

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

Lívia Regueira Fortunato

**CAPTURA DE CO<sub>2</sub> EM BLOCOS DE CONCRETO POR MEIO DA  
CURA CARBÔNICA E APLICABILIDADE INDUSTRIAL**

São Carlos

2025

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

Lívia Regueira Fortunato

**CAPTURA DE CO<sub>2</sub> EM BLOCOS DE CONCRETO POR MEIO DA  
CURA CARBÔNICA E APLICABILIDADE INDUSTRIAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

**Área de Concentração:** Construção Civil

**Orientador:** Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian

**Coorientador:** Prof. Dr. Alex Neves Junior

São Carlos  
2025



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

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

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Livia Regueira Fortunato Benitez, realizada em 25/07/2025.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian (UFSCar)

Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira (UFSCar)

Profa. Dra. Edna Possan (UNILA)

Prof. Dr. Bruno Luis Damineli (USP)

Prof. Dr. Bahman Ghiassi (UoB)

## AGRADECIMENTOS

---

Agradeço a Deus, que me guiou com sabedoria e fortaleza em cada passo desta longa jornada que enfrentei, inclusive, a pandemia. Sua presença constante, me sustentou com fé, transformando dúvidas em clarezas e desafios em oportunidades de crescimento.

Ao meu querido esposo, Leandro, meu parceiro inabalável em todos os sentidos da vida. Sua força, seu amor e sua paciência foram o meu porto seguro durante cada etapa desta jornada árdua do doutorado. Agradeço profundamente pela sua compreensão nas minhas ausências e pela sua capacidade de manter o meu foco nos momentos de maior dificuldade. Também, agradeço, pela sua presença constante nas idas e vindas à São Carlos, ajuda na instrumentação e execução dos ensaios nos laboratórios, apoio na fábrica durante a produção dos blocos e também, na cura dos mesmos, madrugada adentro. Tenho certeza que a realização deste sonho não seria possível sem você. Eu te amo muito!

À minha filha, Elisa, meu grande amor, agradeço por ser meu combustível e a razão de tudo. Muito da minha força vem de você e por você, minha bebezinha! A mamãe te ama, além do infinito.

Aos meus pais, Pedro e Maria da Graça, agradeço, imensamente, pelos exemplos, ensinamentos, amor incondicional e apoio constante, oferecidos ao longo de toda a minha vida e, em especial, durante esta fase tão desafiadora. Dedico essa tese também, a vocês, meus amores. De forma especial, agradeço a você, mamãe, por ter me incentivado a seguir carreira acadêmica, e claro, por ser meu suporte diário com os cuidados com a Elisa. Sua força e assistência foram essenciais para que eu pudesse me dedicar à pesquisa e à conclusão da tese. Gratidão, infinita. Amo muito vocês!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian, agradeço por todos os ensinamentos, pelas reuniões semanais, pela serenidade, determinação e assertividade com que conduziu esse estudo. Seu firme posicionamento, em todas as fases da pesquisa, demonstraram o profissional de excelência que és. Tenho muito orgulho de ter sido sua orientada no Mestrado e no Doutorado. Serei sempre grata pelo intermédio com importantes empresas e associações, pela oportunidade de conhecer grandes profissionais, professores e empresas no meio técnico, e, também, pelos momentos de acolhimento junto a sua família.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Alex Neves Júnior, agradeço por ter aceito esse desafio, desde o Mestrado. Além de professor, se tornou um grande amigo, por quem tenho profundo carinho e admiração. Agradeço, imensamente, pela expressiva contribuição neste trabalho, pela competência e paciência frente às longas discussões e indagações acerca do tema. Seu

apoio, confiança e direcionamento foram fundamentais para a conclusão dessa tese. Muitíssimo obrigada pela parceria e amizade, que com certeza, tornaram a jornada mais leve.

Agradeço à Associação Bloco – Brasil e seu representante Paulo Grossi pelo apoio financeiro, parceria e fornecimento de informações específicas para execução dos traços dos blocos de concreto, além das diversas reuniões de brainstorming, com fabricantes de blocos de concreto brasileiros visando analisar a viabilidade do procedimento de cura carbônica nas indústrias.

Agradeço às empresas Airliquide e White Martins pelas diversas rodadas de brainstorming, objetivando analisar a viabilidade do fornecimento de CO<sub>2</sub> para a realização da cura carbônica.

Agradeço à Concretize Blocos e Pisos de Concreto, por viabilizar a execução de diversos traços e pela valiosa contribuição ao produzir e disponibilizar os blocos de concreto objeto de estudo desta pesquisa. De forma especial, agradeço ao encarregado de produção Carlos Santana da Cruz por toda paciência, rigor, seriedade e comprometimento com a extração das inúmeras amostras dos blocos.

À professora Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira pela disponibilização do Laboratório de Materiais e Componentes da UFSCar (LMC/UFSCar) e ao professor Dr. Guilherme Aris Parsekian pela disponibilização do Laboratório de Sistemas Estruturais da UFSCar (LSE).

Ao técnico do Laboratório de Materiais e Componentes da UFSCar (LMC), José Roberto de Oliveira, agradeço pela amizade, apoio frente aos desafios e por me ensinar a executar ensaios com todo o rigor e comprometimento que demandam uma pesquisa experimental. Nossas conversas e brincadeiras tornavam os momentos de dificuldade muito mais fáceis.

Ao técnico do Laboratório de Sistemas Estruturais da UFSCar (LSE), Ricardo Canato, pela amizade, apoio e parceria na execução dos ensaios. Obrigada pelos valiosos ensinamentos sobre instrumentação dentro de um laboratório.

À coordenação do Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica (LIEC), Laboratório de física da USP(FCM/NACA) e Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM), responsáveis pela realização dos ensaios de termogravimetria.

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.

À coordenação do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos (PPGECiv/UFSCar) e à coordenação do Conselho

Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo apoio e fomento à minha pesquisa.

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

## RESUMO

FORTUNATO, Livia R. **Captura de CO<sub>2</sub> em blocos de concreto por meio da cura carbônica e aplicabilidade industrial.** Defesa (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2025.

Para minimizar os efeitos do aquecimento global, as emissões globais de CO<sub>2</sub> deverão ser reduzidas em 45% até o ano 2030. Se nada for feito, até 2100 a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera deverá ter um aumento entre 41 a 158% em relação aos níveis atuais, alcançando valores que variam de 535 a 985 ppm. Neste cenário, a indústria cimenteira, responsável por até 8% das emissões globais, pode contribuir por meio da implementação da tecnologia de captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>, a qual será responsável pela redução de até 56% das emissões de CO<sub>2</sub> no setor, até o ano de 2050. Uma das maneiras de se realizar a captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> é através da cura carbônica de materiais cimentícios não armados. Na reação de carbonatação, o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) reage principalmente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) e com os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), mineralizando na forma de CaCO<sub>3</sub>, como calcita, vaterita e aragonita. A literatura mostra que a precipitação de CaCO<sub>3</sub> nos poros do material cimentício altera a porosidade, aumentando a densidade e promovendo a melhora das propriedades físicas e mecânicas do material, além de contribuir com o meio ambiente ao incorporar definitivamente o CO<sub>2</sub> na forma de minerais estáveis. Na presente pesquisa realizou-se a cura carbônica em blocos de concreto. Optou-se por este material cimentício, por ser confeccionado à base de uma mistura seca de concreto, não armada, cuja geometria de paredes estreitas e vazadas, tendem a promover uma maior difusividade do CO<sub>2</sub> no interior da peça. Foram empregados blocos de concreto e amostras extraídas destes respectivos blocos com 4 MPa e 16 MPa, a fim de verificar a resistência à compressão axial dos blocos e amostras obtendo-se o fator de correlação entre eles, também foi construída uma câmara de carbonatação para realização do tratamento com CO<sub>2</sub> durante 2h, 4h, 8h e 16h. O percentual de CO<sub>2</sub> capturado foi avaliado através do ensaio de termogravimetria e termogravimetria derivativa. Trabalhando com blocos de concreto, o objetivo foi o de desenvolver e aplicar uma metodologia da captura, estocagem e utilização de carbono em uma indústria em escala real, realizando também um estudo de viabilidade técnica para implementação da cura carbônica com CO<sub>2</sub> em fábricas de blocos de concreto na região da grande São Paulo – SP.

**Palavras-chave:** captura de CO<sub>2</sub>, cura carbônica, blocos de concreto, resistência à compressão, concreto.

## ABSTRACT

FORTUNATO, Livia R. **CO<sub>2</sub> capture in concrete masonry units through carbonic curing and industrial applicability.** Thesis (Doctorate in Civil Engineering) - Federal University of São Carlos, São Carlos, 2025.

To minimize the effects of global warming, global CO<sub>2</sub> emissions should be reduced by 45% by the year 2030. If nothing is done, by 2100 the concentration of CO<sub>2</sub> in the atmosphere should increase by 41 to 158% compared to current levels, reaching values ranging from 535 to 985 ppm. In this scenario, the cement industry, responsible for up to 8% of global emissions, can contribute by implementing CO<sub>2</sub> capture and storage technology, which will be responsible for reducing CO<sub>2</sub> emissions in the sector by up to 56% by 2050. One way to capture and store CO<sub>2</sub> is through carbonic curing of non reinforced cementitious material. In the carbonation reaction, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) reacts mainly with calcium hydroxide (Ca(OH)<sub>2</sub>) and hydrated calcium silicates (C-S-H), mineralizing in the form of CaCO<sub>3</sub>, such as calcite, vaterite and aragonite. The literature shows that the precipitation of CaCO<sub>3</sub> in the pores of the cementitious material alters the porosity, increasing the density and promoting the improvement of the physical and mechanical properties of the material, in addition to contributing to the environment by definitively incorporating CO<sub>2</sub> in the form of stable minerals. In this research, the aim is to perform carbonic curing in concrete blocks, choosing this cementitious material because it is made from a dry, unreinforced concrete mix, whose geometry of narrow and hollow walls tends to promote greater diffusivity of CO<sub>2</sub> inside the piece. Concrete blocks and samples extracted from these respective blocks with 4 MPa and 16 MPa will be used in order to verify the axial compression resistance of the blocks and samples, obtaining the correlation factor between them. A carbonation chamber will also be built to perform the treatment with CO<sub>2</sub> for 2 hours, 4 hours, 8 hours and 16 hours. The percentage of CO<sub>2</sub> captured will be evaluated through the thermogravimetry and derivative thermogravimetry tests. Working with concrete blocks, the objective is to develop and apply a methodology for the capture, storage and use of carbon in a full-scale industry, also carrying out a technical feasibility study for the implementation of carbonic curing with CO<sub>2</sub> in concrete block factories in the greater São Paulo region - SP.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> capture, carbonic curing, concrete blocks, compressive strength, concrete.

Figura 1 - Resort MGM National Harbor, construído com blocos curados com CO <sub>2</sub> : a) durante a construção, b) após a construção. ....	35
Figura 2 - Origem da Terra.....	40
Figura 3 - Escala de tempo geológica do planeta Terra simplificada.....	41
Figura 4 - Teoria de Milankovitch.....	43
Figura 5 - Representação das temperaturas futuras com base nos diferentes cenários de emissão de CO <sub>2</sub> .....	44
Figura 6 - Ciclo simplificado de carbono-silicato .....	46
Figura 7 - O mecanismo do efeito estufa.....	47
Figura 8 - Concentração de CO <sub>2</sub> atmosférico global nos períodos glaciais e interglaciais, considerando um período de 800.000 anos até o ano de 2018 .....	49
Figura 9 - Concentração Anual de CO <sub>2</sub> verificada por satélites no hemisfério Norte, hemisfério Sul e Global .....	50
Figura 10 - Relação entre a temperatura global média anual (barras) e a concentração de dióxido de carbono em ppm (linha contínua).....	51
Figura 11 - Temperatura média global durante períodos de 5 anos a uma altura de dois metros (eixo esquerdo) e aumento de temperatura estimado desde a era pré-industrial (eixo direito) .....	52
Figura 12 - Países que mais emitiram dióxido de carbono entre 1998 e 2018 .....	53
Figura 13 - Projeções de mudança de temperatura para os períodos de 2020-2029 e de 2090-2099, nos cenários de baixas (figuras superiores) e de altas (figuras inferiores) emissões, a partir dos modelos de circulação geral da atmosfera e dos oceanos.....	53
Figura 14 - Produção de cimento e respectiva emissão de CO <sub>2</sub> , no período de 2010 a 2017...55	55
Figura 15 - Contribuição para redução das emissões de CO <sub>2</sub> a partir de 2006 advindas da indústria do cimento de acordo com diferentes estratégias .....	57
Figura 16 - Médias das emissões de CO <sub>2</sub> / ton clínquer por tipo de forno e por ano.....	58
Figura 17 - Evolução dos substitutos do clínquer no período de 1990 a 2014.....	59

Figura 18 - Armazenamento do CO <sub>2</sub> : a) no transporte, após coleta das chaminés das indústrias e posterior purificação; b) nos tanques da empresa que utiliza a tecnologia da captura e armazenamento de CO <sub>2</sub> em seus concretos .....	62
Figura 19 - Forno para produção à seco do clínquer .....	63
Figura 20 - Medidas para redução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil .....	64
Figura 21 - Máquinas utilizadas na fabricação de blocos no século XIX, início do século XX e uma vibroprensa atual.....	66
Figura 22 - Bloco de Concreto Vazado Simples .....	67
Figura 23 - Artefatos produzidos com concreto seco .....	69
Figura 24 - Resistência à compressão em função da elevação da relação água/cimento .....	69
Figura 25 - Dimensões dos furos: a) Vista superior do bloco; b)Corte A-A.....	73
Figura 26 - Mísulas.....	73
Figura 27 - Diagrama de caixa por tipos de blocos. ....	75
Figura 28 - Ruptura dos corpos de prova extraídos dos blocos.....	76
Figura 29 - Fluxograma do processo de fabricação dos blocos de concreto. ....	81
Figura 30 - Baía de agregados .....	82
Figura 31 - Usina dosadora de agregados.....	83
Figura 32 - Silo de cimento a granel.....	84
Figura 33 - Misturador Planetário .....	84
Figura 34 - Tipo de vibroprensa empregas na confecção dos blocos: a) manual, b) pneumática, c) hidráulica .....	86
Figura 35 - Partes constituintes de uma vibroprensa. ....	86
Figura 36 - Mecanismo de funcionamento da gaveta: a) gaveta recuada; b) gaveta sobre a fôrma.....	87
Figura 37 - Sistema de compressão (Pistão atuando como aplicador de carga).....	88
Figura 38 - Forma para produção de blocos. ....	89
Figura 39 - Detalhe do sistema de mesa vibratória .....	90
Figura 40 - Detalhe de um sistema de vibração produzido por excêntricos fixados nas laterais da forma.....	90
Figura 41 - Detalhe de um sistema de vibração produzido por excêntricos sob a forma.....	91
Figura 42 - Detalhe de um sistema de vibração produzido por biela- virabrequim .....	91

Figura 43 - Posicionamento da forma e avanço da gaveta .....	92
Figura 44 - Vibro – alimentação da forma .....	92
Figura 45 - Retorno da gaveta a posição inicial .....	93
Figura 46 - Etapa de Vibro - compressão .....	93
Figura 47 - Subida da forma concomitantemente à subida da sapata e liberação dos blocos ..	94
Figura 48 - Câmara de cura .....	94
Figura 49 - Hidratação e Microestrutura do Cimento Portland .....	95
Figura 50 - Tanque para armazenamento de CO <sub>2</sub> capturado.....	97
Figura 51 - Câmara de cura carbônica localizadas na empresa Boehmers Hargest Blocks Ltd .....	98
Figura 52 - Comparativo do ganho de resistência à compressão dos concreto carbonatados e referencias.....	99
Figura 53 - Ensaio de ganho de massa realizado em peças de concreto para pavimentação .	110
Figura 54 - Quantificação da captura de CO <sub>2</sub> em blocos de concreto, através do método da curva de massa.....	111
Figura 55 - TG/DTG de uma amostra de concreto carbonatada.....	112
Figura 56 - Equipamento para realização de análise termogravimétrica modelo 404 F1 Pegasus® marca Netzsch.....	113
Figura 57 - Fases: projeto, construção e automatização da câmara por carbonatação .....	131
Figura 58 - Projeto: a) Vistas frontais, prateleiras e porta da câmara de carbonatação; b) Prateleiras. ....	132
Figura 59 - Ventilador: a) Descrição; b) posição dos ventiladores na câmara. ....	132
Figura 60 - Válvula para controle do fluxo de dióxido de carbono e ar: a) Modelo; b) Vista lateral esquerda com dispositivo de entrada de CO <sub>2</sub> . ....	133
Figura 61 - Sensores: a) Concentração de CO <sub>2</sub> ; b) Umidade; c) Temperatura.....	134
Figura 62 - Sílica gel distribuída no interior da câmara. ....	135
Figura 63 - Manômetro para controle da pressão no interior da câmara. ....	135
Figura 64 - Estrutura da câmara de carbonatação (caixa e prateleiras em acrílico): a) vista frontal; b) vista em perspectiva. ....	136
Figura 65 - Porta da câmara: a) Abertura no vão superior, b) Vista frontal da porta com destaque para as regiões críticas. ....	136

