

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM ESTRUTURAS E*
CONSTRUÇÃO CIVIL

CAPTURE DE CO₂ EM PEÇAS DE CONCRETO PARA
PAVIMENTAÇÃO ATRAVÉS DA CURA POR CARBONATAÇÃO
ACELERADA

Lívia Regueira Fortunato Benitez

São Carlos

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

CAPTURA DE CO₂ EM PEÇAS DE CONCRETO PARA
PAVIMENTAÇÃO ATRAVÉS DA CURA POR CARBONATAÇÃO
ACCELERADA

Lívia Regueira Fortunato Benitez

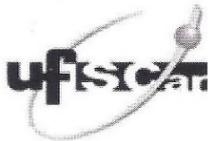
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos para a obtenção do Título de Mestre em Estruturas e Construção Civil.

Área de Concentração: Sistemas
Construtivos

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Aris
Parsekian

Co-orientador: Prof. D.Sc. Alex Neves
Junior

São Carlos
2019

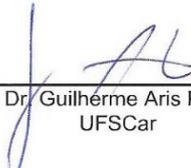


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

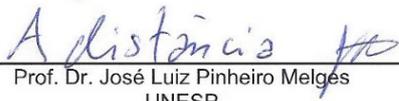
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Livia Regueira Fortunato Benitez, realizada em 28/02/2019:



Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian
UFSCar



Prof. Dr. José Luiz Pinheiro Melges
UNESP



Prof. Dr. Bruno Luis Damineli
USP

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) José Luiz Pinheiro Melges, Bruno Luis Damineli e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ao) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.



Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian

*Aos meus pais e esposo,
meus maiores incentivadores.*

AGRADECIMENTOS

A minha gratidão é toda e primeiramente à Deus, mentor de todas as coisas, responsável por tornar realidade mais essa importante etapa em minha vida.

Aos meus pais, Pedro e Maria da Graça, por acreditarem em mim, por sempre me incentivarem a buscar conhecimento, e por terem me ensinado, por meio de seus exemplos, que um sonho realizado é consequência de muita dedicação. Obrigada por serem meu porto seguro, amo-os incondicionalmente.

De forma especial ao Leandro, meu esposo, que viveu comigo cada momento deste desafio, sempre me ajudando, incentivando e fortalecendo nos momentos difíceis. Seu apoio foi fundamental em muitas etapas deste trabalho. Obrigada, meu amor, por ser sempre minha melhor companhia.

A todos os demais familiares que oraram e torceram por mim, obrigada pelo apoio.

Ao meu orientador professor Guilherme Aris Parsekian pela oportunidade de trabalharmos juntos no Mestrado, pela parceria frente aos desafios, pela confiança na minha capacidade em realizar um trabalho com um tema tão atual e relevante e, pelo intermédio com a Associação Brasileira de Cimento Portland e com a fábrica parceira da pesquisa. Obrigada, Prof. Guilherme, pela amizade, por ter me acolhido na sua casa junto a sua querida família, pelo apoio e disponibilidade.

Agradeço ao meu coorientador professor Alex Neves Júnior por contribuir expressivamente com este trabalho, pela competência e dedicação ao me coorientar. Obrigada pela amizade, confiança, pelas inúmeras reuniões e principalmente pela tranquilidade a mim transmitidas durante todo o processo.

À Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) pela parceria e confiança em aceitar o desafio proposto por esta pesquisa, por disponibilizar a câmara de carbonatação e permitir que os ensaios de absorção de CO₂ e avaliação das peças produzidas fossem realizados em seus laboratórios. Em especial, agradeço ao Arnaldo Forti Battagin e Cláudio Silva pela oportunidade, ao Eng. Flávio Munhoz e Dayvid Guedes, e aos técnicos laboratoriais Maurício, Henrique, Cícero, Rubens e Marcelo por todo cuidado, respeito e comprometimento com o meu trabalho.

À GLASSER Pisos e Pré-moldados Ltda. pela importante e fundamental contribuição ao produzir e disponibilizar as peças de concreto para pavimentação objeto de estudo desta pesquisa. Em especial, agradeço ao Eduardo Lima e Luciano Lima, por toda disponibilidade e pelas informações cedidas.

Agradeço aos membros da banca de qualificação e defesa desta dissertação, por se disporem a discutir o trabalho em profundidade, este auxílio foi de fundamental importância.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, agradeço pelo apoio e troca de conhecimento, o caminho foi mais leve com vocês.

Aos demais amigos que trago da infância, da faculdade, da obra. Obrigada por estarem presentes, mesmo que distantes, e por trazerem mais alegria à minha vida.

Ao Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos (PPGECiv/UFSCar) por todo o suporte durante o mestrado.

A todos, que direta ou indiretamente, contribuíram com a elaboração deste trabalho.

*“A menos que modifiquemos a nossa
maneira de pensar, não seremos capazes de
resolver os problemas causados pela forma
como nos acostumamos a ver o mundo”.*

(Albert Einstein)

RESUMO

FORTUNATO, Livia R. **Captura de CO₂ em peças de concreto para pavimentação através da cura por carbonatação acelerada.** Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

O setor da construção civil se destaca como responsável pela emissão de um terço do total de gases de efeito estufa emitidos pela humanidade. Os processos de extração e fabricação das matérias primas necessárias para a obtenção do concreto emitem grandes quantidades de CO₂ ao meio ambiente. Entretanto, diversas pesquisas têm mostrado que materiais à base de cimento Portland possuem a capacidade de armazenar permanentemente CO₂ em sua matriz cimentícia sob a forma estável de carbonato de cálcio (CaCO₃), através da cura por carbonatação acelerada. Na reação de carbonatação, o gás carbônico (CO₂) reage principalmente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) e com os silicatos de cálcio hidratados (C – S – H), gerando o CaCO₃, que se precipita mineralogicamente como calcita, vaterita e aragonita. A literatura mostra que a precipitação de CaCO₃ nos poros do material cimentício altera a porosidade, aumenta a densidade e promove a melhora das propriedades físicas e mecânicas do material, além de contribuir com o meio ambiente ao incorporar definitivamente o CO₂. Essa tecnologia tem sido aplicada em componentes de concreto sem reforço de aço, tais como blocos de concreto de alvenaria estrutural e não estrutural, telhas, placas, entre outros, havendo pouco estudo relacionado às peças de concreto para pavimentação. Face ao exposto, a presente pesquisa objetivou verificar, analisar e medir a captura de gás carbônico (CO₂) em peças de concreto para pavimentação após o processo de cura por carbonatação acelerada; verificar a aplicabilidade do procedimento experimental referente ao Método de Ganho de Massa utilizado para obtenção do valor da absorção de CO₂; averiguar se houve melhoria nas propriedades físicas e mecânicas das peças de concreto para pavimentação (PCPs) carbonatadas. Para isso, algumas peças produzidas em escala industrial foram submetidas preliminarmente a 12 horas de cura inicial à vapor e 12 horas sem cura inicial à vapor, com posterior cura por carbonatação acelerada durante 4 e 16 horas; esta ocorreu em câmara de carbonatação configurada com 20% de concentração de CO₂, 23°C e 65% de umidade relativa. Posteriormente, a absorção de CO₂ foi quantificada pelo Método do Ganho de Massa e verificada através da aspersão do indicador ácido-base fenolftaleína. As propriedades físicas e mecânicas foram aferidas aos 02 e 28 dias, por meio dos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à abrasão e absorção de água. Os resultados obtidos indicaram que o Método do Ganho de Massa é viável para a obtenção do percentual de absorção de CO₂; todas as mostras submetidas à cura por carbonatação acelerada capturaram CO₂, a maior absorção encontrada foi de 5,1% para as PCPs submetidas à 12 horas sem cura inicial à vapor com posterior 16 horas de carbonatação; além disso comprovou-se o ganho de resistência à compressão nas peças carbonatadas, uma vez que estas aos 02 dias apresentaram resistência à compressão axial de 40,7 MPa e 39,7MPa, em detrimento das PCPs referenciais (não carbonatadas) que apresentaram 37,2 MPa, e aos 28 dias os melhores resultados foram verificados novamente para as PCPs carbonatadas (46,4MPa) em detrimento das PCPs referenciais (40,7MPa); quanto à resistência à abrasão e absorção de água, as PCPs carbonatadas e referenciais não apresentaram diferença significativa. Portanto, concluiu-se que o procedimento de cura por carbonatação acelerada além do ganho ambiental relacionado a captura de CO₂, pode facilitar a gestão na indústria uma vez que as amostras carbonatadas apresentaram elevada resistência à compressão logo nas primeiras idades.

Palavras-chave: absorção de CO₂, cura, carbonatação acelerada, peças de concreto para pavimentação, resistência, concreto.

ABSTRACT

FORTUNATO, Lívia R. **CO₂ capture in concrete units for pavement through accelerated carbonation cure.** Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

The construction sector stands out as responsible for the emission by third of the total greenhouse gases emitted by mankind. The processes of extraction and manufacture of the raw materials, necessary to obtain the concrete, emit large amounts of CO₂ to the environment. However, several researches have shown that Portland cement based materials have the capacity to permanently store CO₂ in the cement matrix in the form of stable calcium carbonate (CaCO₃), through accelerated carbonation curing. In the carbonation reaction the carbon dioxide (CO₂) reacts mainly with the calcium hydroxide (Ca(OH)₂) and the hydrated calcium silicates (C - S - H), generating CaCO₃, which precipitates mineralogically as calcite, vaterita and aragonite. The literature shows that the precipitation of CaCO₃ in the pores of the cementitious material alters the porosity, increases the density and promotes the improvement of the physical and mechanical properties of the material, besides contributing to the environment by definitively incorporating CO₂. This technology has been applied in non-reinforced steel components, such as concrete structural and non-structural masonry blocks, tiles, boards, among others; with a lack of studies related to the concrete units for pavement. Aforesaid, the present research aimed to verify, to analyze and to measure the capture of carbon dioxide (CO₂) in concrete units for pavement after the accelerated carbonation curing process; to verify the applicability of the experimental procedure related to the Mass Gain Method used to obtain the value of CO₂ absorption; if there was an improvement in the physical and mechanical properties of carbonated concrete units for pavement (PCPs) regarding those one made up by conventional process. To do this, some specimens, produced in an industrial scale, were preliminarily submitted to 12 hours of initial steam cure and 12 hours without initial steam cure, followed by accelerated carbonation curing for 4 and 16 hours, this occurred in a carbonation chamber set up with 20 % CO₂ concentration, 23°C and 65% relative humidity. subsequently, the absorption of CO₂ was measured by the Mass Gain Method and checked out by sprinkling the acid-base indicator phenolphthalein; and the mechanical properties were measured at 02 and 28 days, by compressive tests, abrasion resistance test and water absorption test. The results indicated that the Mass Gain Method is feasible to obtain the percentage of the CO₂ absorption; all the samples submitted to accelerated carbonation treatment captured CO₂, the highest absorption found was 5.1% for the PCPs submitted to 12 hours without initial steam cure with a subsequent 16 hours of carbonation; in addition, the compressive strength gain in the carbonated samples was verified, and at the 02 days this presented better resistance to the axial compression of 40.7 MPa, to the detriment of the reference PCPs (non-carbonated) that presented 37,2 MPa; and at 28 days the best results were again verified for the carbonated PCPs (46.4MPa) in detriment to the reference PCPs (40.7MPa); as for abrasion resistance and water absorption, the carbonated and reference PCPs did not present a significant difference. Therefore, it was concluded that the accelerated carbonation cure procedure in addition to the environmental improvement regarding the CO₂ capture, promotes the speed up of the PCP manufacturing, since the carbonated samples presented high compressive strength at early ages.

Key-words: CO₂ absorption, curing, accelerated carbonation, concrete units for pavement, strength, concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Tanque para armazenamento de CO ₂ capturado.....	25
Figura 2.1 – O mecanismo do efeito estufa.....	30
Figura 2.2– Concentração global de CO ₂ na atmosfera no decorrer dos anos.....	30
Figura 2.3 – Médias das emissões de CO ₂ / ton clínquer: a) separadas por tipo de forno e por ano; b) média mundial.....	34
Figura 2.4 – Diferentes formas de assentamento das PCPs.....	36
Figura 2.5 – Aplicação das PCPs em diferentes estados brasileiros.....	37
Figura 2.6 - Peças pré-moldadas de concreto em diversos formatos e tonalidades.....	38
Figura 2.7– Comportamento do intertravamento frente aos deslocamentos vertical, rotação e horizontal, respectivamente.....	38
Figura 2.8 – Diferentes formatos das PCPs.....	39
Figura 2.9 - Formato das PCPs: a) Tipo I; b) Tipo II; c) Tipo III, d) Tipo IV.....	40
Figura 2.10 – Tipos de assentamento das PCPs: a) Fileira; b) Reto; c) Espinha de Peixe ou inclinado; d) Trama.....	41
Figura 2.11 - Efeito da espessura das peças de concreto no desempenho do pavimento sob solicitação do tráfego.....	42
Figura 2.12 - Partes constituintes de uma vibroprensa.....	44
Figura 2.13 - Mecanismo de funcionamento da gaveta: a) gaveta recuada; b) gaveta sobre a fôrma.....	45
Figura 2.14- Sistema de compressão (Pistão atuando como aplicador de carga)	46

Figura 2.15 - Forma para produção de PCP.....	47
Figura 2.16- Detalhe do sistema de mesa vibratória.....	47
Figura 2.17 – Detalhe de um sistema de vibração produzido por excêntricos fixados nas laterais da fôrma.....	48
Figura 2.18 – Detalhe de um sistema de vibração produzido por excêntricos sob a fôrma.....	48
Figura 2.19 – Detalhe de um sistema de vibração produzido por biela-virabrequim.....	49
Figura 2.20 – Posicionamento da forma e avanço da gaveta.....	49
Figura 2.21 – Vibro – alimentação da forma.....	50
Figura 2.22 – Retorno da gaveta a posição inicial.....	50
Figura 2.23– Etapa de Vibro – compressão.....	51
Figura 2.24– Subida da forma concomitantemente à subida da sapata e liberação das PCPs.....	51
Figura 2.25 – Resistência à compressão em função da relação água/cimento (a/c)	57
Figura 2.26 – Comportamento do Concreto em Relação a Adição de Água.....	58
Figura 2.27 - Relação de Resistência à compressão (MPa) e pressão de compactação de formação P_f (MPa) de amostras carbonatadas com diferentes relações a /c, sendo: (1) 0,14; (2) 0,12; (3) 0,1; (4) 0,08.....	67
Figura 2.28– Câmara de carbonatação - configuração de cura de carbonatação usando CO_2 recuperado pressurizado.....	70
Figura 2.29– Método da Curva de Massa.....	72

Figura 2.30 – Curva de Massa para 4hs de carbonatação.....	79
Figura 2.31 – Curva de Massa para 4 dias de carbonatação.....	79
Figura 2.32 – Contribuição para redução das emissões de CO ₂ a partir de 2006 advindas da indústria do cimento de acordo com diferentes estratégias.....	80
Figura 2.33– Tecnologia de captura pós-combustão integrada à cimenteira.....	81
Figura 2.34 – Tecnologia de captura oxicorte integrada à indústria de cimento.....	82
Figura 3.1 – Etapas do programa experimental.....	87
Figura 3.2 – Fluxograma das diferentes condições de processos e tempos de cura; e ensaios aos quais as PCPs foram submetidas.....	89
Figura 3.3 - Fabricação das PCPs: a) vibroprensa; b) regularização após desforma; d) peças acabadas; d) remoção das PCPs; e) transporte das PCPs até câmara de cura à vapor; f) cura à vapor em câmara apropriada.....	94
Figura 3.4 – Peças de Concreto para pavimentação: a) Formato das PCPs; b) Especificação do lote.....	95
Figura 3.5 – Procedimento de ensaio pelo método do ganho de massa: a) b) c) revestimento da câmara; c) posicionamento das PCPs na câmara; d) identificação das PCPs; e) pesagem dos papéis absorventes; f) pesagem das PCPs.....	98
Figura 3.6 – Ensaio de Absorção de CO ₂ e verificação da frente de carbonatação.....	98
Figura 3.7 – Aplicação do indicador ácido-base fenolftaleína nas PCPs carbonatadas	99
Figura 3.8 – Ensaio de Caracterização das PCPs carbonatadas e referências.....	100
Figura 3.9 – Preparação das PCPs para os ensaios: a) identificação das amostras; b) imersão em água; c) pintura da superfície.....	101

Figura 3.10 - Ensaio de resistência à compressão axial: a) prensa; b) posição da peça durante o ensaio; c) peça rompida.....	102
Figura 3.11 - PCP com baixa resistência à abrasão.....	103
Figura 3.12 - Ensaio de resistência à abrasão: a) posicionamento da PCP; b) material abrasivo sendo lançado na interface entre disco e PCP c) desgaste após o ensaio.....	104
Figura 3.13– Pavimento intertravado em que as PCPs apresentam variação quanto a absorção de água.....	105
Figura 3.14 - Ensaio de absorção de água das PCPs: a) peças submersas; b) peças na estufa; c) pesagem das PCPs.....	106
Figura 3.15 – Modelo de tabela contendo resultados do ANOVA fornecido pelo Excel.....	107
Figura 3.16– Modelo da tabela do Teste de Tukey fornecida pelo Excel.....	108
Figura 4.1 – Absorção de CO ₂ em PCPs.....	111
Figura 4.2 – Verificação da frente de carbonatação após 04 e 16 hs de carbonatação	112
Figura 4.3 - Incremento de resistência à compressão.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Potencial anual de sequestro de CO ₂ em produtos de concreto feitos nos EUA e Canadá (SHAO et al 2010)	26
Tabela 2.1 – Estimativa de emissões de CO ₂	32
Tabela 2.2 – Variações nas emissões de CO ₂ referentes à produção do clínquer (Adaptado DAMINELI, 2013)	33
Tabela 2.3 – Valor aproximado de CO ₂ gerado por tonelada de cimento Portland (Adaptado FREITAS et al.,2010)	35
Tabela 2.4 – Requisitos exigidos pela ABNT NBR 9781:2013.....	52
Tabela 2.5 – Tipos e composições dos cimentos fabricados no Brasil (FERNANDES, 2011)	53
Tabela 2.6 –Absorção de CO ₂ em pavers submetidos a cura por carbonatação (SHAO e LIN (2011)	74
Tabela 2.7 – Resistência à compressão de pavers submetidos a cura por carbonatação (SHAO e LIN (2011)	74
Tabela 2.8 –Absorção de CO ₂ em blocos de concreto (m ³ /m ³) (B. ZHAN et al.,2013)	75
Tabela 2.9 – Absorção de CO ₂ (%) em concretos carbonatados (EL-HASSAN e SHAO, 2013)	76
Tabela 2.10– Condições de cura das amostras de concreto (BOYD et al, 2012)	77
Tabela 2.11 – Resultados dos ensaios amostras de concreto (BOYD et al (2012)	77
Tabela 2.12 - Comparação da absorção de CO ₂ por três métodos (EL-HASSAN et al, 2013)	78

Tabela 2.13 - Comparação da captura de CO ₂ através dos processos pós-combustão e Oxicorte na indústria cimenteira (Adpatado de Li et al., 2013)	82
Tabela 3.1 - Propriedades químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado.....	90
Tabela 3.2 - Traço efetivamente empregado (Glasser, 2018)	92
Tabela 3.3 – Combinações para o Teste de Tukey.....	108
Tabela 4.1 – Resultados de absorção de CO ₂ pelo Método do Ganho de Massa para 04 hs de cura por carbonatação.....	109
Tabela 4.2 – Resultados de absorção de CO ₂ pelo Método do Ganho de Massa para 16 hs de cura por carbonatação.....	109
Tabela 4.3 - ANOVA para absorção de CO ₂ durante 04 horas de carbonatação.....	111
Tabela 4.4 - ANOVA para absorção de CO ₂ durante 16 horas de carbonatação	111
Tabela 4.5 - Verificação da frente de carbonatação após 04 e 16 hs de cura por carbonatação	113
Tabela 4.6 - Ensaio de resistência à compressão axial aos 02 dias.....	113
Tabela 4.7 - ANOVA para resistência à compressão axial aos 02 dias.....	114
Tabela 4.8 - Teste de Tukey para resistência à compressão aos 02 dias.....	114
Tabela 4.9 - Ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias.....	115
Tabela 4.10 - ANOVA para resistência à compressão axial aos 28 dias.....	116
Tabela 4.11 - Teste de Tukey para resistência à compressão aos 28 dias.....	116
Tabela 4.12 - Ensaio de resistência à abrasão aos 02 dias.....	118

Tabela 4.13 - Ensaio de resistência à abrasão aos 28 dias.....	118
Tabela 4.14 - ANOVA para resistência à abrasão aos 02 dias.....	119
Tabela 4.15 - ANOVA para resistência à abrasão aos 28 dias.....	119
Tabela 4.16 - Ensaio de absorção de água aos 02 dias.....	119
Tabela 4.17 - Ensaio de absorção de água aos 28 dias.....	120
Tabela 4.18 - ANOVA para absorção de água aos 02 dias.....	120
Tabela 4.19 - ANOVA para absorção de água aos 28 dias.....	120

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ARI - Alta resistência inicial

CaCO₃ – Carbonato de Cálcio

CaO – Óxido de cálcio

Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio

CFCs - Clorofluorcarbonos

CH₄ - Metano

CO₂ – Dióxido de carbono ou gás carbônico

CP – Cimento Portland

(C – S – H) - Silicato de cálcio hidratado

CSI - Iniciativa para a Sustentabilidade do Cimento

EDGAR - Dados de Emissões para Pesquisa Atmosférica Global

EPB - Placas de cimento de poliestireno expandido

f_{pi} – Resistência à compressão individual da peça de concreto para pavimentação

GEE – Gases de efeito estufa

H₂CO₃ – Ácido carbônico

HFC– Hidrofluorcarbonos

IEA - Agência Internacional de Energia

IFBQ - Instituto Falcão Bauer da Qualidade

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

ISO – Internacional Organization for standardization

KOH – Hidróxido de Potássio

Mg(OH)₂ – Hidróxido de magnésio

NASA - Agência do Governo Federal dos Estados Unidos

NaOH – Hidróxido de sódio

NBR - Norma Brasileira

N₂O - Óxido nitroso

PBQP- Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade

PFC – Perfluorcarbonos

PNMC - Política Nacional sobre a Mudança do Clima

SF₆ - Hexafluoreto de enxofre

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

TG - Termogravimetria

PCP - Peça de concreto para pavimentação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	22
1.1 OBJETIVOS	24
1.1.1 GERAL.....	24
1.1.2 ESPECÍFICOS	24
1.2 JUSTIFICATIVA	24
1.3 QUESTÕES DA PESQUISA.....	27
1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	28
2. REFERENCIAL TEÓRICO	29
2.1 EFEITO ESTUFA	29
2.1.1 O MECANISMO, REDUÇÃO DAS EMISSÕES E CONSEQUÊNCIAS.....	29
2.1.2 A CONSTRUÇÃO CIVIL E A EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA ...	31
2.2 PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO.....	35
2.2.1 BREVE HISTÓRICO.....	35
2.2.2 DEFINIÇÕES	37
2.2.3 VANTAGENS DAS PCPs	39
2.2.4 FORMATO DAS PCPs.....	39
2.2.5 FORMAS DE ASSENTAMENTO	41
2.2.6 ESPESSURA DAS PCPs	41
2.2.7 PROCESSO PRODUTIVO DAS PCPs	42
2.2.8 REQUISITOS E NORMALIZAÇÃO	51
2.3 CIMENTO, HIDRATAÇÃO E CONCRETOS.....	52
2.3.1 CIMENTO PORTLAND.....	52
2.3.2 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND	54
2.3.3 O CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND.....	55
2.3.4 O CONCRETO SECO	56
2.4 PROCESSO DE CURA.....	59

2.5 CURA POR CARBONATAÇÃO ACELERADA	60
2.5.1 REAÇÃO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA	61
2.5.2 FATORES QUE INFLUENCIAM O PROCESSO DE CARBONATAÇÃO	63
2.5.3 MÉTODOS DE CARBONATAÇÃO E SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS	68
2.5.4 VANTAGENS DA CURA DE CARBONATAÇÃO ACELERADA EM PRÉ- FABRICADOS CIMENTÍCIOS NÃO ARMADOS	68
2.5.5 MÉTODOS PARA QUANTIFICAR O CO ₂ CAPTURADO	69
2.5.6 ESTUDOS ENVOLVENDO O PROCESSO DE CURA POR CARBONATAÇÃO ACELERADA EM PRÉ-FABRICADOS CIMENTÍCIOS NÃO ARMADOS	73
2.5.7 CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CO ₂ NAS INDÚSTRIAS DE CIMENTO	80
2.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	85
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	87
3.1. MATERIAIS	90
3.2. DEFINIÇÃO TEÓRICA DOS PROCESSOS E TEMPOS DE CURA	92
3.2.1 CURA DAS PCPs CARBONATADAS	92
3.2.2 CURA PCPS NÃO CARBONATADAS (REFERENCIAIS)	93
3.3 FABRICAÇÃO DAS PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO	94
3.3.1 PROCESSO DE CURA INICIAL REALIZADO NA FÁBRICA	95
3.3.2 PROCESSO DE CURA POR CARBONATAÇÃO REALIZADO NA ABCP	96
3.4 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DAS PCPS QUANTO A ABSORÇÃO DE CO₂, OCORRÊNCIA DE CARBONATAÇÃO E GANHO DE RESISTÊNCIA	96
3.4.1 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE CO ₂ PELO MÉTODO DO GANHO DE MASSA	96
3.4.2 VERIFICAÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO	99
3.4.3 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS PEÇAS	99
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	106
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	109
4.1 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE CO₂ NAS PCPs	109

4.2 VERIFICAÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO COM FENOLFTALEÍNA.....	112
4.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO.....	113
4.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO	117
4.5 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	119
5. CONCLUSÕES.....	122
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
7. APÊNDICE.....	137
7.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (02 DIAS).....	137
7.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (28 DIAS).....	140
7.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO (02 DIAS)	143
7.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO (28 DIAS)	146
7.5 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA (02 DIAS)	149
7.1 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA (28 DIAS).....	152

1. INTRODUÇÃO

As alterações climáticas são motivo de preocupação para a população, governos e cientistas em todo o mundo. Recentemente, a NASA, Agência do Governo Federal dos Estados Unidos, responsável pela pesquisa e desenvolvimento de tecnologias e programas de exploração espacial, lançou ao espaço o satélite ICESat-2, cujo objetivo é medir, com elevada precisão, as alturas das camadas de gelo polar da Terra. Inicialmente, Groenlândia e Antártida serão monitoradas, uma vez que verificou-se o derretimento das geleiras e desprendimento das calotas polares nestas regiões (NASA, 2018). O degelo de geleiras e consequente elevação do nível dos mares são alguns dos efeitos desastrosos do aquecimento global, o qual se intensifica devido às crescentes emissões de gases de efeito estufa.

De acordo com a United Nations Framework Convention on Climate Change (2017), os gases do efeito estufa são compostos principalmente por dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), perfluorcarbonos (PFC), hidrofluorcarbonos (HFC), e hexafluoreto de enxofre (SF_6). Sabe-se que o efeito estufa é responsável por manter a Terra aquecida, pois atua evitando que os raios solares sejam refletidos para o espaço. O problema é causado pelo homem, que através de suas atividades, emite elevadas quantidades de gases de efeito estufa (GEE) à atmosfera acarretando o aumento do aquecimento global (BEIROZ, 2011).

Segundo o Banco de Dados de Emissões para Pesquisa Atmosférica Global (EDGAR), em 2016 as emissões mundiais de CO_2 ultrapassaram 32 bilhões de toneladas. Neste contexto, o setor da construção civil se destaca como responsável pela emissão de um terço do total de gases de efeito estufa emitidos pela humanidade (UNEP, 2007). Ocorre que o cimento Portland tradicional é composto basicamente por argila e calcário, e quando calcinados em elevadas temperaturas dão origem ao clínquer. Os grãos de clínquer são moídos com gipsita e dão origem ao cimento. Para se produzir 1.000 kg de clínquer gera-se de 900 a 1.000 kg de CO_2 , sendo que 50 a 60% destes são advindos da reação química de calcinação do calcário e 30 a 40% são oriundos da combustão de combustíveis fósseis no forno (FREITAS, et al, 2010).

Diante da enorme quantidade de GEEs emitidos à atmosfera, o IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) estabeleceu metas para a emissão de poluentes. Estas constituem um grande desafio, especialmente para a indústria cimenteira, uma vez que o rápido desenvolvimento de planos de ações visando a redução dos impactos gerados por sua cadeia produtiva torna-se extremamente urgente e necessário (FAIRBAIRN et al, 2010).

Visando reduzir a emissão de gases de efeito estufa os países industrializados e a Comunidade Europeia assinaram em 16 de fevereiro de 2005 o Protocolo de Quioto. Outro acordo global celebrado entre países desenvolvidos e em desenvolvimento com o mesmo objetivo, é o Acordo de Paris, o qual foi aprovado na COP 21 (Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015, realizada em Paris). Em ambos os acordos foram estipuladas metas de redução ou limitação das emissões dos GEEs (MMA, 2018).

Criado durante o protocolo de Quioto, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo regulamenta e permite a comercialização de “créditos de carbono” entre países, ou seja, por meio dele um país desenvolvido ou de economia em transição para o capitalismo pode comprar os referidos créditos de um país menos desenvolvido, criando-se assim um mercado mundial milionário, no qual o CO₂ vale muito dinheiro (MMA, 2018).

Devido a relevância do tema, a comunidade científica tem trabalhado intensamente no desenvolvimento de soluções para a redução do aquecimento global provocado pela emissão desenfreada de poluentes. Nessa conjuntura, a tecnologia do “Sequestro de Carbono” é de fundamental importância, uma vez que através desta, o CO₂, principal gás de efeito estufa, é retirado da atmosfera. É sabido que a absorção de dióxido de carbono ocorre naturalmente nas florestas através da fotossíntese, no ciclo carbonato-silicato e nos oceanos através de processos físico-químicos e biológicos. No entanto, existem outras estratégias aplicáveis para capturá-lo, tais como: a injeção do CO₂ em reservatórios geológicos e em poços de petróleo depletados (KASTING et al, 1993; PLASYNSKI, 2013).

Neste trabalho foi analisado a estratégia de absorção de CO₂ em pavimentos através da cura por carbonatação acelerada. É sabido que na referida reação química o gás carbônico penetra nos poros do concreto e reage com os hidróxidos alcalinos em solução, reduzindo o pH. O fenômeno da carbonatação não é perceptível a olho nu, não reduz a resistência do concreto e aumenta sua dureza superficial, sendo considerada positiva ao concreto, o problema é que em peças com reforço de aço, dependendo das condições de umidade do ambiente, esta reação promove a corrosão das armaduras, acarretando a longo prazo o aparecimento de manchas, fissuras, destacamento de pedaços de concreto e até a perda da seção resistente e da aderência entre concreto e armadura, ocasionando o colapso da estrutura de concreto armado ou de suas partes, sendo neste caso considerada deletéria (HELENE, 1997). Porém, quando se trata apenas do concreto, excluindo-se a armadura, a reação de carbonatação acelerada é considerada benéfica. Diversos autores dentre eles, Ye (2003), Shao et al. (2006), Galan et al. (2010), Wang et al. (2012), B. Zhan et al. (2013), Yuan et al. (2013), Jang et al (2016), Bertos et al. (2017), D. Zhang et al. (2017), realizaram a cura por carbonatação acelerada em pré-fabricados cimentícios não armados e verificaram que a carbonatação ao incorporar gás carbônico (CO₂) na matriz cimentícia sob a forma estável de

carbonato de cálcio (CaCO_3), promove ganhos ambientais relacionados à absorção permanente de CO_2 e ganho de resistência mecânica logo nas primeiras idades.

Através do estado da arte das pesquisas na área verificou-se que escassos são os estudos relacionados à cura por carbonatação acelerada em peças de concreto para pavimentação (PCPs), principalmente as produzidas industrialmente. Por esse motivo, resolveu-se trabalhar com o referido produto produzido em escala industrial, visando verificar e quantificar a absorção de CO_2 e comparar o ganho de resistência mecânica proporcionada pela cura por carbonatação acelerada com a cura convencionalmente realizada na fábrica. Portanto, a presente pesquisa teve por finalidade aproximar a teoria da prática e verificar a viabilidade de se adotar a tecnologia do Sequestro de CO_2 , através da cura por carbonatação acelerada, nas indústrias.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 GERAL

Este trabalho tem por objetivo geral verificar, analisar e medir a absorção de CO_2 através da cura por carbonatação acelerada em peças de concreto para pavimentação (PCPs) produzidas em escala industrial, bem como verificar a aplicabilidade do procedimento experimental conhecido como Método de Ganho de Massa, utilizado para obtenção do valor da absorção de CO_2 nas PCPs, especificamente.

1.1.2 ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Determinar o estado da arte sobre sequestro de CO_2 em PCPs;
- Determinar a quantidade de CO_2 absorvido nas PCPs;
- Verificar as propriedades mecânicas das PCPs carbonatadas;
- Estimar o custo teórico para captura e armazenamento de CO_2 em uma indústria cimenteira.

1.2 JUSTIFICATIVA

Desde 1930 explora-se a carbonatação e suas consequências deletérias aos elementos em concreto armado. De fato, desde os bancos universitários, os engenheiros civis aprendem que a referida reação química é prejudicial, uma vez que acarreta a destruição da película passivadora que envolve o aço, deixando o material suscetível à corrosão, reduzindo

a longo prazo a durabilidade da estrutura de concreto armado. Entretanto, diversos estudos indicam que a carbonatação de componentes cimentícios não armados é benéfica ao meio ambiente, ao passo que incorpora CO_2 na matriz desses produtos. Este trabalho foi desenvolvido dentro do enfoque positivo conferido à carbonatação, pois analisa sob a ótica sustentável, a qual é promovida quando se utiliza apenas o concreto, excluindo-se a armadura. Estudos indicam que ao se expor por pouco tempo (algumas horas) o recém fabricado componente cimentício sem armadura à cura em câmara de carbonatação com elevadas concentrações de CO_2 , condições adequadas de umidade relativa, pressão e temperatura, ocorre o fenômeno da carbonatação acelerada, o qual promove a captura do CO_2 presente na atmosfera da câmara e ganhos de resistência mecânica, cujos valores são comparáveis aos obtidos em 28 dias quando se utiliza o processo de cura convencional (SHAO et al. (2006), GALAN et al. (2010), WANG et al. (2012), B. ZHAN et al. (2013)).

Estudos mostram que a tecnologia de cura de carbonatação é tecnicamente viável e eficaz para implementação em escala industrial, pois apresenta baixo consumo de energia e alto ganho de desempenho, além de ser uma ferramenta importante no controle do efeito estufa (SHAO et al. (2010)).

Em alguns países a tecnologia do sequestro de carbono em produtos cimentícios já tem sido implementada nas indústrias. Nos Estados Unidos a empresa *CarbonCure Technologies Inc.*, desenvolveu um processo para cura de seus concretos utilizando o CO_2 capturado de usinas de carvão e fábricas de cimento. A empresa afirma que esta tecnologia não apenas permite o armazenamento do CO_2 no concreto sob a forma de carbonatos quimicamente estáveis, mas também alivia eflorescência e rachadura de contração, além de melhorar a resistência ao congelamento e descongelamento (MONKMAN e MACDONALD, 2016). A Figura 1.1, mostra um dos tanques de confinamento e armazenamento de CO_2 que a empresa utiliza.

Figura 1.1 – Tanque para armazenamento de CO_2 capturado.



Fonte: Disponível em:< <http://www.carboncure.com>>. Acesso em: 06/09/2018.

Outras empresas também têm reutilizado beneficemente o CO₂ na cura, fabricação e modificação de cimentos, dentre elas destacam-se: Solidia Technologies, Calera Corporation, TecEco Pty. Ltd, Calix Ltd. e Kajima Corporation (JANG et al, 2016).

El-Hassan e Shao (2013) enfatizam que o uso comercial do CO₂ nos processos de cura nas indústrias agrega ainda mais valor ao dióxido de carbono, uma vez que este passa a ter valor comercial, além do valor econômico relacionado a geração de créditos de carbono.

Com o intuito de retratar os benefícios da captura de CO₂ por meio da cura por carbonatação acelerada em materiais cimentícios não armados, Shao et al. (2010) relatam levantamento nos Estados Unidos e Canadá envolvendo quatro produtos de construção típicos à base de cimento, sendo esses: blocos de concreto, peças de concreto para pavimentação (pavers), placas de cimento de poliestireno expandido (EPB) e fibra de celulose. Tais produtos foram submetidos à cura por carbonatação em uma câmara sob pressão de 500 kPa, concentração máxima de CO₂, à temperatura ambiente, por um período de 2 horas. Os valores relacionados à absorção de carbono, ganho de resistência imediato e desenvolvimento de resistência a longo prazo foram medidos e apresentados na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1.1 – Potencial anual de sequestro de CO₂ em produtos de concreto feitos nos EUA e Canadá (SHAO et al 2010)).

Aspectos observados	Amostras			
	Blocos de Concreto	Pavers	Placas EPB	Placas fibrosa
Produção Anual	4,3x10 ⁹ unid.	74x10 ⁶ m ²	75x10 ⁶ m ²	9.1x10 ⁸ m ²
Cimento usado no produto (Mt)	5,9	2,6	0,595	4,8
Absorção de CO ₂ (%)	9,8	9,8	12,2	19
Potencial de Sequestro de CO ₂ recuperado (Mt)	0,578	0,255	0,073	0,907
Resistência após 02 horas de cura por carbonatação (MPa)	10,3±0,6	10,3±0,6	7,8±0,2	10,5±1,2
Resistência aos 28 dias das peças referencias (não carbonatadas) (MPa)	20,5±0,9	20,5±0,9	7,8±0,5	11,7±0,5

No referido estudo concluiu-se que os materiais cimentícios analisados são candidatos ideais para o armazenamento de CO₂ e que se toda a produção informada fosse carbonatada, o sequestro anual líquido de CO₂ atingiria 1,8 milhões de toneladas de CO₂, com uma

eficiência líquida de 87,1%. Observou-se também que os referidos produtos alcançaram níveis de resistência satisfatórios em apenas 02 horas de carbonatação quando comparados aos produtos que sofreram cura convencional (não carbonatados) em 28 dias. E enfatizou-se a viável aplicabilidade desse procedimento de cura em escala industrial.

Portanto, é nítido que o tema a ser desenvolvido na presente pesquisa, além da questão ambiental agrega grande valor econômico, uma vez que envolve a comercialização industrial do CO₂. Pretende-se com este trabalho avaliar a cura de peças de concreto para pavimentação em ambiente com elevada concentração de CO₂, como estratégia de redução de gases do efeito estufa e melhoramento das propriedades mecânicas do referido produto cimentício.

1.3 QUESTÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa teve a intenção de responder às seguintes questões:

- O procedimento de cura por carbonatação acelerada promoverá a absorção de CO₂ em peças de concreto para pavimentação, especificamente?
- O método do Ganho de Massa será viável para quantificar o CO₂ capturado?
- Qual procedimento de cura inicial anterior à cura por carbonatação mostrar-se-á mais eficiente para captura de CO₂?
- Será possível estimar o sequestro de CO₂ no Brasil, propiciado pela cura por carbonatação das PCPs, através da taxa de absorção de CO₂ a ser obtida no presente estudo?
- Qual procedimento de cura inicial anterior à cura por carbonatação apresentará maior ganho de resistência?
- As PCPs carbonatadas apresentarão melhora quanto à resistência mecânica, logo nas primeiras idades, quando comparadas às PCPs não carbonatadas (referenciais)?

1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O presente trabalho é composto por seis capítulos, os quais se encontram organizados da seguinte maneira:

Neste primeiro capítulo foi introduzido o conteúdo a ser abordado, ressaltando principalmente a carbonatação acelerada como uma estratégia benéfica de cura para materiais cimentícios não armados uma vez que promove a absorção de CO₂ do meio ambiente e ganhos de resistência mecânica, além da questão relacionada a expansão do uso nos últimos anos e vantagens ecológicas relacionadas aos pavimentos intertravados. Este capítulo trouxe também, os objetivos principais e específicos do trabalho, os principais pontos que justificam o desenvolvimento do mesmo, seguidos da apresentação da problemática da pesquisa.

