



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFRAESTRUTURA E
DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

CAIO JOSÉ BASTOS MARQUES SANTOS

**CAPTURA DE CARBONO EM PLACAS DE CONCRETO
PERMEÁVEL**

Tucuruí
2020

CAIO JOSÉ BASTOS MARQUES SANTOS

CAPTURA DE CARBONO EM PLACAS DE CONCRETO PERMEÁVEL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Infraestrutura.

Orientador^a: Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro

Tucuruí

2020

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo
autor**

S237c Santos, Caio José Bastos Marques.
Captura de carbono em placas de concreto permeável /
Caio José Bastos Marques Santos. — 2020.
86 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro
Cordeiro
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2020.

1. Concreto Permeável. 2. Captura de Carbono. 3.
Materiais Cimentícios. I. Título.

CDD 691

CAIO JOSÉ BASTOS MARQUES SANTOS

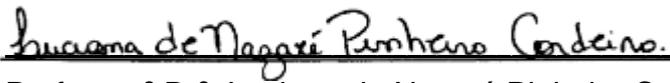
**CAPTURA DE CARBONO EM PLACAS DE CONCRETO
PERMEÁVEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energ do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Infraestrutura.

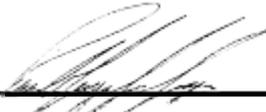
Orientador^a: Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro

Aprovada em 12 de junho de 2020.

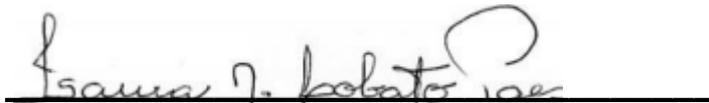
BANCA EXAMINADORA:



Professor^a Dr^a. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro / UFPA - Orientadora



Professor Dr. Paulo Sergio Lima Souza / UFPA



Professor^a Dr^a. Isaura Nazaré Lobato Paes / UFPA



Professor Dr. Daniel Tregnago Pagnussat / UFRGS

dedico este trabalho aos meus
amados e dedicados pais.

AGRADECIMENTOS

Produzir uma pesquisa de dissertação de mestrado é uma atividade que apresenta dificuldades e realizações, envolvendo um progresso contínuo dos conhecimentos adquiridos. A caminhada começa nos primeiros dias de discussões sobre o tema com os professores e colegas. A partir de então, ganha-se maturidade para desenvolver o trabalho acadêmico. Este percurso foi trilhado com o apoio de pessoas as quais eu não poderia deixar de agradecer.

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por ser o criador da vida e o caminho para a paz interior. À Nossa Senhora de Nazaré, motivo de renovação de fé, por interceder nos momentos de dificuldade.

Aos meus pais que sempre apoiaram minhas escolhas e me deram forças para seguir adiante. Obrigado por serem bons exemplos para mim e por estarem presentes em cada conquista. Dedico a eles esta dissertação de Mestrado.

À minha namorada, Ana Beatriz que me incentivou muito e me apoiou nesta etapa de minha vida. Obrigado pela força, pela compreensão e pelo apoio diário, sempre incentivando o estudo e o andamento do mestrado!

À minha professora orientadora Prof^a. Dr^a. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro, que sempre me deu forças e me apoiou no desenvolvimento desta pesquisa. Obrigado pelos conselhos e pelo tempo dedicado. A senhora contribuiu muito para minha formação acadêmica.

Aos professores do Grupo de Pesquisa de Materiais de Construção (GPMAC) Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza e Prof^a. Dr^a. Isaura Nazaré Lobato Paes, que sempre estiveram solícitos em aconselhar e instruir os alunos no Laboratório de Engenharia Civil (LEC).

Aos colegas do mestrado Tiago Braga e Max Ewerton, que também enfrentaram os desafios da pós-graduação. Agradeço à Daniela Baia pela contribuição na pesquisa, discussões sobre o tema e pelo apoio no dia a dia do laboratório. Agradeço aos colegas do GPMAC pelo auxílio em ensaios laboratoriais.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

À Universidade Federal do Pará (UFPA) por oferecer ensino de qualidade e com infraestrutura por meio de seus professores e laboratórios.

Ao concluir esta etapa, sou grato àqueles que me apoiaram, direta e indiretamente, nesta jornada que através de orações e incentivos me deram forças.

*“Inteligência é a capacidade de
se adaptar à mudança.”*
Stephen Hawking

RESUMO

CAPTURA DE CARBONO EM PLACAS DE CONCRETO PERMEÁVEL

A produção de cimento gera impacto no meio ambiente a partir da liberação de CO_2 onde o gás carbônico atua diretamente no fenômeno de “efeito estufa”. Embora a produção de cimento gere altas taxas de dióxido de carbono, os produtos da hidratação do cimento apresentam a capacidade de reabsorver o gás carbônico a partir de um fenômeno físico-químico denominado carbonatação. Esta pesquisa relacionou este fenômeno físico-químico a um material considerado sustentável como o concreto permeável. Este tipo de concreto pode ser utilizado em pavimentos não armados. A pesquisa se concentra em analisar a capacidade de captura de CO_2 em placas de concreto permeável. Foram analisadas, quanto a carbonatação, misturas produzidas com duas faixas granulométricas de seixo rolado e aglomerante CP II F com relações a/c de 0,33 e 0,37 nos ambientes protegidos e desprotegidos de chuva, e em ambiente acelerado em câmara de CO_2 . Foi utilizado indicador químico de fenolftaleína para aferir a ocorrência de carbonatação em cinco idades de leitura e software de análise de imagens para estudo das superfícies carbonatadas. O material apresentou resultados satisfatórios quanto aos parâmetros mecânicos, hídricos e de profundidade de carbonatação, tendo reabsorvido o gás da atmosfera a partir da pasta de cimento que envolve os grãos de agregado do esqueleto granular do material.

Palavras-chave: Captura De Carbono. Concreto Permeável. Materiais Cimentícios. Pavimentos Drenantes.

ABSTRACT

CARBON UPTAKE ON PERVIOUS CONCRETE PLATES

The production of cement has an impact on the environment from the release of CO_2 where carbon dioxide acts directly on the phenomenon of "greenhouse effect". Although cement production generates high rates of carbon dioxide, cement hydration products have the ability to reabsorb carbon dioxide from a physical-chemical phenomenon called carbonation. This research related this physical-chemical phenomenon to a material considered sustainable, such as permeable concrete. This type of concrete can be used on non-reinforced floors. The research focuses on analyzing the ability to capture CO_2 in permeable concrete slabs. As for carbonation, mixtures produced with two granulometric bands of pebble and CP II F agglomerate with a/c ratios of 0.33 and 0.37 were analyzed in protected and unprotected environments, and in an accelerated environment in a CO_2 chamber. A chemical phenolphthalein indicator was used to assess the occurrence of carbonation in five ages of reading and image analysis software to study the carbonated surfaces. The material showed satisfactory results in terms of mechanical, water and carbonation depth parameters, having reabsorbed the atmosphere gas from the cement paste that surrounds the aggregate grains of the material's granular skeleton.

Keywords: Carbon Uptake. Pervious Concrete. Cementitious materials. Pervious Pavement.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Contextualização	1
1.2.	Motivação, Justificativa e Relevância da Pesquisa	3
1.3.	Questão de Pesquisa	5
1.4.	Hipótese de Pesquisa	5
1.5.	Objetivos	5
1.5.1.	Objetivo Geral	5
1.5.2.	Objetivos Específicos.....	5
1.6.	Estrutura do texto de Dissertação	5
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1.	Mudanças Climáticas	6
2.1.1.	Efeito Estufa	7
2.1.2.	Emissões de Dióxido de Carbono	10
2.1.3.	Emissões a partir da Produção de Cimento	12
2.2.	Captura de Carbono	15
2.2.1.	Emissões de carbono e Medidas mitigatórias	15
2.2.2.	Armazenamento Mineral	16
2.2.3.	Captura de Carbono e Materiais Cimentícios.....	18
2.3.	Carbonatação	21
2.3.1.	Características da Carbonatação.....	21
2.3.2.	Temperatura	26
2.3.3.	Umidade	27
2.4.	Concreto Permeável	28
2.4.1.	Características do Concreto Permeável	29
2.4.2.	Parâmetros Normativos do Concreto Permeável	33
2.4.3.	Utilizações Sustentáveis do Pavimento Permeável.....	35
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	37
3.1.	Planejamento do experimento	37
3.1.1.	Fatores Controláveis	38
3.1.2.	Fatores Fixos	39

3.1.3.	Variáveis de Resposta	39
3.2.	Materiais.....	41
3.2.1.	Aglomerante	41
3.2.2.	Agregados	41
3.2.3.	Água	42
3.3.	Métodos.....	43
3.3.1.	Dosagem do concreto permeável.....	43
3.3.2.	Produção do concreto permeável.....	43
3.3.3.	Caracterização das placas permeáveis.....	47
3.3.4.	Estudo de carbonatação em ambiente natural	50
3.3.5.	Carbonatação acelerada	55
3.3.6.	Avaliação do potencial de captura de carbono em CPER	57
4.	Apresentação e Discussão de Resultados.....	59
4.1.	Parâmetros de Dosagem do Concreto Permeável	59
4.2.	Parâmetros Mecânicos do Concreto Permeável	60
4.3.	Parâmetros Hídricos do Concreto Permeável	61
4.4.	Carbonatação do Concreto Permeável	63
4.4.1.	Análise da carbonatação.....	63
4.4.2.	Microscopia Eletrônica de Varredura	73
4.4.3.	Captura de Carbono.....	75
5.	Conclusões.....	77
	Sugestões para próximas pesquisas	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Coeficiente de permeabilidade.....	34
Tabela 2.2 - Resistência de tração na flexão.	34
Tabela 3.1 - Quantidade de amostras por mistura de concreto.....	39
Tabela 3.2 - Caracterização dos agregados.....	42
Tabela 3.3 - Consumo dos materiais em massa.	44
Tabela 4.1 - Avaliação do concreto permeável.	59
Tabela 4.2 - Caracterização hídrica.	61
Tabela 4.3 - Parâmetros hídricos e área carbonata Cura:28 dias).....	69
Tabela 4.4 - Profundidade de carbonatação média (mm)	70
Tabela 4.5 - Profundidade de carbonatação média (mm)	72
Tabela 4.6 - Elementos identificados por EDS.....	75
Tabela 4.7 - Captura de Carbono.....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1– Concentração global de gases estufa.	8
Figura 2.2 – Variação global de temperatura superficial.	9
Figura 2.3 - Emissões antropogênicas globais de dióxido de carbono.	10
Figura 2.4 - Variação da temperatura (1986 – 2005 e 2081 – 2100).	11
Figura 2.5 - Variação de precipitação (1986 – 2005 e 2081 – 2100).	11
Figura 2.6 – Emissões de CO ₂ em processos industriais.	12
Figura 2.7 – Emissões líquidas de carbono em 2015.	13
Figura 2.8 – Emissões de CO ₂ por ton. de cimento produzido.	14
Figura 2.9 – Capacidade e tempo de armazenamento de carbono.	17
Figura 2.10 - Corrosão de armadura de aço.	21
Figura 2.11 - Coroa carbonatada indicando queda de Ph.	22
Figura 2.12 - Carbonatação no concreto permeável.	23
Figura 2.13 - Placa de concreto permeável.	29
Figura 3.1 - Fluxograma das etapas da pesquisa.	37
Figura 3.2 - Planejamento dos ensaios de carbonatação.	40
Figura 3.3- Curva granulométrica do seixo rolado.	42
Figura 3.4 - Ordem de mistura dos materiais.	44
Figura 3.5 - Produção do concreto permeável.	46
Figura 3.6 - Prisma de concreto permeável.	48
Figura 3.7 – Esquema de caracterização hídrica.	48
Figura 3.8 - Corpos de prova prismáticos em ambiente protegido.	51
Figura 3.9 - Limites de área carbonatada.	53
Figura 3.10 - Amostras em ambiente natural.	54
Figura 3.11 - Ensaio Acelerado.	56
Figura 4.1 - Concreto Permeável – Estado Endurecido.	59
Figura 4.2 - Análise visual de coesão.	59
Figura 4.3 - Resistência à tração na flexão aos 28 dias.	60
Figura 4.4. Placas para caracterização hídrica.	61
Figura 4.5 - Porosidade Total.	62
Figura 4.6 - Porosidade Efetiva.	62
Figura 4.7 Carbonatação - Ambiente Protegido.	63
Figura 4.8 - Carbonatação - Ambiente Desprotegido.	64
Figura 4.9 – Carbonatação x Ambientes.	65
Figura 4.10 - Carbonatação x Ambientes.	65

Figura 4.11 – Carbonatação x Ambientes.....	66
Figura 4.12 - Carbonatação x Ambientes.....	66
Figura 4.13 - Carbonatação x a/c (cura: 7 d).....	67
Figura 4.14 - Carbonatação x A/C (cura: 7 d.).....	67
Figura 4.15 - Carbonatação x a/c (cura: 28 d).....	68
Figura 4.16 - Carbonatação x a/c (cura: 28 d).....	68
Figura 4.17 – Carb. acelerada (Cura: 7 dias).....	70
Figura 4.18 – Carb. acelerada (Cura: 28 dias)	70
Figura 4.19 - Carbonatação acelerada.....	71
Figura 4.20 - Região carbonatada.....	73
Figura 4.21 - Região carbonatada.....	73
Figura 4.22 - Região carbonatada.....	73
Figura 4.23 - Região carbonatada.....	73
Figura 4.24 - Micrografia para análise EDS.	74

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 – Formação de ácido carbônico	24
Equação 2.2 – Dissociação do ácido carbônico.....	24
Equação 2.3 – Dissociação do ácido carbônico.....	24
Equação 2.4 – Dissolução do hidróxido de cálcio.....	24
Equação 2.5 – Produção de carbonato de cálcio.....	24
Equação 2.6 – Carbonatação.....	25
Equação 3.1 – Coeficiente de Permeabilidade.....	49
Equação 3.2 – Porosidade total.....	49
Equação 3.3 – Densidade teórica	50
Equação 3.4 – Porosidade efetiva.....	50
Equação 3.5 – Massa de carbono.....	57
Equação 3.6 – Massa de carbono.....	58

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI - American Concrete Institute
A/C - Relação água/cimento
 $CaCO_3$ - Carbonato de Cálcio
 CO_2 - Gás Carbônico
 $Ca(OH)_2$ - Hidróxido de Cálcio
CP IV - Cimento Portland pozolânico
CPER- Concreto Permeável
COP 21 - Conferência da ONU sobre as Mudanças Climáticas de 2015
EPA - Environmental Protection Agency
EUA - Estados Unidos da América
GEE - Gases de Efeito Estufa
 H_2O - Água
 H_2CO_3 - Ácido Carbônico
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
LEMAC – Laboratório de Materiais de Construção
MATCAM – Laboratório de Caracterização de Materiais
MCTIC - Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
NBR - Norma Brasileira
ONU- Organização das Nações Unidas
OH - Íon hidroxila
PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PH - Potencial Hidrogeniônico
RMB – Região Metropolitana de Belém
SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
UFPA - Universidade Federal do Pará

LISTA DE SIMBOLOS

- A – Área superficial do concreto exposta ao gás carbônico
- C – Fator de Correção do coeficiente de permeabilidade
- c – Quantidade de cimento
- CaO – Quantidade de óxido de cálcio contido no cimento
- d – Diâmetro interno do cilindro
- k – Coeficiente de Permeabilidade
- M – Fração molar do CO_2/CaO .
- m – Massa de água
- m_1 – Massa da amostra seca por 24 horas em estufa
- m_2 – Massa da amostra saturada após submersão de 24 horas em água
- MCO_2 – Massa de carbono
- mv – Minoração de volume do concreto permeável
- P_c – Razão cimento/agregado em massa,
- ρ_c – Massa específica do agregado
- ρ_t – Densidade teórica
- ρ_s – Densidade real do concreto
- ρ_w – Massa específica da água
- r – Proporção de CaO totalmente carbonatável
- t – Tempo
- v – Volume da amostra em centímetro cúbico
- v_e – Porosidade efetiva
- v_t – Porosidade total
- y – Profundidade carbonatada

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

O concreto é um material de ampla utilização no desenvolvimento urbano, podendo ser aplicado em diversas edificações e obras de infraestrutura. Este material possibilita a moldagem de diferentes elementos estruturais de variadas formas e tamanhos, apresentando durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008; Neville, 2016). As qualidades citadas resultam em elevada demanda por concreto e, conseqüentemente, grande produção de cimento, a partir de processos industriais que resultam em emissão de gases poluentes.

A grande concentração destes gases na atmosfera representa uma problemática atual de forma que se busca maneiras de atenuar as emissões no período de produção do cimento ou após a liberação do gás em processos industriais. Nesse sentido o presente trabalho aborda uma possível potencialidade dos materiais cimentícios em capturar carbono durante a fase de uso do concreto, atuando como medida mitigatória no balanço de carbono do material, a partir de reações de carbonatação.

A produção de cimento em nível mundial atingiu valores significativos a partir do desenvolvimento urbano, chegando a ser produzido 76,2 bilhões de toneladas de cimento entre 1930 e 2013, sendo 4 bilhões de toneladas apenas em 2013 (XI et al., 2016). Apenas no ano de 2015, o Brasil emitiu 23 milhões de toneladas do gás para a fabricação do aglomerante (MCTIC,2017). Toda esta produção gera impacto no meio ambiente pois a fabricação de cimento envolve o processo de aquecimento de rochas calcárias em temperaturas em torno de 1450°C (NEVILLE, 2016)

O gás liberado neste processo industrial pertence aos chamados gases estufa. Segundo o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2018), o gás carbônico atua diretamente no fenômeno de “Efeito Estufa”, de forma que o aumento progressivo de sua concentração no ar acelera a variação climática na Terra. A liberação de CO₂ resultantes da fabricação de cimento chega a representar 5% das emissões globais deste gás por processos industriais (PADE e GUIMARAES, 2007), contribuindo para o aquecimento climático, uma vez que o concreto é um dos materiais de construção mais utilizados no mundo todo (ANDRADE e HELENE, 2010).

Embora a conseqüente queima do calcário gere altas taxas de gás carbônico (CO_2), liberando até 1100 Kgs na atmosfera (LIMA,2010) durante a produção do aglomerante, os produtos da hidratação do cimento apresentam a capacidade de reabsorver o dióxido de carbono a partir de um fenômeno físico-químico denominado carbonatação. Este fenômeno é indesejável do ponto de vista de durabilidade para o concreto armado. Quando estruturas de concreto são reforçadas com armaduras de aço, o efeito da carbonatação é considerado nocivo pois pode ser relacionado à corrosão das armaduras ao longo do tempo.

Uma conseqüência das reações químicas envolvidas é a diminuição do pH do material, produzindo um ambiente favorável à corrosão das armaduras e diminuindo a durabilidade. Porém, em elementos não armados, a carbonatação pode ter uma nova abordagem relacionada ao potencial de captura de CO_2 . Nesse contexto, citam-se como exemplo pisos de concreto que são estruturas que apresentam elevada área superficial. A área superficial dos elementos produzidos com cimento é a primeira região a ter contado com o dióxido de carbono disperso no ambiente. A partir da porosidade que o elemento cimentício apresentar, o gás ingressará na superfície e poderá reagir com elementos produzidos durante o ganho de resistência do concreto.

O concreto permeável é um material que pode ser utilizado em pavimentos sem a necessidade de reforço com armaduras de aço. Sua aplicação tem como uma de suas finalidades o controle do escoamento urbano de águas pluviais. Este material não necessita de reforço com armaduras de aço e, por ser drenante, tem elevada permeabilidade originada pela grande quantidade de vazios presentes no material. Estas propriedades poderiam influenciar a maneira como o material captura carbono.

As características do concreto permeável e suas aplicações mais comuns poderiam apresentar potencialidades em relação à captura de carbono por carbonatação em elementos cimentícios não armados, explorando a área superficial do concreto. Neste cenário, mostra-se interessante analisar as propriedades deste material frente a uma nova abordagem sobre a carbonatação, onde as reações entre os produtos de hidratação do cimento com o dióxido de carbono não representem somente algo deletério ao concreto.

1.2. Motivação, Justificativa e Relevância da Pesquisa

O tema sobre mudanças climáticas e poluição industrial vem ganhando cada vez mais notoriedade no meio científico a partir dos dados sobre aquecimento climático divulgados no século XXI que afirmam o fator antrópico como potencializador do efeito estufa (IPPC, 2013). Encontros internacionais entre líderes de Estado ocorreram de forma a externar ao mundo a preocupação com o meio ambiente desde a conferência internacional de Estocolmo em 1972. Mais recentemente, a temática destes encontros gira em torno da emissão de gases poluentes e consequentes variações de temperatura no globo. A COP 21, por exemplo, ocorrida na cidade de Paris em 2015, buscou metas para o controle das emissões de CO₂ nos países que foram signatários ao acordo climático realizado (ONU, 2015).

A preocupação com a liberação de gases estufa está relacionada ao aumento da temperatura média do planeta a partir do Efeito Estufa, onde o crescimento da concentração de carbono no ar resulta na aceleração do aquecimento da atmosfera (HARTMANN, 2015; IPCC, 2018). Desta forma, é necessário analisar possíveis medidas mitigatórias que podem atenuar o balanço de emissões de materiais que gerem grandes lançamentos de gases na atmosfera.

Este contexto motiva e justifica a pesquisa em torno de estudos que busquem analisar a contribuição do concreto em recuperar carbono, ao longo do tempo, uma vez que o material gera impacto, mas pode recuperar uma parcela emitida. Isto diminui em parte o impacto das emissões de gases estufa pela produção de materiais da construção civil como o cimento, por exemplo. O desafio se encontra em pesquisar formas de armazenar, permanentemente, o gás carbônico do ambiente e conseguir estimar o potencial de captura deste gás durante a vida útil do material utilizado, como visto em Jacobsen e Jahren (2002), Pade e Guimaraes (2007) e Galan et al. (2010).

A captura de dióxido de carbono não representa, diretamente, uma solução para o problema de emissões a partir da produção do cimento, mas se trata de uma medida compensatória que reabsorverá parte do que foi emitido (PADE e GUIMARAES, 2007; POSSAN et al., 2012). Sabe-se que as soluções que atuam diretamente na produção de gases estufam dependem de estudos longos e, muitas vezes, fatores econômicos e políticos interferem na implementação de novas

tecnologias que mudem processos produtivos. A produção de materiais que liberam o dióxido de carbono como subproduto da queima de combustíveis ou descarbonatação de matéria-prima é um exemplo destes processos produtivos. Segundo Jang et al. (2016) e Branko e Mladena (2016), captura de carbono por meio de armazenamento mineral de CO_2 vem ganhando destaque na última década, onde o gás reage com um componente químico reativo e solúvel presente em um material cimentício, de forma a produzir carbonatos estáveis no estado sólido.

O concreto permeável pode ser analisado neste cenário por ser um material cimentício e poder carbonatar ao longo do tempo. Trata-se de um tipo de concreto não convencional, o qual apresenta um esqueleto granular formado por agregados graúdos de diferentes faixas granulométricas. A composição deste concreto tem a característica peculiar de apresentar macroporos em seu interior. Estes macroporos possibilitam maior ingresso de gases como o dióxido de carbono no interior da estrutura. As aplicações mais comuns do concreto permeável são em pavimentos para calçadas e estacionamentos, logo, o potencial de capturar carbono pode ser explorado em elevadas áreas superficiais.

Pavimentos drenantes já apresentam aplicações do ponto de vista sustentável ou ecológico, como no controle de picos de cheia, controle do escoamento superficial de águas pluviais e pavimentos ao redor de áreas com vegetação, possibilitando passagem de água da chuva pelo elemento até chegar ao solo e, posteriormente, nas raízes das árvores e plantas. O concreto permeável também é uma tecnologia que busca uma alternativa para contornar a excessiva diminuição da permeabilidade no meio urbano atribuída aos pavimentos.

Neste contexto, esta pesquisa é parte integrante do projeto de pesquisa de Chamada Universal/CNPQ sobre concreto permeável, realizada na Universidade Federal do Pará (UFPA), que busca um maior entendimento sobre as características do material, quando produzido em placas que serão destinadas à pavimentação. Esta dissertação abordará a capacidade de captura de CO_2 pela carbonatação em placas de concreto drenante destinadas à pavimentos, discutindo o comportamento deste material frente a captura de carbono.

1.3. Questão de Pesquisa

- Como se comporta o fenômeno da carbonatação e captura de carbono no concreto permeável?

1.4. Hipótese de Pesquisa

- Os vazios interconectados facilitam a entrada de gás carbônico no interior do material promovendo a carbonatação e captura de carbono.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo Geral

- Esta pesquisa tem como objetivo analisar o potencial de captura de carbono em placas de concreto permeável.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Analisar o efeito da condição de exposição no fenômeno de carbonatação em placas de concreto permeável;
- Analisar o efeito da relação água/cimento no fenômeno de carbonatação em placas de concreto permeável.

1.6. Estrutura do texto de Dissertação

O texto de Dissertação de Mestrado apresenta cinco capítulos abordando diferentes aspectos da pesquisa. O primeiro capítulo, trata da contextualização, motivação, justificativa e relevância da pesquisa. Os objetivos gerais e específicos, bem como hipóteses e questões de pesquisa também são apresentados.

O capítulo 2 trata da revisão bibliográfica realizada abordando assuntos relacionados à captura de carbono, aumento da concentração de carbono na atmosfera, concreto permeável e o fenômeno físico-químico da carbonatação.

O capítulo 3 aborda o programa experimental, os materiais utilizados, o modo de produção e a caracterização do concreto permeável.

O capítulo 4 apresenta e discute a análise dos resultados dos ensaios de carbonatação e os resultados para os ensaios que avaliaram as propriedades hidrológicas e mecânicas do material.

O capítulo 5 aborda as conclusões da pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Mudanças Climáticas

O aumento dos valores obtidos de temperatura média na Terra é um dos temas mais discutidos no século XXI, sendo um fenômeno que se intensificou nas últimas décadas, através do aquecimento global. Segundo o IPCC (2018), o cenário atual de aquecimento no planeta é influenciado pela ação humana, por meio de processos industriais, geração de energia, queima de combustíveis fósseis e consequente emissão de gases que atuam na retenção de calor na atmosfera, provocando seu aquecimento.

As mudanças climáticas são percebidas nas observações de variações de precipitação e regime de chuvas, aquecimento climático, taxas maiores de degelo no Ártico e aumento do nível da água nos oceanos, por exemplo. Estas mudanças provocaram preocupação na comunidade científica que começou a discutir mais profundamente as questões ambientais em conferências organizadas pela Organização das Nações Unidas (ONU) desde a década de 70 e que continuaram a ocorrer nas décadas seguintes.

Em 1997, um grande acordo internacional foi assinado entre os países integrantes da ONU, na cidade de Kyoto. O acordo cria diretrizes a partir de um protocolo que busca reduzir a emissão de gases causadores de Efeito Estufa, amenizando as consequências dos impactos ambientais decorrentes do desenvolvimento industrial na Terra.

