



**CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

ANTÔNIO WEMERSON DE ABREU LIMA

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO EM
PEÇAS DE PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO**

ANTÔNIO WEMERSON DE ABREU LIMA

ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO EM
PEÇAS DE PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao curso de Engenharia Civil
do Centro Universitário Christus, como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^a. Ma. Marisa Teófilo
Leitão

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Centro Universitário Christus - Unichristus
Gerada automaticamente pelo Sistema de Elaboração de Ficha Catalográfica do
Centro Universitário Christus - Unichristus, com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L732a Lima, Antônio Wemerson.
Análise da capacidade de captura de dióxido de carbono em
peças de pavimento intertravado de concreto / Antônio Wemerson
Lima. - 2021.
59 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro
Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil,
Fortaleza, 2021.

Orientação: Profa. Ma. Marisa Teófilo Leitão.

1. Carbonatação do concreto. 2. Captura de dióxido de
carbono. 3. Pavimento intertravado. I. Título.

CDD 624

ANTÔNIO WEMERSON DE ABREU LIMA

ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO EM
PEÇAS DE PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Christus como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: ____/____/____

BANCADA EXAMINADORA

Prof. Me. Marisa T. Leitão (Orientador)
Centro Universitário Christus

Prof. Me. Rafaela Fujita Lima
Centro Universitário Christus

Prof. Me. Mariana de Araújo Leite
Centro Universitário Christus

RESUMO

Para que houvesse o surgimento da vida, como a conhecemos, um processo foi e é fundamental na Terra, o Efeito Estufa. No entanto, com a crescente emissão de gases provocadas pelos humanos ao longo dos anos, sendo o principal, o dióxido de carbono (CO₂), o desequilíbrio gerado pela ação humana vem acarretando uma série de problemas decorrentes dessa maior concentração de Gases do Efeito Estufa (GEE) na atmosfera. Dessa forma, o presente trabalho pretende contribuir para a redução do gás mais relevante para o Efeito Estufa, o dióxido de carbono, por meio de peças de pavimento intertravado de concreto, que através da sua carbonatação, pode vir a ser uma alternativa viável para minimização dos impactos causados pelos seres humanos no meio ambiente. Para tanto, realizou-se uma abordagem sobre os principais conceitos acerca da emissão de CO₂ na atmosfera e seus impactos no meio ambiente, assim como fatores que influenciam a carbonatação em peças de concreto. Desse modo, com o objetivo de analisar a capacidade de captura do CO₂ por peças de pavimento intertravado, foram analisadas amostras sem tratamento de carbonatação e com tratamento, essa última se dividindo em duas frentes, a carbonatação natural e a carbonatação induzida. Foi observado que a resistência a compressão estimada das peças de intertravado do tipo 16 faces foi maior após a indução da carbonatação, o que não pôde ser observado nas peças retangulares. Não foi possível observar nenhuma relação entre a resistência e a profundidade de carbonatação das peças ensaiadas.

Palavras-chave: Captura de CO₂. Efeito Estufa. Pavimento intertravado. Indústria cimentícia. Carbonatação.

ABSTRACT

For the emergence of life, as we know it, a process was and is fundamental on Earth, the Greenhouse Effect. However, with the increasing emission of gases caused by humans over the years, the main one being carbon dioxide (CO₂), the imbalance generated by human action has caused a series of problems resulting from this higher concentration of Greenhouse Gases (GHG) in the atmosphere. Thus, the present work intends to contribute to the reduction of the most relevant gas for the Greenhouse Effect, carbon dioxide, by means of interlocking concrete pavement pieces, which through its carbonation, can become a viable alternative for minimization impacts caused by human beings on the environment. Therefore, an approach will be carried out on the main concepts about the emission of CO₂ in the atmosphere and its impacts on the environment, as well as factors that influence carbonation in concrete parts. Thus, in order to analyze the CO₂ capture capacity by interlocking pavement pieces, samples without carbonation treatment and with treatment will be analyzed, the latter being divided into two fronts, natural carbonation and induced carbonation. It was observed that the estimated compressive strength of the 16-face interlocking pieces was higher after the induction of carbonation, which cannot be observed in the rectangular pieces. It was not possible to observe any relationship between the resistance and the carbonation depth of the tested parts.

Keywords: CO₂ capture. Greenhouse effect. Interlocked floor. Cement industry. carbonation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático do Efeito Estufa na Terra.....	14
Figura 2 - Ciclo do carbono.....	17
Figura 3 - Fluxo da fabricação do cimento.....	19
Figura 4 - Captura de CO ₂ ao longo do ciclo de vida da construção devido a carbonatação natural.....	23
Figura 5 - Consequências mais relevantes da carbonatação do concreto	24
Figura 6 - Fatores que influenciam na carbonatação do concreto.....	25
Figura 7 - Representação esquemática da difusão de CO ₂	26
Figura 8 - Corpo de prova após a aspensão da solução de fenolftaleína.....	28
Figura 9 - Diagrama esquemático de um equipamento de análise termogravimétrica	29
Figura 10 - Exemplos de aplicação de pavimento intertravado.....	31
Figura 11 - Exemplo de peças de concreto Tipo I.....	33
Figura 12 - Exemplo de peças de concreto Tipo II.....	34
Figura 13 - Exemplo de peças de concreto Tipo III.....	34
Figura 14 - Exemplo de peças de concreto Tipo IV.....	34
Figura 15 - Tipos de assentamentos mais utilizados.....	35
Figura 16 - Fluxograma das etapas de metodologia.....	36
Figura 17 - Peças do Tipo I com 16 faces e retangulares	37
Figura 18 - Processo de indução de CO ₂ nas peças ensaiadas.....	38
Figura 19 - Máquina de classe I utilizada para determinação da resistência à compressão.....	40
Figura 20 - Ensaio de carbonatação com fenolftaleína.....	42
Figura 21 - Profundidade de carbonatação nos diferentes processos	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação da concentração de CO ₂ na atmosfera.....	15
Gráfico 2 - Emissões de CO ₂ da produção de cimento.....	19
Gráfico 3 - Emissão específica de CO ₂ de 1990 à 2014	20
Gráfico 4 - Brasil: PIB <i>per capita</i> e consumo de cimento <i>per capita</i> (1962 – 2015).....	22
Gráfico 5 - Projeção da produção de cimento no Brasil	22
Gráfico 6 - Efeito da área superficial na captura de CO ₂	27
Gráfico 7 - Desvio padrão dos resultados das resistências à compressão das peças de pavimento intertravado com 16 faces.....	45
Gráfico 8 - Desvio padrão dos resultados das resistências à compressão das peças de pavimento intertravado retangulares.....	48
Gráfico 9 - Resistência à compressão x carbonatação.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistência característica à compressão.....	33
Tabela 2 - Tipos de blocos e suas dimensões.....	37
Tabela 3 - Características dos grupos de peças de pavimento intertravado.....	39
Tabela 4 - Fator multiplicativo p	40
Tabela 5 - Ceficiente de Student	41
Tabela 6 - Resistência a compressão das peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces com carbonatação natural.....	43
Tabela 7 - Resistência a compressão das peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces com carbonatação induzida.....	44
Tabela 8 - Resistência a compressão das peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces sem carbonatação (protegidas)	44
Tabela 9 - Resistência a compressão das peças de pavimento intertravado de concreto retangulares com carbonatação natural.....	46
Tabela 10 - Resistência a compressão das peças de pavimento intertravado de concreto retangulares com carbonatação induzida.....	46
Tabela 11 - Resistência a compressão das peças de pavimento intertravado de concreto retangulares sem carbonatação (protegidas)	47
Tabela 12 - Profundidade de carbonatação das peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces com carbonatação natural.....	49
Tabela 13 - Profundidade de carbonatação das peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces com carbonatação induzida.....	49
Tabela 14 - Profundidade de carbonatação das peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces sem carbonatação (protegidas)	50
Tabela 15 - Profundidade de carbonatação das peças de pavimento intertravado de concreto retangulares com carbonatação natural.....	51
Tabela 16 - Profundidade de carbonatação das peças de pavimento intertravado de concreto retangulares com carbonatação induzida.....	52
Tabela 17 - Profundidade de carbonatação das peças de pavimento intertravado de concreto retangulares sem carbonatação (protegidas).....	52

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

GEE	Gases de Efeito Estufa
CO ₂	Dióxido de Carbono
OMM	Organização Meteorológica Mundial
UNFCCC	Conferência das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
IEA	Agência Internacional de Energia
CSI	Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento
WBCSD	Conselho Empresarial Mundial para Desenvolvimento Sustentável
H ₂ O	Água
CH ₄	Metano
N ₂ O	Óxido Nitroso
CFCs	Clorofluorcarbonos
O ₃	Ozônio
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
ppm	Partes por milhão
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
CSC	<i>Carbon Storage and Capture</i>
TG	Termogravimétrica
CPC-18	<i>Measurement of hardened concrete carbonation depth</i>
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
MPa	Mega Pascal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Problemática	12
1.2	Objetivo geral.....	12
1.3	Objetivos específicos.....	12
1.4	Estrutura.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Efeito Estufa.....	14
2.2	Indústria Cimentícia	18
2.3	Carbonatação no concreto	23
2.3.1	Fatores que influenciam na carbonatação do concreto.....	25
2.3.2	Determinação do pH.....	27
2.3.3	Análise termogravimétrica.....	29
2.4	Pavimentos intertravado	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	Materiais.....	37
3.2	Métodos.....	38
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	43
4.1	Resultados de resistência a compressão	43
4.2	Resultados de carbonatação.....	48
4.3	Relação resistência à compressão x carbonatação	53
5	CONCLUSÃO.....	54
	REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

Para que houvesse o surgimento da vida, como a conhecemos, um processo foi e é fundamental na Terra, o Efeito Estufa. Esse fenômeno natural é formado por gases presentes na atmosfera do nosso planeta, que formam uma camada na qual permitem a passagem de raios solares e impendem que parte do calor liberado se perda no espaço, favorecendo assim a temperatura na Terra para os seres vivos, sendo assim imprescindível para os seres vivos.

Porém, o fenômeno natural do Efeito Estufa tem sido prejudicado devido a ações que elevam as emissões de gases. Dentre os principais Gases de Efeito Estufa (GEE), há o dióxido de carbono (CO_2), que segundo Beiroz (2011) é responsável por cerca de 64% do GEE, decorrente do uso de combustíveis fósseis, queimadas e desmatamentos pelos seres humanos.

Após a Revolução Industrial, no século XVIII, a emissão do CO_2 começou a acontecer de forma acentuada, ocorrendo um desequilíbrio na concentração do gás na atmosfera, passando de 278 partes por milhão (ppm) no período pré-industrial para 407,8 ppm em 2018, de acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM) (2018). Consequente a essa intensificação do Efeito Estufa, segundo Xavier e Kerr, (2004) temos um aumento na temperatura média do planeta, desencadeando uma série de outros problemas, alguns como o derretimento da água congelada na cobertura de montanhas e em geleiras, elevação dos oceanos, aumento na quantidade de chuvas, alteração das características do ambiente em diferentes regiões, dentre outros.

Dessa forma, nas últimas décadas, se tem discutido sobre o efeito estufa e as consequências do mesmo para o meio ambiente, decorrente das mudanças climáticas cada vez mais perceptíveis aos seres vivos. Por meio de Conferências e Protocolos têm sido feitos acordos entre países, sendo o mais recente o Acordo de Paris, firmado na 21ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) adotado em 2015, no qual 195 países se comprometeram a reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa, com o objetivo de limitar o aquecimento global em $1,5^\circ\text{C}$ acima dos níveis pré-industriais (Possan,2019).

A indústria cimentícia é responsável por cerca de 7% das emissões de dióxido e carbono (CO_2) do planeta, seja pela descarbonatação da rocha calcária (CaCO_3) como pela utilização de combustíveis para aquecimento dos fornos de

clínquer, de acordo com Possan (2019). Isso porque a mesma produz material em larga escala. Só em 2017, a produção mundial de cimento totalizou 4.100 milhões de toneladas, sendo 55 milhões de toneladas apenas no Brasil, correspondendo a 1,3% da produção global (DNPM, 2018). Com isso, a indústria cimentícia desempenha um papel fundamental no crescimento de um país, onde a construção civil passa a ser parâmetro de crescimento econômico, de geração de emprego, desenvolvimento e inovações, tendo como desafio aliar a produção de cimento frente ao desenvolvimento do país e buscar soluções alternativas para redução das emissões de CO₂.

Em vista da busca por soluções alternativas para redução das emissões de CO₂, foi elaborada uma estratégia global chamada de *Cement Technology Roadmap* – Transição de Baixo Carbono na Indústria do Cimento, em 2009, produto de uma parceria entre a Agência Internacional de Energia (IEA) e a Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (CSI) do Conselho Empresarial Mundial para Desenvolvimento Sustentável (WBCSD), que segundo Visedo, Pechhio e Battagin (2019) descreviam uma série de alavancas para diminuir a quantidade de CO₂ emitida, no processo de fabricação do cimento, até 2050.

Contudo, a indústria cimentícia apesar de ser responsável pela liberação de CO₂, é também conhecida por capturar esse gás por meio da carbonatação de produtos à base de cimentos, fenômeno esse definido por Possan (2019) como sendo um processo de carbonatação no qual o dióxido de carbono (CO₂) reage com os produtos carbonatáveis presentes na matriz a base de cimento, formando o carbonato de cálcio (CaCO₃) e água (H₂O).

No entanto a carbonatação é prejudicial em peças de concreto armado, por causar a despassivação da armadura contida no interior do concreto, que resulta no processo de corrosão, reduzindo a vida útil da estrutura (Rigo, Oliveira e Possan, 2018, p. 3). Porém em contrapartida, em peças sem a presença de armadura podem haver benefícios com o fenômeno, como é o caso do pavimento intertravado.

Dessa forma, o pavimento intertravado surge como possível solução para a minimização dos impactos causados pela indústria cimentícia por ter a capacidade de capturar o carbono do meio ambiente. Além disso, o uso de pavimento intertravado é bastante usual e apresenta vantagens, onde de acordo com Muller (2005), são de fácil execução e exigem pouca manutenção, sem necessidade de equipamentos sofisticados, além de ser possível projetar rodovias desde o tráfego muito leve até o

muito pesado usando o mesmo tipo de revestimento, desde que respeitada a classe de resistência.

