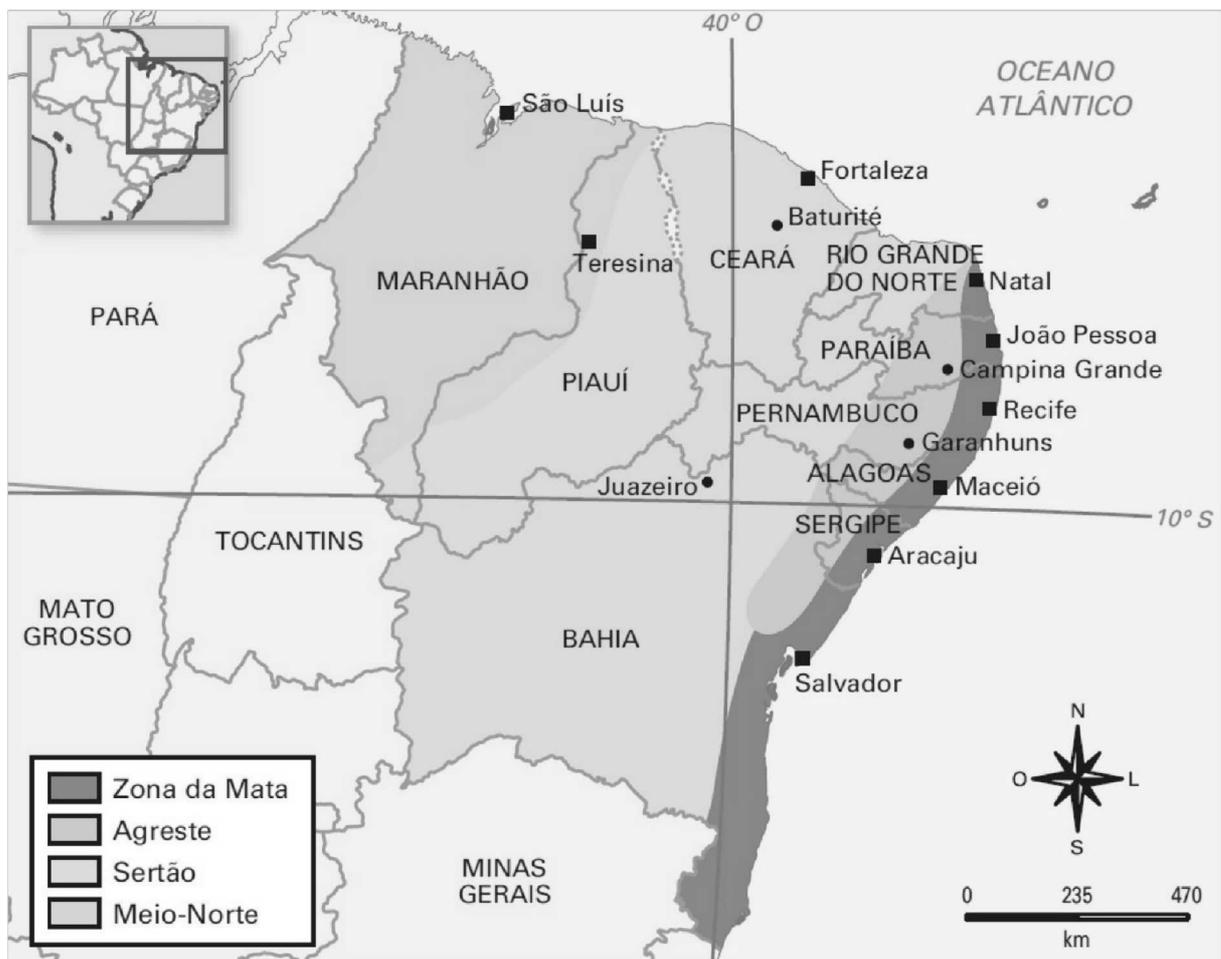
Para comportar 33,58% das cabeças de gado bovino do país (BRASIL, 2021c) e ocupar 39,12% da área plantada (BRASIL, 2021d), grandes extensões de áreas foram e são desmatadas dos biomas nativos regionais (inclusive em áreas protegidas – em menor parcela), a Mata Atlântica, Pantanal, Cerrado e Floresta Amazônica, sobretudo, no norte do Mato Grosso (2º maior emissor do Brasil) – o aumento da emissão pode ser entendido na forma da decomposição da matéria orgânica e redução da capacidade de absorção dos gases poluentes pela vegetação residual. Na agricultura os destaques de emissões diretas são a aplicação de ureia como fertilizante (11,47 milhões de toneladas de dióxido de carbono lançadas no ambiente de 2011 a 2021) e o processo de calagem, que consiste no lançamento de calcário no solo para correção de acidez – emissão de 76,35 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> entre 2011 e 2021 (POTENZA *et al.*, 2021; SEEG, 2021). Segundo mesmos referenciais, essa região é a terceira maior emissora de CO<sub>2</sub> do Brasil.

### 3.1.2 Região Nordeste

O Nordeste é constituído por 9 estados, Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Piauí, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Sergipe, contendo a segunda maior população dentre as regiões (superada pela região Sudeste) em seus 1.552.175,420 km<sup>2</sup> de extensão.

A região é dividida em 4 sub-regiões (Figura 11), fundamentadas na manifestação climática específica, na atividade econômica e a vegetação nativa. Na Zona da Mata (vegetação original: Mata Atlântica), as atividades predominantes a agricultura (cacau, cana-de-açúcar) e o setor de serviços (educação e saúde), sendo referência no Nordeste nesse aspecto. No Agreste (vegetações originais: Mata Atlântica e Caatinga), a economia é fundada no cultivo de algodão, na indústria têxtil, no comércio local e na criação de caprinos. O Sertão (vegetação nativa: Caatinga), por sua vez, tem sua economia centrada em atividades de subsistência como a agricultura comercial (algodão, arroz, café, mandioca, frutas, feijão, milho e soja) e a pecuária extensiva. A última sub-região nordestina é o Meio-Norte (vegetações nativas: Caatinga e Floresta Amazônica), cuja economia é fundada nos setores da agricultura (arroz, algodão e soja), pecuária (gado bovino) e do extrativismo vegetal (palmito, cera de carnaúba e coco babaçu).

Figura 11 – Sub-regiões do Nordeste



Fonte: Sene e Moreira (2018).

Semelhante ao que ocorre na região Centro-Oeste, o maior propulsor das emissões de dióxido de carbono no Nordeste é o desmatamento para mudança de uso das terras dos biomas nativos (de 2011 a 2021 o CO<sub>2</sub> resultante da degradação da vegetação, em milhões de toneladas, foi: 448,48 no Cerrado; 403,96 na Floresta Amazônica; 204,84 na Caatinga e 121,6 na Mata Atlântica), segundo SEEG (2021).

O diferencial dessa região para o Centro-Oeste, quanto a poluição gasosa por gás carbônico, está na participação do setor energético (combustão, geração de eletricidade e afins) em comparação a soma do setor de mudança do uso de terras e florestas (que enquadra os desmatamentos, independente da finalidade) com o setor exclusivo da agropecuária: no Centro-Oeste é 15,63% contra 80,48%, no Nordeste é 37,96% contra 57,58%.

### 3.1.3 Região Norte

A região Norte é a maior do país (3.850.516,275 km<sup>2</sup>), sendo composta por 7 estados, Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins; e contendo 18.906.962 habitantes, superando apenas o Centro-Oeste.

Os setores econômicos notórios do Norte são a pecuária (gado bovino e bubalino, no Pará – 39,96% do rebanho nacional, segundo IBGE (BRASIL, 2021c), o extrativismo (vegetal e mineral, de produtos como madeira, açaí, látex de seringueira, manganês, minério de ferro, bauxita, cassiterita, ouro, cobre, entre outros) e o industrial (a indústria de eletrônicos é o destaque), que foi proporcionado pela Zona Franca de Manaus, criada em 1976.