O segundo capítulo traz uma revisão da bibliografia, expondo conceitos e definições imprescindíveis ao entendimento desta pesquisa, e assimilados mediante o estudo de trabalhos de diversos autores relacionados ao tema.

No terceiro capítulo são apresentados todos os aspectos referentes à metodologia a ser empregada na execução dos ensaios, suas etapas, as ferramentas envolvidas, bem como a ordem e caracterização de cada um dos procedimentos que a compreendem.

O quarto capítulo, explicita todos os resultados obtidos bem como as discussões pertinentes.

O quinto capítulo traz as conclusões do presente estudo.

Por fim, o sexto capítulo inclui a lista de referências utilizadas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Visando a inserção deste trabalho no contexto contemporâneo de desenvolvimento das pesquisas relacionadas ao tema, são expostos a seguir os principais conceitos relacionados ao efeito estufa e às emissões de poluentes relacionadas às matérias primas utilizadas na construção civil, logo após serão abordados informações e conceitos relacionados às Peças de Concreto para Pavimentação (doravante designadas pela sigla PCPs), como histórico, definições, processos produtivos e parâmetros de normatização. Também serão expostos os principais conceitos relacionados ao cimento Portland, hidratação deste, concreto convencional e concreto seco; e por fim os principais quesitos relacionados à cura por carbonatação acelerada, como o mecanismo da reação de carbonatação, fatores que influenciam no processo, vantagens e o Método de Ganho de Massa para obtenção do percentual de CO₂ absorvido por produtos cimentícios não armados.

2.1 EFEITO ESTUFA

2.1.1 O MECANISMO, REDUÇÃO DAS EMISSÕES E CONSEQUÊNCIAS

O aquecimento da atmosfera terrestre trata-se de um fenômeno natural, decorrente da interação dos processos naturais de entrada de radiação eletromagnética entre o sol (fonte geradora de radiação infravermelha, radiação ultravioleta e luz visível) e a emissão de radiação térmica do planeta terra (corpo receptor, dissipador e refletor da energia recebida da fonte geradora). O crescente aumento das atividades humanas, a partir da revolução industrial, promoveu a intensificação da emissão de gases poluentes para a atmosfera; estes interagem a nível molecular com a radiação térmica emitida para a Terra, ocasionando o fenômeno do Aquecimento Global, o qual mais tarde, devido à semelhança do processo, que acontece com a atmosfera do planeta Terra e as estufas construídas pelo homem no cultivo de plantas e alimentos, chamou-se Efeito Estufa (SANTOS, 2000).

Sabe-se que o efeito estufa é responsável por manter a Terra aquecida, uma vez que a camada de CO₂ evita que os raios solares sejam totalmente refletidos para o espaço. Caso ele não existisse a Terra possuiria temperaturas médias inferiores a -10°C. O grande problema é causado pelo homem, que com suas intensas atividades, emite enormes quantidades de CO₂ à atmosfera acarretando o aumento do efeito estufa (BEIROZ, 2011). A Figura 2.1, a seguir, mostra o mecanismo do efeito estufa.

Figura 2.1– O mecanismo do efeito estufa

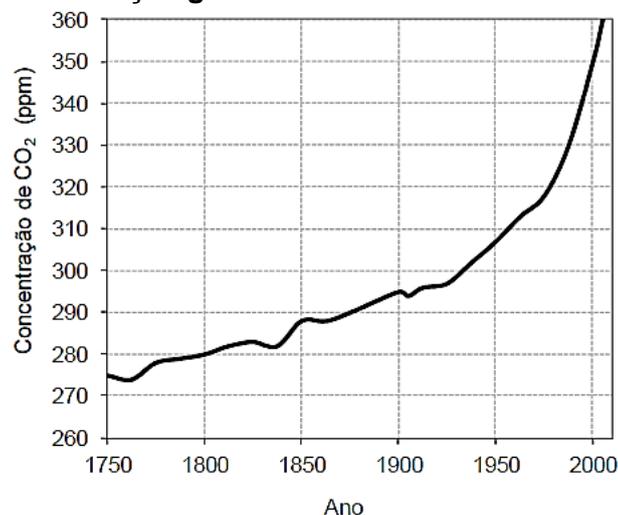


Fonte: PUC MINAS, 2011

De acordo com Santos (2000), os principais gases antropogênicos causadores do efeito estufa são: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), clorofluorcarbonos (CFCs) e óxido Nitroso (N_2O). Dentre eles, o CO_2 presente na atmosfera corresponde a dois terços dos gases de efeito estufa.

O IPCC (2007) projeta que até 2100 a concentração de CO_2 poderá alcançar valores que variam de 535 a 985 ppm, correspondendo a um aumento entre 41 a 158% em relação aos patamares atuais. A Figura 2.2 mostra que após a Revolução Industrial, por volta de 1750, a concentração global de CO_2 aumentou veementemente, corroborando com o fato de que o excesso das emissões de GEE na atmosfera é advindo das ações humanas.

Figura 2.2– Concentração global de CO_2 na atmosfera no decorrer dos anos



Fonte: Yoon, Çopuroğlu e Park (2007).

Apesar das ações antrópicas serem as principais causadoras das elevadas concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, o Homem também tem buscado alternativas para reduzir as emissões de CO₂ e sequestrá-lo de forma definitiva. Acordos e Conferências Internacionais, tais como Protocolo de Quioto, Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima e Conferência Mundial do Clima em Copenhague possuem o objetivo de criar metas para reduzir e estabilizar as emissões de GEE em um nível no qual as atividades humanas não interfiram seriamente nas mudanças climáticas (WWF, 2018).

Nesse sentido, algumas alternativas estão sendo desenvolvidas como: a) substituição de combustíveis tradicionais por alternativos, b) cimentos com menos concentração de clínquer e mais adições, c) armazenamento do CO₂ geológico, oceânico, e em poços de petróleo depletados, d) sequestro de CO₂ em materiais cimentícios através da reação de carbonatação acelerada (JOHN, 2003; OCC, 2005; PLASYNSKI, 2013).

Naturalmente o planeta realiza processos que equilibram o CO₂ da atmosfera, sendo estes a fotossíntese realizada pelas plantas, ciclo carbonato-silicato e a absorção de CO₂ pelos mares e oceanos através de processos físico-químicos e biológicos [KASTING E CASTLING, (2003)]. Porém, sozinhos, não são suficientes.

O fato é que as consequências do aquecimento global já têm sido notadas e podem causar prejuízos irreversíveis à humanidade tais como: derretimento de geleiras e consequente elevação do nível dos mares, desaparecimento de ilhas e cidades litorâneas densamente povoadas, alteração das temperaturas oceânicas, desequilíbrio ambiental das espécies marinhas; desertificação, promovendo a escassez de água, intensificação das secas, alteração do regime das chuvas; maior frequência de eventos extremos climáticos (tempestades tropicais, inundações, nevascas, furacões, tornados e tsunamis) podendo provocar a extinção de espécies de animais e de plantas (CLIMATE CHANGE, 2007b; RAHMAN, et al., 2009; WWF, 2018; FRANCISCO, 2018).

2.1.2 A CONSTRUÇÃO CIVIL E A EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA

De acordo com VITO (2001), os procedimentos utilizados para a produção/obtenção dos insumos empregados na construção civil, relacionados a seguir, são os grandes responsáveis pelas emissões de gases geradores do efeito estufa, dentre eles é possível destacar: cimento, cal, aço, areia e brita (retirada e transporte), queima de combustíveis fósseis, entre outros. Neste trabalho, será dado enfoque aos componentes constituintes do concreto.

2.1.2.1 Cimento

Segundo a Cement Technology Roadmap (2009) entre 2000 e 2006 a produção de cimento aumentou 54% em todo o mundo. Estima-se que entre 2006 e 2050, devido ao crescimento populacional e a conseqüente necessidade de urbanização a qual demanda o consumo de concreto para construção de prédios, habitações, escolas, hospitais, entre outros; a produção de cimento aumente de 0,8 a 1,2% ao ano, chegando a valores entre 3,7 e 4,4 bilhões de toneladas em 2050 (BID, 2010). Enquanto a emissão global de CO₂ advinda da cimenteira em 1990 era de 576 milhões de toneladas (Boden et al., 2011b), em 2006 elas quase triplicaram, alcançando 1,88 bilhão de toneladas. Se esta tendência continuar sem quaisquer ações, a quantidade de emissões de CO₂ no mundo advinda da indústria de cimento deverá atingir 2,34 bilhões de toneladas em 2050. No entanto, a International Energy Agency (IEA) espera que através da utilização de estratégias adequadas, tais como eficiência energética dos fornos, combustíveis alternativos, substituição do clínquer e captura e armazenamento de CO₂, estas emissões sejam reduzidas e finalmente cheguem a 1,55 bilhão de toneladas em 2050 (CEMENT ROADMAP TARGETS, 2009).

De acordo com a Estimativa Anual de Gases de Efeito Estufa no Brasil do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (BRASIL, 2014), o Brasil instituiu através da Lei nº 12.187/2009 a Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC), a qual define o compromisso nacional voluntário de adoção de ações de mitigação com vistas a redução de suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) entre 36,1% e 38,9% em relação às emissões projetadas até 2020. A regulamentação desta política, em 2011, estabeleceu diversos Planos Setoriais, dentre eles o Plano Indústria, com o objetivo de definir diretrizes para a participação do setor industrial na referida política, tendo como meta a redução de 5% das emissões de CO₂ de todo o setor industrial previstas para 2020. Foram incluídos no Plano Indústria os 7 principais setores industriais emissores de gases de efeito estufa: Cimento, Alumínio, Química, Papel e Celulose, Siderurgia, Vidro, Cal. A Tabela 2.1 a seguir, mostra os valores de emissão de CO₂ de acordo com o Setor Industrial e subsetor Cimento.

Tabela 2.1 – Estimativa de emissões de CO₂ no Brasil (Adaptado BRASIL, 2014).

SETOR	1990	1995	2000	2005	2011	2012	Variação	
	GgCO ₂ eq						1995-2005	2005-2012
PROCESSOS INDUSTRIAIS	52.537	63.605	71.674	77.943	86.173	85.365	23,60%	9,50%
Produção de cimento	11.062	11.528	16.047	14.349	22.493	25.309	24,50%	76,40%

Em 2015, na COP 21 em Paris, um acordo de nível de governamental foi instituído com o objetivo de reduzir o aumento da temperatura média global para bem abaixo de 2 °C.

O WBCSD emitiu uma Declaração Global de Ambição pedindo esforços de colaboração de todas as empresas de cimento para reduzir as emissões de CO₂ em 20–25% até 2030 (SCRIVENER, JOHN, GARTNER, 2016).

O fato é que o cimento é o produto mais produzido da Terra em massa, e ao se combinar com água e agregados minerais dá origem aos materiais à base de cimento (por exemplo, concreto), este, por sua vez, é o segundo produto mais utilizado no mundo depois da água (ECO-EFFICIENTS CEMENTS, 2016). O grande problema deve-se ao processo de fabricação do cimento, o qual promove grande liberação de CO₂ ao meio ambiente. O cimento Portland tradicional é composto basicamente por argila e calcário que quando calcinados em elevadas temperaturas dão origem ao clínquer. Os grãos de clínquer são moídos com gipsita e dão origem ao cimento. Para se produzir 1.000 kg de clínquer gera-se de 825 a 1150 kg de CO₂, sendo que 50 a 60% destes são gerados na reação química de calcinação do calcário e 30 a 40% são devidos a combustão de combustíveis fósseis no forno (FREITAS, et al, 2010).

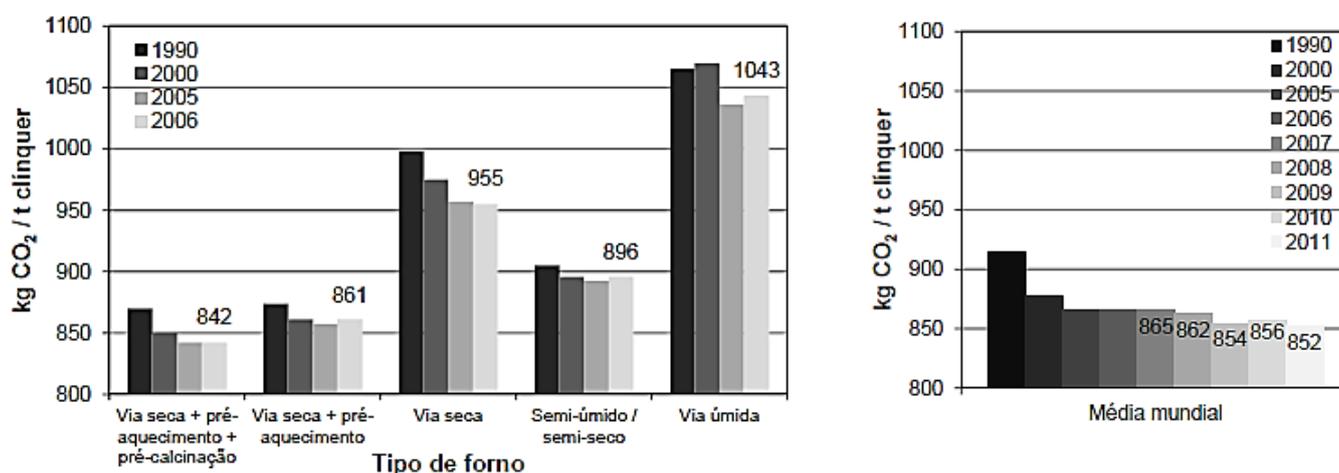
A tabela 2.2, a seguir, mostra a emissão de CO₂ devido à produção de clínquer de acordo com diversos autores.

Tabela 2.2 – Variações nas emissões de CO₂ referentes à produção do clínquer (Adaptado DAMINELI, 2013).

Autor	Kg de CO₂ por ton de clínquer produzida
Yamamoto et al (1997)	824,25 a 1151,7
Humphreys; Mahasenan (2002)	870
Gartner(2004)	859
Josa et al (2004)	821,1 a 900
USGS (2005)	960
IEA (2006)	913 a 1125
Damtoft et al (2008)	840 a 1150
John (2011)	855,07
WBCSD/CSI (2009)	842 a 1043

A variação quanto a emissão de CO₂ está relacionada a fatores como tipo de combustível e tipo de forno utilizado para produção do clínquer, uma vez que fornos por via seca com pré-aquecimento e pré-calcinação emitem menos gás carbônico que fornos por via úmida (WBCSD/GNR, 2011). A Figura 2.3, a seguir, mostra as emissões mundiais de CO₂/ton clínquer, separadas por tipo de forno e por ano.

Figura 2.3 – Médias das emissões de CO₂/ ton clínquer: a) separadas por tipo de forno e por ano; b) média mundial.



Fonte: Damini (2013).

Atualmente a indústria do cimento tem empregado estratégias para reduzir a emissão de CO₂ advinda do clínquer, dentre elas, destacam-se a utilização de combustíveis alternativos e a busca por maior eficiência energética nos fornos durante o processo de produção; além da substituição do clínquer por adições minerais como escória de alto forno e cinzas volantes (WBCSD/CSD, 2009; WBCSD/GNR, 2011).

O Brasil é referência mundial na produção de cimento com baixa emissão de CO₂. De acordo com o Inventário Nacional dos Gases do Efeito Estufa do Ministério da Ciência e Tecnologia (BRASIL, 2010), em 2010, enquanto a emissão média mundial de CO₂ por tonelada de clínquer variava em torno de 900 kg CO₂/ton clínquer, no Brasil esta era abaixo de 600 kg de CO₂/tonelada clínquer, isso se deve ao fato de que as cimenteiras aqui instaladas aderiram em 2002 à Iniciativa para a Sustentabilidade do Cimento (CSI – Cement Sustainability Initiative, 2005), a qual objetiva diminuir as emissões do setor por meio de alterações, especialmente, na tecnologia de produção do cimento. Segundo o relatório do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC (2011) as ações brasileiras mais importantes são relacionadas à produção à seco do clínquer, e da utilização de adições como pozolana, escória e filler, as quais são responsáveis por reduzir a quantidade de clínquer necessário para a produção de uma tonelada de cimento.

Na Tabela 2.3, a seguir, é possível observar que os cimentos com maior porcentagem de adições minerais apresentam menor percentual de CO₂ gerado por tonelada de cimento Portland.

Tabela 2.3 – Valor aproximado de CO₂ gerado por tonelada de cimento Portland (Adaptado FREITAS et al.,2010).

Tipo	Adição	kg CO₂/tonelada
CP II Z	24% Pozolana + Filer	~ 700
CP II E	40% Escória + Filer	~ 580
CP III	75% Escória	~ 290
CP IV	40% Cinzas Volantes	~530
CP V	5% Filer	~ 860

2.1.2.2 Agregados: areia e pedra

Segundo Stachera (2008), a maioria das obras brasileiras utilizam areia natural advinda dos leitos dos rios. Para a extração são empregadas dragas movidas a óleo diesel.

A brita é extraída de pedreiras e a exploração segue as etapas abaixo (Alves, 1987):

- Perfuração mecânica da rocha, através de perfuradores de brocas ou martelos pneumáticos;
- Estabelecimento de linhas de fogo;
- Fogo (explosão): após a colocação dos explosivos;
- Transporte na pedreira: através de caminhões, vagonetes e/ou esteiras;
- Britagem;
- Transporte até a obra.

A utilização desses agregados causa grande impacto ao meio ambiente, pois são atividades extrativistas e ao longo do tempo promovem o esgotamento do recurso natural, uma vez que este não é renovável. Além disso, o processo de extração lança rejeitos ao solo e corpos d'água contaminando-os e degradando-os e emite gases à atmosfera devido a utilização de motores a combustão (STACHERA, 2008).

2.2 PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO (PCPS)

2.2.1 BREVE HISTÓRICO

De acordo com Cruz (2003), no final do século XIX produziu-se a primeira peça pré-fabricada para pavimentação, relatos informam que antes da primeira guerra mundial, algumas patentes já haviam sido registradas. Rapidamente foram observadas suas vantagens

perante as pedras naturais, dentre elas destacou-se a uniformidade dispensando tratamentos adicionais antes do assentamento.

No período pós Segunda Guerra Mundial, as peças de concreto para pavimentação (PCPs) tiveram grande importância e foram amplamente utilizadas na reconstrução da Holanda e Alemanha. A partir de 1950 os formatos das peças de concreto foram remodelados, e estas que antes eram produzidas de modo a imitar os tijolos e pedras utilizadas na época, tendo como únicas vantagens os custos mais baixos e a homogeneidade dimensional, passaram a apresentar um refinamento maior, sendo disponibilizadas em novos modelos e com formatos dentados. Avanços também foram implantados quanto ao conceito de intertravamento e controle de espessuras das juntas facilitando o assentamento e permitindo a utilização correta de mão de obra pouco especializada (CRUZ, 2003).

Por volta dos anos 60, as PCPs passaram a ser vastamente comercializadas na Europa e ganharam os mercados da América Central, do Sul e África do Sul. Na década de 70 chegaram aos Estados Unidos, Austrália, Nova Zelândia e Japão. Ao final da referida década mais de 200 tipos de formas e equipamentos de fabricação já eram comercializados por todo o mundo (CRUZ, 2003).

Em 1980, a produção anual mundial ultrapassou 45 milhões de metros quadrados e 66% das PCPs fabricadas eram aplicadas em vias de tráfego urbano. No final da década de 1990, a indústria mundial de peças de concreto para pavimentação chegou à admirável marca de produção de 100 m² por segundo durante os dias úteis de trabalho (SMITH, 2003).

Atualmente o mercado das PCPs está enraizado em todo o mundo e requisitos importantes relacionados ao desempenho do pavimento em função do tipo de tráfego foram analisados, levando ao desenvolvimento de diversos formatos e espessuras das PCPs. Mudanças também ocorreram quanto ao assentamento, uma vez que este anteriormente era feito apenas de forma manual e artesanal, e atualmente já é feito de forma mecânica permitindo a rápida execução. A Figura 2.4 a seguir, apresenta a execução manual e mecânica do pavimento utilizando peças de concreto para pavimentação.

Figura 2.4 – Diferentes formas de assentamento das PCPs.



Fonte: Disponível em: <<https://maski.com.br/assentamento-do-pavimento-intertravado/>> e

<https://www.mdig.com.br/?itemid=15562>>. Acesso em: 03/06/2017.

Com a evolução, as PCPs tiveram que se adequar aos requisitos impostos por Normas relacionados à dimensão, resistência mecânica, entre outros. No Brasil, a NBR 9781:2013 elaborada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, é Norma que trata das PCPs e as define como componentes pré-fabricados de concreto, utilizados como materiais de revestimento em pavimentos intertravados. Contudo, a demanda relacionada às PCPs avança celeremente e hoje, além de atenderem às solicitações mecânicas, também devem incorporar os conceitos de acessibilidade, sustentabilidade e conservação ambiental. O mercado extremamente desenvolvido oferece uma gama de peças dotadas de diferentes formatos e aspectos disponíveis permitindo não só a concepção de pavimentos intertravados, mas também pavimentos permeáveis, táteis, coloridos e/ou dotados de sinalização horizontal. A Figura 2.5 a seguir, apresenta a aplicação das PCPs em três cidades brasileiras.

Figura 2.5 – Aplicação das PCPs em diferentes estados brasileiros.



Fonte: Portland (2005).

2.2.2 DEFINIÇÕES

As peças de concreto para pavimentação podem ser definidas como componentes pré-fabricados de concreto, utilizados como materiais de revestimento em pavimento intertravado (ABNT NBR 9781:2013).

Segundo Fernandes (2011) as PCPs tratam-se de peças pré-moldadas de concreto utilizadas para construção de pavimentos ou calçadas, cuja superfície possibilita um acabamento confortável para o trânsito de pessoas e sua estrutura permite suportar o trânsito de veículos leves ou pesados, conforme categoria e aplicação.

A Figura 2.6 ilustra algumas peças de concreto para pavimentação, as quais são produzidas em escala industrial em diversos formatos, espessuras e tonalidades.

Figura 2.6 - Peças pré-moldadas de concreto em diversos formatos e tonalidades.



Fonte: ABCP (2010).

Os pavimentos intertravados são constituídos por peças pré-moldadas de concreto, assentadas sobre camada de areia e travadas entre si por contenção lateral. (ABCP, 2012a; ABCP, 2012b). Segundo a NBR 9781:2013, pavimento intertravado é um pavimento flexível cuja estrutura é constituída por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por camada de revestimento composta por peças de concreto justapostas, cujas juntas entre as peças são preenchidas com material de rejuntamento (areia fina ou pó de pedra) e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção.

O intertravamento pode ser definido como a junção das peças modulares de concreto que se encaixam entre si, revestindo a superfície e conferindo desempenho e durabilidade ao pavimento. Trata-se da capacidade das peças de concreto resistirem aos movimentos de deslocamento individual, sendo ele vertical, horizontal ou de rotação com relação a seus vizinhos. Para se obter o intertravamento é essencial a contenção lateral e as juntas preenchidas com areia (ABCP, 2010).

Segundo Fernandes (2011) o intertravamento consiste na transferência de cargas entre uma peça e outra através do atrito lateral entre elas. O autor enfatiza também outra característica do intertravamento que é o fato de ser levemente permeável, uma vez que permite a passagem da água do pavimento para o solo através das juntas.

A Figura 2.7, a seguir, mostra o comportamento do intertravamento frente aos deslocamentos.

Figura 2.7– Comportamento do intertravamento frente aos deslocamentos vertical, rotação e horizontal, respectivamente.



Fonte: ABCP (2010).

2.2.3 VANTAGENS DAS PCPS

As peças de concreto são cada vez mais utilizadas na confecção de pavimentos e calçadas, sua utilização vai desde ruas até praças; e apresentam uma série de vantagens, dentre as quais destacam-se: variedade de cores e formatos, fácil instalação, superfície antiderrapante, liberação imediata ao tráfego, durabilidade, conforto térmico, drenagem do pavimento, além da possibilidade de incorporação do sinal de alerta para deficientes visuais. Sua manutenção é simples e dispensa mão-de-obra especializada, eventuais consertos são realizados com a fácil remoção e reaproveitamento das peças (ABCP, 2012a; ABCP, 2012b).

2.2.4 FORMATO DAS PCPS

No mundo existem mais de 100 formatos de peças de concreto para pavimentação. No Brasil os modelos mais utilizados são: Prisma, 16 faces, Paviesse, Sextavado, Raquete, Duplo T e Estrela (FERNANDES, 2011). A Figura 2.8, traz alguns modelos diferentes de formatos das PCPs.

Figura 2.8 – Diferentes formatos de PCPs.



Fonte: Adaptado de Fernandes (2011).

De fato, não existe unanimidade entre os pesquisadores sobre qual o melhor formato da PCP. Para SHACKEL (1990) o desenho das PCPs segmentadas propicia um melhor intertravamento devido a melhor distribuição dos esforços. Já a ABCP (1999b) afirma que o formato das PCPs não exerce grande influência sobre o desempenho e mecanismo funcional dos pavimentos. Isto posto, pode-se concluir que o único requisito recomendado com relação

ao formato das PCPs é que ele seja capaz de permitir o assentamento em combinação bidirecional.

De acordo com a ABNT NBR 9781:2013, as PCPs podem ser classificadas quanto ao seu formato em quatro tipos, conforme mostrado abaixo:

- **Tipo I:** Peças de concreto segmentadas ou retangulares, com relação comprimento/largura igual a dois (suas dimensões usuais são 20 cm de comprimento por 10 cm de largura). Por possuírem faces laterais retas, curvilíneas ou poliédricas apresentam facilidade de execução na obra, principalmente quanto aos detalhes do pavimento, podendo ser assentadas em fileiras ou em “espinha-de-peixe” (HALLACK, 1998);

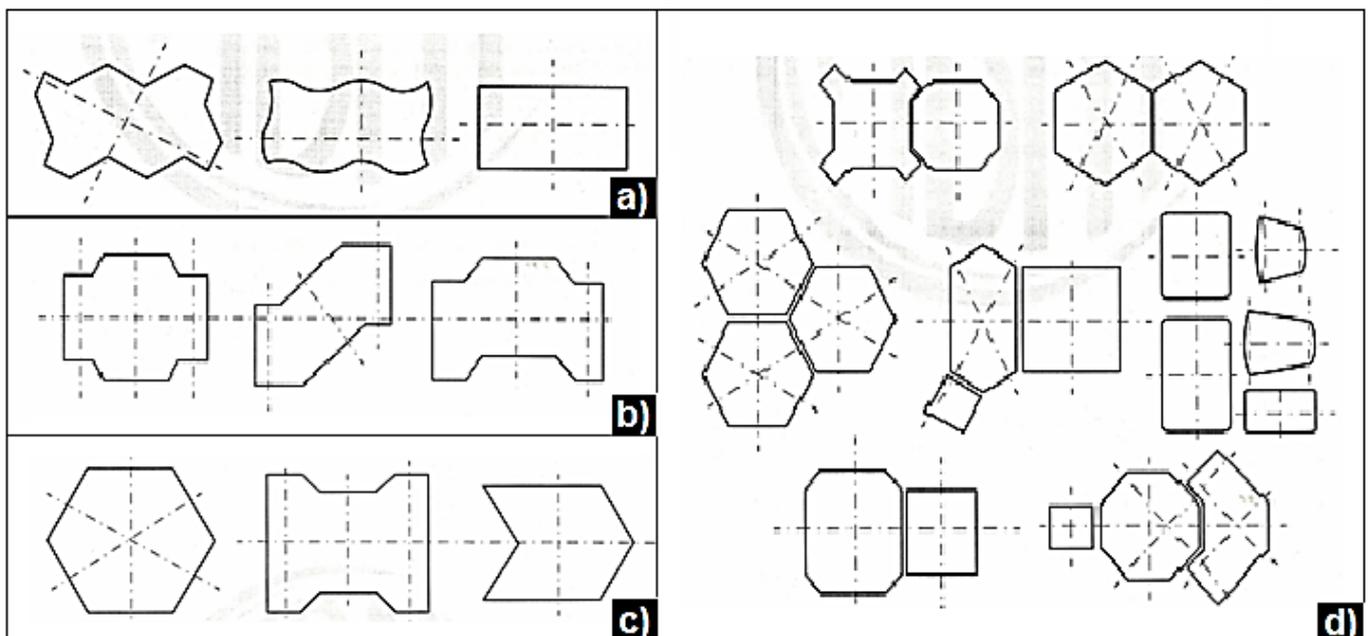
- **Tipo II:** Peças de concreto com tamanhos e proporções similares as peças do Tipo I, porém se intertravam somente em dois lados, devido a isso só podem ser assentadas em fileiras. Podem ser carregadas com apenas uma mão e genericamente têm o formato em “I”;

- **Tipo III:** Peças de concreto com formatos geométricos característicos (trapézios, hexágonos, triédros, entre outros) com peso superior a 4kg, fato este que não permite que as referidas peças sejam carregadas apenas com uma mão. São assentadas seguindo sempre um mesmo padrão;

- **Tipo IV:** Trata-se de um conjunto de peças de concreto com diversos tamanhos, ou uma única peça com juntas falsas, que podem ser usadas com um ou mais padrões de assentamento.

A figura 2.9 extraída da ABNT NBR 9781:2013, apresenta os formatos das PCPs.

Figura 2.9 – Formato das PCPs: a) Tipo I; b) Tipo II; c) Tipo III, d) Tipo IV

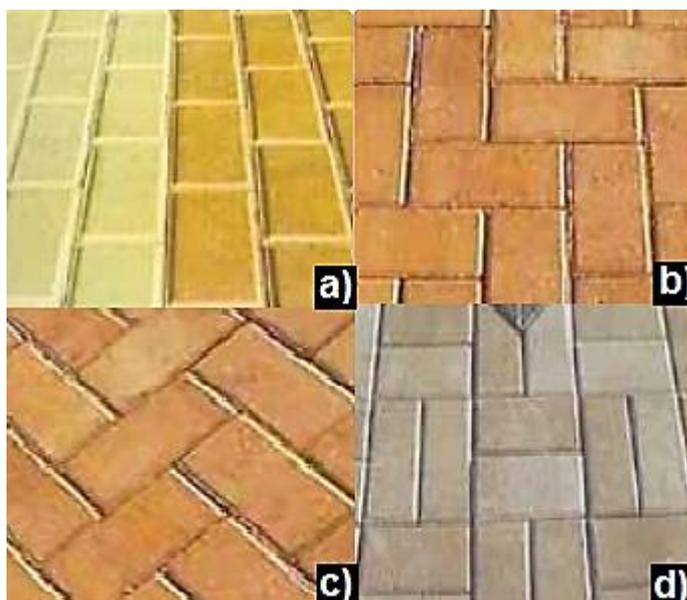


Fonte: ABNT NBR 9781:2013.

2.2.5 FORMAS DE ASSENTAMENTO

Além das diferentes cores e formatos, as PCPs permitem diversos tipos de assentamento, os quais serão apresentados na Figura 2.10, a seguir.

Figura 2.10 – Tipos de assentamento das PCPs: a) Fileira; b) Reto; c) Espinha de Peixe ou inclinado; d) Trama.



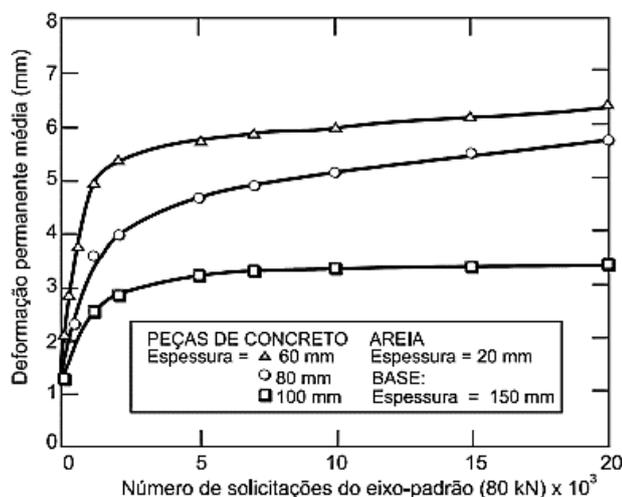
Fonte: Adaptado de ABCP (2010).

2.2.6 ESPESSURA DAS PCPS

Knapton (1976) através de ensaios estatísticos de carga chegou à conclusão de que a espessura das peças de concreto possui pouca ou nenhuma influência no comportamento estrutural dos pavimentos.

Em contrapartida, Shackel (1979, 1990) em seus estudos observou que o aumento na espessura das peças, dentro de um intervalo de 60 mm a 100 mm, é benéfico ao desempenho do pavimento. Em 1979, na África do Sul, ao realizar diversos ensaios com Simulador de Veículos Pesados, verificou que para um mesmo nível de solicitação as deformações permanentes no pavimento eram consideravelmente menores com peças pré-moldadas de concreto de 80 mm do que com peças de 60 mm de espessura. E em 1990, verificou para peças de concreto possuindo espessuras de 60, 80 e 100 mm os diferentes desempenhos do pavimento, conforme mostra a Figura 2.11.

Figura 2.11 - Efeito da espessura das peças de concreto no desempenho do pavimento sob solicitação do tráfego.



Fonte: SHACKEL (1990).

Atualmente a ABNT NBR 9781:2013 apresenta requisitos que corroboram com o estudo de Shackel (1979, 1990), uma vez que fixa que as PCPs devem apresentar medida nominal de espessura de no mínimo 60 mm, especificada em múltiplos de 20 mm; permitindo uma tolerância dimensional de ± 3 mm.

As indústrias fabricantes seguem a ABNT NBR 9781:2013 e compactuam com a linha de pensamento de Shackel (1979, 1990), pois as PCPs são comercializadas com espessuras de 60mm, 80mm e 100mm, e a escolha da sua espessura depende do tipo de solicitação do tráfego (pedestre, veículo leve ou veículo pesado) e da resistência à compressão solicitada; sendo que quanto maior a espessura da PCP, maior a resistência mecânica do concreto e conseqüente maior a resistência à solicitação do tráfego.

2.2.7 PROCESSO PRODUTIVO DAS PCPS

Este item é dedicado a apresentação dos processos de fabricação das PCPs, os quais podem ser divididos em dois grandes grupos: manual e mecânico. Salienta-se que enfoque será dado ao processo mecânico, uma vez que este é comumente empregado em escala industrial devido à elevada produção e controle tecnológico.

2.2.7.1 Processo Manual

- **Processo Virado ou Batido:** Neste processo produtivo o concreto plástico é utilizado para preencher manualmente as formas conjuntas ou individuais, adensadas em mesa vibratória e imediatamente desmoldadas sobre uma base plana, lisa e impermeável. Isto faz

com que as peças tenham a superfície lisa, dando a aparência estética mais agradável (BITTENCOURT, 2012).

Fernandes (2011) afirma que considerando uma mesma equipe constituída por seis pessoas, a produção virada ou batida produz em média 50 m²/dia, enquanto que no processo mecânico vibro prensado a produção chega a 1800 m²/dia.

• **Processo Dormido:** O referido processo produtivo possui esse nome devido ao fato das peças serem desmoldadas apenas no dia seguinte à fabricação, para tanto preenche-se os moldes com concreto, cuja consistência não é plástica e por fim adensa-se em mesa vibratória (BITTENCOURT, 2012). De acordo com Fernandes (2011) o processo dormido apresenta baixa produtividade e acabamento liso devido ao fato dos moldes utilizados serem de plástico, aço ou fibra.

2.2.7.2 Processo Mecânico

Este processo é caracterizado pela produção mecânica das peças, segundo Oliveira (2004) o processo produtivo das PCPs é caracterizado pelas etapas:

- 1) Confecção do traço, em que há o proporcionamento dos materiais;
- 2) Mistura, em geral realizada em misturador orbital;
- 3) Produção (moldagem) das PCPs, através das máquinas de vibroprensagem;
- 4) Cura das PCPs.

A etapa que se destaca devido a sua maior importância é a da produção (moldagem) das PCPs, pois é através das máquinas de vibro-compressão, as quais possuem esse nome pois realizam a compressão e vibração simultânea do material, que as propriedades físicas e mecânicas serão conferidas ao concreto seco utilizado na produção dos pavers (RODRIGUES, 1995 a).

De acordo com Fernandes (2011) o grande desafio da produção prensada é a utilização de equipamentos que propiciem a máxima redução do número de vazios da mistura na fase de adensamento, de modo a obter a máxima densidade e conseqüente resistência mecânica das peças.

Diversas são as vantagens que fazem com que esse processo produtivo seja o mais utilizado mundialmente, dentre elas destacam-se: elevada produtividade, necessidade de pouca mão de obra, maior controle da produção e homogeneidade das peças, variedade de cores e formatos, e desempenho estético do produto (FERNANDES, 2011).

No presente trabalho o enfoque será dado à produção mecânica vibro prensada, por essa ser a mais utilizada em escala industrial e por ser o método produtivo utilizado pela empresa participante da pesquisa.

□ **VIBROPRENSAS**

➤ **Tipos de vibroprensas:**

De acordo com Fernandes (2011) as vibroprensas podem ser do tipo:

- *Hidráulicas*: são as mais eficientes, pois utilizam bomba e pistões a óleo, sendo possível conciliar prensagem e vibração, e obter peças bem compactadas, as quais resultarão em pavers de até 50 MPa com baixo consumo de cimento. Estas vibroprensas podem ser dotadas de centrais programáveis, as quais possibilitam o controle dos tempos de alimentação, prensagem, acomodação e extrusão das peças.

- *Pneumáticas*: possuem esse nome por utilizaram pistão movido a ar comprimido. Não apresentam a mesma energia de compactação das máquinas hidráulicas, logo consomem mais cimento para se obter produtos com as mesmas resistências dos produzidos por estas.

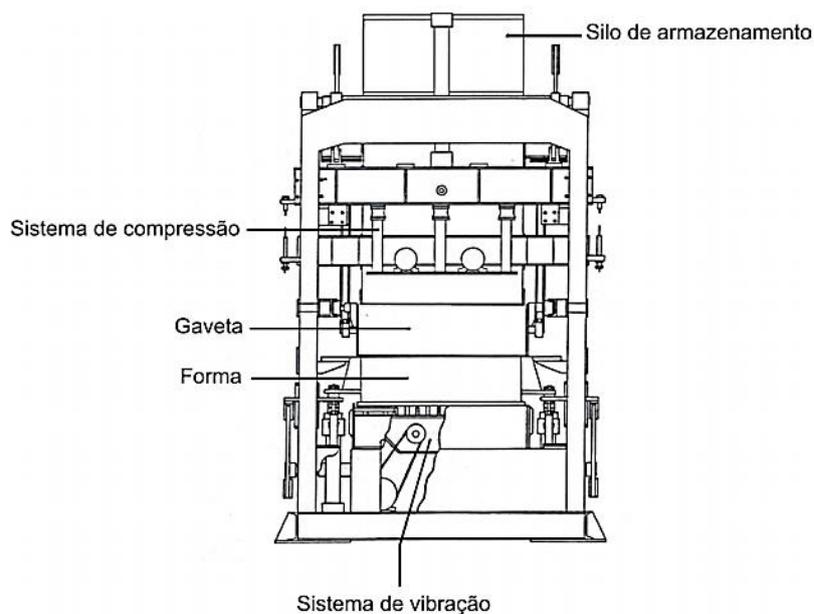
- *Manuais*: não contam com sistema de prensagem, logo consomem grandes quantidades de cimento. A produção é praticamente artesanal.

➤ **Equipamentos constituintes:**

Segundo Oliveira (2004), a máquina vibroprensa é constituída basicamente pelo silo de armazenamento, gaveta, sistema de compressão, forma ou molde e sistema de vibração.

A figura 2.12 a seguir representa as partes constituintes de uma máquina vibroprensa.

Figura 2.12 - Partes constituintes de uma vibroprensa



Fonte: OLIVEIRA (2004).