1.1 Problemática

Baseado na justificativa apresentada têm-se como problema para esta pesquisa a seguinte pergunta: Qual a capacidade de captura de CO₂ por peças de pavimento intertravado?

1.2 Objetivo geral

A partir da problemática da pesquisa, foi traçado como objetivo geral da pesquisa analisar a capacidade de captura do CO₂ por peças de pavimento intertravado.

1.3 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral da pesquisa seja alcançado, foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a resistência a compressão de peças de intertravados do tipo 16 faces e retangular;
- Verificar o nível de carbonatação das peças;
- Analisar a interferência da carbonatação na resistência à compressão das peças ensaiadas;

1.4 Estrutura

Dentro da conjuntura apresentada anteriormente, esse trabalho será composto em cinco seções, de modo a melhor subtrair o conteúdo. Na primeira seção, há a introdução, na qual apresenta os motivadores gerais do trabalho, com a justificativa, a problemática, os objetivos gerais e os objetivos específicos desse trabalho.

Na segunda seção, há referencial teórico, onde o principal objetivo é trazer um entendimento sobre a importância de se combater a quantidade desequilibrada de CO₂ na atmosfera, sendo essa seção dividida em sub tópicos, sendo eles: Efeito Estufa, Indústria Cimentícia, Fatores que influenciam a carbonatação, Análise da carbonatação e Pavimentação com Intertravado.

Na terceira seção, é mostrada a metodologia do trabalho, trazendo o tipo de pesquisa realizada, os instrumentos de coleta do CO₂ e análise de dados, o ambiente de pesquisa e os procedimentos adotados.

Já na quarta seção, serão abordados os resultados do estudo da quantidade de CO₂ absorvida pelo pavimento intertravado, assim como sua resistência antes e após o procedimento de carbonatação, definindo vantagens e desvantagens do processo.

Por fim, na quinta seção serão apresentadas as conclusões, sendo fornecidas as devidas sugestões e restrições encontradas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nessa seção será realizada uma revisão bibliográfica sobre os principais pontos relacionados ao tema principal da pesquisa. Dessa forma, será comentado sobre: Efeito Estufa, carbonatação, indústria cimentícia e pavimento intertravado.

2.1 Efeito Estufa

O Efeito Estufa é caracterizado por gases que são relativamente transparentes à radiação solar, onde são responsáveis por absorver parte da radiação emitida pela superfície terrestre, evitando que volte para o espaço, fazendo assim com que a temperatura seja maior do que caso não houvesse esse bloqueio pelos gases na atmosfera (Xavier; Kerr, 2004).

Figura 1 – Desenho esquemático do Efeito Estufa na Terra.



Fonte: Junges, A. L. *et. al* (2018, p. 133)

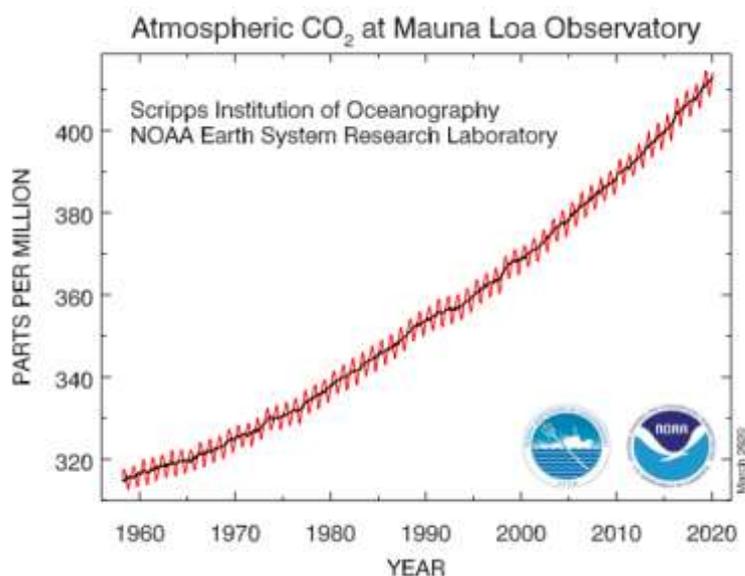
Conforme a Figura 1, Junges *et. al.* (2018) afirmam que cerca de 70% da radiação solar entra no sistema terrestre, sendo os outros 30% refletidos e compõe o albedo, na qual a Terra estando aquecida, reemite para o espaço radiação infravermelha, que por sua vez, é absorvida pelos Gases de Efeito Estufa. Em seguida, ao absorver a radiação infravermelha, os GEE a reemitem em todas as direções, sendo parte da radiação perdida no espaço e parte retida na baixa atmosfera.

Dessa forma, o Efeito Estufa é um fenômeno natural imprescindível para a vida na Terra, afirma Beiroz (2011), já que segundo o mesmo autor, é ela quem mantém o planeta aquecido, no qual sem esse fenômeno as temperaturas na Terra seriam abaixo dos 10°C negativos. Contudo, a partir da quantidade de GEE, passou a haver efeitos maléficos, devido ao aumento da temperatura no planeta, gerando vários problemas ambientais relacionados com o aquecimento global.

Segundo Santos (2000), os principais gases causadores do Efeito Estufa são o Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O), Clorofluorcarbonos (CFCs) e Ozônio (O₃), sendo o mais relevante o Dióxido de Carbono (CO₂), devido a maior emissão na atmosfera, proveniente da extração, transformação, transporte e uso final de combustíveis fósseis e os desmatamentos de florestas seguidas de queimadas.

De acordo com o Índice Anual de Gases de Efeito Estufa do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) atualizado em 2019, Alves (2020) afirma que a concentração de CO₂ disparou após a Revolução Industrial, onde antes a quantidade de dióxido de carbono emitido na atmosfera estava abaixo de 280 partes por milhão (ppm), passando a 310 ppm em 1950, 350 ppm em 1987, 400 ppm em 2015 e chegando a 411,4 ppm em 2019, conforme a Curva de Keeling no Gráfico 1 abaixo:

Gráfico 1 – Variação da concentração de CO₂ na atmosfera – Curva de Keeling: 1959-2019



Fonte: *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

Dessa forma, conforme Beiroz (2011) a ação humana vem acarretando em alterações desastrosas na sociedade, tendo como consequências:

- Derretimento de calotas polares: que irá causar um aumento no nível do mar e conseqüentemente provocará inundações e alagamentos de ilhas e cidades;
- Tufões, furacões, maremotos e enchentes com maior intensidade;
- Desvio de correntes marítimas com a elevação da temperatura nos mares – ocasionando a extinção de vários animais marinhos e diminuindo a quantidade de peixes nos mares;
- Mudança nos regimes de chuvas, onde haverá menos chuvas em determinadas regiões e mais elevadas em outras;
- Doenças poderão se alastrar por diversos territórios, onde hoje não são encontradas;
- Desertificação;
- Aumento das temperaturas;

Ainda de acordo com relatório especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (2019), o ritmo atual de aquecimento global é estimado em 1,00°C, onde até o momento, as emissões de GEE podem provocar um aquecimento adicional de 0,5°C nas próximas duas ou três décadas ou em uma escala de tempo secular, aumentando ainda mais os riscos associados ao clima.

Diante das consequências do Efeito Estufa, a comunidade científica tem trabalhado aos longos dos anos com medidas de combate ao desequilíbrio do dióxido de carbono na atmosfera, visto que os processos naturais para absorção do gás, como a fotossíntese de plantas, ciclo carbono-silicato e a absorção de CO₂ pelos mares e oceanos por processos físico-químicos e biológicos, se tornou insuficiente para o equilíbrio na atmosfera (Benitez, 2019).

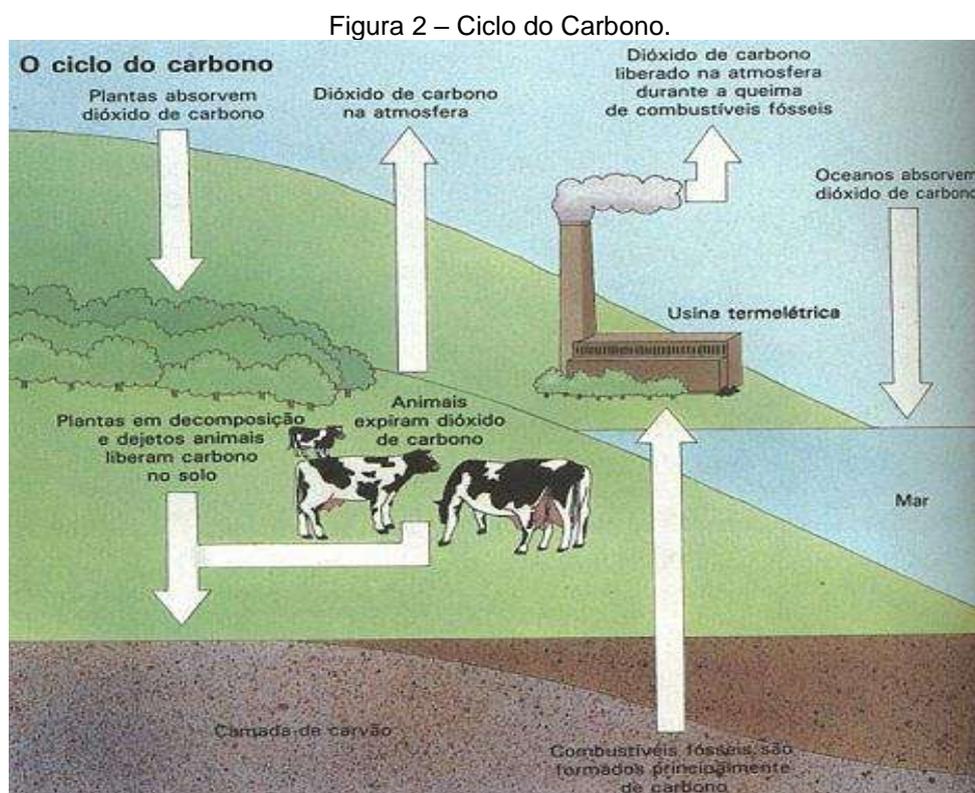
Isto posto, os cientistas observaram que o concreto é capaz de realizar a captura do CO₂ na atmosfera, por carbonatação, reavendo parte do que foi emitido na fabricação de seu componente, o cimento. No entanto, esse processo químico se torna prejudicial para peças de concreto armado, visto que parte da camada protetora que envolve o aço é retirada e a armadura sofre corrosão, reduzindo a vida útil da estrutura (Benitez, 2019). Raisdorfer et al. (2015), o efeito da carbonatação gera

mudanças químicas nos compósitos de cimento hidratado, provocando a despassivação da armadura, ocorrendo a perda de seção da armadura e a aderência desta com o concreto.

Por outro lado, segundo Antonio e Possan (2016), em estruturas não armadas, como os artefatos de concreto, revestimentos argamassados e outros, a carbonatação funciona como uma captura e estocagem do CO_2 da atmosfera, processo reverso a produção do cimento, podendo assim atuar como medida compensatória das emissões dos Gases de Efeito Estufa.

2.1.1 Processo de captura de carbono

A captura de carbono é o processo de remoção do gás carbônico da atmosfera, no qual ocorre principalmente de forma natural, por meio de florestas, oceanos e organismos que realizam a fotossíntese, ou seja, capturam o carbono e lançam o oxigênio na atmosfera. Esse processo natural é conhecido como o Ciclo do Carbono, como é possível ser visto na Figura 2 a seguir.



Fonte: "Ciclo do Carbono" em Só Biologia.

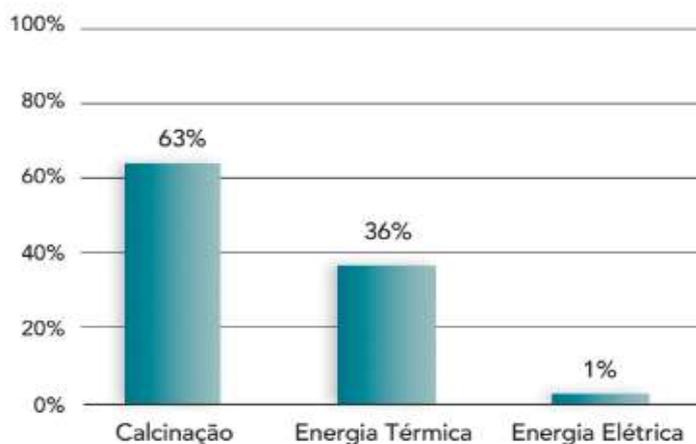
Dessa forma, Sedjo (2001) afirma que as florestas trocam CO₂ com o ambiente por meio de processos como fotossíntese, que combina o dióxido de carbono atmosférico com a água, liberando posteriormente oxigênio para a atmosfera e incorporando os átomos de carbono nas células das plantas, sendo assim capaz de reter volumes de carbono por longos períodos.

Além do ecossistema florestal ser importante para o equilíbrio de CO₂ na atmosfera, Nascimento (s.d) afirma que os oceanos também se mostram como um dos lugares mais promissores para o sequestro de carbono, já que cobrem a maior parte da superfície da Terra, por meio de macroalgas e o fitoplâncton que realizam fotossíntese para converter CO₂ em açúcares da mesma forma que as plantas terrestres. Ainda de acordo com Nascimento (s.d), atualmente, eles retiram da atmosfera cerca de 1/3 do carbono emitido pela atividade humana, aproximadamente dois bilhões de toneladas métricas por ano. Assim, o processo natural de fotossíntese, seja em ecossistemas terrestres ou aquáticos, ajuda a diminuir consideravelmente a quantidade de CO₂ na atmosfera.

Dessa forma, preservar os meios naturais, é fundamental para que haja o equilíbrio na Terra, no entanto, diante da quantidade de emissão de CO₂ emitida diariamente no planeta, novas ferramentas de captura de carbono vem sendo estudadas afim de comportar essa demanda de dióxido de carbono na atmosfera.