A situação da região quanto à emissão de dióxido de carbono é crítica, pois o estado mais poluente está nela (Pará), fixando o Norte como a região com maior emissão nos últimos anos. No período de 2011 a 2021, a divisão do lançamento, por setor (em bilhões de toneladas): 0,03 da combinação de processos industriais, resíduos e agropecuária (exceto desmatamentos para esse fim); 0,3 de energia e 4,89 provém da mudança do uso de terras e florestas. Destes, 94,96% é resultado do desmatamento da Floresta Amazônica (SEEG, 2021), cuja destinação é a ampliação das zonas urbanas, expansão para a agropecuária e a extração de minérios, visto que a serra de Carajás, no Pará, é uma das maiores reservas do mundo.

### 3.1.4 Região Sudeste

Formada pelos 4 estados Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, a região Sudeste possui área menor que as regiões anteriores (924.558,341 km<sup>2</sup>), porém, é a mais populosa dentre todo o país, com 89.632.912 habitantes (42,02% dos brasileiros).

As atividades econômicas de destaque pertencem aos setores de extrativismo mineral (sendo os principais produtos o minério de ferro, petróleo, manganês e ouro), da pecuária intensiva (desenvolvida em áreas menores que a extensiva, com emprego tecnológico, animais de espécies selecionadas), a indústria (têxtil, siderúrgicas, químicas, sucroalcooleira, calçadista), o financeiro (bancos e afins), o comércio e o setor de serviços.

Sobre as emissões no período de 2011-2021, a região foi a segunda colocada, com 21,03% do total. Diferente das regiões anteriores, os setores que mais emanam CO<sub>2</sub> para o ambiente são o de energia (63,78%) e o de processos industriais (17,24%); os setores de mudança do uso de terras e florestas e de agropecuária somam 18,95%. Detalhando essas frações, no setor energético, 46,79% do CO<sub>2</sub> é resultado da queima de combustíveis nos modais de transporte, tendo o modal rodoviário como grande representante (91,80%). Por sua vez, o setor de processos industriais tem com maior emissor a indústria de produção de metais (67,86%), sendo que a produção do aço e ferro gusa são os responsáveis absolutos, com 97,16% desses 67,86% (SEEG, 2021).

### **3.1.5 Região Sul**

A região Sul possui 3 estados, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, que ocupam juntos 576.736,822 km<sup>2</sup> e abrigam 30.402.587 habitantes. Depois do Sudeste, essa é a região que mais contribui com a riqueza do país.

Na economia regional destacam-se o extrativismo do carvão mineral, da madeira e da erva-mate; a agricultura, com o cultivo do trigo, aveia, centeio, maçã, uva, entre outros; a pecuária, estando com a maior criação de suínos e galináceos do Brasil, respectivamente 50,24% e 48,52% (BRASIL, 2021c); a indústria, entre as quais a têxtil, calçados, alimentos, bebidas, metalurgia e de equipamentos agrícolas. No setor de comércio e serviços, destacam-se as atividades relacionadas ao turismo, significativo no Sul.

O dióxido de carbono dessa região, a menor emissora do país (apenas 8,75%), originado setor de energia (55,74%) e o de mudança do uso de terras e florestas (36,25%). Análogo ao Sudeste, no setor de energia a maior contribuição vem da combustão nos meios de transportes, 61,84%, dos quais 96,46% correspondem ao modal rodoviário. No setor de mudanças do uso de terras e florestas a região assemelha-se ao Centro-Oeste, Nordeste e Norte, nas quais o desmatamento da vegetação nativa associados à agropecuária é a causa predominante – por bioma, 63,02% do CO<sub>2</sub> é consequência do desflorestamento da Mata Atlântica, 36,61% no Pampa e 0,37% no Cerrado. Nas emissões referentes ao setor exclusivo d agropecuária, o uso do calcário equivale a 78,99% e o da ureia 21,01% (SEEG, 2021).

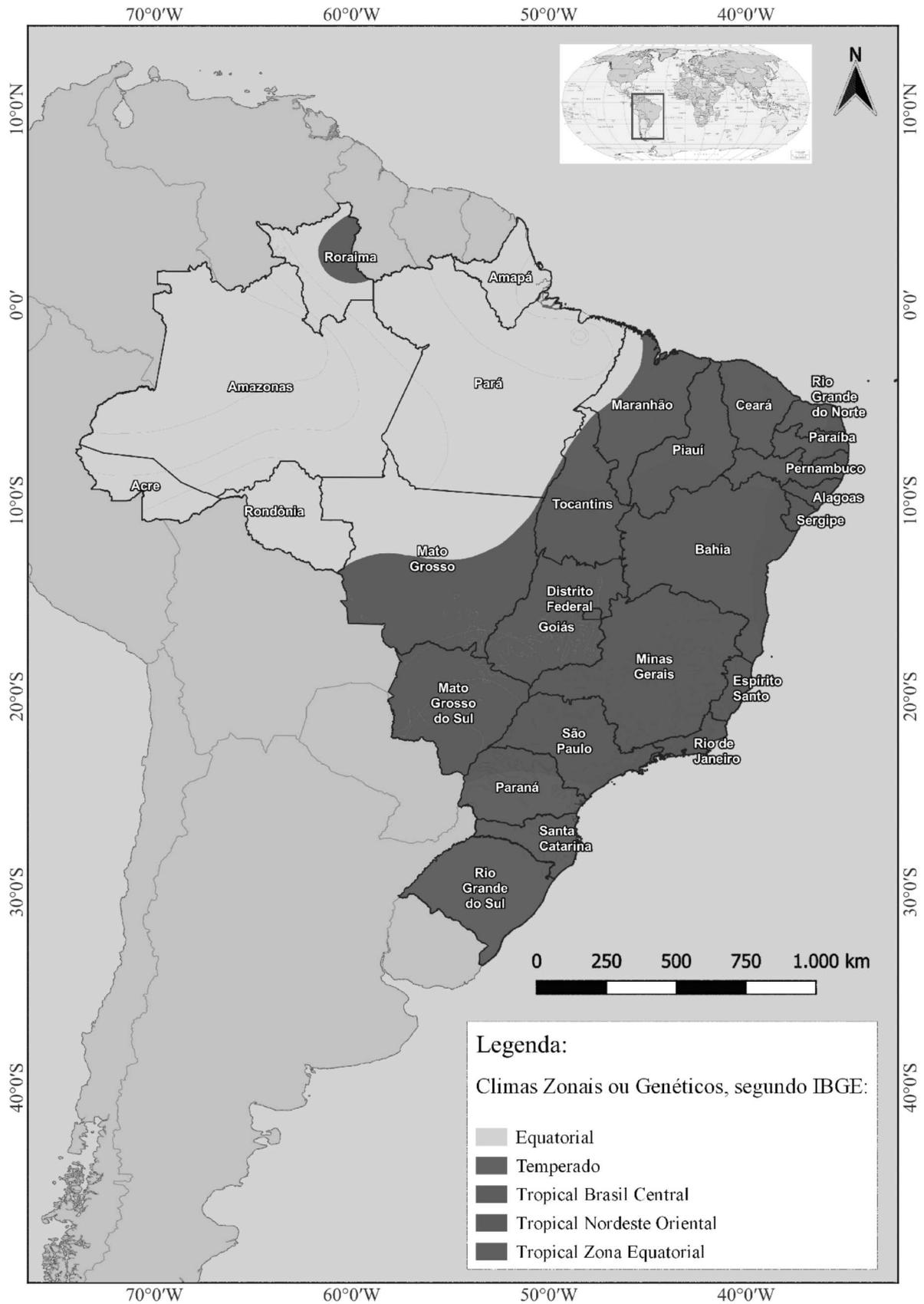
### 3.2 MACROCLIMAS BRASILEIROS

Os macroclimas são “a[s] maior[es] das unidades climáticas que faz[em] o compartimento do clima no globo e compreende[m] áreas muito extensas da superfície da Terra [...] como [os] clima[s] dos oceanos, dos continentes, de um grande país” (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007, plural do autor), esta sendo a condição do Brasil.

Oficialmente o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (BRASIL, 2002b), o Brasil engloba 5 Climas Zonais ou Genéticos (Figura 12) que se manifestam de maneiras distintas em localidades (latitude, longitude e altitude) distintas. Na bibliografia brasileira encontram-se outras propostas de regionalização macroclimática considerando especificidades das 5 zonas do IBGE (a exemplo dos modos de manifestação ilustrados na Figura 13), contudo, mesmo havendo semelhanças (em especial na nomenclatura empregada) há divergências quanto a área de abrangência das feições climáticas.