Segundo Oliveira (2004) a máquina de vibro prensagem é constituída por:

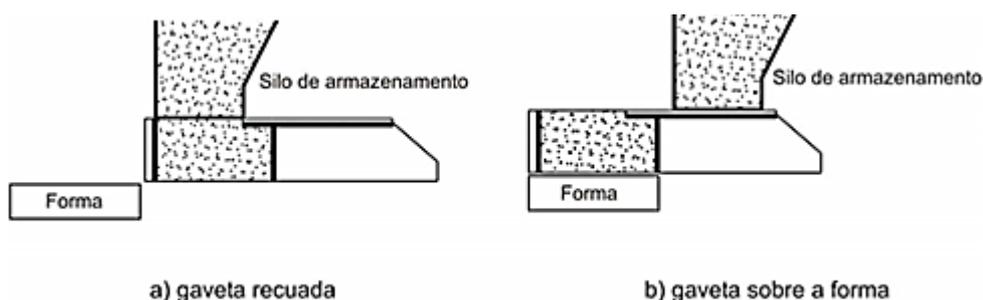
- **Silo de armazenamento:** o concreto seco já misturado fica armazenado no silo para posterior enchimento da gaveta. Este compartimento fica localizado na parte superior da máquina vibro prensa e seu volume varia de acordo com o fabricante.

- **Gaveta:** trata-se de um compartimento móvel que transporta o concreto armazenado do silo à forma. É constituída por compartimentos de concreto (quando a gaveta encontra-se na posição recuada este compartimento é preenchido com concreto) e de motor (quando a gaveta é acionada, esta é deslocada para cima da forma, alimentando-a, enquanto o silo de armazenamento fica fechado pelo compartimento do motor), conjunto de agitadores (responsáveis por facilitar o preenchimento das formas) e raspadores (responsáveis por remover concreto excedente do topo faz formas e da face da sapata que esteve em contato com o concreto).

Para a qualidade final do produto um conceito importante é o tempo de alimentação, o qual refere-se ao tempo que a gaveta deve permanece sobre a forma de modo a preenchê-la com concreto, onde simultaneamente é acionado o sistema de vibração. Observa-se que quanto maior for o tempo de alimentação, maior será a quantidade de concreto na forma, diminuindo o volume de vazios nas peças e elevando, conseqüentemente à resistência à compressão das mesmas (OLIVEIRA, 2004).

A Figura 2.13, a seguir, mostra o funcionamento da gaveta.

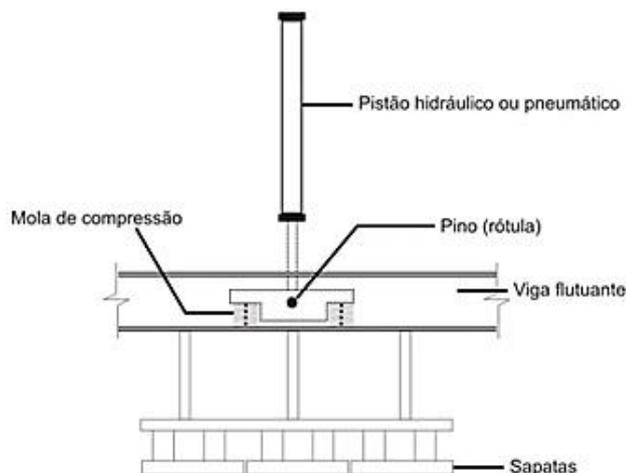
Figura 2.13 - Mecanismo de funcionamento da gaveta: a) gaveta recuada; b) gaveta sobre a fôrma.



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2004).

- **Sistema de compressão:** atua durante a moldagem das peças aplicando a carga de compressão. O referido sistema de compressão é composto por pistão, viga flutuante e sapata. O pistão (hidráulico ou pneumático) fica conectado à viga flutuante, esta por sua vez é responsável por transferir a carga à sapata, à qual é responsável por comprimir o concreto contido na forma. O sistema de compressão é representado pela figura 2.14, abaixo.

Figura 2.14 - Sistema de compressão (Pistão atuando como aplicador de carga).



Fonte: OLIVEIRA (2004).

Outro fator relevante para a qualidade final do produto está relacionado ao tempo de vibro compressão, que corresponde ao tempo de descida das sapatas e contato das mesmas com o concreto até que a espessura final das peças seja estabelecida, em geral esse tempo dura de 3 a 6 segundos, porém varia de acordo com o maquinário, componentes do concreto e tempo de alimentação. Todo esse processo de compressão ocorre com o sistema de vibração acionado e está diretamente relacionado ao ganho de resistência mecânica das PCPs (OLIVEIRA,2004).

De acordo com Alberio (2001) a recuperação elástica é um fator que deve ser levado em consideração e está diretamente relacionada a velocidade e ao tempo de compactação. Sabe-se que quanto maior for a velocidade de aplicação da carga, menos tempo as partículas possuem para se reordenarem e alcançarem posições mais estáveis, estas sofrem expansão (após a retirada da carga), criam tensões de tração e conseqüente fissuração. A recuperação elástica do material está diretamente relacionada a velocidade de aplicação da carga de compressão, a distribuição granulométrica e teor de umidade (compacidade) do material.

- **Forma:** também conhecida por molde, armazena o concreto advindo da gaveta. É a forma quem determina o formato e a dimensão das PCPs (OLIVIERA, 2004). A Figura 2.15, ilustra um dos tipos de formas empregados na produção vibro prensada de PCP.

Figura 2.15 - Forma para produção de PCP.



Fonte: Próprio autor (2018).

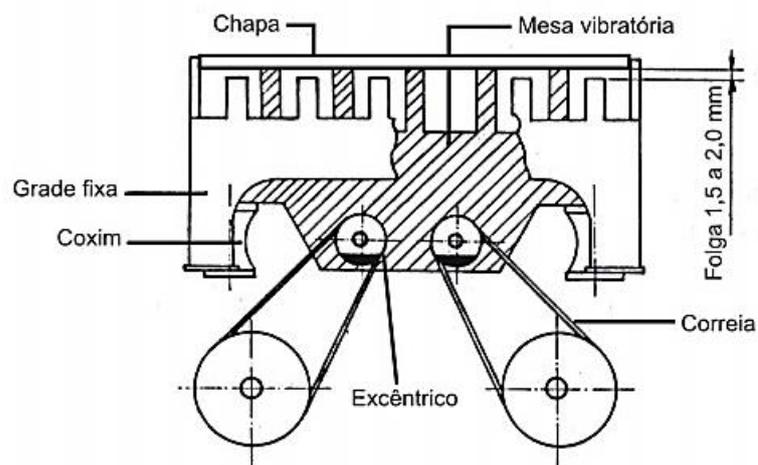
• **Sistema de vibração:** o efeito de vibração possui influência direta na qualidade dos artefatos e produtividade da máquina (OLIVEIRA, 2004). Segundo Neville (1988) a vibração promove a fluidificação dos componentes da argamassa, reduzindo o atrito interno e acomodando os agregados.

De acordo com Bresson (1981) a vibração é função de alguns parâmetros como direção, frequência, amplitude, velocidade e aceleração.

Segundo Oliveira (2004) em geral nas máquinas vibroprensas utiliza-se os sistemas de vibrações unidirecionais verticais através de mesas vibratórias ou sistemas de vibrações aplicados diretamente nas formas.

As mesas vibratórias geralmente possuem dois eixos de massas excêntricas, os quais são movidos por motores elétricos que giram sincronizados e em sentidos inversos (OLIVEIRA, 2004). A Figura 2.16 ilustra o detalhe deste sistema de vibração.

Figura 2.16 - Detalhe do sistema de mesa vibratória.

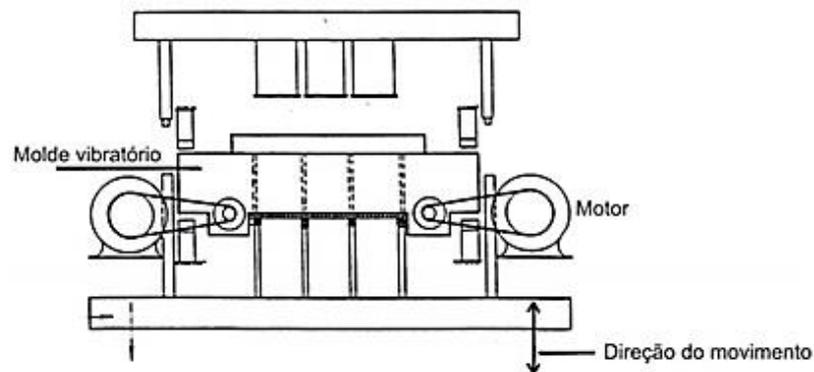


Fonte: OLIVEIRA (2004).

De acordo com Bresson (1981) os sistemas de vibrações aplicados diretamente sobre as formas pode ser de três tipos:

- **Vibradores excêntricos fixados nas laterais da forma:** a vibração é realizada através de vibradores excêntricos, sincronizados, ligados diretamente às laterais das formas e movidos através de dois motores independentes, onde a transmissão da rotação dos motores ao eixo excêntrico é realizada por polias e correias. A Figura 2.17, demonstra o referido sistema de vibração.

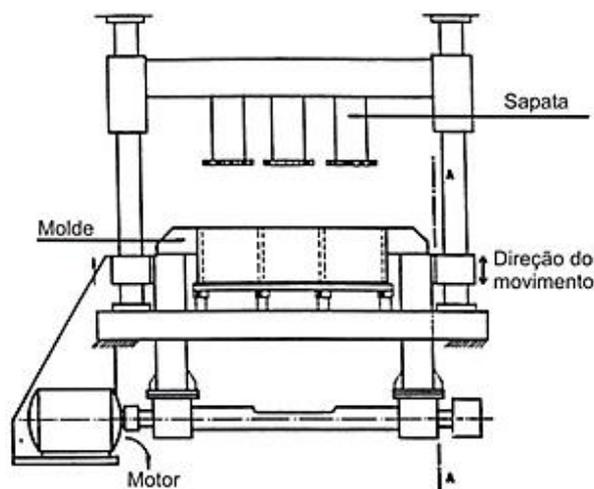
Figura 2.17 – Detalhe de um sistema de vibração produzido por excêntricos fixados nas laterais da forma.



Fonte: BRESSON (1981).

- **Vibradores excêntricos sob a forma:** neste caso os vibradores excêntricos estão ligados às laterais das formas e posicionados sob a mesma. A Figura 2.18, abaixo, mostra o referido sistema de vibração.

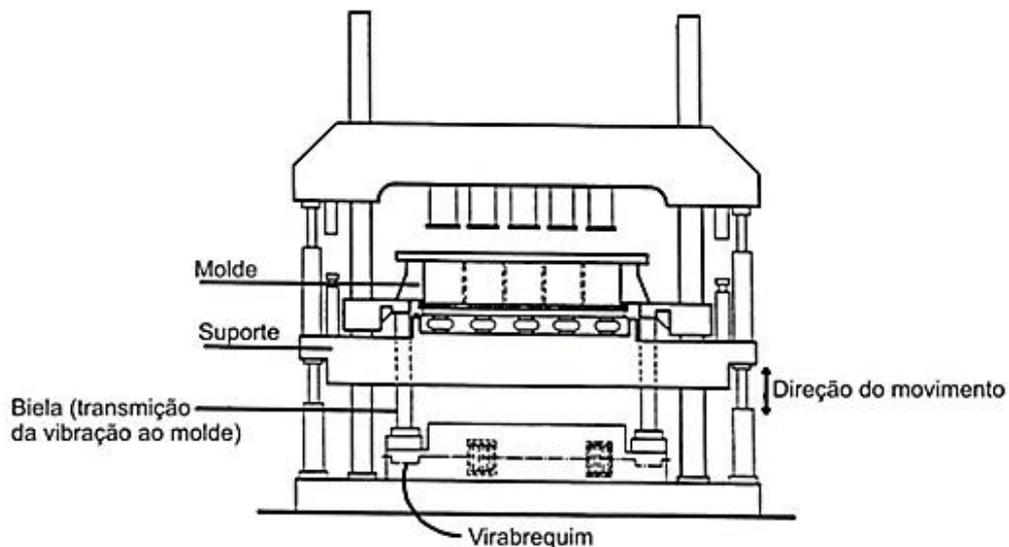
Figura 2.18 – Detalhe de um sistema de vibração produzido por excêntricos sob a forma.



Fonte: BRESSON (1981).

- **Sistema de vibração tipo Biela-virabrequim:** neste sistema de vibração a forma é fixada rigidamente sobre a cabeça das bielas. A figura 2.19, abaixo, traz a representação deste sistema.

Figura 2.19 – Detalhe de um sistema de vibração produzido por biela-virabrequim.



Fonte: BRESSON (1981).

➤ **Ciclos de produção:**

Segundo Oliveira (2004) as vibroprensas disponíveis no mercado possuem tempos de ciclo que variam de 8 a 25 segundos e o ciclo de produção das PCPs envolve as seguintes etapas na ordem apresentada:

- 1) Posicionamento da forma e avanço da gaveta: posiciona-se a forma sobre a chapa em que serão moldadas as PCPs e em seguida ocorre o avanço da gaveta sobre a forma; conforme mostra a Figura 2.20.

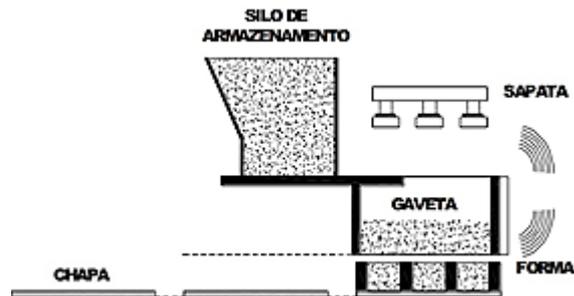
Figura 2.20– Posicionamento da forma e avanço da gaveta.



Fonte: PIROLA (2011).

- 2) Vibro - Alimentação: é a fase em que a gaveta alimenta a forma com concreto, tudo ocorre com o sistema de vibração acionado. Essa fase é de grande importância pois está relacionada a compacidade final dos produtos. A Figura 2.21, mostra esta fase do ciclo produtivo.

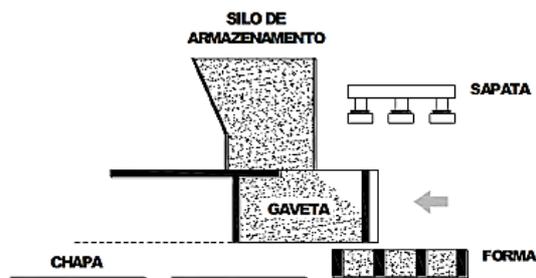
Figura 2.21 – Vibro – alimentação da forma.



Fonte: Adaptado de PIROLA (2011).

- 3) Retorno da gaveta a posição inicial: desliga-se o sistema de vibração e a gaveta retorna a posição inicial, sendo esta novamente preenchida com concreto, conforme mostra Figura 2.22.

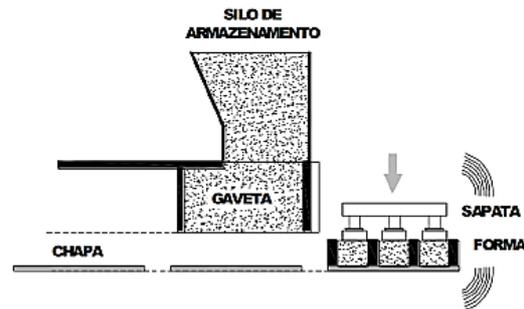
Figura 2.22 – Retorno da gaveta a posição inicial.



Fonte: PIROLA (2011).

- 4) Vibro - compressão: nesta etapa as sapatas juntamente com o sistema de vibração promovem a vibro-compressão do concreto até que a espessura final da peças seja alcançada, conforme mostra Figura 2.23.

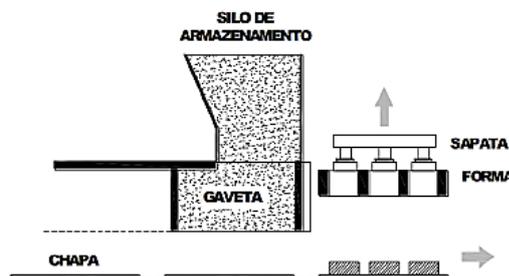
Figura 2.23 – Etapa de Vibro - compressão.



Fonte: PIROLA (2011).

- 5) Desforma: desliga-se o sistema de vibração e ocorre a subida da forma concomitantemente a subida da sapata, enquanto isso, uma nova chapa é posicionada sob a forma de modo a reiniciar o ciclo, conforme mostra a Figura 2.24, abaixo.

Figura 2.24 – Subida da forma concomitantemente à subida da sapata e liberação das PCPs.



Fonte: PIROLA (2011).

2.2.8 REQUISITOS E NORMALIZAÇÃO

A ABNT NBR 9781:2013 elaborada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT trata das especificações e métodos de ensaios relacionados às peças de concreto para pavimentação. A Norma estabelece um conjunto de requisitos que devem ser cumpridos para as PCPs, como: dimensões e tolerâncias máximas permitidas, valores limites exigidos para os ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água, resistência à abrasão, além de critérios a serem observados durante a inspeção visual e processo de amostragem. A Tabela 2.4, abaixo, traz alguns dos requisitos exigidos pela NBR 9781:2013.

Tabela 2.4– Requisitos exigidos pela ABNT NBR 9781:2013

Requisitos	Limites aceitáveis	
Tolerâncias dimensionais (mm)	Comprimento	$\leq 250 \pm 3$
	Largura *	$\geq 97 \pm 3$
	Espessura	$\geq 60 \pm 3$
Resistência característica estimada à compressão axial exigida aos 28 dias (MPa)	Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha	≥ 35
	Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	≥ 50
Absorção de água (%) **		≤ 6
Resistência à abrasão (largura da cavidade máxima em mm)	Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha	≤ 23
	Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	≤ 20

* medida real da largura mínima na área da peça destinada à aplicação de carga no ensaio de resistência à compressão. As peças podem apresentar pontos com largura inferior a 100 mm, desde que possuam uma área plana isenta de rebaixos e juntas falsas onde possa ser inscrito um círculo de 85 mm de diâmetro.

** não são admitidos valores individuais maiores do que 7 %.

2.3 CIMENTO, HIDRATAÇÃO E CONCRETOS

2.3.1 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é um material pulverulento de cor acinzentada popularmente conhecido apenas como cimento. Recebeu esse nome por apresentar tonalidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland. Foi criado e patenteado pelo construtor inglês, Joseph Aspdin, em 1824. O cimento Portland é um aglomerante hidráulico, pois após o seu endurecimento torna-se resistente à água. Quando associado aos agregados miúdos e/ou graúdos, além de outros aglomerantes como a cal, dá origem às argamassas e concretos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP, 2002).

O cimento Portland é composto de clínquer e de adições. O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento Portland, é constituído por calcário e argila. Para produção do clínquer a pedra de calcário é britada, moída e misturada em devidas proporções com a argila moída, a mistura vai ao forno e chega a 1450°C. O clínquer sai do forno em pelotas, é moído e transforma-se em pó, daí então são adicionadas diversas

matérias primas (gesso, escórias de alto-forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos) as quais nos permitem a obtenção de diversos tipos de cimento. O clínquer é constituído basicamente de 65% de CaO, sendo o restante silicato tricálcico $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$, silicato dicálcico $(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$, aluminato tricálcico $(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3$ e ferro aluminato tetracálcico $(\text{CaO})_4\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ (ABCP, 2002).

A Tabela 2.5 a seguir, apresenta os principais tipos de cimentos atualmente produzidos e sua composição.

**Tabela 2.5 – Tipos e composições dos cimentos fabricados no Brasil
(FERNANDES, 2011).**

IDENTIFICAÇÃO			COMPOSIÇÃO			
Tipo	Sigla	Classe	Clínquer + Gesso	Escória	Pozolana	Filler
COMPOSTO	CP II - E	25	56 a 94	6 a 34	0	0 a 10
		32				
		40				
	CP II - F	25	76 a 94	0	0	0 a 10
		32				
		40				
	CP II - Z	25	90 a 94	0	0	6 a 10
		32				
		40				
ALTO FORNO	CP III	25	25 a 65	35 a 70	0	0 a 5
		32				
		40				
POZOLÂNICO	CP IV	25	45 a 85	0	15 a 50	0 a 5
		32				
ARI	CP V	-----	95 a 100	0	0	0 a 5

Em geral as indústrias fabricantes de pré-moldados de cimento utilizam o cimento Portland do tipo V (CP V - ARI), pois este apresenta maior resistência logo nos primeiros dias de idade, permitindo o manuseio das peças e menor índice de quebras na fase de paletização (FERNANDES, 2011).

Segundo Neville (2016) o CPV – ARI apresenta elevada resistência nas primeiras idades devido ao fato de possuir um clínquer com alta finura (resultado de uma maior moagem) e maior concentração de silicato tricálcico - C3S (mais alto do que 55%, chegando à 70%).

A ABCP (2002) confirma que o desenvolvimento da alta resistência inicial é propiciado pela utilização de uma dosagem diferenciada de calcário e argila durante a produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com água, ele adquira maiores resistências rapidamente.

2.3.2 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

O contato do grão de cimento anidro com a água resulta na dissolução dos íons Ca^{2+} e Si^{4+} , os quais são advindos dos silicatos tricálcico (C_3S) e bicálcico (C_2S), estes componentes estão presentes em grandes quantidades (75 a 80%) na composição do cimento (RAMACHANDRAN, 1999).

O mesmo ocorre com outro componente importante, o aluminato tricálcico (C_3Al), que por sua vez contribui com os íons Ca^{2+} e $\text{Al}(\text{OH})^{3-}$ em solução. Logo, dá-se origem aos chamados embriões das fases hidratadas de silicatos e aluminatos de cálcio; para que estes se tornem núcleos estáveis é necessário que eles superem a chamada energia de ativação (E_a) (ROSSETTO, 2007). De acordo o referido autor, em termos práticos, isso representa uma redução na relação entre a área de superfície e o volume que satisfaça a redução da energia livre de Gibbs. Para maiores detalhes sobre as teorias dos estágios iniciais de hidratação do cimento Portland vide referências (YANG; NEUBAUER; JENNINGS, 1997).

A hidratação prossegue até que a pressão osmótica do sistema não seja suficiente para romper a superfície dos grãos anidros, ou seja, o grão entra em equilíbrio com o meio. Na sequência, dois são os mecanismos responsáveis pela redução da energia livre de Gibbs: o crescimento das fases hidratadas e a densificação (ROSSETTO, 2007). A contínua disponibilidade de água favorece o crescimento dos hidratados de silicatos e aluminatos de cálcio, enquanto o maior empacotamento das partículas favorece a densificação. Em uma pasta de cimento já hidratada, os produtos de hidratação formados são principalmente o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], a etringita (fases AFt), o monossulfato (fases AFm) e possivelmente fases amorfas ricas em íons Al^{3+} e SO_4^{2-} (PETER; MUNTEAN; MEIER BOHM, 2008).

O processo de hidratação é responsável por reduzir a separação das superfícies cimentícias, pelo crescimento das fases hidratadas que confinam moléculas de água em nano camadas ao redor dos grãos. Segundo Rossetto, Souza e Pandolfelli (2009), a configuração das superfícies hidratadas, em escala nanométrica, proporciona adesão ao material em função de pontos discretos de contato. De acordo com esses autores, a água confinada permite aderir duas superfícies que com ela possam realizar ligações de hidrogênio. As ligações de hidrogênio são formadas quando a eletronegatividade do elemento covalente ao hidrogênio for suficiente para mantê-lo susceptível à interação com o outro elemento que

disponibilize um par de elétrons não conjugados (ROSSETO et al., 2009). Portanto, a água além de provocar a hidratação do cimento, também apresenta uma função importante na adesão das partículas hidratadas de cimento, pois ela é capaz de doar duas ligações hidrogênio e de aceitar outras duas (ROSSETO, 2007; ROSSETO et al., 2009).

Enquanto existe água disponível para a hidratação dos grãos anidros de cimento e a estabilidade entre a área superficial e o volume dos núcleos ou embriões não é atingida, os íons são dissociados e transportados por osmose para regiões onde a água dos poros está menos saturada. A formação e precipitação dos núcleos ou embriões, naturalmente aproximam as superfícies dos grãos adjacentes. O consumo da água dos poros da matriz cimentícia cessa o processo de dissolução dos íons dos componentes do cimento, e a partir daí a água confinada atua somente na adesão das fases cimentícias.

2.3.3 O CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

No ranking dos materiais mais consumidos pelo homem o concreto está em segundo lugar, perdendo apenas para a água, isto se deve a diversos fatores tais como: resistência à água, possibilidade de obtenção de elementos estruturais de vários formatos e dimensões, baixo custo, pouca manutenção e componentes facilmente disponíveis no mercado. (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Devido às suas diversas propriedades, dentre elas a estrutural, é considerado hoje o mais importante material da construção civil (HELENE E TIBÉRIO, 2010).

O concreto é um material de construção proveniente da mistura, em proporções adequadas, de: aglomerantes, agregados e água. Os aglomerantes possuem a função de unir os fragmentos de outros materiais, em geral se emprega o cimento Portland, que reage com a água e endurece com o tempo. Os agregados são partículas minerais e de acordo com sua dimensão são divididos em dois grupos: agregados graúdos e miúdos (PINHEIRO, 2007).

O concreto tem que atender as prescrições de norma com relação às características mecânicas quando endurecido, e também possuir trabalhabilidade e consistência quando fresco, enquanto transportado e colocado nas fôrmas. Para se obter o concreto mais adequado e econômico é imprescindível o conhecimento de suas características. As propriedades do concreto variam de acordo com o seu estado físico em: propriedades do concreto fresco e propriedades do concreto endurecido. Estas estão relacionadas à resistência à compressão, durabilidade, impermeabilidade, estabilidade volumétrica e aparência. Aquelas relacionam-se a trabalhabilidade, plasticidade, facilidade ao ser transportado, lançado e adensado, entre outras (NEVILLE, 1982).

Quanto à resistência à compressão Mehta e Monteiro (2008) dividem os concretos em três categorias: concreto de baixa resistência ($f_{ck} < 20\text{MPa}$), concreto de resistência moderada ($20\text{MPa} \leq f_{ck} < 40\text{MPa}$) e concreto de alta resistência ($f_{ck} \geq 40\text{MPa}$).

Os concretos plásticos, são os concretos usualmente utilizados nas obras de construção civil, caracterizam-se pela facilidade de adensamento e trabalhabilidade, tal fato é possível devido ao elevado consumo de água, o qual ultrapassa a quantidade necessária à hidratação. O excesso de água promove a trabalhabilidade porém leva a formação de poros na pasta de cimento os quais acarretam a redução da resistência após o completo endurecimento. Duff Abrams, em 1919, estabeleceu a Lei de Abrams a qual considera que para concretos plásticos, perfeitamente adensados e com consistência fixa, as resistências são inversamente proporcionais à relação água/cimento (NEVILLE, 1997).

A ausência de conhecimento técnico e/ou equipamentos adequados para mistura e adensamento faz com que na prática seja comum a produção de concretos extremamente plásticos, com relação água/cimento acima da ideal. Esta prática resulta na ocorrência de fenômenos indesejáveis para a estrutura tais como: exsudação, elevada porosidade e absorção, entre outros, estes, por sua vez, acarretam a redução da resistência, elevada permeabilidade e diminuição da vida útil da estrutura (FERNANDES, 2011).

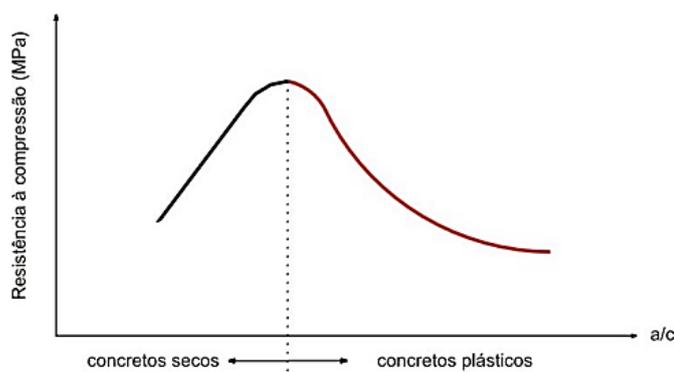
Portanto o concreto plástico apesar de possuir inúmeras vantagens, também em alguns casos, pode apresentar deficiências que dificultam ou inviabilizam a sua utilização. Para suprir essa lacuna, surgiram os conhecidos concretos especiais, os quais apresentam propriedades distintas e bem definidas. Neste grupo, aparece o concreto seco, o qual é utilizado na fabricação das PCPs, objeto de estudo da presente pesquisa.

2.3.4 O CONCRETO SECO

Para a fabricação de artefatos de cimentos dentre eles destacam-se as peças de concreto para pavimentação, blocos de concreto, tubos de concreto, placas, entre outros; utiliza-se o concreto seco. De acordo com Oliveira (2004), o concreto seco encontra-se no grupo dos concretos especiais e devido a menor quantidade de água utilizada apresenta baixa relação água/materiais secos, elevada consistência e coesão, e ainda, diferencia-se pela forma como o ar aprisionado é retirado. Também conhecido por “concreto farofa”, “zero-slump” ou ainda “no-slump”. Ao contrário dos concretos plásticos, os concretos secos não seguem à risca a “lei de Abrams”, uma vez que a diminuição do fator a/c não significa melhora da resistência à compressão. No concreto seco a resistência é proporcional ao grau de compactação que o equipamento proporciona às peças e maiores quantidades de água possuem função lubrificante reduzindo o atrito interno entre os grãos, melhorando a trabalhabilidade e compactabilidade da mistura. Portanto, para um mesmo traço e energia de compactação, acrescentar água à mistura até certo ponto (umidade ótima) promove a redução da porosidade e conseqüente aumento da resistência. Tal comportamento pode ser

observado na Figura 2.25 abaixo que relaciona o fator a/c e a resistência a compressão (OLIVEIRA, 2004).

Figura 2.25 – Resistência à compressão em função da relação água/cimento (a/c).



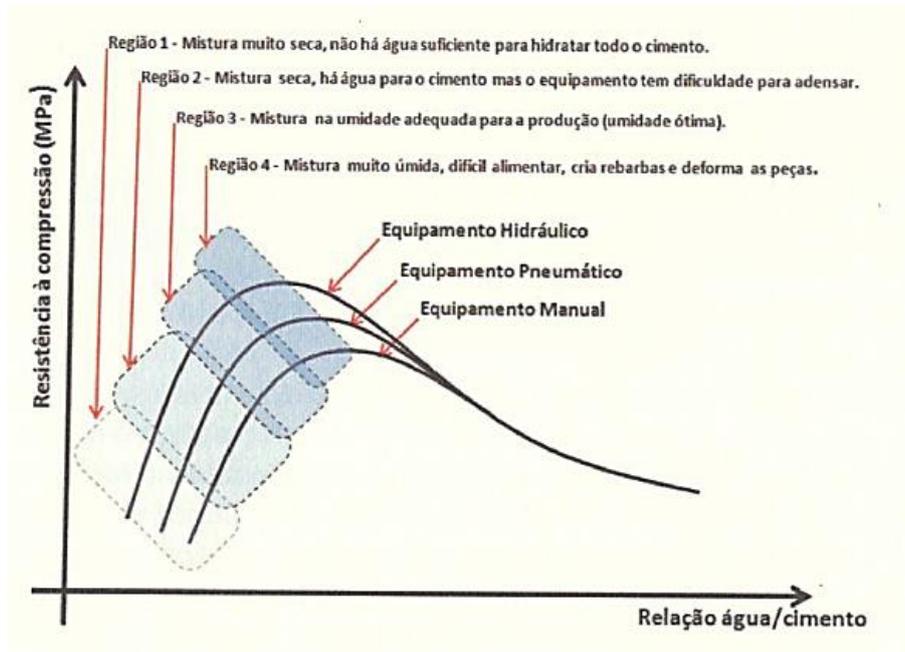
Fonte: Oliveira (2004).

De acordo com Marchand et. al (1996), por conta da necessidade de desforma imediata neste concreto utiliza-se uma menor quantidade de água fazendo com que ele apresente consistência superior à dos concretos usuais (plásticos). Para sua compactação torna-se necessária a adoção de equipamentos especiais (JUVAS, 1993). No caso das peças pré-moldadas de concreto para pavimentação utilizam-se vibroprensas com o intuito de conferir, à mistura, alta compactidade (OLIVEIRA, 2004).

Segundo Marchioni (2012), o concreto seco apresenta facilidade de compactação, tal fato está relacionado com as características físicas da mistura e com a mobilidade das partículas dentro da forma. De acordo com a autora, compactar as peças de concreto por meio da vibro prensagem é bastante eficiente, uma vez que reduz o volume de vazios, aumenta a resistência mecânica e diminui a permeabilidade do produto final.

É possível observar que para um mesmo traço e mesma relação a/c , aplicando-se maiores energias de compactação, obtém-se maiores valores de resistência à compressão. Portanto, conclui-se que equipamentos mais fortes (hidráulicos) permitem alcançar maiores resistências (FERNANDES, 2011). A Figura 2.26, mostra o referido comportamento.

Figura 2.26 – Comportamento do Concreto em Relação a Adição de Água.



Fonte: Fernandes (2011).

As propriedades requeridas no estado endurecido para as PCPs tais como: resistência à compressão, resistência à abrasão, durabilidade e textura superficial, estão diretamente relacionadas à porosidade (no concreto seco existem pelo menos dois tipos de porosidade, a macro porosidade a qual é relacionada aos vazios decorrentes da falta de adensamento ou má granulometria; e a micro porosidade da pasta a qual é ocasionada quando se utiliza mais água do que o necessário para a hidratação do cimento), coesão (característica que permite que as peças resistam aos impactos provenientes da movimentação da bandeja e do transporte logo após a extrusão), teor de umidade e tipo de equipamento utilizado para vibro compressão (FERNANDES, 2011).

Segundo a ABNT NBR 9781:2013, o concreto utilizado nas peças de concreto para pavimentação deve ser constituído de cimento Portland, agregados e água, sendo permitido o uso de aditivos e pigmentos conforme requisitos abaixo:

- cimento Portland: pode ser de qualquer tipo e classe, devendo obedecer às ABNT NBR 5732:1991, ABNT NBR 5733:1991, ABNT NBR 5735:1991, ABNT NBR 5736:1999, ABNT NBR 11578:1997 e ABNT NBR 12989:1993;
- agregados: podem ser naturais, industriais ou reciclados, obedecendo a ABNT NBR 7211:2009 ou outras Normas Brasileiras pertinentes;
- água: deve atender à ABNT NBR 15900-1:2009;
- aditivos: devem atender à ABNT NBR 11768:2011;
- pigmentos: deve ser de base inorgânica e atender à ASTM C 979/C 979M.

De acordo com a ABNT 9781:2013 as peças dos lotes produzidos devem ser inspecionadas visualmente de modo a identificar as que apresentam defeitos que possam vir a causar danos à estética, assentamento e desempenho estrutural do pavimento.

2.4 PROCESSO DE CURA

O procedimento de cura tem por objetivo proporcionar condições adequadas de temperatura e umidade para que ocorra a perfeita hidratação do cimento, obtendo assim um concreto com resistência mecânica e durabilidade apropriados (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

O processo de cura tem por finalidade evitar a perda de água de amassamento de qualquer produto à base de cimento a qual é provocada por fatores relacionados à temperatura ambiente, o vento e umidade relativa do ar. A cura é extremamente importante pois possui influência direta nas propriedades do concreto endurecido relacionadas ao ganho de resistência, redução da porosidade, absorção de água, fissuração e eflorescência (BATTAGIN et al, 2010).

Para Fernandes (2011) o ideal seria curar o concreto em compartimentos com umidade acima de 80% e temperatura variando de 30°C a 65°C, visando a máxima hidratação do produto à base de cimento.

A cura das peças de concreto para pavimentação se assemelha à cura utilizada para os demais elementos pré-moldados de concreto e em geral é realizada por meio de métodos convencionais, tais como: cobertura com lona plástica, câmara úmida e cura à vapor. O tipo de cimento utilizado determina o método de cura mais eficaz para o ganho rápido de resistência, em geral, para cura de PCP os métodos mais eficientes são a cura úmida e a cura à vapor em ambiente saturado (FERNANDES, 2011).

Nas indústrias fabricantes de pré-moldados de cimento a atividade de cura é o processo mais demorado da produção, sendo também conhecida como “tempo morto”. Para tanto, visando-se obter a máxima produção e redução do tempo de espera na fabricação torna-se necessário acelerar a cura do concreto através da utilização de cimentos de alta resistência inicial – ARI, aditivos aceleradores e associação de um sistema de cura eficaz (MELO, 1996).

➤ SISTEMAS DE CURA CONVENCIONAIS

- **Cura úmida:**

Na cura úmida o produto pré-fabricado de concreto deve ser mantido em ambiente saturado com umidade elevada, sendo o ideal acima de 95%. O correto é utilizar uma câmara

dotada de equipamentos que nebulizem água e o gotejamento deve ser evitado para que não ocorra a cavitação na superfície do concreto (ABCP, 2002).

De acordo com a ABNT NBR 9479:1994 a câmara úmida é um compartimento isolado e hermeticamente fechado, de dimensões adequadas para estocagem dos elementos para cura. A câmara deve ser construída de material resistente não corrosivo, a atmosfera deve ser saturada de água (umidade não deve ser inferior a 95%) de modo a assegurar que as superfícies expostas dos elementos mantenham-se úmidas e a temperatura mantida constante em (23 ± 2) °C. Durante o dia deve-se fazer ao menos três leituras das condições de temperatura e umidade.

- **Cura térmica:**

O processo de cura térmica promove a aceleração da reação de hidratação, uma vez que a alta temperatura e a atmosfera saturada de vapor reduzem o período de latência entre o cimento e a água, fazendo com que a reação de hidratação ocorra mais cedo, promovendo o rápido enrijecimento do concreto (NEVILLE, 1997).

Quando se utiliza a cura térmica deve-se tomar cuidado com as micro fissurações que podem decorrer devido a evaporação de parte da água necessária à hidratação do cimento. Também deve-se atentar para o fato de que este processo de cura devido a rápida velocidade inicial de hidratação pode levar a formação de espaços intersticiais, os quais ocorrem devido à falta de tempo para a difusão dos produtos para as posições mais distantes das partículas de cimento, podendo levar a formação de um produto final com maior porosidade e com menor potencial de desenvolvimento de resistência mecânica final (SALVADOR FILHO, 2001).

Para Camarini e Cincotto (1995), este sistema de cura é o mais eficiente, pois proporciona uma maior rapidez na entrega das peças em comparação com o processo de cura convencional, além de possibilitar um melhor aproveitamento das formas, equipamentos e espaço para estocagem dos elementos.