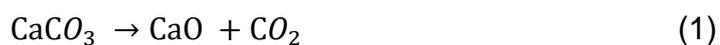
2.2 Indústria Cimentícia

A indústria cimentícia possui grande responsabilidade em relação a quantidade de CO₂ emitido na atmosfera, isso porque essa indústria é responsável por 7% do CO₂ emitido na atmosfera (Possan, 2019). Dessa quantidade, a produção do cimento é responsável por aproximadamente 90% das emissões do dióxido de carbono, onde a etapa de fabricação de clínquer se torna um emissor direto do CO₂, seja da queima de combustíveis fósseis, que detém de 30% a 40% das emissões diretas ou pelo processo de descarbonização (calcinação), com 60% a 70% restantes e outros 5% ocorrem indiretamente, resultante do consumo elétrico na indústria (CSI;SNIC, 2014), como demonstra o Gráfico 2 a seguir:

Gráfico 2 – Emissões de CO₂ da produção do cimento.

Fonte: ROADMAP (2019, p. 16).

Ainda sobre a fabricação do cimento, o processo de descarbonatação (calcinação) da rocha calcária, dar-se conforme a Equação 1 (Felix; Possan, 2018).



Onde:

- CaCO₃ = Carbonato de cálcio.
- CaO = Óxido de cálcio.
- CO₂ = Dióxido de carbono.

Dessa forma, as etapas que compõe o processo de produção do cimento para que se tenha o produto final esperado, têm início com a extração da matéria-prima seguido de processos de queima industrial e adições de materiais, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Fluxo da fabricação do cimento.

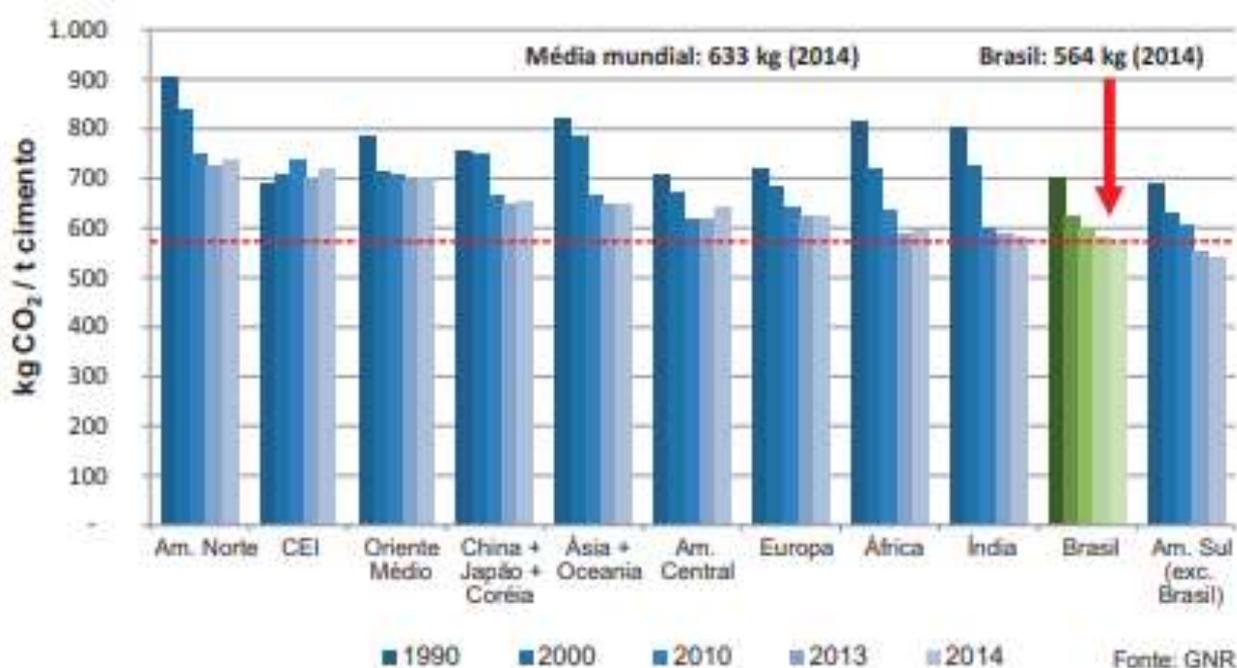


Fonte: Cimento Mauá (2017)

Na figura 3 é possível observar o fluxo de fabricação do cimento, no qual inicialmente há a extração do calcário e argila, o qual posteriormente são reduzidas suas dimensões pelo britador afim de se ter a adequação ao processo industrial, e assim é feita a preparação dessas matérias-primas pelo pré-homogeneizador. Em seguida, o moinho realiza a trituração do material, o transformando em “farinha”, passando para a fase de homogeneização, no qual será feita a queima pelo forno e pré-aquecedor até formar o clínquer, em que pode receber adições. Por fim, é realizada a moagem do cimento pelos separadores dos componentes minerais, sendo armazenado nos silos de cimento, saindo daqui ensacado, pronto para o uso.

Dessa forma, sabendo da quantidade de CO₂ emitida na atmosfera durante a produção do cimento, Visedo, Pechio e Battagin (2019) afirmam que no Brasil há um importante programa de infraestrutura a ser implementado, aliado ao aumento populacional, o que deverá gerar enorme desafio a ser enfrentado, como produzir o cimento necessário ao desenvolvimento do país buscando ao mesmo tempo soluções para reduzir ainda mais as emissões de CO₂. Possan *et.al.* (2012) afirma que o Brasil é um dos países que emite menor quantidade de CO₂ por tonelada de cimento produzida, tornando-se referência mundial, como é possível observar no Gráfico 3, onde esteve abaixo da média mundial em 2014.

Gráfico 3 – Emissão Específica de CO₂ de 1990 a 2014.

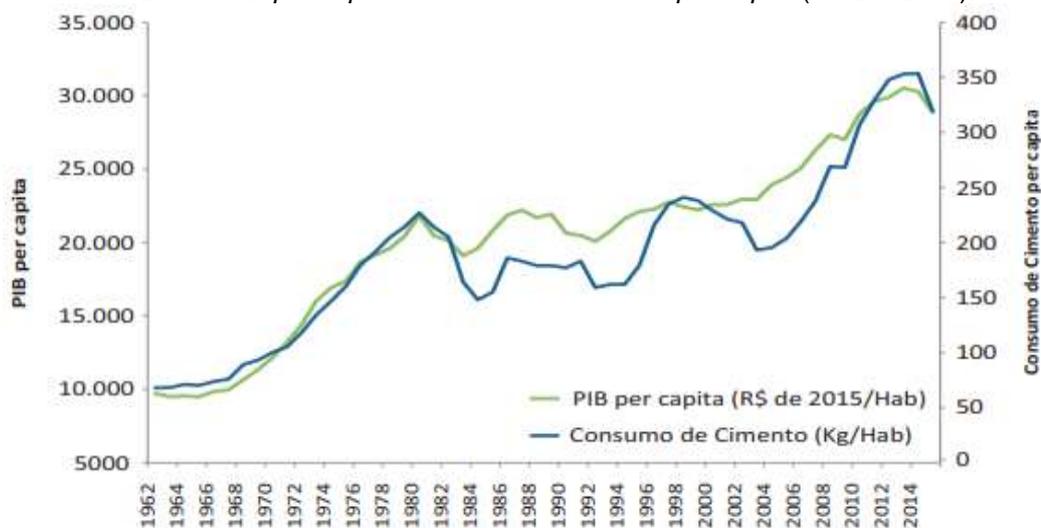


Fonte: WBCSD/GNR, 2016 (Adaptado por Visedo, Pecchio e Barragin, 2019)

Segundo Visedo, Pecchio e Battagin (2019), diante do desafio apresentado, foi criada a *Cement Technology Roadmap – Brasil*, fruto de uma parceria reeditada entre as duas entidades brasileiras da indústria do cimento, o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) e a Associação Brasileira de Cimento Portland, com a Agência Internacional de Energia (IEA) e a Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (CSI), na qual as soluções estudadas se concentram em quatro principais pilares, sendo eles: uso de matérias-primas alternativas, por meio do uso de adições e substitutos do clínquer, do uso de combustíveis alternativos, por meio da utilização de da troca de combustíveis fosseis, de maior emissão, por biomassas e resíduos com poder energético, do uso de medidas de eficiência energética, mediante investimento em linhas de equipamentos de menor consumo térmico e/ou elétrico e do uso de tecnologias inovadoras e emergentes, por meio do incentivo a pesquisas e desenvolvimentos de tecnologias, como a captura de CO₂.

Ainda assim, é válido ressaltar que o cimento é fundamental na cadeia produtiva da indústria da construção, estando diretamente ligado ao seu desenvolvimento, por ser um componente essencial do concreto, que por sua vez, é fundamental para o crescimento da infraestrutura de um país, sendo utilizado para construção de estradas, hospitais, escola, pontes, habitações, dentre outros, desempenhando assim papel importante na economia (SNIC, 2017).

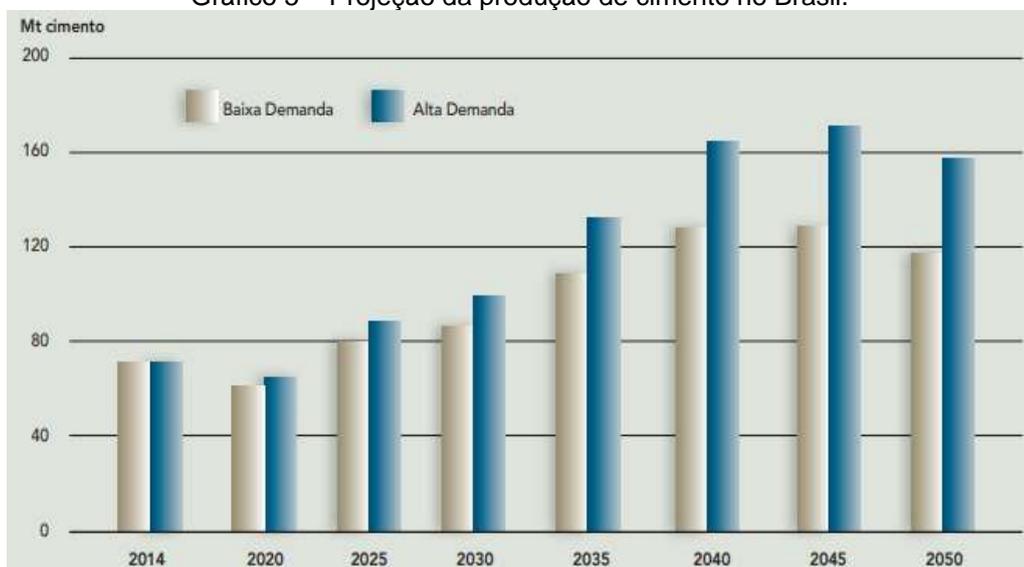
Conforme Pacheco *et. al.* (2019) a indústria da construção é o setor que emprega 7% da população mundial, no qual 2/5 de tona a energia do mundo é utilizada e consome 50% do total de recursos naturais da crosta terrestre. Dessa forma, Guimarães e Visedo (2019) afirmam que ao observar a relação entre a renda, medida pelo PIB, e o consumo de cimento para um conjunto variados de países, incluindo o Brasil, demonstra, que deveras, essa variável está completamente correlacionada com o consumo do cimento, sendo fortemente influenciados pelos ciclos econômicos, conforme o Gráfico 4, que mostra essa relação no Brasil.

Gráfico 4 – Brasil: PIB *per capita* e consumo de cimento *per capita* (1962 – 2015).

Fonte: SNIC e IPEA,2016.

Ainda de acordo com Guimarães e Visedo (2019), o Roadmap Tecnológico do Cimento, lançado em 2019 pela indústria de cimento brasileira, considera dois cenários para o crescimento do PIB até 2050: baixa demanda e alta demanda (Figura 7). No qual, conforme Guimarães e Visedo (2019), é possível observar no Gráfico 5, um crescimento acentuado da demanda por cimento no Brasil entre 2014 e 2050 nos dois cenários, onde essa alavancada está fortemente condicionada ao crescimento de renda do país, destacando a redução do déficit habitacional, o aumento no investimento em infraestrutura, uma maior eficiência no uso do produto no longo prazo e as mudanças demográficas na população nas próximas décadas.

Gráfico 5 – Projeção da produção de cimento no Brasil.



Fonte: Roadmap Tecnológico do Cimento,2019.

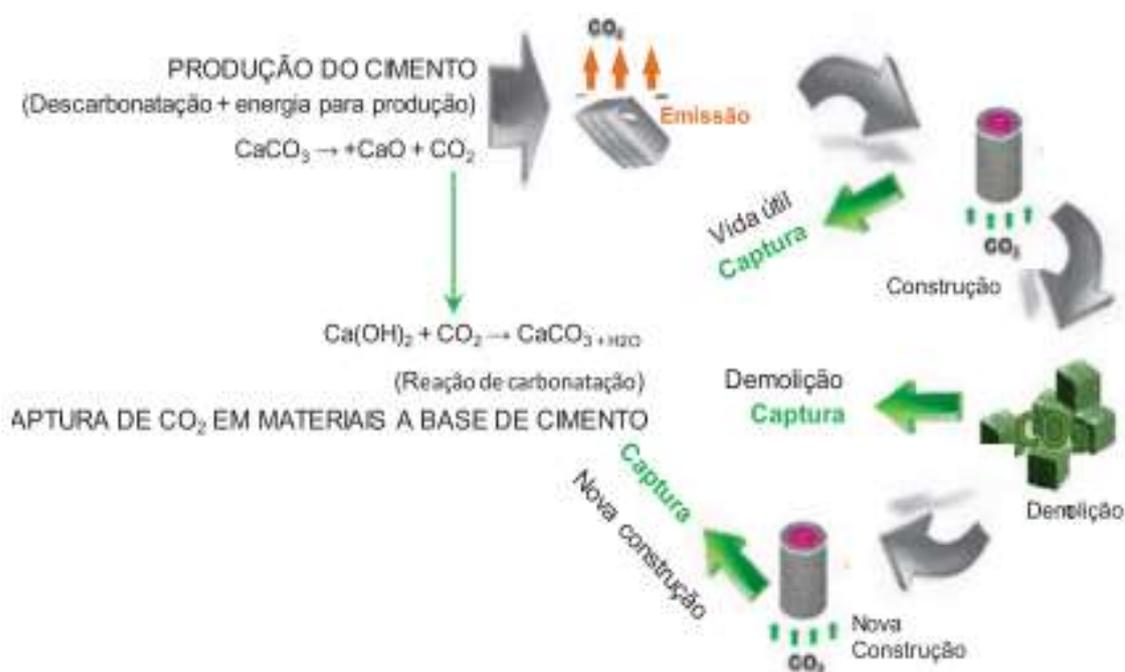
2.3 Carbonatação no concreto

A indústria cimentícia na busca por soluções para mitigar/reduzir as suas emissões de CO₂ na atmosfera, indo de encontro ao Acordo de Paris, tem incentivado o estudo de várias formas de captura e estocagem de carbono, como o *Carbon Storage and Capture* (CSC). Essa tecnologia surgiu com potencial de uso pela indústria cimentícia, seguindo dessa forma a indicação do Roadmap tecnológico do cimento, segundo Possan (2019).