Figura 66 - Abertura na lateral da porta. ....	137
Figura 67 - Inserção de fechaduras e dobradiças: a) Câmara, b) Projeto. ....	137
Figura 68 - Prateleiras: a) Empenadas, b) Solução encontrada: calços, c) Prateleiras suportando o peso dos blocos com a inserção dos calços.....	138
Figura 69 - Teste de estanqueidade. ....	138
Figura 70 - Acidente com câmara de CO <sub>2</sub> .....	139
Figura 71 - Manômetro com maior precisão. ....	139
Figura 72 - Sistema de contenção com cantoneiras: a) face lateral; b) fundo e c) face superior. ....	140
Figura 73 - Novos dispositivos de vedação da porta. ....	141
Figura 74 - Acidente com câmara de CO <sub>2</sub> .....	141
Figura 75 - Gráfico de concentração de CO <sub>2</sub> .....	142
Figura 76 - Interface autônoma. ....	143
Figura 77 - Câmara de carbonatação finalizada. ....	143
Figura 78 - Câmara de carbonatação autores: a) Silva (2002); b) Abreu (2004); c) Pauletti (2004); d) Barros (2008).....	146
Figura 79 - Continuação Câmara de carbonatação autores: e) Salomão e Silva (2008); f) Saldanha (2013); g) Lucena (2016); h) Soares et al (2017). ....	147
Figura 80 - Transporte do CO <sub>2</sub> para atender a própria indústria que o capturou e demais clientes. ....	152
Figura 81 - Tanque para armazenamento de CO <sub>2</sub> capturado. ....	154
Figura 82 - Câmara de testes Solidia. ....	155
Figura 83 - Câmaras de carbonatação desenvolvidas pela Solidia Technologies em estruturas de Container, localizadas: a) EUA, b) Canadá, c) d) Reino Unido. ....	155
Figura 84 - Modelo de dinâmica dos fluidos computacional indicando a taxa de evaporação de água dentro das câmaras de cura. ....	156
Figura 85 - Fluxo de gás dentro das câmaras Solidia modelado para condições ideais. ....	156
Figura 86 - Fluxo de gás dentro das câmaras Solidia modelado para condições ideais. ....	157
Figura 87 - Tanque para armazenamento de CO <sub>2</sub> capturado. ....	158
Figura 88 - Câmaras de carbonatação desenvolvidas pela Carboclave: a) Retrofit, b) Novas instalações.....	159

Figura 89 - Tubulação contendo o CO <sub>2</sub> que será injetado na câmara de carbonatação.....	160
Figura 90 - Container-câmara.....	161
Figura 91 - Controle da câmara: a) configuração da injeção de CO <sub>2</sub> , b) aferição da temperatura. ....	161
Figura 92 - Container-câmara.....	162
Figura 93 - Proposta de câmara de carbonatação: nova instalação. ....	165
Figura 94 - Câmaras de cura à vapor em fábrica de blocos de concreto. ....	166
Figura 95 - Sensores: a) Concentração de CO <sub>2</sub> ; b) Umidade; c) Temperatura.....	169
Figura 96 - Instalações da câmara e do fornecimento de CO <sub>2</sub> , equipamentos e sensores para realização da cura com CO <sub>2</sub> na indústria.....	169
Figura 97 - Localização dos fornecedores de CO <sub>2</sub> (Airliquide) e indústrias fabricantes de blocos de concreto no estado de São Paulo. ....	170
Figura 98 - Raio de 100 km para distribuição do CO <sub>2</sub> . ....	171
Figura 99 - Câmara de cura à vapor existente em indústria fabricante de blocos de concreto no estado de São Paulo. ....	172
Figura 100 – Fluxograma referente à Etapa 1 do programa experimental. ....	178
Figura 101 - Bloco de concreto empregado na pesquisa. ....	179
Figura 102 - Agregados naturais. a) Areia natural; b) Pó de pedra; c) Pedrisco; d) Detalhe areia; e) Detalhe pó de pedra; f) Detalhe pedrisco. ....	181
Figura 103 - Matérias – primas: a) baia de agregados naturais, b) cimento ensacado, c) dispositivos de controle de água e aditivo. ....	183
Figura 104 - Equipamentos empregados na fabricação dos blocos: a) misturador, b) esteira, c) máquina vibroprensa.....	183
Figura 105 : Blocos de concreto: a) distribuídos no barracão, b) cobertos com lona, c) armazenados em sala isolada. ....	184
Figura 106 - Capeamento do bloco: a) chapa dura sobre o bloco; b) bloco posicionado na prensa hidráulica capeado na face inferior e superior com chapa dura. ....	185
Figura 107 - Amostras extraídas das paredes longitudinais dos blocos. ....	187
Figura 108 - Posição em que amostras serão retiradas do bloco: a) superior (s), b) intermediária (m), e c) inferior (i). ....	187

Figura 109 - Amostras: a) Local no bloco em que as amostras foram retiradas, b) Amostras extraídas das regiões inferior (i), intermediária (m) e superior (s) da parede longitudinal do bloco. ....	188
Figura 110 - Amostras: a) extração da amostra com serra circular manual; b) extração da amostra com serra circular de bancada; c) amostra capeada com chapa dura na prensa, d) amostras capeadas com chapa dura após ensaio.....	189
Figura 111 - Amostra com partes desagregadas devido ao corte com serra circular manual e serra circular de bancada. ....	191
Figura 112 - Amostras: a) capeamento com pasta de cimento; b) ensaio na prensa. ....	191
Figura 113 - Teste Tukey relacionando resistências à compressão das amostras dos blocos BR 4 e BR 16 e suas posições no bloco.....	193
Figura 114 - Regiões superior e inferior do bloco de concreto que apresentam maior resistência devido ao processo de vibração durante sua fabricação. ....	193
Figura 115 - Fluxograma dos ensaios de resistência à compressão das amostras e dos blocos, afim de obter o coeficiente de correlação entre amostras e blocos com 4 MPa e 16 MPa, aos 02, 07 e 28 dias.....	194
Figura 116 - Fluxograma referente à Etapa 2 do programa experimental.....	197
Figura 117 - Blocos sendo curados em galpão coberto da indústria. ....	198
Figura 118 - Umidade e temperatura aferidas no barracão. ....	198
Figura 119 - Amostras sendo cortadas da região superior do bloco.....	199
Figura 120 - Amostras submetidas à cura carbônica.....	199
Figura 121 - Cura referência (com lona) e cura ambiente. ....	200
Figura 122 -Verificação da frente de carbonatação com fenolftaleína após 2 e 4 horas de cura carbônica nas amostras dos blocos BR 4 e 16. ....	201
Figura 123 - Preparação amostra após cura com CO <sub>2</sub> : a) submersa em álcool isopropílico; b) selada à vácuo.....	202
Figura 124 - Preparação da amostra no Laboratório de Materiais e Componentes da UFSCar (LMC): a) trituração; b) maceração; c) peneiramento; d) amostra pulverolenta; e) filtragem em álcool isopropílico; e) armazenamento em eppendorf. ....	203
Figura 125 - Capeamento das amostras: a) nivelamento, b) nivelamento, c) amostras capeadas e identificadas. ....	205

Figura 126 - Ensaio de resistência à compressão axial: a) amostra na prensa, b) amostras após rompimento.....	205
Figura 127 - Equipamentos TG/DTG: a) Laboratório CCDM, b) Laboratório NACA. ....	206
Figura 128 - Cura dos blocos de concreto com CO <sub>2</sub> . ....	209
Figura 129 - Preparo dos meios blocos: a) Corte dos blocos com makita, b) Desbaste com lixadeira, c) Regularização final com utilização de makita e esquadro.....	210
Figura 130 - Blocos e meios blocos em ambiente de laboratório.....	210
Figura 131 - Ensaio com o bloco e meio bloco na prensa hidráulica.....	211
Figura 132 - Resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para os blocos BR 4 e BR 16. ....	213
Figura 133 - Ruptura dos blocos: a) BR 4; b) BR 16. ....	215
Figura 134 - Resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras BR 4 e BR 16. ....	216
Figura 135 - Ruptura das amostras dos blocos BR 4.....	218
Figura 136 -Ruptura das amostras dos blocos BR 16.....	218
Figura 137 - Amostras BR 4 e BR 16, após aspensão de fenolftaleína.....	226
Figura 138 - Mensuração do avanço da frente de carbonatação na amostra BR 16.....	227
Figura 139 - TG/DTG – amostras BR 4 e BR 16 – não carbonatados. ....	228
Figura 140 - TG/DTG – amostras BR 4 - 2a+2c e BR 16 - 2a+2c.....	229
Figura 141 - Amostras BR 4 e BR 16, após aspensão de fenolftaleína.....	234
Figura 142 - Mensuração do avanço da frente de carbonatação na amostra BR 16.....	234
Figura 143 - TG/DTG – amostras BR 4 - 4a+2c e BR 16 - 4a+2c.....	235
Figura 144 - Amostras após 2 horas de cura ambiente.....	237
Figura 145 - Amostras BR 4 e BR 16, após aspensão de fenolftaleína.....	241
Figura 146 - Mensuração do avanço da frente de carbonatação na amostra BR 16 – 3a+4c. ....	241
Figura 147 - TG/DTG – amostras BR 4 - 3a+4c e BR 16 - 3a+4c.....	242
Figura 148 - Amostras BR 4 e BR 16, após aspensão de fenolftaleína.....	247
Figura 149 - Mensuração do avanço da frente de carbonatação na amostra BR 16 – 3a+8c. ....	247
Figura 150 - TG/DTG – amostras BR 4 - 3a+8c e BR 16 - 3a+8c.....	248
Figura 151 - Amostras BR 4 e BR 16, após aspensão de fenolftaleína.....	253

Figura 152 - Mensuração do avanço da frente de carbonatação na amostra BR 16 – 3a+16c. .....	253
Figura 153 - TG/DTG – amostras BR 4 - 3a+16c e BR 16 - 3a+16c.....	254
Figura 154 - Captura de CO <sub>2</sub> verificada para os diferentes tipos de cura para as amostras BR 4 e 16. ....	256
Figura 155 - Local em que as amostras foram retiradas dos blocos após a cura carbônica. ..	260
Figura 156 - Amostras dos blocos BR 4 - 2a+2c, após aspersão de fenolftaleína. ....	261
Figura 157 - Amostras dos blocos BR 16 - 4a+2c, após aspersão de fenolftaleína. ....	261
Figura 158 - Mensuração do avanço da frente de carbonatação na amostra BR 16 – 4a+2c. .....	262
Figura 159 - TG/DTG – Blocos BR 4 – não carbonatados. ....	263
Figura 160 - TG/DTG – Blocos BR 4 - 2a+2c. ....	264
Figura 161 - TG/DTG – Blocos BR 16 – não carbonatados. ....	265
Figura 162 - TG/DTG – Blocos BR 16 - 4a+2c. ....	266
Figura 163 - Cura carbônica: a) amostras; b) blocos.....	268
Figura 164 - Local em que as amostras foram retiradas dos blocos após a cura carbônica. ..	269
Figura 165 - Área de contato com CO <sub>2</sub> (cor cinza): a) amostra; b) amostra retirada do bloco. .....	269
Figura 166 – Cura carbônica dos blocos: a) umidade interna; b) parede da câmara condensada. .....	271

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1 - Composição do cimento de acordo com a norma brasileira (% em massa) .....	60
Tabela 2 - Designação por classe, largura dos blocos e espessura mínima das paredes .....	71
Tabela 3 - Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração .....	72
Tabela 4 - Tamanho da amostra. ....	74
Tabela 5 - Correlação entre as resistências dos CPs e dos blocos de concreto. ....	77
Tabela 6 - Resistência à compressão dos blocos e corpos-de-prova e correlação.....	77
Tabela 7 - Resistência à compressão de blocos e corpos de prova.....	78
Tabela 8 - Pesquisas envolvendo a cura carbônica em pré-fabricados cimentícios não armados.....	115
Tabela 9 - Pesquisas envolvendo a cura carbônica em pré-fabricados cimentícios não armados (continuação). ....	116
Tabela 10 - Pesquisas envolvendo a cura carbônica em pré-fabricados cimentícios não armados (continuação).....	117
Tabela 11 - Pesquisas envolvendo a cura carbônica em pré-fabricados cimentícios não armados (continuação).....	118
Tabela 12 - Pesquisas envolvendo a cura carbônica em pré-fabricados cimentícios não armados (continuação).....	119
Tabela 13 - Resumo das diferentes câmaras de carbonatação, conforme relatado na literatura. ....	123
Tabela 14 - Resumo das diferentes câmaras de carbonatação, conforme relatado na literatura (continuação). ....	124
Tabela 15 - Resumo das diferentes câmaras de carbonatação, conforme relatado na literatura (continuação). ....	125
Tabela 16- Resumo das diferentes câmaras de carbonatação, conforme relatado na literatura (continuação). ....	126
Tabela 17 - Resumo das diferentes câmaras de carbonatação, conforme relatado na literatura (continuação). ....	127
Tabela 18 - Umidade relativa produzida para diferentes tipos de solução aquosa.....	134
Tabela 19 - Propriedades do agregado natural – areia média.....	179

Tabela 20 - Tabela 2: Propriedades do agregado natural – pó de pedra.....	180
Tabela 21 - Propriedades do agregado natural – pedrisco.....	181
Tabela 22 - Traços para fabricação dos blocos de concreto.....	182
Tabela 23 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias para todos os blocos analisados.....	185
Tabela 24 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02 dias considerando 06 unidades de blocos BR4, submetidos a diferentes processos de cura.	186
Tabela 25 - Resistência à compressão axial das amostras BR 4.....	189
Tabela 26 - Resistência à compressão axial das amostras BR 16.....	190
Tabela 27 - Resistência à compressão axial (MPa) aos 28 dias – serra circular manual + capeamento com pasta de cimento.....	192
Tabela 28 - ANOVA para verificar se ocorre variação da resistência à compressão da amostra BR 4 de acordo com sua posição na parede do bloco.....	192
Tabela 29 -ANOVA para verificar se ocorre variação da resistência à compressão da amostra BR 16 de acordo com sua posição na parede do bloco.....	192
Tabela 30 - Informações das curas e dos ensaios.....	204
Tabela 31 - Combinações de cura empregadas, tempos e quantidades de amostras.....	204
Tabela 32 - Informações das curas e dos ensaios.....	207
Tabela 33 - Combinações de cura empregadas, tempos e quantidades de amostras.....	207
Tabela 34 - Informações das curas e dos ensaios.....	212
Tabela 35 - Combinações de cura empregadas, tempos e quantidades de amostras.....	212
Tabela 36 - Ensaio de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para os blocos BR 4 e BR 16.....	213
Tabela 37 - ANOVA para resistência à compressão axial para blocos BR 4.....	214
Tabela 38 - ANOVA para resistência à compressão axial para blocos BR 16.....	214
Tabela 39 - Ensaio de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras com BR 4 e BR 16.....	215
Tabela 40 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4...216	
Tabela 41 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16.217	
Tabela 42 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 02 e 07 dias.....	217

Tabela 43 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 e 28 dias.....	217
Tabela 44 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 02 e 28 dias.....	218
Tabela 45 - Correlação entre as resistências à compressão axial das amostras extraídas dos blocos e blocos com 4MPa e 16MPa.....	220
Tabela 46 - Correlação entre as resistências à compressão axial das amostras extraídas dos blocos e blocos com 4MPa.....	221
Tabela 47 - Correlação entre as resistências à compressão axial das amostras extraídas dos blocos e blocos com 16 MPa.....	221
Tabela 48 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 4, submetidas às curas 2a+2c e referência.....	223
Tabela 49 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 02 dias, considerando as curas 2a+2c e referência.....	223
Tabela 50 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 07 dias, considerando as curas 2a+2c e referência.....	223
Tabela 51 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 28 dias, considerando as curas 2a+2c e referência.....	224
Tabela 52 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 16, submetidas às curas 2a+2c e referência.....	224
Tabela 53 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 02 dias, considerando as curas 2a+2c e referência.....	225
Tabela 54 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 dias, considerando as curas 2a+2c e referência.....	225
Tabela 55 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 2a+2c e referência.....	226
Tabela 56 - Resultados de captura de CO <sub>2</sub> pelo ensaio de termogravimetria para amostras BR 4 - 2a+2c e BR 16 - 2a+2c.....	229
Tabela 57 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 4, submetidas às curas 4a+2c e referência.....	230