2.5 CURA POR CARBONATAÇÃO ACELERADA

A cura de produtos cimentícios não armados por meio da carbonatação acelerada vem diretamente ao encontro da grande necessidade industrial referente ao aumento da produção e ganho de tempo, uma vez que o tempo morto (tempo de cura) é extremamente reduzido (SHAO et al 2006). Ye (2003), Shao et al. (2006), Galan et al. (2010), B. Zhan et al. (2013), Neves Jr (2014), Jang et al (2016), Bertos et al. (2017), D. Zhang et al. (2017), mostraram que a referida cura além de capturar CO₂ promove a densificação da microestrutura e alterações nas ligações químicas dos produtos cimentícios, levando ao aumento de resistência mecânica

e durabilidade. Segundo essas referências bons resultados são obtidos nos processos em que a cura por CO₂ é utilizada para substituir totalmente ou parcialmente a cura úmida e cura térmica, tradicionalmente empregadas. Shao e Morshed (2015), verificaram que a cura por CO₂ permite duração consideravelmente menor do que as curas tradicionais, além de contribuir para melhorar as propriedades de alta resistência e baixa permeabilidade do concreto. Boyd et al (2012) compararam a cura por carbonatação acelerada com a cura à vapor e verificaram que após a cura por carbonatação o concreto passa a exibir maior resistência à permeabilidade de cloretos e à ataques de sulfatos e menores danos foram observados por congelamento e descongelamento; tais fatos foram atribuídos ao teor significativamente reduzido de hidróxido de cálcio na superfície do concreto carbonatado. Alguns estudos tem associado a cura por CO₂ às curas tradicionais, He et al. (2016) submeteram amostras à cura de CO₂ e posterior cura úmida, a pós-hidratação através da cura com água aumentou a formação de gel C-S-H, etringita e monocarboaluminato, os quais promoveram a diminuição da porosidade da matriz cimentícia. Já Pauletti (2004) analisou a cura úmida, realizada antes da cura por CO₂, e verificou que a cura submersa ou úmida ao passo que promoveu condições satisfatórias para hidratação do cimento, acabou ocasionando o fechamento dos poros, reduzindo a velocidade da reação de carbonatação, não sendo, contudo, a mais indicada para a finalidade abordada neste trabalho. Lo e Lee (2002) compararam a cura ao ar com a cura úmida realizadas anteriormente à Cura por CO₂ e observaram que concretos curados em água apresentam 72% da carbonatação dos concretos curados ao ar, após 03 meses de ensaio acelerado. Os estudiosos concluíram que a cura ao ar faz com que os poros fiquem mais abertos, o que propicia o aumento da quantidade de canais intercomunicáveis e conseqüente aumento da velocidade de difusão de dióxido de carbono.

2.5.1 REAÇÃO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA

Através da reação de carbonatação, a qual possui natureza exotérmica, os produtos de hidratação do cimento, sendo o principal deles, o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), reagem com o CO₂, gerando produtos à base de carbonato e gel de sílica. A reação principal de carbonatação ocorre entre o Ca(OH)₂ e o CO₂ na presença de água e é apresentada a seguir:



Numerosos estudos realizados na segunda metade do século XX revelaram que não só $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mas também C-S-H pode ser submetido a carbonatação. De fato, relata-se que a carbonatação do hidrato silicato de cálcio ocorre em um segundo momento, quando a maior parte do hidróxido de cálcio já foi consumido (MORANDEAU et al., 2014). A reação é apresentada abaixo:



O principal produto formado pelas reações de carbonatação é o carbonato de cálcio (CaCO_3), o qual é insolúvel e aparece na forma mineralógica como, calcita, vaterita e raramente na forma de aragonita (SMOCZYK, 1976).

De acordo com a composição química do cimento, a presença de adições leva a formação de outros tipos de hidratos em menor quantidade, dentre os quais destacam-se $\text{Mg}(\text{OH})_2$, KOH e NaOH, estes também sofrem carbonatação e geram carbonatos como produtos.

De acordo com Maries (1985), o mecanismo da reação de carbonatação, em suas etapas sequenciais, ocorre conforme descrito abaixo:

- 1) Difusão de CO_2 no ar;
- 2) Permeação de CO_2 através do sólido;
- 3) Solvatação de CO_2 (gasoso) para CO_2 (aquoso);
- 4) Hidratação de CO_2 (aquoso) para H_2CO_3 . Este é um passo lento e determinante da taxa;
- 5) Ionização de H_2CO_3 para H^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} . Ocorre quase instantaneamente, fazendo com que o pH caia aproximadamente 3 unidades, tipicamente de 11 para 8;
- 6) Dissolução das fases mais solúveis do cimento hidratado, sendo a mais facilmente dissolúvel o $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
- 7) Nucleação de CaCO_3 , C – S – H. A nucleação é favorecida por temperaturas ligeiramente elevadas e pela presença de material finamente dividido;
- 8) Precipitação de fases sólidas. No começo, vaterita e aragonita podem ser formadas, mas são revertidos em calcita. Carbonato de cálcio amorfo pode ser encontrado no produto final.
- 9) Carbonatação Secundária. O gel C–S–H se forma e é progressivamente descalcificado, convertendo-se em última análise em CaCO_3 .

Desde o início do século XX, diversos autores têm estudado a carbonatação de hidratos de cimento, dentre eles destacam-se: Neville (1963), Ho e Lewis (1987), Parrot (1987), Saetta e Vitaliani (2004), Pauletti (2004), Villain et al. (2007). Historicamente o foco é dado a “carbonatação intempérica” do concreto armado, a qual ocorre a longo prazo e é deletéria à armadura, uma vez que causa a redução do pH do concreto promovendo a destruição da película passivadora que envolve o aço, deixando o material suscetível à corrosão, acarretando o declínio da durabilidade da estrutura de concreto armado (JANG et al., 2016).

Estudos recentes de Ye (2003), Shao et al. (2006), Galan et al. (2010), B. Zhan et al. (2013), Neves Jr (2014), Jang et al (2016), Bertos et al. (2017), D. Zhang et al. (2017), têm analisado e demonstrado que a reação de carbonatação quando utilizada como cura não acarreta a deterioração do material cimentício não armado, ao contrário, promove benefícios a este, dentre os quais destacam-se a capacidade potencial do concreto em absorver CO₂ da atmosfera, ganhos referentes as propriedades mecânicas, além de maior durabilidade.

2.5.2 FATORES QUE INFLUENCIAM O PROCESSO DE CARBONATAÇÃO

A reação de carbonatação sofre influência direta do meio ambiente em que a amostra está inserida e da composição química desta. Para tanto, os parâmetros relacionados a difusividade e reatividade do CO₂ são os mais importantes e estão relacionados abaixo.

- **Temperatura:** A taxa de difusão e a taxa de reação de carbonatação aumentam com a temperatura (LIANG et al. (2000) e LAGERBLAD, (2005)). Segundo Liu et al. (2001) e Haselbach e Thomle (2014) o sequestro de CO₂ à pressão atmosférica é crescente até alcançar a temperatura de 60°C, a partir daí ele começa a diminuir. Observou-se que o aumento da temperatura até 60°C promove o aumento da difusão do CO₂ para o interior dos poros e da quantidade lixiviada de íons Ca²⁺, ocasionando o aumento da carbonatação; já temperaturas maiores que 60°C reduzem a solubilidade do CO₂ na água, diminuindo assim a taxa de carbonatação.
- **Concentração de CO₂ e Pressão:** ambientes com taxas de pressão e concentração de CO₂ elevadas aumentam a velocidade de difusão do CO₂, favorecendo a carbonatação (STUMPP (2003) e YE(2003)). De acordo com Bukowski e Berger (1979), Bernal et al. (2014) e Mo et al. (2016) injetar à alta pressão grandes quantidades de CO₂ na matriz cimentícia antes dos poros serem fechados promove um aumento da frente de carbonatação.

- Teor de água: a água não é consumida durante a reação de carbonatação, porém é essencial para desencadeá-la. Portanto, um concreto muito seco não carbonata devido à falta de água necessária para que os íons se formem, reajam e produzam CaCO_3 . Em condições saturadas a carbonatação torna-se lenta devido à redução da velocidade de difusão do gás ((LIANG et al. (2000) e LAGERBLAD, (2005)).

Segundo Sorochkin et al. (1975) quanto menor o fator a/c, maior é a permeabilidade do gás, ou seja, maior é a difusão do CO_2 no material cimentício.

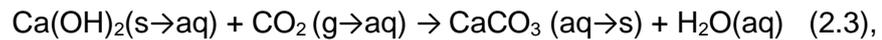
Para Boyd et. al (2012) um dos fatores que impede a carbonatação precoce é o bloqueio dos poros capilares por água livre. Os autores informam que para concretos com elevado fator a/c, a água livre da superfície deve ser removida antes que a reação de carbonatação aconteça, de modo a não prejudicar a formação dos produtos da reação.

- Umidade relativa: A umidade da câmara de carbonatação interfere diretamente na difusão do CO_2 e na cinética da reação de carbonatação. Alguns resultados relatados por diversos autores quanto a umidade relativa ideal para que a reação ocorra são: Helene (1986) entre 65 e 85%, Papadakis et al. (1989) entre 50 e 65%, Neville (1997) entre 50 e 70%, Kulakowski (2002) entre 50% e 70%, Pauletti (2004), entre 50% e 70%, Miranda (2014) entre 50% e 70%.
- Composição química do Cimento Portland: Os elementos Ca, Mg, K e Na influenciam consideravelmente na carbonatação de matrizes cimentícias. Os hidratos de cálcio presentes nas fases Ca(OH)_2 , C-S-H e C-A-S-H são os principais envolvidos na reação de carbonatação (PETER et al., 2008). Além disso, a adição de materiais complementares cimentícios (como cinzas de carvão, escória de alto forno, etc) pode resultar na carbonatação de componentes tais como Mg(OH)_2 , KOH e NaOH (MEIER et al., 2007). Segundo Kobayashi e Uno (1989), Helene (1993), Stumpp et al (2003), cimentos com adições minerais exibem porosidade reduzida, o que atrapalha a difusão do CO_2 , porém promove-se a aceleração da frente de carbonatação, pois prepondera-se o efeito da reserva alcalina. Ou seja, uma vez que a quantidade de Ca(OH)_2 existente é menor, a “barreira” de CaCO_3 produzida também é menor, permitindo um maior avanço da frente de carbonatação.

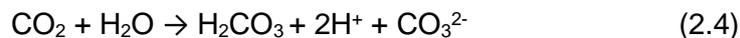
Sabe-se que a reação de carbonatação principal ocorre através do hidróxido de cálcio, porém outros componentes advindo da reação de hidratação do cimento sofrem carbonatação, a seguir veremos de forma particularizada a carbonatação dos produtos da hidratação do cimento CPV- ARI, utilizado na confecção das peças de concreto para pavimentação.

➤ *Carbonatação de hidróxido de cálcio:*

Em geral a reação de carbonatação que ocorre na pasta de cimento endurecida é expressa conforme a Equação (2.3) a seguir.



Essa reação ocorre porque o hidróxido de cálcio além de ser o mais comum elemento dentre os hidratos de cimento Portland é o que apresenta maior solubilidade em água; assim, a reação com o CO₂ prontamente prossegue. Como Eq. (2.3) mostra, a carbonatação do hidróxido de cálcio ocorre entre um sólido e um gás, sendo a presença de água necessária para a dissociação iônica do hidróxido de cálcio e do CO₂. No entanto, a referida reação é apropriada para descrever a reação de carbonatação do hidróxido de cálcio em solução aquosa sob condições ideais, sendo inadequada para explicar a carbonatação da pasta de cimento endurecida (SAETTA et al, 1993). A reação de carbonatação da pasta de cimento endurecida é conhecida por ocorrer dentro de poros capilares que são preenchidos com uma solução de elevado pH e hidróxido de cálcio geralmente em estado sólido (ROTHSTEIN et al, 2002). A solução nos poros consiste de muitos cátions com íons hidróxido existentes em equilíbrio. O CO₂ de fontes externas entra, se dissolve na solução porosa e dá origem ao ácido carbônico (H₂CO₃). Conforme demonstra a Eq. (2.4) (JOHANNESSON et al, 2001; ZIVICA et al, 2001).



O ácido carbônico reage com o hidróxido de cálcio dissolvido na solução dos poros e precipita sob a forma de carbonato de cálcio, o qual apresenta baixa solubilidade, conforme Eq.(2.5), abaixo.

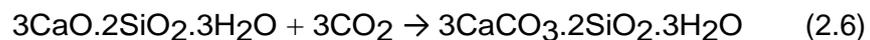


Conforme a reação continua, o hidróxido de cálcio contido na pasta de cimento diminui e o carbonato de cálcio aumenta, ocorrendo concomitantemente a redução do pH da pasta endurecida (PETER et al, 2008; JANG et al, 2015).

➤ *Carbonatação do Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H):*

Através do processo de hidratação o cimento portland produz silicato de cálcio hidratado (C-S-H), Ca(OH)₂ e sulfoaluminatos de cálcio hidratados, tais como

trisulfo aluminato (etringite) e monossulfato aluminato (Mehta e Monteiro, 2006). Estudos relatam que a carbonatação do C-S-H inicia-se somente após a carbonatação do hidróxido de cálcio (Morandeu et al, 2014). Ocorre que a reação de carbonatação ao consumir os íons Ca^+ , oriundos do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e presentes na solução dos poros, induz por equilíbrio químico a liberação de Ca^+ do C-S-H. Este processo altera a relação Ca/Si do C-S-H modificando a sua composição e transformando o C-S-H em um gel de sílica. A reação de carbonatação que envolve o C-S-H, pode ser vista pela equação (2.6) abaixo (LAGERBLAD, B., 2005; SULAPHA et al, 2003).



➤ *Carbonatação dos sulfoaluminato de cálcio hidratados:*

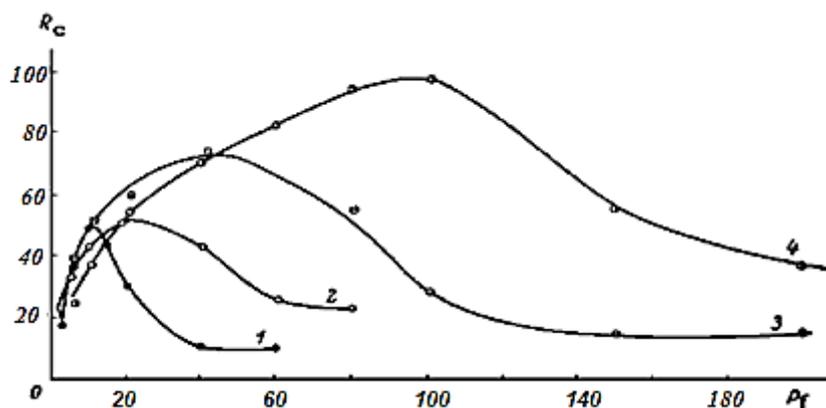
A reação de hidratação do C_3A e C_4AF dá origem à etringita e às fases AFm ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-mono}$). A composição química da etringita e do AFm varia de acordo com a duração da hidratação, sendo a concentração de SO_4 o fator mais influente. As fases do AFm em pasta de cimento Portland enrijecido geralmente consistem em monossulfatos (Mehta e Monteiro, 2006). De acordo com Dilnesa et al. (2007) as fases de AFm são formadas por uma estrutura estratificada que consiste de uma camada primária carregada positivamente $[\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})(\text{OH})_6]^+$ e uma camada intermediária negativamente carregada $[\text{X nH}_2\text{O}]^-$, onde o X pode ser substituído pelo possível ânions SO_4 , OH , Cl e CO_3 . Sendo assim, a fixação de CO_2 na pasta de cimento pode ser na forma de monocarbonato $3\text{CaO}(\text{AlnFe}1-n)\text{2O}_3(\text{CaCO}_3)_m\text{H}_2\text{O}$ e bicarbonato $3\text{CaO}(\text{AlnFe}1n)\text{2O}_3(\text{CaCO}_3)_{0,5}(\text{Ca}(\text{OH})_2)_{0,5}m\text{H}_2\text{O}$. A carbonatação da etringita produz gesso, calcita, gel de alumina e gel amorfo como novos produtos de reação (NISHIKAWA et al, 1995; GROUNDS et al, 1988, KIRA et al, 1979).

- Porosidade: a porosidade está diretamente relacionada com a permeabilidade, difusão de CO_2 e velocidade de carbonatação, portanto quanto maior for a porosidade, maior será a difusividade de CO_2 e a velocidade da carbonatação. A compactação e as condições de cura da matriz cimentícia influenciam diretamente a porosidade (POON et al, 1986; ROYA et al, 1999). Ishida e Maekawa (2000) observaram que os poros ficam mais finos após a carbonatação. Os autores informaram que o volume do cristal de CaCO_3 é cerca de 11,7% maior que o do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, tal fato contribui significativamente para o ganho de resistência mecânica no material cimentício.
- Tipo, tamanho e forma das amostras: as amostras e seus formatos podem influenciar na profundidade da frente de carbonatação. Kulakowski (2002), comparou a

profundidade de carbonatação de amostras de cilíndricas (diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm) e prismáticas (40x40x160 mm) referentes a um mesmo material (argamassa) e mesmas condições de exposição e observou que o corpo-de-prova prismático apresentou profundidade de carbonatação média de 9,23 mm, enquanto para o corpo-de-prova cilíndrico a profundidade de carbonatação média foi de 13,81 mm, ou seja, aproximadamente 50% maior. A estudiosa atribuiu tal resultado à possível soma de vetores na difusão do CO_2 das amostras cilíndricas.

- **Pressão de compactação:** A pressão de compactação utilizada no processo produtivo para compactar pré-moldados cimentícios não armados visa o ganho de resistência do produto. Porém quando se pensa em carbonatar a amostra deve-se considerar que a compactação ao reduzir a porosidade e a permeabilidade, dificulta a difusão de CO_2 , precipitando menos CaCO_3 nos poros, resultando em menor desenvolvimento de resistência quando comparado a um concreto que não sofreu compactação (SOROCHKIN et. al (1975). Neste sentido, visando-se obter a máxima resistência à compressão Sorochkin et. al (1975) analisaram amostras de concreto com diferentes fatores a/c compactadas e carbonatadas. A Figura 2.27 informa a pressão de compactação ideal à ser utilizada no processo produtivo de acordo com o fator a/c utilizado na confecção do concreto para se obter a máxima resistência das peças carbonatadas.

Figura 2.27: Relação de Resistência à compressão (MPa) e pressão de compactação de formação P_f (MPa) de amostras carbonatadas com diferentes relações a/c, sendo: (1) 0,14; (2) 0,12; (3) 0,1; (4) 0,08.



Fonte: Sorochkin et. al (1975).

2.5.3 MÉTODOS DE CARBONATAÇÃO E SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

- Carbonatação com CO₂ seco sob pressão: neste método as amostras sólidas são desidratadas pelo fluxo do gás seco, acarretando a falta de água necessária à reação de carbonatação (FERNANDEZ BERTOS et al.,2004).
- Carbonatação em sistemas estáticos e dinâmicos à baixas pressões: A reação de carbonatação por ser exotérmica vaporiza uma porção da água presente no material cimentício. No sistema dinâmico, o fluxo constante de CO₂ ajuda a remover esse vapor de água, enquanto que no sistema estático, o vapor de água fica preso podendo saturar a atmosfera (BUKOWSK, 1979).
- Carbonatação a vácuo: Este método é realizado à pressões próximas do vácuo na presença de um dessecante (VENHUIS, 2001). Estas condições diminuem a resistência do transporte de água do sólido carbonatante para o dessecante devido ao grande espaço livre médio deixado para as moléculas de vapor de água. Este método tem mostrado dar uma carbonatação mais completa.
- Carbonatação à alta pressão: O ambiente com elevada pressão promove a maior difusividade de CO₂ para o interior dos poros do material cimentício, portanto grandes quantidades de gás são introduzidas em toda a amostra antes do fechamento dos poros, logo aumenta-se a carbonatação (BUKOWSK, 1979).
- Carbonatação supercrítica: Nessas condições o CO₂ se comporta como um gás denso, sem tensão superficial, facilitando e aumentando a penetração nos poros menores, o resultado é um produto com propriedades mecânicas aprimoradas e considerável mudança morfológica (JONES, 1996).

2.5.4 VANTAGENS DA CURA DE CARBONATAÇÃO ACELERADA EM PRÉ-FABRICADOS CIMENTÍCIOS NÃO ARMADOS

O estudo da arte realizado nesta pesquisa indica que submeter produtos pré-fabricados cimentícios sem a presença de armaduras à cura por carbonatação acelerada tem acrescido benefícios de grande valor ambiental devido a absorção de CO₂, além de ganhos relacionados de resistência mecânica e durabilidade. Estes serão melhor explanados a seguir.

2.5.4.1 Resistência Mecânica e Durabilidade

Segundo Ye (2003), Shao et al. (2006), Galan et al. (2010), Wang et al. (2012), B. Zhan et al. (2013), Yuan et al. (2013), Neves Jr (2014), Jang et al (2016), Bertos et al. (2017), D. Zhang et al. (2017), obedecendo-se as condições necessárias de umidade relativa, pressão,

concentração de CO₂ e temperatura; a cura por carbonatação acelerada em poucas horas proporciona à amostra elevados valores de resistência mecânica à compressão, os quais pelo processo de cura convencional, somente seriam obtidos com o passar de vários dias. Tal fato ocorre pois a reação de carbonatação gera como produto CaCO₃, este precipita nos poros, reduzindo a porosidade, aumentando a densidade e a resistência do material cimentício.

2.5.4.2 Absorção de CO₂

Com o intuito de reduzir a presença de gases do efeito estufa na atmosfera, a tecnologia do sequestro de CO₂ em pré fabricados não armados, tornou-se uma dentre várias estratégias utilizadas no controle do aquecimento global. Tal tema a ser desenvolvido na presente pesquisa, além da questão ambiental agrega grande valor econômico, uma vez que envolve o mercado mundial de créditos de carbono.

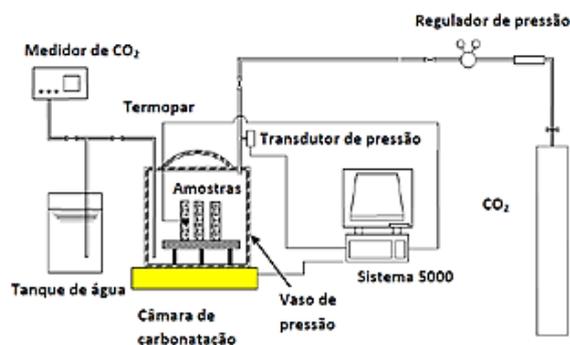
El-Hassan e Shao (2013) destacam que o uso comercial do CO₂ nos processos de cura nas indústrias agrega ainda mais valor ao dióxido de carbono. A indústria *CarbonCure*, localizada no Canadá, é uma das empresas que já tem utilizado e desenvolvido a estratégia de captura de CO₂ através da cura por carbonatação em materiais cimentícios.

Observa-se que ao se expor por pouco tempo (algumas horas) o material cimentício sem armadura recém fabricado, ou seja, com pouca idade à cura em câmara de carbonatação com elevadas concentrações de CO₂, condições adequadas de umidade relativa, pressão e temperatura, ocorre o fenômeno da carbonatação acelerada, a qual promove a captura do CO₂ presente na atmosfera da câmara e ganhos de resistência mecânica, cujos valores são comparáveis aos obtidos em 28 dias quando se utiliza o processo de cura convencional ((WANG et al. (2012) e YUAN et al. (2013)).

2.5.5 MÉTODOS PARA QUANTIFICAR O CO₂ CAPTURADO

Para o procedimento experimental as matrizes cimentícias recém fabricadas devem ser inseridas em câmara de carbonatação configurada adequadamente quanto a temperatura, umidade e concentração de CO₂, para que se inicie a reação de carbonatação. A Figura 2.28 mostra amostras inseridas na câmara de carbonatação.

Figura 2.28– Câmara de carbonatação - configuração de cura de carbonatação usando CO₂ recuperado pressurizado.



Fonte: (SHAO et al.,2010).

O sistema apresentado conta com o fornecimento contínuo de dióxido de carbono de alta pureza em uma câmara selada na qual os produtos pré-fabricados de cimento são inseridos após a sua produção. A pressão e a concentração de CO₂ permanecem constantes durante todo o procedimento e o pico de temperatura varia de acordo com o teor de cimento utilizado nos produtos (SHAO et al. (2010)).

Diversas são as estratégias utilizadas para medir a quantidade de CO₂ capturado em produtos cimentícios, a seguir serão apresentadas as principais técnicas encontradas nesta revisão bibliográfica.

2.5.5.1 Método do Ganho de Massa

Está bem documentado por Shao et al. (2006), Shao et al. (2010), Shao e Lin (2011), Rostami et al (2012), B. Zhan et al. (2013), Neves Jr. (2014), que a carbonatação acelerada em materiais a base de cimento com pouca idade, obedecendo determinadas condições experimentais de umidade, temperatura, concentração de CO₂, tempo de exposição e etc, aumenta a massa dos corpos de prova pela precipitação de CaCO₃ na micro estrutura, alterando a porosidade, aumentando a densidade e por fim elevando a resistência, sendo o método de ganho de massa plenamente eficaz.

Ocorre que durante o período de cura na câmara de carbonatação, acontecem simultaneamente as reações de vaporização, hidratação e carbonatação, logo, o aumento de massa resulta de um somatório de vários efeitos advindos dessas reações.

Neste experimento, a quantidade de CO₂ absorvida pode ser estimada através do ganho de massa dado pela equação 2.7 que considera a massa da amostra antes e após a carbonatação, incluindo a massa de água perdida durante a reação e a massa inicial de cimento Portland da mistura.

$$G.deMassa(\%) = \frac{(Massa)_{depois,CO_2} + (Massa)_{P.de. \acute{A}gua} - (Massa)_{antes,CO_2}}{(Massa)_{S.do. Aglomerante}} \quad (2.7)$$

Onde:

$(Massa)_{antes, CO_2}$ – Massa da amostra antes da carbonatação;

$(Massa)_{depois, CO_2}$ – Massa da amostra depois da carbonatação;

$(Massa)_{P.de. \acute{A}gua}$ – Massa de perda de água;

$(Massa)_{S.do. Aglomerante}$ – Massa inicial dos aglomerantes reativos.

A água a ser computada na equação (2.7) advém tanto da umidade interna do corpo prova como da reação de carbonatação, logo a mesma participa da massa do corpo de prova e deve ser computada na equação. Esta água é medida através de papéis absorventes dispostos no interior da câmara (SHAO et al., 2006).

Não se pode afirmar que corpos de prova curados ao ar livre, por apresentarem menor umidade inicial, apresentarão menor potencial de carbonatação, pois a menor formação de hidratos devido à cura seca poderá propiciar uma menor barreira alcalina, permitindo o avanço da frente de carbonatação e conseqüentemente maior formação de $CaCO_3$ e H_2O (EL-HASSAN E SHAO, 2013).

Portanto, para que o cálculo da Captura de CO_2 seja realizado de forma correta não é possível negligenciar a água perdida.

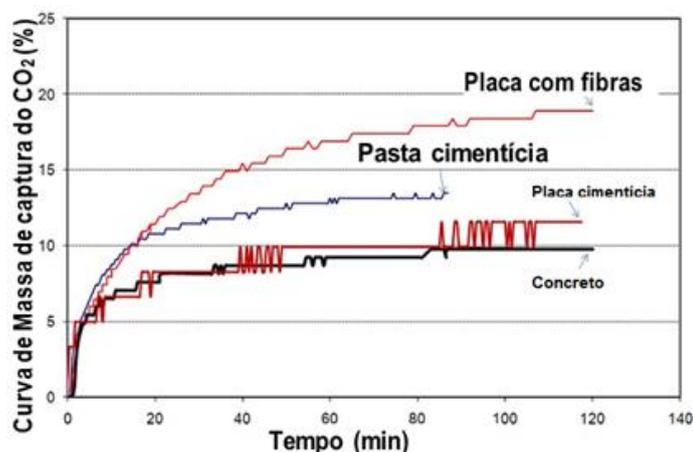
2.5.5.2 Método da Curva de Massa

O segundo método utilizado para quantificar a absorção de CO_2 é o método da curva de massa. As curvas de massa são obtidas usando uma balança eletrônica (conforme mostrado na Figura 31) para registrar o ganho de massa *in situ* das amostras pré-moldadas em função do tempo durante todo o processo de carbonatação, além de sensores de pressão de injeção de gás no sistema. A balança é zerada a partir do momento em que as amostras são inseridas na câmara e se inicia o processo de carbonatação. O ganho de massa é registrado a partir do momento em que o gás é injetado. Ao final do processo o gás é liberado à pressão atmosférica e a massa residual registrada pela balança representa a absorção total de massa de CO_2 (SHAO et al. (2006), SHAO et al. (2010), SHAO e LIN (2011), ROSTAMI et al (2012), B. ZHAN et al. (2013), NEVES JR. (2014)).

A Figura 2.29, a seguir, é referente ao estudo de Shao et al (2010) e mostra as curvas de massas correspondentes a absorção de CO_2 ao longo do tempo dos produtos placa

cimentícia com fibra, pasta cimentícia, placa cimentícia e concreto. Através das curvas é possível observar que os ganhos significativos de massa referentes a absorção de CO_2 ocorrem nos primeiros 30 minutos para o concreto, placa cimentícia e pasta cimentícia, enquanto que para a placa com fibras os ganhos são importantes até mais de uma hora do início da reação de carbonatação, resultando em uma absorção significativamente maior na placa com fibras. Os valores finais da curva de massa representam a absorção de CO_2 no período estudado. É importante salientar que apesar de maiores tempos de tratamento promoverem uma maior absorção de CO_2 , existe um limite a partir do qual o ganho de massa começa a decrescer devido à densificação das camadas e a própria perda de umidade durante a reação (SHAO et al, 2006).

Figura 2.29– Método da Curva de Massa.



Fonte: (SHAO et al. (2010)).

2.5.5.3 Termogravimetria

Autores como Papadakis et al. (1992), Fukushima et al. (1998), Huijgen et al. (2005), Chang e Chen (2006), Huntzinger (2006) utilizam-se de técnicas analíticas como a termogravimetria (TG) para a obtenção do percentual de CO_2 absorvido durante a reação de carbonatação. Nas amostras carbonatadas observa-se o crescimento da frente de carbonatação por meio da redução do pico de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e concomitante aumento de pico de CaCO_3 . A TG é um processo pelo qual a amostra é aquecida e a redução de massa é registada em diversas temperaturas. A perda de massa pode ocorrer devido desidratação ou por exemplo a descarbonatação com a liberação do CO_2 (LIV HASELBACH, 2009).

Para Perkinelmer (2018) termogravimetria é a técnica na qual realizando-se o aquecimento de um material ocorrerá o aumento ou diminuição do seu peso.

Papadakis et al. (1991) realizou análises de TG em amostras expostas a dióxido de carbono e várias condições de umidade relativa e obteve decomposição correspondentes à

desidroxilação do Ca(OH)_2 variando entre (400-500°C) e a descarbonatação do CaCO_3 variando entre (600-800°C).

Chang e Chen (2006) realizaram a TG em diversas amostras de cimento hidratado com diferentes idades e sob condições variadas. Eles estimaram que a maior parte da perda de massa a (425-550°C) é referente a decomposição de Ca(OH)_2 e que a perda de massa entre (550 e 950°C) é devido à decomposição de CaCO_3 .

2.5.6 ESTUDOS ENVOLVENDO O PROCESSO DE CURA POR CARBONATAÇÃO ACELERADA EM PRÉ-FABRICADOS CIMENTÍCIOS NÃO ARMADOS

Diversos estudos envolvendo a utilização da cura por carbonatação acelerada em pré-fabricados cimentícios não armados têm sido realizados para o desenvolvimento de um processo de cura que possa ser implementado em escala industrial e que seja capaz não apenas de criar as condições ideais para que o produto adquira resistência à compressão exigida por norma, mas também seja sustentável ao passo que promova a absorção de CO_2 da atmosfera, reduzindo o aquecimento global e em contra partida gerando créditos de carbono, os quais a cada dia que passa têm se tornado uma importante moeda de troca entre países desenvolvidos e em desenvolvimento.

A seguir, serão apresentadas breves descrições das metodologias bem como os resultados alcançados por alguns dos trabalhos contidos na literatura.

No estudo realizado por Shao e Lin (2011) foi analisado o método de carbonatação acelerada nas primeiras idades do concreto usando CO_2 recuperado para cura. Na análise realizada para o concreto seco – “slump zero”, representativo dos concretos utilizados em produtos como alvenaria de blocos, canos, pavers e lajes alveolares, as amostras foram formadas sob prensa hidráulica com compactação de 8 MPa e sem vibração. Foram produzidas 12 amostras, sendo que em 06 destas foi realizada a cura de hidratação por 28 dias em saco selado (estas foram consideradas como referenciais) e nas outras 06 amostras realizou-se a cura de carbonatação acelerada por 2 horas. Com o objetivo de analisar a resistência, amostras de dimensão 127x76x20 mm foram submetidas a testes de compressão, utilizando-se uma máquina servo-hidráulica com duas barras de aço paralelas - uma no topo e outra na parte inferior da amostra – visando a transferência de cargas; observou-se que as amostras submetidas a carbonatação por 2 horas apresentaram resistência de 9,6MPa, valor equivalente a 60% da resistência obtida pela amostra referência após 28 dias de cura por hidratação. E quanto a absorção de CO_2 verificou-se através do método da curva de massa e ganho de massa, que dentre as amostras submetidas à cura de carbonatação por 2 horas o maior valor referente ao sequestro de CO_2 foi 11,7%.

Shao e Lin (2011), apresentaram também o estudo realizado para pavers produzidos em escala industrial, com espessura de 64mm, obtidos com agregado grosso de calcário, teor de cimento de 20% e fator água/cimento de 0,4. Os referidos pavers foram compactados por meio de vibração e enviados ao laboratório dentro de 02 horas da sua produção. As peças de concreto para pavimentação foram submetidas inicialmente à cura ao ar livre durante a noite, à temperatura de 22 °C e 65% de umidade e posteriormente carbonatadas em câmara de carbonatação configurada com 1,5 bar e 99% de concentração de CO₂.

. Observou-se que o maior valor de absorção de CO₂ foi de 7,4%, referente a amostra S2C. A diferença quanto a absorção de CO₂ entre as amostras S1C e S2C foi atribuída à presença de água livre na superfície de S1C devido ao curto tempo de cura inicial. Utilizou-se o método da curva de massa e ganho de massa para quantificação do percentual de CO₂ absorvido. Os valores estão mostrados na Tabela 2.6, a seguir.

Tabela 2.6 – Absorção de CO₂ em pavers submetidos a cura por carbonatação (SHAO e LIN (2011)).

Amostras	Condições de Cura	Absorção de CO₂ (%)
S1C	2 horas de cura ao ar livre + 4 horas de carbonatação	3,4
S2C	19 horas de cura ao ar livre + 5 horas de carbonatação	7,4
S3H	Cura convencional	0

Os referidos pavers também foram ensaiados quanto a resistência à compressão axial. Os testes foram realizados após 24 horas da produção e o valor encontrado para resistência à compressão axial foi maior para os pavers submetidos a um maior tempo de cura por carbonatação acelerada (amostra S2C), conforme mostra a Tabela 2.7, abaixo.

Tabela 2.7 – Resistência à compressão de pavers submetidos a cura por carbonatação (SHAO e LIN (2011)).

Amostras	Condições de Cura	Resistência após 24 horas (MPa)
S1C	2 horas de cura ao ar livre + 4 horas de carbonatação	31
S2C	19 horas de cura ao ar livre + 5 horas de carbonatação	46
S3H	Cura convencional (saco selado)	35

Rostami et al. (2012) submeteram amostras de pasta de cimento, com relação $a/c=0,36$ escolhida justamente para representar um grupo de concretos pré-moldados, como blocos de alvenaria, tubos de esgoto e lajes alveolares, à câmara de carbonatação com concentração de CO_2 de 99,5%, pressão constante de 0,15 MPa, por 2h após 18h de cura por hidratação. Observou-se um incremento de resistência de 61% em relação as referências, sendo tal fato foi explicado pela formação de CaCO_3 junto ao C-S-H. Observou-se também que as amostras carbonatadas apresentaram uma absorção de CO_2 de 8,9%. Para quantificar o CO_2 absorvido foram utilizados os métodos de ganho de massa, curva de massa e termogravimetria.

Ye (2003) ao carbonatar materiais cimentícios em câmara de carbonatação usando pressão de 5 bar, concentração máxima de CO_2 em torno de 100%, durante 2 horas, obteve captura de CO_2 em torno de 7 a 8%, calculada através do método do ganho de massa, e resistências à compressão superiores a 40 MPa e módulos de ruptura superiores a 6 MPa.

B. Zhan et al. (2013) inseriram blocos de concreto de vedação e estrutural produzidos com agregados finos reciclados na proporção de 0%, 50% e 100% em uma câmara de carbonatação com concentração de CO_2 de 100%, pressão de 0,1 bar, durante 6, 12 e 24 h. Os pesquisadores observaram que os valores de absorção de CO_2 aumentaram de acordo com o tempo de exposição à cura por carbonatação, estes foram calculados através do método de ganho de massa e termogravimetria e estão apresentados na Tabela 2.8 abaixo.

Tabela 2.8 – Absorção de CO_2 em blocos de concreto (m^3/m^3) (B. Zhan et al. (2013)).

Tempos de cura das amostras por carbonatação	Absorção de CO_2 (m^3/m^3) - Amostras					
	Bloco Estrutural 0% agregado reciclado	Bloco Estrutural 50% agregado reciclado	Bloco Estrutural 100% agregado reciclado	Bloco Vedação 0% agregado reciclado	Bloco Vedação 50% agregado reciclado	Bloco Vedação 100% agregado reciclado
6 h	28,02	28,34	30,08	24,00	22,19	27,00
12h	30,11	33,88	36,07	35,03	30,82	30,35
24h	36,03	43,96	40,88	33,74	35,76	34,52

Para o referido experimento, comparando-se a cura úmida convencional (referência) com a cura por CO_2 , observou-se que a resistência à compressão dos blocos vedação e estrutural carbonatados foram superiores às resistências à compressão dos blocos curados convencionalmente.

El-Hassan e Shao (2015) produziram blocos de alvenaria de concreto leve. O concreto leve utilizou escória de alto forno expandida como agregado e esta não é sensível à carbonatação. Os materiais foram misturados em um misturador, moldados em moldes de

127 x 76 x 38 mm e compactados usando um martelo vibrador para simular a produção da indústria de blocos. Por conta da mistura seca, o concreto foi desmoldado logo após a fundição e as amostras foram submetidas à diferentes situações de cura ao ar (a) com temperatura de 25 ° C e 50% de umidade relativa períodos de até 18 horas, e cura em câmara de carbonatação (c) com pressão de 0,1 MPa e concentração de CO₂ de 99%. Os resultados de absorção de CO₂ foram obtidos através dos métodos de ganho de massa e curva de massa e constam na Tabela 2.9, abaixo.

Tabela 2.9 – Absorção de CO₂ (%) em concretos carbonatados (EL-HASSAN e SHAO (2015)).

Condição de cura	Absorção de CO ₂ (%)
0a + 4c	8,3
4a + 4c	21,7
6a + 4c	23,2
8a + 4c	23,7
18a + 4c	24,3
18a + 2c	21,1
18a + 96c	35,1

Observa-se que no primeiro grupo com carbonatação de 4 horas, a carbonatação imediata sem cura inicial resultou em uma absorção de carbono de 8,3%, tal valor indica um baixo grau de reação. Acredita-se que a carbonatação imediata foi impedida pela superfície saturada. A cura inicial ao ar de 4, 6, 8 e 18 horas removeu a água livre e ao agregar a carbonatação subsequente de 4 horas houve um aumento significativo na absorção média de carbono, os valores obtidos foram 21,7%, 23,2%, 23,7% e 24,3%, respectivamente. Conclui-se que a cura inicial reduz a água livre, abrindo espaço para a difusão de gás e a precipitação de carbonato de cálcio. No segundo grupo, a cura inicial foi fixada em 18 horas. Quando a carbonatação de 2 horas foi comparada com a carbonatação de 4 horas, a carbonatação mais longa promoveu maior absorção de carbono. Na carbonatação prolongada, a absorção de carbono por 96 horas de carbonatação foi aumentada em 44% em comparação com 4 horas. Portanto, conclui-se neste estudo que agregar cura ao ar à cura por carbonatação pode trazer resultados interessantes em termos de absorção de CO₂.

Boyd et al (2012) submetaram amostras de concreto zero-slump, com fator a/c = 0,36 compactados por vibração às condições de cura mostradas na Tabela 2.10 abaixo:

Tabela 2.10– Condições de cura das amostras de concreto (BOYD et al (2012)).