Devido ao caráter genérico dos Climas Zonais as características deles também o são, sendo elas listadas no Quadro 3.

Figura 12 – Climas zonais ou genéticos do Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 13 – Modos de manifestações específicos do Climas Zonais brasileiros



Fonte: Brasil (2002a).

Quadro 3 – Principais características do Climas Zonais brasileiros

(continua)

| Macroclima              | Principais características  | Regiões de abrangência  |
|-------------------------|---|---|
| Equatorial              | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ intensa incidência da radiação solar e, como consequência, altas temperaturas e uniformes durante todo o ano (baixa amplitude térmica).</li> <li>▪ abundância de chuvas e umidade relativa alta.</li> <li>▪ temperatura média supera 25 °C.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Centro-Oeste</li> <li>▪ Norte</li> </ul>   |
| Temperado               | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ verões quentes e inverno frio, podendo atingir temperaturas negativas.</li> <li>▪ chuva bem distribuída ao longo do ano.</li> <li>▪ temperatura média anual de 19 °C.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sul</li> </ul>   |
| Tropical Brasil Central | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ verões chuvosos e inverno frio e seco.</li> <li>▪ temperatura média anual oscila entre 20 °C e 28 °C.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Centro-Oeste</li> <li>▪ Nordeste</li> <li>▪ Norte</li> <li>▪ Sudeste</li> <li>▪ Sul</li> </ul> |

(conclusão)

| <b>Macroclima</b>          | <b>Principais características</b>  | <b>Regiões de abrangência</b>   |
|----------------------------|--|---|
| Tropical Nordeste Oriental | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ zona marcada por altas temperaturas ao longo do ano e com maior umidade em relação aos demais macroclimas tropicais, devida localização em faixa litorânea.</li> <li>▪ verão com baixa umidade e inverno chuvoso.</li> <li>▪ temperatura média anual de 25 °C.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nordeste</li> </ul>                  |
| Tropical Zona Equatorial   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ elevadas temperaturas ao longo do ano (baixa amplitude térmica).</li> <li>▪ verão chuvoso e inverno seco, com pouca chuva.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nordeste</li> <li>▪ Norte</li> </ul> |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

No Quadro 4 expõe-se a manifestação específica dos macroclimas nos estados brasileiros por efeito das variáveis precipitação total média ( $h_{média}$ ), umidade relativa média ( $UR_{média}$ ) e temperatura média ( $T_{média}$ ), todas anuais.

Quadro 4 – Manifestação específica anual dos macroclimas nos estados brasileiros: precipitação, umidade relativa e temperatura

(continua)

| <b>Região político-administrativa</b> | <b>Estado</b>       | <b><math>h_{média}</math> (mm)</b> | <b><math>UR_{média}</math> (%)</b> | <b><math>T_{média}</math> (°C)</b> |
|---------------------------------------|---------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Centro-Oeste                          | Distrito Federal    | 0,150                              | 63,74                              | 21,52                              |
|                                       | Goiás               | 0,140                              | 63,40                              | 23,70                              |
|                                       | Mato Grosso do Sul  | 0,127                              | 63,70                              | 24,23                              |
|                                       | Mato Grosso         | 0,173                              | 67,54                              | 24,91                              |
| Nordeste                              | Alagoas             | 0,181                              | 80,13                              | 24,77                              |
|                                       | Bahia               | 0,127                              | 70,32                              | 24,59                              |
|                                       | Ceará               | 0,063                              | 65,03                              | 26,94                              |
|                                       | Maranhão            | 0,160                              | 68,83                              | 27,19                              |
|                                       | Paraíba             | 0,137                              | 64,27                              | 21,76                              |
|                                       | Pernambuco          | 0,108                              | 69,01                              | 24,60                              |
|                                       | Piauí               | 0,095                              | 60,58                              | 27,53                              |
|                                       | Rio Grande do Norte | 0,051                              | 64,25                              | 27,54                              |
|                                       | Sergipe             | 0,135                              | 72,29                              | 25,29                              |

(conclusão)

| <b>Região político-administrativa</b> | <b>Estado</b>     | <b><math>h_{média}</math> (mm)</b> | <b><math>UR_{média}</math> (%)</b> | <b><math>T_{média}</math> (°C)</b> |
|---------------------------------------|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Norte                                 | Acre              | 0,309                              | 80,96                              | 25,53                              |
|                                       | Amazonas          | 0,244                              | 79,43                              | 26,59                              |
|                                       | Amapá             | 0,450                              | 81,94                              | 26,15                              |
|                                       | Pará              | 0,257                              | 78,51                              | 26,08                              |
|                                       | Rondônia          | 0,164                              | 60,49                              | 27,54                              |
|                                       | Roraima           | 0,055                              | 69,03                              | 26,71                              |
|                                       | Tocantins         | 0,167                              | 67,04                              | 25,14                              |
| Sudeste                               | Espírito Santo    | 0,160                              | 75,43                              | 22,84                              |
|                                       | Minas Gerais      | 0,154                              | 68,71                              | 21,73                              |
|                                       | Rio de Janeiro    | 0,188                              | 78,75                              | 21,85                              |
|                                       | São Paulo         | 0,148                              | 71,71                              | 21,09                              |
| Sul                                   | Paraná            | 0,192                              | 72,92                              | 20,43                              |
|                                       | Rio Grande do Sul | 0,169                              | 74,24                              | 17,86                              |
|                                       | Santa Catarina    | 0,250                              | 78,99                              | 18,36                              |

Fonte: Adaptado (2023) de Brasil (2022c).

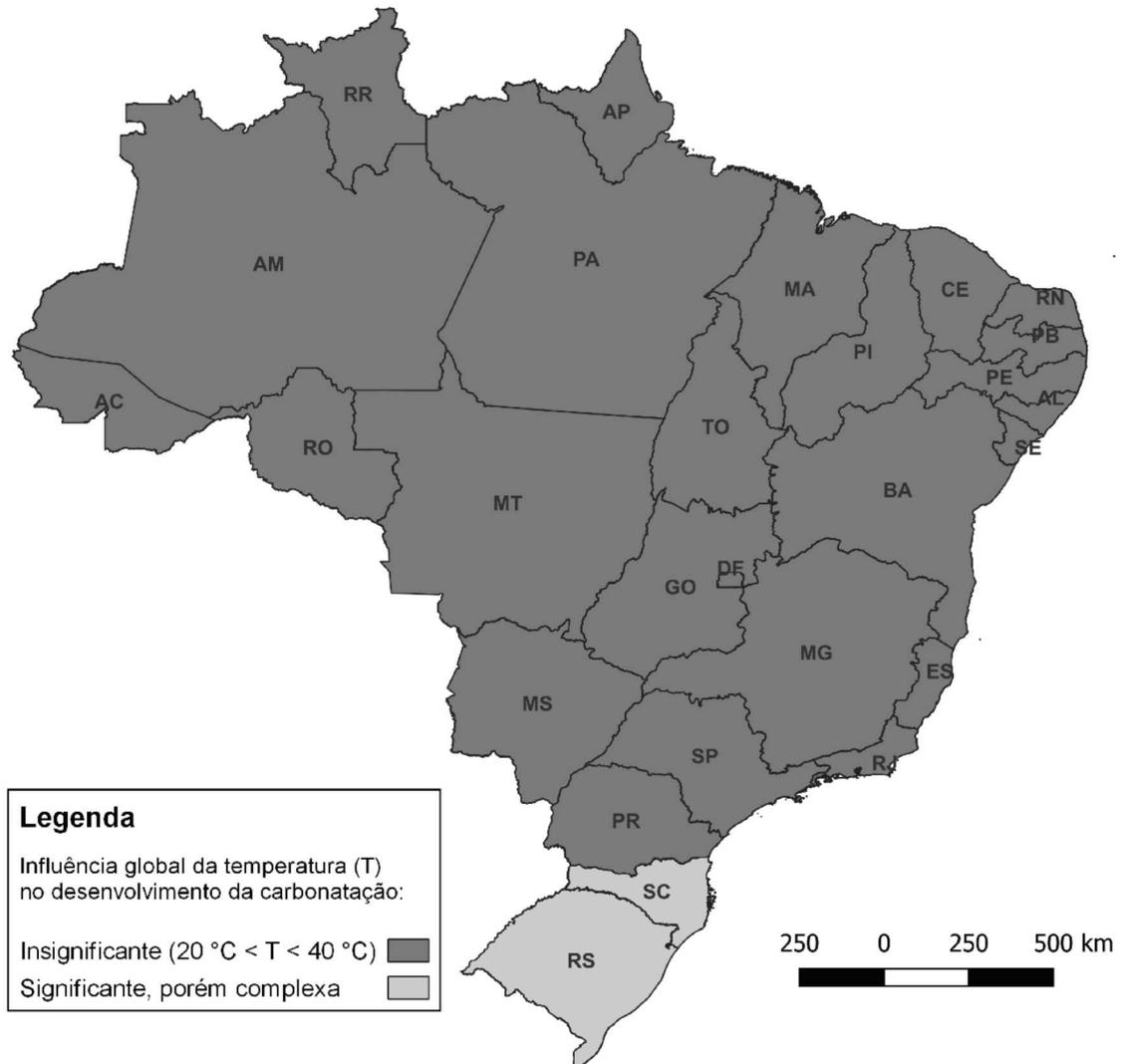
## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1 MAPAS DE RISCO