Mais recentemente, ocorreu a Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas em 2015, na cidade de Paris. Chamado de COP 21, este evento reuniu líderes de 197 países, tendo como principal objetivo discutir o clima no planeta e as mudanças climáticas causadas pelo efeito estufa e aquecimento global (ONU, 2015). A COP 21 buscou envolver não só os países desenvolvidos, mas também, os países subdesenvolvidos e em desenvolvimento.

Segundo a Organização das Nações Unidas o resultado da conferência foi estabelecido através do acordo de Paris, o qual visa a redução do aquecimento global, para que até 2100, a temperatura média da Terra apresente um crescimento inferior a 2°C. Esta meta aponta para uma tendência mundial de minimizar os impactos das mudanças climáticas (ONU, 2015). Este acordo é um marco no combate as emissões industriais, motivando a redução dos riscos provenientes de

mudanças climáticas, onde cada país participante se compromete a reduzir as emissões de gases estufa.

O aquecimento global pode envolver o aumento de catástrofes de origem natural, afetando países com litoral e a segurança dos habitantes das localidades costeiras. O aumento de riscos em nível global foi discutido no Marco de Sendai, no Japão, que reuniu 187 líderes de Estado. Os países representados se comprometeram em adotar a Declaração de Sendai e o Marco para a Redução de Riscos de Desastres no período de 2015 até 2030. A adoção bem-sucedida do Marco envolve engajamento político dos signatários, compreensão dos riscos de desastres naturais, melhorar o gerenciamento de riscos por parte dos países, investimento na redução de vulnerabilidades e reforçar a prevenção de desastres.

2.1.1. Efeito Estufa

O Efeito estufa é definido como um fenômeno de aquecimento térmico e atmosférico que ocorre naturalmente na Terra, segundo o relatório base de ciência física (IPCC, 2013). Ele é fundamental para manter a temperatura do globo em condições ideais para a sobrevivência de fauna e flora nos biomas do planeta. Caso não existisse o efeito estufa natural, a temperatura da Terra seria fria em excesso, impossibilitando a sobrevivência dos seres vivos e reprodução das espécies. Uma parcela da energia dos raios ultravioletas emitidos pelo Sol para o planeta Terra é refletida de volta para o espaço e outra parcela é absorvida pela superfície terrestre e pela água dos oceanos. Parte do calor irradiado de volta ao espaço, em forma de raios infravermelho, é retida pelos gases de efeito estufa presentes na atmosfera (AMAP, 2011; HARTMANN, 2015).

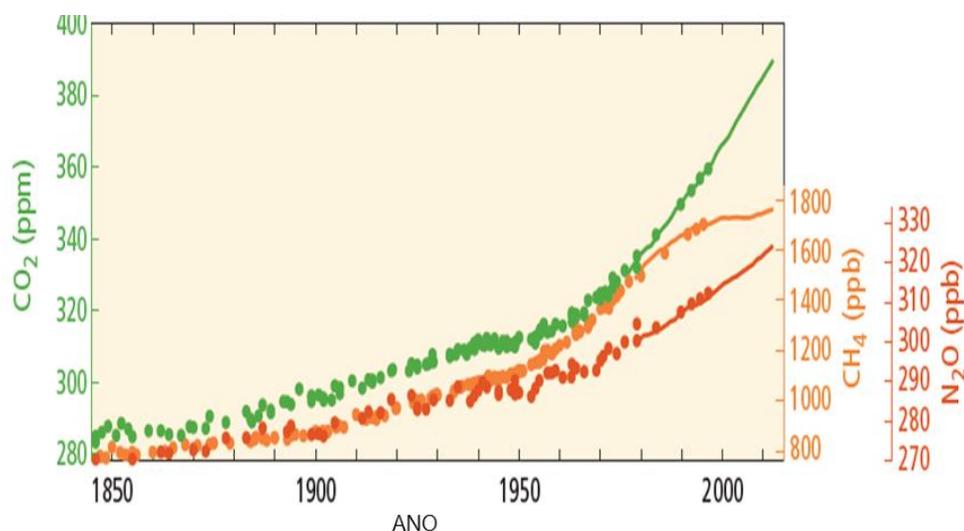
A comparação feita com a estufa se baseia no que acontece na estrutura de vidro que recebe este nome, onde os raios solares atravessam os vidros e esquentam a parte interna da estufa. Os raios infravermelhos ou calor não conseguem se dispersar facilmente devido a presença de barreiras que são as paredes de vidro. Parte do calor fica retido no interior da estrutura, provocando o aquecimento da mesma. Os gases de efeito estufa emitidos por processos industriais, presentes na atmosfera, funcionam como o vidro da estufa, permitindo a entrada da radiação ultravioleta, mas dificultando que toda ela seja irradiada de volta ao espaço (AMAP, 2011; IPCC, 2013).

Este efeito é potencializado através de fatores antropogênicos, ou seja, fatores que são produzidos pela ação humana (IPCC 2014). Quando o Efeito Estufa é intensificado artificialmente, este fenômeno deixa de ter um caráter positivo de manutenção de temperatura e passa a ter um caráter nocivo de aquecimento além do normal para a vida da Terra, resultando em mudanças climáticas.

Os fatores antropogênicos estão relacionados à queima de combustíveis de origem fóssil e à processos industriais que geram emissões de gases. Os gases lançados ao ambiente atuam na absorção de mais radiação e consequente retenção de calor (HARTMANN, 2015). As emissões de gases de efeito estufa (GEE), a partir da ação humana, aumentaram desde a revolução industrial, promovidas pelo desenvolvimento econômico e crescimento populacional nos grandes centros urbanos.

Nos últimos séculos, gases considerados de efeito estufa, ou seja, gases que retêm energia térmica proveniente da radiação solar, como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) tiveram aumento progressivo de suas concentrações na atmosfera do planeta (IPCC, 2014), como visto na Figura 2.1.

Figura 2.1– Concentração global de gases estufa.



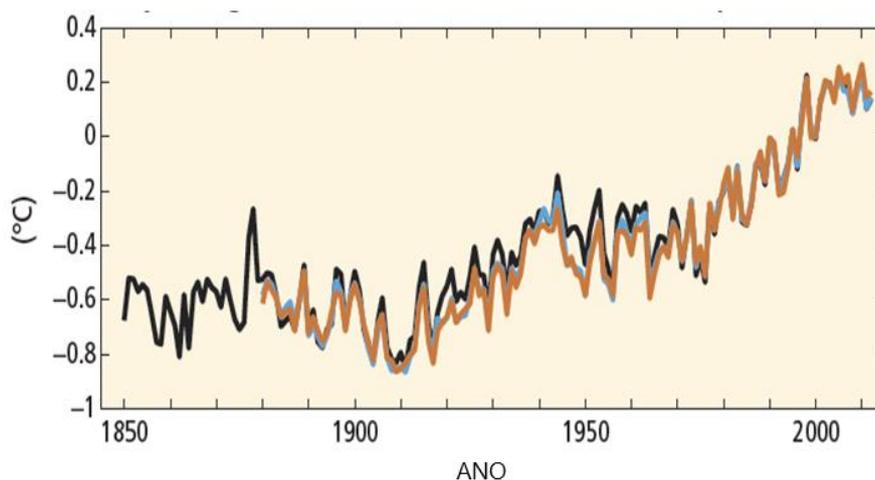
Fonte: IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. pag 3. 2014.

O aumento de concentrações dos gases conforme a Figura 2-1 pode ser relacionada a fatores antropogênicos como a disseminação de processos industriais pelo mundo. Segundo o Relatório Síntese de Mudanças Climáticas divulgado pelo IPCC (2014), os efeitos das emissões em larga escala de GEE foram percebidos em todo o sistema climático do planeta e são prováveis de terem

potencializado o aquecimento observado desde meados do século XX. As pesquisas abordadas no Relatório Síntese apontam que cada uma das últimas três décadas foi, sucessivamente, mais quente na superfície da Terra do que em outra década anterior. O registro histórico aponta que o período de 1983 a 2012 foi provavelmente o período mais quente dos últimos 1400 anos.

Este fenômeno evidencia o processo de aquecimento climático do planeta, onde, desde a década de 1950 é observado maiores temperaturas médias na atmosfera e no oceano devido e derretimento das quantidades de gelo nas calotas polares, como visto na Figura 2.2. É possível visualizar a progressão da tendência a partir de 1950, onde a variação de temperatura continua aumentando, chegando a valores de variações maiores que antes de 1950, onde as linhas preta, azul e laranja representam, cada uma, diferentes bancos de dados do IPCC, corroborando a partir de diferentes bancos de dados a tendência de aumento.

Figura 2.2 – Variação global de temperatura superficial.



Linhas de cor preta, azul e laranja representam três diferentes bancos de dados do IPCC
Fonte: IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. pag 3. 2014.

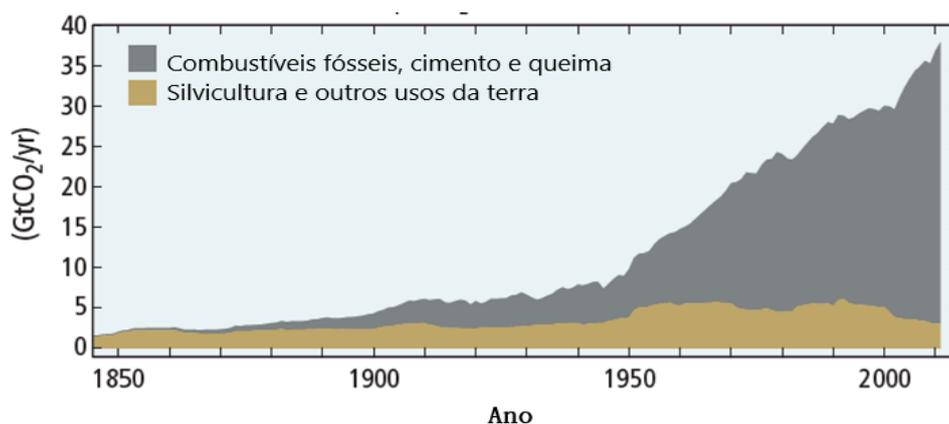
O relatório nacional sobre a base científica das mudanças climáticas (PBMC, 2016) corrobora os efeitos na temperatura, citando a ocorrência de variações de índices baseados na temperatura mínima diária. Estas variações provocam aumento de noites quentes e diminuição de noites frias na maior parte da América do Sul, resultando em maiores variações da amplitude diurna e noturna da temperatura. Estas consequências são abordadas no relatório de Ciência Básica de Mudanças Climáticas (IPCC, 2013), onde é discutido as tendências do cenário atual de aumento da temperatura global. Uma preocupação dos ambientalistas é o impacto que estas variações podem gerar nos biomas da natureza (PBMC, 2018).

2.1.2. Emissões de Dióxido de Carbono

O IPCC sinaliza que as emissões de CO₂ resultantes da combustão de combustíveis fósseis e processos industriais de produção, incluindo produção de cimento em escala global, contribuíram com cerca de 78% do aumento total das emissões de gases de efeito estufa no período compreendido entre os anos 1970 a 2010.

A partir de 1950, as emissões de dióxido de carbono aumentaram progressivamente no planeta, como é mostrado na Figura 2.3 e coincide com a tendência do aumento da variação de temperatura para o mesmo período visualizado na Figura 2.2. A hipótese da relação entre emissões de gases estufa e aquecimento climático visto nas últimas décadas é fortemente defendida pelos relatórios científicos publicas pelo IPCC.

Figura 2.3 - Emissões antropogênicas globais de dióxido de carbono.



Fonte: IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. pag 3. 2014.

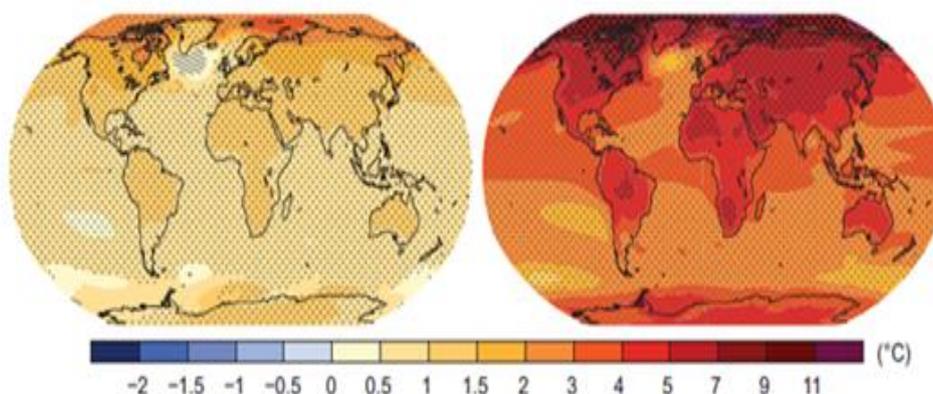
Nota-se o quão relevante são as emissões de gás carbônico no setor de indústrias e consumo de combustível de origem fóssil, acentuando grande crescimento na taxa de emissões, pois a tendência antes de 1950 era muito menor que a nova tendência vista a partir de 1950, onde a quantidade de gigatoneladas de dióxido de carbono ao ano aumenta de forma intensa.

As políticas de mitigação do aquecimento global e uso de materiais que armazenem por reações químicas os GEE visam diminuir a progressão de consequências negativas no clima como mudanças na precipitação e alteração dos sistemas hidrológicos. Estes fenômenos afetam os recursos hídricos, quantitativamente e qualitativamente, onde as espécies são influenciadas a

mudarem de habitat, seus padrões de migração e interações com outras espécies em resposta às mudanças climáticas. Podem ocorrer, também, diminuição da superfície e volume de gelo, derretimento das calotas polares e aumento do nível da água (AMAP, 2019). Os impactos também podem ocorrer nos centros urbanos, atuando em vulnerabilidades das grandes cidades (PBMC, 2017).

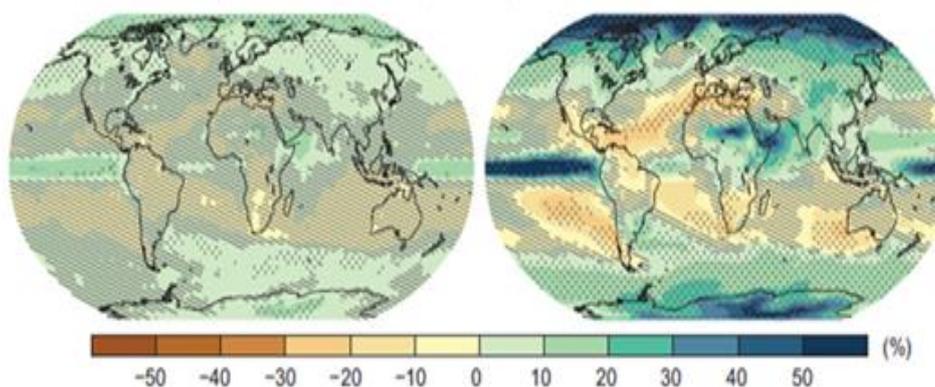
As Figuras 2.4 e 2.5 mostram as alterações de temperatura superficial e precipitação no globo de 1986 até 2005, respectivamente, bem como a projeção realizada (IPCC, 2013) para o período de 2081 a 2100. Percebe-se que as projeções não são muito animadoras no que tange o progresso das mudanças climáticas no globo caso o efeito estufa continue sendo intensificado por fatores antropogênicos. Como visto, as emissões de gases estufa contribuem para estes cenários, principalmente o dióxido de carbono, emitido em grande quantidade em escala mundial pela indústria cimenteira.

Figura 2.4 - Variação da temperatura (1986 – 2005 e 2081 – 2100).



Fonte: IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. pag 12. 2014.

Figura 2.5 - Variação de precipitação (1986 – 2005 e 2081 – 2100).



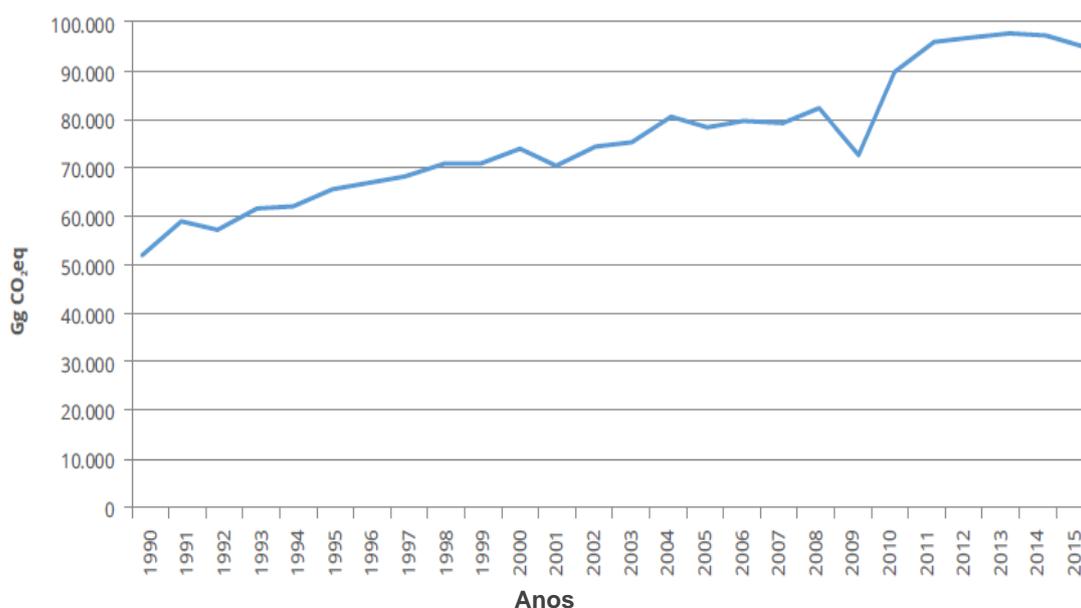
Fonte: IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. pag 12. 2014.

2.1.3. Emissões a partir da Produção de Cimento

No Brasil, a indústria cimenteira tem participação relevante no quadro nacional de emissões por processos industriais. Segundo dados obtidos no relatório de emissões de gases de efeito estufa no Brasil (MCTIC, 2017), as emissões no setor de processos industriais, englobando variados tipos de indústrias, apresentaram crescimento de 21,86% nas emissões de CO₂ no período entre 2005 a 2015, sendo emitidos 95 milhões de toneladas em 2015.

A Figura 2.6 mostra o crescimento das emissões de dióxido de carbono ao longo dos anos neste setor. Percebe-se o grande crescimento a partir de 2010 coincidindo com a alta produção de cimento neste período, o qual o país sediou eventos como a Copa do Mundo de futebol em 2014 e Jogos Olímpicos de 2016.

Figura 2.6 – Emissões de CO₂ em processos industriais.



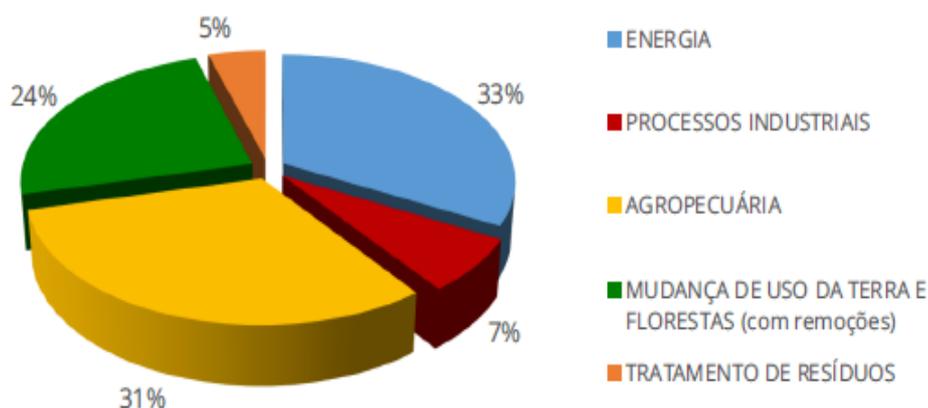
Fonte: MCTIC, *Estimativas Anuais De Emissões De Gases De Efeito Estufa No Brasil*. Pag15.2017.

Nos eventos citados, as cidades-sede precisaram melhorar a infraestrutura urbana necessária para viabilizar a realização dos eventos, construindo estádios, hotéis e viadutos por exemplo. Cabe ressaltar que o processo de fabricação de cimento é um importante integrante do setor de processos industriais no país, causando lançamento de gás carbônico na atmosfera como subproduto da produção do aglomerante. Um dos setores que mais contribuem para a liberação de gases a partir de queima de combustível e procedimentos químicos de produção é o setor de processos industriais. Este setor envolve diferentes tipos de produção

em grande escala por todo o território nacional de produtos e materiais. Dependendo do tipo de reações envolvidas nas atividades de fabricação, uma quantidade considerável de gás carbônico pode ser lançada ao ambiente.

O setor de processos industriais, no Brasil, representa 7% das emissões líquidas no país (Figura 2.7). Dentro deste setor, a produção do cimento representa 24,9% de participação, emitindo 23 milhões de toneladas em 2015 (MCTIC,2017). Entre 2005 e 2015 houve aumento de 65,64% na quantidade de CO₂ liberado. Só no primeiro trimestre de 2018, segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do cimento (SNIC,2019), já tinham sido produzidos cerca de 12,5 toneladas. Apesar de possuir uma contribuição menor da divisão, o setor de processos industriais, o qual inclui as participações da indústria cimenteira apresenta altos valores.

Figura 2.7 – Emissões líquidas de carbono em 2015.



Fonte: MCTIC, *Estimativas Anuais De Emissões De Gases De Efeito Estufa No Brasil*.Pag12.2017.

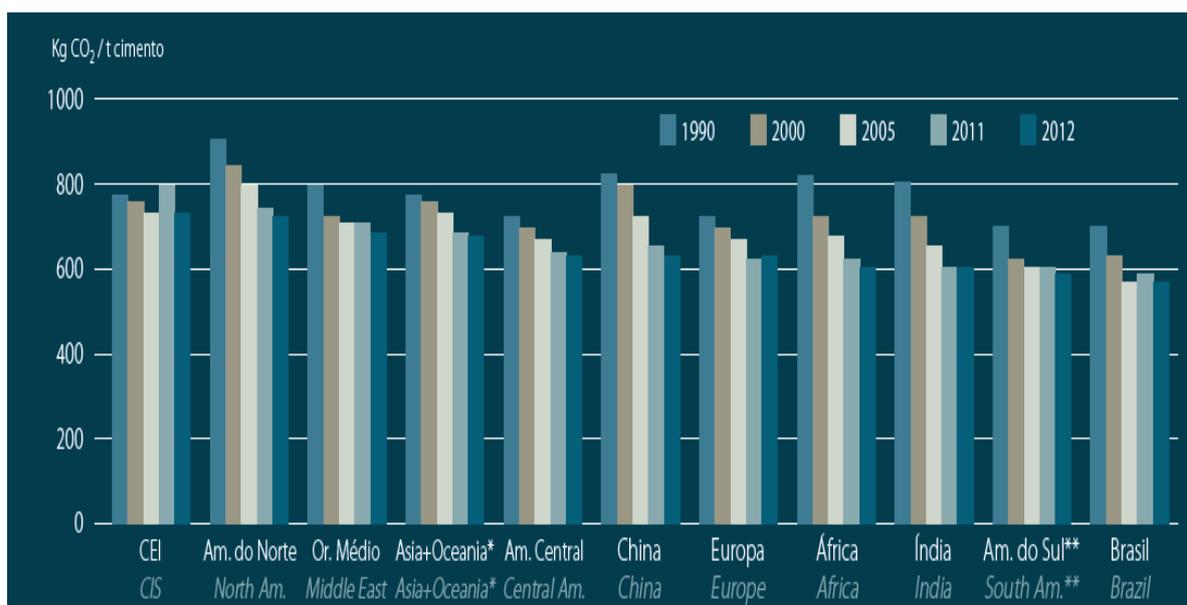
A produção de cimento está relacionada ao processo de descarbonatação do calcário. Segundo Neville (2016), o cimento Portland é constituído de material calcário, alumina e sílica, onde estes materiais sofrem moagem e queima em temperaturas de até 1450°C em fornos rotativos. O material resultante é parcialmente fundido, formando esferas denominadas de clínquer. Durante a etapa de queima em grandes fornos, a matéria-prima calcária em estado sólido, forma óxido de cálcio sólido através da separação do dióxido de carbono em estado gasoso, o qual é liberado para o ambiente.

Lima (2010) aponta que para cada de tonelada de cimento produzida, é emitido entre 700 a 1100 Kg de gás carbônico, durante a fabricação deste material, considerando queima de matéria-prima, combustível e energia. O Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2013), em coleta de dados da indústria

cimenteira, mostra que são emitidos em torno de 600 kg de CO₂ para cada tonelada produzida de cimento, no Brasil.

É possível visualizar as emissões no Brasil em comparação com outros países e continentes na Figura 2.8. Embora o Brasil emita uma quantidade considerável de gás carbônico por tonelada de cimento, o país não é o principal emissor, ficando atrás de Índia e China, por exemplo.

Figura 2.8 – Emissões de CO₂ por ton. de cimento produzido.



Fonte: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC. Relatório Anual. Pag 12. 2013.

Visando contornar as consequências dos impactos negativos gerados pelas mudanças climáticas e atingir níveis aceitáveis de gás carbônico na atmosfera, deve-se buscar a implementação conjunta de ações estratégicas de mitigação das emissões de gases industriais. Estas ações envolvem a otimização a eficiência na geração de energia, implantar fontes de energia com menores níveis de liberação de carbono e capturar CO₂ emitido a partir destes processos (GONZALEZ, 2014).

Como visto, na Figura 2.8, a magnitude das emissões de dióxido de carbono para a produção do cimento é muito elevada. As soluções ou medidas mitigatórias devem atuar na fonte das emissões do gás estufa ou atuar na recuperação deste gás, assim o setor de processos industriais, pode ter seu balanço de carbono atenuado, desacelerando o aumento da concentração de carbono pelo qual é responsável. Uma alternativa que representa uma medida mitigatória baseada em analisar a reabsorção do gás carbônico a partir de materiais que possuam esta capacidade se mostra interessante.

2.2. Captura de Carbono

2.2.1. Emissões de carbono e Medidas mitigatórias

Nas últimas décadas a preocupação com as mudanças climáticas vem aumentando e a busca por soluções e medidas compensatórias em relação as emissões de carbono são cada vez mais necessárias graças a evolução dos impactos ambientais já visíveis na natureza (IPCC, 2018; LACKNER, 2013). As possíveis alternativas poderiam ser aplicadas na origem do problema, ou seja, nos processos que originam as emissões de gases estufa e suas consequências (LIMA, 2010), ou podem ser aplicadas como medidas compensatórias após a liberação dos gases (GALAN et al., 2010; PADE e GUIMARAES, 2007).