Tabela 58 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 02 dias, considerando as curas 4a+2c e referência. ....	231
Tabela 59 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 07 dias, considerando as curas 4a+2c e referência. ....	231
Tabela 60 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 28 dias, considerando as curas 4a+2c e referência. ....	231
Tabela 61 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 16, submetidas às curas 4a+2c e referência. ....	232
Tabela 62 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 02 dias, considerando as curas 4a+2c e referência. ....	232
Tabela 63 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 dias, considerando as curas 4a+2c e referência. ....	233
Tabela 64 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 4a+2c e referência. ....	233
Tabela 65 - Resultados de captura de CO <sub>2</sub> pelo ensaio de termogravimetria para amostras BR 4 - 4a+2c e BR 16 - 4a+2c. ....	235
Tabela 66 - Resumo dos itens analisados para as amostras BR 4: resistência à compressão, frente de carbonatação e captura de CO <sub>2</sub> . ....	236
Tabela 67 - Resumo dos itens analisados para as amostras BR 16 : resistência à compressão, frente de carbonatação e captura de CO <sub>2</sub> . ....	236
Tabela 68 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 4, submetidas às curas 3a+4c e referência. ....	237
Tabela 69 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 02 dias, considerando as curas 3a+4c e referência. ....	238
Tabela 70 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 07 dias, considerando as curas 3a+4c e referência. ....	238
Tabela 71 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 28 dias, considerando as curas 3a+4c e referência. ....	238
Tabela 72 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 16, submetidas às curas 3a+4c e referência. ....	239

Tabela 73 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 02 dias, considerando as curas 3a+4c e referência. ....	239
Tabela 74 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 dias, considerando as curas 3a+4c e referência. ....	240
Tabela 75 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 3a+4c e referência. ....	240
Tabela 76 - Resultados de captura de CO <sub>2</sub> pelo ensaio de termogravimetria para amostras BR 4 – 3a+4c e BR 16 – 3a+4c. ....	242
Tabela 77 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 4, submetidas às curas 3a+8c e referência. ....	244
Tabela 78 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 02 dias, considerando as curas 3a+8c e referência. ....	244
Tabela 79 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 07 dias, considerando as curas 3a+8c e referência. ....	244
Tabela 80 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 28 dias, considerando as curas 3a+8c e referência. ....	245
Tabela 81 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 16, submetidas às curas 3a+8c e referência. ....	245
Tabela 82 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 02 dias, considerando as curas 3a+8c e referência. ....	246
Tabela 83 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 dias, considerando as curas 3a+8c e referência. ....	246
Tabela 84 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 3a+8c e referência. ....	246
Tabela 85 - Resultados de captura de CO <sub>2</sub> pelo ensaio de termogravimetria para amostras BR 4 e BR 16 - 3a+8c. ....	248
Tabela 85 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 4, submetidas às curas 3a+16c e referência. ....	249
Tabela 87 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 02 dias, considerando as curas 3a+16c e referência. ....	250

Tabela 88 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 07 dias, considerando as curas 3a+16c e referência. ....	250
Tabela 89 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 28 dias, considerando as curas 3a+16c e referência. ....	250
Tabela 90 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 16, submetidas às curas 3a+16c e referência. ....	251
Tabela 91 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 02 dias, considerando as curas 3a+16c e referência. ....	251
Tabela 92 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 dias, considerando as curas 3a+16c e referência. ....	252
Tabela 93 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 3a+16c e referência. ....	252
Tabela 94 - Resultados de captura de CO <sub>2</sub> pelo ensaio de termogravimetria para amostras BR 4 e BR 16 - 3a+8c. ....	254
Tabela 95 - Resultados de captura de CO <sub>2</sub> para todas as curas analisadas. ....	255
Tabela 96 - Resumo dos itens analisados para as amostras BR 4: resistência à compressão, frente de carbonatação e captura de CO <sub>2</sub> . ....	256
Tabela 97 - Resumo dos itens analisados para as amostras BR 16: resistência à compressão, frente de carbonatação e captura de CO <sub>2</sub> . ....	257
Tabela 98 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias para os blocos e meios blocos BR 4, submetidos às curas 2a+2c e referência. ....	258
Tabela 99 - ANOVA para resistência à compressão axial dos <i>blocos</i> BR 4 aos 28 dias, considerando as curas 2a+2c e referência. ....	258
Tabela 100- ANOVA para resistência à compressão axial dos <i>meios blocos</i> BR 4 aos 28 dias, considerando as curas 2a+2c e referência. ....	259
Tabela 101 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias para os blocos e meios blocos BR 16, submetidas às curas 4a+2c e referência. ....	259
Tabela 102 - ANOVA para resistência à compressão axial dos <i>blocos</i> BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 4a+2c e referência. ....	260
Tabela 103 - ANOVA para resistência à compressão axial dos <i>meios blocos</i> BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 4a+2c e referência. ....	260

Tabela 104 - Quantidade e identificação das amostras.....	263
Tabela 105 - Resultados de captura de CO <sub>2</sub> pelo ensaio de termogravimetria para amostras BR 4 - 2a+2c. ....	264
Tabela 106 - Resultados de captura de CO <sub>2</sub> pelo ensaio de termogravimetria para amostras BR 16 - 4a+2c. ....	266
Tabela 107 - Captura de CO <sub>2</sub> verificados por meio das análises térmicas: termogravimetria e termogravimetria derivativa. ....	268
Tabela 108 - Resumo dos itens analisados para as amostras BR 4: resistência à compressão, frente de carbonatação e captura de CO <sub>2</sub> .....	272
Tabela 109 - Resumo dos itens analisados para as amostras BR 16: resistência à compressão, frente de carbonatação e captura de CO <sub>2</sub> .....	273
Tabela 110 - Análises e resultados de resistência à compressão axial para as amostras BR4 - 2a+2c e referência.....	275
Tabela 111 - Análises e resultados de resistência à compressão axial para as amostras BR 16 - 4a+2c e referencia.....	276
Tabela 112 - Correlação entre as resistências à compressão axial das amostras extraídas dos blocos e blocos com 4MPa e 16 MPa.....	276

**ABNT** - Associação Brasileira de Normas Técnicas

**ARI** - Alta resistência inicial

**CaCO<sub>3</sub>** – Carbonato de Cálcio

**CaO** – xido de cálcio

**Ca(OH)<sub>2</sub>** – Hidróxido de cálcio

**CFCs** - Clorofluorcarbonos

**CO<sub>2</sub>** – Dióxido de carbono ou gás carbônico

**CP** – Corpo de prova

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

**EDGAR** - Dados de Emissões para Pesquisa Atmosférica Global

**GEE** – Gases de efeito estufa

**H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>** – cido carbônico

**HFC**– Hidrofluorcarbonos

**IEA** - Agência Internacional de Energia

**IPCC** – Painel Intergovernamental sobre Mudanas Climáticas

**KOH** – Hidróxido de Potássio

**Mg(OH)<sub>2</sub>** – Hidróxido de magnésio

**NASA** - Agência do Governo Federal dos Estados Unidos

**NaOH** – Hidróxido de sódio

**N<sub>2</sub>O** - xido nitroso

**PFC** – Perfluorcarbonos

**SF<sub>6</sub>** - Hexafluoreto de enxofre

**SNIC** - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

**TG** – Termogravimetria

**DTG** – Termogravimetria derivativa

**H** - Horas

**CCS** – *Carbon Capture and Storage*

**CCUS** - *Carbon Capture, Utilization and Storage*

**RCD** - Resíduos da Construção Civil e Demolição

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>1.1 OBJETIVOS .....</b>	<b>33</b>
1.1.1 Geral .....	33
1.1.2 Específicos.....	33
<b>1.2 JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>34</b>
<b>1.3 QUESTÕES DA PESQUISA.....</b>	<b>37</b>
<b>1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS.....</b>	<b>38</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>39</b>
<b>2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS NATURAIS.....</b>	<b>39</b>
2.1.1 Planeta terra: origem.....	39
2.1.2 Evolução .....	41
2.1.3 Glaciações.....	42
2.1.4 Captura de CO <sub>2</sub> .....	45
2.1.5 Efeito Estufa .....	46
<b>2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS ANTROPOGÊNICAS.....</b>	<b>48</b>
2.2.1 Aquecimento global.....	48
<b>2.3 REDUÇÃO E REMOÇÃO DAS EMISSÕES NA INDÚSTRIA DO CIMENTO..</b>	<b>56</b>
2.3.1 Redução das emissões e a industria do cimento - Brasil .....	63
<b>2.4 BLOCOS DE CONCRETO .....</b>	<b>64</b>
2.4.1 Breve Histórico.....	64
2.4.2 Definições.....	67
2.4.3 Concreto Seco.....	69
2.4.4 Requisitos e Normalização .....	71
2.4.5 Avaliação das Propriedades Mecânicas.....	74
□ Determinação da Resistência Característica à Compressão .....	74

2.4.6 Estudos sobre correlação da resistência à compressão axial entre blocos e amostras .....	75
2.4.7 Processo produtivo dos blocos .....	80
<b>2.5 CURA DO CONCRETO .....</b>	<b>95</b>
2.5.1 Sistemas de cura convencionais .....	96
<b>2.6 CURA CARBÔNICA .....</b>	<b>96</b>
2.6.1 Reação de carbonatação.....	100
2.6.2 Fatores que influenciam o processo de carbonatação.....	101
2.6.3 Vantagens da cura carbônica em pré-fabricados cimentícios não armados .....	106
2.6.4 Métodos Para avaliar e estimar a captura de CO <sub>2</sub> em materiais cimentícios .....	107
2.7 Estudos envolvendo o processo de cura carbônica em pré-fabricados cimentícios não armados.....	114
<b>2.8 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....</b>	<b>128</b>
<b>3. DESENVOLVIMENTO DE CÂMARA PARA PESQUISA DE CURA CARBÔNICA</b>	
<i>130</i>	
<b>3.1 PROJETO CÂMARA DE CARBONATAÇÃO- fase 1 .....</b>	<b>131</b>
<b>3.2 CONSTRUÇÃO DE CÂMARA DE CARBONATAÇÃO – FASE 2 .....</b>	<b>136</b>
<b>3.3 AUTOMATIZAÇÃO DA CÂMARA DE CARBONATAÇÃO – FASE 3.....</b>	<b>142</b>
<b>3.4 ORIENTAÇÕES PARA CONSTRUÇÃO DE CÂMARA DE CARBONATAÇÃO... ..</b>	<b>144</b>
<b>3.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....</b>	<b>147</b>
<b>4. VIABILIDADE TÉCNICA E DE LOCALIZAÇÃO PARA IMPLEMENTAÇÃO DA CURA QUÍMICA COM CO<sub>2</sub> EM FÁBRICAS DE BLOCOS DE CONCRETO NA REGIÃO DE SÃO PAULO.....</b>	<b>149</b>
<b>4.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA .....</b>	<b>149</b>
4.1.1 Características da inovação .....	150
<b>4.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE QUANTO A LOCALIZAÇÃO .....</b>	<b>163</b>
4.2.1 Localização.....	163

<b>4.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E LOCALIZAÇÃO PARA IMPLEMENTAÇÃO DA CURA QUÍMICA COM CO<sub>2</sub> EM FÁBRICAS DE BLOCOS DE CONCRETO NA REGIÃO DE SÃO PAULO .....</b>	<b>164</b>
4.3.1 Metodologia.....	164
4.3.2 Matéria prima – CO <sub>2</sub> capturado .....	164
4.3.3 Instalações .....	165
4.3.4 Equipamentos e sensores para controle de parâmetros .....	168
4.3.5 Localização.....	170
4.3.6 Estimativa de consumo de CO <sub>2</sub> para saturação da câmara de cura .....	171
4.3.7 Estimativa da captura de CO <sub>2</sub> durante a cura pelos blocos de concreto.....	173
4.3.8 Estimativa de custo inicial.....	173
4.3.9 Estimativa de consumo e custo mensal de CO <sub>2</sub> .....	174
4.3.10 Conclusão do capítulo .....	175
<b>5. METODOLOGIA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>176</b>
<b>5.1 ENSAIOS ESTRUTURAIS – ETAPA 1.....</b>	<b>177</b>
5.1.1 ESTÁGIO 1 .....	178
5.1.2 ESTÁGIO 2.....	187
5.1.3 ESTÁGIO 3.....	194
<b>5.2 ENSAIOS TERMOGRAVIMÉTRICOS E ESTRUTURAIS – ETAPA 2.....</b>	<b>195</b>
5.2.1 ESTÁGIO 1 – DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CURA AMBIENTE INICIAL IDEAL PARA MÁXIMA CAPTURA DE CO <sub>2</sub> E GANHO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA .....	197
5.2.2 ESTÁGIO 2 – DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CURA COM CO <sub>2</sub> IDEAL PARA MÁXIMA CAPTURA DE CO <sub>2</sub> E GANHO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA .....	207
<b>5.3 ENSAIOS TERMOGRAVIMÉTRICOS E ESTRUTURAIS – ETAPA 3.....</b>	<b>208</b>
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>213</b>
<b>6.1 ENSAIOS ESTRUTURAIS – ETAPA 1.....</b>	<b>213</b>

6.1.1 Resistência à compressão axial dos blocos com 4 e 16 MPa aos 02, 07 e 28 dias.....	213
6.1.2 Resistência à compressão axial das amostras com 4 e 16 MPa aos 02, 07 e 28 dias.....	215
6.1.3 Correlação entre resistência das amostras e blocos com 4 e 16 MPa aos 02, 07 e 28 dias.....	219
6.1.4 Conclusões.....	221
<b>6.2 ENSAIOS TERMOGRAVIMÉTRICOS E ESTRUTURAIS – ETAPA 2.....</b>	<b>222</b>
6.2.1 Resistência à compressão axial das amostras BR 4 e BR 16 submetidas às curas 2a+2c e referência, aos 02, 07 e 28 dias .....	222
6.2.2 Verificação da frente de carbonatação com fenolftaleína .....	226
6.2.3 Ensaios termogravimétricos .....	227
6.2.4 Conclusões Parciais .....	230
6.2.5 Resistência à compressão axial das amostras BR 4 e BR 16 submetidas às curas 4a+2c e referência, aos 02, 07 e 28 dias .....	230
6.2.6 Verificação da frente de carbonatação com fenolftaleína .....	233
6.2.7 Ensaios termogravimétricos .....	234
6.2.8 Conclusões Parciais .....	235
6.2.9 CONSIDERAÇÕES: 2 hs e 4 hs cura ambiente + 2 hs cura carbônica .....	236
6.2.10 Resistência à compressão axial das amostras BR 4 e BR 16 submetidas às curas 3a+4c e referência, aos 02, 07 e 28 dias .....	237
6.2.12 Verificação da frente de carbonatação com fenolftaleína .....	240
6.2.13 Ensaios termogravimétricos .....	242
6.2.14 Conclusões Parciais .....	242
6.2.15 Resistência à compressão axial das amostras BR 4 e BR 16 submetidas às curas 3a+8c e referência, aos 02, 07 e 28 dias .....	243
6.2.16 Verificação da frente de carbonatação com fenolftaleína .....	247
6.2.17 Ensaios termogravimétricos .....	248
6.2.18 Conclusões Parciais .....	248
6.2.19 Resistência à compressão axial das amostras BR 4 e BR 16 submetidas às curas 3a+16c e referência, aos 02, 07 e 28 dias .....	249

6.2.20	Verificação da frente de carbonatação com fenolftaleína .....	252
6.2.21	Ensaio termogravimétrico .....	253
6.2.22	Conclusões Parciais .....	254
6.2.23	Definição da melhor condição de cura .....	255
<b>6.3</b>	<b>ENSAIOS TERMOGRAVIMÉTRICOS E ESTRUTURAIS – ETAPA 3.....</b>	<b>257</b>
6.3.1	Resistência à compressão axial dos blocos e meios blocos BR 4 e BR 16 submetidos às curas BR 4 – 2a+2c, BR 16 – 4a+2c e referência, aos 28 dias .....	258
6.3.2	Verificação da frente de carbonatação com fenolftaleína .....	260
6.3.3	Ensaio termogravimétrico .....	262
6.3.4	Conclusões Parciais .....	266
<b>6.4</b>	<b>ANÁLISE CAPTURA DE CO<sub>2</sub> BLOCO X AMOSTRA .....</b>	<b>267</b>
<b>7.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>272</b>
<b>7.1</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>278</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>279</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Os atributos do concreto são considerados incomparáveis, uma vez que este material além de econômico, é facilmente preparado em qualquer local e apresenta qualidades estruturais necessárias para construções duradouras, tanto que impulsiona a produção de cimento, que nos anos de 2000 a 2006 aumentou em 54% em todo o mundo (CEMENT TECHNOLOGY ROADMAP, 2009). Estima-se que de 2006 a 2050, a fabricação do referido produto tenha aumentos da ordem de 0,8 a 1,2% ao ano (BID, 2018).