Desse modo, Possan (2019) estabelece que existem duas formas de se realizar a captura e estocagem do carbono, sendo uma delas a de forma direta, na qual compreende a captura do CO₂ oriundo de processos industriais e da queima de combustíveis fósseis antes de chegar a atmosfera. A segunda forma, denominada de indireta, a qual terá maior ênfase neste trabalho, se dá pelo processo de sequestro de CO₂, que pode ocorrer por meio da carbonatação de matérias cimentícios, como por exemplo o concreto.

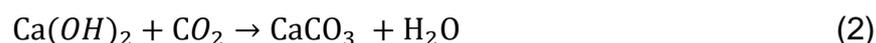
De acordo com Possan (2019), a captura de CO₂ em materiais cimentícios, ocorre ao longo da vida útil da edificação e continua após sua demolição, conforme o ciclo da Figura 4.

Figura 4 – Captura de CO₂ ao longo do ciclo de vida da construção devido a carbonatação natural.

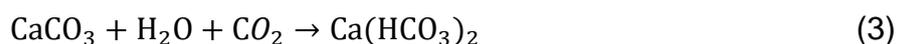


Fonte: Possan, 2019.

Rigo (2019) afirma que o processo de carbonatação do concreto se trata de uma reação físico-química entre o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente no concreto com o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera, sendo o último um gás de caráter ácido, que ao reagir com os hidróxidos, de caráter básico, resulta na formação de sal e água, conforme a Equação 2.



Segundo Couto (2017), com o excesso de CO_2 , a reação irá continuar havendo, formando o bicarbonato de cálcio ($\text{Ca(HCO}_3)_2$), tendo assim uma velocidade de difusão a maior solubilidade do ($\text{Ca(HCO}_3)_2$) ser bem maior que do CaCO_3 , conforme a Equação 3. É válido ressaltar que Possan (2010) afirma que o hidróxido de potássio (KOH) e o hidróxido de sódio (NaOH) também são carbonatáveis.



Para o concreto armado a carbonatação trata-se de um mecanismo deteriorante decorrente da penetração do CO_2 no interior do mesmo por meio da sua rede dos poros ou fissuras (Capraro, 2019). Tal processo ocasiona uma série de consequências para os materiais cimentícios, no qual Perim (2013) afirma que as mais relevantes são a redução do pH, a mudança de porosidade, o aumento de massa e a retração por carbonatação, sendo sistematizadas, a seguir, na Figura 5.

Figura 5 – Consequências mais relevantes da carbonatação do concreto.

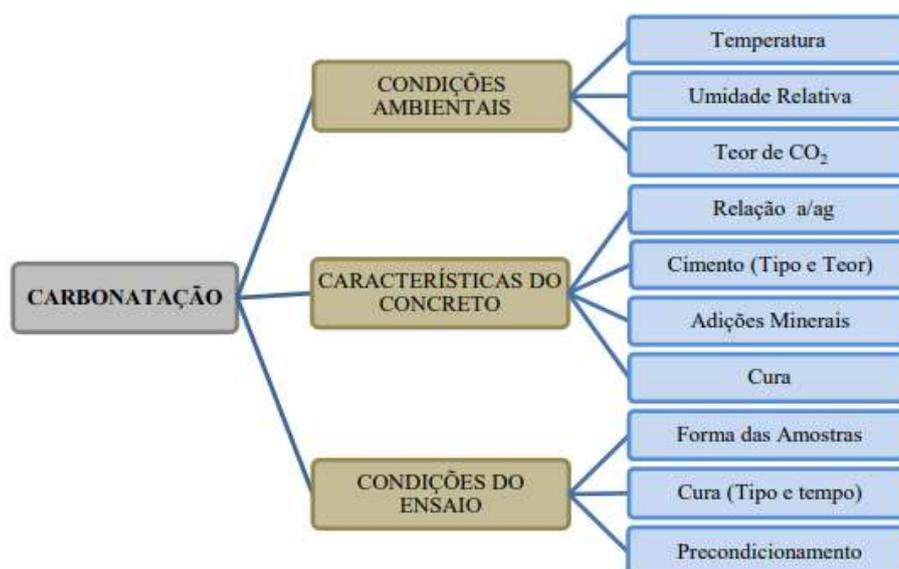


Fonte: Perim, 2013.

2.3.1 Fatores que influenciam na carbonatação do concreto

A carbonatação do concreto é dependente de vários fatores que afetam a reação, tendo um vasto referencial teórico acerca desses fatores, nos quais são destacados por Tasca (2012), Werle et al. (2011), Perim (2013) e Santis et al. (2017) o tipo e quantidade de cimento, relação água/cimento, qualidade de execução do concreto e cura, concentração de CO₂ no ambiente, temperatura e a umidade relativa do ar. Esses e outros fatores podem ser visualizados na Figura 6.

Figura 6 – Fatores que influenciam na carbonatação do concreto.



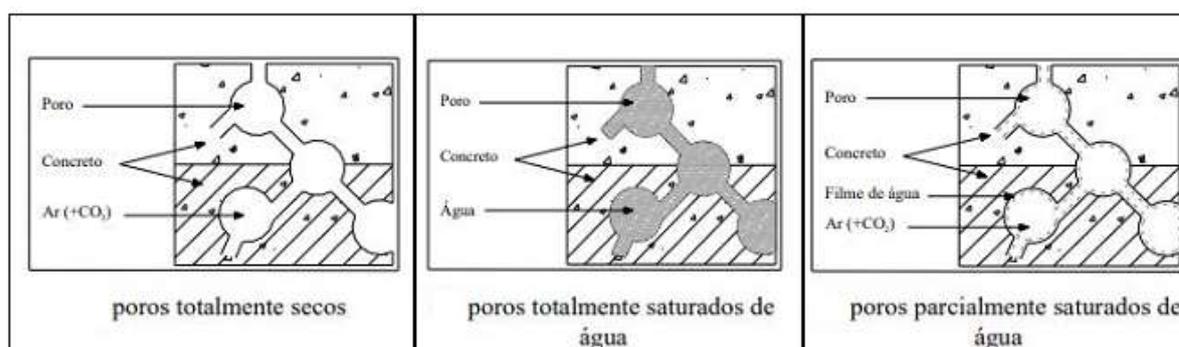
Fonte: Perim, 2013.

Sobre o tipo e quantidade de cimento, Tasca (2012) comenta que a maior reserva alcalina do cimento empregado, tende a ser proporcional ao avanço da carbonatação. Já sobre a relação água/cimento é possível, por meio de Ferreira (2013) compreender que afeta diretamente as propriedades microestruturais do concreto, devido ao aumento da porosidade do concreto à medida que essa relação aumenta, resultando numa maior velocidade de carbonatação. Quanto a qualidade de execução do concreto e cura, Tasca (2012) afirma que é um fator preponderante para a durabilidade, visto que uma compactação deficitária pode gerar falhas e uma cura mal executada pode ocasionar uma má hidratação do concreto, que é essencial para se atingir a sua resistência.

No que se refere as condições ambientais, Santis et. al (2017) afirma que quanto maior a diferença entre a concentração de CO_2 nos meios externos e internos, maior a penetração do gás no concreto, ou seja, maior a sua velocidade de carbonatação. Tasca (2012) também inclui a temperatura como um fator que influencia indiretamente no fenômeno de carbonatação, pois a mesma contribui para o aumento da velocidade das reações, incrementando o consumo da reserva alcalina no interior do concreto.

Além disso, Tasca (2012) afirma que a umidade relativa do ar é um importante fator que afeta a carbonatação do concreto, pois a difusão do CO_2 através do concreto, é função do teor de umidade nos poros do material. Dessa forma, Bakker (1988), conclui que quando o concreto não possui água nos seus poros, a difusão do CO_2 ocorre normalmente, no entanto não há reação com os compostos do cimento hidratado pela falta de solubilização. Já nos poros totalmente saturados, a carbonatação praticamente não ocorre devido a baixa taxa de difusão do CO_2 na água. Porém, quando os poros são parcialmente saturados, a difusão do CO_2 é facilitada, pois as tensões superficiais entre a parede sólida e as moléculas solubilizadas de CO_2 tendem a acentuar o processo de difusão. Essa difusão de CO_2 pode ser visto na Figura 7, a seguir.

Figura 7 – Representação esquemática da difusão de CO_2 .

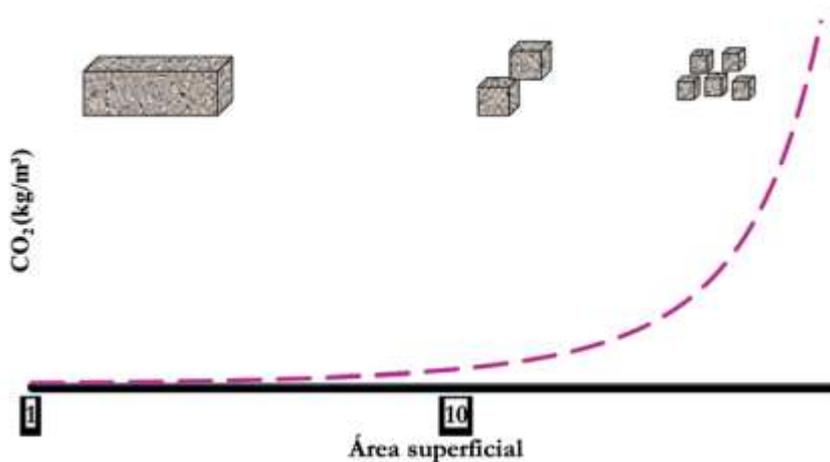


Fonte: Adaptado de Bakker (1988).

Ainda segundo Possan (2019), há outro fator que também tem influência na captura de CO_2 e conseqüentemente a carbonatação, sendo ele a área superficial do concreto, ou seja, quanto maior essa área, maior a captura do CO_2 , havendo assim uma relação metros quadrados/metro, conforme o Gráfico 6. Possan (2019) afirma que determinar essa relação é o principal parâmetro para os cálculos de captura de

CO₂ dos materiais à base de cimento, já que a carbonatação do concreto ocorre do exterior para o interior do material, de forma lenta, quando exposto em condições naturais de CO₂.

Gráfico 6 – Efeito da área superficial na captura de CO₂.



Fonte: Possan, 2019.

Existem diversos métodos para que seja realizada a medição da carbonatação, de modo a caracterizar o concreto. Entre esses métodos está a difração de raio-X, termogravimétrica (TG), determinação de pH por meio de titulação, espectrofotometria no infravermelho, dentre outros. No entanto, receberão destaque no presente estudo, os métodos de determinação do pH e o de análise termogravimétrica detalhados nos itens a seguir.

2.3.2 Determinação do pH

Tasca (2012) afirma que o método de determinação do pH é o mais utilizado devido sua facilidade de execução e baixo custo, sendo necessária uma solução para a aplicação do ensaio, onde a mais empregada é a fenolftaleína, esse que por sua vez é um composto orgânico, C₂₀H₁₄O₄, comumente utilizado para classificar as substâncias em básicas ou ácidas, apresentando uma coloração vermelho-carmim ou rosa, para pH superiores a 9,8 e permanecendo incolor para pH inferiores a 9. De acordo com Oliveira (2017), o pH ideal do concreto está em torno de 13, caso o contrário esse pH pode ser alterado por ações de agentes agressivos como o CO₂ ou também a presença de íons cloreto, que quando atingirem a

profundidade da armadura ocorre a corrosão do aço. É possível observar esse fenômeno na Figura 8 a seguir.

Figura 8 – Corpo de prova após a aspersão da solução de fenolftaleína.



Fonte: Tasca, 2012.

Sendo assim, como o pH ideal para o concreto fica em torno de 13, a parte da estrutura ensaiada que apresenta a coloração vermelho-carmim significa não apresenta carbonatação. No entanto, na região onde o concreto permanece incolor significa que o pH está abaixo de 9,0, estando assim a região carbonatada.

Seu ensaio é normalizado pela RILEM (1988), sob a designação CPC - 18 *Measurement of hardened concrete carbonation depth*, no qual descreve o procedimento para realização do método, sendo executado pela utilização de uma solução com 1% de fenolftaleína, em 70% de álcool etílico e 29% de água destilada, onde inicialmente é borrifado, na forma de névoa, o indicador em uma região recém-fraturada, região essa que não pode ter sido carbonatada ao reagir com o CO₂ do ar, em seguida, após a secagem, é permitido a utilização de uma resina incolor, sem brilho, para a fixação da cor do indicador. A norma recomenda que seja aguardado um prazo de 24 horas para a medição da profundidade de carbonatação, pois é mais fácil observar os limites das faces carbonatadas e não carbonatadas. Tasca (2012) afirma que a leitura do ensaio deve ser realizada com equipamento de precisão, não devendo ser empregada em superfície serrada, molhada e com presença de pó, e sim por meio de fratura por percussão ou compressão diametral.

É válido ressaltar que o método de determinação do pH com uso da fenolftaleína apresenta desvantagens, conforme Saldanha (2013), onde ele afirma que em zonas de pH com valor igual a 9, o indicador pode indicar uma profundidade

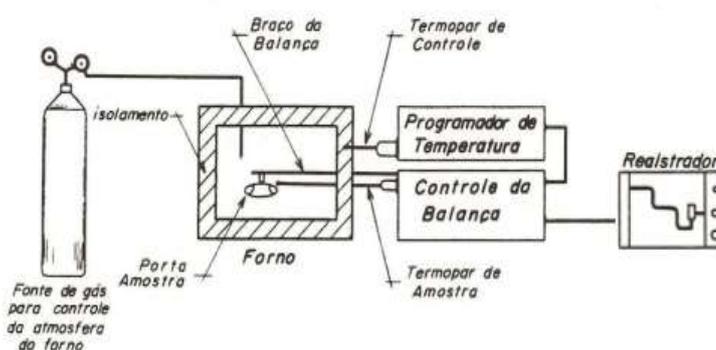
não correspondente a um concreto carbonatado ou parcialmente carbonatado. Já quando o indicador se torna rosa, indica elevada concentração de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mas poderá não indicar a ausência total de carbonatação, porque o método não difere se a redução do pH foi provocada por carbonatação ou por outros gases ácidos.