Sabe-se que soluções para ser aplicadas em indústrias como a cimenteira levam considerável tempo de pesquisa e estudos de viabilidade que precisam levar em consideração a matéria prima utilizada, matriz energética viável e processos industriais mais eficientes. Devido a falta de interesse ou ideia de alto custo, a implementação de soluções para emissões muitas vezes ocorre de forma gradual e lenta. Desta forma, tem-se buscado analisar o potencial de materiais que podem reagir e capturar o carbono já emitido (HASELBACH e ALAM, 2015; Jang et al., 2016).

Capturar ou sequestrar o gás carbônico representa uma estratégia criativa que já foi proposta para mitigar os impactos econômico, ambiental e social das variações climáticas, onde deve-se aprimorar uma rede de captura e sequestro do dióxido de carbono, resolvendo problemas de otimização das tecnologias envolvidas (GONZALEZ, 2014). O autor citado desenvolveu pesquisa sobre estratégias para a redução das emissões de carbono, relacionando a elaboração de políticas de incentivo econômico e o desenvolvimento de infraestrutura capaz de armazenar o gás carbono.

A captura de carbono, a partir das reações com o dióxido de carbono, acontece quando este gás é separado dos outros gases encontrados no ar, através de alta pressão. Depois é injetado em lugares apropriados para a captura, seja no solo ou no oceano. Outra alternativa é capturar o dióxido de carbono a partir de reações químicas entre o gás e moléculas reagentes de materiais, de forma a produzir compostos químicos estáveis (LACKNER, 2013).

Branko e Mladena (2016) aponta que tem havido uma série de avanços recentes em pesquisas relacionadas com a utilização da pasta de cimento para reagir com o dióxido de carbono e se obter benefícios de caráter econômico ou ambiental. O autor afirma que estes benefícios podem ser considerados como uma justificativa atrativa para aproveitar, sob outro aspecto, essa reatividade com o gás carbônico.

Esta medida compensatória é relacionada ao balanço de carbono, enquanto não se soluciona de maneira mais eficaz a origem do problema de grandes emissões. O CO₂ é emitido para o ambiente, e após certo período, uma parcela é reabsorvida, sendo retirada do ar. Cabe ressaltar que este tipo de tecnologia não representa diretamente uma solução, mas sim algo que pode atenuar o balanço de carbono de alguns materiais (POSSAN et al., 2012).

Segundo Jang et al. (2016), os requisitos para armazenamento e captura de dióxido de carbono estão relacionados a eficácia da tecnologia empregada, a capacidade do meio reagente de capturar uma grande quantidade de gás carbônico, estabilidade a longo prazo, competitividade nos custos da tecnologia e baixo risco ambiental. O autor cita que a utilização de CO₂ sequestrado em um processo que resulta na produção de compostos químicos de materiais ganhou recentemente muita atenção. Mais especificamente, a captura de CO₂ por carbonatação mineral, envolvendo processos químicos entre o gás carbônico e metais alcalinos produzindo minerais.

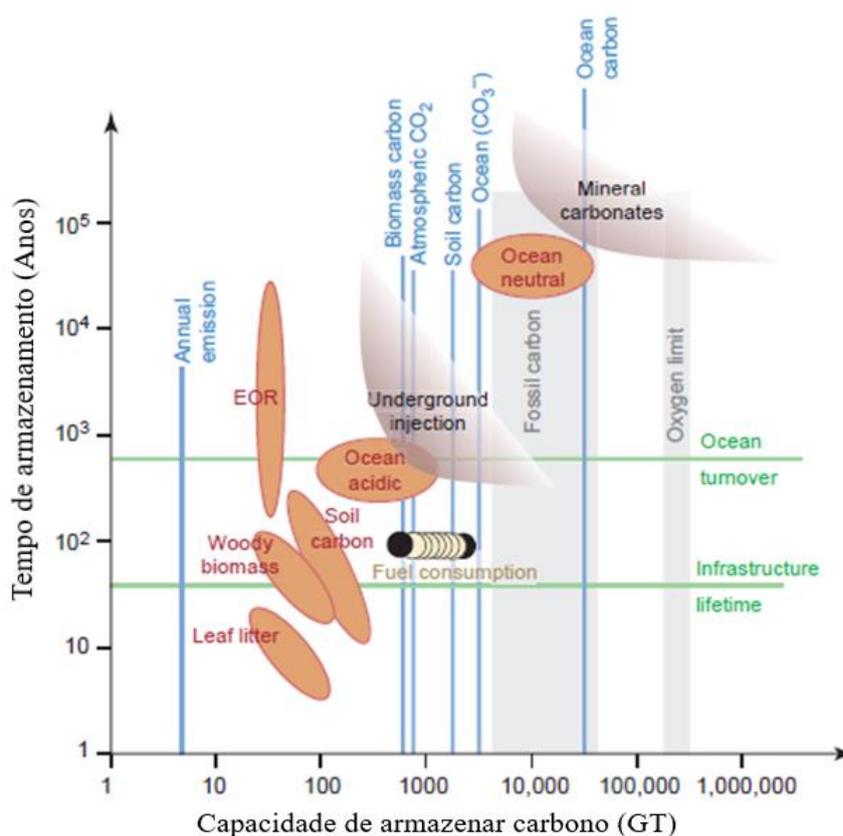
2.2.2. Armazenamento Mineral

O armazenamento mineral consiste em consumir parte do dióxido de carbono presente no ar, a partir de um conjunto de reações químicas que formam como produto carbonatos de metais alcalinos, como o cálcio, por exemplo (BRANKO e MLADENA, 2016). Estes compostos são formados em estado sólido da matéria, possuindo estabilidade. As moléculas de CO₂ no estado gasoso são absorvidas e se combinam com moléculas reagentes, ficando retidas nos carbonatos produzidos (KLUNK, 2009). Assim, o gás estufa não conseguirá voltar à atmosfera, graças a estabilidade das moléculas produzidas nas reações de captura de carbono. A característica de reter a longo prazo o carbono em carbonatos justifica a utilização e pesquisa deste tipo de tecnologia pois não se

pode correr o risco de, após algumas décadas o gás retornar para o ambiente. Isto representaria desperdício de investimentos e o tempo empregado poderia ser utilizado em outros tipos de medidas compensatórias caso houvesse o risco de retorno do gás carbônico.

Pode-se ver na Figura 2.9 (LACKNER, 2003), que a tecnologia de armazenamento mineral pela formação de carbonatos apresenta maior capacidade de armazenamento e durabilidade que outros sistemas de captura como injeção de gás no solo, no oceano e captura em biomassa. Através de comparação entre tecnologias, conclui-se que é interessante pesquisar os processos de captura de CO₂ que se adequem a configuração do armazenamento que produza minerais a partir das reações com o dióxido de carbono.

Figura 2.9 – Capacidade e tempo de armazenamento de carbono.



Fonte: Lackner, S. K., *A Guide to CO₂ Sequestration*. Science vol 300, 13 June, 2003, p 1678. 2003

Bertos (2004) sinaliza que as reações de carbonatação ocorrem em materiais com disponibilidade de cálcio. Quanto maior a concentração de Ca no material, melhor será o produto da carbonatação. O ambiente alcalino do sólido faz

com que os hidróxidos de metais formem carbonatos na presença de dióxido de carbono, caracterizando o armazenamento mineral. O autor aponta que para ser suscetível à carbonatação, os materiais que sofrerão as reações devem ser de natureza inorgânica, contendo sais de cálcio ou silício.

A alta estabilidade dos carbonatos pode ser relacionada também a vantagem deste material permanecer exposto ao ambiente, onde sua superfície será atingida por intempéries. O interessante em relação a captura de carbono é aliar a pesquisa sobre armazenamento mineral aos materiais encontrados no dia a dia, preferencialmente, aqueles geraram emissões a partir do processo de produção para atenuar o saldo do balanço de carbono do material produzido por processos industriais.

2.2.3. Captura de Carbono e Materiais Cimentícios

O concreto é um material compósito rico em carbonato de cálcio e reagentes químicos que o produzem. Este material pode apresentar potencial em consumir dióxido de carbono do ambiente e formar moléculas de $CaCO_3$. Um dos principais elementos químicos constituintes do concreto é cimento, o qual é gerado a partir de processos industriais que liberam grande quantidade de CO_2 na atmosfera a partir da queima do calcário como matéria prima (LIMA, 2010).

Apesar da queima do calcário gerar elevadas emissões, os produtos da hidratação do cimento apresentam a capacidade de reabsorver o dióxido de carbono através de um processo físico-químico chamado carbonatação. O fenômeno da carbonatação acontece quando o gás carbônico entra nos poros de materiais produzidos com cimento e reage com componentes químicos como, por exemplo, o hidróxido de cálcio na presença de umidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2016). A reação tem início na área superficial do concreto ou argamassa e avança para o interior da estrutura de forma gradual.

Os materiais cimentícios apresentam potencial de captura de dióxido de carbono através do consumo da portlandita produzida nas reações de hidratação do cimento. Esta possível aplicação da carbonatação mineral pode se mostrar adequada em relação a estruturas de concreto pois atenuaria o impacto gerado pela produção de cimento, pelo menos em uma parcela do total emitido. Ashraf et al., (2016) sinaliza que o concreto e outros materiais à base de cimento têm o

potencial de apresentar captura de carbono levando à possível redução da emissão de gases estufa, ao longo do tempo, provenientes da indústria cimenteira.

Segundo Jang et al., (2016), a carbonatação ocorre porque o cálcio é o elemento mais comum entre os hidratos de cimento Portland, e o hidróxido de cálcio tem a maior solubilidade em água em comparação com os outros compostos de cálcio. O hidróxido de cálcio confere o caráter básico do meio e geralmente existe em estado sólido. O autor cita que a reação de carbonatação na pasta de cimento ocorre dentro de poros capilares.

Branko e Mladena (2016) aponta que é comumente assumido que o hidróxido de cálcio é o produto de hidratação que reage mais prontamente com CO_2 . O dióxido de carbono pode reagir com o hidróxido de cálcio dissolvido, resultando na precipitação de carbonato de cálcio fracamente solúvel no espaço de poros. A carbonatação da portlandita envolve três etapas principais, segundo o autor, que são a dissolução do hidróxido de cálcio, a absorção de gás carbônico com formação de íons de carbonato e a reação química de precipitação de moléculas de carbonato de cálcio.

Segundo Bertos et al., (2004), o dióxido de carbono induz a solvatação de íons cálcio das fases sólidas, que então re-precipitam no espaço de poros da mistura como $CaCO_3$, formando um produto solidificado. A reação é controlada por difusão do gás. Este se difunde para o sólido, resultando em uma frente crescente de material carbonatado ao redor de uma zona interna de material não carbonatado, resultando na captura de carbono. O aspecto ambiental da carbonatação mineral em reabsorver o gás estufa já vem sendo analisado em pesquisas (JACOBSEN e JAHREN, 2002; GALAN e al., 2010), o qual aborda resultados obtidos sobre o potencial de captura de carbono em concretos.

A pesquisa bibliográfica realizada mostrou que os temas “captura de carbono” e “construção civil” já se relacionam a partir de pesquisas realizadas tanto em âmbito nacional quanto internacional. Haselbach e Thomas (2014) pesquisaram sobre sequestro de carbono em amostras de calçada de concreto, Jang et al. (2016) realizou uma revisão dos recentes avanços na utilização de tecnologias de sequestro de carbono em materiais à base de cimento, enquanto que Haselbach e Alam (2015) analisaram a captura de carbono em antigos e novos pavimentos de cimento Portland.

Em nível nacional, Possan et al. (2012) analisou a potencialidade de captura do gás carbônico pela carbonatação do concreto da usina hidroelétrica de Itaipu. Foram apresentados resultados preliminares que indicaram que existe uma frente de carbonatação na extensão da barragem de concreto em Itaipu apontando para a potencialidade de sequestro de carbono pela barragem.

A autora analisou corpos de prova de diferentes locais da barragem, onde o concreto estava submetido a variados tipos de umidade e condições de ambiente, alguns mais protegidos do que outros em relação a presença de intempéries como, por exemplo, água da chuva. O cimento utilizado na pesquisa contava com adições e a análise buscava um melhor entendimento de quanto potencial a barragem apresentava para recuperar o dióxido de carbono em sua área superficial que tem contato com o gás.

Na literatura internacional Galan et al. (2010) buscou ampliar o conhecimento sobre a pegada ecológica do dióxido de carbono em relação ao cimento, utilizando ensaios de análise termogravimétrica e indicador químico de mudanças de pH como a fenolftaleína, mostrando regiões que sofreram reações de carbonatação nas pastas de cimento exposta em diferentes ambientes.

Pade e Guimaraes (2007) discutiram o efeito da carbonatação nas emissões de carbono relacionadas ao concreto, indicando que pode ser significativa a contribuição global nas emissões a partir de sua produção. O autor aponta que o material apresenta potencial de recuperar parte da quantidade total emitida para a atmosfera e que o processo de demolição de estruturas, ao final do período de utilização, influencia a quantidade de material carbonatado, aumentando a magnitude de captura de dióxido de carbono.

Xi et al. (2016) realizou estudo que buscou estimar a absorção de gás carbônico em nível global no período entre os anos de 1930 e 2013. O autor utilizou um modelo analítico criado que descreve as reações químicas que ocorrem no processo de carbonatação. Segundo o autor, o modelo de sua pesquisa teve como dados de entrada, valores atuais e catalogados durante o período de utilização das estruturas e período pós demolição. Estas estruturas foram produzidas com materiais cimentícios.

Os valores referentes a absorção de carbono pelo concreto são variados na literatura. Como as condições ambientais variam de região para região no globo, as análises de carbonatação costumam apresentar grande variabilidade.

2.3. Carbonatação

Neville (2016) define a carbonatação como o conjunto de reações de troca catiônica entre o ácido carbônico e o hidróxido de cálcio presentes na pasta de cimento Portland hidratada. Vários fatores podem influenciar a cinética do fenômeno químico da carbonatação como temperatura, umidade relativa do ar, concentração de carbono no ambiente, tipo de cimento, porosidade do concreto e condição de exposição da estrutura ao ambiente.

As reações químicas da carbonatação não são as causas diretas de deterioração do concreto, mas influenciam na durabilidade do material como, por exemplo, reduzindo o PH na pasta de cimento endurecida de um valor de 12,6 para aproximadamente 9 (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Os autores destacam que se todo o hidróxido de cálcio é carbonatado, o PH pode chegar a 8,3, tendo reduzido significativamente o caráter básico do concreto.

2.3.1. Características da Carbonatação

O processo da carbonatação é um fator importante para o começo do fenômeno da corrosão das armaduras (SALES et al.,2018). A redução do PH ocasiona a formação de um ambiente propício para a corrosão no caso de concretos reforçados com armaduras de aço, como pode ser visto na manifestação patológica apresentada na Figura 2.10.

Figura 2.10 - Corrosão de armadura de aço.



Fonte: Acervo do autor (2019).

A armadura envolvida pela pasta de cimento hidratada produz uma fina camada de passivação que promove proteção contra a reação com água e

oxigênio. Esta proteção ocorre em ambiente de pH básico próximo a armadura, tendo menor efeito quando o este parâmetro está baixo pois a camada de óxido protetor é removida, permitindo o início de corrosão (NEVILLE, 2016). Segundo Bertolini (2010), quando a carbonatação atinge uma profundidade próxima da armadura o aço perde a passivação a partir da presença de água e oxigênio na parte superficial do aço. Quando é aplicado um indicador químico de queda de pH na superfície da seção transversal dos elementos de concreto é possível analisar a carbonatação através da mudança de coloração do concreto. Usualmente utilizado uma solução de fenolftaleína para aferir a presença de material carbonatado.

Após ocorrer a reação inicial com o indicador químico, é possível visualizar regiões de coloração rosa-carmim e regiões de cor natural do concreto. Quando acontece a mudança de cor, ou seja, do cinza para o rosa-carmim, significa que a área continua com o pH elevado característico do concreto. Já as zonas que apresentaram a coloração original do material, após a aspensão, indicam as regiões do material cimentício que sofreu as reações de carbonatação.

A figura 2.11 mostra um corpo de prova de concreto convencional o qual foi aspergido com a solução de fenolftaleína. Pode-se observar uma “coroa” carbonatada na região periférica do corpo de prova de concreto convencional, onde o pH da amostra sofreu uma redução em seu valor. Esta região conservou sua cor, ao contrário do centro com coloração rosada. Este comportamento é esperado uma vez que as reações de carbonatação são promovidas pela interação do material com o ambiente, acontecendo de da superfície em direção ao interior do elemento de concreto ou argamassa.

Figura 2.11 - Coroa carbonatada indicando queda de Ph.



Fonte: Acervo do autor (2019).

A Figura 2.12 mostra a ocorrência de carbonatação na seção transversal de um corpo de prova prismático produzido com concreto permeável. Pode-se notar que a região carbonatada se localiza na periferia da amostra, a coloração se manteve acinzentada, cor natural do concreto, não reagindo com a fenolftaleína pois o pH está mais baixo. A alcalinidade da região periférica do corpo de prova se encontra menor que na zona central da amostra.

Figura 2.12 - Carbonatação no concreto permeável.

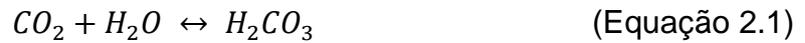


Fonte: Acervo do autor (2019).

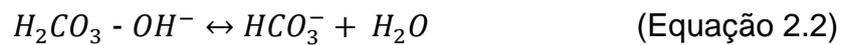
As consequências negativas da carbonatação, relacionadas à diminuição de pH da água de poros da pasta de cimento endurecida, não afetam concretos desprovidos de armaduras de aço, pois não existirá material para ser corroído. No caso do concreto permeável em pavimento de tráfego leve, o qual não apresenta reforço com armadura de aço, o processo da carbonatação pode ser abordado sob óticas diferentes, não relacionados a manifestações patológicas, e sim, visando o sequestro de carbono do ambiente em um contexto sustentável.

A carbonatação ocorre através de um conjunto de equações que descrevem o fenômeno físico-químico pelo qual os materiais cimentícios passam quando expostos ao dióxido de carbono e, a seguir, são apresentadas as equações que expressam cada etapa do processo de captura de carbono por carbonatação (PAPADAKIS, FARDIS e VAYENAS, 1989; MEHTA e MONTEIRO, 2008; PAULETTI, 2009). Inicialmente, o dióxido de carbono, presente no ambiente, ao qual o elemento cimentício está exposto, reage com a água referente à umidade

presente no material, formando um ácido de classificação fraca conhecido como ácido carbônico (Equação 2.1).



Posteriormente, o ácido perde íons hidroxila mostrado na Equação 2.2, produzindo água.



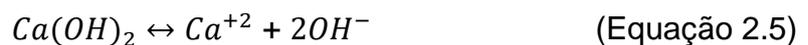
O processo de perda de íons hidroxila continua gerando ânions CO_3^{-2} (Equação 2.3).



Os ânions CO_3^{-2} gerados como produto das reações anteriores apresentam a tendência de reagir com substâncias químicas eletropositivas como cátions presentes no meio ao qual se encontram, resultando na formação de sais. A molécula de CO_3^{-2} reagirá com íons Ca^{+2} (Equação 2.4) produzidos a partir de reações químicas que acontecem como hidróxido de cálcio (Equação 2.5).

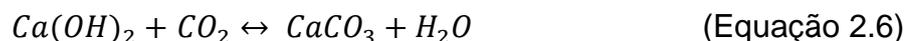


A seguir é apresentada a equação que descreve o processo de formação dos íons de cálcio formados a partir da perda de íons hidroxila da molécula de $Ca(OH)_2$. O hidróxido de cálcio foi formado, inicialmente, através das reações de hidratação do cimento.



Por fim, após este conjunto de reações, ocorre de forma gradual o processo que pode ser resumido em uma equação global. O fenômeno físico-químico da carbonatação, e conseqüente captura de dióxido de carbono em materiais

cimentícios a partir do consumo de hidróxido de cálcio pode ser expressa pela Equação 2.6.



Inicialmente, como as reações ocorrem, na área superficial das estruturas, este parâmetro irá influenciar o potencial de captura de carbono pois, mais material terá contato pela superfície com o dióxido de carbono disperso no ambiente. A forma do elemento de concreto também deve ser considerada importante, visto que influenciará a área superficial.

Estruturas mais espessas e com pouca superfície exposta apresentará menor velocidade de carbonatação que estruturas que apresentam menor espessura e grande área de exposição. Este parâmetro afeta o sequestro de carbono. Bertos (2004) aponta que a maiores frentes de carbonatação são obtidas quando o sólido possui alta concentração de CaO e apresenta alta área superficial exposta ao gás.

As reações de carbonatação acontecem em meio a alguns fatores que podem favorecer ou dificultar a cinética da química envolvida. Por ser um fenômeno que acontece em ambiente natural é esperado que os parâmetros como umidade relativa do ar (U.R.) e temperatura (T), do ambiente em que as reações ocorrem, influenciem a ocorrência da carbonatação.

Outro fator importante é a concentração de carbono em que o elemento cimentício que sofrerá carbonatação será exposto. Estes três parâmetros citados são dependentes das condições ambientais e podem variar de acordo com as condições climáticas e posição geográfica (latitude, longitude e altitude) de cada local.

Outros parâmetros que influenciam a captura de carbono estão relacionados ao material cimentício. Como são os produtos de hidratação do cimento que irão reagir com o dióxido de carbono, com conseqüente consumo, ao longo do tempo, de portlandita, é possível estimar que a quantidade de aglomerante cimentício na mistura poderá influenciar a quantidade de carbono armazenada nos materiais cimentícios.

2.3.2. Temperatura

A temperatura é um fator de influência no processo de carbonatação de elementos de concreto. Este parâmetro faz parte das condições de exposição do material junto com a umidade relativa do ar e o teor de dióxido de carbono, compondo as características do ambiente. Estes fatores podem sofrer leves variações ao longo do dia. Como mencionado neste capítulo, os materiais cimentícios apresentam a capacidade de absorver o gás carbônico em temperatura ambiente (POSSAN et al., 2012; HASELBACH e THOMAS, 2014).

Na literatura, há quem defenda temperaturas específicas e faixas de temperatura onde não ocorre influencia tão acentuada sobre a captura de carbono. A partir de uma condição adequada de umidade, as reações de carbonatação apresentam condição ótima quando ocorre em ambientes com temperaturas próximas de 25°C (CHANG e CHEN, 2006; ASHRAF et al., 2016; BRANKO e MLADENA, 2016).

Segundo Sales et al. (2018), para ambientes onde os valores de temperatura estão inseridos no intervalo entre 20°C e 40°C, o fator controlador mais importante do processo de carbonatação é a difusão. O autor sinaliza que a difusão, como mecanismo de transporte do gás, não é afetada significativamente pela temperatura nos limites do intervalo mencionado.

Em temperaturas mais elevadas, as reações de carbonatação apresentam velocidades maiores, a cinética do processo aumenta, desde que esta temperatura não seja demasiadamente alta, provocando a diminuição da umidade necessária para promover a captura do carbono nas estruturas que utilizam materiais cimentícios (SALES et al., 2018).

Segundo Ollivier e Vichot (2014), a portlandita, principal componente consumido no sequestro de dióxido de carbono, apresenta uma queda na sua solubilidade em temperaturas mais quentes, sendo bem menos solúvel a partir de 40°C até 60°C. Os autores sinalizam que a solubilidade dos produtos do cimento hidratado apresenta importância significativa pois o ataque químico da carbonatação envolve a dissolução progressiva dos hidratos presentes no concreto. Este ataque ocorre a partir do progresso das reações químicas que são dependentes das solubilidades dos hidratos (MEHTA e MONTEIRO, 2008; OLLIVIER e VICHOT (2014).

2.3.3. Umidade

Como mencionado, as reações químicas de carbonatação ocorrem em ambientes que apresentam umidade suficiente para possibilitar a cinética do processo físico-químico (MEHTA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2016). Os valores de umidade do ambiente ao qual o elemento de concreto está exposto exercem influência sobre a velocidade da carbonatação, logo a capacidade de captura de carbono é afetada.

Os trabalhos sobre carbonatação utilizam variadas porcentagens de umidade do ambiente, entretanto existe determinados intervalos que englobam os níveis de umidade mais adequados. Os valores de umidade relativa do ar considerados, pela literatura, mais propícios para a captura de carbono estão compreendidos entre os limites de 50% a 70% (CHANG e CHEN, 2006; ASHRAF et al., 2016; BRANKO e MLADENA, 2016).

Segundo Bertos et al. (2004), a presença de água, através da umidade relativa do ar, é um parâmetro fundamental para o sequestro de dióxido de carbono. O autor aponta que quando a água contém gás carbônico, a partir do ácido carbônico, ocorre a neutralização dos álcalis na água dos poros do elemento de concreto. O autor salienta que o gel de silicato de cálcio hidratado é dissolvido em ambiente de caráter predominantemente ácido.

O gel mencionado representa o produto de hidratação formado a partir da hidratação do cimento Portland (NEVILLE, 2016). Cabe ressaltar que a dissolução do silicato mencionado afeta as propriedades de durabilidade. Bertos et al. (2004) sinaliza que o avanço do ataque químico em meio ácido promove a ocorrência de dissolução de fases primárias e a precipitação de fases secundárias. O autor cita que o principal mineral secundário, o carbonato de cálcio ou calcário, é originado pelas reações do gás carbônico com cátions de metais como o cálcio, por meio da dissolução e consumo do hidróxido de cálcio ou Portilandita.

A umidade relativa do ar na atmosfera é necessária para compor o ambiente propício a reação de carbonatação, entretanto o excesso de água atrapalha o desenvolvimento das reações. Isto ocorre devido a obstrução dos poros na estrutura de concreto, logo o dióxido de carbono terá maior dificuldade em entrar na superfície de concreto (PAPADAKIS, FARDIS e VAYENAS, 1989; MEHTA e MONTEIRO, 2008; PAULETTI, 2009).

2.4. Concreto Permeável

O aumento da demanda por infraestrutura nos grandes centros urbanos aliado ao crescimento progressivo da população e a ocupação desordenada do território urbano leva a um conseqüente processo de diminuição da permeabilidade do solo. Se faz necessário retirar, de forma eficaz e rápida, a água acumulada sobre os pavimentos por meio de sistemas de drenagem superficial eficientes (SUZUKI, AZEVEDO, KABBACH JUNIOR, 2013).

As áreas destinadas a estacionamentos e pavimentos de rolagem de veículos leves utilizam materiais de baixa permeabilidade como concreto convencional e asfalto, favorecendo a formação de poças d'água e áreas apresentando escoamento superficial deficiente das águas pluviais (VIRGILIIS, 2009).

O pavimento permeável pode ser usado como solução alternativa para diminuir os efeitos do processo de impermeabilização nas cidades, possibilitando a percolação de água através do próprio pavimento e redirecionando a água da chuva para o solo. Segundo NBR 16416 (ABNT, 2015), o pavimento de concreto permeável é um material que resiste as solicitações de esforços mecânicos e tráfego de veículos, onde este material permite a percolação de água, apresentando propriedades favoráveis ao meio ambiente em relação ao controle do escoamento (ZHONG, LENG, POON, 2018; XIE, AKIN, SHI, 2019).