No século XXI, o aumento da população do planeta concentra-se em países em desenvolvimento, onde há maior necessidade de novas construções e, conseqüentemente, de maior produção de cimento. Entre os anos de 2011 a 2013, a China sozinha utilizou mais cimento que os Estados Unidos durante todo o século XX. Em 2012, o Brasil foi o quinto maior produtor e o quarto maior consumidor em níveis absolutos, atrás apenas de China, Índia e Estados Unidos (SNIC, 2014). Acredita-se que com a estabilização do consumo na China, países emergentes do Sudeste Asiático e da África Subsaariana, deem continuidade ao consumo exponencial de cimento, impulsionados pela rápida urbanização e pelo desenvolvimento econômico. Espera-se que a área construída no mundo deva dobrar nos próximos 40 anos (UNITED NATIONS, 2014).

O problema é que o processo de fabricação do cimento emite elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera, sendo a indústria cimenteira sozinha responsável por 5% a 8% das emissões globais de CO<sub>2</sub> (WBCSD, 2010).

Em contraponto à perspectiva do aumento do consumo de cimento no planeta, a indústria cimenteira tem como principal desafio reduzir as emissões associadas à produção do cimento. Para tanto, algumas alternativas estão sendo desenvolvidas e implementadas: a) substituição de combustíveis tradicionais por alternativos, b) desenvolvimento de cimentos com menos clínquer e mais adições; c) cura carbônica para o sequestro de CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios; d) armazenamento de CO<sub>2</sub> em reservatórios geológicos, poços de petróleo depletados, entre outros (JOHN, 2003; OCC, 2005; PLASYNSKI, 2013).

Visando contribuir com a mudança deste cenário, a pesquisa se enquadra na tecnologia de captura, utilização e estocagem de carbono (CCUS – do inglês Carbon Capture, Utilization and Storage), a qual será desenvolvida por meio da cura carbônica em blocos de

concreto. Para tanto, a carbonatação do material cimentício não armado foi analisada como um procedimento de cura com  $\text{CO}_2$ , a qual tem se mostrado benéfica à matriz cimentícia, já que promove a formação e precipitação do  $\text{CaCO}_3$  nos poros do concreto, conseqüente ganho precoce de resistência mecânica, lucro ambiental relacionado à captura permanente de  $\text{CO}_2$  e geração de créditos de carbono (YE (2003), SHAO et al. (2006), LIN E SHAO (2011), NEVES JR (2014)). Os estudos que analisam a carbonatação como cura em pré-fabricados não armados são recentes, nacionalmente estes praticamente inexistem e internacionalmente os poucos estudos encontrados não apresentam um consenso e padronização quanto ao processo produtivo e compactação dos materiais analisados, métodos de ensaio para verificação da captura de  $\text{CO}_2$ , realização ou não de cura convencional anterior à cura carbônica e parâmetros de tratamento, corroborando para uma grande variabilidade de resultados. A presente pesquisa pretende contribuir para reduzir essas variações ao otimizar os parâmetros e fatores relacionados à cura carbônica, na direção da máxima captura de  $\text{CO}_2$  e concomitante ganho de resistência mecânica nos blocos de concreto. Para isso serão empregados blocos normalizados produzidos industrialmente; analisados diversos parâmetros de cura, como: início, duração, concentração de  $\text{CO}_2$ , umidade, temperatura e pressão no interior da câmara; além do emprego de técnicas analíticas como a termogravimetria e a termogravimetria derivativa para determinação da quantidade de  $\text{CO}_2$  absorvido pelos blocos, proporcionando maior confiabilidade aos resultados encontrados.

Diversos motivos fizeram com que o bloco de concreto fosse o material cimentício não armado escolhido como objeto de estudo desta pesquisa, dentre eles, destacam-se: i) o fato deste ser produzido em larga escala o que propicia com que mais unidades sejam curadas e mais  $\text{CO}_2$  absorvido; ii) ser composto por concreto seco, apresentar paredes estreitas e geometria vazada, fatores que combinados permitem uma maior difusividade do  $\text{CO}_2$  no interior da peça e um amplificado alcance da frente de carbonatação (SHI et al, 2012; MENG et al, 2019); iii) além de apresentar crescente utilização nos médios e grandes centros urbanos (PARSEKIAN, 2012; TAUIL e NESE, 2023).

Este estudo também pretende obter o coeficiente de correlação referente à resistência à compressão axial entre amostras cortadas dos blocos e os blocos inteiros, sendo estes vibro-prensados industrialmente; para tanto, trabalhar-se-á na etapa de laboratório com amostras carbonatadas e referenciais, correlacionando-as com a unidade de alvenaria. Por meio do estado da arte não se observou a utilização de amostras extraídas dos blocos produzidos pelo processo de fabricação mencionado, além disso verificou-se grande variabilidade quanto a geometria, compactação e tipo de concreto empregado (seco ou

plástico) tanto na confecção das amostras (corpos de prova) como dos blocos, gerando importantes variações nos resultados obtidos. O intuito de correlacionar amostras e blocos deve-se ao fato de que os pesquisadores confeccionaram a câmara de carbonatação utilizada na pesquisa e ao trabalhar com amostras (5x5 cm) tornou-se possível reduzir as dimensões da câmara e ao mesmo tempo trabalhar com uma maior quantidade de variáveis.

Por fim, esta pesquisa também encontra seu ineditismo ao realizar a cura carbônica em blocos de concreto produzidos em indústria parceira, aproximando a pesquisa de um cenário prático. Não obstante, a presente pesquisa cumprirá com a sua finalidade ao aproximar a teoria da prática e verificar a viabilidade de se adotar a tecnologia da captura de CO<sub>2</sub> por meio da mineralização por cura carbônica nas demais indústrias fabricantes de blocos de concreto na região da grande São Paulo.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 GERAL**

A pesquisa tem por objetivo avaliar a aplicabilidade industrial do processo de captura de CO<sub>2</sub> por meio da cura carbônica de blocos vazados de concreto com função estrutural.

### **1.1.2 ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos deste trabalho serão:

- Desenvolver câmara de carbonatação para a realização dos ensaios em laboratório, possível de ser construída a baixo custo por laboratórios de pesquisa e disponibilizar o método de construção dessa;
- Determinar o coeficiente de correlação da resistência à compressão obtida em amostras cortadas dos blocos e em blocos inteiros;
- Determinar os parâmetros ideais para maximizar a carbonatação nos blocos, em relação ao início de cura e tempo de exposição ao CO<sub>2</sub> com concentração de 100%;
- Estudar a viabilidade técnica e de localização para implementação da cura com CO<sub>2</sub> nas dependências de indústrias fabricantes de blocos de concreto na região de São Paulo.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (2018), o principal órgão internacional na área de aquecimento global, defendeu que o aumento da temperatura média global precisa ser mantido abaixo de 1,5°C - e não de 2°C conforme registrado no Acordo de Paris. Isso significa que as emissões globais de CO<sub>2</sub> precisam diminuir em 45% em relação aos níveis registrados no ano 2010. E isso até o ano 2030.

Em 2021, impressionantes 4,4 bilhões de toneladas de cimento foram produzidas globalmente (WORLD ECONOMIC FORUM, 2022). A previsão é de que a produção global de cimento aumente entre 12% e 23% até 2050 (IEA, 2018a). De acordo com os dados globais de emissões de CO<sub>2</sub>, as fábricas de cimento contribuíram com 2,9 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> em 2021, um aumento de quase cinco vezes em comparação 1990, em que foram emitidas 0,57 bilhão de toneladas de CO<sub>2</sub> (Science & Nature, 2022). Segundo WBCSD (2010), atualmente a produção do cimento é responsável por cerca de 7% das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) do planeta, e essas emissões advêm majoritariamente da descarbonatação da rocha calcária (CaCO<sub>3</sub>) e da utilização de combustíveis fósseis para aquecimento dos fornos de clínquer.

Neste cenário, visando-se a redução das emissões associadas à indústria cimenteira até 2050, o Roadmap tecnológico do cimento (ROADMAP, 2019) traz diferentes panoramas. Dentre eles, o documento preconiza a tecnologia inovadora de captura, utilização e estocagem de carbono (CCUS) como importante aliada para a redução da pegada de carbono. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA) (2009a) até o ano de 2050, essa tecnologia será responsável pela redução de até 56% das emissões de CO<sub>2</sub> no setor de cimento.

Em materiais cimentícios, o processo de captura de carbono (ou fixação de CO<sub>2</sub>) se dá através da reação química de carbonatação. Por meio desta, o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) e outros compostos hidratados, reagem com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), formando carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) na presença água (HELENE, 1993; HEWLETT, NEVILLE, 2011). Nesta reação o CO<sub>2</sub> é capturado permanentemente nos poros do concreto, por meio de minerais estáveis como a calcita. Por esse motivo, a carbonatação de materiais cimentícios, que pode ocorrer pelo processo de cura carbônica (idades iniciais de hidratação), durante o ciclo de vida (idades avançadas de hidratação) da construção e após a sua demolição (RCD,s - Resíduos da Construção Civil e Demolição), trata-se de uma forma de captura, armazenamento e utilização de carbono (CCUS) (JANG et al, 2016; POSSAN, 2019).

Nos Estados Unidos, a empresa Solidia Technology desenvolveu um procedimento de cura para seus concretos que emprega dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) capturado de usinas de carvão e fábricas de cimento, ao invés de vapor d'água, e o material cimentício apresenta um melhor desempenho em comparação aos concretos convencionais (Meyer et al., 2018). A tecnologia tem o potencial de economizar pelo menos 1,5 Gton de  $\text{CO}_2$  e 3 trilhões de litros de água (SOLIDIA TECHNOLOGIES, 2019). No Canadá, a empresa *CarbonCure Technologies Inc.*, desenvolveu um processo para fabricação de seus concretos injetando o  $\text{CO}_2$  capturado durante o processo de mistura. A empresa afirma que esta tecnologia não apenas permite o armazenamento do  $\text{CO}_2$  no concreto sob a forma de carbonatos quimicamente estáveis, mas também aumenta a sua resistência, diminui eflorescência e fissuras por retração, além de melhorar a resistência ao congelamento e descongelamento (MONKMAN e MACDONALD, 2016). A empresa Ernest Maier, que emprega a tecnologia patenteada Carboncure, foi responsável por fornecer 195.000 blocos de concreto sustentáveis para a construção do Resort MGM National Harbor (Figura 1), localizado nos EUA, tal feito permitiu o sequestro de 1,43 ton de  $\text{CO}_2$  da atmosfera, mesma quantidade que 12.000,00 m<sup>2</sup> de floresta sequestraria em um ano (LENZ, 2015).

**Figura 1 - Resort MGM National Harbor, construído com blocos curados com  $\text{CO}_2$ : a) durante a construção, b) após a construção.**



Fonte: Adaptado de *CarbonCure Technologies Inc.* Disponível em: <https://www.carboncure.com/resources/mgm-national-harbor/>.

Acesso em 22 de Julho de 2020.

Outras empresas, localizadas no Canadá, EUA, Reino Unido e Japão, também têm reutilizado benéficamente o  $\text{CO}_2$  na cura, fabricação e modificação de cimentos, dentre elas destacam-se: Carbonclave, Carbonbuilt, Carboclave, Calera Corporation, TecEco Pty. Ltd, Calix Ltd. e Kajima Corporation, entre outras (JANG et al, 2016).

Neste contexto, a pesquisa pretende contribuir para a implementação da tecnologia de *Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)* no Brasil, por meio da cura carbônica de

blocos de concreto, uma vez que inexistem relatos desse tipo de procedimento no setor nacional. Considerando os dados do último Roadmap Tecnológico do Cimento emitido pelo SNIC (2023), no ano de 2023 foram produzidas 62.210.000,00 toneladas de cimento no Brasil, destas 2.050.000,00 foram empregadas na fabricação de blocos de concreto. Aplicando-se a menor (8,20%) e maior (43,96%) taxa de captura de CO<sub>2</sub> verificada para blocos de concreto nos estudos de Shao et al. (2010), Monkman e Shao (2010), El-Hassan et al (2013), B Zhan et al. (2013), El-Hassan e Shao (2015), teria sido possível sequestrar de 168.100,00 ton a 901.180,00 ton de CO<sub>2</sub> no Brasil no ano de 2023, valores importantes, considerando toda a produção de blocos de concreto.

Elegeram-se o bloco de concreto como o objeto de estudo da pesquisa, pois além da proeminente taxa de captura de carbono, verificou-se que sua produção ocorre em larga escala (o que propicia com que mais CO<sub>2</sub> seja absorvido); é confeccionado em concreto seco, apresenta paredes estreitas e geometria vazada, fatores que combinados permitem uma maior difusividade de CO<sub>2</sub> no interior da peça e um amplificado alcance da frente de carbonatação (SHI et al, 2012; MENG et al, 2019). Além disso, o bloco de concreto apresenta crescente utilização, principalmente na alvenaria estrutural, nos médios e grandes centros urbanos (PARSEKIAN, 2012; TAUIL e NESE, 2023).

Além disso, optou-se por trabalhar com a cura carbônica de blocos de concreto, pois através do estado da arte da literatura técnica, tanto nacional como internacionalmente, os estudos são escassos e não há padronização quanto ao tratamento (procedimento) de cura carbônica, verificando-se assim, elevada variabilidade quantos às taxas de captura de CO<sub>2</sub>.

Contudo, o tema desenvolvido na presente pesquisa trata da tecnologia de captura, armazenamento e utilização de carbono (CCUS), considerada promissora para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> na indústria cimenteira até 2050. E, segundo Possan (2019) suas aplicações em escala industrial e comercial ainda precisam de pesquisa e desenvolvimento. El-Hassan e Shao (2013), enfatizam que o CO<sub>2</sub> empregado na tecnologia CCUS, por meio da cura carbônica, além da questão ambiental, apresenta valor comercial, uma vez que passa a ser utilizado em um processo da indústria, e valor econômico relacionado ao mercado regulado emergente de créditos de carbono no Brasil e no mundo. Para tanto, no futuro, pretende-se replicar os resultados da pesquisa em escala real realizando a cura carbônica dos blocos em câmara de carbonatação construída nas dependências da indústria.

### 1.3 QUESTÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa teve a intenção de responder às seguintes questões:

- Quais os parâmetros ideais de concentração de CO<sub>2</sub>, temperatura, umidade e tempo de cura para maximizar a captura de CO<sub>2</sub>, sem prejudicar as propriedades mecânicas dos blocos de concreto?
- Qual dos tratamentos de cura carbônica dos blocos de concreto com função estrutural de 4 MPa (BR 4) e 16 MPa (BR 16), apresentará melhores resultados quanto à captura de CO<sub>2</sub> e ganho de resistência?
- O processo de ganho de resistência das amostras carbonatadas é acelerado com relação às amostras referenciais, ou seja, as amostras carbonatadas adquirirão resistências superiores às referenciais logo nas primeiras idades (02 e 07 dias)?
- A correlação quanto a resistência à compressão axial amostra x bloco BR 4 (4 MPa) e BR 16 (16 MPa), apresentou resultados coerentes aos verificados através dos ensaios de resistência à compressão axial dos blocos na prática?
- Quanto seria possível sequestrar de CO<sub>2</sub> no Brasil considerando o percentual de CO<sub>2</sub> capturado pelos blocos analisados na pesquisa?
- A câmara de carbonatação desenvolvida para os ensaios em laboratório atende às necessidades de pesquisas?
- Será viável financeiramente aplicar a cura carbônica em indústrias fabricantes de blocos de concreto?

## 1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O presente trabalho é composto por oito 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 captura de CO<sub>2</sub> do meio ambiente e ganhos de resistência mecânica. Foram expostas as lacunas de conhecimento, variabilidade de resultados e falta de consenso envolvendo o procedimento de cura, determinação da captura de CO<sub>2</sub> e correlação amostra e bloco. Além disso, este capítulo trouxe os objetivos principais, específicos e as questões que envolvem a pesquisa.

O segundo capítulo traz a revisão da bibliografia, expondo conceitos e definições imprescindíveis ao entendimento do tema, e apresenta os estudos de diversos autores.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia experimental com desenvolvimento de protótipo de câmara de carbonatação para realização de cura carbônica em materiais cimentícios não armados.

No quarto capítulo são analisados os fatores que verificarão a viabilidade técnica de implantação da cura química em indústrias fabricantes de blocos de concreto no Brasil, mais precisamente na região de São Paulo.

No quinto capítulo são apresentados todos os aspectos referentes à metodologia do programa experimental, empregados na execução dos ensaios, suas etapas, ferramentas envolvidas, bem como a ordem e caracterização de cada um dos procedimentos que a compreendem.

No sexto capítulo são discutidos os resultados obtidos referentes ao programa experimental implementado.

No sétimo capítulo são expostas as conclusões do estudo desenvolvido na presente tese.

Por fim, o oitavo 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, serão expostos a seguir os principais conceitos relacionados às mudanças climáticas naturais para que sejam compreendidas as mudanças climáticas antropogênicas, logo após serão abordadas informações e conceitos relacionados aos blocos de concreto como histórico, definições, concreto seco e processo produtivo; e por fim, os principais quesitos relacionados à cura carbônica, como o mecanismo da reação de carbonatação, fatores que influenciam no processo, vantagens, métodos utilizados para obtenção do percentual de CO<sub>2</sub> absorvido por produtos cimentícios não armados, estado da arte das pesquisas no tema e análise dos diferentes tipos de câmara de carbonatação fabricadas por pesquisadores.