Embasado no referencial teórico, percebe-se que há três fatores principais que atuam na carbonatação: temperatura, umidade, e concentração de dióxido de carbono no ambiente. Esses fatores são regidos, em macroescala, por um quarto fator, o geográfico, em destaque para os aspectos macroclimáticos (influindo na temperatura e umidade) e socioeconômico (impactando na concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera).

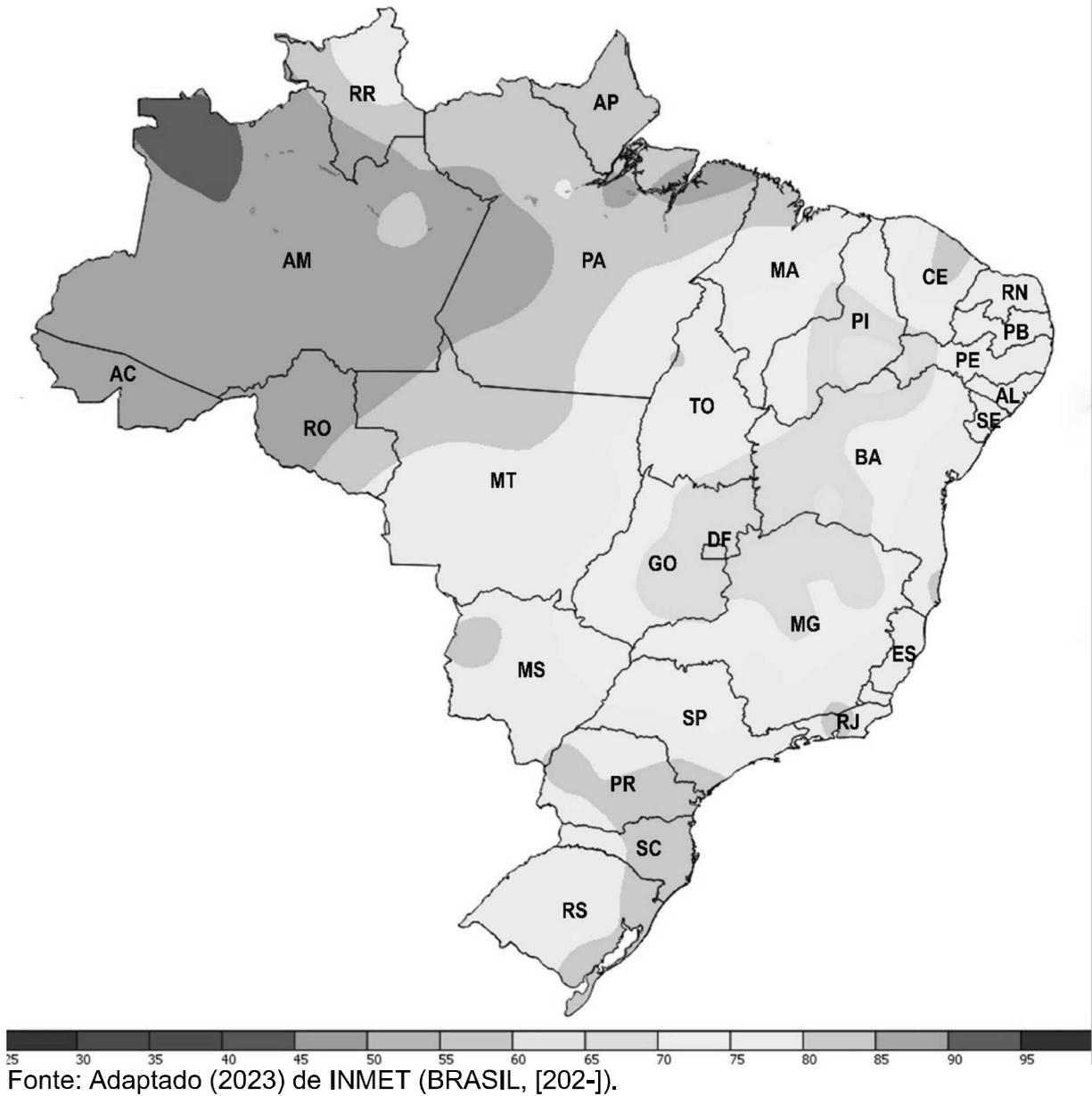
Analisando-se a temperatura média dos estados brasileiros, obtém-se o resultado contido na Figura 14. Dos 27 estados, apenas 2 apresentam influência significativa da variável temperatura na carbonatação, sendo que eles estão na região Sul – devido ao fato de não ser atípico ocorrerem medições abaixo dos 20 °C. Para os demais, a localização do país nos trópicos do planeta favorece a média anual de temperaturas se enquadrar na faixa de 20 °C a 40 °C, situação que simplifica o processo de especificação do risco da anomalia em função da variável de modo isolada (tarefa complexa, de acordo com a literatura).