Segundo Balbo (2009), os pavimentos podem ser produzidos com material não armado, ou seja, não reforçado com aço, a partir de placas de concreto moldadas no local. O autor ressalta que se deve criar juntas transversais e longitudinais, espaçadas de forma igual, na estrutura com o objetivo de evitar fissuras nos elementos de concreto da pavimentação por meio de fenômenos como a retração hidráulica.

A utilização do concreto permeável para construção de pavimentos drenantes se mostra adequada pois a principal característica dos pavimentos permeáveis é, justamente, possibilitar a infiltração da água através da superfície do material, graças aos vazios interconectados presentes no concreto permeável (TENNIS et al., 2004). Esta propriedade reduz o elevado escoamento superficial que produz alagamentos e zonas de empçamento em calçadas, passeios e pistas destinadas ao rolamento e tráfego de veículos (ZHONG, LENG, POON, 2018; XIE, AKIN, SHI, 2019).

Segundo Canholi (2014), a problemática da drenagem urbana deficiente nas cidades de grande e médio porte se mostra preocupante. As enchentes e zonas de alagamento ocorrem mais intensamente e com maior frequência. O autor aponta que é necessário utilizar novas soluções de forma a aumentar a eficiência do sistema de drenagem, melhora as condições de escoamento, diminuir o volume de enchente e melhorar as condições de infiltração da água.

Segundo a normativa nacional, o desempenho eficaz do pavimento permeável de concreto poroso está relacionado à uma permeabilidade maior que 1mm/s e resistência mecânica maior que 2 MPa (ABNT, 2015). A Figura 2.13 mostra uma placa de concreto permeável destinada para pavimentação.

Figura 2.13 - Placa de concreto permeável.



Fonte: Acervo do autor (2019).

As placas de CPER são parte integrante do sistema drenante que pode ser utilizado em zonas de controle do escoamento de água pluviais, se localizando na parte mais superficial da estrutura de pavimentação. A superfície auxilia na infiltração de fluidos pelo interior do sistema de forma que seja evitado o acúmulo de líquido sobre as placas.

2.4.1. Características do Concreto Permeável

O concreto permeável (CPER) pode ser definido como o material constituído de aglomerante hidráulico, agregado graúdo, água, aditivo e com pouca ou nenhuma quantidade de agregado miúdo, formando uma estrutura que possui

vazios interconectados entre si e que permitem que a água passe através da superfície (ACI, 2010).

Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), o CPER é definido como um material que apresenta vazios interconectados, os quais possibilitam a percolação de água por ação da gravidade. Trata-se de um aglomerado de partículas de agregados graúdos, onde cada partícula é envolvida por uma camada de pasta de aglomerante, no caso o cimento.

A ausência de finos permite a formação de um “esqueleto” que apresenta grande quantidade de vazios interconectados entre os agregados aglomerados, possibilitando a percolação de líquidos. A mistura deste tipo de concreto é composta, basicamente, de pasta de cimento, água de amassamento e agregados graúdos.

O concreto drenante tem sido aplicado com maior destaque no controle do escoamento superficial e reabastecimento de corpos d’água (VIRGILIIS, 2009; BATEZINI, 2013; TOMINAGA, 2013), tendo sua utilização recomendada pela EPA, a qual menciona que o concreto permeável é um material de construção sustentável que atua no processo de gerenciamento do escoamento de águas pluviais (TENNIS et al., 2004).

A dosagem de mistura para concreto permeável é baseada em um equilíbrio entre vazios, resistência mecânica e trabalhabilidade (ACI, 2010). A produção do CPER envolve quantidades controladas de aglomerantes e água usados para gerar uma pasta que atuará como matriz aberta ao redor das partículas de agregado graúdo, ligando-as.

Ao unir as partículas de agregado, a pasta de cimento cria um sistema de vazios interconectados que possibilita elevada permeabilidade ao material. Como este material tem pouca quantidade de pasta de cimento, o concreto permeável, no estado fresco, apresenta abatimento muito baixo, ou quase nenhum, no ensaio de consistência do material, conhecido como slump test, normatizado na NBR 67 (ABNT 1998).

Um dos métodos de dosagem utilizados para a produção do concreto permeável é o proposto por Castro et al. (2009). Esta metodologia de dosagem requer, inicialmente, dados de entrada para as formulações do autor como os dados da caracterização do agregado usado na mistura. Os valores de massa específica

e da massa unitária dos grãos de agregado auxiliam na determinação do volume de vazios.

O volume de vazios ou índice de vazios obtido assume que 100% da quantidade de vazios do concreto drenante estarão conectados e possibilitarão a percolação de líquidos através de placas ou peças produzidas com este material. Cabe ressaltar que, na realidade, este comportamento não ocorre desta forma, pois a totalidade de vazios interconectados não está completamente conectada, pois pode ocorrer acúmulo de pasta de cimento entre os grãos, em determinadas regiões na estrutura.

A partir da metodologia de Castro et al. (2009), pode-se estimar a quantidade de aglomerante necessária para se atingir uma certa quantidade de vazios conectados e, através do consumo de cimento, é possível determinar a proporção de materiais utilizados para a produção de um metro cúbico de concreto permeável. O consumo de cimento da mistura concreto permeável é determinado a partir do índice de vazios interconectados da pasta e a relação água/cimento do concreto permeável que será produzido.

Segundo De Larrard (1999), o esqueleto granular pode ser aperfeiçoado, originando concretos que apresentam melhores comportamentos mecânicos nos ensaios de caracterização mecânica. Para tal, o autor propõe o Método de Empacotamento Compressível - MEC, que usa como ferramenta, um modelo matemático baseados em parâmetros físicos visando encontrar um melhor proporcionamento de agregados a ser utilizados na mistura de concreto drenante.

O método do empacotamento compressível, proposto por De Larrard (1999) é utilizado para apontar a compactidade máxima a ser atingida a partir da mistura de grãos com composições granulométricas variadas a partir da comparação entre o empacotamento virtual, sendo o arranjo geométrico ideal, e o empacotamento real, mensurado com dados experimentais.

O comportamento do CPER está fortemente relacionado ao tamanho dos agregados graúdos utilizados (Castro et al., 2009) contendo pouco ou nenhum agregado miúdo, para não ocupar o volume de vazios. A granulometria adotada para a dosagem irá influenciar as propriedades de porosidade, permeabilidade e comportamento mecânico do concreto permeável. Os agregados são utilizados, usualmente, em faixas binárias ou faixa única para compor o esqueleto granular.

Tennis et al. (2004) cita as faixas granulométricas de 19,0-4,75 mm, 9,5-2,36 mm e 9,5-1,18 mm próprias para uso nas misturas de concreto permeável. Castro et al. (2009), em seu estudo de dosagem, corrobora a utilização da faixa de 9,5-2,36 mm, enquanto Chandrappa e Biligiri (2016) apontaram que as faixas de 19-9,5 mm e 9,5-2,36 mm são as mais frequentes para a produção de concreto permeável.

O uso de uma granulometria menor provoca o crescimento da resistência do concreto permeável, fenômeno que é consequência de uma maior força da interface agregado-pasta. Yang e Jiang (2003) apontam que utilizar agregados de tamanho menor pode aumentar o número de partículas agregadas por unidade de volume de concreto. À medida que as partículas vão se aglutinando, a superfície específica do agregado e a área de ligação aumentam, resultando em crescimento de resistência do concreto.

A relação água/cimento que é adotada para a produção do CPER não deve possibilitar que a mistura de concreto se torne seca, dificultando a moldagem de elementos estruturais e precisa garantir resistência mecânica suficiente para as finalidades as quais o material será utilizado, logo deve-se adotar uma relação a/c que resulte em uma boa ligação da pasta de cimento com os grãos de agregado.

É aconselhável adotar relações água/cimento no intervalo entre 0,26 a 0,40 (CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016). Valores de a/c compreendidos nestes limites não resultam em drenagem de pasta de cimento em direção a região inferior do elemento de concreto. Este problema origina o entupimento dos poros do concreto permeável, influenciando negativamente as propriedades de permeabilidade.

Castro et al. (2009) cita que o valor mínimo de relação a/c para adotar é de 0,32, garantindo até este limite os parâmetros de permeabilidade e resistência mecânica. A água de amassamento do aglomerante utilizada na composição do concreto deve ser livre de impurezas para não influenciar a homogeneidade da mistura (LAPORTE AMBROZEWICZ, 2012; NEVILLE e BROOKS, 2013).

Quanto ao consumo de cimento nas misturas, Chandrappa e Biligiri (2016) realizaram um levantamento indicando consumos de cimento variando de 150 a 495kg/m³, enquanto para valores de relações água/cimento a variação foi de 0,200 e 0,418, e massa unitária do agregado variando de 1440 e 1820kg/m³.

A pesquisa envolvendo a utilização do CPER em pavimentos permeáveis aumentou na última década no Brasil. Virgiliis (2009) realizou pesquisa relacionada ao projeto e execução de pavimentos de concreto permeável para retenção de

picos de cheia, enquanto Monteiro (2010) analisou estudo de dosagem e desempenho do concreto permeável.

Batezini (2013) estudou a aplicação deste material como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves e Mariano (2014) analisou a influência do teor de argamassa e da granulometria da brita na permeabilidade e nas resistências à compressão e à abrasão de concretos permeáveis. Mais recentemente, Bechara (2017) analisou o uso destes pavimentos como alternativa de drenagem urbana.

Ribeiro e Silva (2018) abordaram a influência da relação a/c nas propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável. Foi utilizado seixo rolado com faixas granulométricas de 4.80 mm e 2.40 mm, variando-se a relação a/c de 0,31 a 0,39 e consumo de cimento de 351,06 Kg/m³. Os autores concluíram que a mistura produzida com relação água/cimento de 0,37 foi a que atendeu satisfatoriamente os requisitos normativos de resistência mecânica e permeabilidade.

Em âmbito internacional as pesquisas abordaram temas que envolvem o desenvolvimento de concreto poroso utilizando agregado (BUTTHA et al., 2013), potencialidades na mitigação de ilhas de calor (FLOWER et al., 2010) e aumento da resistência mecânica do pavimento drenante de concreto permeável (YANG e JIANG, 2003).

2.4.2. Parâmetros Normativos do Concreto Permeável

A utilização do concreto permeável, quando destinado para pavimentos drenantes produzidos com materiais cimentícios, deve estar dentro de parâmetros normativos estabelecidos pela NBR 16416 (ABNT, 2015) que aborda os requisitos e procedimentos para a produção do CPER no Brasil. Como uma das principais características deste material é sua permeabilidade e uma das suas principais aplicações é a pavimentação, os parâmetros de interesse são permeabilidade e resistência mecânica. A norma citada determina que diferentes tipos de revestimento como, por exemplo, placas ou peças de concreto permeável apresentem um coeficiente de permeabilidade mínimo para o pavimento recém construído. Este valor relacionado a capacidade de infiltração de água no material deve ser superior que 1 mm/s ou 10^{-3} m/s. A Tabela 2.1 apresenta o valor de coeficiente para variados tipos de revestimento com concreto permeável.

Tabela 2.1 - Coeficiente de permeabilidade.

Tipo de revestimento	Método de ensaio		Coeficiente de permeabilidade do pavimento recém construído (m/s)
	Local de avaliação		
	Em laboratório	Em campo	
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Anexo A	Anexo A	$> 10^{-3}$
Peça de concreto permeável	ABNT NBR 13292 ou anexo A		
Placa de concreto permeável			
Concreto permeável moldado no local			

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16416: *Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos*, 2015.

A utilização do concreto permeável para a pavimentação destinada ao tráfego leve de veículos justifica a importância de se realizar ensaios de resistência mecânica. A NBR 16416 (ABNT, 2015) determina as resistências recomendadas para diferentes tipos de revestimentos permeáveis (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Resistência de tração na flexão.

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mecânica característica (MPa)	Método de ensaio
Peça de concreto permeável (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60	≥ 35 (a)	ABNT NBR 9781
	Tráfego leve	80		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	≥ 20 (a)	
	Tráfego leve	80		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	≥ 2 (b)	ABNT NBR 15805
	Tráfego leve	80		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60	≥ 1 (c)	ABNT NBR 12142
	Tráfego leve	100	≥ 2 (c)	

a: Determinação da resistência à compressão, conforme na ABNT NBR 9781

b: Determinação da resistência à flexão, conforme na ABNT NBR 15805

c: Determinação da resistência à tração na flexão, conforme na ABNT NBR 12142

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16416: *Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos*, 2015.

No caso de pavimentos drenantes produzidas com CPER, a norma cita dois tipos de solicitação a se considerar: tráfego de pedestres e tráfego leve de veículos. A resistência mínima recomendada para tração na flexão para placas de concreto permeável é de 2 MPa. Uma das metodologias de ensaio recomendada é a apresentada na NBR 12142 sobre a determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos (ABNT, 2010).

2.4.3. Utilizações Sustentáveis do Pavimento Permeável

Além de melhorar o controle do escoamento superficial e picos de cheia (SAADEH et al., 2019), o pavimento drenante apresenta outras qualidades que podem ser exploradas em sua utilização sustentável no meio urbano (ZHONG, LENG, POON, 2018; XIE, AKIN, SHI, 2019). Este tipo de concreto atua na melhora da qualidade das águas pluviais infiltradas através de purificação física e química da água passante. Os caminhos sinuosos da estrutura do esqueleto permeável podem adsorver os materiais suspensos na água, retirando, por ação física, as partículas sólidas presentes no fluido que adentra a estrutura granular (CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016). Apesar deste efeito positivo, pode ocorrer gradualmente, com o passar do tempo, a obstrução dos vazios do material caso ocorra má utilização ou negligência em relação a utilização do pavimento.

Uma aplicação sustentável, que também utiliza as vantagens da percolação de água no solo, ocorre próximo as árvores em ambiente pavimentado pois os vegetais apresentam dificuldade de crescer em áreas cobertas por pavimentos pouco permeáveis. Isto ocorre devido ao ar e a água serem impedidos de chegar as raízes (VOLDER et al., 2009). Esta aplicação é interessante para cidades arborizadas que precisam aliar pavimentação para pedestres à presença de árvores e plantas nas áreas de passeio com vegetação.

Segundo Yang e Jiang (2003), uma característica que pode ser explorada no pavimento drenante é a capacidade de isolamento acústico. O concreto permeável também tem propriedades relacionadas à absorção de ruídos por meio da estrutura composta por vazios interconectados (ZHONG, LENG, POON, 2018; XIE, AKIN, SHI, 2019). O esqueleto granular auxilia na criação de um ambiente com menos ruídos como barulhos veiculares das pistas destinadas ao tráfego leve.

Quanto a capacidade de isolamento térmico, pavimento drenante apresenta a propriedade de absorver menor quantidade de energia térmica do que outros

pavimentos como o asfáltico. Esta menor retenção de calor é consequência do esqueleto granular composto de vazios interconectados do concreto pois armazena menos energia térmica, auxiliando na redução dos efeitos de ilha de calor nas grandes cidades (TENNIS et al., 2004; XIE; CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016; AKIN, SHI, 2019). Flower et al. (2010) reforça o aspecto positivo das propriedades térmicas do pavimento permeável de concreto. O agravamento das ilhas de calor resulta em zonas de desequilíbrio da temperatura média urbana. Este fenômeno está associado ao aparecimento de regiões de microclimas nos centros urbanos, onde ocorre o aumento local da temperatura. As ilhas de calor provocam desconforto térmico e leva a um maior consumo de eletricidade para auxiliar no resfriamento das habitações

Todas as utilizações sustentáveis as quais o concreto permeável pode ser adotado apresentam possibilidade de se aplicar no meio urbano, possibilitando novas opções de soluções. A captura de carbono pode apresentar uma possível potencialidade. Como o concreto permeável possibilita maior entrada do gás carbônico a partir dos vazios, a quantidade capturada tende a aumentar com o tempo. Balbo (2009) aponta para a utilização do concreto para a confecção de pavimentos. A captura de carbono será maior em grandes superfícies, que gradualmente, também atinge o interior do material. Haselbach (2014) apontou que pavimentos de concreto convencional podem capturar carbono ao longo do tempo, comportamento similar ao concreto permeável em sua superfície exposta durante a fase de utilização.

É sempre bom ter em conta que a pesquisa sobre captura de carbono não representa uma solução para o problema do lançamento de dióxido de carbono na atmosfera através dos processos industriais e queima de combustíveis, mas sim, uma medida mitigatória que atua no balanço de carbono dos materiais. O ideal é a modificação do processo produtivo de indústrias que geram elevados teores de emissão de gás carbônico, gasto energético e uso de combustíveis fósseis. Interferir nestas questões de forma a reduzir o lançamento de carbono na atmosfera leva um considerável tempo de implementação e estudos de viabilidade. Convergir interesses ambientais, financeiros e sociais é algo complexo e que demora para ser alcançado de forma satisfatória.

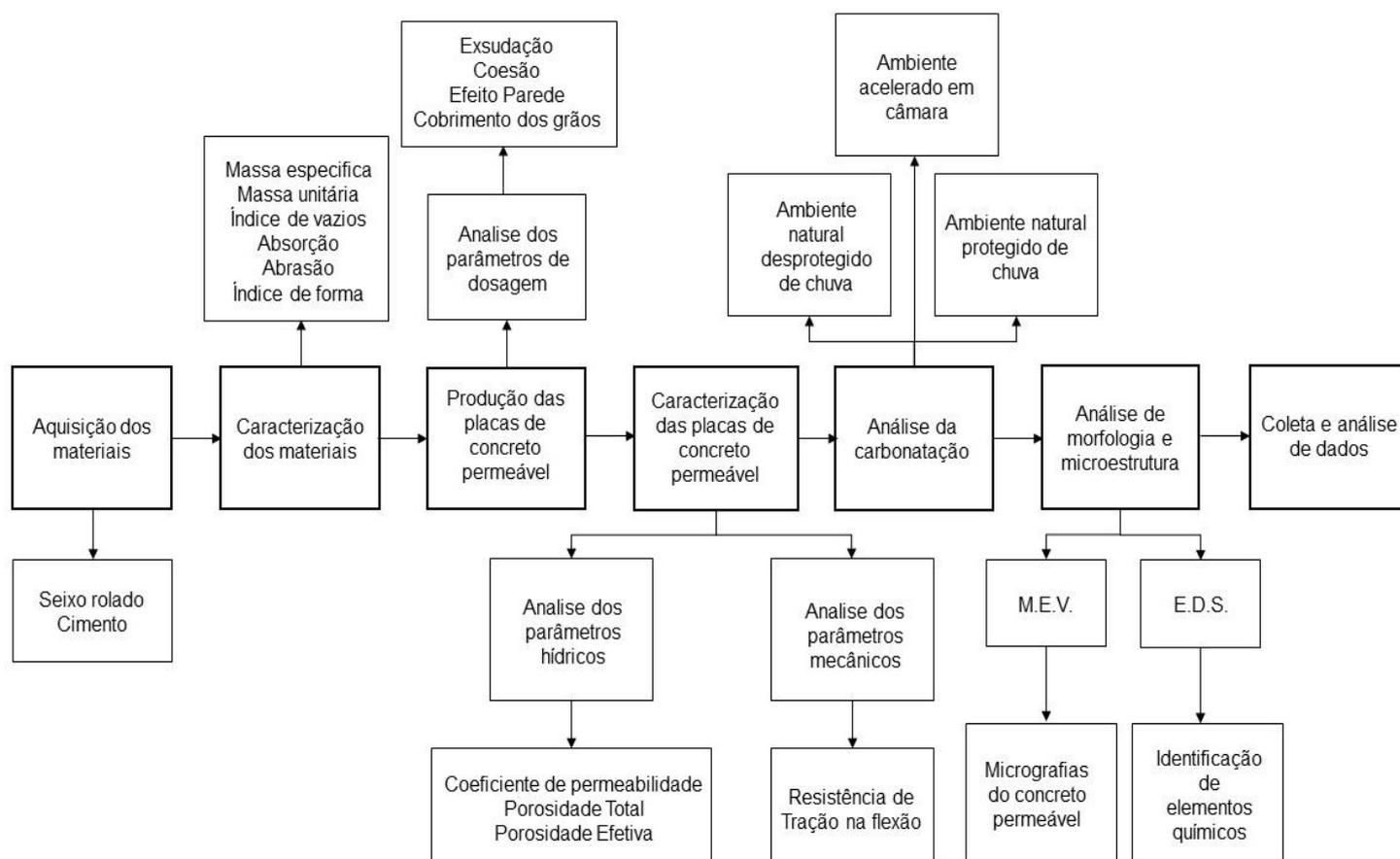
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Planejamento do experimento

O programa experimental foi montado com o intuito de analisar o potencial de captura de carbono a partir do comportamento da carbonatação em placas produzidas com concreto permeável, visto que materiais cimentícios podem estar sujeitos à este fenômeno físico-químico dependendo das condições do ambiente aos quais estão expostas.

O planejamento também visa a caracterização do material em relação aos parâmetros mecânicos e hidráulicos recomendados na norma 16416 (ABNT, 2015) referente a produção de pavimentos de concreto permeável, visto que este é uma aplicação muito comum do material. Na Figura 3.1 é apresentado o fluxograma que mostra o delineamento da pesquisa com as etapas propostas para a realização do programa experimental.

Figura 3.1 - Fluxograma das etapas da pesquisa.



3.1.1. Fatores Controláveis

A análise de captura de carbono é um experimento que conta com a aferição do fenômeno físico-químico da carbonatação em material cimentício, onde fatores ambientais e de dosagem do material podem influenciar as leituras das variáveis de resposta. O planejamento do experimento teve início com a definição dos fatores controláveis e fatores fixos da pesquisa. Foram adotados diferentes valores para a relação água/cimento, período de cura das placas drenantes e diferentes condições de ensaio de carbonatação a partir do tipo de ambiente de exposição ao gás carbônico para se poder comparar os comportamentos das amostras de concreto permeável.

a) Relação água/cimento

Foram adotadas duas relações água/cimento para as misturas de concreto permeável produzidas: 0,33 e 0,37. Os valores de relação a/c foram definidos baseados em pesquisas prévias realizadas na UFPA por Ribeiro e Silva (2018), utilizando os mesmos materiais, onde atenderam os parâmetros normativos referentes à resistência mecânica e permeabilidade recomendados na NBR 16416 (ABNT, 2015).

b) Período de cura

Foram adotados dois períodos de cura para as misturas de concreto permeável. As placas ficaram na cura por imersão em tanque de água por 7 e 28 dias. Esta cura foi adotada por ser um procedimento que garante uma maior hidratação do cimento a partir da condição de saturação da amostra submersa (Neville, 2016).

c) Condição de ensaio de carbonatação

Os ambientes de exposição ao dióxido de carbono que foram adotados são ambientes ao ar livre (natural) e acelerado. O ambiente natural foi dividido em desprotegido das intempéries como a chuva e ambiente natural protegido baseado e adaptado de Kulakowski (2002) e Pauletti (2009). Os locais adotados possibilitam a circulação de ar ambiente ao redor das amostras. Já a condição de ensaio acelerado foi realizada em câmara de CO₂, localizada no laboratório de materiais da UFPA.

3.1.2. Fatores Fixos

Alguns parâmetros foram fixados para a mistura do material a fim de uniformizar o processo de produção das placas de concreto drenante.

- a) Tipo de cimento
- b) Tipo de misturador
- c) Ordem de mistura dos materiais
- d) Faixas granulométricas de agregado
- e) Tipo de adensamento dos materiais

3.1.3. Variáveis de Resposta

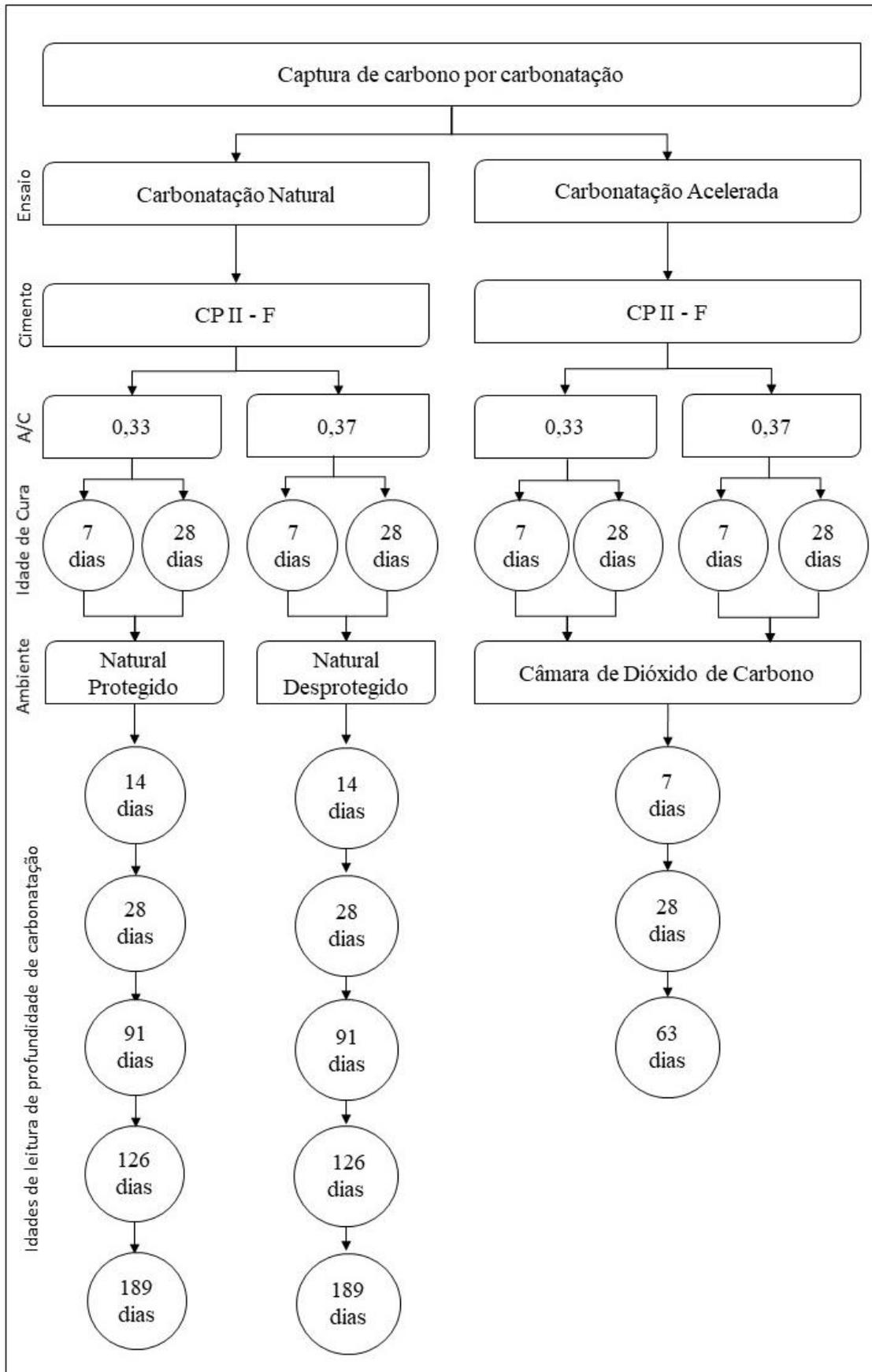
As variáveis de resposta dos ensaios de carbonatação são as profundidades de carbonatação e áreas carbonatadas em idades de leitura específicas de 14, 28, 91, 126 e 189 dias. Estas idades foram baseadas na pesquisa de Possan (2004). As variáveis de resposta escolhidas foram adotadas por serem medidas que demonstram a progressão da carbonatação no material. Estas variáveis já foram utilizadas em estudos de materiais que sofreram reações de carbonatação (Kulakowski, 2002; Possan et al, 2012). Para os ensaios foram utilizadas 4 misturas de concreto permeável, variando a relação a/c e o período de cura mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Quantidade de amostras por mistura de concreto.