2.3.3 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TG) é uma técnica que “têm como intuito quantificar, através do percentual de perda de massa *versus* temperatura, a proporção carbonatada das amostras expostas à ação do CO_2 ” (RIGO, 2019, p.34).

Denari e Cavalheiro (2012) afirmam que o equipamento utilizado para a realização do ensaio termogravimétrico é composto basicamente pela termobalança, instrumento esse que permite a pesagem contínua de uma amostra à medida que é aquecida ou resfriada, sendo que esse equipamento pode mudar de um fabricante para outro, mas os fundamentos de todos eles são os mesmos. Os principais componentes de uma termobalança são: balança registradora, forno, suporte de amostra e sensor de temperatura, programador de temperatura do forno, sistema registrador e controle da atmosfera do forno, como mostra a Figura 9, na qual apresenta um diagrama de um equipamento termogravimétrico genérico.

Figura 9 – Diagrama esquemático de um equipamento de análise termogravimétrica.



Fonte: Danari e Cavalheiro, 2012.

Segundo Saldanha (2013), a análise termogravimétrica apresenta resultado de profundidade de carbonatação superior e mais preciso comparando com o resultado apresentado por fenolftaleína. A generalidade do autor refere ao resultado

de profundidade de carbonatação superior em medições feitas com técnicas distintas da executada através de indicadores químicos.

Na análise da carbonatação através da termogravimetria, Campos (2019) afirma que as reações provenientes da carbonatação acabam consumindo a portlandita e deterioram os compostos hidratados (C-S-H, aluminatos e compostos de magnésio) na formação do carbonato de cálcio. Neste procedimento de análise da carbonatação, são retiradas amostras de concreto com profundidades conhecidas, nos quais são moídas e são submetidas a um aumento contínuo de temperatura até chegar entre 1000°C e 1100°C em uma termobalança.

Os fatores mais comuns que podem afetar as medidas da análise termogravimétrica estão representados no Quadro 1, podendo esses serem divididos em fatores instrumentais e fatores da amostra, conforme Denari e Cavalheiro (2012). Rigo (2019), por sua vez, afirma que para o estudo de captura de CO₂, deve-se ter cuidado especial no manuseio, estocagem e preparo de amostras, com o intuito de evitar a pré-carbonatação.

Quadro 1 – Principais fatores que podem afetar as medidas da análise termogravimétrica.

Fatores Instrumentais	Fatores da Amostra
Razão de aquecimento do forno	Quantidade de amostra
Velocidade de registro (papel)	Solubilidade dos gases envolvidos
Atmosfera do forno	Tamanho das partículas e calor de reação
Geometria do suporte da amostra	Empacotamento da amostra
Sensibilidade da balança	Natureza da amostra
Composição do suporte de amostra	Condutividade térmica

Fonte: Adaptado de Denari e Cavalheiro (2012).

Entretanto, Denari e Cavalheiro (2012) complementam que há diversos outros fatores que podem provocar tais alterações, razão pela qual se deve reportar o maior número possível de detalhes quanto ao experimento realizado, incluindo informações sobre o histórico da amostra, sempre que possível.

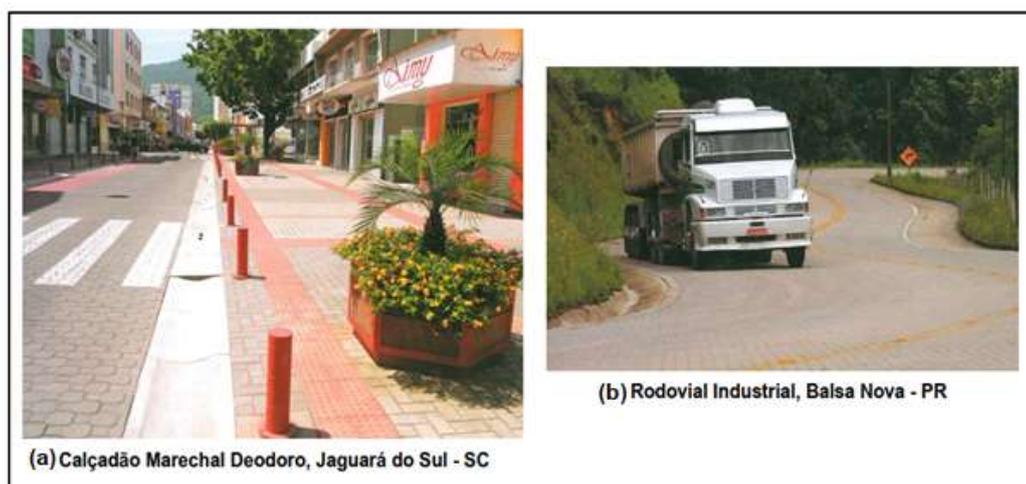
A carbonatação apesar de ser prejudicial ao concreto armado, ela não possui influência negativa em concretos não armados, sendo então uma boa alternativa para o processo de captura de carbono indireto. Com isso, o pavimento intertravado surge como uma alternativa, pois o mesmo é amplamente utilizado na

construção civil, na construção de pavimentos, logo se tornando um potencial para a captura de CO₂, já que o mesmo atende a alguns fatores que influenciam na carbonatação, sendo eles a composição química, a umidade relativa, a temperatura, a cura e o teor de CO₂.

2.4 Pavimentos intertravado

Silva (2016) afirma que a origem do pavimento intertravado é referida na Mesopotâmia há quase 5.000 anos A.C. e muito utilizado na Itália desde 2.000 A.C. Todavia, foi logo após a segunda guerra mundial que os pisos passaram a ser produzidos em escala, principalmente na Alemanha, tomando impulso na década de 70, quando chegaram ao Brasil. Suas muitas opções de formato, padrões, cores e matizes, que permitiram diversas possibilidades estéticas, asseguraram ao pavimento intertravado êxito em praças, parques, jardins, calçadas (Figura 10a), estacionamentos, vias urbanas, pátios, depósitos, galpões industriais, estradas (Figura 10b), acostamentos, entre outros (FIORITI et al., 2007).

Figura 10 – Exemplos de aplicação de pavimento intertravado.



Fonte: Adaptado da ABCP (2005).

De acordo com a NBR 9781/13, que rege especificação e métodos de ensaio, elaborada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, as peças de concreto correspondem a componentes pré-moldados de concreto, utilizados como materiais de revestimentos em pavimento intertravado.

Por sua vez, o pavimento intertravado de concreto, também conhecido como *paver*, piso intertravado, bloquetes, pavimento drenante, bloco intertravado, dentre outros, é definido pela norma NBR 9781/13 como sendo um pavimento flexível cuja estrutura é composta por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por camada de revestimento constituída por peças de concreto justapostas a uma camada de assentamento e cujas juntas entre as peças, são preenchidas por material de rejuntamento e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção.

Conforme Carvalho et al. (2018), o piso intertravado de concreto passou a ser mais utilizado na construção de pavimentos devido sua versatilidade e simplicidade de aplicação. Além disso, existem várias outras vantagens na utilização de pavimento intertravado, conforme a ABCP (2005):

- Refletem melhor a luz do que outros tipos de superfície;
- Proporcionam ao usuário e ao meio ambiente excepcional conforto térmico;
- Não são escorregadios, mesmo sob chuva, ou seja, maior permeabilidade e superfície antiderrapante;
- Sendo removíveis, facilitam o acesso a instalações de serviços subterrâneos, sem perda de blocos por quebra ou dano;
- Usando-se blocos de cores distintas é possível não somente marcar a posição das redes de serviço como, ainda, obter variados e agradáveis efeitos estéticos.
- Facilidade de estocagem;
- Grande capacidade estrutural;
- Utilização imediata do pavimento;
- Pouca ou nenhuma manutenção.

Contudo, como os blocos intertravados são comumente aplicados em pavimentação para o tráfego de veículos e pedestres, as propriedades mecânicas dos mesmo são de importância, na qual a norma NBR 9781:2013 estabelece a resistência necessária à compressão das peças, sendo previsto de 35 MPa para o tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais de linha, ou de 50 MPa quando houver tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Resistência característica à compressão.

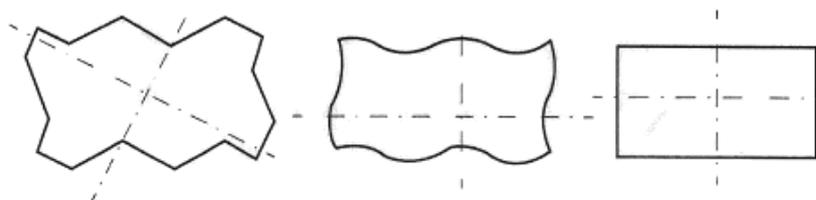
Solicitação	Resistência característica à compressão (f_{pk}) aos 28 dias (MPa)
Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha	≥ 35
Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	≥ 50

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9781 (2013).

Ainda de acordo com a ABNT NBR 9781:2013, os blocos intertravados, podem ser classificadas em quatro grupos, a saber:

- Tipo I: Peças de concreto com formato próximo ao retangular, com relação comprimento/largura igual a dois, que se arranjam entre si nos quatro lados e podem ser assentadas em fileiras ou em espinha de peixe. A Figura 11 exemplifica melhor o formato das peças do tipo I.

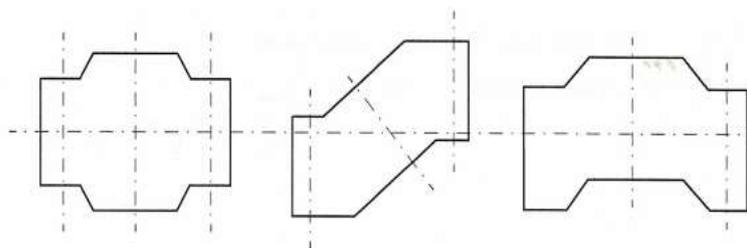
Figura 11 – Exemplos de peças de concreto do Tipo I.



Fonte: ABNT NBR 9781 (2013).

- Tipo II: Peças de concreto com formato único, diferente do retangular e que só podem ser assentadas em fileiras. Elas somente podem ser montadas em fileiras travadas e suas dimensões são, usualmente, 20 cm de comprimento por 10 cm de largura (ABCP, 2010). A Figura 12 ilustra melhor as peças do tipo II.

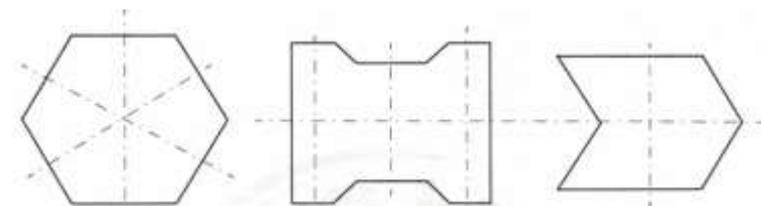
Figura 12 – Exemplos de peças de concreto do Tipo II.



Fonte: ABNT NBR 9781 (2013).

- Tipo III: Peças de concreto com formatos geométricos característicos, como trapézios, hexágonos, triédros etc., com pesos superiores a 4 kg. Pelo seu peso e tamanho, não pode ser apanhado com uma mão só, tendo suas dimensões de, pelo menos, 20 x 20 cm (ABCP,2010). A Figura 13 apresenta o tipo III.

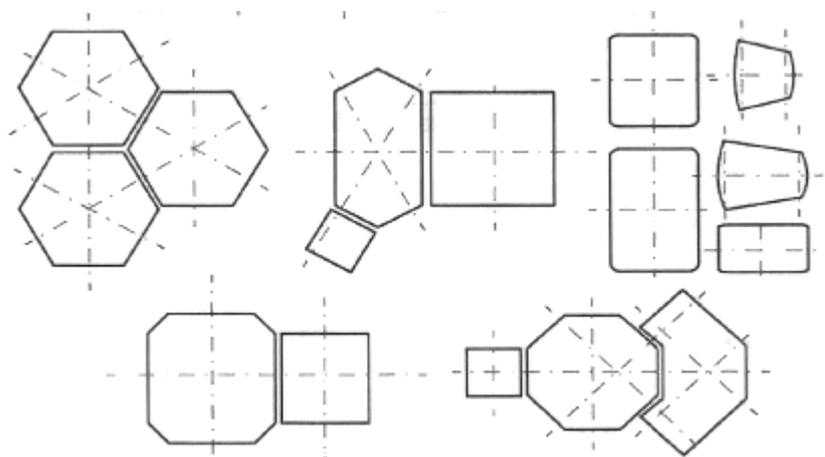
Figura 13 – Exemplos de peças de concreto do Tipo III.



Fonte: ABNT NBR 9781 (2013).

- Tipo IV: Conjunto de peças de concreto de diferentes tamanhos, ou uma única peça com juntas falsas, que podem ser utilizadas com um ou mais padrões de assentamento. A Figura 14 apresenta o tipo IV.

Figura 14 – Exemplos de peças de concreto do Tipo IV.

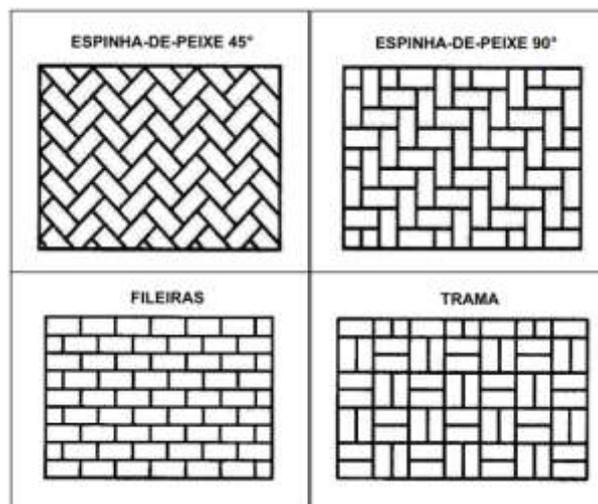


Fonte: ABNT NBR 9781 (2013).