Figura 14 – Classificação da influência isolada da temperatura na carbonatação



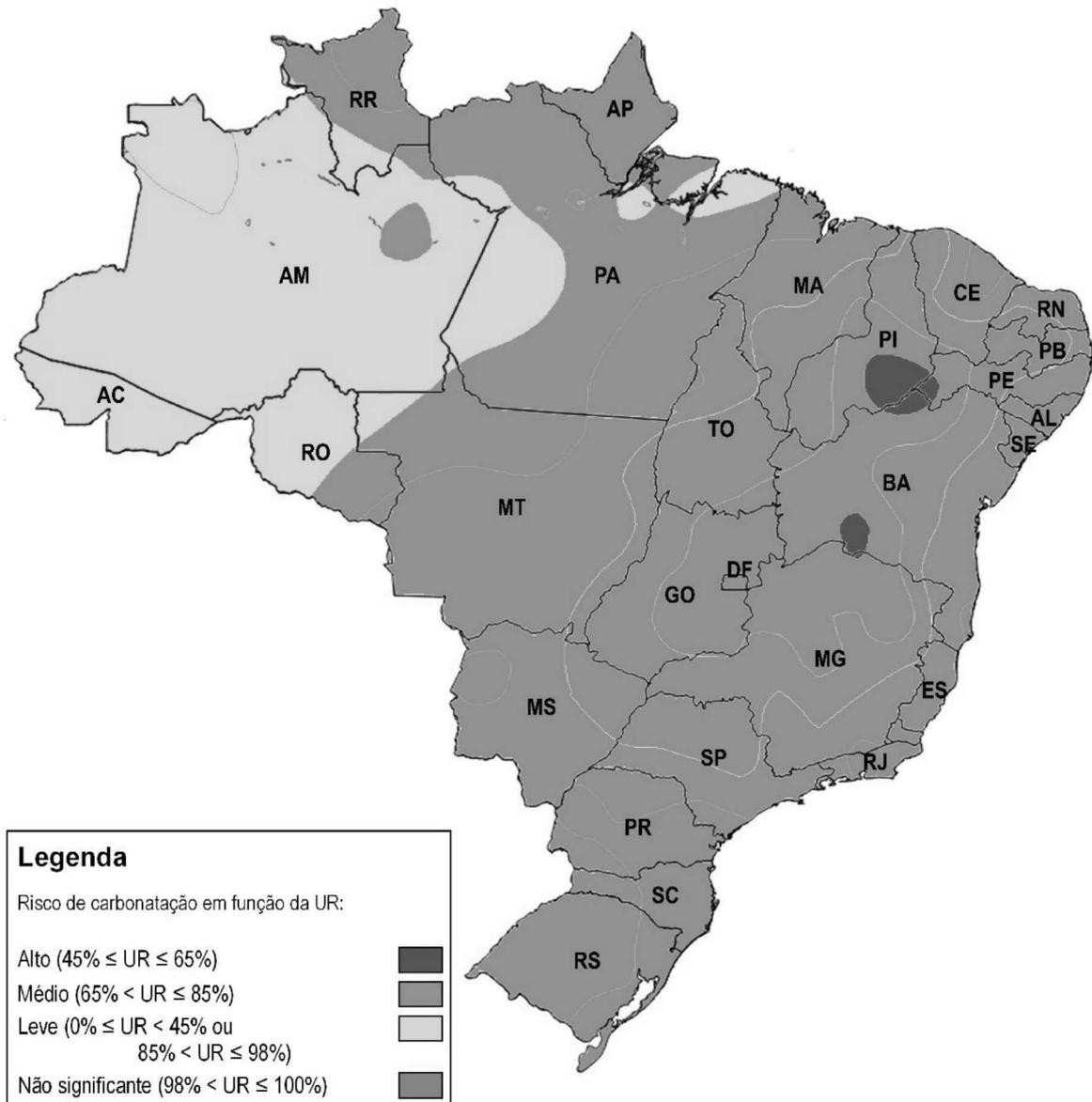
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 15 – Umidade relativa anual média (%) do Brasil



Através das informações contidas na Figura 15, um mapa de risco de carbonatação em função das condições de umidade do ambiente foi elaborado (Figura 16).

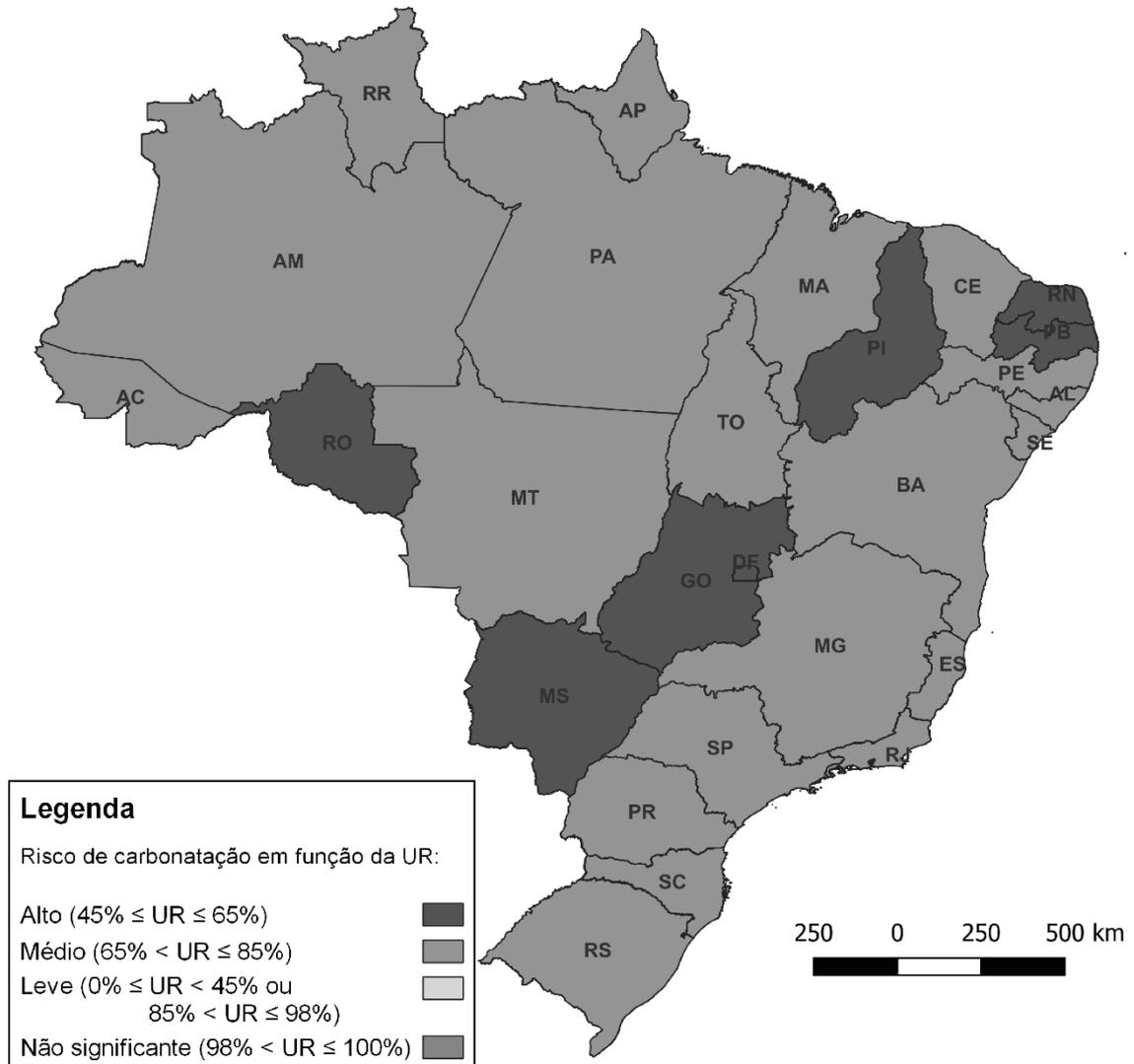
Figura 16 – Risco de carbonatação por faixa de umidade relativa do território brasileiro, em função de UR



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Uma segunda versão do mapa de risco foi desenhada (Figura 17), com os limites das zonas de risco simplificados para coincidir com as delimitações das unidades federativas, facilitando a aplicação prática do mesmo. Os dados utilizados para a produção são mais recentes que os embutidos na Figura 16, contudo, os de ambos foram coletados pela mesma fonte.