## 2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS NATURAIS

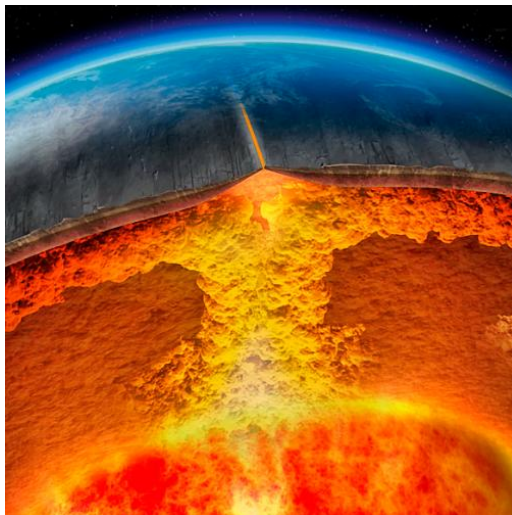
As mudanças climáticas naturais do planeta Terra sempre existiram em maior ou menor escala e foram decisivas para constituição da vida na Terra como experimentamos atualmente. As alterações climáticas naturais são motivadas por fatores internos e externos, tais como: radiação solar, parâmetros orbitais, formação da Terra e derivação dos continentes, erupções vulcânicas, furacões, ciclones, formações montanhosas que podem afetar a circulação atmosférica, entre outros (OLIVEIRA E SAMPAIO, 2009). Para compreendê-las faz-se necessário o entendimento da formação e evolução da Terra, bem como de seus períodos glaciais e interglaciais para então compreender o complexo sistema que é alterado diariamente pela ação antropogênica desenfreada e as possíveis consequências dessas inferências.

### 2.1.1 PLANETA TERRA: ORIGEM

O Big Bang deu origem ao universo, sistema solar e planeta Terra. A Terra tem sua formação datada de aproximadamente 4,6 bilhões de anos atrás e era constituída unicamente por magma à elevadas temperaturas que em contato com o universo, o qual possuía temperatura muito menor, passou a perder calor e a ser resfriar, dando origem à crosta terrestre (camada rochosa superficial), mais internamente ao manto (magma com elevadas

temperaturas e ao núcleo (Níquel e Ferro em estado sólido à elevadas temperaturas) (COSTA, 2013). Na Figura 2, é demonstrado a constituição inicial do planeta Terra.

**Figura 2 - Origem da Terra**



Fonte: National Geographic (2020). Acesso em:  
<https://www.nationalgeographicbrasil.com/espaco> (18/04/2020).

A evolução transformou a Terra em um planeta rochoso, constituído por uma superfície composta por  $\frac{3}{4}$  de água (hidrosfera) e por uma vasta camada de 1000 km de gases, a atmosfera (INPE, 2010). A atmosfera, fundamental para a vida na Terra e local onde se iniciam os processos que darão origem aos fenômenos climáticos, se originou a cerca de 4 bilhões de anos quando o planeta, extremamente aquecido começou a esfriar, e de seu interior expeliu-se gases, vapor d'água e outros elementos, que se dirigiram em direção ao espaço e foram barrados pela força gravitacional, fixando-se, parte, ao redor da Terra. Inicialmente a atmosfera era composta por nitrogênio, vapor d'água e dióxido de carbono em elevadas quantidades. O CO<sub>2</sub> serviu de alimento para os primeiros organismos vivos da Terra, as bactérias fotossintetizantes, que o utilizavam juntamente com a luz e água para produzir sua energia, e excretavam oxigênio. Contudo, aos poucos, a constituição da atmosfera foi se alterando e atualmente é composta pelas seguintes concentrações de gases: 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio, 0,93% de argônio, 0,038% de dióxido de carbono e demais gases como neônio, hélio, metano, criptônio, hidrogênio, ozônio, em menor concentração (FREITAS, 2020).

### 2.1.2 EVOLUÇÃO

Visando uma melhor compreensão da relação entre a formação da Terra e as mudanças do clima dividiu-se a idade evolutiva do planeta Terra em três importantes Éons (Arqueano, Proterozoico e Fanerozoico), estes por sua vez foram subdivididos em Eras, Períodos e Épocas (PRESS et al, 2006). A Figura 3 representa as idades evolutivas do planeta mencionadas de forma simplificada.

**Figura 3 - Escala de tempo geológica do planeta Terra simplificada**

ÉON	ERA	PERÍODO	ÉPOCA		
FANEROZOICO	CENOZOICA	Quaternário	Holoceno	0,01	
			Pleistoceno	1,8	
		TERCIÁRIO	Neógeno	Plioceno	
				Mioceno	
				Oligoceno	
			Paleoceno	Eoceno	
				Paleoceno	
					65
		MESOZOICA	Cretáceo		
			Jurássico		
	Triássico		248		
	PALEOZOICA	Permiano			
		Caronífero			
		Devoniano			
Siluriano					
Ordoviciano					
Cambriano		545			
PROTEROZOICO				2500	
ARQUEANO				4500	

x milhões de anos

Fonte: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/escala-tempo-geologico.htm>. Acesso em: 18/04/2020.

Na escala de tempo apresentada é possível observar que o primeiro éon, o Arqueano, durou cerca de dois bilhões de anos, sendo a maior de todas as divisões temporais da Terra, uma vez que engloba a formação e resfriamento da crosta do planeta (a qual é toda segmentada em placas tectônicas). O éon Proterozoico ocorreu de 2,5 bilhões de anos até 545 milhões de anos atrás, e é marcado pela formação dos minerais metálicos (ferro, ouro, alumínio, manganês, entre outros), e pelas primeiras formas de vida fotossintetizantes e primeiros animais invertebrados. Quanto ao clima nesses éons pouco se sabe, isso se deve

ao fato de que as possíveis evidências do clima neste período foram removidas pelos subsequentes episódios climáticos e geológicos (OLIVEIRA E SAMPAIO, 2009).

Depois disso, todas as evoluções das formas de relevo e das formas de vida na Terra aconteceram de 545 milhões de anos atrás até os dias atuais, durante o Fanerozoico. Na era Paleozoica, do éon Fanerozoico, a Terra havia acabado de sair de um período glacial, conhecido por “Snowball Earth”, e estima-se que a temperatura estava mais alta do que nos dias atuais, em resposta à maior atividade vulcânica e à maior quantidade de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Havia, em média, mais precipitação, o que levou a um aumento do nível médio do mar. Calcula-se que a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera era cerca de dez vezes maior do que os dias atuais. A Pangeia, que foi uma colossal massa sólida que formava um único continente, cercada por um único oceano, se formou no final do período Permiano da era paleozoica (TEIXEIRA et al, 2009).

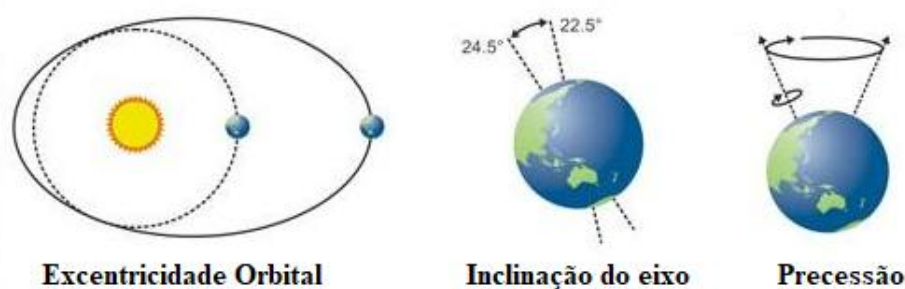
A era Mesozoica foi marcada por vulcanismos, separação da Pangeia e formação de petróleo e gás natural. Nesta era, a cerca de 100 milhões de anos, ocorreu o mais recente aquecimento do planeta. A temperatura era maior do que hoje em dia, sobretudo nas altas latitudes, o que indica uma diminuição significativa ou a ausência de gelo nesses pontos. Acredita-se que a quantidade de CO<sub>2</sub> na atmosfera era de duas a dez vezes maior do que atualmente. Além disso, o nível do mar era mais elevado e cerca de 15% a 20% da superfície atual estava submersa. Na era cenozoica, entre 55 e 50 milhões de anos atrás, as temperaturas do ar e do mar aumentaram, provavelmente por causa de um aumento da atividade tectônica, o qual resultou na atual formação dos continentes e oceanos. Houve também a intensificação das atividades vulcânicas, promovendo uma maior concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera e, conseqüentemente, no aumento do efeito estufa (OLIVEIRA E SAMPAIO, 2009). No período Quaternário da era cenozoica, verifica-se o surgimento do homem, dos dobramentos modernos (tais como cordilheira dos Andes e Himalaia) e as últimas glaciações (WALKER, 2005).

### **2.1.3 GLACIAÇÕES**

Glaciações ou Eras do Gelo tratam-se de períodos de resfriamento global em que o gelo dos pólos se expande, chegando a cobrir 30% da superfície da Terra e a temperatura média do planeta cai em cerca de 6°C. Apesar de não ser clara a razão para que ocorra uma Era Glacial, os cientistas apontam algumas possibilidades que quando combinadas, podem ser cruciais na mudança de temperatura da Terra, são elas: movimentação das placas

tectônicas, composição da atmosfera, variações das atividades solares, vulcanismo, albedo (que é a medida da quantidade de radiação solar refletida de um objeto ou alvo com relação a quantidade de energia incidente, assim o gelo reflete a radiação solar, resfriando a Terra; e os oceanos a absorvem, aquecendo a Terra) (MULLER, 1997). Existe ainda a hipótese de Milankovitch, o qual relaciona teorias orbitais da Terra ao seu resfriamento, sendo: a) excentricidade orbital ( trata-se da interferência gravitacional sofrida pela movimentação de translação terrestre em torno do sol, podendo tornar a órbita mais ovalar e distante do sol, o que afeta o recebimento de energia solar, pode ocorrer a cada cem mil anos); b) inclinação do eixo (a inclinação do eixo da Terra pode variar entre  $24,5^\circ$  a  $22,5^\circ$ , esse fenômeno ocorre a cada 41 mil anos, e quanto mais inclinada estiver a Terra menor é a incidência solar); c) precessão (é a oscilação da direção do eixo da Terra, formando um cone imaginário, o que também altera a inclinação do planeta, e pode ocorrer a cada 26 mil anos) (LEITE, 2015). A Figura 4, demonstra a Teoria de Milankovitch.

**Figura 4 - Teoria de Milankovitch**



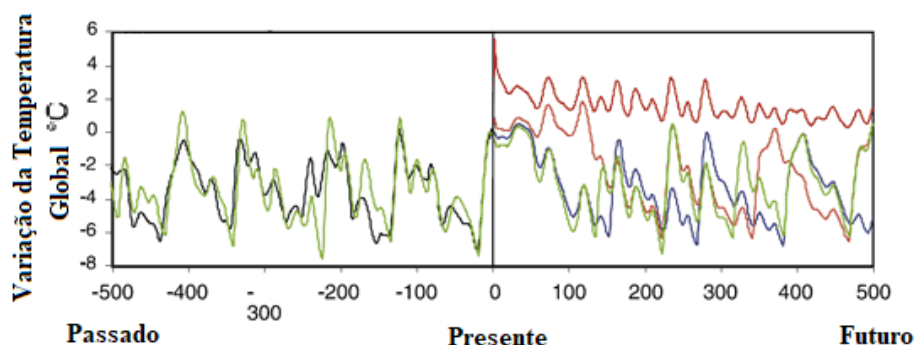
Fonte: Adaptado de Silva (2007).

Desde o éon Proterozoico a Terra vem passando por esses períodos de resfriamento, estes são cíclicos e nos últimos 2,7 milhões de anos, já ocorreram cerca de 25 vezes. Os períodos gelados (chamados de eras glaciais) duram em média 100 mil anos e são intercalados por eras temperadas (chamadas de interglaciais), como a que vivemos atualmente. O fato é que os períodos interglaciais costumam durar 10 mil anos, e o atual já se estende por 12 mil. Os cientistas relacionam o fato de não termos entrado numa era glacial com o aquecimento global (VARADI, RUNNEGAR, GHIL, 2003). Recentemente, tem-se observado uma nova baixa na radiação solar, o que significaria um resfriamento do planeta a longo prazo, porém está acontecendo exatamente o contrário, pois a temperatura média da Terra só aumenta com o passar dos anos, o gelo ocupa apenas 10% da superfície e as calotas

polares do Ártico vem se degradando e não aumentando, tanto que a NASA, Agência do Governo Federal dos Estados Unidos, responsável pela pesquisa e desenvolvimento de tecnologias e programas de exploração espacial, consternada, lançou ao espaço o satélite ICESat-2, que visa medir as alturas das camadas de gelo polar da Terra. Inicialmente, Groenlândia e Antártida serão monitoradas, pois observou-se o derretimento das geleiras e desprendimento das calotas polares nestas regiões (NASA, 2018). Os estudiosos atribuem esse fato ao aumento da incidência de gases de efeito estufa na atmosfera que acarretam o aumento do aquecimento global. Contudo, é provável que esse período interglacial seja o mais longo da história da Terra. Conseqüentemente, não há possibilidade de uma nova Era Glacial acontecer tão cedo (KAUFAMAN et all, 2009).

Archer e Buffett (2005) examinaram as respostas do clima diante à vários cenários de emissões de CO<sub>2</sub> advindas da queima de combustíveis fósseis, e estas estão representadas na Figura 5. A linha verde representa o comportamento natural clima sem emissões humanas de CO<sub>2</sub>. A linha azul representa uma liberação humana de 300 giga toneladas de carbono – esta quantidade já havia sido alcançada em 2005 segundo os pesquisadores. A linha laranja representa a variação da temperatura global caso houvesse a liberação de 1000 giga toneladas de carbono - essa situação impediria uma Era Glacial por 130.000 anos. Se as emissões de carbono alcançassem 5000 giga toneladas ou mais, a glaciação seria evitada por meio milhão de anos. Porém, o ideal é que isso não ocorra, pois experimentaríamos as desastrosas conseqüências do aquecimento global desenfreado. Segundo os autores, atualmente vivenciamos a combinação de uma força orbital relativamente fraca com um longo período de permanência atmosférica de CO<sub>2</sub>, essa conjuntura deverá gerar o período interglacial mais longo dos últimos 2,6 milhões de anos.

**Figura 5 - Representação das temperaturas futuras com base nos diferentes cenários de emissão de CO<sub>2</sub>**

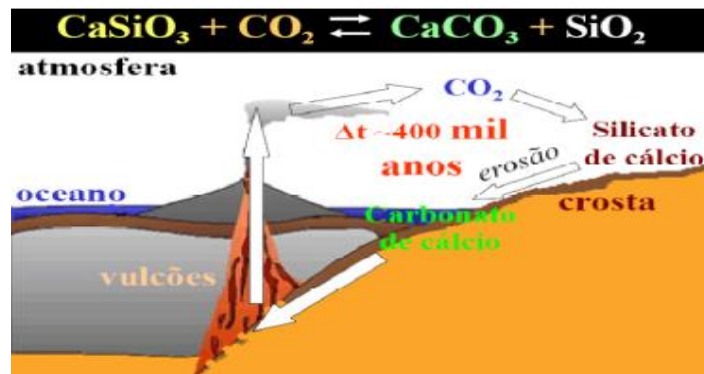


Fonte: Adaptado de Archer e Buffett (2005).

#### **2.1.4 CAPTURA DE CO<sub>2</sub>**

O planeta captura o CO<sub>2</sub> presente na atmosfera da Terra naturalmente por meio de mecanismos como a fotossíntese realizada pelas plantas, processos físico-químicos e biológicos realizados pelos mares e oceanos e ciclo carbonato-silicato (KASTING e CASTLING, (2003); PLASYNSKI, 2013). A quantidade global de carbono armazenado nas plantas por meio da fotossíntese é relativamente pequena em comparação às grandes quantidades de carbono armazenadas no oceano e em reservatórios de combustíveis fósseis. Porém, esse estoque de carbono na vegetação assume importância fundamental devido ao fato de que ele pode aumentar ou diminuir rapidamente, em resposta ao clima ou a intervenções humanas (como incêndios florestais e desmatamento), tendo efeitos importantes e imediatos na concentração de carbono na atmosfera. Os processos físico-químicos realizados pelos mares e oceanos capturam o CO<sub>2</sub> da atmosfera por meio do processo de difusão, o qual depende fundamentalmente da diferença de temperatura entre esses dois reservatórios de carbono. Basicamente, quando a temperatura do oceano é baixa, há captura de CO<sub>2</sub> da atmosfera pelo oceano, e quando a temperatura do oceano é alta, há liberação de CO<sub>2</sub> do oceano para a atmosfera, portanto as maiores taxas de captura de CO<sub>2</sub> se concentram nas regiões temperadas (mares frios) (OLIVEIRA E SAMPAIO, 2009). Já no ciclo carbonato-silicato, o CO<sub>2</sub> atmosférico dissolve-se na água da chuva, produzindo H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Essa solução ácida provoca erosão das rochas silicatadas liberando os íons Ca<sup>2+</sup>, 2HCO<sup>3-</sup> e SiO<sup>2+</sup>, estes podem ser lixiviados para os oceanos, onde organismos marinhos o utilizam para a construção de suas conchas carbonatadas ricas em calcita. Quando estes morrem contribuem para os grandes estoques de carbono dos sedimentos marinhos. O resultado líquido é a remoção do CO<sub>2</sub> atmosférico. O ciclo é completado quando o fundo do mar sofre subdução, os minerais de carbonato recombina-se com minerais de silicato, à temperaturas superiores a 300°C e originam os silicatos de cálcio e gás carbônico, estes retornam à crosta terrestre através dos vulcões que liberam o magma e dióxido de carbono de volta para a atmosfera. A Figura 6, traz a representação do ciclo carbonato-silicato (KASTING E CASTLING (2003)).