Condições de cura	Processo de cura	Cura Inicial	Cura carbonatação	Cura subsequente
A	cura ao ar ^a	20 hs ar livre	0 h	saco selado
C	cura de carbonatação ^b sem pulverização de água	18 hs ar livre	2 hs	saco selado
CW	cura de carbonatação com spray de água	18 hs ar livre	2 hs + spray água	saco selado
ST	cura a vapor ^c	04 hs de cura a vapor	0 h	saco selado
SE	saco selado ^d	saco selado	0 h	saco selado

^a Cura ar ar: 25 °C, Umidade relativa 60% em câmara ambiental

^b Cura por carbonatação: 0,15 MPa pressão gás

^c Cura a vapor: a 63° C em ambiente saturado

^d Cura selada: 25°C em saco selado

Para verificação do percentual de CO₂ absorvido pelas amostras de concreto, utilizou-se o método de Ganho de Massa e o método de Curva de Massa. Os resultados quanto a resistência à compressão e absorção de CO₂ estão apresentados na Tabela 2.11, abaixo.

Tabela 2.11 – Resultados dos ensaios amostras de concreto (BOYD et al (2012)).

Condição de cura	Tempo de cura	Resistência à Compressão (MPa)	Absorção de CO ₂ (%)		
			Ganho de Massa	Curva de Massa	Média
A	20 hs	17,0 ± 0,4	0	0	0
C	20 hs	23,3 ± 1,0	7,2 ± 0,3	7,4 ± 0,2	7,3 ± 0,2
ST	20 hs	26,5 ± 1,4	0	0	0
SE	20 hs	18,7 ± 0,9	0	0	0
A	28 dias	22,1 ± 1,1	0	0	0
C	28 dias	28,8 ± 1,7	6,9 ± 0,2	7,3 ± 0,2	7,1 ± 0,2
CW	28 dias	38,9 ± 0,3	7,3 ± 0,4	7,5 ± 0,3	7,4 ± 0,4
ST	28 dias	36,8 ± 0,9	0	0	0
SE	28 dias	39,8 ± 2,9	0	0	0

Observou-se que a absorção de CO₂ variou entre 7% e 9% e atribuiu-se esta variação às diferentes relações superfície-volume e permeabilidade das amostras, uma vez que estas tiveram o mesmo processo produtivo, incluindo cura inicial, concentração de CO₂, pressão de CO₂ e duração de carbonatação. Os valores de absorção de CO₂ obtidos pelo método de ganho de massa e curva de massa foram comparáveis e ficaram bem próximos.

A resistência à compressão das amostras de concreto carbonatado (C) às 20 hs foram maiores do que a referência selada (SE) e a cura ao ar (A), mas ligeiramente inferior à resistência a compressão do concreto submetido a cura a vapor (ST). Aos 28 dias, o concreto carbonatado com compensação de água (CW) é mais resistente que o concreto curado a vapor (ST) e sua resistência é comparável à do concreto referência de cura selada (lote SE). Sem compensação de água, a resistência do concreto carbonatado (C) é reduzida em 26%. Portanto evidencia-se que a compensação de água através de spray após a carbonatação é crucial na hidratação subsequente. Em suma, um concreto submetido à cura inicial combinada com a cura de carbonatação seguidas por spray de água tem condições de apresentar uma maior resistência precocemente e tardiamente (28 dias) maior do que um concreto curado a vapor.

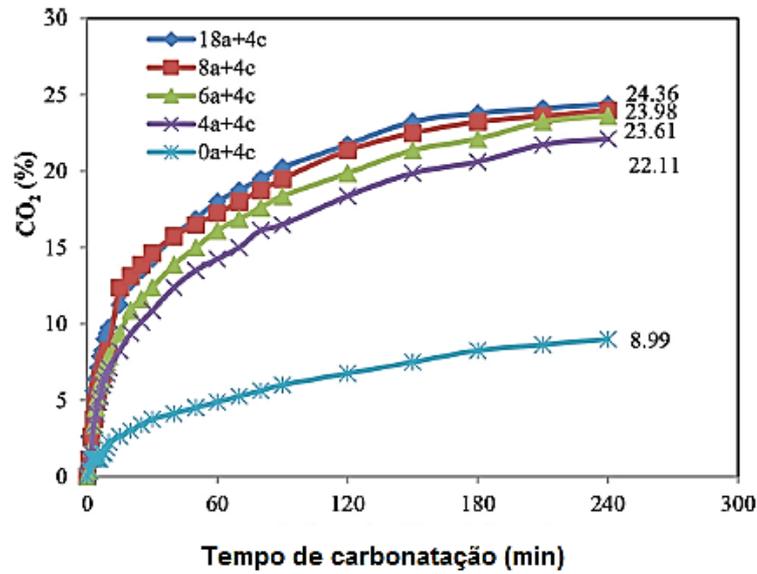
El-Hassan et al (2013) analisaram o efeito da cura por carbonatação imediata, cura inicial (a) seguida de cura por carbonatação (c) e cura à vapor em blocos de concreto produzidos com concreto seco, $a/c=0,40$, fabricados em máquina manual de blocos. A cura inicial anterior a cura de carbonatação foi realizada de 4 a 18 horas a uma umidade relativa de 50% e temperatura de 25°C. A absorção de CO₂ foi verificada pelos métodos de Ganho de Massa, Curva de Massa e Termogravimetria e os valores encontrados foram bem próximos e estão mostrados na Tabela 2.12 a seguir.

Tabela 2.12 - Comparação da absorção de CO₂ por três métodos (EL-HASSAN et al, 2013).

Condição de Cura	Absorção de CO ₂ (%)		
	Ganho de Massa	Curva de Massa	Termogravimetria
0a	---	---	---
0a+4c	7,5±1,8	9,0	8,9
4a+4c	21,3±1,4	22,1	21,6
6a+4c	22,8±1,8	23,6	22,7
8a+4c	23,5±1,6	24,00	23,2
18a+4c	24,2±0,35	24,4	24,0
18a+2c	20,4±0,4	21,7	21,5
18a+96c	34,9±1,6	35,2	35,0

Pelo método da curva de massa comparou-se cinco lotes com cura inicial de 0, 4, 6, 8 e 18 horas, seguidos por carbonatação de 4 horas e foi possível verificar que 60 a 70% da reação ocorreu na primeira hora e 80 a 90% ocorreu na segunda hora. A figura 2.30 abaixo mostra o comportamento das amostras.

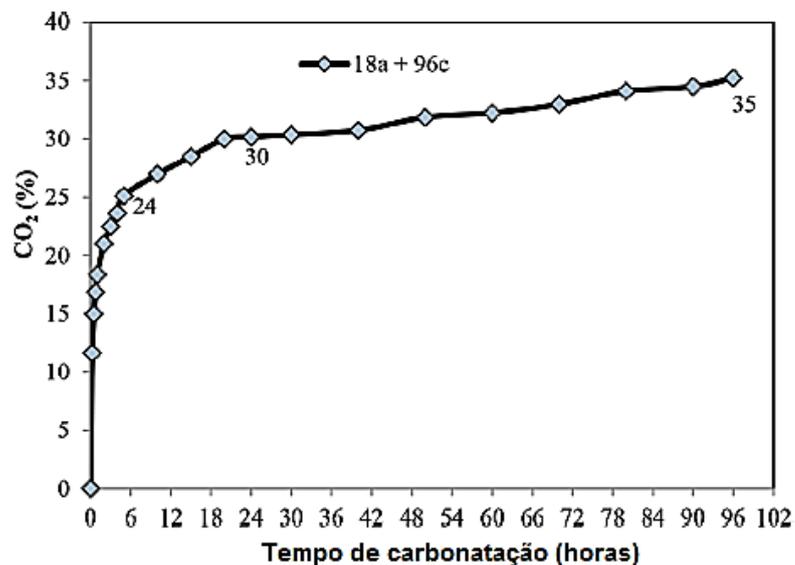
Figura 2.30 – Curva de Massa para 4hs de carbonatação.



Fonte: El-Hassan et al (2013).

A Carbonatação extensa de 96 horas também foi estudada e sua curva de massa é mostrada na Figura 2.31, abaixo. Observou-se que em apenas 04 horas a absorção atingiu 68% do total de 04 dias e após 1 dias a absorção atingiu 86% do total de 04 dias.

Figura 2.31 – Curva de Massa para 4 dias de carbonatação.



Fonte: El-Hassan et al (2013).

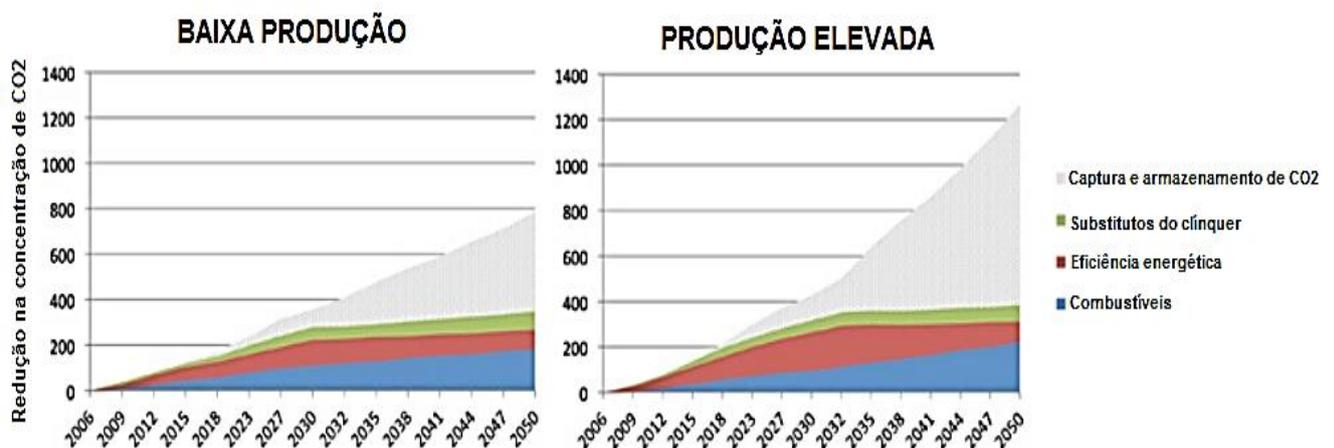
Quanto a resistência à compressão os blocos carbonatados exibiram maior resistência inicial após 01 dia, porém menor resistência aos 28 dias, segundo os autores tal fato se deve à perda de água por cura inicial. Um mecanismo de borrifo de água foi concebido para compensar a perda de água e, finalmente, a resistência à compressão dos blocos carbonatados chegou a valores comparáveis às referências (cura hidratação e cura à vapor). Concluiu-se que a cura de carbonatação pode substituir o vapor na produção dos blocos, pois acelera a hidratação e melhora a durabilidade.

Portanto, com base no levantamento do estado da arte das pesquisas na área, observa-se que apesar de muito ter sido feito, ainda existe uma lacuna de conhecimento relacionada às peças de concreto para pavimentação, pois escassos são os estudos encontrados.

2.5.7 CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CO₂ NAS INDÚSTRIAS DE CIMENTO

A tecnologia de captura e armazenamento de dióxido de carbono é considerada pela Agência Internacional de Energia (IEA) (2009a) como essencial para redução em até 56% das emissões de CO₂ no setor de cimento até o ano de 2050. Sabe-se que as emissões de CO₂ do referido setor são advindas da combustão dos combustíveis e da calcinação do calcário no forno; através da tecnologia citada, o CO₂ é capturado à medida que é emitido, comprimido a um líquido, transportado em oleodutos para ser posteriormente armazenado. A figura 2.32 a seguir, mostra a redução das emissões de CO₂ proporcionada pelas estratégias de mitigação agrupadas sob os títulos: combustíveis, eficiência energética, substitutos do clínquer e captura e armazenamento de carbono (Eco-Eficient Cements, 2016). O relatório estimou ainda que será necessário o investimento de US \$ 321 a 592 bilhões para capturar o CO₂ advindo da indústria de cimento (IEA, 2009).

Figura 2.32 – Contribuição para redução das emissões de CO₂ a partir de 2006 advindas da indústria do cimento de acordo com diferentes estratégias.



Fonte: (Eco-Eficient Cements, 2016).

2.5.7.1 Captura de CO₂ em uma fábrica de cimento

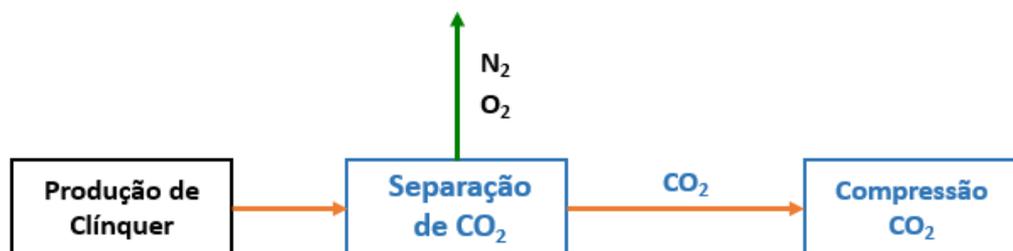
A seguir serão apresentados três métodos potenciais para capturar CO₂ a partir de emissões estacionárias.

- **Captura pós-combustão**

A tecnologia de captura pós-combustão (onde o CO₂ é separado do gás de combustão) poderia ser aplicada tanto nas fábricas de cimento recém-construídas como para modernizar as plantas existentes. Segundo IEA (2009b); CSI/ECRA (2009); Bosoaga et al., (2009) esta técnica que já é comercialmente madura em outras aplicações, provavelmente será aplicada em larga escala na indústria de cimento.

Através da referida tecnologia o gás de combustão que sai da planta é coletado e enviado ao solvente à base de amina, onde o dióxido de carbono no gás é capturado pelo solvente. O solvente rico em CO₂ é então bombeado para um dessorvedor, onde o dióxido de carbono liberado é purificado antes de ser comprimido e transportado para o local de armazenamento (IEA (2009b); CSI/ECRA (2009); BOSOAGA et al., (2009)). A figura 2.33 a seguir demonstra simplificada o processo.

Figura 2.33 – Tecnologia de captura pós-combustão integrada à cimenteira



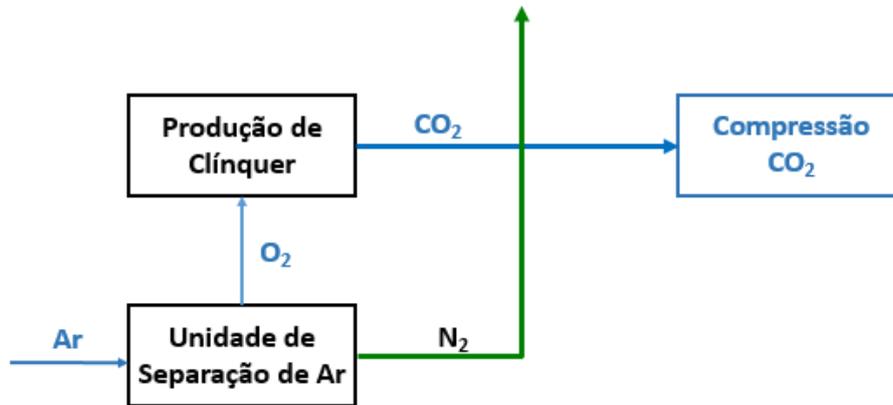
Fonte: (Adaptado de Li et al., 2013).

- **Tecnologia oxicorte**

Esta tecnologia é promissora para capturar CO₂ da cimenteira a longo prazo mesmo que seu desenvolvimento técnico demore mais para ser implementado do que o da captura pós-combustão (CSI/ECRA, 2009). No processo Oxicorte, o forno do clínquer é alimentado com oxigênio ao invés do ar ambiente (Figura 2.34). Para tanto, faz-se necessário a presença de uma Unidade de Separação de Ar de última geração, neste sentido deverão ocorrer alterações no forno onde ocorre a calcinação do calcário e em demais instalações da indústria. No momento, algumas plantas aumentaram o teor de oxigênio no conteúdo do forno para aumentar a taxa de reação durante o processo de calcinação. Isso, por si só, é uma indicação positiva, já que o resultado de qualquer adição de oxigênio puro poderá aumentar a

concentração de CO₂ no gás de combustão. De acordo com estudos, a redução da emissão de carbono para a cimenteira que implementar o processo Oxicorte deve ficar entre 63% e quase 100%, mas a aplicação só foi realizada em um projeto piloto (CSI/ECRA, 2009).

Figura 2.34 – Tecnologia de captura oxicorte integrada à indústria de cimento.



Fonte: (Adaptado de Li et al., 2013).

A Tabela 2.13 a seguir, apresenta uma comparação qualitativa das tecnologias de captura de CO₂ por pós-combustão e Oxicorte na indústria cimenteira. A captura pós-combustão pode reduzir as alterações nas fábricas de cimento atuais, enquanto a captura de Oxicorte requer modificações no forno e em outros equipamentos.

Tabela 2.13 - Comparação da captura de CO₂ através dos processos pós-combustão e Oxicorte na indústria cimenteira (Adpatado de Li et al., 2013).

Captura pós-combustão	Tecnologia oxicorte
Impacto mínimo no processo existente	Alta concentração de CO ₂ no gás de combustão do forno
A modernização dos fornos existentes é possível	Necessário redesenhar o forno e o <i>retrofit</i> é improvável.
Alto consumo de energia na separação de CO ₂	Alto consumo de energia na produção de oxigênio
Tecnologia comercialmente disponível Estágio de teste piloto	Custo potencialmente mais baixo, mas estimativa vulnerável

- **Looping de carbonato**

O *looping* de carbonato para a captura de CO₂ para qualquer fonte emissora de CO₂ é proposto teoricamente por muitos anos. De forma semelhante a outras tecnologias emergentes, o processo de carbonatação em *looping* precisa ser comprovado por meio de plantas piloto e de demonstração em larga escala. Em geral, ocorre a substituição do solvente à base de amina por um material sólido circulante que absorve o CO₂, o qual é posteriormente liberado na forma pura através de aplicação de calor. Teoricamente, esse sistema pode

oferecer vantagens, pois envolve menos energia para remover o CO₂ do material sólido, além de apresentar nível menor de corrosão e emissão de SO₂. O gás liberado pela combustão reage com o sorvente sólido à base de cálcio (óxido de cálcio) para formar o carbonato de cálcio. Os carbonatos são aquecidos para liberar dióxido de carbono (IPCC, 2005; BOSOAGA et al., 2009; NARANJO et al., 2011; BLAMEY et al., 2010; LI et al., 2013).

2.5.7.2 Transporte e armazenamento do CO₂ capturado

O transporte de CO₂ das instalações de captura para as fontes de armazenamento é a etapa mais importante do processo de captura e armazenamento de CO₂. Espera-se que o sistema de dutos seja o método mais confiável, eficiente e econômico para transportar o CO₂ para as futuras unidades comerciais. Este sistema inclui tubulações e estações de compressão semelhantes aos sistemas de oleodutos desenvolvidos para os gasodutos naturais. O armazenamento do CO₂ capturado pode ser feito em formações geológicas, como salinas profundas, reservatórios de petróleo e gás; e em tanques pressurizados para utilização em indústrias de pré-fabricados, como ocorre na empresa CarbonCure Technologies Inc. (BENHELAL et al., 2013; BARKER et al. (2009)). No momento, a injeção de CO₂ em larga escala para fins de sequestro está ocorrendo em várias partes do mundo (CCS Task Force Report, 2010).

2.5.7.3 Projeto e planejamento para Captura e Armazenamento de Carbono

Novas plantas de cimenteiras deverão levar em consideração o roteiro de tecnologia proposto pela IEA (IEA, 2009a), o qual recomenda que os seguintes critérios sejam considerados em relação à captura pós-combustão em uma fábrica de cimento:

1. Espaço suficiente para o tratamento de captura de CO₂, purificação e compressão (3,6 a 4,3ha de terra são recomendados para Captura e Armazenamento de 1 ton de CO₂/ fábrica de cimento);
2. Capacidade energética fornecida por eletricidade e/ou para captura de CO₂;
3. Inclusão de tecnologias de redução de SO_x e NO_x dentro da planta (ou espaço suficiente para implementação futura) e;
4. Acesso a possíveis locais para o armazenamento de CO₂.

2.5.7.4 Custo da captura de CO₂ em novas fábricas de cimento

Segundo a IEA GHG (2002) a média mundial de emissões por fonte de produção de cimento (0,79 milhões de toneladas de CO₂ por fonte) é significativamente menor do que as emissões referentes às usinas de carvão (3,94 milhões de toneladas de CO₂ por fonte). No

entanto, com base na atual experiência comercial de captura de CO₂, uma única cimenteira ainda é considerada grande o suficiente para exigir equipamentos de captura de CO₂. Alguns fornos de cimento existentes em países em desenvolvimento, como a China e a Índia, são relativamente pequenos (BATTELLE, 2002), porém estão sendo substituídos por plantas grandes e modernas (CAI et al., 2009). A quantidade de CO₂ produzida por um moderno forno de cimento pode ser similar às emissões de uma caldeira de usina de carvão (IPCC, 2005). O fato é que poucos estudos estimam o custo para captura de CO₂, a IEA GHG (2008) estimou US \$ 161/ton de CO₂ capturado através do processo de pós-combustão e US \$ 60/ton de CO₂ capturado através do processo de Oxicorte. A estimativa de custo pela IEA GHG (2008) é semelhante à captura por pós-combustão em uma usina de energia movida a carvão (BARKER et al., 2009). Ho et al. (2011) analisaram a captura de CO₂ por pós-combustão de uma usina de energia que produz Etanolamina na Austrália e calcularam o custo de captura de CO₂ de US \$ 68/ton de CO₂ capturado. O estudo de Hassan (2005) estimou o custo de captura de CO₂ em uma indústria de cimento canadense em US \$ 49/tonelada. Ho et al (2011) acreditam que as diferenças significativas nos custos se devam aos diferentes preços externos de energia, taxas de desconto e métodos de cálculo.

O custo de transporte do CO₂ para longas distâncias é relativamente barato por oleoduto ou por navio. Por oleodutos, o custo pode variar de US \$ 1 a US \$ 10 / ton de CO₂. O custo real varia de acordo com a distância e o volume transportado (MIT, 2007).

O custo de armazenar CO₂ em repositórios geológicos é estimado em US \$ 25 / ton de CO₂, não estando contabilizada a responsabilidade potencial desconhecida de se ocorrer vazamento (IPCC, 2005a). O custo para armazenamento de CO₂ em tanques pressurizados não foi informado.

2.5.7.5 A perspectiva de financiamento da captura de CO₂ nas fábricas de cimento

Na Europa, a Diretiva 2009/29/EC da União Europeia que visa estimular projetos de demonstração de captura e armazenamento de CO₂ e soluções inovadoras de energia renovável pode financiar potencialmente a captura de CO₂ de um forno de cimento (EC (Comissão Europeia), 2009). O Departamento de Energia dos EUA (DOE) também está fornecendo financiamento para projetos de captura de CO₂ em escala piloto nos EUA que incluem a indústria de cimento (NETL, 2009). A longo prazo, serão necessárias medidas de regulamentação setorial ou mecanismos de incentivo com objetivo de direcionar e acionar os investimentos de captura de CO₂ em fábricas de cimento. De fato, o apoio financeiro público juntamente com o privado é essencial para que seja cada vez mais colocado em prática a tecnologia de captura e armazenamento de CO₂.

2.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

O anseio da sociedade em progredir na direção de um mundo mais justo implica no aumento do ambiente construído. Esta tarefa manterá ou elevará ainda mais a demanda por materiais à base de cimento com o passar dos anos (ECO-EFFICIENT CEMENTS, 2016). Hospitais, escolas, barragens, pontes, viadutos, imponentes arranha-céus, habitações unifamiliares - nada disso seria possível sem o cimento. O problema é que a indústria cimenteira é responsável por emitir grandes quantidades de CO₂ ao meio ambiente, promovendo o aumento do aquecimento global e de suas consequências desastrosas. Por este motivo o desenvolvimento de alternativas sustentáveis visando a redução da concentração de CO₂ na atmosfera devem ser desenvolvidas e incentivadas. Dentre elas, destaca-se a tecnologia de captura e armazenamento de CO₂ em materiais cimentícios não armados, a qual foi abordada na presente pesquisa.

A idéia é obter a máxima taxa de captura de CO₂ para cada tipo específico de pré fabricado não armado, porém ainda existe uma lacuna de conhecimento relacionada às condições ideais de início de exposição à cura por carbonatação, tempo de exposição, temperatura, umidade e concentração de CO₂ na câmara. Ocorre que, além destes, diversos outros fatores influenciam o processo de carbonatação, a começar pelo tipo de pré-fabricados não armados analisado, traço, composição química do cimento, tipo de agregado empregado, processo de fabricação (manual ou mecânico), pressão de compactação, entre outros. Através do estado da arte das pesquisas na área observou-se que os blocos de concreto absorveram mais CO₂ do que as peças de concreto para pavimentação, provavelmente isso se deva a menor espessura das paredes do bloco e menor pressão de compactação durante a produção destes, permitindo contudo, uma maior difusividade de CO₂. Verificou-se também que os materiais cimentícios que receberam um spray de água após a cura por carbonatação acelerada apresentaram melhores valores de resistência mecânica do que os carbonatados sem spray de água, concluiu-se portanto, que tal resultado é decorrente do fato de que ao receber a água após a cura o corpo de prova aumentou sua umidade interna, permitindo que as reações de hidratação e consequente ganho de resistência continuassem de forma mais vigorosa com o passar dos dias.

Em todos os estudos contidos no estado da arte desta pesquisa verificou-se a captura CO₂, sendo que os valores variaram de 3,4% (PCP produzida em escala industrial) a 43,96% (bloco de concreto produzido com agregado reciclado) e para todos os casos analisados houve ganho de resistência. Portanto, não resta dúvida de que a cura por carbonatação acelerada é um processo promissor para mitigação de CO₂ da atmosfera e passível de ser

implementado em escala industrial, como já têm feito as indústrias *CarbonCure*, *Calera*, *Calix*, entre outras (MONKMAN e MACDONALD, 2016).

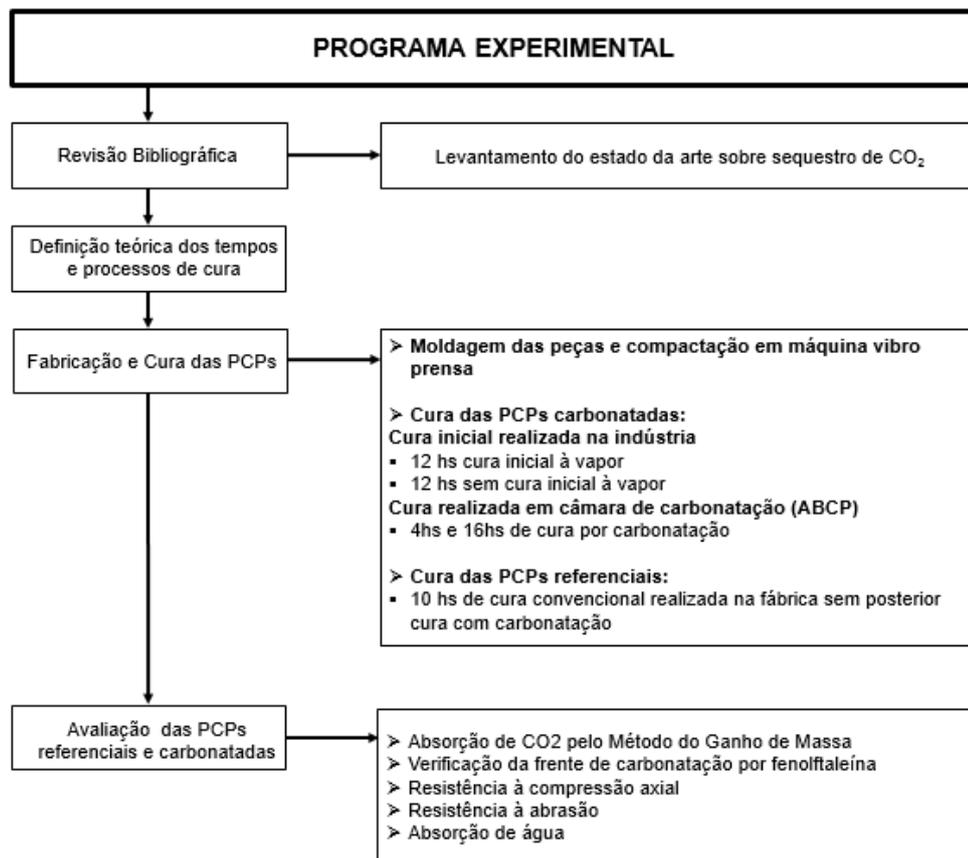
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A fim de atender aos objetivos propostos para o presente trabalho, o programa experimental buscou verificar a absorção de CO₂ em peças de concreto para pavimentação que foram submetidas à carbonatação acelerada e a influência desta nas propriedades mecânicas das PCPs.

Os procedimentos adotados nesta etapa da pesquisa foram baseados nos trabalhos de Ye (2003), Shao et al. (2006), Shao et al. (2010), Monkman e Shao (2010), Galan et al. (2010), Lin e Shao(2011), Rostami et al (2012), Wang et al. (2012), Boyd et al (2012), El-Hassan et al (2013), B. Zhan et al. (2013), Yuan et al. (2013), Neves Jr (2014), El-Hassan et al (2015), Jang et al (2016), Bertos et al. (2017), D. Zhang et al. (2017), tendo como premissa os resultados satisfatórios de absorção de CO₂ e resistência mecânica obtidos.

O organograma da Figura 3.1 descreve as quatro etapas do programa experimental, sendo elas: revisão bibliográfica, definição dos processos e tempos de cura com base na teoria, fabricação e cura das PCPs, e avaliação das PCPs quanto a absorção de CO₂ e ganho de resistência mecânica.

Figura 3.1 – Etapas do programa experimental.



Fonte: Próprio autor (2018).

A primeira etapa consistiu no levantamento do estado da arte relacionado ao sequestro de CO₂, propiciado pela cura por carbonatação acelerada, em PCPs.

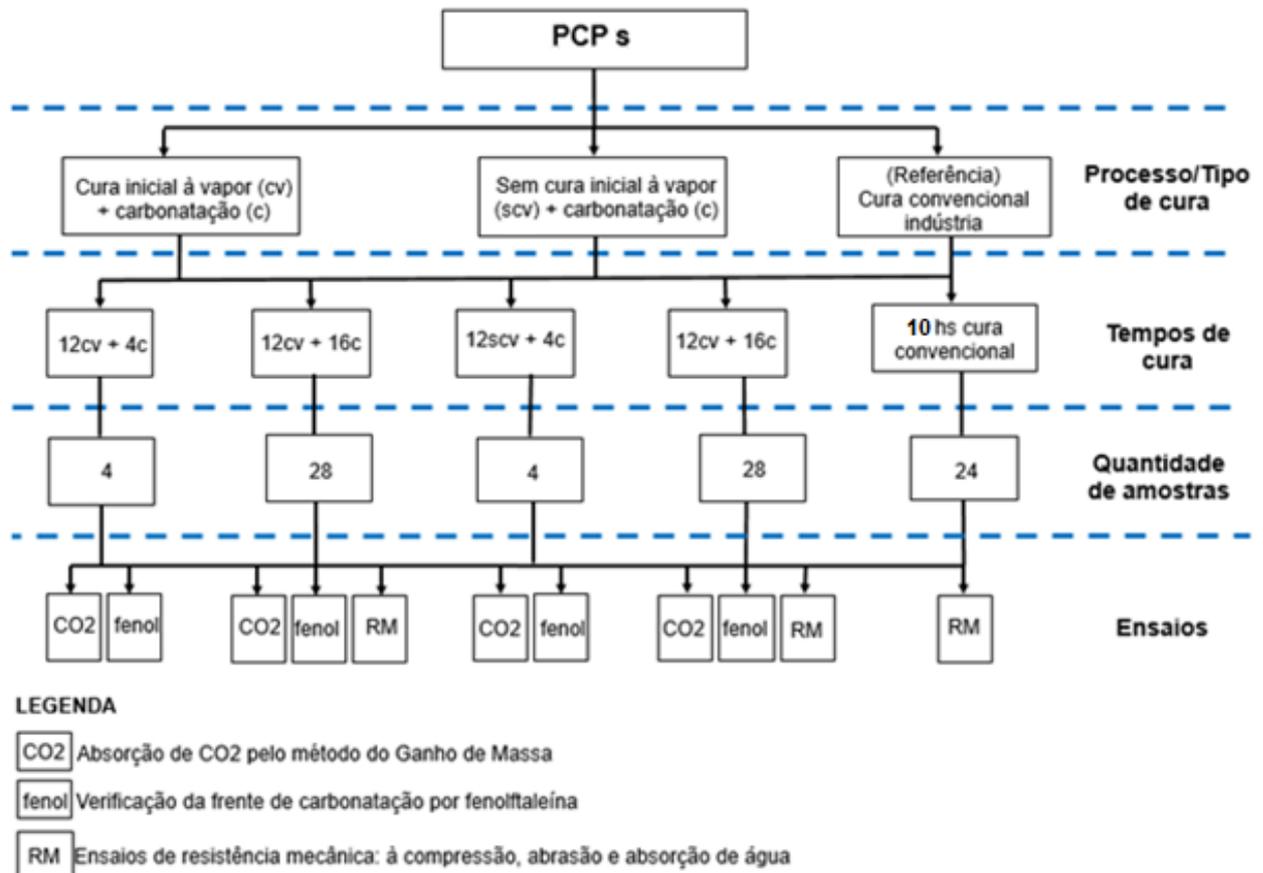
Na sequência, determinou-se teoricamente os processos e tempos de cura que seriam empregados na pesquisa. Com base nos estudos encontrados, concluiu-se que seriam utilizadas duas estações de cura, sendo a primeira denominada de cura inicial, a qual foi subdividida em cura inicial à vapor e sem cura inicial à vapor; e a segunda, que consistiu na cura por carbonatação.

A terceira etapa compreendeu a moldagem e compactação das PCPs na indústria através de máquina vibroprensa e submissão destas ao processo de cura inicial com posterior cura por carbonatação. Para o desenvolvimento desta fase do programa experimental contou-se com o apoio e participação de uma empresa tradicional do setor de blocos e peças de concreto para pavimentação com certificação NBR ISO 9001:2008, Selo de qualidade ABCP, Selo do Programa Setorial de Qualidade PSQ-PBQP e Certificado de Desempenho IFBQ, a qual realizou não apenas a fabricação das PCPs, mas também a cura inicial destas. As peças empregadas neste estudo foram produzidas utilizando-se os mesmos materiais e traço desenvolvidos pela indústria. Tal fato foi muito positivo, pois aproximou o estudo da realidade praticada no mercado. Outro aspecto importante, referiu-se ao apoio conferido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), a qual cedeu sua câmara de carbonatação para a realização da cura por carbonatação acelerada e permitiu que os ensaios necessários para o andamento dessa pesquisa fossem realizados em seus laboratórios. A execução de ensaios em um laboratório conceituado e certificado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), bem como a atuação de técnicos especializados foram de grande importância para o trabalho, uma vez que estes estão diretamente relacionados à credibilidade dos resultados alcançados.

A quarta etapa ocorreu na ABCP e foram realizados os ensaios de absorção de CO₂ pelo método do Ganho de Massa, verificação da frente de carbonatação através do indicador ácido-base fenolftaleína, resistência à compressão axial, resistência à abrasão e absorção de água. Para os ensaios de resistência mecânica utilizou-se com referência PCPs não submetidas à cura por carbonatação, com o intuito de comparar os resultados destas com as PCPs carbonatadas.

A Figura 3.2 resume, em forma de fluxograma, as diferentes condições de processos e tempos cura; e ensaios que foram submetidas às PCPs.

Figura 3.2 – Fluxograma das diferentes condições de processos e tempos de cura; e ensaios aos quais as PCPs foram submetidas.



Fonte: Próprio autor (2018).

Definição das variáveis

Para avaliar a influência do sequestro de CO₂ nas peças de concreto para pavimentação, variou-se na primeira etapa de cura os processos de cura inicial (cura inicial à vapor e sem cura inicial à vapor) mantendo-se o tempo de 12 horas para ambos processos; e na segunda etapa de cura por carbonatação, variou-se os tempos em 4 e 16 horas. Quanto ao traço e materiais empregados na confecção das PCPs não houve variação, pois um dos objetivos da pesquisa é aproximar a teoria da prática.

Devido à variação dos processos e tempos de cura, foram estudadas algumas combinações e para facilitar o entendimento ao longo do trabalho, estes foram codificados da seguinte maneira:

- **12cv+04c:** 12hs de cura inicial à vapor + 04hs de cura por carbonatação;
- **12cv+16c:** 12hs de cura inicial à vapor + 16hs de cura por carbonatação;
- **12scv+04c:** 12hs sem cura inicial à vapor + 04hs de cura por carbonatação;
- **12scv+16c:** 12hs sem cura inicial à vapor + 16hs de cura por carbonatação;
- **PCPs Referenciais (CV):** 10 hs de cura à vapor (Cura convencional da fábrica).

3.1. MATERIAIS

Segundo Fernandes (2011), o conhecimento dos materiais empregados na fabricação das PCPs é de fundamental importância, pois estes estão atrelados ao desenvolvimento das propriedades físicas e mecânicas das peças. Para tanto, foram apresentados a seguir, os materiais empregados na fabricação das peças de concreto para pavimentação objeto de estudo da presente pesquisa.

- Cimento Portland:

O Cimento Portland utilizado pela fábrica para produção das peças de concreto para pavimentação é o do tipo V de Alta Resistência Inicial (CPV - ARI).

As principais propriedades químicas, físicas e mecânicas do lote de cimento utilizado foram ensaiadas segundo a norma ABNT NBR 5733 e fornecidas pelo fabricante. Seus valores médios encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedades químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado.

		Limites ABNT NBR 5733	Valores médios obtidos
	Perda ao fogo (PF)	≤ 4,5	3,33
	Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5	5,81
Teores (%)	Trióxido de enxofre (SO ₃) p/ Aluminato de cálcio (C ₃ A) ≥ 8	≤ 4,5	3,36
	Resíduo insolúvel (RI)	≤ 1,0	0,49
	Anidrido carbônico (CO ₂)	≤ 3,0	2,69
Finura (%)	#200	≤ 6,0	0,00
	#400	N/A	0,55
	Blaine (cm ² /g)	≥ 3000	4992
	Água de consist. (%)	N/A	30,4
Tempo de pega	Início (min)	≥60	179
	Fim (min)	≤ 600	242
	Expansibilidade a quente (mm)	≤ 5,0	-
Resistência à compressão (MPa)	1 Dia	≥14,0	29,3
	3 Dias	≥24,0	40,5
	7 Dias	≥34,0	47,7
	28 Dias	N/A	-

- Areia Natural:

A areia natural utilizada na produção tratou-se de uma areia de rio média, extraída na região de Guararema-SP e fornecida pelo Grupo Sargon como “Itaquareia”.

- Pó de pedra:

O segundo agregado miúdo utilizado foi uma areia industrial. Oriunda do processo de britagem sendo popularmente conhecida como “Pó de Pedra”, seu fornecimento foi realizado pela Pedreira Polimix, unidade de Guarulhos- SP.

- Pedrisco:

O agregado graúdo empregado foi o pedrisco, também conhecido no mercado como brita nº0 (B-0). Sua origem também remete à Pedreira Polimix, unidade de Guarulhos- SP.

- Água:

A água utilizada na fabricação das peças adveio de um poço artesiano localizado nas proximidades da empresa parceira desta pesquisa.

- Aditivos:

O aditivo empregado na produção das PCPS foi o plastificante densificador Press Mix Top, produzido pela Camargo Distribuidora de Produtos Químicos Ltda e recomendado para produção de produtos com concreto seco.

De acordo com o fabricante, o produto é isento de cloretos e seu uso proporciona as seguintes vantagens: aumento da resistência do concreto devido à redução de água na mistura, melhora no acabamento da peça pela facilitação do deslizamento durante a desforma, aumento no grau de compactação das peças, melhora na lubricidade da massa, melhora na coesão da massa reduzindo a quebra durante a produção dos artefatos, redução no consumo de cimento e aumento da produtividade (CAMARGO, 2018).

Quanto à quantidade ideal, recomenda-se a adição de 100mL a 150mL do aditivo para cada 100 kg de cimento.

A Tabela 3.2 a seguir, demonstra a proporção dos materiais empregados no traço de concreto tradicionalmente utilizado pela empresa na fabricação das PCPs.