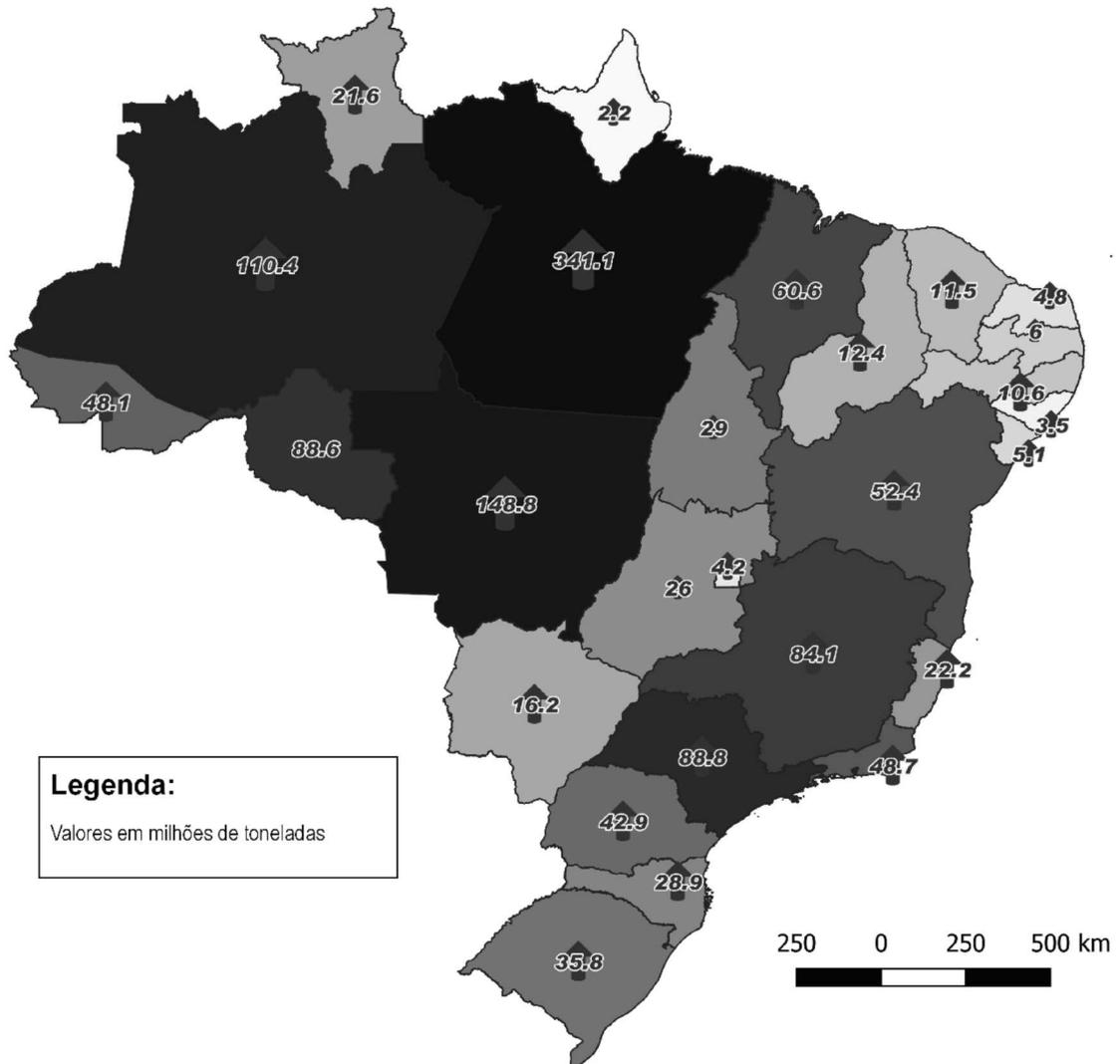
Figura 17 – Risco de carbonatação por estado brasileiro, em função de UR



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Por fim, menciona-se os dados relacionados ao dióxido de carbono. Não se encontra no referencial teórico alguma obra que quantifica o risco de carbonatação para a variável  $\text{CO}_2$ , todavia, é conhecido que o aumento na disponibilidade de gás resulta no aumento na taxa de carbonatação, logo, é possível efetuar uma estimativa qualitativa do risco da anomalia através de outras ferramentas. Neste trabalho, a ferramenta escolhida foi a emissão de  $\text{CO}_2$  por estado (Figura 18), pois reflete as características socioeconômicas de cada território e, portanto, o impacto das atividades humanas na durabilidade de produtos cimentícios frente a carbonatação.

Figura 18 – Emissão bruta de CO<sub>2</sub> por estado brasileiro, segundo SEEG (2021)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Ressalta-se, ainda que houvesse uma avaliação do risco de carbonatação com um critério quantitativo, análogo ao utilizado para a UR, essa iria carecer de aplicação prática, posto que a concentração de dióxido de carbono na atmosfera terrestre tem crescido de forma expressiva no decorrer dos anos. De acordo com a National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA (LAN; TANS; K., 2023), a taxa média anual de crescimento na concentração de CO<sub>2</sub> foi de 1,60 ppm/ano nos últimos 64 anos enquanto que, considerando apenas os últimos 10 anos, essa mesma taxa foi de 2,46 ppm/ano. Tanto a taxa quanto a concentração apresentam comportamento crescente.

Outra particularidade concernente a Figura 18 é a justificativa de ser elegido os dados referente as emissões brutas em detrimento dos das emissões líquidas (parcela do CO<sub>2</sub> que não foi absorvida pela vegetação de terras indígenas ou áreas de proteção ambiental). Segundo Potenza *et al.* (2021), a adoção das emissões líquidas é inadequada sob o ponto de vista climático (alguns estados ficariam com emissões negativas, algo que não possui significado real) embora o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) o permita.

#### 4.2 CONSIDERAÇÕES NORMATIVAS

No intuito de assegurar a proteção e durabilidade das estruturas de concreto, especificações são fornecidas aos projetistas de modo a considerar previamente, na fase de projeto, os efeitos das variáveis que comprometem a integridade e qualidade dos bens dimensionados. No Brasil, os critérios que respaldam as decisões envolvendo a durabilidade são providas pela NBR 6118 (ABNT, 2014) no quadro reproduzido em seguida (Quadro 5).

Quadro 5 – Classes de agressividade ambiental (CAA) da ABNT NBR 6118:2014

| <b>Classe de agressividade ambiental (CAA)</b> | <b>Agressividade</b> | <b>Classificação geral do tipo de ambiente</b> | <b>Risco de deterioração da estrutura</b> |
|--|----------------------|--|---|
| CAA I  | Fraca                | Rural  | Insignificante                            |
|  |                      | Submersa                                       |   |
| CAA II   | Moderada             | Urbana <sup>a, b</sup>                         | Pequeno                                   |
| CAA III  | Forte                | Marinha <sup>a</sup>                           | Grande                                    |
|  |                      | Industrial <sup>a, b</sup>                     |   |
| CAA IV   | Muito forte          | Industrial <sup>a, c</sup>                     | Elevado                                   |
|  |                      | Respingos de maré                              |   |

<sup>a</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

<sup>b</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

<sup>c</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: Adaptado (2023) de ABNT (2014).

A mesma norma divide os espaços em 4 classes de agressividade ambiental (CAA I – Fraca, CAA II – Moderada, CAA III – Forte, CAA IV – Muito forte) baseadas no risco de deterioração, a saber, insignificante, pequeno, grande ou elevado. O enquadramento do empreendimento em uma das classes (que influenciará no processo de dimensionamento) é feito pelo projetista, utilizando como critério a tipo de região de alocação: rural, submersa, urbana, marinha, industrial ou sujeitas a respingos de maré.

Por outro lado, o EN 1992 Eurocode 2 (CEN, 2004) classifica os ambientes em 18 classes em função de aspectos como umidade, saturação dos poros do material e agentes químicos contidos no ar, águas marítimas ou subterrâneas, sendo o primeiro parâmetro diretamente ligado às condições climáticas de uma região. Essas classes estão divididas em 6 grupos de anomalias (Sem risco de corrosão ou ataque; Corrosão induzida por carbonatação; Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar; Corrosão induzida por cloretos da água do mar; Ataque pelo gelo/degelo com ou sem produtos do descongelamento; Ataque químico). O trecho do quadro da norma relacionado a carbonatação é reproduzido no Quadro 6.

Quadro 6 – Classes de exposição em função das condições ambientais para corrosão induzida por carbonatação

| <b>2 Corrosão induzida por carbonatação</b> |                               |  |
|---|-------------------------------|--|
| <b>Designação da classe</b>                 | <b>Descrição do ambiente</b>  | <b>Exemplos informativos de condições em que poderão ocorrer as classes de exposição</b>                                       |
| XC1   | Seco ou permanentemente úmido | Concreto no interior de edifícios com uma umidade relativa do ambiente baixa   |
| XC2   | Úmido, raramente seco         | Superfícies de concreto sujeitas a contato prolongado com água<br>Um grande número de fundações                                |
| XC3   | Umidade moderada              | Concreto no interior de edifícios com umidade relativa do ambiente moderada ou elevada<br>Concreto exterior protegido da chuva |
| XC4   | Alternadamente úmido e seco   | Superfícies de concreto sujeitas a contato com água, não incluídas na classe de exposição XC2                                  |

Fonte: Adaptado (2023) de EN 206-1 apud NP EN 1992-1-1 Eurocódigo 2 (CEN, 2010).