Cruz (2003) afirma que ainda há outro tipo de peça de pavimento intertravado de concreto, sendo a do tipo grelha, que são utilizadas em áreas gramadas e não possuem nenhum tipo de intertravamento, sendo utilizadas quando são requeridos efeitos arquitetônicos e permeabilidade, como em calçadas e área de entrada de garagem.

Todavia, ainda de acordo com Cruz (2003), não existe um consenso entre os pesquisadores acerca da influência do formato das peças no desempenho do pavimento, sendo que há concordância sobre o fato de que a disposição das peças no assentamento interfere diretamente da durabilidade do mesmo. Dessa forma, Leal (2018) estabelece que os modelos mais utilizados de assentamento são: espinha-de-peixe (a 45° e 90°), em fileira e a trama. A Figura 15 apresenta esses assentamentos mais empregados na disposição das peças.

Figura 15 – Tipos de assentamentos mais utilizados.



Fonte: Adaptado de Cruz (2003).

Dessa forma, com essa sessão foi possível revisar os principais assuntos relacionados ao tema e verificar as relações entre eles, mostrando que o piso intertravado tem uma boa possibilidade de influenciar positivamente a captura de CO₂.

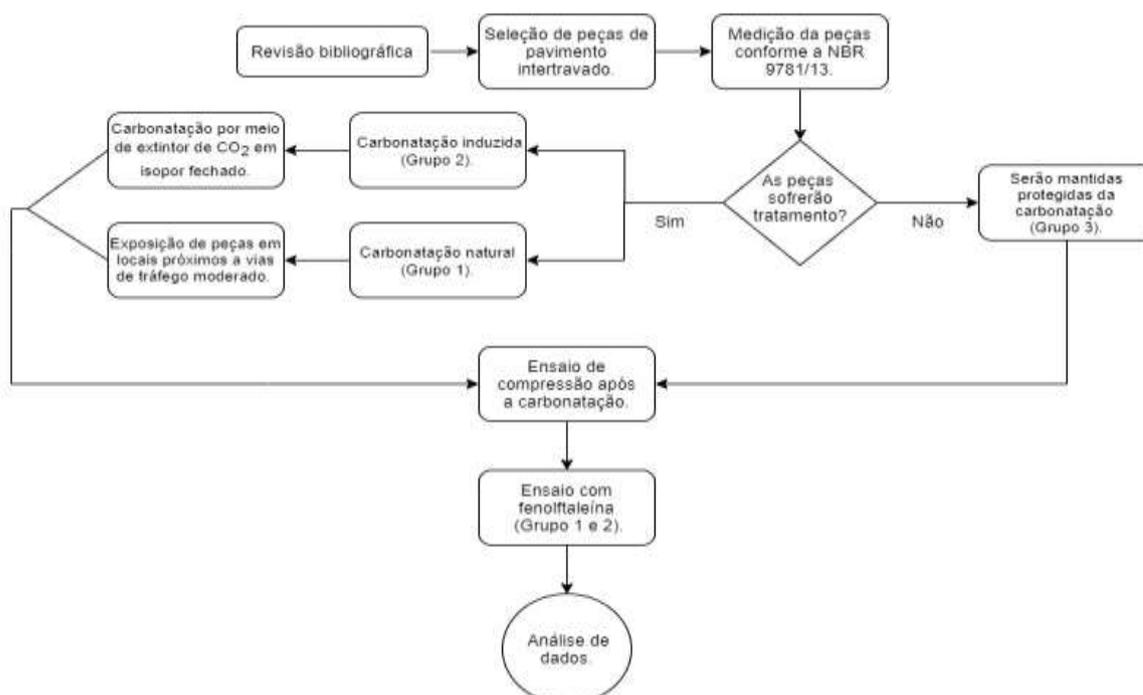
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção será detalhado o procedimento metodológico que foi seguido a fim de obter e analisar dados que possam responder aos objetivos propostos na seção de introdução.

A metodologia empregada no trabalho foi uma abordagem quantitativa, pois há o uso de dados numéricos para a análise dos resultados. Os dados a serem analisados foram de resistência a compressão axial das peças de pavimento intertravado e da profundidade de carbonatação dessas peças.

A presente pesquisa classifica-se como experimental, visto que foram realizados ensaios normatizados para a obtenção dos dados. Além disso a pesquisa também se classifica como bibliográfica, pois realizou-se extensa revisão acerca do tema em questão. Utilizou-se de livros, normas técnicas, monografias, teses e artigos para obter uma melhor compreensão do tema e facilitar a análise e discussão dos resultados. A pesquisa bibliográfica revisou conteúdo sobre os temas de efeito estufa, indústria cimentícia, carbonatação e pavimento intertravado. Essa revisão deu suporte para a parte experimental da pesquisa, a qual será detalhada a seguir, por meio da Figura 16, que representa um fluxograma das etapas da metodologia aplicada.

Figura 16 - Fluxograma das etapas da metodologia.



3.1 Materiais

A fim de responder a problemática da pesquisa foram selecionadas 60 peças de pavimento de dois modelos diferentes, mas que estão dentro da mesma classificação de Tipo I conforme a norma NBR 9781. As peças selecionadas são do modelo de 16 faces e do modelo retangular, e foram obtidas por meio de duas empresas diferentes, que trabalham no ramo de pré-moldados. A seguir, na Tabela 2, é mostrada a divisão das peças de pavimento intertravado e suas dimensões nominais.

Tabela 2 – Tipos de blocos e suas dimensões.

Modelos Tipo 1	Quantidade	Dimensões (cm)
16 Faces	30 peças	22 x 11 x 7,5
Retangulares	30 peças	19 x 9,5 x 5,5

Na Figura 17 é possível verificar o modelo das peças utilizadas. Conforme informação repassada pelo fabricante, as peças possuem resistência a compressão de 35 MPa e são utilizados para tráfego de veículos leves, segundo especificado na NBR 9781/2013.

Figura 17 – Peças do Tipo I com 16 faces e retangulares.



Para a etapa de carbonatação das peças, foi utilizado um isopor com capacidade de 170 L, no qual as peças de pavimento intertravado foram inseridas. Para a simulação da carbonatação foi inserido o CO₂ por meio de um extintor, conforme Figura 18 a seguir. O isopor foi vedado, sendo aberto somente no momento da inserção do CO₂, e logo em seguida novamente fechado, afim de haver uma maior exposição dos objetos em estudo ao efeito de carbonatação.

Figura 18 – Processo de indução de CO₂ nas peças ensaiadas.



3.2 Métodos

Com o intuito de auxiliar a compreensão dos resultados, as peças selecionadas foram divididas em três grupos, os quais tiveram solicitações distintas. As peças do grupo 1 foram expostas a locais próximos de vias de tráfego moderado, na qual entende-se haver carbonatação natural. As peças do grupo 2 foram expostas a um processo de carbonatação induzido por meio de extintor de CO₂. As peças do grupo 3, denominado de grupo de referência, não foram expostas a nenhuma solicitação, ficando o mesmo protegido em local coberto e fechado. As quantidades de peças distribuídas em cada grupo estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características dos grupos de peças de pavimento intertravado.

	Quantidade	Identificação	Idade de ruptura	Procedimento
Grupo 1	20 peças	A1 ao A10 B1 ao B10	>90 dias	Carbonatação natural
Grupo 2	20 peças	C1 ao C10 D1 ao D10	>90 dias	Carbonatação induzida
Grupo 3	20 peças	E1 ao E10 F1 ao F10	>90 dias	Sem carbonatação

Para confirmação das medidas nominais, cada peça foi medida conforme a NBR 9781 (ABNT, 2013) na qual determina que a fabricante dos blocos de concreto informe suas medidas nominais de largura, comprimento e espessura. Segundo a norma, as peças devem atender as dimensões e tolerâncias máximas que são de 250 mm para o comprimento máximo nominal e 60 mm para a sua espessura máxima nominal, com uma largura mínima de 97 mm na área destinada a aplicação da carga no ensaio de resistência à compressão. Para a medição do comprimento, largura e espessura, será utilizado um paquímetro com resolução de 0,1 mm. Será calculado também com esses resultados o índice de forma, que é relação entre comprimento e espessura.

Para verificação da resistência, foi realizado o rompimento das peças dos três grupos. Este ocorreu na mesma data, apesar de que as peças não possuíam datas da fabricação iguais. Tanto as peças do modelo 16 faces como as peças retangulares foram rompidas com a idade maior que 90 dias.

O ensaio de resistência a compressão foi realizado conforme a NBR 9781 (ABNT, 2013), na qual estabelece condições para a realização do ensaio de resistência característica à compressão (f_{pk}), dentre as quais estão a necessidade de as superfícies de carregamento das peças estarem retificadas e a disposição das peças sobre placas auxiliares. Para o ensaio foi utilizado um equipamento de ensaio classe I, conforme a Figura 19. É válido ressaltar que a norma NBR 9781 (ABNT, 2013) estabelece que as peças sejam saturadas em água, por no mínimo vinte e quatro horas antes do ensaio, no entanto, para o que será verificado, as peças não serão saturadas afim de obter uma resistência à compressão o mais próximo da situação real.

Figura 19 – Máquina de classe I utilizada para determinação da resistência à compressão.



Segundo a norma NBR 9781 (ABNT, 2013), os resultados de resistência à compressão das peças serão obtidos dividindo-se as cargas de ruptura, expressa em newtons (N), pela área de carregamento, expressa em milímetros quadrados (mm^2), multiplicando-se o resultado pelo fator p , função da altura da peça, conforme a Tabela 4. A partir dessa resistência, será realizado um comparativo com a resistência especificada na norma. E também será analisado o quanto o processo de carbonatação afetará a resistência a compressão.

Tabela 4 – Fator multiplicativo p .

Espessura nominal das peças mm	p
60	0,95
80	1
100	1,05

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9781 (2013).

Além disso, também foi analisado a espessura de carbonatação das peças. Para isso as peças que foram expostas a esse processo, após o seu rompimento, serão submetidas ao ensaio de fenolftaleína, na qual a parte carbonatada, ou seja, a incolor, será medida por meio de um paquímetro.

Por fim, seguindo a norma NBR 9781 (ABNT, 2013), foi realizada a determinação da resistência à compressão estimada, sendo assim o seu valor característico estimado pela Equação 4.1 e Equação 4.2 a seguir.

$$f_{pk,est} = f_p - t \times s \quad (4.1)$$

Sendo:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(f_p - f_{pi})^2}{n-1}} \quad (4.2)$$

Onde:

- f_p = é a resistência média das peças, expressa em megapascals (MPa);
- f_{pi} = é a resistência individual das peças, expressa em megapascals (MPa);
- $f_{pk,est}$ = é a resistência característica estimada à compressão, expressa em megapascals (MPa);
- n = é o número de peças da amostra;
- s = é o desvio-padrão da amostra, expresso em megapascals (MPa);
- t = é o coeficiente de Student, fornecido na Tabela 5, em função do tamanho da amostra.

Tabela 5 – Coeficiente de Student.
(nível de confiança de 80 %)

n	t
6	0,92
7	0,906
8	0,896
9	0,889
10	0,883
12	0,876
14	0,87
16	0,866
18	0,863
20	0,861
22	0,859
24	0,858
26	0,856
28	0,855
30	0,854
32	0,842

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9781 (2013).

Após o rompimento das peças, as mesmas foram submetidas ao ensaio de carbonatação com a fenolftaleína para verificação da camada de carbonatação em cada peça, conforme a Figura 20 a seguir.

Figura 20 – Ensaio de carbonatação com fenolftaleína.



Dessa forma, seguindo a normalização do ensaio de fenolftaleína de RILEM (1988), sob a designação CPC - 18 *Measurement of hardened concrete carbonation depth*, foi executado o ensaio nas peças dos grupos 1, 2 e 3. Para isso, inicialmente foi borrifado, em forma de névoa, a solução de fenolftaleína na região recém-fraturada das peças e em seguidas guardadas em local seco e protegido, no qual posteriormente ao prazo de 24 horas, foi realizada a medição da profundidade de carbonatação, com o auxílio de um paquímetro.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir, serão apresentados os resultados de ensaios realizados, com respectivas discussões e análise para cada propriedade.

4.1 Resultados de resistência a compressão

Após as amostras ficarem expostas cada uma a uma situação específica, conforme apresentado na metodologia, foram realizados os ensaios previstos de resistência a compressão e profundidade de carbonatação. Nas Tabelas 6, 7 e 8, a seguir, são apresentados os resultados de resistência à compressão e resistência à compressão estimada para as peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces que sofreram procedimento de carbonatação natural, carbonatação induzida e sem carbonatação respectivamente.

Tabela 6 – Resistência a compressão das peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces com carbonatação natural.

Carbonatação Natural (16 faces)					
Descrição	Carga (tf)	Carga (N)	Área (mm ²)	Resistência à compressão (Mpa)	Resistência à compressão estimada (Mpa)
A1	18,92	189200	5675	33,34	26,43
A2	18,99	189900	5675	33,46	
A3	13,59	135900	5675	23,95	
A4	16,13	161300	5675	28,42	
A5	17,62	176200	5675	31,05	
A6	15,23	152300	5675	26,84	
A7	19,74	197400	5675	34,78	
A8	19,53	195300	5675	34,41	
A9	13,18	131800	5675	23,22	
A10	19,19	191900	5675	33,81	

Tabela 7 – Resistência a compressão das peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces com carbonatação induzida.

Carbonatação Induzida (16 faces)					
Descrição	Carga (tf)	Carga (N)	Área (mm²)	Resistência à compressão (Mpa)	Resistência à compressão estimada (Mpa)
C1	31,47	314700	5675	55,45	35,51
C2	18,13	181300	5675	31,95	
C3	18,7	187000	5675	32,95	
C4	28,32	283200	5675	49,90	
C5	20,48	204800	5675	36,09	
C6	22,51	225100	5675	39,67	
C7	24,96	249600	5675	43,98	
C8	22,04	220400	5675	38,84	
C9	27,75	277500	5675	48,90	
C10	26,05	260500	5675	45,90	

Tabela 8 – Resistência a compressão das peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces sem carbonatação (protegidas).