Tabela 3.2 – Traço em massa efetivamente empregado (Glasser, 2018).

Traço	Cimento (kg)	Aditivo diluído (L)	Pedrisco (kg)	Areia de rio (kg)	Pó de pedra (kg)	Água (L)	Relação a/c (estimada)
PCP	220	1,98	292	700	595	129	0,586

3.2. DEFINIÇÃO TEÓRICA DOS PROCESSOS E TEMPOS DE CURA

Esta etapa foi baseada na revisão bibliográfica e teve como objetivo alinhar a teoria com a realidade praticada no mercado, sobretudo à prática de produção realizada na empresa participante da pesquisa. Para tanto, optou-se por realizar a cura inicial (fábrica) e posterior cura por carbonatação acelerada (ABCP). Visando-se verificar o incremento de resistência após carbonatação, tornou-se necessário ensaiar as PCPS carbonatadas e as PCPs não carbonatadas (referenciais) para comparação do ganho de resistência.

3.2.1 CURA DAS PCPS CARBONATADAS

O estado da arte dessa pesquisa demonstrou que os materiais cimentícios não armados que foram submetidos a um processo de cura inicial anterior à cura por carbonatação apresentaram melhores resultados quanto à absorção de CO₂ e ganho de resistência mecânica do que os que imediatamente após a moldagem foram carbonatados ((Shao e Lin (2011), Boyd et al (2012), El-Hassan e Shao (2013) e El-Hassan et al (2013)). Portanto, diante dos resultados, optou-se por submeter as peças de concreto para pavimentação à cura inicial (fábrica) e posterior cura por carbonatação acelerada (ABCP). A seguir, foram descritos os motivos para escolha dos processos e tempos de cura inicial e cura por carbonatação.

3.2.1.1 Cura inicial

- **Cura à vapor:** foi empregada pois o calor e a umidade presentes neste procedimento de cura promovem a aceleração da reação de hidratação do cimento; gerando maior quantidade de hidratos, principalmente Ca(OH)₂, o qual reagirá posteriormente com o CO₂ durante a carbonatação (YE (2003), SHAO et al. (2006), GALAN et al. (2010), WANG et al. (2012), B. ZHAN et al. (2013));
- **Sem cura inicial à vapor:** foi utilizada pois a revisão bibliográfica apontou que a referida cura ao passo que gera menos produtos de hidratação, promove a redução da barreira alcalina, propiciando um maior avanço da frente de carbonatação (YUAN et al. (2013), JANG et al (2016), BERTOS et al. (2017), D. ZHANG et al. (2017)).

Os tempos de cura inicial idealizados para a realização da presente pesquisa consistiram em: 12hs de cura inicial à vapor e 12 hs sem cura inicial à vapor.

3.2.1.2 Cura por carbonatação acelerada

Para a realização da cura por carbonatação acelerada, após a cura inicial, as PCPs devem ser inseridas em câmara de carbonatação com condições adequadas de concentração de CO₂, temperatura e umidade para a ocorrência da reação de carbonatação e posterior aferição da absorção de CO₂ e ganho de resistência. Durante um tempo inicialmente estimado de 4 horas.

3.2.2 CURA PCPS NÃO CARBONATADAS (REFERENCIAIS)

O processo de cura à vapor (térmica) realizado pela empresa foi o adotado como referência. Tal escolha justificou-se pelo fato de que a empresa possui um procedimento de fabricação consolidado no mercado (atuando há mais de 47 anos na produção de PCPs) e por seu elevado controle de qualidade interno, voltado à avaliação e certificação das peças.

É sabido que o processo de cura térmica promove a aceleração da reação de hidratação, uma vez que a alta temperatura e a atmosfera saturada de vapor reduzem o período de latência entre o cimento e a água, fazendo com que a reação de hidratação ocorra mais cedo, promovendo o rápido enrijecimento do concreto (NEVILLE, 1997).

A cura térmica, por ser um processo de cura mais eficiente, é empregada no dia a dia da empresa, uma vez que esta apresenta elevada produtividade e necessita de maior rapidez na entrega das peças, além de melhor aproveitamento dos equipamentos e espaço para estocagem das PCPs produzidas.

Na indústria o tempo de cura total varia de acordo com a demanda de produção, uma vez que a empresa fabrica uma ampla variedade de blocos e peças de concreto para pavimentação, sendo necessária a rápida desocupação das câmaras de cura para alocação de novos produtos.

Portanto, todo o procedimento de cura deve variar de 8 à 10hs, sendo de 1 à 2hs de descanso pós prensagem + 1h de injeção de calor pelos queimadores + 6 à 7hs de estufa fechada para aproveitamento do calor.

3.3 FABRICAÇÃO DAS PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

A produção das PCPs ocorreu no dia 08 de agosto, com início às 0hs, em uma indústria localizada na região da grande São Paulo - SP. A vibroprensa responsável pela confecção das peças é americana, de marca Besser, modelo Vibropac 4312J.

As PCPs foram produzidas em formato retangular (10x20x6cm), visando a solicitação por tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais; devendo para tanto apresentar resistência à compressão ≥ 35 MPa aos 28 dias de idade (ABNT NBR 9781:2013). Estas foram escolhidas para objeto de estudo da pesquisa por serem as PCPs mais comercializadas pela empresa.

A Figura 3.3 a seguir, apresenta algumas etapas referentes à fabricação das PCPs.

Figura 3.3 - Fabricação das PCPs: a) vibroprensa; b) regularização após desforma; d) peças acabadas; d) remoção das PCPs; e) transporte das PCPs até câmara de cura à vapor; f) cura à vapor em câmara apropriada.



Fonte: Glasser (2018).

A Figura 3.4 a seguir, apresenta as PCPs utilizadas nos ensaios e a especificação do lote produzido.

Figura 3.4 – Peças de Concreto para pavimentação: a) Formato das PCPs;
b) Especificação do lote.



Fonte: Próprio Autor (2018).

3.3.1 PROCESSO DE CURA INICIAL REALIZADO NA FÁBRICA

Cura inicial à vapor: as PCPs foram alocadas em estufa onde foi promovido o aumento de temperatura até 60°C, a aceleração do calor foi propiciada por queimadores a gás aos quais se adicionou névoa de água, vaporizando o ambiente para umidificação/hidratação do produto. O procedimento de cura inicial à vapor teve duração de 12hs, sendo: 1h de injeção de calor pelos queimadores + 11hs de estufa fechada para aproveitamento do calor;

Sem cura inicial à vapor: após a produção, as PCPs foram alocadas dentro do galpão coberto da empresa, porém fora da estufa, à temperatura e umidade ambientes, durante 12 horas.

Cura referência (PCPs não carbonatadas): trata-se da cura convencionalmente realizada na indústria, o procedimento utilizado foi o mesmo descrito na cura inicial à vapor, diferindo-se apenas o tempo de duração do procedimento, pois ao todo foram 10 hs, sendo: 1hs de descanso pós prensagem + 1h de injeção de calor pelos queimadores + 8hs de estufa fechada para aproveitamento do calor;

3.3.2 PROCESSO DE CURA POR CARBONATAÇÃO REALIZADO NA ABCP

Logo após os procedimentos de cura inicial as amostras foram encaminhadas ao laboratório da ABCP, onde foram identificadas, pesadas e inseridas na câmara de carbonatação, a qual apresentava a seguinte configuração:

- Umidade relativa de 65%;
- Temperatura de 23°C;
- Concentração máxima de CO₂ permitida pela câmara de 20%.

Tanto a umidade relativa de 65%, como a temperatura de 23°C (ambiente) foram adotadas com embasamento no estado da arte, pois através deste verificou-se que estas promoviam melhores resultados quanto a absorção de CO₂.

Observou-se que para maximizar a reação de carbonatação a maioria dos autores referenciados na revisão bibliográfica desta pesquisa utilizaram concentração de CO₂ em torno de 100%, porém a câmara de carbonatação utilizada neste experimento era dotada de um sensor que impedia o incremento de CO₂ em concentrações superiores a 20%, portanto devido a este fato utilizou-se a concentração de CO₂ máxima permitida de 20%.

O tempo de exposição ao CO₂ estipulado teoricamente foi de 4hs. Porém, observou-se que para atingir a concentração máxima de CO₂ de 20% a câmara de carbonatação demorou cerca de 1:30hs, ficando 40% do tempo de exposição comprometido, perante este fato e tendo em vista que um dos objetivos do trabalho é verificar a absorção de CO₂, resolveu-se com a anuência da ABCP, adotar os tempos de carbonatação de 4hs e 16hs. O tempo de 16hs foi escolhido para compatibilizar com os horários de funcionamento da ABCP e com a disponibilidade da câmara.

3.4 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DAS PCPS QUANTO A ABSORÇÃO DE CO₂, OCORRÊNCIA DE CARBONATAÇÃO E GANHO DE RESISTÊNCIA

3.4.1 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE CO₂ PELO MÉTODO DO GANHO DE MASSA

Dentre as estratégias de quantificação de CO₂ capturado por materiais cimentícios, utilizou-se o método do Ganho de Massa, uma vez que a reação de carbonatação, ao envolver a formação de novos produtos na matriz, além de influenciar os existentes, modifica a porosidade e altera a densidade do material obtido, promovendo o aumento de massa (Neville (1963), Ho e Lewis (1987), Parrot (1987), Ye (2003), Saetta e Vitaliani (2004), Shao et al. (2006), Galan et al. (2010), B. Zhan et al. (2013)).

No referido método utilizado por diversos autores dentre eles Shao et al. (2006), Shao et al. (2010), Monkman e Shao (2010), Lin e Shao(2011), verifica-se a absorção de CO₂ por meio da equação apresentada a seguir:

$$G.deMassa(\%) = \frac{(Massa)_{depois, CO_2} + (Massa)_{P.de. \acute{A}gua} - (Massa)_{antes, CO_2}}{(Massa)_{S.do. Aglomerante}} \quad (3.1)$$

Onde:

(Massa)antes,CO₂ – Massa da amostra antes da carbonatação.

(Massa)depois,CO₂ – Massa da amostra depois da carbonatação.

(Massa)P.de. Água – Massa de perda de água.

(Massa)S.do. Aglomerante – Massa inicial do aglomerante.

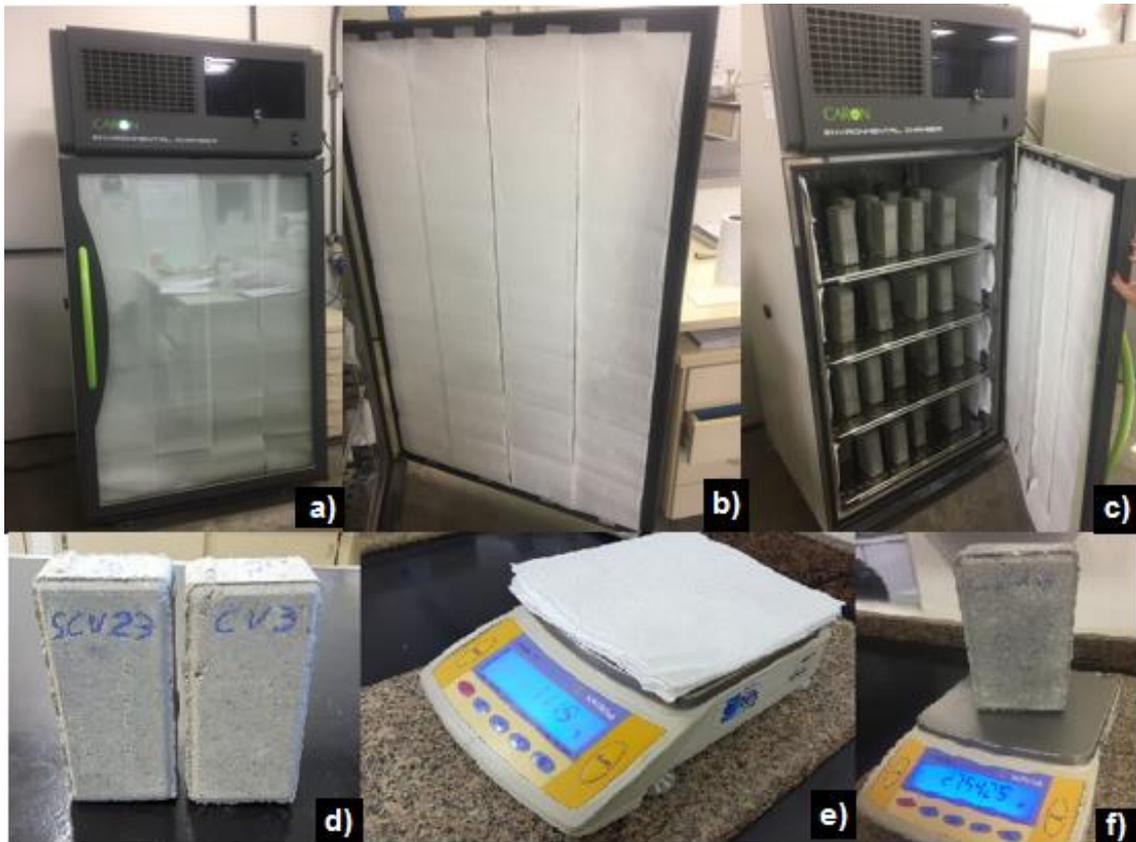
O procedimento de ensaio baseou-se nos estudos de Shao et al. (2006), Shao et al. (2010), Monkman e Shao (2010), Lin e Shao (2011), Rostami et al (2012), El-Hassan et al (2013), B. Zhan et al. (2013), e El-Hassan e Shao (2015). A câmara de carbonatação marca *Caron*, modelo 6020-2 foi revestida internamente com papel absorvente, com o objetivo de que a água presente neste sistema fechado, advinda das reações de hidratação, evaporação e carbonatação fosse absorvida pelo papel e então computada nos cálculos. Para tanto, o papel absorvente foi pesado antes e depois da cura por carbonatação. A referida etapa de revestimento da câmara de carbonatação e pesagem inicial do papéis absorventes foi realizada antes das PCPs chegarem à ABCP. Após a produção e cura inicial na fábrica, as PCPs foram encaminhadas rapidamente à Associação Brasileira de Cimento Portland onde foram identificadas (CV – cura à vapor; SCV –sem cura inicial à vapor), pesadas (Massa antes, CO₂) e inseridas na câmara de carbonatação para a realização da cura. Transcorridas 4 horas, quatro amostras (localizadas em posições diferentes) foram retiradas, pesadas para obtenção da Massa após carbonatação por 4 horas e rapidamente foram retornadas à câmara para que a cura continuasse até completar 16 horas. O mesmo procedimento foi realizado para os papéis absorventes, para os quais foram retiradas amostras da porta, das laterais e do teto, e com base no valor de água absorvido por estas amostras, estimou-se toda a água absorvida até então pelo sistema. Os papéis foram pesados e recolocados na câmara de carbonatação. O processo continuou até a totalização de 16 hs de cura. Após transcorridas as 16hs, as PCPs foram removidas da câmara e pesadas, bem como os papéis absorventes.

Para se chegar ao valor da massa de cimento por peça, verificou-se que o traço utiliza 220 kg de cimento e produz 640 unidades, portanto a massa inicial de aglomerante foi de 343,75 gramas/peça.

A Figura 3.5, abaixo, ilustra o procedimento de ensaio para verificação da absorção de CO_2 pelo método do Ganho de Massa.

Figura 3.5 – Procedimento de ensaio pelo método do ganho de massa:

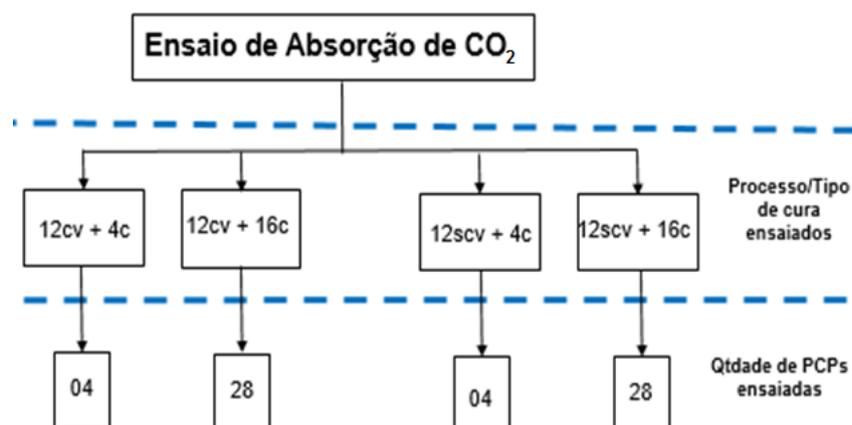
a) b) c) revestimento da câmara; c) posicionamento das PCPs na câmara; d) identificação das PCPs; e) pesagem dos papéis absorventes; f) pesagem das PCPs.



Fonte: próprio autor (2018).

Informações quanto ao processo e tempo de cura, bem como quantidade de peças ensaiadas são apresentadas pelo organograma da Figuras 3.6, a seguir.

Figura 3.6 – Ensaio de Absorção de CO_2 .



Fonte: Próprio autor (2018).

3.4.2 VERIFICAÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO

Com o objetivo de verificar e comprovar a ocorrência da carbonatação, realizou-se também a aspersão do indicador ácido-base fenolftaleína, o qual fica roxo em meio básico e transparente em meio ácido, indicando a ocorrência da carbonatação. A figura 3.7, a seguir, mostra o teste realizado aplicando-se a fenolftaleína.

Figura 3.7 – Aplicação do indicador ácido-base fenolftaleína nas PCPs carbonatadas.

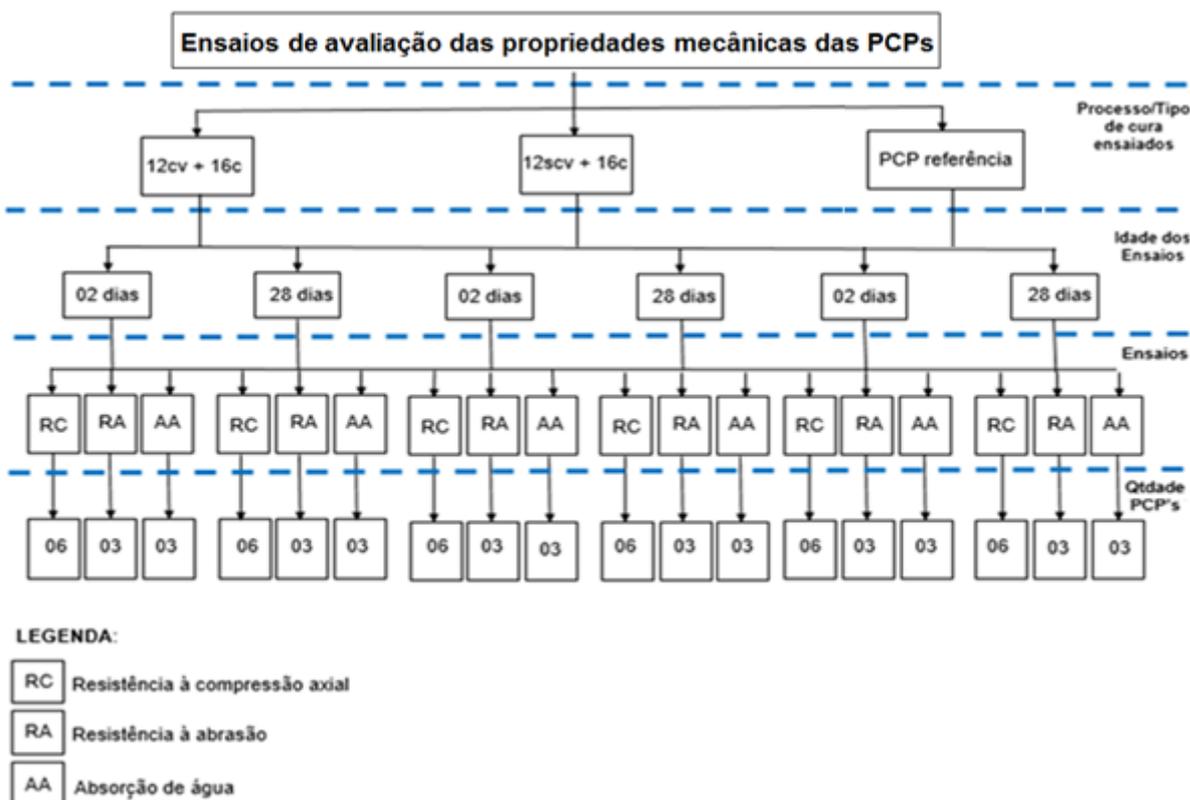


Fonte: Próprio autor (2018).

3.4.3 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS PEÇAS

A avaliação das propriedades mecânicas das PCPs é de suma importância para comprovar mais uma vantagem proporcionada pela cura por carbonatação, a qual está relacionada aos ganhos de resistência mecânica do material cimentício em poucas idades. A análise das propriedades mecânicas foram realizadas aos 02 (pouca idade) e 28 dias. Conforme mostra o organogramas da Figuras 3.8 abaixo.

Figura 3.8 – Ensaios de avaliação das propriedades mecânicas PCPs carbonatadas e referências.

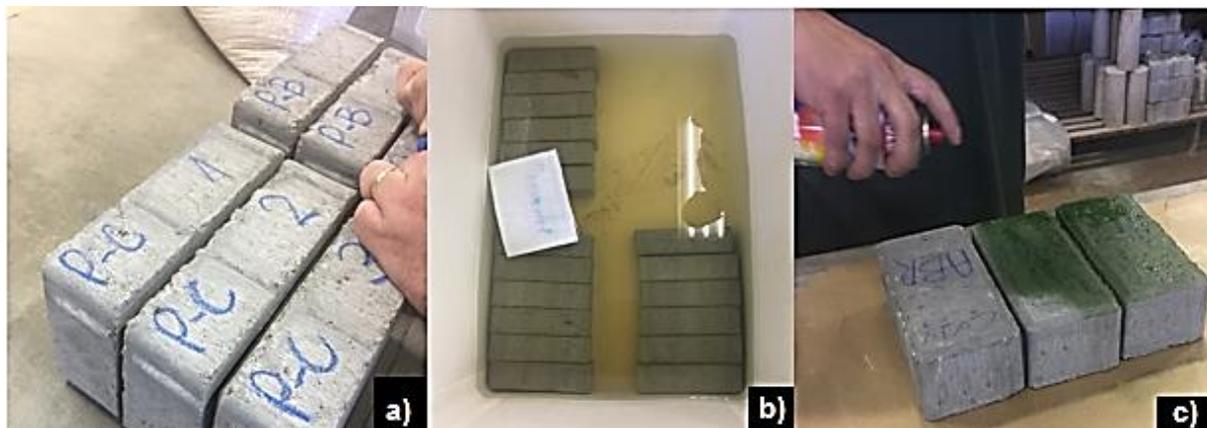


Fonte: Próprio autor (2018).

3.4.3.1 PREPARAÇÃO DAS PCPs

No dia anterior aos ensaios as peças foram medidas e identificadas com as siglas: PB – Referência (cura à vapor); PC – sem cura inicial à vapor e posterior carbonatação e PD – cura à vapor e posterior carbonatação. As PCPs que posteriormente seriam submetidas aos ensaios de compressão axial foram retificadas e submersas em água por 24 horas, as PCPs que seriam submetidas aos ensaios de resistência à abrasão foram pintadas com spray para melhor visualização do desgaste e as PCPs que seriam ensaiadas quanto à absorção de água foram submersas em tanque até completa saturação. A Figura 3.9, a seguir, retrata algumas etapas da preparação das peças para os ensaios.

Figura 3.9 – Preparação das PCPs para os ensaios: a) identificação das amostras; b) imersão em água; c) pintura da superfície.



Fonte: Próprio autor (2018).

3.4.3.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO

Mehta e Monteiro (2008) relacionam a qualidade do concreto à sua resistência a compressão, devido ao fato dele trabalhar predominantemente à compressão.

Todo o procedimento de ensaio de aferição da resistência característica à compressão axial das PCPs carbonatadas e PCPs referenciais foi realizado seguindo as especificações contidas na ABNT NBR 9781: 2013. Para o referido ensaio todas as peças foram retificadas e saturadas em água a $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ por no mínimo 24 horas, após decorrido o tempo, as PCPs foram posicionadas individualmente, de forma centralizada na prensa, de modo que suas faces superior e inferior ficassem em contato com as placas auxiliares. Por ser um ensaio destrutivo, o carregamento foi aplicado de forma crescente e contínua, com velocidade de 3120N/s ($\sim 318\text{Kgf/s}$) até a completa ruptura por compressão, sendo então possível calcular a resistência característica à compressão. A Figura 3.10, a seguir, ilustra as etapas do procedimento.

Figura 3.10 - Ensaio de resistência à compressão axial: a) prensa; b) posição da peça durante o ensaio; c) peça rompida.



Fonte: Próprio autor (2018).

A resistência à compressão individual das PCPs foi calculada de acordo com a Equação 3.2, abaixo, retirada da ABNT NBR 9781:2013:

$$f_{pi} = \left(\frac{P}{A}\right) * p \quad (3.2)$$

Onde:

f_{pi} = resistência à compressão individual da PCP (MPa);

P = Carga máxima de ruptura, em newtons (N);

A = área de carregamento, em milímetros quadrados (mm²);

p = fator de correção em função da altura da peça (Tabela A.1 da norma; sendo igual à 0,95 para peças com 60mm de altura).

Admitindo-se que as resistências à compressão obedeçam à distribuição normal, com auxílio da estatística, o valor característico de resistência estimada à compressão para o lote de PCPs deve ser estimado através das Equações 3.3 e 3.4.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (f_p - f_{pi})^2}{n-1}} \quad (3.3)$$

$$f_{pk, est} = f_p - t \times S \quad (3.4)$$

Onde:

f_p = resistência média das PCPs (MPa);

f_{pi} = resistência à compressão individual da PCP (MPa);

$f_{pk, est}$ = resistência característica estimada à compressão (MPa);

n = número de PCPs;

S = Desvio padrão da amostra (MPa);

t = coeficiente de Student, o qual varia de acordo com o tamanho da amostra (Tabela A.2 da Norma, sendo igual a 0,920 para 6 amostras).

Os lotes das peças de concreto para pavimentação entregues ao cliente com idade inferior a 28 dias devem apresentar no mínimo 80% do f_{pk} especificado na Tabela 2 da ABNT NBR 9781:2013 (sendo ≥ 35 MPa, para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais; e ≥ 50 MPa, para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados) no momento de sua instalação, sendo que aos 28 dias ou mais de idade de cura, o f_{pk} deve ser igual ou superior ao especificado na Tabela 2.

3.4.3.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO

A resistência à abrasão está relacionada com o desgaste superficial das peças de concreto para pavimentação provocado pelo trânsito sobre as peças. A Figura 3.11, apresenta uma PCP com baixa resistência à abrasão.

Figura 3.11 - PCP com baixa resistência à abrasão.



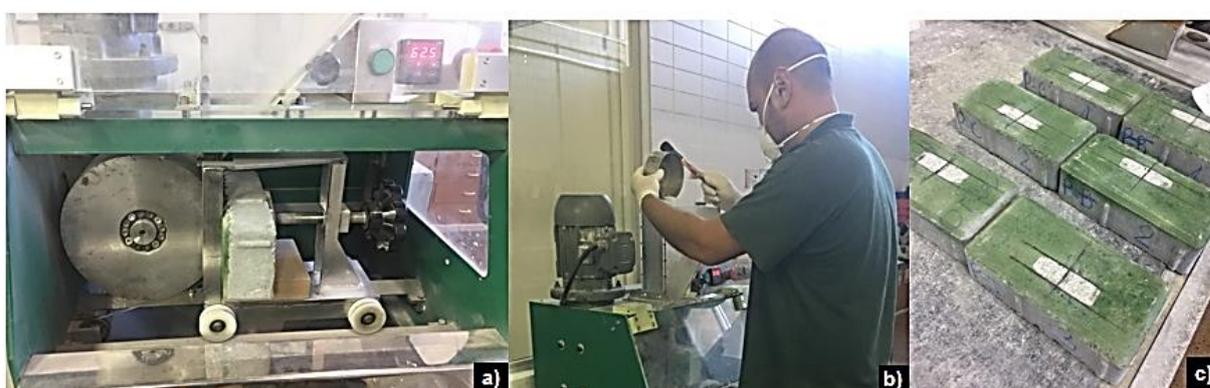
Fonte: Marchioni (2011).

Segundo Aslantas (2004) não se deve relacionar resistência à abrasão com resistência à compressão, uma vez que nem sempre será verificada essa correlação, pois PCPs com adequada resistência à compressão podem apresentar baixa resistência à abrasão devido a problemas na superfície da peça.

O ensaio de abrasão é considerado facultativo pela norma ABNT NBR 9781: 2013, porém esta prevê uma simulação das condições de desgaste em que as PCPs poderão estar submetidas durante sua utilização.

O ensaio de resistência à abrasão das PCPs carbonatadas e PCPs referenciais também foi direcionado pela ABNT NBR 9781:2013. Para o referido ensaio as peças foram pintadas com spray para que o desgaste fosse mais facilmente identificado, em seguida foram inseridas individualmente e posicionadas de forma centralizada em relação ao disco de aço rotativo com diâmetro de 200 mm e espessura de 70 mm e um contrapeso, o qual foi responsável por manter a PCP pressionada contra o disco. O reservatório do equipamento foi abastecido com material abrasivo constituído de óxido de alumínio fundido branco, o qual foi lançado de forma uniforme e simultânea à cada rotação do disco. Após as 62,5 revoluções do disco, o comprimento da largura da cavidade máxima impressa no corpo de prova foi medido com auxílio de um paquímetro. A Figura 3.12, a seguir ilustra as etapas do procedimento.

Figura 3.12 - Ensaio de resistência à abrasão: a) posicionamento da PCP; b) material abrasivo sendo lançado na interface entre disco e PCP c) desgaste após o ensaio.



Fonte: Próprio autor (2018).

3.4.3.4 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água nas PCPs está diretamente relacionada a porosidade e a consequente capacidade das peças de reterem líquido em seu interior (FERNANDES, 2011). Sabe-se que a porosidade governa a resistência, logo esse requisito é um indicativo da resistência mecânica das PCPs (MARCHIONI, 2012). A Figura 3.13 a seguir, retrata um pavimento intertravado constituído por PCPs que apresentam variação quanto a absorção de água.

Figura 3.13– Pavimento intertravado em que as PCPs apresentam variação quanto a absorção de água.



Fonte: Marchioni (2012).

Segundo a ABNT NBR 9781:2013 “a absorção de água, expressa em porcentagem, representa o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido a penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa em estado seco”.

O procedimento experimental para obtenção do percentual de absorção de água das PCPs foi direcionado conforme prescrição da referida norma e iniciou-se com o processo de saturação em que as peças foram submersas em água à temperatura de $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$, por 24 horas, feito isto foram posicionadas sobre tela metálica com o objetivo de escoar o excesso de água até a verificação da condição saturada com superfície seca, em seguida as peças foram pesadas individualmente para determinação da massa saturada; logo após iniciou-se o processo de secagem em que as PCPs saturadas foram inseridas em estufa com temperatura a $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ durante 24 horas, em seguida as PCPs foram pesadas individualmente para verificação da massa seca. A Figura 3.14 a seguir, ilustra as etapas do procedimento.

Figura 3.14 - Ensaio de absorção de água das PCPs: a) peças submersas; b) peças na estufa; c) pesagem das PCPs.



Fonte: Próprio autor (2018).

A absorção de água de cada PCP foi calculada de acordo com a Equação 3.5, abaixo:

$$A = \left(\frac{m_{sat} - m_{seca}}{m_{seca}} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

Onde:

A = absorção de água de cada PCP (%);

m_{sat} = massa da PCP saturada (g);

m_{seca} = massa da PCP seca (g).

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Os resultados nos ensaio das PCPs quanto à absorção de CO_2 , resistência à compressão axial, resistência à abrasão e absorção de água, foram avaliados estatisticamente segundo a Análise de Variâncias (ANOVA) e o Teste de Tukey. Ambos os testes serão brevemente descritos nesta seção.

3.5.1 ANOVA

Refere-se a um conjunto de técnicas estatísticas que permite comparar a média de três ou mais tratamentos (amostras), afirmando se existe ou não uma diferença significativa entre elas. A análise tem início com o estabelecimento de duas hipóteses iniciais: H_0 (hipótese nula) que afirma a igualdade entre as médias ($\mu_A = \mu_B = \mu_C$) e H_1 (hipótese alternativa) que supõe a existência de ao menos uma diferença entre elas ($\mu_A \neq \mu_B$ ou $\mu_A \neq \mu_C$ ou $\mu_B \neq \mu_C$). Todo o procedimento é realizado com base na hipótese

nula. A aceitação ou rejeição de H_0 depende do valor F obtido. Caso “ F ” seja maior que o “ $F_{crítico}$ ” a hipótese nula é rejeitada, se o contrário ocorrer, aceita-se H_0 .

O teste estatístico ANOVA realizado nesta pesquisa foi o de fator único ou “*oneway*”. Apenas uma única fonte de variação entre as amostras foi considerada (FILHO, 2015). A significância adotada foi de 5% ($\alpha=0,05$), ou seja, a análise foi realizada segundo uma confiança de 95% ($1- \alpha$). Para realização do ANOVA, contou-se com o auxílio do software Microsoft Excel, o qual forneceu os resultados tal como disposto na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Modelo de tabela contendo resultados do ANOVA fornecido pelo Excel.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos						
Dentro dos grupos						
Total						

Fonte: Próprio autor (2018).

Onde:

SQ= Soma dos quadrados dos tratamentos;

gl = Graus de liberdade;

MQ = Média quadrática dos tratamentos;

F = Valor calculado segundo o teste;

valor-P = Maior valor de significância (se valor-P < α , rejeita-se H_0);

F crítico = Valor de referência para a significância adotada (tabelado);

3.5.2 TESTE DE TUKEY

Ao se constatar diferença significativa no grupo de amostras avaliado, tornou-se necessário conhecer quais amostras diferiam entre si. Para isso, utilizou-se o Teste de Tukey, o qual consiste em um teste de hipóteses, assim como o ANOVA. Contudo, este avalia apenas duas amostras por vez. A hipótese nula e alternativa passam então a ser H_0 ($\mu_A=\mu_B$) e H_a ($\mu_A\neq\mu_B$). Para contemplar todo o grupo de amostras houve a necessidade de realizar o Teste de Tukey diversas vezes, combinando as amostras de duas a duas. O Teste de Tukey também foi realizado através do software Excel, utilizando-se uma significância de 5% ($\alpha=0,05$) e os resultados para cada combinação foram disponibilizados conforme a Figura 3.16, a seguir.

Figura 3.16– Modelo da tabela do Teste de Tukey fornecida pelo Excel.

	Amostra A	Amostra B
Média	XXXXXXXX	XXXXXXXX
Variância	XXXXXXXX	XXXXXXXX
Observações	XXXXXXXX	XXXXXXXX
Hipótese da diferença de média	XXXXXXXX	
gl	XXXXXXXX	
Stat t	XXXXXXXX	
P(T<=t) uni-caudal	XXXXXXXX	
t crítico uni-caudal	XXXXXXXX	
P(T<=t) bi-caudal	XXXXXXXX	
t crítico bi-caudal	XXXXXXXX	

Fonte: Próprio autor (2018).

A aceitação ou rejeição de H_0 depende do valor “Stat t” obtido. Caso esse seja maior que o “t crítico bi-caudal” a hipótese nula é rejeitada, se o contrário ocorrer, aceita-se H_0 . Para a avaliação dos diferentes processos de cura estudados nesta pesquisa foram realizadas 3 combinações. Estas podem ser melhor observadas na Tabela 3.3, abaixo.

Tabela 3.3 – Combinações para o Teste de Tukey.

CURAS	12cv + 16 c	12scv +16c
PCP Referência	1	2
12cv + 16 c		3
12scv +16c		

Após a realização do Teste de Tukey em cada combinação, atribuiu-se as siglas EQ para aquelas onde as médias foram consideradas equivalentes (H_0 aceita) e DS para as combinações onde diferenças significativas foram verificadas (H_0 rejeitada).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados todos os resultados obtidos nos procedimentos de ensaios de absorção de CO₂, verificação da frente de carbonatação com fenolftaleína, resistência à compressão axial, resistência à abrasão e absorção de água das PCPs submetidas à cura por carbonatação acelerada e referenciais.

4.1 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE CO₂ NAS PCPS

As Tabela 4.1 e 4.2 abaixo, mostram os valores relacionados à absorção de CO₂ obtidos pelo método do Ganho de Massa para as PCPs submetidas à cura por carbonatação durante 04 e 16 horas, respectivamente.

Tabela 4.1 – Resultados de absorção de CO₂ pelo Método do Ganho de Massa para 04 hs de cura por carbonatação.

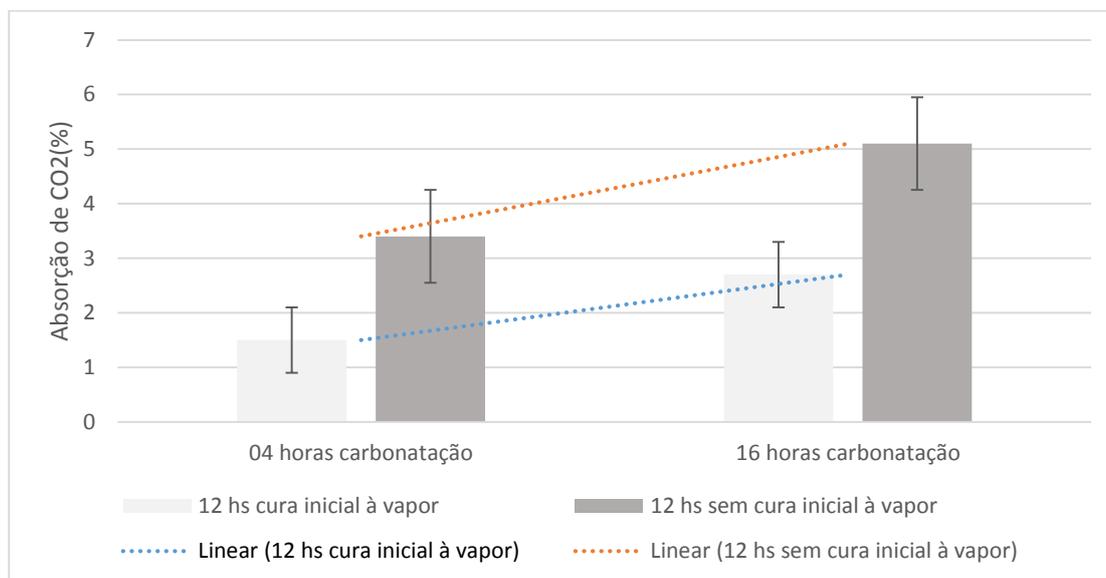
Corpo de prova nº	Absorção de CO ₂ (%)	
	12cv + 04c	12scv + 04c
1	1,9	3,4
2	1,0	3,1
3	1,6	3,3
4	1,6	3,9
Desvio Padrão	0,4	0,3
Coef. Variação (CV)	25,17%	10,01%
Absorção média de CO₂ (%)	1,5	3,4

Tabela 4.2 – Resultados de absorção de CO₂ pelo Método do Ganho de Massa para 16 hs de cura por carbonatação.

Corpo de prova nº	Absorção de CO ₂ (%)	
	12cv +16c	12scv + 16c
1	3,1	6,0
2	1,5	4,4
3	2,7	5,7
4	2,4	4,8
5	1,6	4,1
6	3,2	6,0

7	1,9	6,5
8	3,6	6,5
9	2,7	4,1
10	4,2	4,7
11	2,5	5,4
12	2,6	4,9
13	1,5	5,8
14	4,2	4,2
15	2,6	5,6
16	3,4	4,2
17	2,9	5,2
18	1,8	4,8
19	4,0	4,5
20	3,6	5,0
21	1,9	6,2
22	3,0	5,2
23	2,9	4,8
24	1,8	5,0
25	2,7	5,9
26	1,5	4,5
27	2,4	4,4
28	4,2	5,4
Desvio Padrão	0,8	0,7
Coef. Variação (CV)	31,07%	14,26%
Absorção média de CO₂ (%)	2,7	5,1

O gráfico contido na Figura 4.1 ilustra o sequestro de CO₂ para ambos os processos e tempos de cura inicial e posterior cura por carbonatação acelerada.