Tendo em vista apenas a carbonatação, destaca-se que a norma brasileira fornece parâmetros qualitativos e genéricos<sup>2</sup> para a classificação do risco ambiental, sobretudo, para anomalias relacionadas a condições climáticas, tendo o potencial de induzir ao erro a tomada de decisão por parte dos projetistas. A NBR fornece como critério de classificação da CAA o tipo de ambiente em que a estrutura se encontra, em outras palavras, o nível de concentração de gás carbônico. Apesar do CO<sub>2</sub> ser essencial, ele não é o melhor critério primário<sup>3</sup> para estimar o risco de carbonatação pois, conforme retratado no decorrer do trabalho, os dados históricos indicam que por consequência do desenvolvimento econômico e as mudanças no espaço geográfico a concentração desse gás vem aumentando de forma contínua no planeta; soma-se a realidade de concreto e argamassa de alto desempenho com resistência à compressão superior a 60 MPa, para os quais a influência da concentração do dióxido de carbono é insignificante (EKOLU, 2016).

A normalização europeia, por sua vez, conta com um critério exclusivo para classificação da agressividade do ambiente em relação a carbonatação, baseado na umidade relativa, parâmetro mais simples e assertivo na avaliação do risco de desenvolvimento pois, afora o fato da água ser uma substância obrigatória, controla a contribuição do gás carbônico<sup>4</sup>. Com tais características, reduz-se a possibilidade de equívocos na delimitação da periculosidade do ambiente. Contudo, semelhante, a norma brasileira, a avaliação é qualitativa.

Baseado nos resultados dos mapas das Figuras 16 a 18, identifica-se que os macroclimas, quando associados com as atividades humanas impõem às estruturas locais na maior parte dos estados brasileiros, condições severas (médio e alto risco). Contrastando com os preceitos normativos nacionais do Quadro 5, depreende-se que empreendimentos projetados para ambientes costeiros e industriais (CAA III e IV) atendem ao requisito de durabilidade frente a carbonatação. Porém, para localidades em estados como Pará e Mato Grosso, a CAA I e CAA II para elementos não-

---

<sup>2</sup> O Quadro 5 fornece mesmos critérios para a classificação do risco para todas as anomalias.

<sup>3</sup> A UR é considerada um critério secundário, conforme sugere os comentários a e b nas notas de rodapé do Quadro 5. Para descrição da carbonatação, essa hierarquia dos critérios não é a mais prudente.

<sup>4</sup> Através da regulação da difusão do gás no interior do material sujeito a carbonatação. Ainda que um ambiente contenha CO<sub>2</sub> em abundância, o impacto desse será limitado caso os poros do concreto/argamassa estejam saturados.

submersos os expõe a risco de carbonatação além da capacidade de durabilidade fornecida por essas classes.

## 5 CONCLUSÃO

A carbonatação dos produtos cimentícios é um processo anômalo diretamente relacionado com as variáveis climáticas ambientais, que atuam simultaneamente como reagentes essenciais e como reguladores das reações químicas envolvidas. Os parâmetros envolvidos são temperatura, concentração de gás carbônico e umidade (respectivamente do mais ao menos complexo de avaliar a influência na anomalia). No Brasil, as condições macroclimáticas impõem ao seu território rigorosas condições de agressividade ambiental, favoráveis à carbonatação, cujo risco para a maior parte dos estados é médio e alto. Os principais parâmetros condicionantes a esse cenário são a umidade relativa – UR a partir de 60%, Norte chuvoso – e a concentração de CO<sub>2</sub>, pois a temperatura média no país, exceto no Rio Grande do Sul e Santa Catarina, encontra-se dentro da faixa 20 a 40 °C, em que o efeito da variável T pode ser desprezado. As atividades econômicas agravam a conjuntura, com a emissão e redução da capacidade de absorção do dióxido de carbono pela vegetação. A atual normalização concedendo um método genérico de classificação da agressividade ambiental através das CAAs, embasado em ambientes padronizados, que implica na variável CO<sub>2</sub> como parâmetro predominante (insignificante para produtos cimentícios de alto desempenho – fck > 60 MPa), mostra-se inadequada para a carbonatação em um país com diversidade climática e econômica como o Brasil. A fim de assegurar a durabilidade e vida útil das estruturas de concreto recomenda-se a adoção de mapas de risco específicos para a anomalia, fundamentado nas condições macroclimáticas e tendo como parâmetro primário a umidade; que fornecerão condições mais assertivas e condizentes com a realidade do local a ser construído. Para futuros trabalhos aconselha-se um estudo aprofundado da influência da temperatura na carbonatação para a região Sul, o estudo e desenvolvimento de métodos quantitativos para avaliação do risco em função da concentração de CO<sub>2</sub> – removendo a dependência das emissões – e a produção de mapas para níveis geográficos mais específicos (para municípios e estações do ano, por exemplo).

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 256 p.

BARBOSA, Maria Teresa Gomes; FONTANELLA, João Pedro Costa; PEREIRA, Thales da Silva Soares; SALZANI, Lucca Oliveira. Análise das exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e proteção das armaduras segundo a normalização brasileira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 63., 2022, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: IBRACON, 2022. p. 120-136.

BARBOSA, Maria Teresa Gomes; SÁNCHEZ, Emil. Some notes on size effect and influence of aggregate roughness. In: DHIR, Ravindra; HARRISON, Thomas A.; NEULANDS, Moray David (ed.). **Cement combinations for durable concrete**. [S.L.]: Thomas Telford, 2015. p. 351-356. Thomas Telford Publishing. <http://dx.doi.org/10.1680/ccfdc.34013.0038>. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/ccfdc.34013.0038>. Acesso em: 13 dez. 2022.

BOLINA, Fabrício Longhi; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Patologia de estruturas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 320 p.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério da Economia. **Área territorial brasileira 2021**. 2022a. IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos->. Acesso em: 01 fev. 2022.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério da Economia. **Área territorial**: Brasil, grandes regiões, unidades da federação e municípios. 2021a. IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html?edicao=33086&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 22 fev. 2023.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério da Economia. **Áreas urbanizadas do Brasil 2019**. 2019. IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/tipologias-do-territorio/15789-areas-urbanizadas.html?edicao=35569&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 22 fev. 2023.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério da Economia. **Estimativas de população enviadas ao TCU**. 2021b. IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?edicao=314>. Acesso em: 22 fev. 2023.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério da Economia. **Mapa de clima do Brasil**. 2002a. IBGE. Disponível em: [https://atlascolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas\\_brasil/brasil\\_clima.pdf](https://atlascolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas_brasil/brasil_clima.pdf). Acesso em: 16 fev. 2023.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério da Economia. **Mapa de clima do Brasil**. 2002b. IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/climatologia/15817-clima.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 21 jun. 2022.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério da Economia. **Panorama**. 2022b. IBGE. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>. Acesso em: 01 fev. 2022.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério da Economia. **Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM)**: tabela 1 - Efetivo dos rebanhos, por tipo de rebanho, segundo o Brasil, as Grandes Regiões e as Unidades da Federação. 2021c. IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?=&t=resultados>. Acesso em: 23 fev. 2023.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério da Economia. **Produção Agrícola Municipal (PAM)**: tabela 1 - Área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção do Brasil, das Grandes Regiões e das Unidades da Federação, segundo os produtos das lavouras temporárias. 2021d. IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-munici>. Acesso em: 23 fev. 2023.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Dados históricos anuais**: ano 2022 (automática). 2022c. INMET. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 30 jan. 2023.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Normais climatológicas do Brasil 1991-2020**: umidade relativa do ar (%) - anual. [202-]. Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Disponível em: [https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/1961-1990/precipitacao\\_acumulada\\_mensal\\_anual](https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/1961-1990/precipitacao_acumulada_mensal_anual). Acesso em: 16 fev. 2023.

CASCUDO, Oswaldo. **O controle da corrosão de armaduras em concreto**: inspeção e técnicas eletroquímicas. São Paulo; Goiânia: PINI; Editora UFG, 1997. 237 p. Livro teve coedição.

CASCUDO, Oswaldo; CARASEK, Helena (org.). **Durabilidade do concreto**: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. São Paulo: IBRACON, 2014. 615 p.