Figura 6 - Ciclo simplificado de carbono-silicato



Fonte: Kasting e Catling (2003).

Há algumas décadas verifica-se que a captura de CO<sub>2</sub> realizada naturalmente pelo planeta não é suficiente para equilibrar a quantidade deste em suspensão na atmosfera, o resultado é um crescente aquecimento global e suas consequências desastrosas (SANTOS, 2000).

#### 2.1.5 EFEITO ESTUFA

O efeito estufa é um fenômeno natural que torna possível a vida humana na Terra e mantém o planeta aquecido pois, caso não existisse, a temperatura média seria muito baixa, da ordem de -18°C. A troca de energia entre a superfície e a atmosfera da Terra proporcionam uma temperatura média global, próxima à superfície, de 14°C. No efeito estufa parte da energia solar que chega ao planeta, ao atingir o topo da atmosfera terrestre, é refletida diretamente de volta ao espaço e parte é absorvida pelos oceanos e pela superfície da Terra, promovendo o seu aquecimento. Uma parcela desse calor é irradiada de volta ao espaço, mas é bloqueada pela presença de gases de efeito estufa que, apesar de deixarem passar a energia vinda do Sol (emitida em comprimentos de onda menores), são opacos à radiação terrestre, emitida em maiores comprimentos de onda. Essa diferença nos comprimentos de onda se deve às diferenças nas temperaturas do Sol e da superfície terrestre (MMA, 2020). A Figura 7, demonstra o mecanismo do efeito estufa.

**Figura 7 - O mecanismo do efeito estufa**



Fonte: PUC MINAS, 2011.

Quando existe um balanço entre a energia solar incidente e a energia refletida na forma de calor pela superfície terrestre, o clima se mantém praticamente inalterado. Entretanto, o balanço de energia pode ser alterado de várias formas: (1) pela mudança na quantidade de energia que chega à superfície terrestre; (2) pela mudança na órbita da Terra ou do próprio Sol; (3) pela mudança na quantidade de energia que chega à superfície terrestre e é refletida de volta ao espaço, devido à presença de nuvens ou de partículas na atmosfera (também chamadas de aerossóis, que resultam de queimadas, por exemplo); e, finalmente, (4) à alteração na quantidade de energia de maiores comprimentos de onda refletida de volta ao espaço, devido a mudanças na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera (VASCONCELLOS, 2012).

Atualmente verifica-se uma baixa na radiação solar, o que significaria um resfriamento do planeta a longo prazo, porém está acontecendo exatamente o contrário, pois a temperatura média da Terra só aumenta com o passar dos anos e este aumento é atribuído à exponencial concentração de gases causadores do efeito na atmosfera. Segundo IPCC (2013) até 2100 a concentração de CO<sub>2</sub> poderá alcançar valores que variam de 535 a 985 ppm, e a temperatura da Terra poderá aumentar de 1,5°C - melhor dos cenários e 5,8°C - no pior.

Tal fato, tornou-se uma preocupante realidade, e introduz, pela primeira vez na história da Terra, o conceito de mudanças climáticas antropogênicas, que correspondem às alterações do clima no planeta resultantes das atividades humanas.

Os principais gases antropogênicos causadores do efeito estufa são: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), clorofluorcarbonos (CFCs) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Dentre eles, o CO<sub>2</sub> presente na atmosfera corresponde a dois terços dos gases de efeito estufa (SANTOS, 2000).

## **2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS ANTROPOGÊNICAS**

Ao longo da evolução da Terra, em todas as escalas de tempo, o clima sofreu mudanças. Porém, os cientistas têm observado que anteriormente estas eram resultantes de fenômenos naturais e atualmente são decorrentes das atividades humanas. De fato, o equilíbrio do planeta Terra encontra-se em risco, pois as ações antropogênicas nas últimas décadas passaram a ameaçá-lo de forma importante. A principal evidência dessa mudança atual do clima é o aquecimento global (OLIVEIRA E SAMPAIO, 2009; MMA, 2020).

### **2.2.1 AQUECIMENTO GLOBAL**

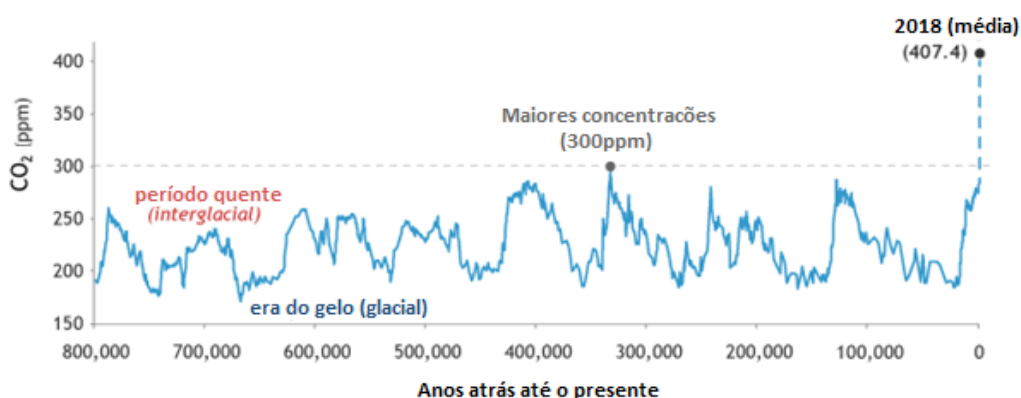
Aquecimento global é um fenômeno climático de larga extensão, pois trata-se do aumento da temperatura média superficial global. De fato, trata-se de um efeito estufa maximizado pela ação humana, por isso sua ocorrência é determinada por um conjunto de fatores internos e/ou externos como a atividade solar, composição físico-química atmosférica, tectonismo, vulcanismo; além, claro, das emissões desenfreadas de gases de efeito estufa, os quais são originados de uma série de atividades humanas, como na indústria, pelos processos de produção de cimento, alumínio, ferro e aço; transporte, devido a queima de combustíveis fósseis, como petróleo e gás natural; nas florestas, pelo desmatamento e degradação de florestas; na agricultura, por meio da preparação da terra para plantio e aplicação de fertilizantes; na pecuária, por meio do tratamento de dejetos animais e pela fermentação entérica do gado (SILVA E PAULA, 2009; BOTKIN e KELLER, 2016; MMA, 2020).

Os principais gases de efeito estufa antrópicos e com maior impacto climático são o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) (COPERNICUS (2019)). Esses e outros gases atuam obstruindo a dissipação do calor terrestre para o espaço.

Aumentos naturais nas concentrações de dióxido de carbono aqueceram periodicamente a temperatura da Terra durante os ciclos da era glacial nos últimos milhões de anos ou mais. Os episódios quentes (interglaciais) começaram com um pequeno aumento da luz solar devido a uma pequena oscilação no eixo de rotação da Terra ou no caminho de sua órbita ao redor do Sol. Com base em bolhas de ar presas em núcleos de gelo com uma

milha de espessura (e outras evidências paleoclimáticas), sabemos que durante os ciclos da era glacial dos últimos milhões de anos, o dióxido de carbono nunca excedeu 300 ppm. Antes do início da Revolução Industrial, em meados da década de 1700, a quantidade média global de dióxido de carbono era de cerca de 280 ppm. Em 1958, o observatório Vulcânico Mauna Loa, verificou que o dióxido de carbono atmosférico global já era de 315 ppm. Em 9 de maio de 2013, o dióxido de carbono médio diário ultrapassou 400 ppm pela primeira vez e em 2018 foi verificado 407,4 ppm. (LUTHI et al., 2008; LINDSEY, 2020). A Figura 8, demonstra a concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico global atual (2018) e durante os períodos glaciais e interglaciais, considerando um período de 800.000 anos atrás.

**Figura 8 - Concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico global nos períodos glaciais e interglaciais, considerando um período de 800.000 anos até o ano de 2018**

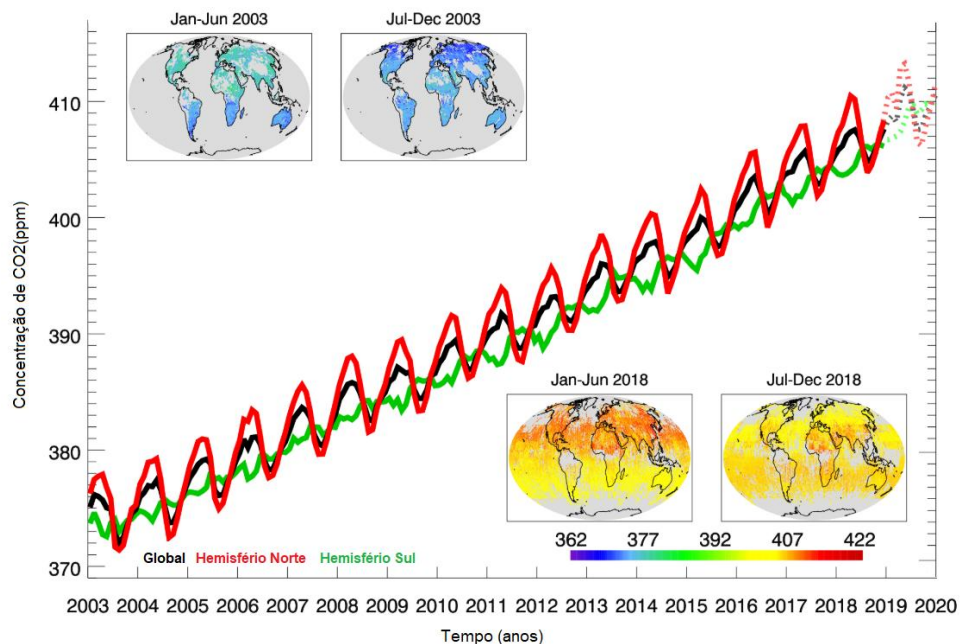


Fonte: Disponível em:<<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>>. Acesso em 12/05/2020.

Se a demanda global por energia continuar crescendo e for atendida principalmente com combustíveis fósseis, o dióxido de carbono atmosférico deverá alcançar valores de 540 a 970 ppm, isto é, 90 a 250% acima do nível de 1750 (NASA, 2018). Segundo Copernicus (2019) a concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> está aumentando a uma taxa média de aproximadamente 0,6%/ano. Embora as concentrações de CO<sub>2</sub> variem no espaço e no tempo, elas estão aumentando em todas as áreas do globo. Os níveis flutuam a cada ano, principalmente devido à captação e liberação sazonal regular pela vegetação, através da fotossíntese, respiração e decomposição da matéria orgânica. As flutuações são maiores no Hemisfério Norte, onde está localizada a maior parte da vegetação terrestre do planeta. O maior valor de concentração de CO<sub>2</sub> registrado até o final de 2019 foi no mês de maio no Hemisfério Norte, em aproximadamente 413 ppm. O aumento em todo o ano de 2019 foi de

2,7 ± 0,8 ppm. Isso foi maior que o crescimento em 2018, que foi de 2,1 ± 0,5 ppm, mas menor que o aumento de 2,9 ± 0,3 ppm em 2015. Em 2015, houve um forte evento El Niño que resultou em uma maior taxa de crescimento de CO<sub>2</sub> atmosférico devido a uma absorção mais fraca do que o normal pela vegetação terrestre; também houve grandes emissões de CO<sub>2</sub> de incêndios florestais, por exemplo, na Indonésia. A Figura 9, demonstra a Concentração Anual de CO<sub>2</sub> verificada por satélites no hemisfério Norte, hemisfério Sul e Global.

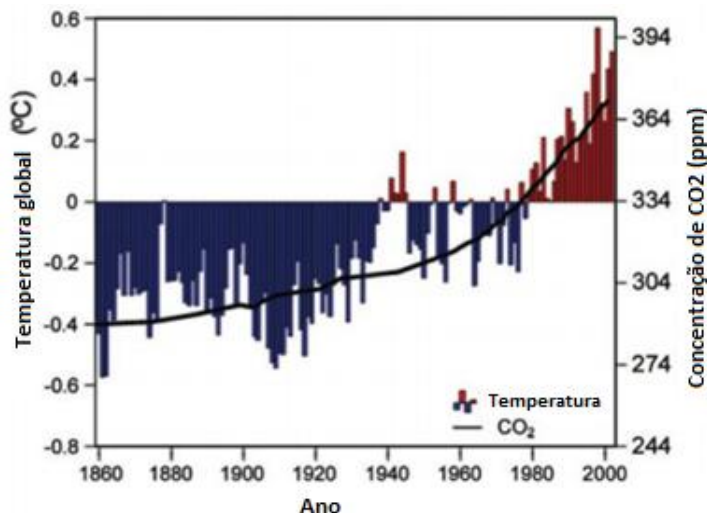
**Figura 9 - Concentração Anual de CO<sub>2</sub> verificada por satélites no hemisfério Norte, hemisfério Sul e Global**



*Fonte: Adaptado de Serviço de Mudança Climática Copernicus (C3S) / Serviço de Monitoramento de Atmosfera Copernicus (CAMS) / ECMWF / Universidade de Bremen. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/ESOTC/2019/greenhouse-gas-concentrations>. Acesso em: 20/07/2020.*

Através da Figura 10 é possível perceber a relação entre o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> e o aumento da temperatura global (BOTKIN e KELLER, 2003).

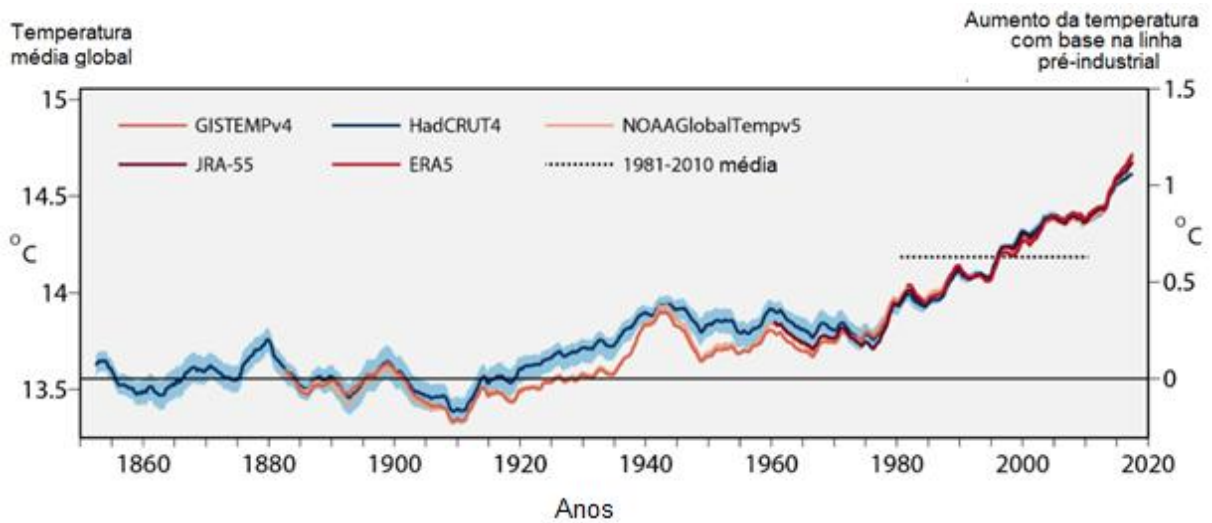
**Figura 10 - Relação entre a temperatura global média anual (barras) e a concentração de dióxido de carbono em ppm (linha contínua)**



Fonte: Adaptado de BOTKIN e KELLER, 2003.