Figura 4.1 – Absorção de CO₂ em PCPs.

Fonte: próprio autor (2018).

Com o objetivo de verificar se houve diferença significativa entre as médias de absorção de CO₂ para os diferentes processos de cura inicial e posterior carbonatação por 04 horas, realizou-se o teste estatístico ANOVA e os resultados encontram-se na Tabela 4.3, a seguir.

Tabela 4.3 - ANOVA para absorção de CO₂ durante 04 horas de carbonatação.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7,22	1	7,22	55,89677419	0,00029563	5,9873776
Dentro dos grupos	0,775	6	0,129167			
Total	7,995	7				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, foi possível concluir que houve diferença significativa entre as médias de absorção de CO₂. Os valores de captura de CO₂ para os diferentes processos de cura inicial e posterior carbonatação por 16 horas também foram verificados segundo à ANOVA. Os resultados são apresentados pela Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - ANOVA para absorção de CO₂ durante 16 horas de carbonatação.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	80,95049051	1	80,95049051	128,9461	6,29E-16	4,019541
Dentro dos grupos	33,90042616	54	0,62778567			
Total	114,8509167	55				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, foi possível concluir que houve diferença significativa entre as médias de absorção de CO₂.

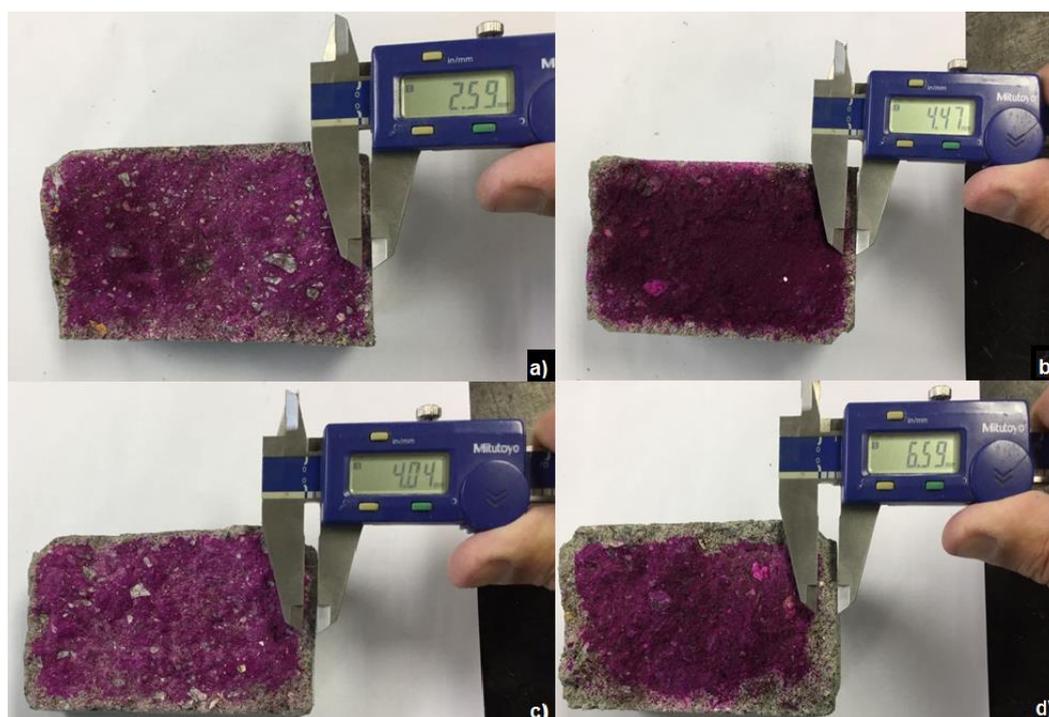
Através dos resultados obtidos verificou-se e comprovou-se estatisticamente a superioridade dos valores de absorção de CO₂ para as PCPs sem cura inicial à vapor com posterior carbonatação por 4hs e 16hs. Tal fato foi atribuído à redução da barreira alcalina, uma vez que, as PCPs não submetidas a cura inicial à vapor produziram menores quantidades de hidratos, propiciando um maior avanço da frente de carbonatação e conseqüente superior absorção de CO₂. Tais resultados corroboram com os estudos de Shao e Lin (2011), El-Hassan e Shao (2015) e El-Hassan et al (2013).

4.2 VERIFICAÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO COM FENOLFTALEÍNA

A Figura 4.2 e a Tabela 4.5 a seguir, mostram os valores relacionados ao avanço da frente de carbonatação verificada por meio do ensaio de aspersão de fenolftaleína nas PCPs submetidas à cura por carbonatação durante 04 e 16 horas.

Figura 4.2 – Verificação da frente de carbonatação após 04 e 16 hs de carbonatação:

- a) 12cv+04c (12hs de cura à vapor inicial + 04hs de cura por carbonatação);**
- b) 12scv+04c (12hs sem cura à vapor inicial + 04hs de cura por carbonatação);**
- c) 12cv+16c: (12hs de cura à vapor inicial + 16hs de cura por carbonatação);**
- d) 12scv+16c: (12hs sem cura à vapor inicial + 16hs de cura por carbonatação).**



Fonte: próprio autor (2018).

Tabela 4.5 - Verificação da frente de carbonatação após 04 e 16 hs de cura por carbonatação.

Corpo de prova nº	Avanço da frente de carbonatação (mm)			
	12cv + 04c	12scv + 04c	12cv + 16c	12scv + 16c
1	2,59	4,47	4,04	6,59

Por meio dos resultados apresentados, verificou-se que após 04 e 16 horas de carbonatação, houve um maior avanço da frente de carbonatação nas PCPs sem cura inicial à vapor, tal resultado se deve a redução da barreira alcalina proporcionada pela ausência de cura inicial à vapor e conseqüente menor formação de hidratos, conforme verificado na teoria e nos estudos que compõem o estado da arte desta pesquisa.

4.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO

A Tabela 4.6 traz os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02 dias de idade das PCPs submetidas à 16 horas de cura por carbonatação acelerada e peças referenciais (não carbonatadas).

Tabela 4.6 - Ensaio de resistência à compressão axial aos 2 dias.

Corpo de prova nº	Resistência à compressão axial (MPa)		
	12cv + 16 c	12scv +16c	PCP Referência (CV)
1	39,7	39,3	38,2
2	42,9	40,2	39,7
3	41,2	40,7	39,7
4	41,7	41,9	37,5
5	42,9	40,2	36,7
6	42,4	41,5	37,8
Média amostral	41,8	40,6	38,3
Desvio padrão	1,2	1,0	1,2
Coef. Variação (CV)	2,87%	2,46%	3,13%
f_{pk} (MPa) *	40,7	39,7	37,2

* Resistência característica à compressão

Por meio dos resultados obtidos verificou-se que todas as PCP's ensaiadas aos 02 dias de idade alcançaram resistência característica à compressão axial superior ao exigido na ABNT NBR 9781:2013, a qual deve ser igual ou superior a 35 MPa aos 28 dias.

Com o intuito de verificar se houve diferença significativa entre as médias das resistências à compressão axial obtidas para os diferentes processos de cura aos 02 dias de idade, realizou-se o teste estatístico ANOVA e os resultados encontram-se na Tabela 4.7, a seguir.

Tabela 4.7 - ANOVA para resistência à compressão axial aos 2 dias.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	6110,913333	3	2036,97111	1102,654878	2,27E-22	3,098391
Dentro dos grupos	36,9466667	20	1,84733333			
Total	6147,86	23				

Verificou-se que o valor de "F" obtido foi maior que o "Fcrítico". Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre as médias das resistências à compressão axial fornecidas pelos três processos de cura aos 02 dias de idade. Para averiguar onde se encontram tais diferenças aplicou-se o Teste de Tukey, cujos resultados são expostos na Tabela 4.8 a seguir.

Tabela 4.8 - Teste de Tukey para resistência à compressão aos 02 dias.

CURAS	12cv + 16 c	12scv +16c
PCP Referência	DS*	DS*
12cv + 16 c		EQ**
12scv +16c		

DS* =diferença significativa entre as duas curas analisadas

EQ** = valores estatisticamente equivalentes

Portanto, é possível verificar que houve diferença significativa quanto à resistência à compressão axial entre as PCPs carbonatadas e as PCPs referenciais, sendo os valores de fpk equivalentes entre as PCPs carbonatadas. Tal resultado, comprova estatisticamente que a cura por carbonatação acelerada promove ganho de resistência às PCPs logo nas primeiras idades.

Observou-se que as PCPs carbonatadas sem cura inicial à vapor (12scv+16c) apresentaram valores de resistência à compressão axial superiores às PCPs referências (curadas apenas à vapor), essa situação não seria provável caso as PCPs fossem curadas apenas “ao ar livre” sem posterior carbonatação, pois na cura ao ar livre menos produtos de hidratação são formados. De acordo com a teoria abordada no presente estudo, tal resultado deve-se à menor formação de hidratos e conseqüente menor formação de barreira alcalina nas PCPs sem cura inicial à vapor, o que permitiu um maior avanço da frente de carbonatação e conseqüente maior precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3) nos poros do concreto.

Os resultados obtidos corroboram com os estudos de Shao e Lin (2011), Rostami et al (2012), B.Zhan (2013), El-Hassan e Shao (2015) e El-Hassan et al (2013).

A Tabela 4.9 traz os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias de idade das PCPs submetidas à 16 horas de cura por carbonatação acelerada e peças referenciais (não carbonatadas).

Tabela 4.9 - Ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias.

Corpo de prova nº	Resistência à compressão axial (MPa)		
	12cv + 16 c	12scv +16c	PCP Referência
1	49,7	43,2	43,2
2	48,7	45,7	40,0
3	51,4	45,7	41,9
4	47,2	43,4	45,9
5	47,0	45,0	42,4
6	45,5	43,4	49,4
Média amostral	48,3	44,4	43,8
Desvio padrão	2,1	1,2	3,4
Coef. Variação (CV)	4,39%	2,70%	7,65%
f_{pk} (MPa) *	46,4	43,3	40,7

* Resistência característica à compressão

Através dos resultados encontrados tornou-se possível concluir que todas as PCPs ensaiadas aos 28 dias de idade possuíram resistência característica à compressão axial superior ao exigido na ABNT NBR 9781:2013, a qual deve ser igual ou superior a 35 MPa aos 28 dias.

Realizou-se o teste estatístico ANOVA para verificar se houve diferença significativa entre as médias das resistências à compressão axial obtidas para os

diferentes processos de cura aos 28 dias de idade e os resultados encontram-se na Tabela 4.10, a seguir.

Tabela 4.10 - ANOVA para resistência à compressão axial aos 28 dias.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	69,97	2	34,985	6,118041	0,011405	3,68232
Dentro dos grupos	85,775	15	5,718333			
Total	155,745	17				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, houve diferença significativa entre as médias das resistências à compressão axial fornecidas pelos três processos de cura aos 28 dias de idade das PCPs. Para averiguar onde se encontram tais diferenças aplicou-se o Teste de Tukey, cujos resultados são expostos na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Teste de Tukey para resistência à compressão aos 28 dias.

CURAS	12cv + 16 c	12scv +16c
PCP Referência	DS*	EQ**
12cv + 16 c		DS*
12scv +16c		

DS* =diferença significativa entre as duas curas analisadas

EQ** = valores estatisticamente equivalentes

Observou-se que aos 28 dias a maior resistência à compressão axial encontrada foi para as PCPs submetidas à cura inicial à vapor e posterior carbonatação, verificou-se que houve diferença significava entre a resistência à compressão destas quando comparada às PCPs submetidas aos demais processos de cura. Os valores de fpk das PCPs sem cura inicial à vapor com posterior carbonatação apesar de apresentarem uma tendência a serem superiores aos fpk_s das PCPs referenciais (curadas somente à vapor, não carbonatadas), se mostraram equivalentes de acordo com o teste estatístico de Tukey. Contudo, do ponto de vista ambiental as PCPs (12scv+16c) são mais vantajosas do que as PCPs referenciais, uma vez que aquelas apresentam a prerrogativa de incorporar o CO₂ do meio.

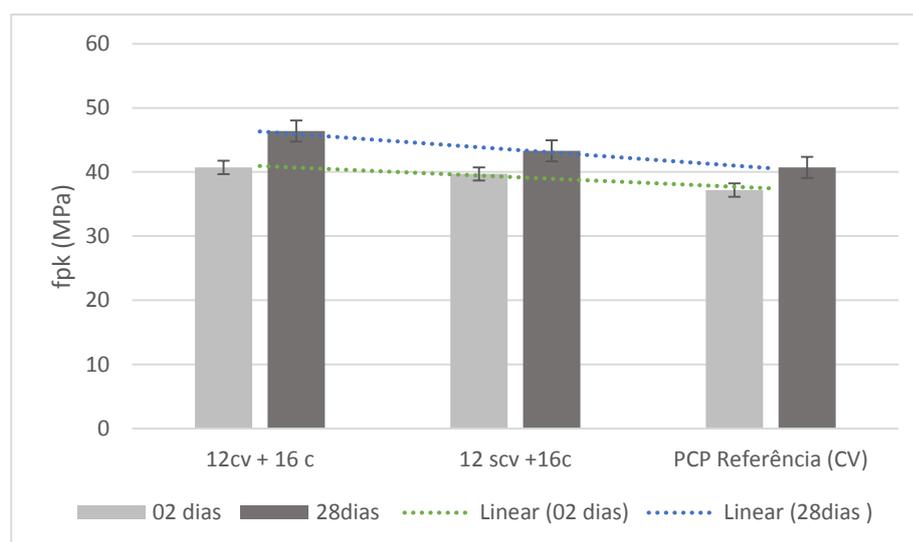
As PCPs (12scv+16c) e (12cv+16c) não mantiveram os valores de fpk equivalentes aos 02 e 28 dias; tal fato, foi atribuído a cura inicial à vapor, a qual

proporciona uma maior umidade interna ao corpo de prova permitindo que as reações de hidratação do cimento (as quais dependem de água) perdurem por mais tempo, enquanto que as PCPs não curadas inicialmente à vapor, por este motivo acabaram apresentando menor umidade interna, prejudicando as reações de hidratação.

Resultados semelhantes foram verificados no estudo de El-Hassan et al (2013), Boyd et al (2012) e B. Zhan et al (2013).

O gráfico contido na Figura 4.3 ilustra o incremento de resistência à compressão das peças dos 02 aos 28 dias de idade, nele é possível visualizar que as PCPs carbonatadas ganharam resistência com o passar dos dias, sendo este resultado de grande valia para indústria, uma vez que ademais, agregam a questão do benefício ambiental relacionado ao sequestro de CO₂.

Figura 4.3 - Incremento de resistência à compressão.



Fonte: próprio autor (2018).

4.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO

As Tabelas 4.12 e 4.13 trazem os resultados dos ensaios de resistência à abrasão das PCPs submetidas à 16 horas de cura por carbonatação acelerada e peças referenciais (não carbonatadas), realizados aos 02 e 28 dias de idade, respectivamente.

Tabela 4.12 - Ensaio de resistência à abrasão aos 02 dias.

Corpo de prova nº	Abrasão individual (mm)		PCP Referência (CV)
	12cv + 16 c	12scv +16c	
1	21,6	21,6	21,2
2	21,4	21,6	21,5
3	21,3	22,1	22,2
Desvio padrão	0,16	0,29	0,51
Coef. Variação (CV)	0,74%	1,32%	2,37%
Abrasão média (mm)	21,4	21,8	21,6
Abrasão média corrigida (mm)	21,5	22,00	21,5

Tabela 4.13 - Ensaio de resistência à abrasão aos 28 dias.

Corpo de prova nº	Abrasão individual (mm)		PCP Referência (CV)
	12cv + 16 c	12scv +16c	
1	21,8	21	21
2	22,0	22,5	23
3	22,0	22,5	22
Desvio padrão	0,12	0,87	1,00
Coef. Variação (CV)	0,52%	3,94%	4,55%
Abrasão média (mm)	21,9	22,0	22,0
Abrasão média corrigida (mm)	22,0	22,0	22,0

Os resultados dos ensaios de resistência abrasão mostraram que todas as PCPs ensaiadas aos 02 e 28 dias de idade atenderam a ABNT NBR 9781: 2013, a qual determina que os valores de desgaste devem ser iguais ou inferiores à 23 mm.

Realizou-se o teste ANOVA para verificar se houve ou não diferença significativa entre as médias das resistências à abrasão obtidas para os três diferentes processos de cura aos 2 e 28 dias de idade. Os resultados foram sintetizados pela Tabela 4.14 e 4.15, respectivamente.

Tabela 4.14 - ANOVA para resistência à abrasão aos 02 dias.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,16888889	2	0,084444444	0,684685	0,539713	5,143253
Dentro dos grupos	0,74	6	0,123333333			
Total	0,90888889	8				

Tabela 4.15 - ANOVA para resistência à abrasão aos 28 dias.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,008889	2	0,004444	0,007561	0,992477	5,143253
Dentro dos grupos	3,526667	6	0,587778			
Total	3,535556	8				

Nas situações analisadas acima o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”, com 95% de confiança. Para tanto, concluiu-se que as resistências médias obtidas são estatisticamente equivalentes tanto aos 02 dias, como aos 28 dias de idade das PCPs.

Portanto, os resultados de resistência à abrasão para as PCPs carbonatadas e referenciais aos 02 e 28 dias foram considerados equivalentes e satisfatórios. Logo, a carbonatação, apesar de tornar a peça prematura devido a rápida maturação, não trouxe prejuízos para a resistência à abrasão.

4.5 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

As Tabelas 4.16 e 4.17 trazem os resultados dos ensaios de absorção de água aos 02 e 28 dias de idade das PCPs submetidas à 16 horas de cura por carbonatação acelerada e peças referenciais (não carbonatadas), respectivamente.

Tabela 4.16 - Ensaio de absorção de água aos 02 dias.

Corpo de prova nº	Absorção de água (%)		
	12cv + 16 c	12scv +16c	PCP Referência (CV)
1	4,2	4,4	3,7
2	4,2	4,9	4,2
3	3,3	4,5	2,4
Desvio padrão	0,52	0,26	0,93
Coef. Variação (CV)	13,33%	5,65%	27,35%
Absorção média de água (%)	3,9	4,6	3,4

Tabela 4.17 - Ensaio de absorção de água aos 28 dias.

Corpo de prova nº	Absorção de água (%)		
	12cv + 16 c	12 scv +16c	PCP Referência (CV)
1	4,3	3,8	2,8
2	5,7	3,8	3,1
3	1,8	4	3,4
Desvio padrão	1,98	0,12	0,30
Coef. Variação (CV)	50,23%	2,99%	9,68%
Absorção média de água (%)	3,9	3,9	3,1

Os resultados dos ensaios de absorção de água mostraram que todas as PCPs ensaiadas aos 2 e 28 dias de idade atenderam a ABNT NBR 9781: 2013, a qual determina que a absorção das PCPs deve ser igual ou inferior a 6,0%.

Realizou-se o teste ANOVA para verificar se houve ou não diferença significativa entre as médias de absorção de água obtidas para os três diferentes processos de cura aos 02 e 28 dias de idade, os resultados foram sintetizados e encontram-se nas Tabelas 4.18 e 4.19, respectivamente.

Tabela 4.18 - ANOVA para absorção de água aos 02 dias.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,068889	2	1,034444	2,578947	0,155492	5,143253
Dentro dos grupos	2,406667	6	0,401111			
Total	4,475556	8				

Tabela 4.19 - ANOVA para absorção de água aos 28 dias.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,28666667	2	0,643333333	0,481697	0,639721	5,143253
Dentro dos grupos	8,01333333	6	1,335555556			
Total	9,3	8				

Nas situações analisadas acima o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”, com 95% de confiança; concluiu-se então que as médias de absorção de água obtidas são estatisticamente equivalentes aos 02 e 28 dias de idade das PCPs.

Portanto, os resultados quanto à absorção de água para as PCPs carbonatadas e referenciais aos 02 e 28 dias foram considerados equivalentes e satisfatórios. Logo, a carbonatação, apesar de tornar a peça prematura devido a rápida maturação, não trouxe prejuízos para a resistência à abrasão.

5 CONCLUSÕES

O estado da arte relacionado às pesquisas de absorção de CO₂ em pré-fabricados de cimento, apresentado neste trabalho, mostra que, apesar de muito ter sido feito, ainda existem lacunas de conhecimento, incluindo algumas relacionadas às peças de concreto para pavimentação. Após revisão bibliográfica, verificou-se que escassos são os estudos relacionados às PCPs e aos fatores que influenciam na carbonatação destas, tais como: início de cura, tempo de exposição, concentração de CO₂, umidade relativa, temperatura e correlação com ensaios naturais. A partir do presente estudo, as *questões de pesquisa* foram respondidas e seguem abaixo.

- O procedimento de cura por carbonatação acelerada promoverá a absorção de CO₂ em peças de concreto para pavimentação, especificamente?

Os resultados obtidos evidenciam que o procedimento de cura por carbonatação acelerada promoveu a captura de CO₂ nas PCPs e atestam o elevado potencial deste procedimento para benefício ambiental. Uma vez que a concentração de CO₂ utilizada nos ensaios foi de apenas 20% e pode ser aumentada, o potencial poderá ser ainda maior.

- O método do Ganho de Massa será viável para quantificar o CO₂ capturado?

O Método do Ganho de Massa demonstrou-se viável para obtenção do percentual de absorção de CO₂. Tal conclusão é corroborada pelos estudos que compuseram o estado da arte dessa pesquisa, uma vez que Shao et al. (2006), Shao et al. (2010), Monkman e Shao (2010), Shao e Lin (2011), Rostami et al (2012), El-Hassan et al (2013), B. Zhan et al. (2013), e El-Hassan e Shao (2015) utilizaram o referido método para quantificar a absorção de CO₂. Inclusive, Shao e Lin (2011), Rostami et al (2012), B. Zhan et al. (2013), El-Hassan et al (2013) e El-Hassan e Shao (2015) verificaram a absorção de CO₂ utilizando os métodos de Ganho de Massa, Curva de Massa e/ou Termogravimetria, e concluíram que os resultados obtidos por meio dos três métodos são próximos.

- Qual procedimento de cura inicial anterior à cura por carbonatação mostrar-se-á mais eficiente para captura de CO₂?

Melhores resultados quanto a absorção de CO₂ foram obtidos para as PCPs sem cura inicial à vapor e posterior carbonatação por 4hs e 16hs. De acordo com o estado da arte apresentado a não realização de cura inicial à vapor promove a redução da barreira alcalina, propiciando um maior avanço da frente de carbonatação, permitindo que mais CO₂ seja incorporado na matriz cimentícia. Tal resultado foi confirmado pelo teste de fenolftaleína, uma

vez que as PCPs sem cura inicial à vapor e posterior carbonatação por 4hs e 16hs apresentaram maior avanço da frente de carbonatação.

- Será possível estimar o sequestro de CO₂ no Brasil, propiciado pela cura por carbonatação das PCPs, através da taxa de absorção de CO₂ a ser obtida no presente estudo?

É de conhecimento do meio técnico que a emissão de CO₂ referente a produção de cimento no ano de 2012 no Brasil foi de aproximadamente 25.309.000 toneladas. No referido ano foram produzidas 69.324.000 toneladas de cimento (SNIC, 2012), sendo, destas, 4.159.440 toneladas representativas do setor de pré-fabricados não armados (blocos, PCPs e telhas, entre outros) (SNIC, 2012). Aplicando-se a melhor taxa de absorção de CO₂ encontrada de 5,10%, concluiu-se que teria sido possível sequestrar no Brasil no ano de 2012, aproximadamente 212.131,44 ton de CO₂, o que corresponderia a ~ 1,0 % do total de CO₂ emitido pelo subsetor. Tal resultado pode ser considerando potencialmente ótimo, pois a taxa de 5,1% foi obtida para concentração de CO₂ na câmara de carbonatação de apenas 20%, valor bem inferior ao encontrado na revisão bibliográfica que variava em torno de 100%.

- Qual procedimento de cura inicial anterior à cura por carbonatação apresentará maior ganho de resistência?

Com relação aos resultados obtidos quanto à resistência à compressão axial foi possível verificar que as PCPs carbonatadas sem cura inicial à vapor e com cura inicial à vapor apresentaram resultados elevados aos 02 e 28 dias. Os maiores valores foram verificados para as PCPs com cura inicial à vapor, provavelmente por conta da maior umidade interna do corpo do prova o que permitiu que as reações de hidratação do cimento perdurassem por mais tempo. Quanto à resistência à abrasão e absorção de água, as PCPs carbonatadas apresentaram resultados equivalentes às não carbonatadas.

- As PCPs carbonatadas apresentarão melhora quanto à resistência mecânica quando comparadas às PCPs não carbonatadas (referenciais) logo nas primeiras idades?

As PCPs carbonatadas apresentaram melhora quanto à resistência mecânica quando comparadas às PCPs não carbonatadas. Ocorre que a carbonatação torna a peça prematura, ou seja, sua maturação é acelerada e esta acaba adquirindo as propriedades mecânicas esperadas aos 28 dias muito mais rapidamente. Desta forma, corroborando-se com os trabalhos anteriores realizados com pré moldados não armados, comprova-se o ganho de resistência em poucas idades promovido pela referida reação química, sendo sua incorporação no processo de cura de grande vantagem para a indústria de pré-fabricados.

Por fim, os resultados e informações obtidas nesta pesquisa, evidenciam que o processo de cura por carbonatação acelerada traz benefícios para a indústria de pré fabricados não armados, uma vez que as peças carbonatadas além de absorverem CO₂ do meio, apresentam elevada resistência mecânica logo nas primeiras idades, reduzindo o tempo de espera nas fábricas. Para tanto, sugere-se que as indústrias brasileiras, seguindo o exemplo das indústrias internacionais, passem a aplicar a cura por carbonatação acelerada no seu dia a dia, obtendo produtos sustentáveis devido a captura de CO₂ do meio e mais eficientes do ponto de vista da resistência mecânica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIL, S.; VASUDEV. A; KUMAR, P.; REDDY, A.; **STUDY ON CO2 ABSORVING CONCRETE.** International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), Vol 8. 2017. Disponível: http://www.iaeme.com/MasterAdmin/UploadFolder/IJCIET_08_04_201/IJCIET_08_04_201.pdf > Acesso em: 20/11/2017.

ALVES, J.A., **Materiais de construção.** Editora da Universidade Federal de Goiás. 6ª Edição. Goiânia GO. 1987.

ASCE (1992) – **Design and construction of urban stormwater management systems.** American Society Of Civil Engineers. New York.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Manual de Pavimento Intertravado.** Passeio Público. 2010.36p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Pavimento intertravado é alternativa sustentável para economia de recursos.** (Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/pavimento-intertravado-e-alternativa-sustentavelpara-economia-de-recursos> >). Acessado em 27.11.2017a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Pavimentos Intertravados –Pontos de destaque.** (Disponível em: <http://www.solucoesparacidades.com.br/passeio_publico/pavimento-intertravado>). Acessado em 27.11.2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT NBR 9781:2013: **Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT NBR 16416:2015 – **Pavimentos permeáveis – requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro, 2015.

Barker, D.J., Turner, S.A., Napier-Moore, P.A., Clark, M., Davison, J.E., 2009. **CO2 capture in the cement industry.** Energy Procedia 1, 87e94.

Barker, D.J., Turner, S.A., Napier-Moore, P.A., Clark, M., Davison, J.E., 2009. **CO₂ capture in the cement industry**. In: Proceedings of the Ninth International Conference on Greenhouse Gas Technologies, GHGT-9, WashingtonDC, USA. Energy Procedia 1, pp. 87–94.

BATTAGIN, A. F.; CURTI, R.; SILVA, C. O.; MUNHOZ, F. A. C. **Influência das condições de cura em algumas propriedades dos concretos convencionais e de alto desempenho**. In: Instituto brasileiro de Concreto – Congresso Brasileiro, 44, 2010. São Paulo, 13p.

Battelle, 2002. **Toward a Sustainable Cement Industry**, WBCSD (<http://www.wbcscd.org/web/projects/cement/articles/sdi.pdf>) (accessed 3.06.11).

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

Benhelal a , Gholamreza Zahedi a,* , Ezzatollah Shamsaei b , Alireza Bahadori. **Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry**. Elsevier Ltd, Journal of Cleaner Production 51 (2013).

BESSA, V.M.T. **Contribuição da metodologia de avaliação das emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida das fachadas de edifícios e escritórios**. 286 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

Blamey, J., Anthony, E.J., Wang, J., Fennell, P.S., 2010. **The calcium looping cycle for large-scale CO₂ capture**. Progress in Energy and Combustion Science 36, 260–279.

Bosoaga, A., Masek, O., Oakey, J., 2009. **CO₂ capture technologies for cement industry**. In: Proceedings of Ninth International Conference on Greenhouse Gas Technologies, GHGT-9, Washington DC, USA, EnergyProcedia 1, pp. 133– 140.

Boyd, Andrew J., Rostami, V., Shao, Y. **Carbonation Curing versus Steam Curing for Precast Concrete Production**. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 24, No. 9, September 1, 2012.

BRASIL - Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação Geral de Mudanças Globais de

Clima, 2010. Segunda comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília: MCT. 154p. Disponível em: http://www.mct.gov.br/upd_blob/0219/219293.pdf>. Acesso em: 16 set. 2018.

BRASIL - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **ESTIMATIVAS ANUAIS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL**, - 2ª edição, 2014.

Boden, T., Marland, G., Andres, B., 2011b. **Global CO₂ Emissions from Fossil-fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751e2008**. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. Disponível em: cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2008.ems>.

Bukowski, J.M. , R.L. Berger, **Reactivity and strength development of CO₂ activated non-hydraulic calcium silicates** Cem. Concr. Res. 9 (1979).

Cai, W., Wang, C., Liu, W., Mao, Z., Yu, H., Chen, J., 2009. **Sectoral analysis for international technology development and transfer: cases of coal-fired power generation, cement and aluminium in China**. Energy Policy 37, 2283–2291.

CCS Task Force Report, 2010. Disponível em: www.fe.doe.gov/programs/sequestration/ccstf/CCSTaskForceReport2010.pdf. Acesso em 28/12/2018.

Cement Technology Roadmap, 2009. **Carbon Emissions Reductions up to 2050**. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) and International Energy Agency (IEA). October 2010.

Cement roadmap targets, 2009. International Energy Agency (IEA), Disponível em: www.iea.org/papers/2009/Cement_Roadmap_targets_viewing.pdf.

Chan, Chloe Yan; Peterson, Karl; Bromerchenkel, Lucas Herzog; Dittrich, Maria and Monkman, Sean. **ASSESSMENT OF CARBON SEQUESTRATION POTENTIAL OF CONCRETE BLOCKS WITH AN ACCELERATED ENVIRONMENTAL EXPOSURE CHAMBER**. 13TH CANADIAN MASONRY SYMPOSIUM HALIFAX. Dalhousie University, Canada, JUNE 4TH – JUNE 7TH 2017.

Climate Change, 2007b. The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge Univ. Press; 2007. pp. 747e785.

Damineli, Bruno Luis, **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas.** Tese Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Ed.Rev. São Paulo, 2013, 237p.

Dilnesa, B.Z. , B. Lothenbach, G. Le Saout, G. Renaudin, A. Mesbah, Y. Filinchuk, A. Wichser, E. Wieland, **Iron in carbonate containing AFm phases.** Cem. Concr. Res. 41 (2011) 311–323.

EC (European Commission), 2009. Directive 2009/29/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 Amending Directive 2003/87/EC so as to Improve and Extend the Greenhouse Gas Emission Allowance Trading Scheme of the Community (<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0063:0087:en:PDF>).

ECRA, 2011. ECRA CCS Project (http://www.wbcscement.org/pdf/CSIForum2010/09%20ECRA_CCS_%20CSI_Warschau1.pdf). Acessado em 28/12/2018..

El-Hassan, H, Shao, Y, **Early carbonation curing of concrete masonry units with ortland limestone cement,** Cement & Concrete Composites 62 (2015) 168–177.

El-Hassan,H, Shao Y, Ghoulah,Z. **Effect of Initial Curing on carbonation of Lightweight Concrete Masonry Units,** ACI Materials Journal/July-August 2013.

FAIRBAIRN, E.M.R., AMERICANO, B.B., CORDEIRO, G.C., PAULA, T.P., TOLEDO FILHO, R.D., SILVOSO, M.M. —**Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO2 emissions reduction and potential for carbon credits.**II Journal of Environmental. Management. V.91, n.9, pp 1864-1871, 2010.

Fernández Bertos M, S.J.R. Simons. **A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO2.** Journal of Hazardous Materials B112 (2004).

FERNANDES, I. D. **Blocos & Pavers** – Produção e Controle de Qualidade. 2 ed. Jaraguá do Sul – Santa Catarina: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda., 2011. 182 p.

FRANCISCO, Wagner. "**Consequências do Aquecimento Global**"; Brasil Escola. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/consequencias-do-aquecimento-global.htm>>. Acesso em 28 de dezembro de 2018.

FREITAS, et al. **Importância do concreto na geração de CO2 em um caso de obra de um edifício**. Paraná, 2010.

GARCIA, I. G; PERDRIX, C. A; RÁBADE, M. P; PERIS, P. M; AGÜI, J. C. L; BARBUDO, M. A. S. Estudio Del **Efecto sumidero de CO2 de los Materiales de Base cemento. Cemento Hormigón**. Nº 939. Jul/ago 2010. PP. 70-83

HALLACK, ABDO, (1998). "**Dimensionamento de Pavimentos com Revestimento de Peças Pré-Moldadas de Concreto para Áreas Portuárias e Industriais**", Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo – Escola Politécnica, São Paulo, Brasil, 116 p.

Hassan, S.M.N., 2005. **Techno-Economic Study of CO2 Capture Process for Cement Plants**. A Master Thesis Presented to the University of Waterloo. Ontario, Canada.

HELENE, P; ANDRADE, T; **Concreto de Cimento Portland**. São Paulo: IBRACON- Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais, 2010. 40 p. Apostila.

HELENE, P. **Introdução da Durabilidade no Projeto das Estruturas de Concreto**. Ambiente Construído. São Paulo. Vol. 01, 1997.

HEWLETT PC. **Lea's Chemistry of cement and concrete**. 4 ed. London, Arnold, 1998.

Ho, M., Allinson, G., Wiley, D., 2011. **Comparison of MEA capture cost for low CO2 emissions sources in Australia**. International Journal of Greenhouse Gas Control 5, 49–60.

Hu, Minghe; Liu, Yanchun (Roxanne). **CO2 CAPTURE, REUSE NEEDS TO BE SUSTAINABLE — AND PROFITABLE**. Medill School of Journalism- Northwestern University. Disponível em: <http://dc.medill.northwestern.edu/blog/2018/08/14/co2-capture-reuse-needs-sustainable-profitable/#sthash.9uHpnvw2.dpbs>. Acesso em 28/12/2018.

IEA (International Energy Agency), 2009a. Cement Technology Roadmap 2009, Carbon Emissions Reductions up to 2050. IEA/OECD. Paris (http://www.iea.org/papers/2009/Cement_Roadmap.pdf). Acesso em 27/12/2018.

IEA GHG, 2002. **Opportunities for Early Application of CO2 Sequestration Technology**. IEA GHG PH4/10. Cheltenham, UK.

IEA GHG, 2008. **CO2 Capture in the Cement Industry**. Cheltenham, UK, Report no. 2008/3.

IEA, WBCSD, Int Energy Agency, OECD/ IEA; WBCSD, 2009. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,3862,en.html>.

INSTITUT WALLON DE DEVELOPPEMENT ECONOMIQUE ET SOCIAL ET D'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ASBL. IDD – Institut Wallon – **VITO. Greenhouse gas emissions reduction and material flows**. Disponível em <http://www.belspo.be/belspo/home/publ/pub_ostc/CG2131/rappCG31_en.pdf>. Acessado em 27/11/2017. 2001.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2005a. **Underground Geological Storage”** Chapter 5 IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Eighth Session of IPCC Working Group III Montreal, Canada.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2005. **Carbon Dioxide Capture and Storage**. Cambridge University Press, UK.

Jang, J.G., Kim, H.J., Park, S.M., Lee, H.K., **The influence of sodium hydrogen carbonate on the hydration of cement**. Constr. Build. Mater. 94 (2015).

Johannesson, P. Utgenannt, **Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar**, Cem. Concr. Res. 31 (2001).

JOHN, V. **Nova técnica diminui emissão de CO2 na produção de cimento. Agência USP de Notícias**. São Paulo, 2013. Editoria: Tecnologia. 1p. Disponível em: <<http://www.usp.br/agen/?p=134582>>. Acesso em: 25/11/2017.

Jones, R.H. **Cement treated with high-pressure CO2**. Materials Technology Ltd., Nevada, USA, 1996.

JUVAS, K.; **Very dry precasting concrete**. In: **Special Concretes: Workability and Mixing**. Proceedings of the Internacional RILEM Workshop, London, 1993. P. 153-168.

KASTING, J.F.; CATLING, D. **Evolution of an habitable planet**. Annu. Rev. Astron. Astrophys, New York, n.41, p.429-463,2003.

KNAPTON, J., (1996) **“Romans and their Roads – The Original Small Element Pavement Technologists”**, Fifth International Concrete Block Paving Conference, pp. 17-52, Tel-Aviv, Israel, June, 1996.

Kira, K. Y. Makino, Yamamoto, K., **Carbonation of synthesized ettringite**, Gypsum Lime 159 (1979).

LAGERBLAD, B., 2005 (Febr), —**Carbon Dioxide Uptake During Concrete Life Cycle – State of Artll** – In: CBI Report 2, Swedish Cement and Concrete Research Institute.

LEVITT, M.. **Precast concrete: manufacture, properties and usage**. London : Applied Science, 1982. p. 33 – 52.

Li, Jia , Pradeep Tharakan b , Douglas Macdonald b , Xi Liang. **Technological, economic and financial prospects of carbon dioxide capture in the cement industry**. Elsevier Ltd, Energy Policy 61 (2013) 1377–1387.

MARCHAND, J.; HORNAIN, H.; DIAMOND, S.; PIGEON, M.; GUIRAUD, H. **The microstructure of dry concrete products**. Cement and Concrete Research, 1996. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884696850307>>. Acesso em: 02/12/2017.

MARCHIONI, M. L. **Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco para peças de concreto para pavimentação intertravada**. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-18072013-150832/pt-br.php>>. Acesso em:02/12/2017.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P.J.M., **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo. IBRACON, 2008.

Mit, J.M., Takahashi, T., Goldberg, D., McGrail, B.P., 2007. **Experimental evaluation of in situ CO₂-water-rock reactions during CO₂ injection in basaltic rocks**. Implications for geological CO₂ sequestration. *Geochem. Geophys. Geosyst.*.

Monkman, S, MacDonald, M, **Carbon dioxide upcycling into industrially produced concrete blocks**, *Constr. Build. Mater.* 124 (2016) 127–132.

Morandeu A., M. Thiéry, P. Dangla, **Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties**, *Cem. Concr. Res.* 56 (2014).

MORE, B.; JADHAV, P.; JADHAV, V.; NARULE, G.; MULANI, S; **CO₂ Absorbing Concrete Block**. INTERNATIONAL JOURNAL OF TECHNOLOGY ENHANCEMENTS AND EMERGING ENGINEERING RESEARCH, VOL 2. INDIA, 2014.

MULLER, R. M. **Avaliação de Transmissão de Esforços em Pavimentos Intertravados de Blocos de Concreto**. 2005. 234f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Acessado em: 27/09/2016. Disponível em <http://wwwp.coc.ufrj.br/teses/mestrado/geotecnia/2005/Teses/MULLER_RM_05_t_M_geo.pdf>.