CASTRO, Eliane Kraus de. **Desenvolvimento de metodologia para manutenção de estruturas de concreto armado**. 1994. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 1994. Cap. 5. Disponível em: <http://www.pecc.unb.br/wp-content/uploads/dissertacoes/M94-4A-Eliane-de-Castro.pdf>. Acesso em: 07 fev. 2022.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **Durable concrete structures: design guide**. 2. ed. Lausanne: Thomas Telford, 1989. 120 p. ISBN: 978-0-7277-3549-2.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 1504-9**: Products and systems for the protection and repair of concrete structures — definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity — Part 9: general principles for the use of products and systems. Berlim: Deutsches Institut Für Normung (DIN), 2008.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **NP EN 1992-1-1 EUROCODE**: Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. [S.L.]: Instituto Português da Qualidade, 2010. 259 p.

CUI, Hongzhi; TANG, Waiching; LIU, Wei; DONG, Zhijun; XING, Feng. Experimental study on effects of CO<sub>2</sub> concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. **Construction and building materials**, [S.L.], v. 93, p. 522-527, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815006844>. Acesso em: 25 jan. 2023.

DROUET, Emeline; POYET, Stéphane; BESCOP, Patrick Le; TORRENTI, Jean-Michel; BOURBON, Xavier. Carbonation of hardened cement pastes: influence of temperature. **Cement and concrete research**, [S.L.], v. 115, p. 445-459, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.09.019>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884617310244?via%3Di> hub. Acesso em: 17 jan. 2023.

DYER, Thomas. **Concrete durability**. Boca Raton: CRC Press, 2014. 420 p. International Standard Book Number-13: 978-0-203-86211-7 (eBook - PDF).

EKOLU, S.O.. A review on effects of curing, sheltering, and CO<sub>2</sub> concentration upon natural carbonation of concrete. **Construction and building materials**, [S.L.], v. 127, p. 306-320, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.056>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816314969>. Acesso em: 25 jan. 2023.

EMMONS, Peter H. **Concrete repair and maintenance illustrated**: problem analysis; repair strategy; techniques. Kingston: R.S. Means, 1994. 320 p.

FIGUEIREDO, Enio Pazini; MEIRA, Gibson Rocha. Corrosión de armadura de estruturas de hormigón. In: INTERNACIONAL, Alconpat (org.). **Boletín técnico**. 6. ed. [S. L.]: Alconpat Brasil, 2013. (Procedimientos recomendables da ALCONPAT Internacional). Disponível em: <https://alconpat.org.br/boletim-tecnico-06-alconpat-brasil/>. Acesso em: 27 dez. 2022.

FRANCISCO, Wagner de Cerqueira e. **Divisão regional brasileira**: a divisão regional brasileira atual foi definida em 1970, mas inúmeras outras divisões foram realizadas ao longo da história do Brasil. [20--?]. Elaborado por Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/brasil/divisao-regional->

brasileira.htm#:~:text=Os%20crit%C3%A9rios%20utilizados%20para%20esse,Norte%20Oriental%2C%20Oriental%2C%20Meridional.. Acesso em: 02 fev

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 176 p. ISBN 85-224-3169-8.

GLASSER, F. P.; PEDERSEN, J; GOLDTHORPE, K.; ATKINS, M.. Solubility reactions of cement components with NaCl solutions: I. Ca(OH)<sub>2</sub> and C-S-H. **Advances In Cement Research**, [S.L.], v. 17, n. 2, p. 57-64, abr. 2005. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/adcr.2005.17.2.57>.

INSTITUTO DE ENGENHARIA. **DT 001/13 DTPC**: Diretrizes técnicas de inspeção predial. São Paulo: IE, 2013. 24 p. Disponível em: <https://www.institutodeengenharia.org.br/site/wp-content/uploads/2017/10/arqnot8007.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2022.

LAN, Xin; TANS, Pieter; K., W.. **Thoning**: trends in globally-averaged CO<sub>2</sub> determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. 2023. Elaborado por National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA. Disponível em: [https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gl\\_gr.html](https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gl_gr.html). Acesso em: 21 fev. 2023.

MEDEIROS, M. de; ISAIA, Geraldo Cechella. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (ed.). **Concreto**: ciência e tecnologia. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1-1712. ISBN v.1: 978-85-98576-16-9 e v.2: 978-85-98576-20-6

MEIRA, Gibson Rocha. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto**: fundamentos, diagnóstico e prevenção. João Pessoa: IFPB, 2017. 130 p.

MENDONÇA, Francisco; DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasi. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. ISBN 978-85 -86238-54-3.

MONTEMOR, M. F.; CUNHA, M.P; FERREIRA, M.G; SIMÕES, A.M. Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides. **Cement and concrete composites**, [S.L.], v. 24, n. 1, p. 45-53, fev. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465\(01\)00025-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465(01)00025-7). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946501000257>. Acesso em: 22 nov. 2022.

NARDINO, Cladilson; VALDÉS, Analiet Calvo; MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; PIERALISI, Ricardo. Previsão de vida útil de estruturas por modelos matemáticos e carbonatação natural. In: SIMPÓSIO PARANAENSE DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4., 2019, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: Alconpat, 2019. p. 300-311.

POTENZA, Renata Fragoso *et al.* **SEEG 9 (1990-2020)**: análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima. 2021. Elaborado por Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa -

SEEG. Disponível em: <http://seeg.eco.br/documentos-analiticos>. Acesso em: 21 fev. 2023.

PU, Yunhui *et al.* Accelerated carbonation technology for enhanced treatment of recycled concrete aggregates: a state-of-the-art review. **Construction and building materials**, [S.L.], v. 282, n. 1, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122671>.

RAUPACH, Michael; BÜTTNER, Till. **Concrete repair to EN 1504**: diagnosis, design, principles and practice. [S. L.]: CRC Press, 2014. 288 f

RIBEIRO, Daniel Vêras (org.). **Corrosão em estruturas de concreto armado**: teoria, controle e métodos de análise. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 272 p. ISBN 978-85-352-7548-3.

RIBEIRO, P. H. L. C.; MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R.; BARBOSA, N. P.. Realcalinização de concretos carbonatados: influência de características do material. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA Y RECUPERACIÓN DE ESTRUCTURAS, 6., 2010, Córdoba. **Anais [...]**. Córdoba: Cinpar, 2010. p. 1-18.

RICHARDSON, Mark G.. **Carbonation of reinforced concrete**: its causes and management. Dublin: Citis, 1988. 205 p.

RICHARDSON, Mark G.. **Fundamentals of durable reinforced concrete**. [S. L.]: CRC Press, 2002. 273 p. (Modern Concrete Technology). ISBN 0-203-22319-5.

SENE, Eustáquio de; MOREIRA, João Carlos. **Geografia geral e do Brasil, 7º ano**: ensino fundamental, anos finais. São Paulo: Scipione, 2018.

SHERMAN, Gary E. *et al.* **QGIS**. 2022. Versão 3.26.3 'Buenos Aires'. [S. L.]. Disponível em: [https://qgis.org/pt\\_BR/site/forusers/download.html](https://qgis.org/pt_BR/site/forusers/download.html). Acesso em: 08 out. 2022.

SILVA, Paulo Fernando Araújo. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana**. São Paulo: PINI, 1995. 152 p.

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (Brasil). Observatório do Clima. **Tabela geral de dados**: Brasil e estados. 2021. (SEEG). Disponível em: <http://seeg.eco.br/download>. Acesso em: 19 jun. 2022.

THOMAZ, Ércio. **Trincas em edifícios**: causas, prevenção e recuperação. São Paulo: Pini, 1989. 194 p. Publicado com coedição de IPT/EPUSP.

VAREJÃO-SILVA, Mário Adelmo. **Meteorologia e climatologia**. Recife: Mário Adelmo Varejão-Silva, 2006. 463 p. Versão digital 2.

WORLDOMETER. **Largest countries in the world (by area)**. [20--]. Disponível em: <https://www.worldometers.info/geography/largest-countries-in-the-world/>. Acesso em: 01 fev. 2022.

XU, Zuhua *et al.* Effects of temperature, humidity and CO<sub>2</sub> concentration on carbonation of cement-based materials: a review. **Construction and building Materials**, [S.L.], v. 346, set. 2022. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128399>. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822020591>. Acesso em:  
15 jan. 2023.