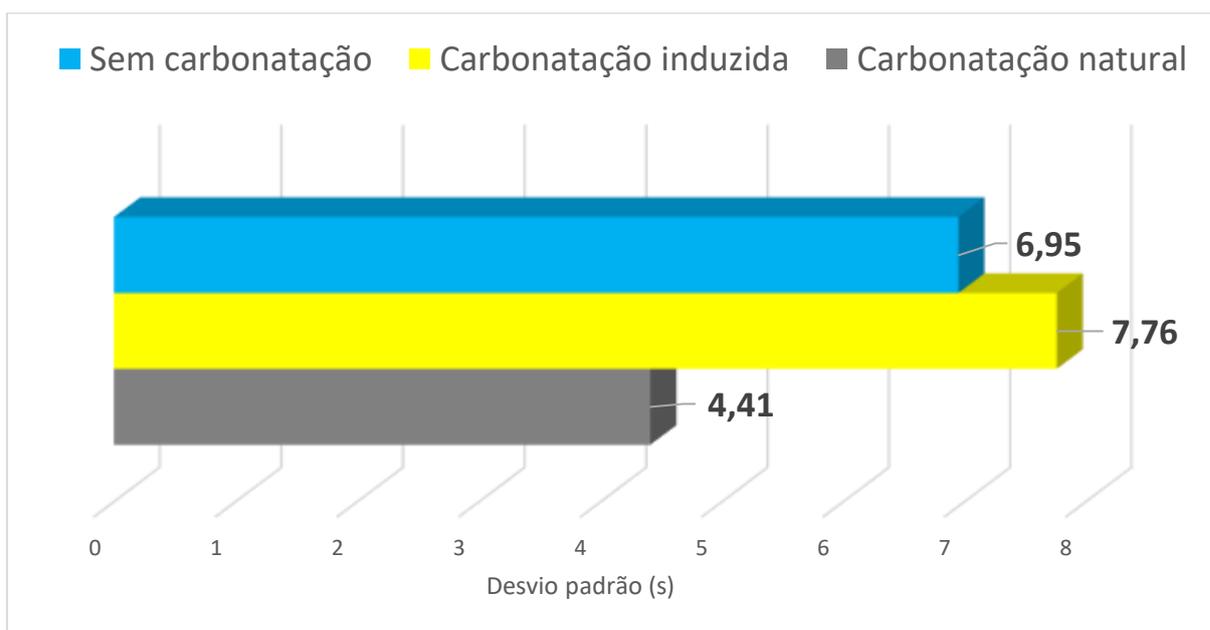
Sem Carbonatação (16 faces)					
Descrição	Carga (tf)	Carga (N)	Área (mm²)	Resistência à compressão (Mpa)	Resistência à compressão estimada (Mpa)
E1	21,13	211300	5675	37,23	31,56
E2	15,28	152800	5675	26,93	
E3	19,07	190700	5675	33,60	
E4	20,83	208300	5675	36,70	
E5	26,57	265700	5675	46,82	
E6	17,17	171700	5675	30,26	
E7	21,16	211600	5675	37,29	
E8	24,56	245600	5675	43,28	
E9	27,81	278100	5675	49,00	
E10	20,38	203800	5675	35,91	

Diante dos resultados à compressão estimada das peças com 16 faces, é possível observar na Tabela 6 e 8, que a resistência a compressão obtida foi inferior ao esperado, que seria de 35Mpa, visto que a norma NBR 9781 (ABNT, 2013) estabelece a resistência a compressão das peças de pavimento intertravado de concreto para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha seja igual ou maior que 35Mpa.

Em contrapartida, a resistência à compressão estimada das peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces que tiveram carbonatação induzida, foi superior a 35 Mpa solicitado na norma NBR 9781 (ABNT, 2013), conforme a Tabela 7. De toda forma é interessante o aumento da resistência obtido considerando que as peças de intertravado utilizadas para pavimentação ficarão expostas por muito tempo e sendo solicitadas tanto superficialmente como em toda sua altura.

É válido ressaltar que através dos resultados obtidos de resistência à compressão das peças com 16 faces na Tabela 6, 7 e 8, mostram que houve uma variação elevada, acarretando em um desvio padrão alto, sendo o maior nas peças com carbonatação induzida, conforme o Gráfico 8 a seguir.

Gráfico 7 – Desvio padrão dos resultados das resistências à compressão das peças de pavimento intertravado com 16 faces.



Assim como ocorreu com as peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces, nas Tabelas 9,10 e 11, a seguir, são apresentados os resultados de resistência à compressão e resistência à compressão estimada para as peças de pavimento intertravado de concreto retangulares que sofreram procedimento de carbonatação natural, carbonatação induzida e sem carbonatação respectivamente.

Tabela 9 – Resistência a compressão das peças de pavimento intertravado de concreto retangulares com carbonatação natural.

Carbonatação Natural (Retangulares)					
Descrição	Carga (tf)	Carga (N)	Área (mm²)	Resistência à compressão (Mpa)	Resistência à compressão estimada (Mpa)
B1	13,36	133600	5675	23,54	24,47
B2	15,95	159500	5675	28,11	
B3	15,29	152900	5675	26,94	
B4	14,15	141500	5675	24,93	
B5	18,73	187300	5675	33,00	
B6	14,62	146200	5675	25,76	
B7	17,32	173200	5675	30,52	
B8	15,49	154900	5675	27,30	
B9	14,69	146900	5675	25,89	
B10	21,97	219700	5675	38,71	

Tabela 10 – Resistência a compressão das peças de pavimento intertravado de concreto retangulares com carbonatação induzida.

Carbonatação Induzida (Retangulares)					
Descrição	Carga (tf)	Carga (N)	Área (mm²)	Resistência à compressão (Mpa)	Resistência à compressão estimada (Mpa)
D1	8,51	85100	5675	15,00	18,47
D2	22,80	228000	5675	40,18	
D3	15,30	153000	5675	26,96	
D4	19,77	197700	5675	34,84	
D5	10,68	106800	5675	18,82	
D6	16,62	166200	5675	29,29	
D7	22,71	227100	5675	40,02	
D8	16,67	166700	5675	29,37	
D9	9,61	96100	5675	16,93	
D10	9,93	99300	5675	17,50	

Tabela 11 – Resistência a compressão das peças de pavimento intertravado de concreto retangulares sem carbonatação (protegidas).

Sem Carbonatação (Retangulares)					
Descrição	Carga (tf)	Carga (N)	Área (mm²)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à compressão estimada (MPa)
F1	19,71	197100	5675	34,73	22,73
F2	17,19	171900	5675	30,29	
F3	22,36	223600	5675	39,40	
F4	19,54	195400	5675	34,43	
F5	19,55	195500	5675	34,45	
F6	20,76	207600	5675	36,58	
F7	22,29	222900	5675	39,28	
F8	11,17	111700	5675	19,68	
F9	9,03	90300	5675	15,91	
F10	11,19	111900	5675	19,72	

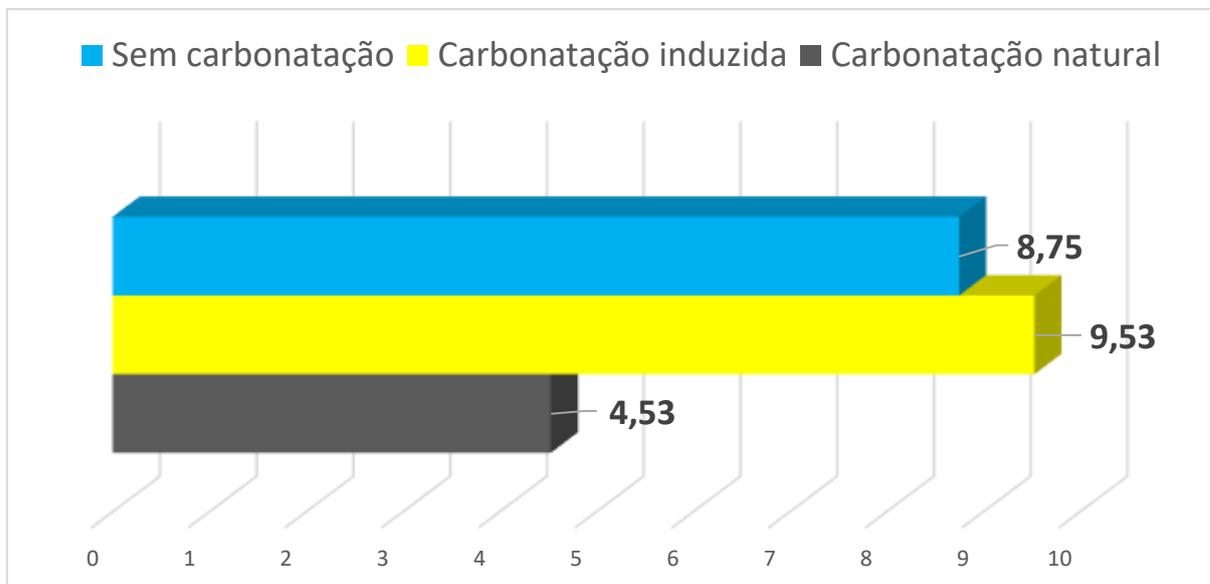
É possível notar nas Tabelas 9, 10 e 11, que a resistência à compressão estimada das peças retangulares não atendeu os 25Mpa para o qual as peças foram fabricadas, porém, é importante ressaltar que as peças de pavimento intertravado de concreto retangulares não se adequam a norma NBR 9781:2013, pois possuem altura inferior ao mínimo permitido.

Ainda é notório ressaltar que as peças retangulares estudadas, são destinadas a tráfego de pedestres, de acordo com o fornecido pelo fabricante, logo não exige uma alta resistência.

Conforme as Tabelas 9,10 e 11, diferente das peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces, que tiveram maior resistência à compressão nas peças induzidas a carbonatação, para as peças retangulares, houve uma maior resistência à compressão nas peças que foram carbonatadas naturalmente, tendo seu valor de resistência próximo as peças guardadas, ou seja, sem carbonatação.

Assim como ocorreu nas peças com 16 faces, nas peças retangulares também ocorreu um elevado desvio padrão nos resultados de resistência à compressão, como é possível observar no Gráfico 9 a seguir.

Gráfico 8 – Desvio padrão dos resultados das resistências à compressão das peças de pavimento intertravado retangulares.



4.2 Resultados de carbonatação

Posteriormente feito o ensaio de resistência à compressão das peças de pavimento intertravado de concreto, foi realizado o ensaio com fenolftaleína, afim de se obter a profundidade de carbonatação das peças ensaiadas.

Dessa forma, através do ensaio com fenolftaleína, verifica-se que nas peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces, as amostras que tiveram maior exposição ao dióxido de carbono, ou seja, as induzidas, obtiveram uma maior profundidade de carbonatação, como esperado. As Tabelas 12, 13 e 14, a seguir, mostram os valores de profundidade de carbonatação de cada amostra e os valores médios dessa profundidade para as peças que sofreram procedimento de carbonatação natural, carbonatação induzida e sem carbonatação respectivamente.

Tabela 12 – Profundidade de carbonatação das peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces com carbonatação natural.

Carbonatação Natural (16 faces)		
Descrição	Profundidade de carbonatação (cm)	Média da profundidade (cm)
A1	0,08	0,053
A2	0,05	
A3	0,05	
A4	0,05	
A5	0,05	
A6	0,06	
A7	0,05	
A8	0,04	
A9	0,08	
A10	0,02	

Tabela 13 – Profundidade de carbonatação das peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces com carbonatação induzida.

Carbonatação Induzida (16 faces)		
Descrição	Profundidade de carbonatação (cm)	Média da profundidade (cm)
C1	0,25	0,17
C2	0,08	
C3	0,28	
C4	0,11	
C5	0,14	
C6	0,09	
C7	0,09	
C8	0,27	
C9	0,08	
C10	0,30	

Tabela 14 – Profundidade de carbonatação das peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces sem carbonatação (protegidas).

Sem Carbonatação (16 faces)		
Descrição	Profundidade de carbonatação (cm)	Média da profundidade (cm)
E1	0,05	0,05
E2	0,06	
E3	0,06	
E4	0,10	
E5	0,05	
E6	0,07	
E7	0,03	
E8	0,00	
E9	0,03	
E10	0,05	

Ainda é possível observar nas Tabelas 12 e 14, que o valor médio de profundidade de carbonatação das peças que sofreram carbonatação natural e que não foram carbonatadas, foram praticamente iguais, o que se deve ao fato de o local no qual as peças foram expostas naturalmente não ficar próximo de uma via com tráfego intenso, demonstrando que ambas as condições de exposição, natural e sem carbonatação, eram similares.

Finalmente, a fim de ilustrar o resultado da profundidade de carbonatação das peças de 16 faces, na Figura 21 são apresentadas três peças dos diferentes grupos (carbonatação, natural, induzida e protegida, respectivamente). Pode-se verificar que na peça que passou pelo processo de carbonatação induzida, a mancha que indica que não há carbonatação é mais fraca e espalhada, diferente das outras peças, onde claramente a carbonatação se concentrou apenas numa faixa pequena da espessura das peças.

Figura 21 – Profundidade de carbonatação nos diferentes processos.



Assim como ocorreu o ensaio de fenolftaleína nas peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces, nas peças retangulares também foi realizado o mesmo ensaio após o rompimento das peças. A seguir, nas Tabelas 15, 16 e 17, são mostrados os valores de profundidade de carbonatação de cada amostra e os valores médios dessa profundidade para as peças que sofreram procedimento de carbonatação natural, carbonatação induzida e sem carbonatação respectivamente.

Tabela 15 – Profundidade de carbonatação das peças de pavimento intertravado de concreto retangulares com carbonatação natural.

Carbonatação Natural (Retangulares)		
Descrição	Profundidade de carbonatação (cm)	Média da profundidade (cm)
B1	0,09	0,09
B2	0,07	
B3	0,07	
B4	0,08	
B5	0,07	
B6	0,09	
B7	0,10	
B8	0,15	
B9	0,08	
B10	0,10	

Tabela 16 – Profundidade de carbonatação das peças de pavimento intertravado de concreto retangulares com carbonatação induzida.

Carbonatação Induzida (Retangulares)		
Descrição	Profundidade de carbonatação (cm)	Média da profundidade (cm)
D1	0,55	0,284
D2	0,20	
D3	0,25	
D4	0,24	
D5	0,18	
D6	0,19	
D7	0,24	
D8	0,26	
D9	0,55	
D10	0,18	

Tabela 17 – Profundidade de carbonatação das peças de pavimento intertravado de concreto retangulares sem carbonatação (protegidas).