Naranjo, M., Brownlow, D., Garza, A., 2011. **CO₂ capture and sequestration in the cement industry**. In: Proceedings of the Tenth International Conference on Greenhouse Gas Technologies, GHGT-10, Amsterdam, Netherlands. *Energy Procedia* 4, pp. 2716–2723.

NETL (US Department of Energy National Energy Technology Laboratory), 2009. **Recovery Act: Carbon Capture and Sequestration from Industrial Sources and Innovative Concepts for Beneficial CO₂ Use**. Disponível: <<http://fossil.energy.gov/sequestration/publications/arra/DE-FOA-0000015.pdf>>.

NEVES, J,A.; **Captura de CO₂ em Materiais Cimentícios através da Carbonatação Acelerada** / Alex Neves Junior – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

NEVILLE, A. M., **Propriedades do concreto**. Tradução Salvador E. Giammusso. 1. Ed. São Paulo: PINI,1982.

OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação**. 2004. 296 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87148/206164.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 02/12/2017.

Perkinelmer , "**Thermogravimetric Analysis (TGA): A Beginner's Guide**". Disponível em: *perkinelmer.com - TGABeginnersGuide.pdf*. Acesso em 19/05/2018.

PINHEIRO, L. **FUNDAMENTOS DO CONCRETO E PROJETO DE EDIFÍCIOS**. São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas, 2007. 380 p. Apostila.

PLASYNSKI, S., DAMIANI, D. —**Carbon Sequestration through Enhanced Oil Recovery**ll, U. S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory. Disponível em: , Acesso em 25 out. 2017.

Poon C.S., A.I. Clark, R. Perry, A.P. Barker, P. Barnes, **Permeability study on the cement based solidification process for the disposal of hazardous wastes**, Cem. Concr. Res. 16 (1986).

PUC MINAS, **Esquema gráfico do efeito estufa**. Disponível em: <www.pucminas.br>. Acesso em: 11 de dezembro de 2011.

Rahman, A., Suarez, A., Van Ypersele, J.P., 2009. **Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) “reasons for concern”**. Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America 106 (11), 4133e4137.

RAKI, L., BEAUDOIN, JJ., ALIZADEH R. —**Nanotechnology Applications for Sustainable Cement-Based Products**ll, Nanotechnology in Construction, n.3 , pp. 119- 124, 2009.

ROSTAMI V., SHAO Y., BOYD AJ. —**Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing**ll. Cement Concrete Research, n.42, v.1, pp 186–93, 2012.

Roya S.K., K.B. Poh, D.O. Northwood, Durability of concrete-accelerated carbonation and weathering studies, Build. Environ. 34 (1999).

Rothstein D., J.J. Thomas, B.J. Christensen, H.M. Jennings, **Solubility behavior of Ca-, S-, Al-, and Si-bearing solid phases in Portland cement pore solutions as a function of hydration time.** Cem. Concr. Res. 32 (2002).

RUIFENG, D., ZAOXIAO Z., HONGFANG L., et al. —**Recovery of waste heat in cement plants for the capture of CO₂**, Frontiers of Chemical Science and Engineering, v.6, pp 104-111, 2012.

Saetta, A.V. , B.A. Schrefler, R.V. Vitaliani, **The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials,** Cem. Concr. Res. 23 (1993).

SANQUETA, C. **ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM UMA OBRA DE CONSTRUÇÃO CIVIL COM A METODOLOGIA GHG PROTOCOL.** 2013.19 p. Universidade Federal do Paraná – UFPR, Paraná, 2013.

SANTOS, M.; **INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DERIVADAS DE HIDRELÉTRICAS.** 2000. 154 p. Tese (Doutorado em Ciências de Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

SHACKEL, B. (1979). **“A pilot study of the performance of block paving under traffic using a heavy vehicle simulator”.** In: SYMPOSIUM ON PRECAST CONCRETE PAVING BLOCK, Johannesburg. Proceedings. s.l., Concrete Society of Southern Africa Concrete Masonry Association, s.d.

SHACKEL, B.(1990). **“Design and construction of interlocking concrete block pavements”.** London, Elsevier. In: SYMPOSIUM ON PRECAST CONCRETE PAVING BLOCK, Johannesburg. Proceedings. s.l., Concrete Society of Southern Africa Concrete Masonry Association, s.d.

Shao Y, X Lin. **Early-age carbonation curing of concrete using recovered CO₂.** Concrete International, 2011 - concrete.org. McGill University, Montreal, QC, Canada, 2011.

SHAO Y., ZHOU X., MONKMAN S., —**A new CO₂ sequestration process via concrete products production.** EIC Climate Change Technology, Canada, Ottawa, 10-12 May 2006.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatório Anual, 2010. Rio de Janeiro, SNIC; 2011.

STACHERA, T.; **AVALIAÇÃO DE EMISSÕES DE CO₂ NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UM ESTUDO DE CASO DA HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL NO PARANÁ.** In: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2008, Rio de Janeiro: UTFPR, 2008. 13 p.

STUMPP, M. J., 2003, —**Carbonatação de Concretos com Altos Teores de Adições Mineraiis e de Cal Hidratada**.l. Dissertação* de M.Sc., UFSM/ PPGEC, Santa Maria, RS, Brasil.

SULAPHA, P., WONG, SF., WEE, TH., et al. — **Carbonation of Concrete Containing Mineral Admixtures.** Journal of Materials in Civil Engineering, v.15, n.2, pp. 134-143, 2003.

T. Grounds, H. Midgley, D.V. Novell, **Carbonation of ettringite by atmospheric carbon dioxide, Thermochim. Acta** 135 (1988) 347–352.

T. Nishikawa, K. Suzuki, S. Ito, K. Sato, T. Takebe, **Decomposition of synthesized ettringite by carbonation.** Cem. Concr. Res. 22 (1992).

The Emissions Database for Global Atmospheric Research – EDGAR - *Fossil CO₂ & GHG emissions of all world countries, 2017.* Disponível em:< <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/>>. Acessado 02/05/2018.

Tucci, C. M.; Bertoni, J. C. (2003) **Inundações urbanas na América do Sul.** Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME. **Avaliação de Políticas Públicas para Redução da Emissão de Gases de Efeito Estufa em Edificações.** Relatório PNUMA – Iniciativa para Edificações e Construções Sustentáveis. Universidade da Europa Central, Budapeste, 106p. 2007.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). Disponível em <http://unfccc.int/ghg_data/ghg_data_unfccc/items/4146.php>. Acesso em: 26/11/2017.

Venhuis M.A., E.J. Reardon, **Vacuum method for carbonation of cementitious waste forms**. Environ. Sci. Technol. 35 (2001).

WWF-Brasil. As mudanças climáticas. Disponível em https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/reducao_de_impactos2/clima/mudancas_climaticas2/>. Acesso em: 27/12/2018.

YANG, M.; NEUBAUER, C. M.; JENNINGS, H. M. **Interparticle potential and sedimentation behavior of cement suspensions**. Advanced Cement Based Materials, Evanston, v. 5, p. 1-7, 1997.

YE, G., 2003, —**Carbon Dioxide Uptake By Concrete Through Early-Age Curing**II. M.Sc Dissertation, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal, Canadá.

YOON, In-S.; ÇOPUROĞLU, O.; PARK, Ki-B. **Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete**. Atmospheric Environment, v 41, n 34, p.7274-7285, 2007.

Zivica, V., A. Bajza, **Acidic attack of cement based materials – a review: part 1**. Principle of acidic attack, Constr. Build. Mater. 15 (2001).

7. APÊNDICE

Na ABCP, para os ensaios de resistência mecânica, os técnicos identificaram as peças de concreto para pavimentação foram identificadas com as siglas:

PD – cura à vapor e posterior carbonatação;

PC – sem cura inicial à vapor e posterior carbonatação e;

PB – Referência (cura à vapor).

7.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (02 DIAS)

Amostra	p-d	Dimensões nominais (cm)	20x10x6	Modelo:								
						X Retangular						

DETERMINAÇÃO DIMENSIONAL - NBR 9781 - PO-GT-2003													
Corpo-de-prova (nº)	Dimensões (mm)												
	Comprimento				Largura				Altura				
	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média	
1	199	199	199	199	100	100	100	100	62	62	61	62	
2	199	199	199	199	100	100	100	100	62	62	62	62	
3	200	200	200	200	99	99	99	99	62	62	62	62	
4	199	199	199	199	100	100	100	100	61	61	61	61	
5	199	199	199	199	99	99	99	99	62	62	62	62	
6	200	200	200	200	99	99	99	99	61	61	61	61	
Item 5.2	Atende variações dimensionais máximas: comprimento e largura: 3mm e altura: 5mm											SIM	
Análise visual	Atende ao item 6.2 da NBR 9781											SIM	
Obs.:													
Operador:	Felipe / Rubuns			Visto:				Data:	9/8/2018				

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NBR 9781							
Peça de concreto (nº)	Massa (g)	Carga Máxima de Ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)				
			Individual f _{pi}	Média f _p	Desvio Padrão s	f _{pk} = resistência característica à compressão	
1	2763	237000	39,7	41,8	1,2	40,7	
2	2759	256000	42,9				
3	2761	246000	41,2				
4	2739	249000	41,7				
5	2749	256000	42,9				
6	2799	253000	42,4				
Altura nominal (mm)	Fator multiplicativo "p"	Coefficiente de Student (t)	Área de carregamento (mm ²)	número de peças n	s = $\sqrt{\frac{\sum (f_p - f_p)^2}{n-1}}$	f _{pk} = f _p - (t x s) f _{pk} = (carga/área)**"p"	
60	0,95	0,920	5674	6			
NBR 9781 - item 5.1	35 MPa - Veículos comerciais de linha X		50 MPa - Veículos especiais		Não Atende		
Operador:	Henrique			Visto:			
Data :	10/8/2018						

1º) $f_{pi} = \left(\frac{237000}{5674} \right) \times 0,95 = 39,7$

2º) $s = \sqrt{\frac{(41,8-39,7)^2 + (1,1)^2 + (0,6)^2 + (0,1)^2 + (-1,1)^2 + (-0,6)^2}{(6-1)}} = 1,2$

3º) $f_{pk} = (41,8 - (1,92 \times 1,2)) = 40,7 \text{ MPa}$

Amostra	p-c	Dimensões nominais (cm)	20x10x6	Modelo:								
						X Retangular						

DETERMINAÇÃO DIMENSIONAL - NBR 9781 - PO-GT-2003

Corpo-de-prova (nº)	Dimensões (mm)											
	Comprimento				Largura				Altura			
	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
1	200	200	200	200	101	101	100	101	61	61	61	61
2	199	199	199	199	100	100	100	100	63	62	62	62
3	199	199	199	199	100	100	100	100	62	62	62	62
4	200	200	200	200	101	101	101	101	61	61	61	61
5	199	199	199	199	100	100	100	100	63	62	62	62
6	199	199	199	199	101	101	101	101	61	61	61	61
Item 5.2	Atende variações dimensionais máximas: comprimento e largura: 3mm e altura: 5mm										SIM	
Análise visual	Atende ao item 6.2 da NBR 9781										SIM	
Obs.:												
Operador:	Felipe / Rubuns			Visto:				Data:	9/8/2018			

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NBR 9781

Peça de concreto (nº)	Massa (g)	Carga Máxima de Ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)								
			Individual f_{pi}	Média f_p	Desvio Padrão s	f_{pk} = resistência característica à compressão					
1	2741	235000	39,3	40,6	1,0	39,7					
2	2750	240000	40,2								
3	2732	243000	40,7								
4	2720	250000	41,9								
5	2730	240000	40,2								
6	2728	248000	41,5								
Altura nominal (mm)	Fator multiplicativo "p"	Coefficiente de Student (t)	Area de carregamento (mm ²)	número de peças n	$s = \sqrt{\frac{\sum (f_p - f_{pi})^2}{n-1}}$	$f_{pk} = f_p - (t \times s)$ $f_{pi} = (carga/área)^{**}p$					
60	0,95	0,920	5674	6							
NBR 9781 - item 5.1	35 MPa - Veículos comerciais de linha	X	50 MPa - Veículos especiais	-	Não Atende						
Operador:	Henrique			Visto:				Data :	10/8/2018		

Amostra	p-b	Dimensões nominais (cm)	20x10x6	Modelo:								
					X Retangular							

DETERMINAÇÃO DIMENSIONAL - NBR 9781 - PO-GT-2003												
Corpo-de-prova (nº)	Dimensões (mm)											
	Comprimento				Largura				Altura			
	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
1	199	199	199	199	100	100	100	100	61	61	61	61
2	199	199	199	199	100	100	100	100	62	62	62	62
3	199	199	199	199	100	100	100	100	59	59	59	59
4	200	200	200	200	99	99	99	99	62	62	62	62
5	199	199	199	199	100	100	100	100	62	62	62	62
6	200	200	200	200	100	100	100	100	60	60	60	60
Item 5.2	Atende variações dimensionais máximas: comprimento e largura: 3mm e altura: 5mm										SIM	
Análise visual	Atende ao item 6.2 da NBR 9781										SIM	
Obs.:												
Operador:	Felipe / Rubuns			Visto:				Data:	9/8/2018			

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NBR 9781									
Peça de concreto (nº)	Massa (g)	Carga Máxima de Ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)						
			Individual f_{pi}	Média f_p	Desvio Padrão s	f_{pk} = resistência característica à compressão			
1	2677	228000	38,2	38,3	1,2	37,2			
2	2689	237000	39,7						
3	2606	237000	39,7						
4	2722	224000	37,5						
5	2698	219000	36,7						
6	2676	226000	37,8						
Altura nominal (mm)	Fator multiplicativo "p"	Coefficiente de Student (t)	Area de carregamento (mm^2)	número de peças n	$s = \sqrt{\frac{\sum (f_p - f_p)^2}{n-1}}$	$f_{pk} = f_p - (t \times s)$			
60	0,95	0,920	5674	6		$f_{pi} = (carga/área)^{1/p}$			
NBR 9781 - item 5.1	35 MPa - Veículos comerciais de linha		X	50 MPa - Veículos especiais	-	Não Atende	-		
Operador:	Henrique			Visto:			Data :	10/8/2018	

7.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (28 DIAS)

Amostra	pd 28 dias	Dimensões nominais (cm)	20x10x6	Modelo:								
						X						
						Retangular						

DETERMINAÇÃO DIMENSIONAL - NBR 9781 - PO-GT-2003												
Corpo-de-prova (n°)	Dimensões (mm)											
	Comprimento				Largura				Altura			
	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
1	199	199	199	199	99	99	99	99	61	61	61	61
2	200	200	200	200	99	99	99	99	60	60	60	60
3	199	199	199	199	100	100	100	100	60	60	60	60
4	199	199	199	199	99	99	99	99	60	60	60	60
5	200	200	200	200	100	100	100	100	61	61	61	61
6	200	200	200	200	100	100	100	100	61	61	61	61
Item 5.2	Atende variações dimensionais máximas: comprimento e largura: 3mm e altura: 5mm										SIM	
Análise visual	Atende ao item 6.2 da NBR 9781										SIM	
Obs.:												
Operador:	Antonio			Visto:				Data:	3/9/2018			

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NBR 9781							
Peça de concreto (n°)	Massa (g)	Carga Máxima de Ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)				
			Individual f_{pi}	Média f_p	Desvio Padrão s	f_{pk} = resistência característica à compressão	
1	2672	297000	49,7	48,3	2,1	46,4	
2	2669	291000	48,7				
3	2633	307000	51,4				
4	2596	282000	47,2				
5	2646	281000	47,0				
6	2651	272000	45,5				
Altura nominal (mm)	Fator multiplicativo "p"	Coefficiente de Student (t)	Area de carregamento (mm ²)	número de peças n	$s = \sqrt{\frac{\sum (f_p - \bar{f}_p)^2}{n-1}}$	$f_{pk} = f_p - (t \times s)$ $f_{pi} = (carga/área)^{**}p$	
60	0,95	0,920	5674	6			
NBR 9781 - item 5.1	35 MPa - Veículos comerciais de linha		X	50 MPa - Veículos especiais	-	Não Atende	-
Operador:	Henrique			Visto:			
Data :	4/9/2018						

Amostra	pc 28dias	Dimensões nominais (cm)	20x10x6	Modelo:								
						X						
						Retangular						

DETERMINAÇÃO DIMENSIONAL - NBR 9781 - PO-GT-2003												
Corpo-de-prova (nº)	Dimensões (mm)											
	Comprimento				Largura				Altura			
	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
1	199	199	199	199	99	99	99	99	60	60	60	60
2	199	199	199	199	99	99	99	99	61	61	61	61
3	199	199	199	199	100	100	100	100	61	61	61	61
4	200	200	200	200	100	100	100	100	60	60	60	60
5	200	200	200	200	99	99	99	99	61	61	61	61
6	199	199	199	199	99	99	99	99	60	60	60	60
Item 5.2	Atende variações dimensionais máximas: comprimento e largura: 3mm e altura: 5mm									SIM		
Análise visual	Atende ao item 6.2 da NBR 9781									SIM		
Obs.:												
Operador:	Antonio			Visto:				Data:	3/9/2018			

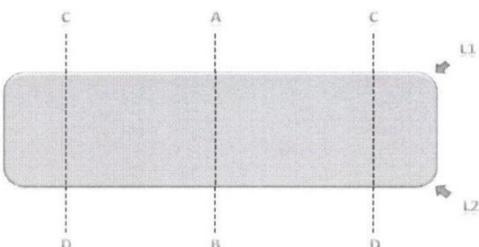
DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NBR 9781									
Peça de concreto (nº)	Massa (g)	Carga Máxima de Ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)						
			Individual f_{pi}	Média f_p	Desvio Padrão s	f_{pk} = resistência característica à compressão			
1	2637	258000	43,2	44,4	1,2	43,3			
2	2587	273000	45,7						
3	2624	273000	45,7						
4	2648	259000	43,4						
5	2657	269000	45,0						
6	2680	259000	43,4						
Altura nominal (mm)	Fator multiplicativo "p"	Cóeficiente de Student (t)	Area de carregamento (mm ²)	número de peças n	$s = \sqrt{\frac{\sum(f_p - f_{pi})^2}{n-1}}$	$f_{pk} = f_p - (t \times s)$			
60	0,95	0,920	5674	6		$f_{pi} = (carga/área) \times "p"$			
NBR 9781 - item 5.1	35 MPa - Veículos comerciais de linha		X	50 MPa - Veículos especiais	-	Não Atende	-		
Operador:	Henrique			Visto:			Data :	4/9/2018	

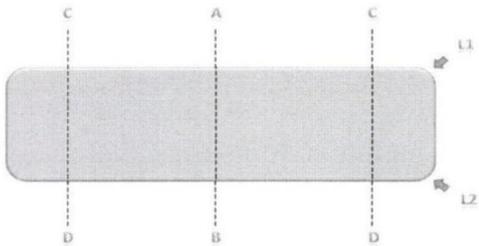
Amostra	pb 28dias	Dimensões nominais (cm)	20x10x6	Modelo:								
					X	Retangular						

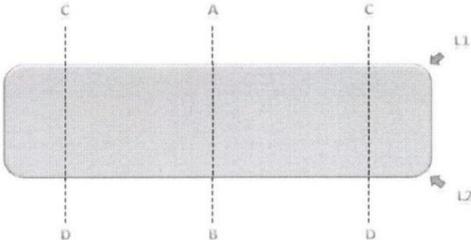
DETERMINAÇÃO DIMENSIONAL - NBR 9781 - PO-GT-2003														
Corpo-de-prova (nº)	Dimensões (mm)													
	Comprimento				Largura				Altura					
	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média		
1	199	199	199	199	99	99	99	99	60	60	60	60		
2	199	199	199	199	99	99	99	99	60	60	60	60		
3	200	200	200	200	99	99	99	99	61	61	61	61		
4	200	200	200	200	99	99	99	99	61	61	61	61		
5	199	199	199	199	99	99	99	99	61	61	61	61		
6	200	200	200	200	100	100	100	100	60	60	60	60		
Item 5.2	Atende variações dimensionais máximas: comprimento e largura: 3mm e altura: 5mm											SIM		
Análise visual	Atende ao item 6.2 da NBR 9781											SIM		
Obs.:														
Operador:	Antonio			Visto:					Data:	3/9/2018				

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NBR 9781									
Peça de concreto (nº)	Massa (g)	Carga Máxima de Ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)						
			Individual f_{pi}	Média f_p	Desvio Padrão s	f_{pk} = resistência característica à compressão			
1	2641	258000	43,2	43,8	3,4	40,7			
2	2686	239000	40,0						
3	2679	250000	41,9						
4	2636	274000	45,9						
5	2685	253000	42,4						
6	2731	295000	49,4						
Altura nominal (mm)	Fator multiplicativo "p"	Coefficiente de Student (t)	Area de carregamento (mm ²)	número de peças n	$s = \sqrt{\frac{\sum (f_p - \bar{f}_p)^2}{n-1}}$	$f_{pk} = f_p - (t \times s)$			
60	0,95	0,920	5674	6		$f_{pi} = (carga/área) \times "p"$			
NBR 9781 - item 5.1	35 MPa - Veículos comerciais de linha		X	50 MPa - Veículos especiais	-	Não Atende	-		
Operador:	Henrique			Visto:			Data :	4/9/2018	

7.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO (02 DIAS)

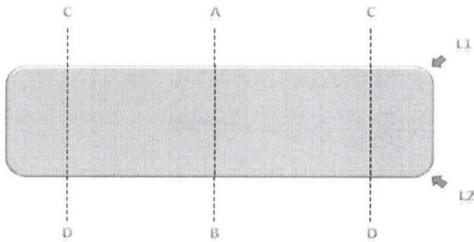
		PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO- DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A ABRASÃO ABNT NBR 9781:2013		F- 2078 Rev. 05		
Amostra:		p-d 1		Identificação:		
						
Valores de calibração (mm)			Cálculo de Abrasão			
valor da cavidade inicial: (Ci) 17			$A = Cmi + (Ci - Cc)$			
valor de calibração: (Cc) 17						
Nº CP	Valor da cavidade no corpo de prova (mm)			Resultado de Abrasão individual (A)	Resultado de Abrasão médio (A)	Resultado de Abrasão corrigido médio
	Entre A e B (Cmi)	Entre C e D	Entre C e D			
1	21,6	Para calibração	Para calibração	21,6	21,4	21,5
2	21,4	Para calibração	Para calibração	21,4		
3	21,3	Para calibração	Para calibração	21,3		
Solicitação de Abrasão Máxima (mm)						
20 < trafego leve ≤ 23		X		trafego pesado: ≤ 20		
Aparelhagem Calibrada					Nº do Equipamento	
Paquímetro					3054	
Balança					2449	
$S = \sqrt{\frac{\sum (0,04) + (0,00) + (0,01)}{2}} = 0,158 \approx 0,16$						
Técnico:		Henrique		Revisor:		Data: 10/08/2018

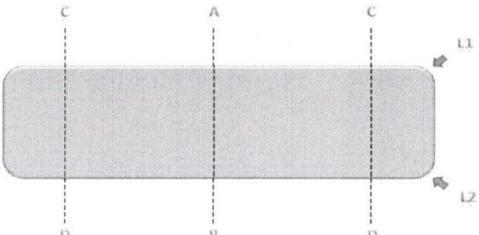
		PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO- DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A ABRASÃO ABNT NBR 9781:2013		F- 2078 Rev. 05		
Amostra:		p -c 1		Identificação:		
						
Valores de calibração (mm)			Cálculo de Abrasão			
valor da cavidade inicial: (Ci)		17	$A = Cmi + (Ci - Cc)$			
valor de calibração: (Cc)		17				
Nº CP	Valor da cavidade no corpo de prova (mm)			Resultado de Abrasão individual (A)	Resultado de Abrasão médio (A)	Resultado de Abrasão corrigido médio
	Entre A e B (Cmi)	Entre C e D	Entre C e D			
1	21,6	Para calibração	Para calibração	21,6	21,8	22,0
2	21,6	Para calibração	Para calibração	21,6		
3	22,1	Para calibração	Para calibração	22,1		
Solicitação de Abrasão Máxima (mm)						
20 < trafego leve ≤ 23		X		trafego pesado: ≤ 20		
Aparelhagem Calibrada				Nº do Equipamento		
Paquímetro				3054		
Balança				2449		
$S = \sqrt{\frac{(0,04) + (0,04) + (0,09)}{2}} = 0,29$						
Técnico:		Henrique		Revisor:		Data: 10/08/2018

		PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO- DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A ABRASÃO ABNT NBR 9781:2013		F- 2078 Rev. 05		
Amostra:		p-b 1		Identificação:		
						
Valores de calibração (mm)			Cálculo de Abrasão			
valor da cavidade inicial: (Ci) 17			$A = C_{mi} + (C_i - C_c)$			
valor de calibração: (Cc) 17						
Nº CP	Valor da cavidade no corpo de prova (mm)			Resultado de Abrasão individual (A)	Resultado de Abrasão médio (A)	Resultado de Abrasão corrigido médio
	Entre A e B (C _{mi})	Entre C e D	Entre C e D			
1	21,2	Para calibração	Para calibração	21,2	21,6	21,5
2	21,5	Para calibração	Para calibração	21,5		
3	22,2	Para calibração	Para calibração	22,2		
Solicitação de Abrasão Máxima (mm)						
20 < trafego leve ≤ 23		X		trafego pesado: ≤ 20		
Aparelhagem Calibrada					Nº do Equipamento	
Paquímetro					3054	
Balança					2449	
$S = \sqrt{\frac{\sum (0,16 + 0,01 + 0,36)}{(3-1)}} = 0,51 //$						
Técnico: Henrique		Revisor:		Data: 10/08/2018		

7.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO (28 DIAS)

	PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO- DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A ABRASÃO ABNT NBR 9781:2013			F- 2078 Rev. 05		
	Amostra:	PD 28DIAS		Identificação:		
Valores de calibração (mm)			Cálculo de Abrasão			
valor da cavidade inicial: (C_i) 17			$A = C_{mi} + (C_i - C_c)$			
valor de calibração: (C_c) 17						
Nº CP	Valor da cavidade no corpo de prova (mm)			Resultado de Abrasão individual (A)	Resultado de Abrasão médio (A)	Resultado de Abrasão corrigido médio
	Entre A e B (C_{mi})	Entre C e D	Entre C e D			
1	21,8	Para calibração	Para calibração	21,8	21,9	22,0
2	22,0	Para calibração	Para calibração	22,0		
3	22,0	Para calibração	Para calibração	22,0		
Solicitação de Abrasão Máxima (mm)						
20 < trafego leve ≤ 23		X		trafego pesado: ≤ 20		
Aparelhagem Calibrada					Nº do Equipamento	
Paquímetro					3054	
Balança					2691	
Técnico: Henrique		Revisor:		Data: 04/09/2018		

		PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO- DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A ABRASÃO ABNT NBR 9781:2013		F- 2078 Rev. 05			
Amostra:		PC 28DIAS		Identificação:			
							
Valores de calibração (mm)			Cálculo de Abrasão				
valor da cavidade inicial: (Ci)		17	$A = Cmi + (Ci - Cc)$				
valor de calibração: (Cc)		17					
Nº CP	Valor da cavidade no corpo de prova (mm)			Resultado de Abrasão individual (A)	Resultado de Abrasão médio (A)	Resultado de Abrasão corrigido médio	
	Entre A e B (Cmi)	Entre C e D	Entre C e D				
1	21,0	Para calibração	Para calibração	21,0	22,0	22,0	
2	22,5	Para calibração	Para calibração	22,5			
3	22,5	Para calibração	Para calibração	22,5			
Solicitação de Abrasão Máxima (mm)							
20 < trafego leve ≤ 23		X		trafego pesado: ≤ 20			
Aparelhagem Calibrada				Nº do Equipamento			
Paquímetro				3054			
Balança				2691			
Técnico:		Henrique		Revisor:		Data: 04/09/2018	

		PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO- DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A ABRASÃO ABNT NBR 9781:2013		F- 2078 Rev. 05		
Amostra:		PB 28DIAS		Identificação:		
						
Valores de calibração (mm)			Cálculo de Abrasão			
valor da cavidade inicial: (Ci) 17			$A = C_{mi} + (C_i - C_c)$			
valor de calibração: (Cc) 17						
Nº CP	Valor da cavidade no corpo de prova (mm)			Resultado de Abrasão individual (A)	Resultado de Abrasão médio (A)	Resultado de Abrasão corrigido médio
	Entre A e B (C _{mi})	Entre C e D	Entre C e D			
1	21,0	Para calibração	Para calibração	21,0	22,0	22,0
2	23,0	Para calibração	Para calibração	23,0		
3	22,0	Para calibração	Para calibração	22,0		
Solicitação de Abrasão Máxima (mm)						
20 < trafego leve ≤ 23		X		trafego pesado: ≤ 20		
Aparelhagem Calibrada				Nº do Equipamento		
Paquímetro				3054		
Balança				2691		
Técnico:		Henrique		Revisor:		Data: 04/09/2018

7.5 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA (02 DIAS)



Absorção de água e Área líquida

Amostra:	PD	Linha:		Amarração:	
Classe:		Módulo:		Tipo:	
Tipo de agregado:					

Determinação da umidade e absorção (NBR 12118/13) - PO-GT-2002									
Corpo-de-prova nº	Massa da amostra recebida (g) (m ₃)	Massa da amostra seca em estufa a 110°C (g)			Massa da amostra saturada em água (g)			Absorção (%)	Umidade (%)
		Hora Inicial: 10:00			Hora Inicial: 10:00				
		24h	+2h	+2h (m ₁)	24h	+2h	+2h (m ₂)		
7				2645			2756	4,2	
8				2660			2772	4,2	
9				2663			2750	3,3	
10									
11									
12									
Média								3,9	
Balança N°	2449			Estufa N°					
$Absorção = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \times 100$					$Umidade = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100$				
Para determinar m ₁ e m ₂ , as leituras a cada 2h não devem apresentar diferenças >0,5% em relação ao maior valor									
Item 5.3 (NBR 6136/07)	Agregado normal: Absorção média ≤ 10,0% Agregado leve: Absorção individual ≤ 16,0% e média ≤ 13,0%								
Técnico: Antonio / Henrique	Visto:			Data Inicial: 09/08/2018					

Área líquida (NBR 12118/13)						
Corpo-de-prova nº	Altura dos blocos (mm)				Massa aparente m ₄ (g)	Área líquida (mm ²)
	h ₁	h ₂	h ₃	h média individual (h)		
7						
8						
9						
10						
11						
12						
Média						
Temperatura da água =	19,0 °C					
γ = massa específica de água utilizada no ensaio	0,9984 g/cm ³					
Área líquida = ((m ₂ - m ₄) / h.γ) . 1000						
Técnico: Antonio / Ze Cicero	Visto:			Data Final: 10/08/2018		



Absorção de água e Área líquida

Amostra:	PC	Linha:		Amarração:	
Classe:		Módulo:		Tipo:	
Tipo de agregado:					

Determinação da umidade e absorção (NBR 12118/13) - PO-GT-2002									
Corpo-de-prova n°	Massa da amostra recebida (g) (m ₃)	Massa da amostra seca em estufa a 110°C (g)			Massa da amostra saturada em água (g)			Absorção (%)	Umidade (%)
		Hora Inicial: 10:00			Hora Inicial: 10:00				
		24h	+2h	+2h (m ₁)	24h	+2h	+2h (m ₂)		
7				2638			2753	4,4	
8				2635			2763	4,9	
9				2649			2769	4,5	
10									
11									
12									
Média								4,6	
Balança N°	2449			Estufa N°					
$Absorção = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \times 100$					$Umidade = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100$				
Para determinar m ₁ e m ₂ , as leituras a cada 2h não devem apresentar diferenças >0,5% em relação ao maior valor									
Item 5.3 (NBR 6136/07)	Agregado normal: Absorção média ≤ 10,0% Agregado leve: Absorção individual ≤ 16,0% e média ≤ 13,0%								
Técnico: Antonio / Henrique	Visto:			Data Inicial: 09/08/2018					

Área líquida (NBR 12118/13)						
Corpo-de-prova n°	Altura dos blocos (mm)				Massa aparente m ₄ (g)	Área líquida (mm ²)
	h ₁	h ₂	h ₃	h média individual (h)		
7						
8						
9						
10						
11						
12						
Média						
Temperatura da água =	19,0 °C					
γ = massa específica de água utilizada no ensaio	0,9984 g/cm ³					
Área líquida = ((m ₂ - m ₄) / h . γ) . 1000						
Técnico: Antonio / Ze Cicero	Visto:			Data Final: 10/08/2018		



Absorção de água e Área líquida

Amostra:	PB	Linha:		Amarração:	
Classe:		Módulo:		Tipo:	
Tipo de agregado:					

Determinação da umidade e absorção (NBR 12118/13) - PO-GT-2002									
Corpo-de-prova nº	Massa da amostra recebida (g) (m ₃)	Massa da amostra seca em estufa a 110°C (g)			Massa da amostra saturada em água (g)			Absorção (%)	Umidade (%)
		Hora Inicial: 10:00			Hora Inicial: 10:00				
		24h	+2h	+2h (m ₁)	24h	+2h	+2h (m ₂)		
7				2638			2736	3,7	
8				2605			2714	4,2	
9				2638			2702	2,4	
10									
11									
12									
Média								3,4	
Balança N°	2449			Estufa N°					
$Absorção = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \times 100$				$Umidade = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100$					
Para determinar m ₁ e m ₂ , as leituras a cada 2h não devem apresentar diferenças >0,5% em relação ao maior valor									
Item 5.3 (NBR 6136/07)	Agregado normal: Absorção média ≤ 10,0%			Agregado leve: Absorção individual ≤ 16,0% e média ≤ 13,0%					
Técnico: Antonio / Henrique	Visto:			Data Inicial: 09/08/2018					

Área líquida (NBR 12118/13)						
Corpo-de-prova nº	Altura dos blocos (mm)				Massa aparente m ₄ (g)	Área líquida (mm ²)
	h ₁	h ₂	h ₃	h média individual (h)		
7						
8						
9						
10						
11						
12						
Média						
Temperatura da água =	19,0 °C					
γ = massa específica de água utilizada no ensaio	0,9984 g/cm ³					
Área líquida = ((m ₂ - m ₄) / h.γ) . 1000						
Técnico: Antonio / Ze Cicero	Visto:			Data Final: 10/08/2018		

7.1 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA (28 DIAS)



Absorção de água e Área líquida

Amostra:	PD 28DIAS	Linha:		Amarração:	
Classe:		Módulo:		Tipo:	
Tipo de agregado:					

Determinação da umidade e absorção (NBR 12118/13) - PO-GT-2002									
Corpo-de-prova n°	Massa da amostra recebida (g) (m ₃)	Massa da amostra seca em estufa a 110°C (g)			Massa da amostra saturada em água (g)			Absorção (%)	Umidade (%)
		Hora Inicial: 10:00			Hora Inicial: 10:00				
		24h	+2h	+2h (m ₁)	24h	+2h	+2h (m ₂)		
7		2584	2576	2573	2675	2680	2684	4,3	
8		2560	2556	2550	2688	2694	2696	5,7	
9		2605	2600	2595	2634	2640	2643	1,8	
10									
11									
12									
Média								3,9	
Balança N°	2449			Estufa N°					
$Absorção = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \times 100$					$Umidade = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100$				
Para determinar m ₁ e m ₂ , as leituras a cada 2h não devem apresentar diferenças >0,5% em relação ao maior valor									
Item 5.3 (NBR 6136/07)	Agregado normal: Absorção média ≤ 10,0% Agregado leve: Absorção individual ≤ 16,0% e média ≤ 13,0%								
Técnico:	Antonio / Henrique			Visto :			Data Inicial : 03/09/2018		

Área líquida (NBR 12118/13)							
Corpo-de-prova n°	Altura dos blocos (mm)				Massa aparente m ₄ (g)	Área líquida (mm ²)	
	h ₁	h ₂	h ₃	h média individual (h)			
7							
8							
9							
10							
11							
12							
Média							
Temperatura da água =	19,0 °C						
γ = massa específica de água utilizada no ensaio	0,9984 g/cm ³						
Área líquida = ((m ₂ - m ₄) / h.γ) . 1000							
Técnico:	Antonio / Ze Cicero			Visto:		Data Final : 04/09/2018	



Absorção de água e Área líquida

Amostra:	PC 28DIAS	Linha:		Amarração:	
Classe:		Módulo:		Tipo:	
Tipo de agregado:					

Determinação da umidade e absorção (NBR 12118/13) - PO-GT-2002									
Corpo-de-prova nº	Massa da amostra recebida (g) (m ₃)	Massa da amostra seca em estufa a 110°C (g)			Massa da amostra saturada em água (g)			Absorção (%)	Umidade (%)
		Hora Inicial: 10:00			Hora Inicial: 10:00				
		24h	+2h	+2h (m ₁)	24h	+2h	+2h (m ₂)		
7		2639	2634	2628	2720	2724	2727	3,8	
8		2606	2600	2594	2783	2689	2692	3,8	
9		2645	2639	2636	2733	2738	2741	4,0	
10									
11									
12									
Média								3,9	
Balança N°		2449			Estufa N°				
$Absorção = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \times 100$					$Umidade = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100$				
Para determinar m ₁ e m ₂ , as leituras a cada 2h não devem apresentar diferenças >0,5% em relação ao maior valor									
Item 5.3 (NBR 6136/07)		Agregado normal: Absorção média ≤ 10,0% Agregado leve: Absorção individual ≤ 16,0% e média ≤ 13,0%							
Técnico: Antonio / Henrique				Visto:			Data Inicial: 03/09/2018		

Área líquida (NBR 12118/13)						
Corpo-de-prova nº	Altura dos blocos (mm)				Massa aparente m ₄ (g)	Área líquida (mm ²)
	h ₁	h ₂	h ₃	h média individual (h)		
7						
8						
9						
10						
11						
12						
Média						
Temperatura da água =		19,0 °C				
γ = massa específica de água utilizada no ensaio				0,9984 g/cm ³		
Área líquida = ((m ₂ - m ₄) / h.γ) . 1000						
Técnico: Antonio / Jose Cicero				Visto:		Data Final: 04/09/2018



Absorção de água e Área líquida

Amostra:	PB 28DIAS	Linha:		Amarração:	
Classe:		Módulo:		Tipo:	
Tipo de agregado:					

Determinação da umidade e absorção (NBR 12118/13) - PO-GT-2002

Corpo-de-prova nº	Massa da amostra recebida (g) (m ₃)	Massa da amostra seca em estufa a 110°C (g)			Massa da amostra saturada em água (g)			Absorção (%)	Umidade (%)
		Hora Inicial: 10:00			Hora Inicial: 10:00				
		24h	+2h	+2h (m ₁)	24h	+2h	+2h (m ₂)		
7		2645	2639	2636	2701	2707	2711	2,8	
8		2635	2628	2624	2697	2700	2706	3,1	
9		2631	2625	2619	2698	2703	2709	3,4	
10									
11									
12									
Média								3,1	

Balança N°	2449	Estufa N°	
------------	------	-----------	--

$$Absorção = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \times 100$$

$$Umidade = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100$$

Para determinar m₁ e m₂, as leituras a cada 2h não devem apresentar diferenças >0,5% em relação ao maior valor

Item 5.3 (NBR 6136/07)	Agregado normal: Absorção média ≤ 10,0% Agregado leve: Absorção individual ≤ 16,0% e média ≤ 13,0%	
Técnico: Antonio / Henrique	Visto :	Data Inicial : 03/09/2018

Área líquida (NBR 12118/13)

Corpo-de-prova nº	Altura dos blocos (mm)				Massa aparente m ₄ (g)	Área líquida (mm ²)
	h ₁	h ₂	h ₃	h média individual (h)		
7						
8						
9						
10						
11						
12						
Média						

Temperatura da água =	19,0 °C
-----------------------	----------------

γ = massa específica de água utilizada no ensaio	0,9984 g/cm ³
--	---------------------------------

Área líquida = ((m ₂ - m ₄) / h.γ) . 1000	
--	--

Técnico: Antonio / Jose Cicero	Visto:	Data Final : 04/09/2018
--------------------------------	--------	-------------------------