Misturas de concreto	Quantidade de amostras submetidas à carbonatação		
	Ambiente natural protegido de chuva	Ambiente natural desprotegido de chuva	Ambiente acelerado em câmara
a/c: 0,33 - Cura: 7 dias	3	3	2
a/c: 0,33 - Cura: 7 dias	3	3	2
a/c: 0,33 - Cura: 28 dias	3	3	2
a/c: 0,37 - Cura: 28 dias	3	3	2

Na Figura 3.2 é apresentado o planejamento dos ensaios de carbonatação do concreto permeável, contendo os diferentes ambientes de exposição ao gás carbônico, datas de leitura da profundidade de carbonatação das amostras, e fatores variáveis como relação água/cimento e período de cura das misturas produzidas.

Figura 3.2 - Planejamento dos ensaios de carbonatação



3.2. Materiais

Para a moldagem das placas de concreto permeável, e posteriormente, os corpos de prova prismáticos deste material, foram utilizados materiais convencionais comuns da construção civil como aglomerante hidráulico, materiais agregados para composição do concreto e água para o amassamento das misturas produzidas.

3.2.1. Aglomerante

O aglomerante utilizado para a produção do concreto permeável foi o cimento Portland composto CP-II-F-32 com massa específica de $2,8 \text{ g/cm}^3$, tendo sua composição constituída de silicatos de cálcio, silicatos de alumínio, silicatos de ferro, sulfato de cálcio e filler carbonático, segundo informações obtidas com o fabricante do aglomerante. Este cimento tem sua fabricação realizada segundo a norma técnica brasileira NBR 166697 (ABNT, 2018).

O cimento Portland composto CP-II-F-32 teve sua escolha baseada na facilidade de obtenção do produto na região metropolitana de Belém, seu amplo uso para produção de elementos de concreto na cidade e por não conter adições pozolânicas. O uso de pozolanas pode não ser aconselhável nesta pesquisa visto que este tipo de adição promove a ocorrência de reações químicas de consumo da portlandita, no processo de hidratação do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008; TASHIMA et al., 2012).

A utilização de cimentos com estas adições poderia influenciar a velocidade de carbonatação das amostras ensaiadas. Poderia ocorrer o consumo de hidróxido de cálcio, na presença de umidade, não apenas pelo dióxido de carbono, mas também, pelo material pozolânico (ZAMPIERI, 1989; CASTRO et al., 2017).

3.2.2. Agregados

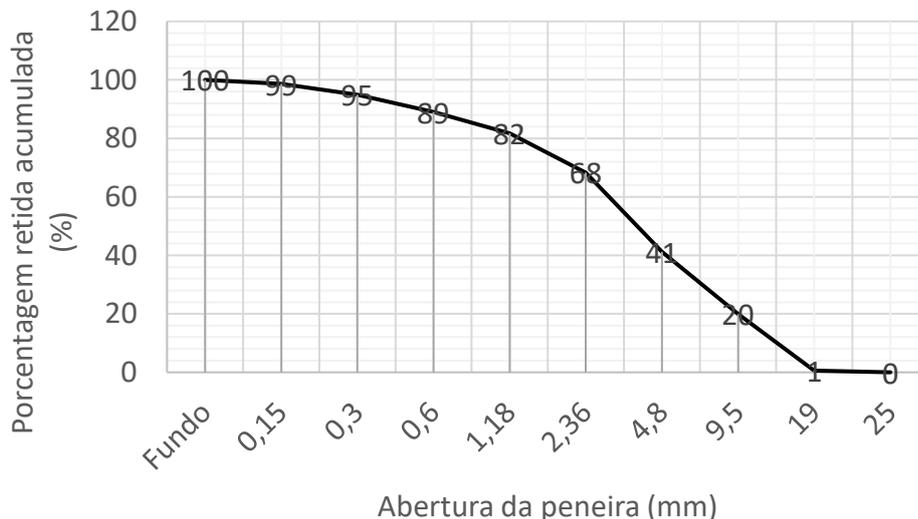
O agregado que foi utilizado para produção das placas de concreto permeável foi o seixo rolado, comprado na região metropolitana de Belém, sendo escolhido por ser o material agregado mais comercializado nesta região e o mais comum para produção de elementos de concreto na cidade. A caracterização dos agregados utilizados na pesquisa foi realizada de acordo com as recomendações normativas e os resultados obtidos são mostrados na Tabela 3.2. Cada parâmetro foi analisado a partir de sua respectiva norma vigente.

Tabela 3.2 - Caracterização dos agregados.

Parâmetro	Norma	Resultado
Massa Específica	NBR NM 53 (ABNT, 2009b)	2,63 g/cm ³
Massa Unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006b)	1,66 g/cm ³
Absorção	NBR NM 53 (ABNT, 2009b)	2%
Índice de Vazios	NBR NM 45 (ABNT, 2006b)	36,87%
Índice de Forma	NBR 7809 (ABNT, 2019)	1,34
Desgaste por abrasão	NBR NM 51 (ABNT, 2001)	60%

O índice de forma dos grãos do agregado não foi superior a 3, estando dentro do valor limite normativo, enquanto, para a perda por abrasão, o seixo obteve perda de massa superior a 50%. Para garantir os vazios interconectados do concreto permeável foram adotadas duas faixas granulométricas, as quais estão compreendidas nos intervalos 9,5 mm - 4,75 mm e 4,75 mm - 2,36 mm. A adoção de faixas granulométricas menores promove um aumento do desempenho mecânico na produção de concreto drenante (COSIC et al., 2015). A curva granulométrica é apresentada na Figura 3.3. As faixas granulométricas citadas apresentam maior proporção no seixo adquirido.

Figura 3.3- Curva granulométrica do seixo rolado.



3.2.3. Água

A água que foi utilizada para a realização da mistura e amassamento do concreto permeável para a produção de placas foi proveniente da rede de abastecimento local da cidade de Belém, no bairro do Guamá.

3.3. Métodos

3.3.1. Dosagem do concreto permeável

A metodologia de dosagem adotada para a moldagem das placas do concreto drenante foi desenvolvida e proposto por Castro et al. (2009). O método citado já vem sendo utilizado em estudos do grupo de pesquisas de materiais da UFPA, desde 2017, visando a produção de elementos de concreto com alta permeabilidade. A metodologia de dosagem também foi utilizada por Ribeiro e Silva (2018) e Braga (2019) para a moldagem de placas permeáveis destinadas a pavimentação.

Esta metodologia se baseia em parâmetros físicos dos materiais como a massa específica e a massa unitária dos agregados, bem como o índice de vazios do seixo rolado para se poder determinar a proporção adequada dos materiais de construção utilizados na mistura de concreto permeável. O consumo de cimento da mistura concreto permeável é determinado a partir de dados como a massa específica do aglomerante, a relação água/cimento adotada na mistura e a densidade dos materiais utilizados, por exemplo. O consumo de aglomerante foi de 351,06 Kg/m³ para o concreto permeável produzido. Com este valor foi possível determinar a quantidade de água utilizada para a mistura dos materiais.

A partir dos resultados encontrados na caracterização dos agregados adquiridos para a pesquisa é possível calcular o proporcionamento dos materiais a fim de se obter um esqueleto granular que combinasse vazios interconectados e compactidade. O esqueleto granular de grãos de seixo e pasta de cimento que resultou em uma estrutura de compactidade mais elevada foi a combinação de 77% dos agregados compreendidos no intervalo 9,5 mm - 4,75 mm e 23% compreendido no intervalo granulométrico de 4,75 mm - 2,36 mm. A composição do concreto contou apenas com estas duas faixas de granulometria e não foi utilizado materiais finos na mistura para não diminuir a capacidade de permeabilidade das placas produzidas.

3.3.2. Produção do concreto permeável

Para a produção do concreto permeável foi adotada a proporção 1:4,47, em massa, apresentado na Tabela 6. Nota-se que o consumo de cimento de 351,06 Kg/m³ está dentro do intervalo de consumos levantados por Chandrappa e Biligiri

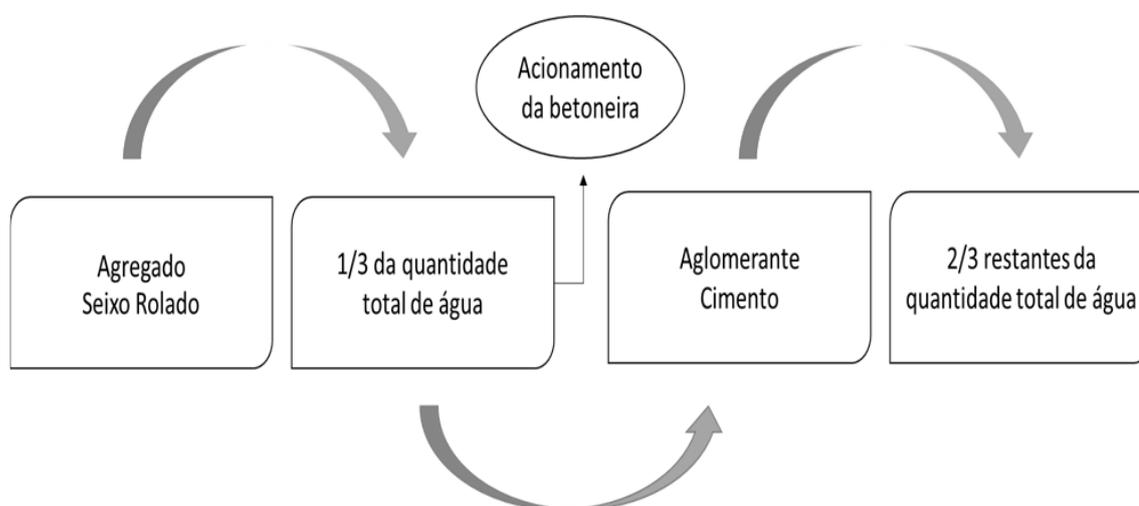
(2016) e próximo dos valores utilizados por Castro et al. (2009). As relações água-cimento adotadas foram de 0,33 e 0,37 como mostrado a seguir, na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Consumo dos materiais em massa.

Mistura (c : p)	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Consumo de Agregado (kg/m ³)	Consumo de água (kg/m ³)	Relação Água/Cimento	Teor de Pasta (%)
1 : 4.47	351.06	1569.24	115.84	0.33	15.97
			129.89	0.37	30.01

O processo de mistura de concreto foi realizado por meio de uma betoneira de eixo inclinado de 150 litros de capacidade, apresentando 40 rotações por minuto. A partir de testes prévios, atestou-se que a melhor ordem de mistura para a produção do concreto permeável seria como mostrada na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Ordem de mistura dos materiais.



Primeiramente, foi colocada toda a quantidade de material agregado na betoneira de eixo inclinado. Para facilitar a adesão superficial do seixo rolado com o aglomerante, foi despejado um terço da quantidade de água no seixo rolado. Desta forma, a superfície dos grãos seria coberta com o cimento mais facilmente. Como o seixo utilizado apresenta duas faixas granulométricas distintas, a betoneira foi acionada antes da entrada do cimento, visando homogeneizar os agregados.

Após este processo, adicionou-se toda a quantidade de cimento na mistura e, depois, foram lançados os dois terços restantes da quantidade de água. O tempo total de mistura, desde o acionamento da betoneira, teve duração de dois minutos e foi obtido por meio de teste preliminares realizados no grupo de pesquisa de materiais da Universidade Federal do Pará.

Para avaliar a qualidade do concreto produzido, ao final da mistura dos materiais, foi realizada uma análise visual no estado fresco deste material. O objetivo foi aferir a exsudação da pasta que recobre os grãos de agregados graúdos. Outro aspecto a ser avaliado é a coesão do concreto produzido, necessária para a moldagem eficaz das placas, utilizando o método proposto por Tennis et al. (2004). O método citado determina a formação de uma esfera com a palma das mãos durante a moldagem do CPER visando avaliar, visualmente, se a relação água/cimento está adequada compara unir os grãos sem segregar.

Ao final da produção do concreto, o material foi colocado em um molde metálico quadrado de dimensões 40 cm x 40 cm x 10 cm com óleo em sua superfície para facilitar o desmolde da placa. Uma vez que o CPER é colocado nos moldes metálicos, é necessário realizar a compactação do material. Este processo foi feito com o auxílio de um rolo metálico de 55 quilogramas que passará na superfície do material, aplicando energia para adensar a placa de concreto permeável no estado fresco.

Após o concreto permeável ser colocado nos moldes das placas, foi iniciado o período de cura do material produzido. As primeiras 48 horas de cura aconteceram enquanto as placas estiverem ainda nos moldes metálicos. Retirá-las antes do final dos dois primeiros dias poderia ocasionar fragmentação excessiva das arestas das placas e conseqüente perda de material. Após a desmoldagem, as placas foram levadas para o local de cura úmida por imersão em tanque contendo água até as idades de 7 dias e 28 dias conforme descrito anteriormente no planejamento experimental.

Os elementos de concreto produzidos foram colocados no tanque de forma que ficassem apoiados em suas menores seções transversais para evitar a colmatação do material. Vale ressaltar que após o período de cura, já no estado endurecido, foi aferido o cobrimento dos agregados pela pasta de cimento a fim de aferir se ocorreu o efeito parede, condição esta que implica em uma barreira de pasta na superfície do material, afetando na permeabilidade do sistema. Após a

retirada das placas de dentro do tanque, foi necessário segmentá-las a partir de serra giratória para se obter prismas de dimensão de 20 cm x 10 cm x 10 cm para a realização dos ensaios de carbonatação. As placas de concreto permeável destinadas aos ensaios hídricos não precisaram ser segmentadas. A seguir, na Figura 3.5, é apresentado o registro fotográfico dos equipamentos e etapas da produção do concreto permeável.

Figura 3.5 - Produção do concreto permeável



(A) Betoneira de 150 litros, (B) teste visual coesão de Tennis, (C) molde metálico, (D) concreto permeável, (E) rolo metálico para adensamento, (F) desmolde da placa de CPER, (G) Cura e (H) prismas de concreto permeável. Fonte: Acervo do autor (2019).

3.3.3. Caracterização das placas permeáveis

a) Parâmetros de Dosagem

Ao final da produção do concreto permeável foi realizada a avaliação das placas produzidas. Esta avaliação contou com análise da coesão e exsudação logo após a retirada do concreto da betoneira. Depois que as placas são submetidas ao período de cura, onde foram submersas em tanque de água, é feita a avaliação da superfície do concreto para aferir se ocorreu efeito parede. A inspeção dos parâmetros de dosagem tem como objetivo avaliar o estado do concreto permeável produzido no estado fresco e no estado endurecido.

O efeito parede está relacionado ao acúmulo de pasta de cimento nas laterais do molde metálico o qual acomoda o concreto permeável no estado fresco logo quando acaba o processo de mistura dos materiais. Caso ocorra o efeito mencionado, este excesso de pasta se concentrará nas superfícies da placa, promovendo uma barreira física que fechará os vazios superficiais da placa. Isto afetará as propriedades drenantes do material. O teste realizado no estado fresco foi proposto por Tennis et al. (2004), o qual sugere a formação de uma esfera de concreto permeável ainda no estado fresco para se avaliar a coesão e exsudação do material por meio de inspeção visual.

b) Caracterização Mecânica

Para avaliar se o concreto permeável atende os parâmetros de desempenho mecânico estabelecidos pela NBR 16416 (ANBT, 2015) foi realizado o ensaio de resistência à tração na flexão em 3 corpos de prova prismáticos de concreto (40 cm x 20 cm x 20 cm) (Figura 3.6). Este ensaio conta com procedimentos normatizados de acordo com a NBR 12142 (ABNT, 2011). Foram produzidos C.P.s de concreto permeável, sendo uma com relação água/cimento de 0,33 e a outro com relação 0,37. A idade de cura dos C.P.s foi de 28 dias. A cura foi realizada de forma que as amostras ficaram submersas em tanque de água.

Os parâmetros normativos estipulam resistência mínima de 2 MPa de tração na flexão. Este valor de resistência é referente aos pavimentos produzidos com concreto permeável e destinados ao tráfego leve de veículos, podendo ser aplicado, em áreas de passeio para pedestres como descrito na NBR 16416 (ANBT, 2015).

Figura 3.6 - Prisma de concreto permeável.



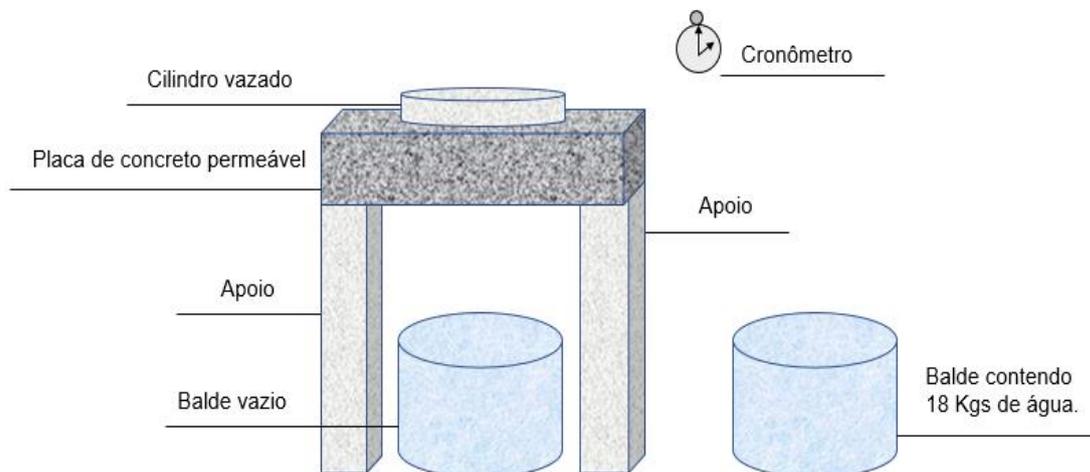
Fonte: Acervo do autor (2019).

c) Caracterização Hídrica

Para a realização da caracterização hídrica das placas drenantes foi aferido o coeficiente de permeabilidade a partir da formulação matemática descrita na NBR 16416 (ANBT, 2015). Este parâmetro está relacionado a capacidade de infiltração de fluidos, como a água, no interior da estrutura granular do concreto permeável e deve ser estimado para comparação com o valor mínimo presente na norma vigente. A infiltração de água deve apresentar coeficiente de permeabilidade maior que 10^{-3} metros por segundo (ANBT, 2015).

O ensaio de permeabilidade (Figura 3.7) conta com os seguintes equipamentos para sua realização: cilindro de PVC com 300 milímetros de diâmetro, massa de calafetar para fixação do cilindro sobre o elemento de concreto, balde para despejar a água, cronômetro para aferir o tempo de infiltração do líquido e baldes vazios para recolher a água lançada sobre a amostra de concreto.

Figura 3.7 – Esquema de caracterização hídrica.



Fonte: Acervo do autor (2019).

A placa de concreto permeável deve ser colocada sobre duas estruturas suficientemente resistentes para apoiá-la. Assim, o sistema montado permite a captação da água que irá atravessar o concreto drenante. Abaixo do material é colocado um balde vazio que irá acumular a água passante para ser descartada, posteriormente. Foram feitas 5 repetições. A seguir é mostrado como será determinado o coeficiente de permeabilidade do material, a partir dos dados obtidos por meio da Equação 3.1.

$$k = \frac{C \cdot m}{d^2 \cdot t} = \text{coeficiente de permeabilidade} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde:

- k = Coeficiente de Permeabilidade (mm/H)
- C = Fator de Correção de Unidade do Sistema S.I. = 4583666000
- m = Massa de água (Kg)
- d = Diâmetro interno do cilindro (mm)
- t = Tempo de infiltração (s)

O valor do coeficiente deve ser maior que 10^{-3} m/s para atender a permeabilidade normativa. Outro fator importante a ser analisado, quanto a permeabilidade de um concreto permeável é a macro porosidade. A fim de se aferir a quantidade de vazios pelos quais a água se infiltra, realizou-se ensaios de porosidade total e efetiva nos prismas de 20 cm x 10 cm x 10 cm extraídos das placas.

A porosidade total é um parâmetro relacionado ao volume total de poros presentes na amostra analisada. A totalidade dos poros leva em conta os poros fechados e os que estão conectados entre si ao longo do material. O parâmetro pode ser calculado por meio da Equação 3.2 (XU et al., 2018).

$$v_t = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_t}\right) \cdot 100 \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

- v_t = Porosidade total
- ρ_t = Densidade teórica (g/cm³)
- ρ_s = Densidade real do concreto (g/cm³).

A densidade teórica é estimada por meio da Equação 3.3 (ZHENG, 2004).

$$\rho_t = \frac{100 + P_c + 0,25P_c}{\frac{100}{\rho} + \frac{P_c}{\rho_c} + (0,25P_c \cdot 0,75)} \cdot \rho_w \quad (\text{Equação 3.3})$$

Onde:

- ρ_t = Densidade teórica (g/cm³)
- P_c = Razão cimento/agregado em massa,
- ρ_c = Massa específica do agregado (g/cm³)
- ρ_w = Massa específica da água (g/cm³)

O parâmetro da porosidade efetiva, diferentemente da porosidade total, leva em conta a quantidade de poros que estão conectados na estrutura e pode ser estimada pela Equação 3.4 (LEE e KIM, 2010).

$$v_e = \left(1 - \frac{m_1 - m_2}{v \cdot \rho_w}\right) \cdot 100 \quad (\text{Equação 3.4})$$

Onde:

- v_e = Porosidade efetiva
- m_1 = Massa da amostra seca por 24 horas em estufa (g)
- m_2 = Massa da amostra saturada após submersão de 24 h em água (g)
- v = Volume da amostra em centímetro cúbico (cm³)
- ρ_w = Massa específica da água (g/cm³).

3.3.4. Estudo de carbonatação em ambiente natural

Para o ensaio de carbonatação foi utilizado corpos de prova prismáticos com dimensões de 20 cm x 10 cm x 10 cm. Esta dimensão foi escolhida de acordo com as dimensões da placa de concreto produzida, visando obter o máximo de prismas com seção transversal quadrada. Estes prismas de concreto foram submetidos à três condições de exposição de dióxido de carbono, sendo o ambiente natural protegido da chuva e natural desprotegido de chuva.

a) Carbonatação em ambiente natural protegido de chuva

O ambiente natural protegido de chuva é uma área de 16 m² que apresentou umidade relativa do ar média de 76% e temperatura média de 29°C ao longo do período de exposição. O teor de carbono oscilava próximo do valor de 700 PPM. O

espaço onde os corpos de prova ficaram expostos ao ambiente, é um espaço aberto e coberto que possui uma bancada para sustentar as amostras de concreto, que foram espaçadas entre si para possibilitar a circulação de ar entre elas. Esta circulação de ar é natural, assim como a umidade local. Os corpos de prova estavam em condição seca em temperatura ambiente quando foram armazenados.

Os dados de temperatura e umidade referentes aos ambientes naturais de exposição ao dióxido de carbono foram obtidos por aparelhos de aferição e comparados com o banco de dados disponíveis no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET - 2019). Segundo o órgão mencionado, os locais protegidos e desprotegidos de intempéries, onde os corpos de prova prismáticos foram alocados, apresentam entre 72% a 87% de umidade relativa do ar e 24° C e 36° C de temperatura média para os meses de exposição.

Como os prismas permeáveis não chegavam a ser saturados devido a proteção contra chuva, a umidade era influenciada apenas pelo ar, e não pelo contato com água, como acontece nos locais desprotegidos das intempéries. Neste último caso, ocorre períodos de saturação e secagem das amostras, alterando a condição do ensaio. A ausência de chuva possibilita uma condição mais estável, gerando resultados menos dependentes de variações mais acentuadas de umidade. Os corpos de prova ensaiados podem ser vistos na Figura 3.8.

Figura 3.8 - Corpos de prova prismáticos em ambiente protegido.



Fonte: Acervo do autor (2019).

Nas datas específicas das leituras de profundidade (14, 28, 91, 126 e 189 dias), os prismas foram levados para o laboratório de materiais de construção da faculdade de engenharia civil / UFPA, onde uma fatia de 2 cm x 10 cm x 10 cm foi segmentada a partir do topo dos prismas (prisma na posição vertical) para análise de captura de carbono na parte inferior da fatia. Esta espessura foi suficientemente resistente ao corte do prisma sem provocar desagregação dos grãos de agregados.

Uma amostra de menor valor de espessura poderia ser mais frágil e desagregar, podendo inviabilizar os ensaios realizados no concreto permeável.

As fatias de concreto permeável foram levadas ao LEMAC, onde foi analisado o pH da amostra com indicador químico de fenolftaleína a 1%, dissolvida em 70% de álcool etílico e 30% de água destilada. O objetivo é mostrar a ocorrência de carbonatação no material cimentício após determinado período, onde a amostra apresenta queda no caráter básico do concreto. Quando a solução líquida de fenolftaleína é aspergida na superfície interna da fatia, ocorre uma mudança de coloração do material, onde a parte que sofreu as reações de carbonatação apresenta a cor natural do concreto e a região que não sofreu reações de carbonatação apresenta cor rosa carmim, indicando a região de pH mais elevado.

Depois que o teste com o indicador químico de fenolftaleína foi feito, realizou-se o registro fotográfico da área superficial das seções transversais de cada fatia. A imagem gerada foi analisada com escala em programa de análise de imagens digitais *Imagem J* para uma determinação mais precisa da área que sofreu o processo de carbonatação. O método utilizado para análise de imagens foi baseado e adaptado de Kulakowski (2002) e Pauletti (2009), os quais contaram com registro fotográfico com imagens de superfícies carbonatadas de elementos cimentícios. Estas imagens tinham a área de carbonatação delimitadas no programa de análise e a partir desta área se define o avanço da carbonatação. Para este estudo foi utilizado o software *Imagem J*.