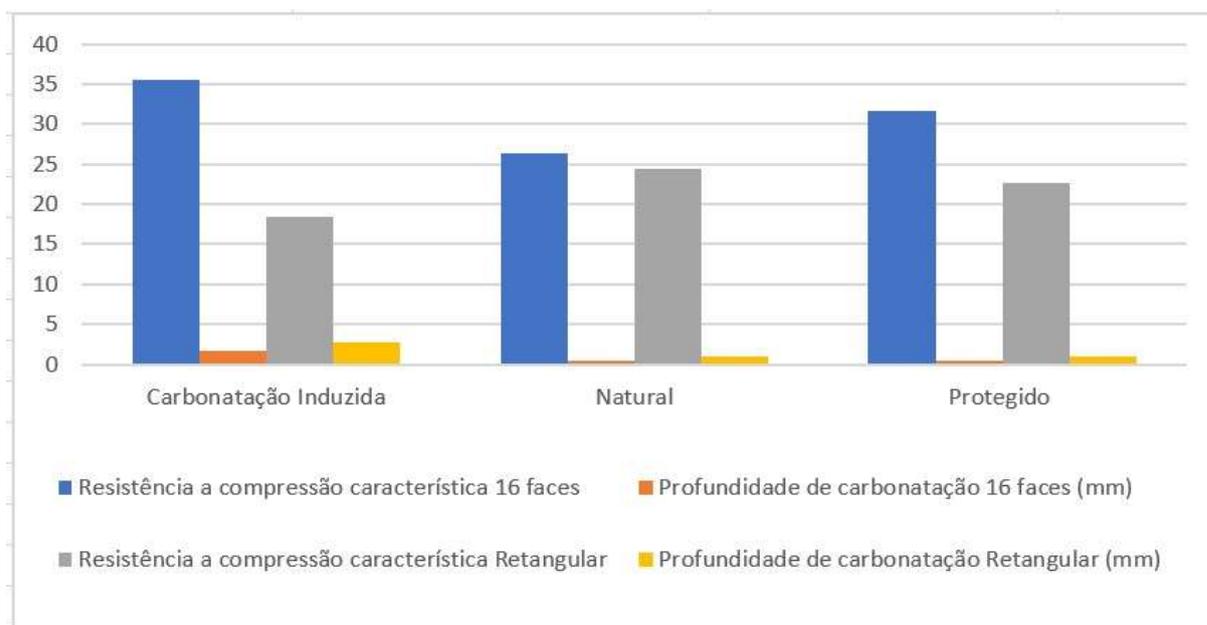
Sem Carbonatação (Retangulares)		
Descrição	Profundidade de carbonatação (cm)	Média da profundidade (cm)
F1	0,11	0,108
F2	0,19	
F3	0,10	
F4	0,12	
F5	0,10	
F6	0,11	
F7	0,07	
F8	0,11	
F9	0,08	
F10	0,09	

Diante dos resultados apresentados nas Tabelas 15, 16 e 17, como era esperado, o valor médio de profundidade das peças retangulares induzidas a carbonatação foi maior quando comparado ao valor médio das peças retangulares com carbonatação natural e sem carbonatação, o que nos leva a crer que quanto maior a exposição das peças ao dióxido de carbono, maior será a profundidade de carbonatação das mesmas.

4.3 Relação resistência à compressão x carbonatação

Com os resultados de resistência à compressão e carbonatação das peças de pavimento intertravado de concreto com 16 faces e retangulares, obteve-se o Gráfico 10 a seguir.

Gráfico 9 – Resistência à compressão x carbonatação.



Dessa forma, conforme o Gráfico 10, foi possível notar que não há relação entre a resistência à carbonatação e a profundidade de carbonatação das peças ensaiadas, pois não houve um crescimento da resistência à compressão nas peças com maior carbonatação.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados nas peças de pavimento intertravado do tipo 16 faces e retângulas, foi possível observar uma grande variação nos resultados de resistência a compressão. Respondendo ao primeiro objetivo desta pesquisa, que é avaliar a resistência a compressão de peças de intertravados do tipo 16 faces e retangular, observou-se que todas as peças analisadas apresentaram resultado de resistência a compressão estimada abaixo do especificado pela norma NBR 9781 (2013). Com exceção da peça do tipo 16 faces que teve a carbonatação induzida, o restante das peças apresentou resultado de resistência a compressão estimada abaixo da resistência especificada em norma. Apesar de resistência a compressão não ser o foco da pesquisa, é importante comentar sobre esse resultado. O mesmo pode estar relacionado ao fato de que a prensa utilizada estava a mais de um ano sem calibração.

Cabe ainda salientar sobre a importância de se trabalhar com fatores de segurança em dosagens de concreto para intertravados visto a possibilidade de resistência não atingir o especificado pela norma e também da mesma diminuir com tempo como aconteceu com as peças de intertravado do tipo retangular.

Respondendo o segundo objetivo da pesquisa, que é verificar o nível de carbonatação das peças, observou-se que as peças de intertravado que sofreram carbonatação induzida obtiveram maior profundidade de carbonatação como já era esperado. Esse comportamento foi observado tanto para as peças de 16 faces quanto para as peças do tipo retangular. Considerando a questão ambiental discutida no referencial teórico, esse resultado é benéfico visto que essas peças podem fazer a captura do dióxido de carbono, contribuindo assim para a redução do mesmo na atmosfera.

Por fim, para o terceiro objetivo da pesquisa, que é analisar a interferência da carbonatação na resistência à compressão das peças ensaiadas, não foi possível observar nenhuma relação. Visto que o resultado de resistência a compressão estimado aumentou nas peças de 16 faces que sofrem carbonatação induzida, porém nas peças retangulares que passaram pela carbonatação induzida, o resultado de resistência a compressão estimado foi inferior.

Como principal resultado da pesquisa, aponta-se para a capacidade que as peças de intertravados possuem de capturar o dióxido de carbono presente na

atmosfera de forma natural. Como essas são peças utilizadas para pavimentação e tráfego de pedestres, indica-se um maior incentivo do uso das mesmas em centros urbanos onde há uma maior emissão do dióxido de carbono.

Para trabalhos futuros, sugere-se que sejam realizados ensaios em uma maior quantidade de peças, assim como o processo de carbonatação induzido seja realizado em equipamento próprio para isso. Também é importante que sejam utilizados equipamentos com calibração recente. Por fim, é interessante que as peças com carbonatação natural sejam expostas a situação reais, como por exemplo vias de tráfego veicular intenso.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio**, 2013.

ABCP. Praças, Caminhos e Pátios. **Obras brasileiras com pisos intertravados de concreto**, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público**. São Paulo, 2010. 36p

ANTONIO, I.; POSSAN, E. **Estimativa da captura do CO₂ devido à carbonatação de concreto e argamassas**. 2016.

ALVES, J. Concentração de CO₂ na atmosfera bate recorde histórico em 2019. In **EcoDebate**, ISSN 2446-9394, 13/01/2020. Disponível em: <<https://www.ecodebate.com.br/2020/01/13/concentracao-de-co2-na-atmosfera-bate-recorde-historico-em-2019-artigo-de-jose-eustaquio-diniz-alves/>>. Acesso em: 12 de março de 2020.

BAKKER, R. F. M. Initiation period. In: Schiessl, P., ed. **Corrosion of steel in concrete**. Cap. 3, p.22-55. London, Chapman and Hall, 1988.

BENITTEZ, L. **Captura de CO₂ em peças de concreto para pavimentação através da cura por carbonatação acelerada**. 2019.

BEIROZ, H. **Efeito Estufa**. Rio de Janeiro: Simonsen – faculdades e colégios, 2011. 5 p Apostila.

CAMPOS, Mateus de Oliveira. **Influência da carbonatação no ensaio de esclerometria**. 2019.

CARVALHO, Rafael Amancio et al. Utilização de resíduos de corpos de prova de concreto para fabricação de pavimentação intertravada. **Revista InterScientia**, v. 6, n. 2, p. 12-29, 2018.

CAPRARO, A. P. et al. Estudo da previsão da vida útil de uma estrutura em concreto armado: iniciação da corrosão por carbonatação. **Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo, v. 6, n. 2, p. 53-68, dez. 2019. ISSN 2358-6508. Disponível em: <<https://seer.imed.edu.br/index.php/revistaec/article/view/3147>>. Acesso em: 17 de março de 2020.

"Ciclo do carbono" em *Só Biologia*. Virtuuous Tecnologia da Informação, 2008-2020. Consultado em 05/07/2020 às 18:29. Disponível na Internet em https://www.sobiologia.com.br/conteudos/bio_ecologia/ecologia29.php

COUTO, R. A. **Avaliação probabilística da vida útil de estruturas de concreto armado sujeitas à carbonatação**. 2017.

Como é feito o cimento, sua composição e nomenclatura no mercado. **Cimento Mauá**, 2017. Disponível em: <<https://cimentomaua.com.br/>>. Acesso em: 09 de março de 2020.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento Intertravado de Concreto: Estudo dos Elementos e Métodos de Dimensionamento**. 2013. 281f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

DENARI, Gabriela Bueno; CAVALHEIRO, E. T. G. Princípios e aplicações de análise térmica. **São Carlos: IQSC**, p. 19, 2012.

DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. 2018. **Cimento - Sumário Mineral**, 2018. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes>>. Acesso em: 11 de março de 2020.

FELIX, E. F.; POSSAN, E. Balance emissions and CO₂ uptake in concrete structures: simulation based on the cement content and type. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 1, p. 135-162, 2018.

FIORITI, Cesar Fabiano; INO, Akemi; AKASAKI, Jorge Luís. Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. **ambiente Construído**, v. 7, n. 4, p. 43-54, 2007.

GUIMARÃES, F.; VISEDO, G. Projeções para o consumo de cimento no Brasil e de emissões absolutas de CO₂ para o período 2020 a 2050. Estratégias para mitigação do CO₂ na cadeia produtiva do concreto, **revista IBRACON de Concreto e Construções**, Fortaleza, ed. 95, p. 60-66, jul./set. 2019.

IPCC – PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2018. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>>. Acesso em: 06 de fevereiro de 2020.

JUNGES, A. et al. Efeito estufa e aquecimento global: uma abordagem conceitual a partir da física para educação básica. **Experiências em Ensino de Ciências. Cuiabá. Vol. 13, n. 5 (dez. 2018), p. 126-151**, 2018.

MÜLLER, R. M. **Avaliação de transmissão de esforços em pavimentos intertravados de blocos de concreto**. 2005. Tese de Doutorado. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil)–Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro.

Nascimento, P. S. em **Sequestro de carbono**. Sem data. Consultado em 01/07/2020. Disponível na Internet em <https://www.infoescola.com/ecologia/sequestro-de-carbono/>.

NOAH - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. 2020. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>>. Acesso em: 15 de março de 2020.

OLIVEIRA, A. et al. Avaliação da carbonatação na resistência de estruturas de concreto com uso da esclerometria. Estratégias para mitigação do CO₂ na cadeia produtiva do concreto, **revista IBRACON de Concreto e Construções**, Fortaleza, ed. 95, 2019.

OLIVEIRA, T. R. **Análise da frente de carbonatação em concreto convencional: estudo de caso em edificações com idade diferenciada na cidade de Juazeiro do Norte – CE**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade regional do Cariri, Ceará, Juazeiro do Norte: Monografia, 2017.

POSSAN, E. Captura de CO₂ em materiais cimentícios. Estratégias para mitigação do CO₂ na cadeia produtiva do concreto, **revista IBRACON de Concreto e Construções**, Fortaleza, ed. 95, p. 60-66, jul./set. 2019.

PERIM, José Roberto. **Influência do metacaulim na durabilidade de concretos usuais de mercado sujeitos à carbonatação acelerada**. 2013.

PACHECO, J. et al. Contribuição dos concretos de alto desempenho na redução do impacto ambiental e incremento da sustentabilidade. Estratégias para mitigação do CO₂ na cadeia produtiva do concreto, **revista IBRACON de Concreto e Construções**, Fortaleza, ed. 95, p. 90-104, jul./set. 2019.

RAISDORFER, J. W., et al. **Carbonatação – Previsão da vida útil das obras de artes especiais**. 2015.

RIGO, E. **Avaliação do potencial de captura de CO₂ de concretos com resíduos de construção e demolição devido à carbonatação**. 2019. Dissertação de Mestrado.

RILEM. **Measurement of hardened concrete carbonation depth CPC-18**. Revista Materials and Structures. V. 17, no 102. 1988.

ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050 / coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

SANTOS, M. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa derivadas de hidrelétricas**. 2000. Tese de Doutorado. PhD. Dissertation, University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 154p.

SALDANHA, Filipe José Martins. **Desenvolvimento de um dispositivo de ensaio de carbonatação acelerada com controlo de humidade relativa**. 2013. Tese de Doutorado.

SEDJO, Roger A. **Forest carbon sequestration: some issues for forest investments**. 2001.

SILVA, Vanessa Cristine. **O DESIGN COMO POTENCIALIZADOR PARA ALCANÇAR A INOVAÇÃO NO REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS**:

TECNOLOGIA PARA AGREGAR VALOR NA PRODUÇÃO DE PISOS INTERTRAVADOS. **Blucher Design Proceedings**, v. 2, n. 9, p. 4527-4538, 2016.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2020. Disponível em: <<http://snic.org.br/>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2020.

TASCA, M. **Estudo da Carbonatação Natural de Concretos Com Pozolanas**: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura. Santa Maria, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012

VISEDO, G.; PECCHIO, M.; BATTAGIN, A. Bases para o lançamento do Mapeamento Tecnológico do Cimento – Brasil 2050. Estratégias para mitigação do CO₂ na cadeia produtiva do concreto, **revista IBRACON de Concreto e Construções**, Fortaleza, ed. 95, p. 26-32, jul./set. 2019.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Greenhouse gas bulletin: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2017**. N.14, 8p, 2018. Disponível em: <https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5455>. Acesso em: 16 de março de 2020.

XAVIER, M; KER, A. **A análise do efeito estufa em textos paradidáticos e periódicos jornalísticos**. Caderno Brasileiro de ensino de Física, 2004, 21.3: 325-349.