O aumento da temperatura vem ocorrendo desde meados do século XIX (pré-industrial) e deverá continuar enquanto as emissões de CO<sub>2</sub> permanecerem elevadas. A Figura 11, demonstra a temperatura média global em períodos de 5 anos a uma altura de dois metros da superfície (eixo esquerdo), bem como o aumento de temperatura estimado desde a era pré-industrial, representada em 0°C (eixo direito) de acordo com diferentes conjuntos de dados: ERA5 (Copernicus Climate Change Service (C3S) ) (ECMWF); GISTEMP (NASA); HadCRUT4 (Met Office Hadley Center), NOAA GlobalTemp (NOAA) e JRA-55 (JMA). Segundo Copernicus (2019), é possível considerar que desde meados da década de 1970 houve uma taxa de aquecimento global de 0,1°C a cada cinco a seis anos. Porém esta não pode ser considerada constante, pois, por exemplo, a média do período de 2003 a 2012 mostra que quase não houve mudança de temperatura e logo depois nos anos de 2015-2019, verificou-se um acentuado aumento, um pouco acima de 1,1°C, o qual foi atribuído ao calor excepcional desse período que compreende os cinco anos mais quentes já registrados.

**Figura 11 - Temperatura média global durante períodos de 5 anos a uma altura de dois metros (eixo esquerdo) e aumento de temperatura estimado desde a era pré-industrial (eixo direito)**

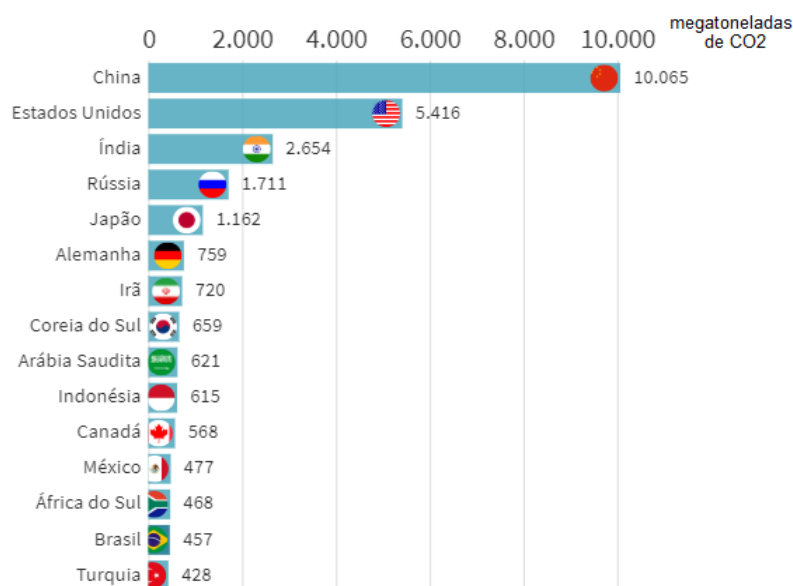


Fonte: Adaptado de Copernicus Climate Change Service (C3S) / ECMWF. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/ESOTC/2019/surface-temperature>. Acesso em: 20/07/2020.

O Acordo de Paris estipula que os países, a cada cinco anos, deverão avaliar seus avanços quanto à redução das emissões de gases de efeito estufa. O principal objetivo é reduzir o aumento da temperatura média global próximo à superfície, mantendo-a bem abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais e prosseguir os esforços para limitar o aumento a 1,5°C.

A Figura 12 demonstra o ranking dos países que mais emitiram CO<sub>2</sub> no período de 1998 a 2018. Atualmente a China ocupa o primeiro lugar, sendo o país que mais emite dióxido de carbono do mundo, e isto se deve principalmente à queima de combustíveis fósseis, como o carvão. Durante a Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas que ocorreu em Copenhague no ano de 2009, o governo chinês prometeu que, até 2020, reduziria suas emissões em até 45%, porém os dados coletados pelo Global Carbon Project demonstraram que o país está distante de alcançar a meta. Os Estados Unidos, segundo lugar no ranking, apesar de terem fechado um número recorde de usinas de carvão em 2018, também não conseguiram reduzir suas emissões de CO<sub>2</sub> e em novembro de 2019, anunciaram sua saída do Acordo de Paris. O Brasil encontra-se em 14º lugar e prometeu reduzir as emissões entre 36,1% e 38,9% até 2020, meta transformada na Lei N° 12.187 de 29 de dezembro de 2009, que provavelmente também não será alcançada (EDGAR, 2018).

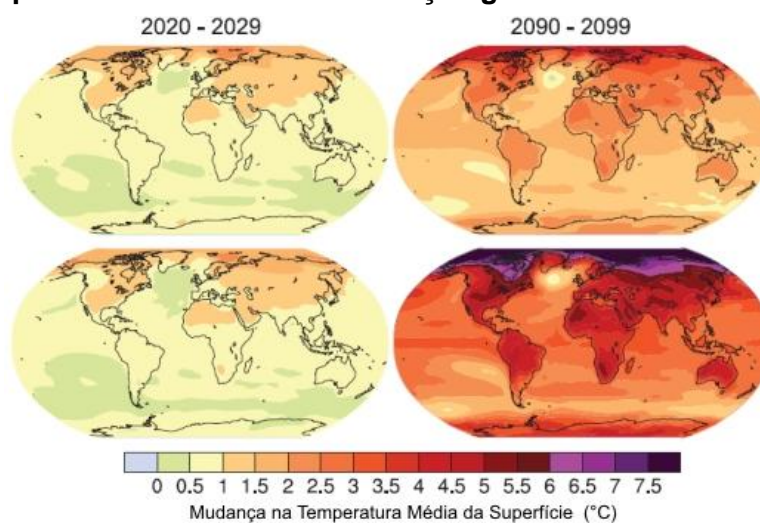
**Figura 12 - Países que mais emitiram dióxido de carbono entre 1998 e 2018**



Fonte: EDGAR (2018).

Se as tendências de crescimento das emissões se mantiverem, os modelos climáticos apontam o provável aquecimento de até 8°C em algumas regiões do globo até o final do século XXI, conforme se pode verificar na Figura 13. Conclui-se que, mesmo no cenário de baixas emissões de GEE, as projeções do IPCC (2007) indicam aumento da temperatura, sobretudo no Hemisfério Norte, mesmo no período entre 2020 e 2029.

**Figura 13 - Projeções de mudança de temperatura para os períodos de 2020-2029 e de 2090-2099, nos cenários de baixas (figuras superiores) e de altas (figuras inferiores) emissões, a partir dos modelos de circulação geral da atmosfera e dos oceanos**



Fonte: IPCC (2007).

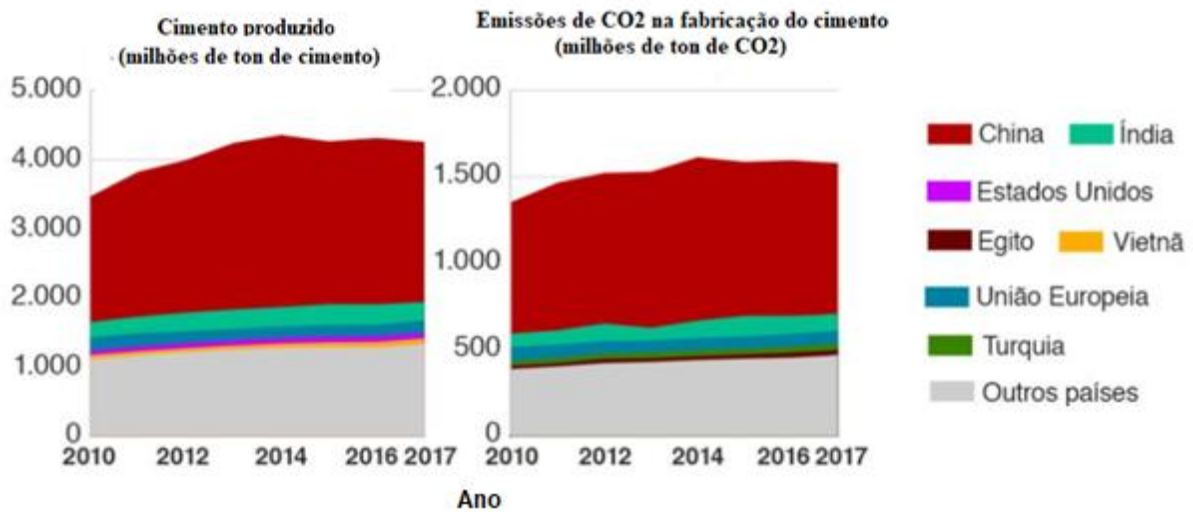
Contudo, urgentemente os países precisam implementar medidas para reduzir as emissões de GEE e também capturá-los da atmosfera; uma vez que o aquecimento global já traz consequências desastrosas ao planeta Terra e à humanidade, dentre elas destacam-se: derretimento de geleiras (como as da Groenlândia, segunda maior fonte de água doce do planeta, que estão derretendo cerca de 1,8 mm por ano), elevação do nível dos mares e sua acidificação, desaparecimento de ilhas (como o arquipélago da Indonésia, que poderá perder até 2 mil de suas 17,5 mil 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).

### **2.2.1.1 O aquecimento global e a indústria do cimento**

O cimento Portland tradicional é constituído basicamente de clínquer e gipsita. O clínquer, por sua vez, é constituído basicamente por argila e calcário calcinados em elevadas temperaturas. Para se produzir 1.000 kg de clínquer gera-se de 825 a 1150 kg de CO<sub>2</sub>, 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).

As emissões globais de CO<sub>2</sub> devido a indústria cimenteira observadas equivalem a 5% a 8% das emissões mundiais de CO<sub>2</sub> (WBCSD, 2010). No Brasil, a indústria de cimento foi responsável por 29,7% das emissões de CO<sub>2</sub> de processos industriais em 2012 (BRASIL, 2014). A Figura 14, traz um gráfico relacionando a produção de cimento com a sua respectiva emissão de CO<sub>2</sub> no mundo, nos anos de 2010 a 2017. Neste é possível verificar com apreensão a supremacia da China em relação as demais nações quando o assunto é produção de cimento e emissão de CO<sub>2</sub>. Sabe-se que a China sozinha utilizou mais cimento entre 2011 e 2013 do que os Estados Unidos durante todo o Século XX.

**Figura 14 - Produção de cimento e respectiva emissão de CO<sub>2</sub>, no período de 2010 a 2017.**



Fonte: Adaptado de Netherlands Environmental Assessment Agency – PBL (2019).  
Acesso: <https://www.pbl.nl/en/trends-in-global-co2-emissions> (17/06/2020).

É indiscutível que o cimento, com sua forte presença ao redor do mundo, atua moldando construções e levando progresso às comunidades; no entanto, este apresenta um efeito colateral muito preocupante sobre o clima, uma vez que seu processo de confecção se trata de uma grandiosa fonte de geração de dióxido de carbono, principal gás causador do aquecimento global (RODGERS, 2018). Estima-se que de 2006 a 2050, a fabricação do referido produto tenha aumentos da ordem de 0,8 a 1,2% ao ano, podendo chegar entre 3700 a 4400 megatoneladas até 2050 (BID, 2018). Para tanto, tecnologias no setor de cimento, tem sido propostas e implementadas, visando reduzir as emissões associadas à produção do cimento Portland, em contraponto à perspectiva de aumento do consumo de cimento no planeta.

Em contrapartida, algumas pesquisas atuais na área têm verificado que estruturas construídas em concreto tem a capacidade de absorver o CO<sub>2</sub> da atmosfera ao longo de sua vida útil e até após a sua demolição, por conta da reação de carbonatação. Jacobsen e Jahren (2002) verificaram que 16% do CO<sub>2</sub> emitido na produção do cimento é capturado pelo concreto no decorrer de sua vida útil. Pade e Guimarães (2007), verificaram que durante a sua vida útil o concreto poderá absorver até 24% do CO<sub>2</sub> emitido na produção do cimento, porém para uma perspectiva de 100 anos, considerando a demolição da estrutura, este poderá absorver

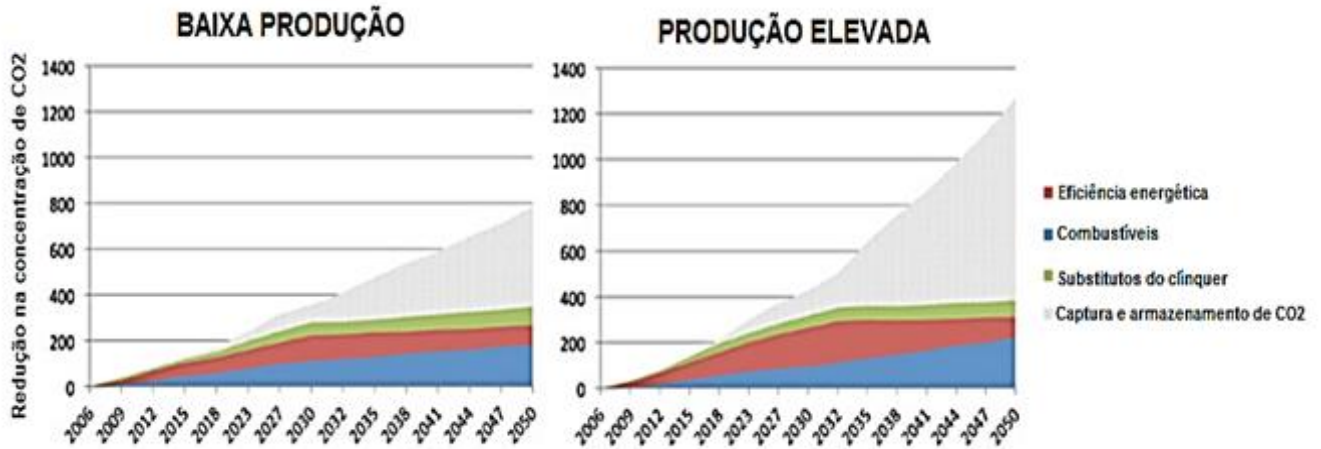
até 57%. Possan et al (2012), realizaram estudos na barragem de Itaipu e constataram que o concreto existente na parte central da barragem capturou 8.517 toneladas de CO<sub>2</sub> desde a construção (1975 a 1982) até o ano de 2012. O cerne da questão deve-se ao fato de que a carbonatação do concreto aumenta sua dureza superficial, sendo considerada positiva ao concreto e ao meio ambiente devido à captura de CO<sub>2</sub>, porém esta pode ser prejudicial à estrutura de concreto armado, uma vez que dependendo das condições de umidade do ambiente, esta reação promove a corrosão das armaduras, acarretando a longo prazo no aparecimento de manchas, fissuras, destacamento do concreto de cobertura 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).

Portanto, conclui-se que para construções executadas apenas em concreto a carbonatação é extremamente benéfica; contudo, quando se trata de estruturas em concreto armado, um maior cuidado deve ser tomado quanto a ocorrência da carbonatação, principalmente quando a edificação estiver localizada em ambientes considerados agressivos, pois a referida reação pode ser prejudicial à estrutura.

### **2.3 REDUÇÃO E REMOÇÃO DAS EMISSÕES NA INDÚSTRIA DO CIMENTO**

O relatório emitido pela Eco-Efficient Cements (2016) espera que através da utilização de estratégias adequadas, tais como eficiência energética dos fornos, combustíveis alternativos, substituição do clínquer e captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>, as emissões globais de CO<sub>2</sub> devido a indústria cimenteira sejam reduzidas e cheguem a 1,55 bilhão de toneladas em 2050. A Figura 15 demonstra a redução das emissões de CO<sub>2</sub> por meio do emprego das tecnologias citadas.

**Figura 15 - Contribuição para redução das emissões de CO<sub>2</sub> a partir de 2006 advindas da indústria do cimento de acordo com diferentes estratégias**



Fonte: Adaptado de Eco-Efficient Cements (2016).

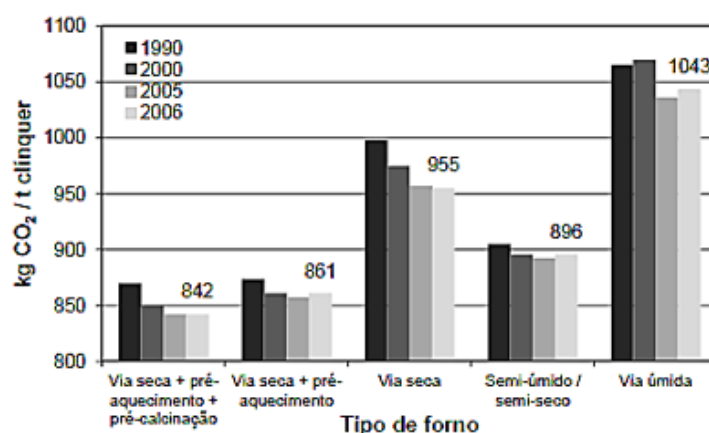
- **Eficiência energética dos fornos**

Os principais esforços para aumentar a eficiência energética dos fornos produtores de clínquer começaram após a crise energética dos anos 1970. Um forno a seco de última geração com pré-calcinador consome cerca de 50% menos energia do que um forno longo úmido tipicamente usado naquela época (SZABÓ, 2003).