O programa computacional adotado foi desenvolvido para o processamento de imagens em diferentes escalas, visando auxiliar análises de mensuração de áreas, distâncias entre outros fatores parâmetros em imagens. Dentro da interface do programa é possível utilizar inúmeros recursos que auxiliam na edição de fotografias, otimizando o contraste, saturação e produzindo melhores condições para a mensuração de distâncias em escala definida (IMAGEM J, 2019).

Após a calibragem das imagens no programa, as ferramentas de mensuração de distâncias são acionadas para estimar, em milímetros, o espaçamento entre a borda da amostra e o início da região que apresenta coloração rosada, onde a fenolftaleína reagiu, indicando que esta parte não apresentou queda de pH em consequência da captura de carbono. Para se chegar ao valor de área carbonatada, buscou-se delimitar com linhas amarelas a região que reagiu com a fenolftaleína conforme a Figura 3.9.

Figura 3.9 - Limites de área carbonatada



Fonte: Acervo do autor (2019)

O critério adotado para se medir a região carbonatada, ou ponto de carbonatação, foi escolher pontos que se encontravam no limite entre a área que reagiu com a fenolftaleína e a área que não reagiu. Estas regiões do corpo de prova apresentam a variação da cor cinza para a rosa-carmin, delimitando as zonas que sofreram e que não sofreram carbonatação. Em determinadas fatias, a região rosada foi mais disforme, entretanto foi usado o mesmo critério para se estimar a área delimitada por pontos onde a fenolftaleína reagiu e indicou um limite visível para demarcação.

Os dados referentes ao avanço da carbonatação foram utilizados como dados de entrada para se estimar a captura de carbono no material pesquisado. Após a segmentação de uma única fatia de cada prisma para leitura de resultado de profundidade de carbonatação, os corpos de prova retornaram para o ambiente natural do ensaio de captura gás carbônico, dando prosseguimento ao período de ensaio até as próximas datas programadas para análise. O procedimento descrito foi repetido nas idades de leitura subsequentes. O ensaio de varredura por micrografia foi realizado a fim de analisar a ocorrência da formação de carbonato de cálcio na microestrutura do concreto a partir das reações de carbonatação.

b) Carbonatação em ambiente natural desprotegido de chuva

O ambiente natural desprotegido de chuva é uma área de 5 m² com umidade relativa do ar de 79% e temperatura média de 28°C (INMET,2019). A área de exposição ao dióxido de carbono onde os corpos de prova ficaram expostos é um espaço aberto que possui uma superfície para apoiar as amostras de concreto, que foram espaçadas entre si para possibilitar a circulação de ar entre elas, como feito

também no ambiente protegido. A circulação de ar é natural e ocorre incidência de chuva. Os corpos de prova (Figura 3.10) foram analisados na condição seca em temperatura ambiente, quando levados ao laboratório de análise de materiais.

Figura 3.10 - Amostras em ambiente natural



Fonte: Acervo do autor (2019)

A análise da carbonatação ocorreu como apresentado no item 3.3.4.a. Para analisar a pasta de cimento após o período de exposição das amostras, a morfologia da microestrutura da pasta de cimento foi avaliada por Microscopia Eletrônica De Varredura (M.E.V.) e Espectrografia Por Dispersão De Energia (E.D.S.). Os equipamentos utilizados no MEV apresentam alta resolução produzindo imagens da microestrutura de materiais. O objetivo foi analisar se as amostras apresentaram a ocorrência da formação de carbonato de cálcio na microestrutura do material cimentício a partir das reações químicas com o dióxido de carbono. A interface agregado/pasta do concreto também foi analisada.

O concreto permeável apresenta grande variabilidade na disposição interna dos grãos de agregados, ocasionando diferentes volumes de vazios ao longo da estrutura de concreto permeável. Isto promove variabilidade no comportamento da carbonatação no material, onde os prismas de uma mesma mistura podem apresentar variações na área carbonatada. Devido a isto, aferiu-se a carbonatação no prisma que obteve comportamento intermediário, ou seja, no que apresentou áreas de carbonatação nem máximas e nem mínimas para se poder analisar um comportamento médio que não foi muito influenciado pela disposição dos grãos e volume dos vazios, os quais se forem obstruídos por efeito parede podem diminuir a velocidade de carbonatação no concreto permeável.

3.3.5. Carbonatação acelerada

O ensaio de carbonatação para ambiente acelerado em câmara de dióxido de carbono envolve o controle de fatores importantes em relação as reações de carbonatação como temperatura, umidade e concentração de carbono. A câmara ficou fechada durante a realização do ensaio, o que promoveu uma maior conservação do ambiente interno do equipamento. Quando era necessário abri-la, verificava-se a umidade, temperatura e ocorria a reposição de gás carbônico para voltar a condição adotada inicialmente. A seguir são apresentados os fatores relacionados ao ensaio acelerado, na pesquisa:

a) Umidade

A umidade relativa do ar no interior da câmara variou em torno de 70%. Esta umidade se encontra próximo dos intervalos considerados mais adequados para as reações de carbonatação ocorrerem, como visto em Bertos et al. (2004), Chang e Chen (2006), Ashraf et al. (2016) e Branko e Mladena (2016).

b) Temperatura

A temperatura no interior da câmara variou em torno de 26°C. Este valor de temperatura também está próximo da faixa de valores limites considerados mais adequados para as reações de carbonatação ocorrerem nos materiais cimentícios, como visto em Bertos et al. (2004), Chang e Chen (2006), Ashraf et al. (2016) e Branko e Mladena (2016).

c) Concentração de carbono

Foi adotado a concentração de carbono de 3% no interior da câmara de dióxido de carbono. Este valor foi escolhido com base na comparação de teores de carbono realizada por Castellote et al. (2009) que concluiu que valores mais baixos de concentração de dióxido de carbono resultam em resultados de carbonatação mais próximos da realidade do ambiente natural. Conclusão que foi apontada também por Pauletti (2009) em pesquisa sobre carbonatação acelerada. Para a realização do ensaio acelerado, uma placa de concreto permeável, foi segmentada em corpos de prova prismáticos de dimensão 20 cm x 10 cm x 10 cm. Estes prismas foram alocados dentro do equipamento, onde foram submetidos a condição acelerada. A câmara conta com um cilindro de CO₂ responsável por armazenar o

gás e liberá-lo no interior dela quando necessário. Este cilindro de gás está acoplado na parte lateral do equipamento, podendo ser facilmente acionado sem interferir na parte interna, onde os prismas estão armazenados. O controle da vazão de CO_2 foi realizado a partir de um rotâmetro em L/min. O tempo de vazão foi cronometrado até chegar na concentração adotada, onde lançamento de gás era interrompido. Foi necessário repetir o processo a cada idade de leitura quando a câmara era aberta. O Na Figura 3.11 são apresentados os equipamentos utilizados.

Figura 3.11 - Ensaio Acelerado.



(A) Câmara de carbonatação, (B) cilindro de dióxido de carbono, (C) Leitor de concentração de carbono, (D) Ventoinha. Fonte: Acervo do autor (2019).

No interior da câmara foi instalado uma ventoinha para facilitar a dispersão do dióxido de carbono no interior. A concentração de carbono foi medida por um dispositivo digital que mede em partes por milhão (PPM) e que ficou instalado no interior do equipamento, próximo aos corpos de prova de concreto. A umidade relativa do ar e a temperatura da câmara também foram aferidas pelo dispositivo. Os dados médios de temperatura e umidade referentes ao ambiente de exposição acelerado foram medidos, registrando 68% de umidade relativa do ambiente e 26° C temperatura. Ao longo da realização do ensaio foi necessário controlar a

quantidade de carbono. A adequação do teor de carbono foi realizada a partir da liberação de mais gás carbônico pelo cilindro que armazena dióxido de carbono próximo à câmara. A análise da carbonatação foi feita como descrito item 3.3.4a.

3.3.6. Avaliação do potencial de captura de carbono em CPER

Pode-se obter, a partir do indicador de pH, a profundidade de carbonatação na seção transversal dos prismas e a área carbonatada da superfície das amostras de concreto permeável. Estes dados foram utilizados em formulações matemáticas que relacionam a profundidade e a área que sofreu carbonatação com a captura de carbono em elementos cimentícios como o concreto.

Na revisão da literatura foi encontrado o estudo de Possan et al. (2012) que utiliza uma formulação matemática para a captura de CO_2 para o concreto (Equação 3.5). A formulação conta com a entrada de dados como a profundidade carbonatada do corpo de prova e a área de superfície exposta ao dióxido de carbono, por exemplo. A partir de cálculos estequiométricos e informações sobre a composição do aglomerante, é possível obter o valor em quilogramas de carbono fixado, relacionando os dados de profundidade de carbonatação, quantidade de cimento por m^3 e quantidade de óxido de cálcio contido no cimento.

$$MCO_2 = y.c.CaO.r.A.M \quad (\text{Equação 3.5})$$

Onde:

- MCO_2 = Massa de carbono (Kg)
- y = Profundidade carbonatada (m)
- c = Quantidade de cimento (kg/m^3)
- CaO = Quantidade de óxido de cálcio contido no cimento (%)
- r = Proporção de CaO totalmente carbonatável (%)
- A = Área superficial do concreto exposta ao gás carbônico (m^2)
- M = Fração molar do CO_2/CaO .

Esta equação foi adaptada para poder ser aplicada ao concreto permeável, onde uma variável foi introduzida com o objetivo de desconsiderar os vazios interconectados, uma vez que a fórmula original aponta o comportamento de um material considerado maciço, apresentando apenas microporos. O resultado da

equação original foi multiplicado pelo termo mv que representa a minoração de volume do concreto permeável desconsiderando as regiões de vazios estimados nos ensaios de porosidade realizados na caracterização hídrica do material. Foram adotados os valores de 0,54 e 0,59 para o fator mv das amostras com relação a/c de 0,33 e 0,37 respectivamente, uma vez que a porosidade total do concreto permeável produzido foi de 0,46 ($a/c = 0,33$) e 0,41 ($a/c = 0,37$). A fórmula adaptada de Possan et al. (2012) é mostrada na Equação 3.6.

$$MCO_2 = y.c.CaO.r.A.M.mv \quad (\text{Equação 3.6})$$

Onde ocorre o acréscimo de:

- mv = Minoração de volume do concreto permeável desconsiderando os vazios interconectados (%)

A partir da formulação matemática adaptada de Possan et al. (2012) estimou-se a quantidade de carbono em 1 m² de concreto permeável. A condição de contorno para essa estimativa envolve o concreto exposto em meio urbano sob condições naturais de temperatura e umidade. O período levado em consideração para a estimativa foi o de 189 dias que é a última idade de leitura dos ensaios. A quantidade de cimento foi obtida através dos cálculos de dosagem, a quantidade adotada de óxido de cálcio contido no cimento foi de 60% (NEVILLE, 2016), o valor adotado para a proporção de CaO totalmente carbonatável foi de 75% (ANDRADE et al. 2018) e a fração molar referente a relação CO₂/CaO é de 0,78 obtido a partir de estequiometria dos elementos químicos.

Pode-se calcular a captura de carbono para um metro quadrado de concreto produzido e extrapolar este valor para uma área superficial maior, dependendo da aplicação que o concreto será utilizado. O concreto permeável pode ser empregado em estacionamentos e áreas de passeio, logo a superfície exposta ao gás é elevada e pode promover grande captura de carbono quantificada teoricamente pela formulação adotada. A partir da quantidade estimada para a captura de carbono, foi possível relacionar este dado com o valor referente a emissão de gases para a produção do concreto permeável e estimar o quanto o material recupera do carbono emitida, levando em conta emissões com transporte e produção. Segundo Anastasiou et al. (2017), são lançados no ambiente cerca de 19,5 kg/m² no ambiente em relação ao concreto permeável.

4. Apresentação e Discussão de Resultados

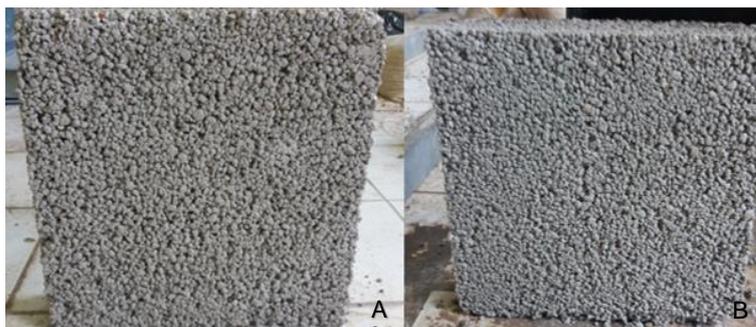
4.1. Parâmetros de Dosagem do Concreto Permeável

Na Tabela 4.1 se encontra informações sobre o estado fresco e endurecido do concreto produzido. As placas não sofreram exsudação e apresentaram coesão suficiente entre os grãos de seixo. A pasta de cimento apresentou cobertura satisfatório sobre os agregados. A superfície do concreto no estado endurecido pode ser vista na Figura 4.1. A proporção de materiais utilizados gerou uma mistura de baixo teor de pasta, promovendo a formação de uma mistura mais “seca”.

Tabela 4.1 - Avaliação do concreto permeável.

Mistura de concreto (a/c)	Estado Fresco		Estado Endurecido	
	Coesão	Exsudação	Efeito Parede	Cobrimento dos Grãos
0,33	Sim	Não	Não	Satisfatório
0,37	Sim	Não	Não	Satisfatório

Figura 4.1 - Concreto Permeável – Estado Endurecido.



(A): A/C = 0,33; (B): A/C = 0,37. Fonte: Acervo do autor (2019).

Na figura 4.2, pode-se ver a coesão dos agregados em meio a pasta de cimento pelo método proposto por Tennis et al. (2004). O concreto com relação a/c de 0,33 originou uma esfera de característica menos “trabalhável” que a amostra de a/c 037, embora com coesão entre os grãos. Foi possível visualizar que o seixo estava coberto por pasta de aglomerante, promovendo adesão entre os agregados.

Figura 4.2 - Análise visual de coesão

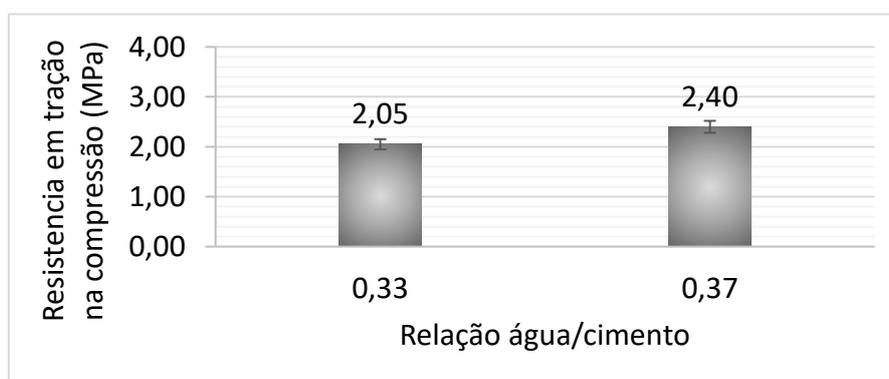


(A): A/C = 0,33; (B): A/C = 0,37. Fonte: Acervo do autor (2019).

4.2. Parâmetros Mecânicos do Concreto Permeável

Os resultados obtidos mostraram que o concreto de relação a/c 0,37 apresentou maior valor de resistência à tração na flexão (Figura 4.3). Estes resultados mostram que os dois traços estão dentro dos parâmetros normativos, possuindo resistência maior que os 2 MPa (ANBT, 2015). A presença de mais pasta de cimento na placa de a/c 0,37 promove uma maior compactação da estrutura do esqueleto granular do concreto permeável. É possível estimar que, ao contrário do concreto convencional, onde a resistência aumenta com a diminuição da relação a/c (MEHTA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2016), a resistência do concreto permeável diminui quando adotado valores dentro de um intervalo com relações a/c mais baixos (CHINDAPRAIST et al, 2008; TORRES et al, 2015).

Figura 4.3 - Resistência à tração na flexão aos 28 dias



A modificação no teor de pasta promoveu diminuição no valor da resistência mecânica de tração na flexão. A dosagem para concreto permeável é baseada em um equilíbrio entre vazios, resistência mecânica e trabalhabilidade. Para relações a/c muito baixas, promovendo misturas demasiadamente “secas”, é possível que não seja atingida os valores mínimos normativos de resistência mecânica, pois não será promovida uma ligação eficaz entre os grãos de seixo rolado que compõe o esqueleto granular do concreto permeável.

Castro et al. (2009) aponta que o valor mínimo de a/c para adotar na dosagem do concreto permeável é de 0,32, garantindo até este limite os parâmetros de permeabilidade e resistência mecânica. Chandrappa e Biligiri (2016) mostram que valores entre 0,28 e 0,40 são os valores mais adotados nas dosagens para se obter uma pasta que una as partículas de agregado, criando um sistema de vazios interconectados com resistência suficiente para as aplicações mais comuns do concreto permeável.

4.3. Parâmetros Hídricos do Concreto Permeável

Os resultados referentes aos parâmetros hídricos das placas permeáveis apontaram que as propriedades hidráulicas do material atendem aos valores normativos para pavimentos drenantes (ABNT, 2015). Foram realizados ensaios de coeficiente de permeabilidade, porosidade total e porosidade efetiva. Os concretos produzidos apresentaram valores de coeficiente de permeabilidade superiores ao valor mínimo de $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s (Tabela 4.2) recomendado em norma.

Tabela 4.2 - Caracterização hídrica.

Relação a/c das placas testadas	Período de cura das placas de concreto	Coefficiente de permeabilidade k (m/s)	Atende a NBR 16416 (ABNT, 2015)
0,33	28 dias	$9,4 \times 10^{-3}$	Sim
0,37	28 dias	$8,7 \times 10^{-3}$	Sim

O material produzido apresentou propriedades permeáveis apontadas como positivas por Tennis et al. (2004), Virgiliis (2009) e Mariano (2014), onde a capacidade de permeabilidade do material pode ser aproveitada como uma solução criativa para os problemas de drenagem no contexto urbano apresentados por Canholi (2014). A água pôde infiltrar normalmente da superfície para o interior da placa e conseguir sair pelos vazios do esqueleto granular da estrutura de concreto. As placas testadas no ensaio são visualizadas na Figura 4.4.

Figura 4.4. Placas para caracterização hídrica.



(A): a/c = 0,33; (B): a/c = 0,37. Fonte: Acervo do autor (2019).

Para que o concreto permeável possua elevada capacidade de infiltração é preciso que este material apresente um elevado volume de vazios conectados na

estrutura granular. O maior teor de pasta na mistura com a/c 0,37 promove diminuição do teor de vazios do concreto como apontado por Chindapraist et al. (2008) e Kim et al. (2010). O comportamento do material no ensaio de permeabilidade é coerente com os resultados dos ensaios de porosidade total (Figura 4.5) e efetiva (Figura 4.6), uma vez que os testes realizados apontaram que a amostra com maior relação a/c apresentou menor porosidade total, ou seja, a quantidade total de vazios presentes na amostra foi menor em relação a mistura com menor relação a/c. Isto pode ser percebido, também, para a porosidade efetiva, que considera apenas os vazios interconectados do material.

Figura 4.5 - Porosidade Total.

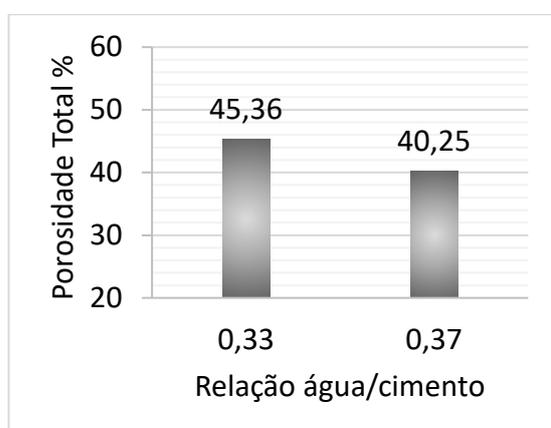
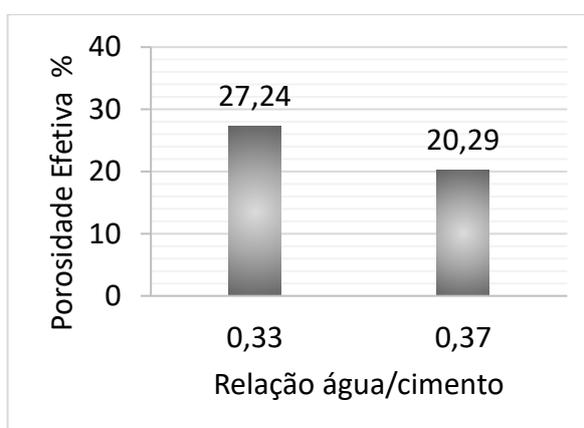


Figura 4.6 - Porosidade Efetiva.



A mistura de a/c 0,33 obteve maior porosidade efetiva e total. Como os macroporos do esqueleto granular de agregados controlam a capacidade de infiltração de líquidos nos concretos drenantes, qualquer fator que gera influência sobre a estrutura granular pode afetar o comportamento permeável. Isto ocorre em relação ao aumento da pasta de cimento na mistura de concreto pois resulta no preenchimento de parte dos vazios presentes no material, reduzindo, parcialmente, a permeabilidade do sistema como apontado por Torres, Hu e Ramos (2015).

A característica do concreto permeável de ter maior permeabilidade por meio da diminuição da relação a/c vai ao encontro dos resultados de coeficiente de permeabilidade que mostraram maior capacidade de percolamento da água nas placas com a/c 0,33. Os resultados dos ensaios hídricos apontaram que o concreto permeável pode ser utilizado na solução de problemas de drenagem apontado por Zhong et al. (2018) e Xie et al. (2019), onde o concreto permeável foi analisado como material para pavimentação drenante devido suas características hidrológicas positivas.

4.4. Carbonatação do Concreto Permeável

4.4.1. Análise da carbonatação

Os resultados obtidos apontaram que o material cimentício reage com o dióxido de carbono ao longo do tempo nas condições de temperatura e umidade dos locais de ensaio. O concreto permeável apresenta baixas quantidades de pasta de cimento no interior das amostras, entretanto, o grande teor de vazios do material possibilita o contato do gás carbônico com a pasta de cimento. As fatias dos prismas de concreto permeável analisados são apresentadas nas Figuras 4.7 e 4.8.

Figura 4.7 Carbonatação - Ambiente Protegido

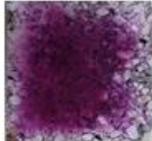
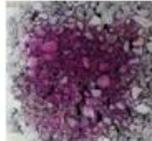
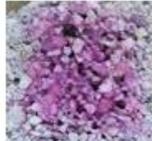
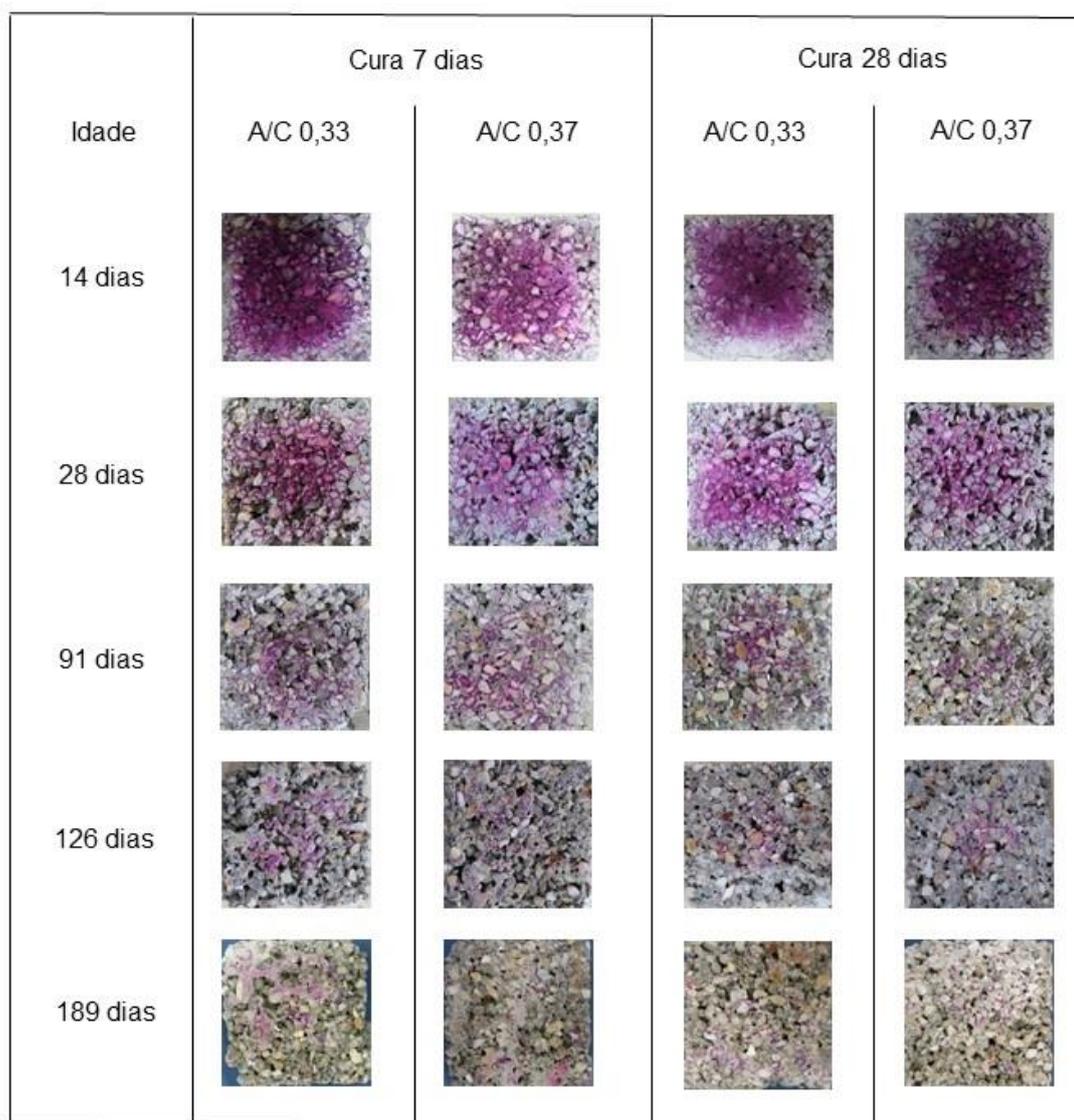
Idade	Cura 7 dias		Cura 28 dias	
	A/C 0,33	A/C 0,37	A/C 0,33	A/C 0,37
14 dias				
28 dias				
91 dias				
126 dias				
189 dias				

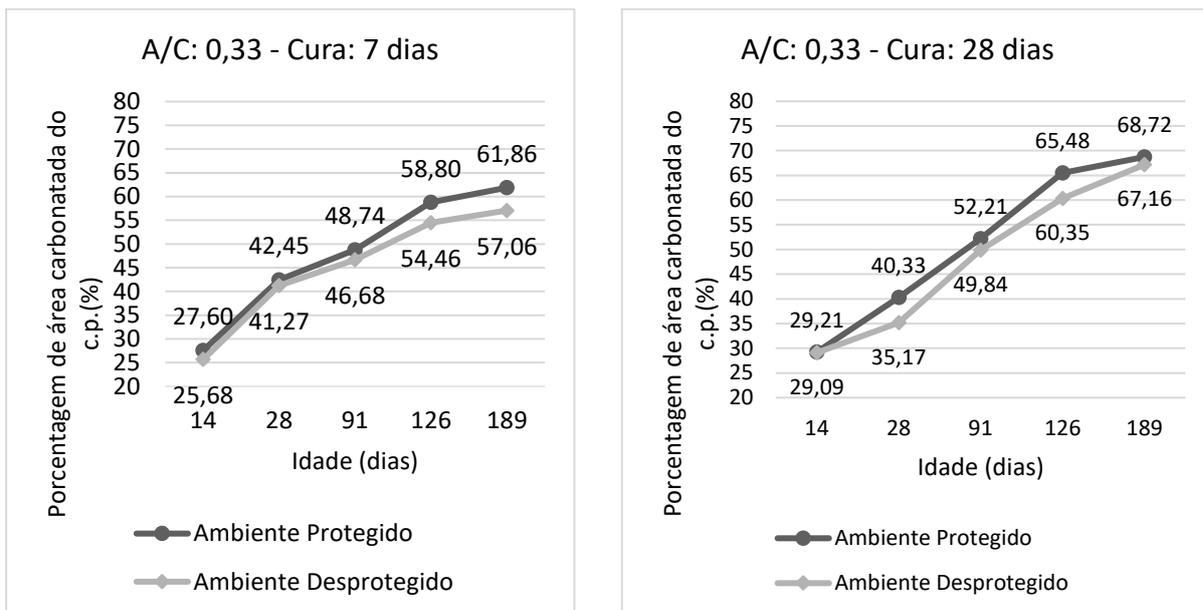
Figura 4.8 - Carbonatação - Ambiente Desprotegido



A coloração rosa-carmim localizada no centro das amostras representa a região que não está carbonatada, ou seja, o pH do material não foi alterado ainda como consequência do consumo de hidróxido de cálcio a partir da reação com o dióxido de carbono. A coloração cinza localizada na região periférica das fatias indica as partes que carbonataram e não reagiram com o indicador químico de fenolftaleína.

A seguir são apresentados os resultados de carbonatação em diferentes ambientes para o concreto permeável de a/c 0,33 e períodos de cura de 7 e 28 dias nas Figuras 4.9 e 4.10.

Figura 4.9 – Carbonatação x Ambientes. Figura 4.10 - Carbonatação x Ambientes.



De acordo com as figuras é possível notar que as amostras carbonataram de forma parecida. O ambiente protegido de chuva proporcionou uma carbonatação um pouco maior que o ambiente desprotegido. Possan et al. (2012) obteve comportamentos similares para carbonatação de elementos cimentícios em diferentes ambientes, onde o ambiente apresentou ligeira diminuição na captura de carbono. Este comportamento é esperado uma vez que ocorre incidência de água, em determinados períodos do dia no ambiente desprotegido, cobrindo os poros com uma fina lâmina de água, impedindo as reações entre o dióxido de carbono e hidróxido de cálcio. A condição de carbonatação é atingida novamente quando a amostra volta ao estado seco, naturalmente, a partir da ventilação e exposição ao sol no ambiente ao qual se encontra exposta.

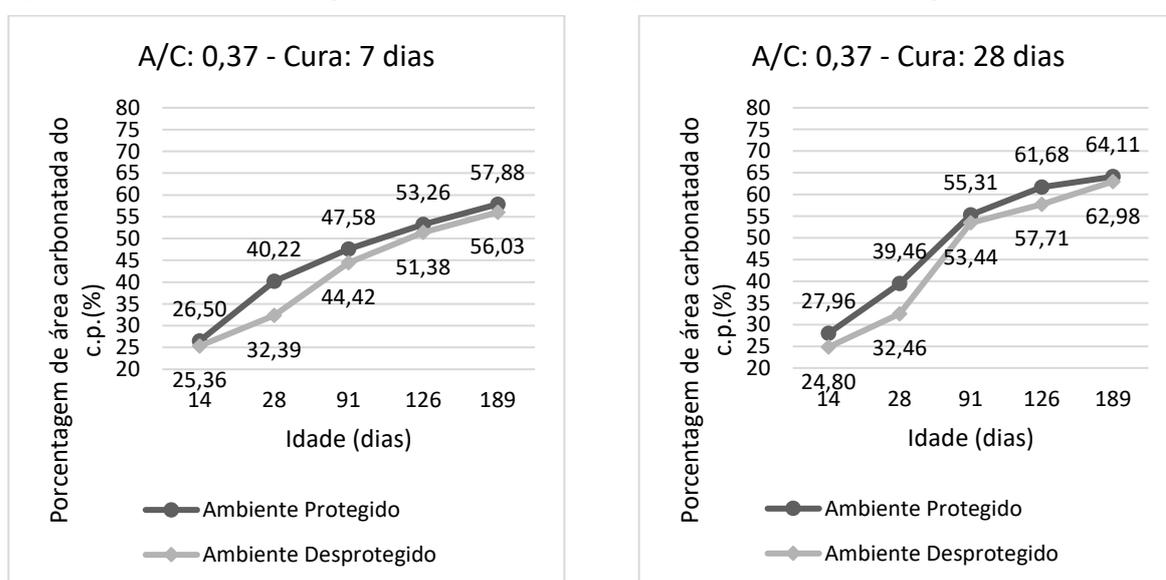
É possível visualizar nas Figuras 4-3 e 4-4 que ocorreu captura de carbono ao longo dos meses, de forma gradual, atingindo valores maiores que para o concreto convencional. Jacobsen e Jahren (2002) apontam que o concreto convencional pode capturar carbono e Kulakowski (2002) mostra que para este concreto com poros menores, a velocidade de captura é mais lenta, uma vez que a estrutura do mesmo dificulta a livre entrada de dióxido de carbono.

O comportamento da carbonatação está relacionado aos materiais cimentícios presentes no concreto. A composição do concreto permeável possibilita uma maior região de vazios e maior superfície de contato dos grãos cobertos por pasta de cimento. Isto ocorre devido o concreto não conter areia ou agregados

menores que 2,4 milímetros, produzindo uma quantidade maior de vazios no material. As laterais das amostras, onde ocorre a entrada do gás carbônico, apresentam muitos espaços entre os grãos possibilitando contato do gás carbônico com a pasta de cimento que os cobre.

As amostras com $a/c = 0,33$ obtiveram comportamento similar às amostras de $a/c = 0,37$ quanto ao ambiente que promoveu maior carbonatação. A seguir são apresentados os resultados referentes aos ambientes analisados para o concreto permeável de $a/c 0,37$ e períodos de cura de 7 e 28 dias nas Figuras 4.11 e 4.12.

Figura 4.11 – Carbonatação x Ambientes. Figura 4.12 - Carbonatação x Ambientes.

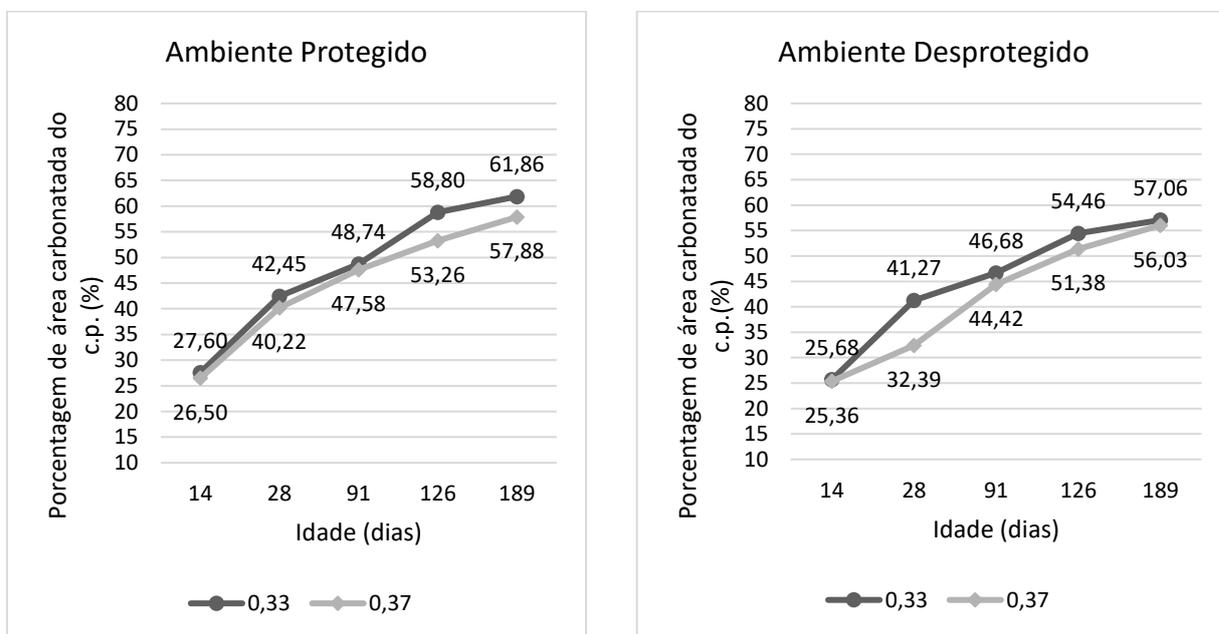


Os resultados mostram que a carbonatação das amostras apresentou valores próximos. A área carbonatada na amostra de $a/c = 0,37$ exposta ao ambiente protegido da chuva obteve uma carbonatação levemente maior do que no ambiente desprotegido. Os períodos de cura adotados nas misturas de concreto não promoveram aumento ou diminuição elevada na progressão de área carbonatada das amostras quando comparadas, não havendo alterações após 7 dias. As maiores influências foram provocadas pelo ambiente de exposição ao qual os corpos de prova foram condicionados, onde o ambiente protegido das intempéries gerou maior captura de carbono.

As duas relações água/cimento adotadas para a produção do concreto drenante apresentaram influência na carbonatação ao longo do tempo de exposição. As amostras de $a/c = 0,37$ carbonataram menos nos dois ambientes do que as amostras de $a/c = 0,33$ para o período de cura de 7 dias com 189 dias de

ensaio. A seguir são apresentados os resultados de captura de carbono nos dois ambientes relacionando as relações a/c 0,33 e 0,37 com período de cura de 7 dias nas Figuras 4.13 e 4.14.

Figura 4.13 - Carbonatação x a/c (cura: 7 d) Figura 4.14 - Carbonatação x A/C (cura: 7 d.)

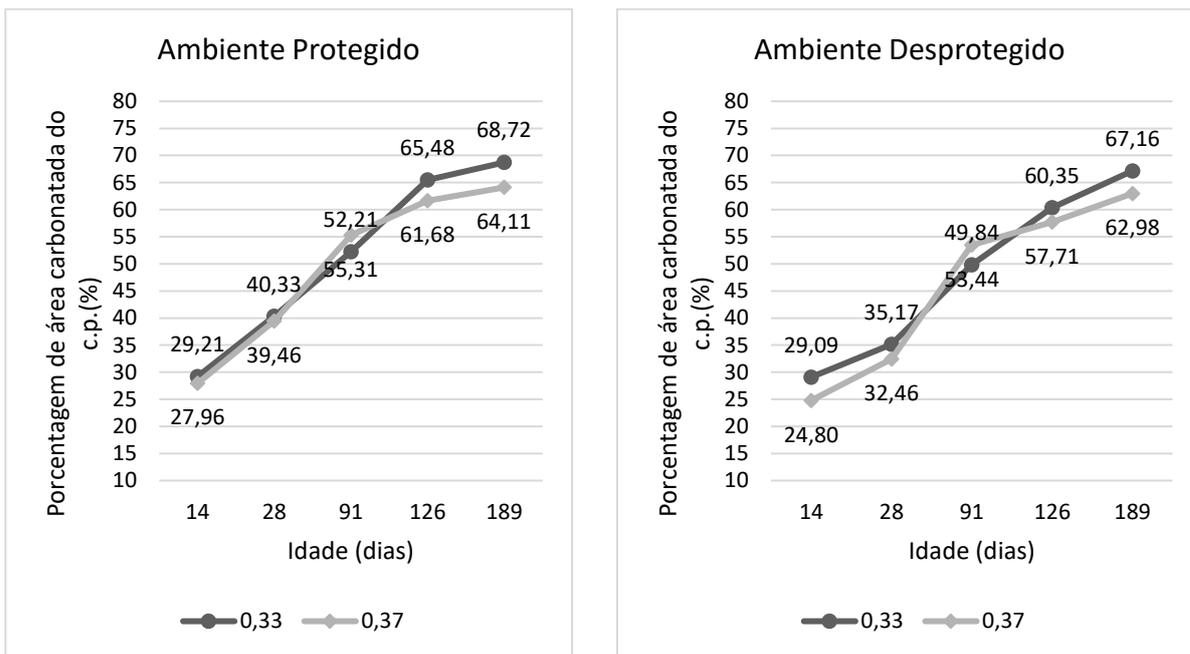


A pasta de cimento fixou gás carbônico, gradualmente, na estrutura do material concreto como Pade e Guimaraes (2007), Galan (2010) e Jang et al (2016) mostraram ser possível em elementos cimentícios. A realização do ensaio MEV auxiliou na identificação dos elementos químicos presentes nas amostras de concreto permeável como pode ser visto no item 4.4.2.

De acordo com os dados das figuras apresentadas é possível dizer que a influência das regiões de vazios é maior que a influência da relação água/cimento pois as duas relações não promoveram diferenças mais elevadas na área que capturou carbono, uma vez que na leitura final os resultados foram similares. Entretanto, os valores da progressão de carbonatação também foram maiores que os valores do concreto convencional pois ocorreu maior entrada de gás carbônico e maior contato com a superfície do grão de seixo que contém pasta de cimento.

Para o período de cura de 28 dias o comportamento obtido ao final do período de exposição a relação a/c = 33 apresentou valores um pouco maiores do que a mistura com a/c= 0,33. A seguir são apresentados os resultados de captura de carbono nos dois ambientes relacionando as relações a/c 0,33 e 0,37 com período de cura de 28 dias nas Figuras 4.15 e 4.16.

Figura 4.15 - Carbonatação x a/c (cura: 28 d) Figura 4.16 - Carbonatação x a/c (cura: 28 d)



A porcentagem carbonatada das fatias envolvendo os diferentes ambientes de exposição, períodos de cura e relações água/aglomerante mostra que apesar das variações destes fatores, as influências sobre o material provocam leves alterações na proporção das áreas de captura de carbono no período analisado. Cabe ressaltar que o concreto permeável apresenta pouca pasta de cimento e a maior parte da seção transversal do material é composta por grãos de agregados como o seixo rolado de granulometria #4,8 mm, logo a mistura de concreto não tem valor elevado do teor de pasta.

Os valores de área carbonatada nas figuras apresentadas mostraram comportamento similar da progressão de carbonatação nas amostras, onde ocorreu leves diferenças ao final do período de análise. O concreto de caráter permeável, a partir da presença de macroporos em sua estrutura, mostrou carbonatar de forma mais rápida de acordo com os resultados obtidos. Os comportamentos podem variar dependendo da distribuição dos vazios e ocorrência de efeito parede no interior do material, que obstrui a entrada do gás carbônico, preenchendo a região de vazio.

Na tabela 4.3 é possível ver os resultados dos parâmetros hídricos do concreto permeável como a porosidade total e efetiva dos prismas ensaiados e o índice de permeabilidade em comparação com a área carbonatada ao final de 189 dias de exposição. Estes parâmetros auxiliam na análise da influência do volume

de vazios do material sobre o avanço da carbonatação, uma vez que a porosidade é um dos fatores que atua no fenômeno da carbonatação. A modificação da relação a/c gerou aumento na porosidade, promovendo o aumento da permeabilidade K das amostras como consequência. Os prismas que sofreram mais carbonatação foram os das misturas de concreto permeável que apresentam menor relação a/c, maior porosidade e maior permeabilidade

Tabela 4.3 - Parâmetros hidricos e área carbonata Cura:28 dias).

Relação a/c	Coefficiente de permeabilidade k (mm/s)	Porosidade Efetiva (%)	Porosidade Total (%)	Área de carbonatação - ambiente desprotegido (%)	Área de carbonatação - ambiente protegido (%)
0,33	9,4	27,24	45,36	67,16	68,72
0,37	8,7	20,29	40,25	62,98	64,11

A mistura de concreto com menor relação a/c apresenta maior porosidade total e efetiva e promove maior facilidade de entrada do dióxido de carbono a partir das regiões de vazio no material, promovendo contato do gás com a superfície dos grãos de seixo cobertos com pasta e dando início as reações de carbonatação no material.

Este comportamento ocorre porque o volume de vazios é maior na mistura com maior relação a/c devido a porosidade ser mais elevada em concretos permeáveis com pouca pasta de cimento no interior da estrutura. Além das áreas carbonatadas, também foram medidas as profundidades de carbonatação a partir da lateral das amostras. Estas profundidades levaram em conta o avanço da carbonatação, em linha reta, não excluindo os macroporos presentes no concreto permeável.

A seguir são apresentados os valores de profundidade na Tabela 4.4. É possível notar o avanço gradual, data após data de leitura. O comportamento do avanço da profundidade de carbonatação das amostras apresentou a tendência similar aos dados de área carbonatada mostrados nas figuras. O ambiente protegido apresentou valores levemente maiores, comportamento visto também para a relação á/c de 0,33, o que tinha se refletido quando foram medidas as áreas que reagiram com a fenolftaleína.

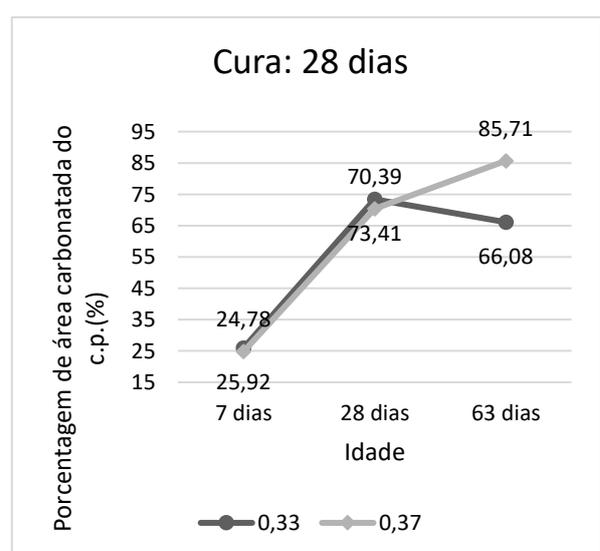
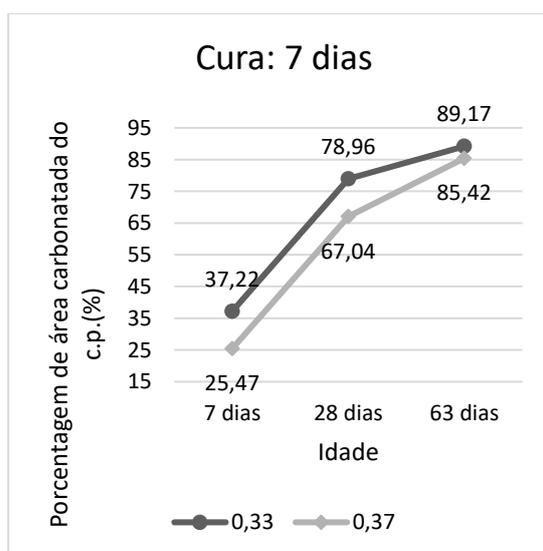
Tabela 4.4 - Profundidade de carbonatação média (mm)

Ambiente	Protegido				Desprotegido			
	Cura	7 dias		28 dias		7 dias		28 dias
A/C	0,33	0,37	0,33	0,37	0,33	0,37	0,33	0,37
14	7,49	6,4	8,78	7,8	7,14	6,04	7,41	6,23
28	10,32	9,8	12,30	10,6	10,61	10,36	11,84	10,91
91	16,59	15,9	18,33	16,1	16,42	16,23	17,06	16,69
126	25,00	23,3	26,19	24,8	24,08	23,63	25,93	24,94
189	30,60	29,1	31,77	27,6	30,16	29,54	30,25	29,85

Na realização da medida foi levado em conta os vazios ou macroporos presentes na estrutura da amostra. A estrutura granular do concreto permeável é diferente do concreto convencional, dificultando a comparação entre os dois tipos de material, entretanto é possível fazer análises de como a presença de vazios pode interferir no comportamento do material.

Na carbonatação acelerada em câmara (Figuras 4.19 e 4.20), o avanço da região carbonatada apresentou maior velocidade que nas amostras ao ar livre. A captura de carbono ocorreu de forma mais intensa a partir da utilização da câmara, a qual promoveu um período de exposição menor para se obter áreas carbonatadas similares aos valores dos ensaios em ambiente natural.

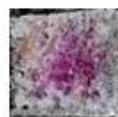
Figura 4.17 – Carb. acelerada (Cura: 7 dias) Figura 4.18 – Carb. acelerada (Cura: 28 dias)



É possível notar maior captura em idades menores de leitura quando comparado com as figuras mostradas anteriormente. A progressão da carbonatação diminuiu ao longo das leituras como ocorreu de forma similar no ensaio de ambiente natural, mostrando maior velocidade de captura nas primeiras idades. A terceira idade de análise apresentou comportamento diferente do esperado, onde houve menor área de carbonatação. Este comportamento pode ter sido influenciado por fatores como condição de umidade do prisma no interior da câmara ou ocorrência de efeito parede na lateral do corpo de prova, próximo de onde a fatia foi segmentada, o que obstrui os macroporos ou vazios do concreto permeável.

A maior velocidade de captura de carbono foi promovida pelo maior teor de carbono contido no interior da câmara onde as amostras estavam armazenadas e expostas ao gás. Os valores eram maiores que 10000 PPM de dióxido de carbono, o que caracterizou o aumento do gás ao redor do concreto permeável. Foi observado que a região carbonatada das fatias retiradas da câmara tinham uma melhor delimitação de onde a fenolftaleína reagiu. As amostras do ambiente natural apresentaram uma região de carbonatação mais disforme e desordenada, não estando concentrada exatamente no centro da fatia em algumas amostras. A seguir, as amostras do ensaio acelerado na Figura 4.21.

Figura 4.19 - Carbonatação acelerada

	Cura 7 dias		Cura 28 dias	
Idade	A/C 0,33	A/C 0,37	A/C 0,33	A/C 0,37
7 dias				
28 dias				
62 dias				

As amostras com relação a/c 0,33 carbonataram um pouco mais rápido que as com relação a/c 0,37. Observa-se um comportamento similar aos ambientes naturais protegido e desprotegido, pois a mistura de concreto permeável que obteve maior permeabilidade e porosidade (total e efetiva) nos ensaios hídricos, também apresentou maior carbonatação.

O ensaio acelerado buscou simular uma condição mais elevada de exposição ao dióxido de carbono. A condição de ensaio da câmara pode sofrer alterações quando esta é aberta nas idades de leitura, quando se retiram as amostras, o que pode ter promovido leves influências sobre a temperatura e teor de carbono. Entretanto, buscou-se adequar estes parâmetros, novamente, após devolver as amostras destinadas à próxima idade de leitura de carbonatação.

Além das áreas, foram medidas também as profundidades carbonatadas no ensaio acelerado, levando em conta o avanço no interior da estrutura. A seguir são apresentados os valores na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Profundidade de carbonatação média (mm)

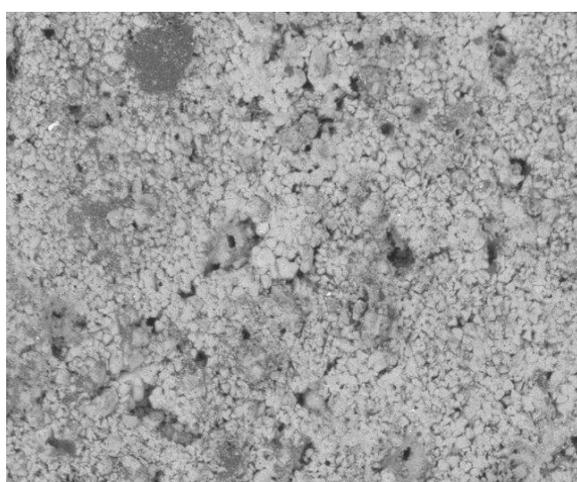
Ambiente Acelerado				
Cura	7 dias		28 dias	
A/C	0,33	0,37	0,33	0,37
7	19,23	9,11	10,17	8,42
28	32,10	27,52	30,19	26,42
62	36,60	35,25	25,11	33,63

Foi possível notar o avanço mais rápido da profundidade em idades de leitura menores que no ensaio em ambiente natural. As últimas idades apresentaram valores maiores de captura com exceção de uma leitura na amostra de 0,33 e cura de 28 dias, como mencionado na análise de áreas. O comportamento observado seguiu a tendência das figuras apresentadas anteriormente, uma vez que os dados de profundidade e área carbonatada representam a condição dos corpos de prova durante o ensaio. Em idades menores de leitura se obteve valor elevado de carbonatação no ensaio acelerado, o que representa uma maior captura em ambientes onde o teor de carbono tem valores maiores que em ambientes naturais.

4.4.2. Microscopia Eletrônica de Varredura

A carbonatação no interior das amostras foi avaliada também a partir da identificação dos elementos químicos fixados na estrutura de concreto permeável. A microestrutura da pasta de aglomerante do concreto foi avaliada por meio dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura (M.E.V.) e espectrografia por dispersão de elétrons. As micrografias obtidas no ensaio M.E.V. apresentaram a morfologia de componentes químicos presentes nas reações de carbonatação como o carbonato de cálcio e análise da interface agregado/pasta. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais – MATCAM / UFPA. A seguir é mostrada a região carbonatada nas Figuras 4.22 a 4.25.

Figura 4.20 - Região carbonatada



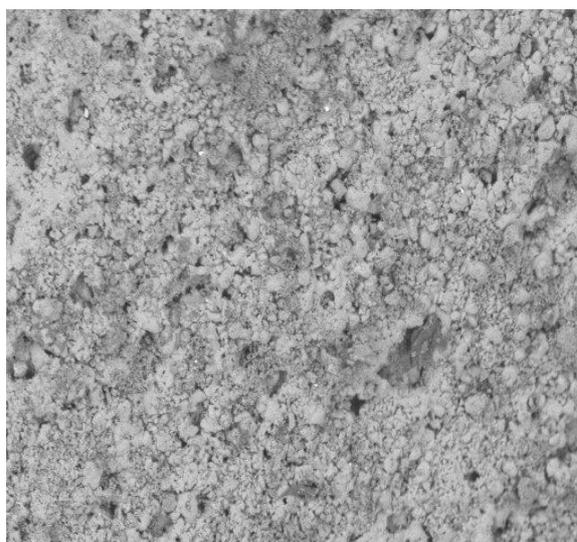
UFPA - LME2637 2020/01/30 11:20 F D4.6 x800 100 um

Figura 4.21 - Região carbonatada



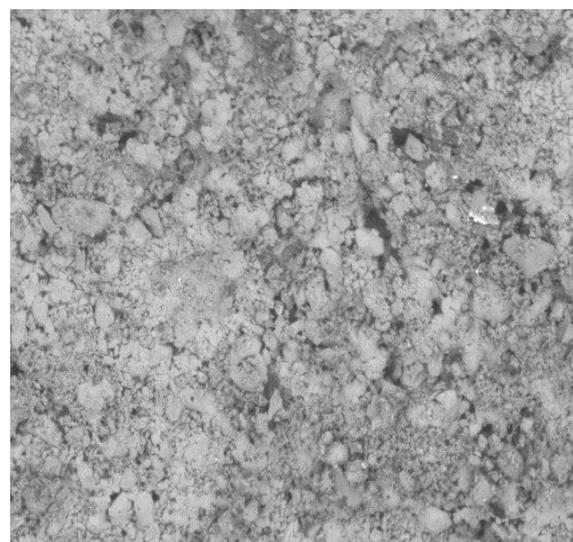
UFPA - LME2636 2020/01/30 11:18 F D4.9 x800 100 um

Figura 4.22 - Região carbonatada



UFPA - LME2635 2020/01/30 11:17 F D4.7 x600 100 um

Figura 4.23 - Região carbonatada



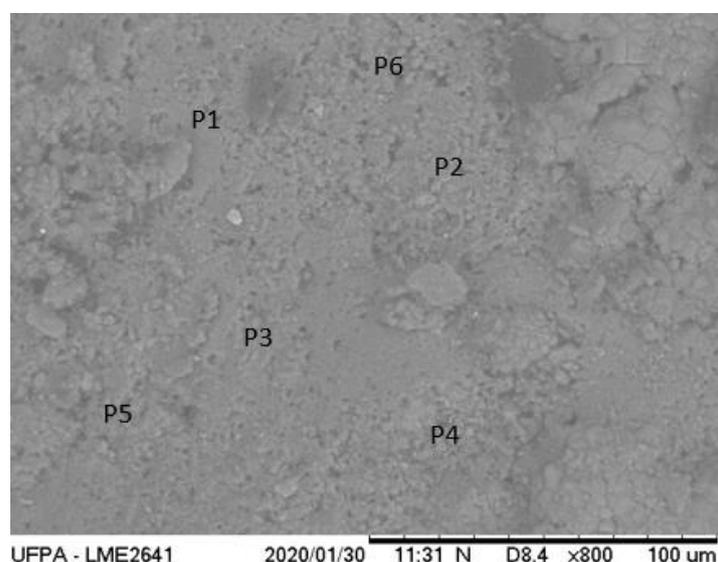
UFPA - LME2634 2020/01/30 11:15 F D4.8 x800 100 um

Como a carbonatação ocorreu de maneira similar nas misturas produzidas, foi realizada a análise morfológica em um traço específico de concreto permeável. A amostra analisada foi de uma fatia de concreto permeável com 28 dias de cura e relação a/c de 0,37. A microestrutura do carbonato de cálcio foi encontrada por meio de análise de espectrografia por dispersão de energia (E.D.S.), identificando os elementos químicos presentes no material como o cálcio, oxigênio e carbono. A presença do elemento Carbono na microestrutura da região carbonatada aponta que o material cimentício absorveu este elemento químico em reações carbonáticas a partir do ambiente.

A espectrografia por dispersão de elétrons é realizada a partir de micrografias eletrônicas por varredura. Em uma micrografia são escolhidos diferentes pontos de análise para se obter as massas atômicas dos componentes do material. É possível visualizar nas imagens apresentadas que a região carbonatada tem superfície mais “rugosa” constituída de elementos cimentícios do concreto permeável.

Os dados encontrados nos ensaios MEV e EDS possibilitam a identificação de elementos químicos no interior da estrutura. Segundo Silva (2007), o concreto apresenta carbonatação quando é encontrado o elemento carbono na microestrutura com elevação da relação Ca/Si, onde Bertos et al. (2004) aponta que maiores relações Ca/Si podem identificar pontos mais carbonatados no ponto de estudo, desde que se localize o carbono na região analisada. A seguir a imagem 4.26 apresenta a região considerada no M.E.V. e os pontos de análise por EDS.

Figura 4.24 - Micrografia para análise EDS.



Os resultados sobre massa atômica dos elementos químicos encontrados em cada ponto de análise das imagens apresentadas são mostrados na Tabela 4.6. É possível ver que carbono foi identificado na maioria dos pontos. A presença do carbono está relacionada a captura do gás por meio das reações de carbonatação, produzindo $CaCO_3$.

Tabela 4.6 - Elementos identificados por EDS.

Elementos Químicos	Massa Atômica					
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6
C	15,44	12,07	13,85	-	16,93	17,1
O	59,41	48,41	52,14	31,85	60,12	55,33
Ca	16,9	33,25	25,7	58,43	14,4	20,5
Si	5,1	4,41	5,48	5,43	7,27	4,87
Mg	0,7	0,58	0,9	-	0,52	0,55
Al	1,91	0,67	1,43	1,42	0,73	1,11
Ca/Si	3,3137	7,5397	4,6898	10,761	1,9807	4,2094

4.4.3. Captura de Carbono

A estimativa de captura de carbono levou em consideração a quantidade capturada de gás carbônico ao longo do tempo pelas reações de carbonatação e a quantidade deste gás emitido, sendo considerado $19,5 \text{ Kg/m}^2$ (ANASTASIOU et al., 2017) para o processo de produção do concreto permeável. Este valor é baseado na soma de emissões referentes aos materiais utilizados, transporte e produção do concreto. Segundo o autor são considerados $18,9 \text{ KgCO}_2 / \text{m}^2$ emitidos em relação aos materiais que compõem o concreto permeável, $0,3 \text{ KgCO}_2 / \text{m}^2$ para o transporte dos materiais e $0,3 \text{ KgCO}_2 / \text{m}^2$ para produção do concreto permeável.

A seguir, na Tabela 4.7, é apresentada a estimativa de quanto dióxido de carbono é capturado ao longo da profundidade de carbonatação a partir da

superfície. Os dados são referentes ao período de cura de 28 dias, uma vez que é o tempo recomendado para a produção de elementos de concreto.

Tabela 4.7 - Captura de Carbono

a/c - ambiente – idade (dias)	Profundidade Carbonatada (mm)	Captura de carbono para superfície de 1 m ² (kg)	Quantidade recuperada (%)
0,33 - Protegido - 189	31,77	2,11	11%
0,37 - Protegido - 189	27,60	2,01	10%
0,33 - Desprotegido - 189	30,25	2,01	10%
0,37 - Desprotegido - 189	29,85	2,17	11%
0,33 - Acelerado - 63	25,11	1,67	9%
0,37 - Acelerado - 63	33,63	2,44	13%

A quantidade recuperada de carbono leva em consideração a produção de um metro quadrado do material, o qual é relacionado à quantidade de dióxido de carbono que foi lançada no ambiente para produzir e transportar o concreto. Na formulação matemática de captura de carbono foi estimada a captura do gás carbônico em 1 m². Considerou-se a área de superfície de 1 m² para todas as misturas e foi obtido resultados em Kg de carbono que variaram de acordo com os dados de profundidade carbonatada obtidas a partir de dados dos ensaios de carbonatação.

Pode-se perceber na tabela apresentada que a captura de carbono leva a recuperação próxima de 10% da quantidade emitida a partir do transporte e produção do concreto permeável, referente a uma profundidade carbonatada de cerca de 30 mm. A porcentagem de carbono que foi reabsorvido foi similar para as condições de ensaio as quais o material foi submetido. Com a progressão desta frente de carbonatação, esta recuperação de carbono aumenta a partir que, ao longo do tempo, mais gás carbônico adentrará nas regiões de vazios da estrutura do material.

5. Conclusões

O concreto permeável sofreu as reações de carbonatação, uma vez que é constituído de elementos cimentícios como a pasta de cimento. As amostras de concreto permeável expostas em ambiente desprotegido de chuva capturaram uma quantidade ligeiramente menor de carbono que as amostras que estavam em ambiente protegido. Isto ocorre devido a influência da chuva e o consequente contato entre a superfície do concreto e a água. As amostras com menor relação a/c apresentaram maior profundidade de carbonatação.

A estimativa de quanto carbono foi capturado, a partir de formulação matemática para captura de carbono em elementos cimentícios, apontou que um m² do material apresenta potencial de capturar cerca de 10% do carbono emitido (na produção) para os primeiros 6 meses de exposição do material ao dióxido de carbono. A velocidade de carbonatação das amostras diminuiu com o passar do tempo. O concreto permeável é composto por grandes regiões de vazios que possibilitaram que o gás carbono chegasse em mais grãos de seixo cobertos por pasta de cimento. Amostras com maiores valores para os parâmetros de coeficiente de permeabilidade, porosidade efetiva e porosidade total, apresentam maior captura de carbono.

O ensaio acelerado promoveu uma carbonatação mais rápida. As regiões carbonatadas do concreto permeável armazenado na câmara obtiveram zonas de carbonatações com delimitações mais precisas. A coloração da fenolftaleína apresentava limites mais definidos do que no ensaio em ambiente natural, o que facilitava a mensuração da região que carbonatou.

A resistência mecânica de tração na flexão do concreto permeável se mostrou adequada para a utilização do material para pavimentação drenante destinada a tráfego leve. As propriedades hídricas das placas permeáveis produzidas apresentaram permeabilidade satisfatória acima dos valores normativos para pavimentos drenantes.

A utilização de duas faixas granulométricas distintas na composição do esqueleto granular do material garantiu a formação de vazios interconectados, uma característica fundamental para o funcionamento de um sistema drenante. O seixo rolado foi uma escolha viável e se mostra como uma opção de agregado que pode ser utilizado para a produção de placas permeáveis.

Sugestões para próximas pesquisas

O tema sobre a captura de carbono se mostra atual e ainda existe um campo muito vasto para realizar pesquisas nesta área de interesse. Analisar a captura de carbono representa a busca de um maior entendimento de mais uma característica relacionada aos materiais cimentícios. Para prosseguir as pesquisas é possível realizar estudos em argamassas e concretos, variando o tipo de cimento utilizado na produção dos elementos produzidos com materiais cimentícios. Pode-se buscar uma melhor compreensão sobre como o tipo de cimento pode influenciar a velocidade das reações de carbonatação na superfície exposta do concreto ao dióxido de carbono.

Outra vertente de análise é comparar resultados de captura de carbono quando se utilizar diferentes adições minerais para aferir se ocorre influência nos valores de carbono reabsorvido. Esta abordagem atua em um aspecto ambiental pois a utilização de adições minerais em substituição parcial do cimento, diminui a quantidade utilizada do aglomerante, sendo possível analisar o balanço de carbono do concreto.

Quanto ao concreto permeável, uma sugestão de pesquisa é sua produção contendo aditivos químicos que visem a redução do consumo de cimento na produção do material. A pesquisa sobre captura de carbono ainda pode envolver outros aspectos sobre elementos cimentícios visando um maior entendimento desta área de interesse.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. ACI 522R-10: *Report on Pervious Concrete*. Farmington Hills, 2010. ISBN 978-087031-364-6

_____. NBR NM 51: *Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”*. 6 p. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM 248: *Agregados – Determinação da composição granulométrica*. 6 p. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 7809: *Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro*. 3 p. Rio de Janeiro, 2019.

_____. NBR NM 45: *Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. 8 p. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR 7211: *Agregados para concreto - Especificação*. 9 p. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 53: *Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. 8 p. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 9781: *Peças de concreto para pavimentação — Especificação e métodos de ensaio*. 21 p. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 12142: *Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos*. 5 p. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 16416: *Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos*. 25 p. Rio de Janeiro, 2015.

Anastasiou, E.K., Liapis, A., Papachristoforou, M., 2017. Life Cycle Assessment of concrete products for special applications containing EAF slag. *Procedia Envi-ron. sci.* 38, 469 -476. 2017.

Andrade, T., Helene. P.; *Materiais de Construção civil e Principios de Ciência e Engenharia de Materiais – Volume 2*. Capítulo 29. Editor Geraldo C. Isaia. 2ª Edição. 1772 páginas. IBRACON. São Paulo. 2010.

Andrade, C.; Sanjuán, M. Á. *Updating Carbon Storage Capacity of Spanish Cements*. *Sustainability*, v. 10, n. 11, 2018.

AMAP– Arctic Monitoring and Assessment Programme. *Climate Change In the Arctic - A Hot Topic! SWIPA 2011: Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic*. 20 p. 2011.

AMAP - Arctic Monitoring and Assessment Programme. *Arctic Climate Change Update 2019 An Update To Key Findings Of Snow, Water, Ice And Permafrost In The Arctic (Swipa) 2017*. 12 p. 2019.

Ashraf, W.; *Carbonation of cement - based materials: Challenges and opportunities*. Construction and Building Materials, nº 120, p 558 - 570. 2016.

Balbo, J. T.; *Pavimentos de Concreto*. São Paulo. Editora Oficina de Textos. 472 p. 2009.

Batezini, R. *Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves*. 133 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia e Transportes, São Paulo, 2013.

Bechara, L. *Concreto Poroso Como Revestimento De Pavimento Permeável: Alternativa De Drenagem Urbana Não Estrutural À Região Metropolitana De Belém*. 117 P. Dissertação (Mestrado) – UFPA, Instituto De Tecnologia, Programa De Pós-Graduação Em Arquitetura E Urbanismo, Belém, 2017.

Bertolini, L.; *Materiais de Construção – Patologia, reabilitação e Prevenção*. São Paulo. Oficina de Textos, 414 p. 2010.

Bertos, M. F., Simons, S. J. R., Hills, C. D., Carey, P. J.; *A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂*. Journal of Hazardous Materials. nº112, p 193–205. 2004.

Braga, N. T. S.; *Concretos permeáveis na Amazônia: Desafios e potencialidades regionais*. Dissertação de Mestrado. PPGAU/UFPA, Belém, 2019.

Branko Š, Mladena L. *Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities*. Construction and Building Materials nº 117, p 285–301. 2016.

Buttha, A; Hasanah, N; Farhayu, N; Hussin, M; Tahir, M; Mirza, J. *Properties Of Porous Concrete From Waste Crushed Concrete*. In Construction And Building Materials. nº 47, p 1243-1248. 2013.

Canholi, P. A.; *Drenagem Urbana e Controle de Enchentes*. 2ª edição. São Paulo. Oficina de Textos. 384 p. 2014.

Castellote, M., Fernandez, L., Andrade, C., Alonso, C., *Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations*. Materials and Structures, V. 42, P. 515-525, 2009.

Castro, J.; Solminihac, H.; Videla, C.; Fernandez, B. Estudio De Dosificaciones En Laboratorio Para Pavimentos Porosos De Hormigón. Revista Ingeniería De Construcción Vol. 24 N°3, 2009.

Castro, A. L.; Santos, R. F. C.; Gonçalves, K. M.; Quarcioni, V. A.; *Characterization of blended cements with red clay industry waste (Caracterização de cimentos compostos com resíduo da indústria de cerâmica vermelha)*. Cerâmica vol.63 no.365 São Paulo Jan./Mar. 2017.

Chandrappa, A. K.; Biligiri, K. P.; *Pervious Concrete as a Sustainable Pavement Material – Research Findings and Future Prospects: A State of The Art Review*. Construction and Building Materials, Volume 111, P. 262 - 274, 2016.

Chindapraist, P.; Hatanaka, S.; Chareerat, T.; Mishima, N.; Yuasa, Y. Cement paste characteristics and porous concrete properties. Revista Construction and Building Materials. Vol. 22, p. 894-901, 2008.

Chang, C.F., Chen, J.-W. *The experimental investigation of concrete carbonation depth*, Cem. Concr. Res. 36 p. 1760–1767, 2006.

Cosic, K.; Korat, L.; Ducman, V.; Netinger, I. Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. Revista Construction and Building Materials. Vol. 78, p. 69-76, 2015.

De Larrard, F.; *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*. Modern Concrete Technology Series, volume 9, E & F. N. SPON, London, 421 p., 1999.

Flower, W; Burian, S; Pomeroy, C; Pardyjac, E. *Surface Temperature And Heat Exchange Differences Between Pervious Concrete And Traditional Concrete And Asphalt Pavements*. Low Impact Development: Redefining Water In The City. Asce. P. 1417 – 1430. 2010.

Galan, I; Andrade, C; Mora, P; Sanjuan, M. *Sequestration Of Co2 By Concrete Carbonation*. Environmental Science & Technology, P. 3181–3186, 2010.

Gonzalez, E. R. S.; *Incentivos econômicos e projeto de supply chain para captura e sequestro de carbono: caso Brasil*. Production, v. 24, n. 4, p. 847-860, oct./dec. 2014.

Hartmann, d. L.; *Global Physical Climatology*. 2nd Edition Elsevier Science. 2015.

Haselbach, L; Alam, A. *Carbon Sequestration In Old And New Portland Cement Concrete Pavement Interiors*. Innovative Materials And Design For Sustainable Transportation Infrastructure. P. 71-82. 2015.

Haselbach, L; Thomas, A. *Carbon Sequestration In Concrete Sidewalk Samples*. Construction And Building Materials 54, P. 47–52. 2014.

Imagem J. An open platform for scientific image analysis. No endereço eletrônico <https://imagej.net/Welcome>. Acessado em 20/10/2019.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. No endereço eletrônico <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acessado em 25/05/2019.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. No endereço eletrônico <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos>. Acessado em 23/09/2019.

IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Change. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis - Summary For Policymakers*". Intergovernmental Panel On Climate Change, Geneva, 2013.

IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Change. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution Of Working Groups I, Ii And Iii To The Fifth Assessment Report Of The Intergovernmental Panel On Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri And L.A. Meyer (Eds.)]. Ippcc, Geneva, Switzerland, 151 P. 2014.

IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Change. *Global Warming 1.5°C Special Report*. Geneva, 2018.

Jacobsen, S., Jahren, P. *Binding of co2 by carbonation of norwegian opc concrete*. Canmet/aci international conference on sustainability and concrete technology, lyon, 2002.

Jang, J; Kim, G; Kim, H; Lee, H. *Review On Recent Advances In Co2 Utilization And Sequestration Technologies In Cement-Based Materials*. Construction And Building Materials 127, P.762–773. 2016.

Klunk, M. A.; *Sequestro de CO2 sob a forma mineral: precipitação de carbonato de magnésio*. Dissertação de Mestrado, 67 p., Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, 2009.

Kulakowski, M. P. *Contribuição ao Estudo da Carbonatação em Concretos e Argamassas Compostos com Adição de Sílica Ativa*. 199 p. Porto Alegre. Tese de Doutorado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

Lackner, S. K., *A Guide to CO2 Sequestration*. Science vol 300, 13 june, 2003, p 1677- 1678. 2003.

Laporte Ambrozewicz, P. H.; *Materiais de Construção – Normas, Especificações, Aplicação e Ensaios de Laboratório*. 1ª Edição, Editora Pini, São Paulo, 2012.

Kim, H. K.; Lee, H. K.; *Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete*. Applied Acoustics 71 p. 607–615. 2010.

Lima, J. *Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas*, São Paulo: Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, EPUSP, 2010.

Mariano, H.; *Influência do Teor de Argamassa e da Granulometria da Brita na Permeabilidade e nas Resistências à Compressão e à Abrasão de Concretos Permeáveis*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 163 p., Goiânia, 2014.

Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades E Materiais*. São Paulo: Ibracon. 674 P. 2008.

MCTIC - Ministério Da Ciência, Tecnologia, Inovações E Comunicações, *Estimativas Anuais De Emissões De Gases De Efeito Estufa No Brasil*. 4º Edição. 90 P. 2017.

Monteiro, A. *Concreto Poroso: dosagem e desempenho*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Federal de 36p., Goiás, Goiânia, 2010.

Neville, A. M., Brooks, J. J.; *Tecnologia do Concreto*. 2º Edição. Porto Alegre. Editora Bookman, 448 p. 2013.

Neville, A. M. *Propriedades Do Concreto*. 5ª Edição. Porto Alegre. Editora Bookman, 888p. 2016.

Ollivier, J. P., Vichot, A. *Durabilidade do Concreto – Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. Tradução: Oswaldo Cascudo e Helena Carasek. 606 p. IBRACON. 2014.

ONU - Organização das Nações Unidas. Encontrado no endereço Eletrônico <https://nacoesunidas.org/conferencia-de-sendai-adota-novo-marco-para-reduzir-riscos-de-desastres-naturais-no-mundo/> 1p. 2015. Endereço eletrônico acessado em 24 / 07 / 2019.

ONU - Organização das Nações Unidas. Encontrado no endereço eletrônico <https://nacoesunidas.org/cop21/> . 1 página. 2015. endereço eletrônico acessado em 10/03/2019.

PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. 2018. *Potência Ambiental da Biodiversidade: um caminho inovador para o Brasil*. [Scarano, F.R., Santos, A.S., Ribeiro, S.K., Nobre, C.A., Marengo, J.A., Ometo, J.P., Ceotto, P., Loyola, R., Pires, A.P.F., Ribeiro, J.B., Carneiro, B.L.R.(Eds)]. Relatório Especial do PBMC e da Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos, 1ª ed. PBMC/COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro. 62p. 2018.

PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. *Mudanças Climáticas e Cidades*. [Ribeiro, S.K., Santos, A.S. (Eds.)]. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. PBMC, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 116p. 2017.

PBMC - Painel Brasileiro De Mudanças Climáticas. *Base Científica Das Mudanças Climáticas - Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao 1º Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas*. [Ambrizzi, T., Araújo, M. (Eds.)]. PBMC, COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil 111 p. 2016.

Pauletti C.; *Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição*. Tese de Doutorado em Engenharia - Escola de Engenharia, Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 285 p. Porto Alegre, 2009.

Pade, C., Guimaraes, M.; *The Co2 Uptake Of Concrete In A 100 Years Perspective*. Cement And Concrete Research. Páginas 1384 – 1356, 2007.

Papadakis, V. G.; Vayenas, C.G.; Fardis, M. N.; *A Reaction Engineering Approach to the Problem of Concrete Carbonation*. AICHE Journal, vº 35, nº 10, p. 1639 – 1650. 1989.

Possan, E.; Felix. E. F. C. *Balanço das emissões e da captura de CO2 em estruturas de concreto: simulação em função do consumo e tipo de cimento*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, Volume 11, Número 7, P. 135-162, 2018.

Possan, E.; Fogaça, J.; Pazuch, C. *Sequestro De Co2 devido À Carbonatação Do Concreto: Potencialidades Da Barragem De Itaipu*. Revista De Estudos Ambientais, Volume 14, Número 2, Páginas 28 - 38, 2012.

Possan, E., *Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado*. Dissertação de mestrado,

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 153p, Porto Alegre, 2004.

Ribeiro, J. M.; Silva, T. S. M., *Pavimentos de concretos permeáveis: A otimização da relação água/cimento*. Trabalho de conclusão de curso em engenharia civil, 19 p., Faculdade de Engenharia Civil / UFPA. Belém, 2018.

Saadeh, S., Ralla, A., Al-Zubi, Y., Wu, R., Harvey, J.; *Application of fully permeable pavements as a sustainable approach for mitigation of stormwater runoff*. International Journal of Transportation Science and Technology. 2019.

Sales, A., Tutikian, B. F., Souza, C. A. C., Almeida, F. C. R., Cunha, M. P. T., Lourenço, M. Z., Cascudo, O., Helene, P.; *Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto – Teoria, Controle, e Técnicas de Análise e Intervenção*. 2ª Edição. 370 páginas. Editora Elsevier / GEN / LTC. 2018.

Silva, V. M.; *Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida*. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos – SP, 306 páginas. 2007.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. *Relatório Anual*. Rio de Janeiro, 2013.

SNIC - Sindicato Nacional Da Industria Do Cimento. *Produção Nacional De Cimento Por Regiões E Estados Em Toneladas*. Encontrado no endereço eletrônico [Http://Snic.Org.Br/Assets/Pdf/Numeros/1544725873.Pdf](http://Snic.Org.Br/Assets/Pdf/Numeros/1544725873.Pdf). 1p. Página acessada em 20/01/2019.

Suzuki, C. Y.; Azevedo, A. M.; Kabbach Junior, F. I.; *Drenagem superficial de pavimentos – Conceitos e dimensionamento*. Editora Oficina de Textos. São Paulo, 2013.

Tashima, M. M.; Fioriti, C. F.; Akasaki, J. L.; Bernabeu, J. P.; Sousa, L. C., Melges, J. L. P.; *Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 151-163, abr./jun. 2012.

Tennis, P. D.; Leming, M. L.; Akers, D. J. *Pervious Concrete Pavements*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, And National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA, 36 P. 2004.

Tominaga, E. *Urbanização e cheias: medidas de controle na fonte*. Dissertação de Mestrado em Engenharia, USP, 137 p., São Paulo, 2013.

Torres, A.; Hu, J.; Ramos, A. *The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete*. Revista Construction and Building Materials. Vol. 95, p. 850-859, 2015.

Virgiliis, A. L. C. *Procedimentos De Projeto E Execução De Pavimentos Permeáveis Visando Retenção E Amortecimento De Picos De Cheias*. Dissertação De Mestrado Apresentada À Escola Politécnica Da Universidade De São Paulo, São Paulo, 2009.

Volder, T. Watson, B. Viswanathan, *Potential Use Of Pervious Concrete Formaintaining Existing Mature Trees During And After Urban Development*. Urban Greening 8, P. 249–256. 2009.

Xi, F; Ciais, P; Davis, S. J; Crawford-Brown, D. *Substantial global carbon uptake by cement carbonation*. Nature Geoscience, Novembro 2016.

Xie, N., Akin, M., Shi., X.; *Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability*. Journal of Cleaner Production, número 210 (2019), páginas 1605 – 1621. 2019.

XU, G.; SHEN, W.; HUO, X.; YANG, Z.; WANG, J.; ZHANG, W.; JI, X. Investigation on the properties of porous concrete as road base material. Revista Construction and Building Materials. Vol 158, p. 141-148, 2018.

Yang, J., Jiang, G.; *Experimental Study On Properties Of Pervious Concrete Pavement Materials*, Cement And Concrete Research, V33, Iss3, pg 381-386. 2003.

Zampieri,V.A., *Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas*. Dissertação de Mestrado, 191 p., USP, São Paulo, 1989.

ZHENG, M. Physical and mechanical performance of porous concrete for drainage base. Tese de Pós-Doutorado. China, 2004.

Zhong, R., Leng Z., Poon, C.; *Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review*. Construction and Building Materials, número 183 (2018), páginas 544 – 553, 2018.