Atualmente as tecnologias mais avançadas em termos de otimização energética dos fornos permitem a utilização mínima de 3GJ de energia por tonelada de clínquer (GARTNER, 2004). Esta condição é operada em fornos por via seca, com adoção de pré-calcinadores e, contudo, menores perdas de calor; e existem em algumas plantas mundiais – caso de algumas japonesas e brasileiras (GARTNER, 2004). A média mundial de eficiência energética dos fornos é de 4,4 GJ/ton de clínquer e a meta é que até 2050 todas as cimenteiras tenham praticado o esforço de modernizar suas plantas e fornos chegando aos 3GJ/ton de clínquer. Nessa situação será possível reduzir de 11% a 15% as emissões totais relacionadas ao combustível empregado no forno de clínquer (MÜLLER e HARNISCH, 2008).

A Figura 16 apresenta as emissões mundiais de CO<sub>2</sub>/ton clínquer, separadas por tipo de forno de cimento e por ano. Através da referida figura é possível observar que os fornos por via seca emitem menos CO<sub>2</sub> do que os fornos por via úmida, sendo o forno “via seca + pré-aquecimento + pré-calcinação” o que apresenta menor emissão de CO<sub>2</sub> durante a fabricação do clínquer. Segundo a WBCSD/GNR (2011) em 2011, 68% das fábricas de cimento haviam migrado para os sistemas de fornos mais eficientes do ponto de vista da redução da emissão de CO<sub>2</sub>.

**Figura 16 - Médias das emissões de CO<sub>2</sub>/ ton clínquer por tipo de forno e por ano**



Fonte: WBCSD/CSI, (2009).

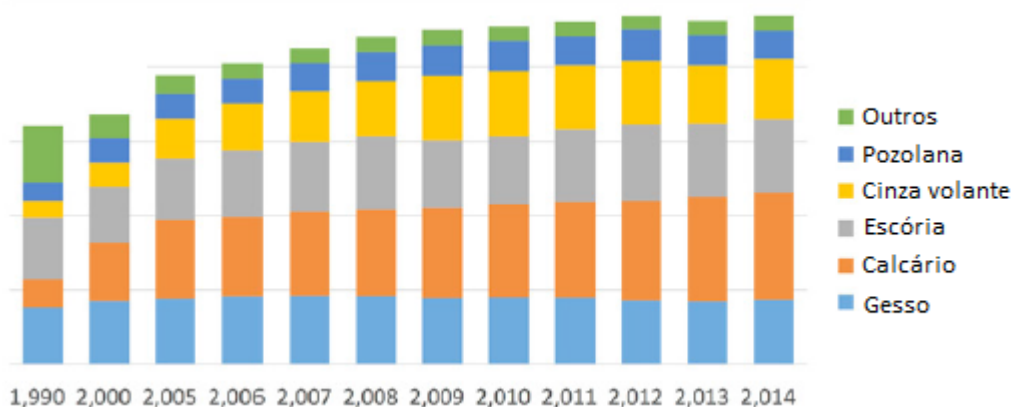
- **Utilização de combustíveis alternativos**

A substituição dos combustíveis tradicionais por alternativos já é uma prática comum nas cimenteiras, que utilizam combustíveis renováveis de biomassa ou até mesmo resíduos de outras indústrias (WBCSD/CSI, 2005). Segundo Müller e Harnisch (2008) até 2050 a utilização de combustíveis alternativos deve crescer 45%, o que promove uma redução de 6% a 16% das emissões totais de CO<sub>2</sub> advindas da indústria de cimento. Já o *Roadmap Eco-Efficient Cements* (2016) espera que o uso mundial de "combustíveis alternativos" cresça de 3% em 2006 para cerca de 37% em 2050, o que acarretará uma redução de aproximadamente 15% nas emissões totais de CO<sub>2</sub> advindas da indústria de cimento.

- **Substituição de clínquer por adições minerais**

Outra estratégia importante e bem estabelecida é a substituição do clínquer por adições minerais, especialmente resíduos reativos de outras indústrias, como as cinzas volantes, geradas a partir da queima do carvão para produzir eletricidade, e escórias de alto forno, um subproduto da produção de ferro-gusa. Essa estratégia tem como vantagens a redução do consumo de energia bem como aumentar a produção sem a necessidade de novos fornos. Entre 2009 e 2011, a média mundial de substituição de clínquer subiu de 16% para 22,9%, sendo os principais substituintes no ano 2011, gipsita (4,4%), calcário (6,42%), escória de alto forno (4,94%) e cinzas volantes (4,34%) (WBCSD/GNR, 2011). Porém, a partir do ano de 2011, é possível verificar uma estabilização no nível de substituição do clínquer. Tal comportamento se deve ao fato de que o fornecimento dos substitutos mais desejáveis do clínquer, devido a redução da emissão de CO<sub>2</sub>, que são escórias de alto-forno e cinzas volantes de qualidade adequada, encontra-se bastante modesto em comparação com a produção total de cimento. A Figura 17 demonstra a evolução dos substitutos do clínquer no período de 1990 a 2014.

**Figura 17 - Evolução dos substitutos do clínquer no período de 1990 a 2014**



Fonte: Adaptado de Scrivener et al (2016).

Caso novas fontes geradoras, de boa qualidade, dos referidos resíduos se tornassem disponíveis a imagem da figura 2.16 acima, mudaria totalmente.

No Brasil, os teores de clínquer permitidos e suas substituições estão normalizados de acordo com a Tabela 1.

**Tabela 1 - Composição do cimento de acordo com a norma brasileira (% em massa)**

IDENTIFICAÇÃO			COMPOSIÇÃO			
Tipo	Sigla	Classe	Clínquer + sulfato de cálcio (%)	Escória de alto forno	Pozolana	Fíler
COMPOSTO	CP II - E	25	51 a 94	6 a 34	0	0 a 15
		32				
		40				
	CP II - F	25	75 a 89	0	0	11 a 25
		32				
		40				
	CP II - Z	25	71 a 94	0	6 a 14	0 a 15
		32				
		40				
ALTO FORNO	CP III	25	25 a 65	35 a 75	0	0 a 10
		32				
		40				
POZOLÂNICO	CP IV	25	45 a 85	0	15 a 50	0 a 10
		32				
ARI	CP V	-----	90 a 100	0	0	0 a 10

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16697:2018.

Os cimentos CP III e o CP IV, são os que admitem maior teor de substituição. Por meio da Tabela 1 é possível verificar que as faixas de variação do percentual de adições são bastante extensas, e isso se deve a uma necessidade prática da indústria, uma vez que em momentos em que o mercado está aquecido e as vendas de cimento aumentam, os teores de substituição tendem a ser reduzidos, pois a produção do aço e da energia por queima de carvão mineral tendem a não acompanhar a do cimento (OLIVEIRA et al, 2014). Em 2012, a produção de cimento foi de mais de  $68 \times 10^6$  ton (SNIC, 2012), e a disponibilidade de escória de alto-forno para a produção brasileira de cimento foi de aproximadamente  $7,55 \times 10^6$  ton (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013). Verifica-se que a escória disponível para substituição de clínquer foi de um pouco mais de 10% do consumo anual de cimento brasileiro, ou próximo de 22% para a região Sudeste, sendo insuficiente. Também se estima que a oferta de cinza volante não é capaz de suprir toda a demanda da indústria cimenteira (HUMPHREYS; MAHASANAN, 2002)

- **Captura e armazenamento (estocagem) de CO<sub>2</sub>**

A captura de CO<sub>2</sub> pode ocorrer de duas maneiras: direta ou indireta. No sequestro direto, o CO<sub>2</sub> é capturado dos processos industriais e de processos ligados ao consumo e/ou geração de energia antes mesmo de atingir a atmosfera. Neste tipo, o CO<sub>2</sub> capturado das indústrias, refinarias, entre outros, é armazenado de forma segura, sendo empregado em processos da indústria ou injetado em formações geológicas. Já no sequestro indireto, o CO<sub>2</sub> é removido da atmosfera após a sua emissão, e ocorre naturalmente, através da fotossíntese e da carbonatação natural de materiais fabricados com cimento e cal, durante a vida útil das construções e também após a sua demolição (POSSAN, 2019).

As mudanças climáticas podem ser reduzidas com a utilização de tecnologias de captura (YAN (2019); ZHANG et al (2020)). Segundo o IPCC (2005), a captura e armazenamento de carbono (CCS – do inglês “*Carbon Capture and Storage*”), trata-se de um procedimento de captura de CO<sub>2</sub> das indústrias e fontes relacionadas à energia e transporte para um local de armazenamento e isolamento. Já na captura, utilização e estocagem de carbono (CCUS – do inglês *Carbon Capture, Utilization and Storage*), o CO<sub>2</sub> é capturado dos gases liberados na combustão de combustíveis fósseis, purificado até apresentar um fluxo de elevada pureza, na sequência pode ser armazenado ou convertido em produtos de alto valor com benefícios econômicos, ambientais e sociais. Na estrutura do CCUS, o CO<sub>2</sub> pode ser utilizado de várias maneiras, principalmente carbonatação mineral e métodos físicos e químicos (ZHANG et al., 2020).

Ambas as tecnologias de captura são consideradas pela Agência Internacional de Energia (IEA) (2009a) como essenciais para a redução em até 56% das emissões de CO<sub>2</sub> no setor de cimento até o ano de 2050. O relatório estimou ainda que será necessário o investimento de US \$ 321 a 592 bilhões para capturar o CO<sub>2</sub> advindo da indústria de cimento (IEA, 2009), o que significaria um elevado investimento. A tecnologia CCUS já é realidade em países desenvolvidos como Estados Unidos e Canadá que comercializam concretos que capturam CO<sub>2</sub> de forma acessível para muitos investidores que acreditam na importância da mitigação do gás carbônico da atmosfera. As empresas Carbonbuilt, Carboclave, Carbicrete, CarbonCure, Carbonclave, Solidia Technologies, são alguns exemplos de indústrias que implementaram a tecnologia de captura, utilização e armazenamento de CO<sub>2</sub> em seus concretos. O CO<sub>2</sub> utilizado na cura dos concretos é adquirido de fornecedores como a Airliquide, estes por sua vez, são responsáveis por coletar, purificar e distribuir o CO<sub>2</sub> proveniente de fontes emissoras industriais, como cimenteiras e usinas de carvão. Ao chegar nas empresas produtoras do

“concreto verde” o CO<sub>2</sub> é armazenado em tanques pressurizados, os quais são reabastecidos regularmente pelo fornecedor de CO<sub>2</sub>. A Figura 18, demonstra o transporte do CO<sub>2</sub> fornecido pela Airliquide, o qual foi capturado das chaminés das indústrias e o CO<sub>2</sub> armazenado em tanques pressurizados na empresa CarbonCure (MONKMAN e MACDONALD, 2016).

**Figura 18 - Armazenamento do CO<sub>2</sub>: a) no transporte, após coleta das chaminés das indústrias e posterior purificação; b) nos tanques da empresa que utiliza a tecnologia da captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> em seus concretos**



Fonte: Disponível em:< <https://www.carboncure.com/technology/>>. Acesso em 13/08/2020.

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), Fortunato et al (2018) verificaram a captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> através da cura carbônica em pré-fabricados cimentícios não armados e constataram que a carbonatação ao incorporar gás carbônico na matriz cimentícia sob a forma estável de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), promove não apenas ganhos ambientais relacionados à captura permanente de CO<sub>2</sub>, mas também ganho de resistência mecânica ao concreto logo nas primeiras idades.

Portanto, não resta dúvidas, que a tecnologia de CCUS através da cura carbônica em concretos demonstra-se válida em termos econômicos, pois sua implementação nas indústrias já é uma realidade, e em termos ambientais, uma vez que promove o sequestro do CO<sub>2</sub> da atmosfera.

### **2.3.1 REDUÇÃO DAS EMISSÕES E A INDÚSTRIA DO CIMENTO - BRASIL**

O Brasil é referência mundial na produção de cimento com baixa emissão de CO<sub>2</sub>, enquanto a média de emissão global de CO<sub>2</sub> é de 8%, em nosso país é em torno de 5%. Segundo o Inventário Nacional dos Gases do Efeito Estufa do Ministério da Ciência e Tecnologia (BRASIL, 2010), em 2010, enquanto a emissão média mundial de CO<sub>2</sub> por tonelada de clínquer variava em torno de 900 kg CO<sub>2</sub>/ton clínquer. No Brasil a emissão é abaixo de 600 kg de CO<sub>2</sub>/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. De acordo com 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 fíler, as quais são responsáveis por reduzir a quantidade de clínquer necessário para a produção de uma tonelada de cimento. A Figura 19 retrata um moderno forno para produção à seco do clínquer, instalado em 2015, no município de Quixeré-CE, o qual possui capacidade de produzir 1500 kt/ano de cimento.

**Figura 19 - Forno para produção à seco do clínquer**



Fonte: Autor (2019).

A Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (2012), acredita que apesar do bom desempenho da indústria do cimento no Brasil no que diz respeito à quantidade de carbono emitido, ainda há algum espaço para redução adicional. A Figura 20, sumariza essas ações, barreiras encontradas para sua implementação e investimentos necessários.

**Figura 20 - Medidas para redução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil**

AÇÃO DE REDUÇÃO	POTENCIAL DE REDUÇÃO	BARREIRAS	P&D	INVESTIMENTO NECESSÁRIO
Eficiência de fornos	Alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Troca do tipo de forno é viável somente para novas plantas</li> </ul>	Nulo	Muito alto
Reaproveitamento de calor dos fornos (na etapa de preaquecimento e para a cogeração de energia)	Baixo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reaproveitamento do calor em outras etapas depende do equipamento existente;</li> <li>Cogeração de energia é utilizada apenas no Japão, devido aos elevados custos de energia</li> </ul>	Nulo	Alto/muito alto
Combustíveis alternativos (coprocessamento de resíduos, biomassa e gás natural)	Alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Morosidade no processo de licenciamento pelos órgãos ambientais para coprocessamento;</li> <li>Oferta de combustíveis alternativos pode ser escassa ou de difícil acesso;</li> <li>Poder calorífico do combustível pode não ser alto o suficiente se comparado ao seu custo</li> </ul>	Baixo (depende do combustível)	Baixo/médio (depende da disponibilidade do combustível)
Cimento com adições	Alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Oferta de materiais adicionáveis pode ser restrita</li> </ul>	Baixo	Baixo/médio (depende da disponibilidade de materiais)
Novos tipos de cimento (Novacem, Calera, Calix e Geopolímeros)	Alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Produzidos em pequena escala;</li> <li>Não há comprovação de que são viáveis economicamente;</li> <li>Utilização não foi testada no longo prazo;</li> <li>Necessidade de requalificar os usuários de cimento;</li> <li>Geopolímeros possuem limitações de desempenho e apresentam custo mais elevado</li> </ul>	Muito alto	Muito alto
Captura e armazenamento de carbono (CCS)	Alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nova tecnologia de baixa maturidade, alto risco de investimento, escala produtiva baixa ou inexistente</li> </ul>	Muito alto	Muito alto

Fonte: ABDI (2012) e WBCSD (2010).

## 2.4 BLOCOS DE CONCRETO

### 2.4.1 BREVE HISTÓRICO

O bloco de concreto para alvenaria foi inventado pelos ingleses em 1832, ainda no formato maciço. O elemento vazado, como é concebido atualmente, com furos para diminuir o peso próprio, foi patenteado pelos ingleses em 1850. Estados Unidos, Alemanha, Itália e Japão são os países que mais se destacaram no emprego desta tecnologia (FERNANDES, 2015).

No Brasil, os blocos de concreto para vedação começaram a ser utilizados a partir de 1940, na construção de residências no conjunto habitacional do Realengo, no Rio de Janeiro; e em núcleos habitacionais próximos às hidrelétricas, uma vez que os resíduos de materiais cimentícios utilizados nas construções das barragens eram manufaturados como matéria

prima para fabricação dos blocos (NEVES et al, 2008). Já os blocos de concreto com função estrutural só passaram a ser utilizados no final da década de 60, após o surgimento de regulamentos específicos que normalizaram a dimensão e segurança dos elementos estruturais, relacionando tensões e resistência dos mesmos. Na época, o padrão das edificações consistia em edifícios de no máximo quatro pavimentos e a técnica construtiva era baseada na experiência dos construtores, onde nos primeiros três andares utilizavam-se tijolos maciços e no último utilizavam-se blocos vazados. Construído em 1966, o conjunto habitacional Central Park Lapa localizado em São Paulo, foi o primeiro a utilizar blocos de concreto estrutural. Inicialmente foi construído o primeiro prédio com quatro pavimentos, e posteriormente, em 1972, mais quatro prédios com doze pavimentos cada foram executados utilizando-se o mesmo sistema construtivo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA – ABCI (1990)).

Nos dias atuais a utilização de blocos de concreto vem crescendo no Brasil, sendo estes utilizados em diversos tipos de construções. As construtoras estão cada vez mais optando pelo sistema construtivo com blocos de concreto estruturais visando a economia e a redução na geração de resíduos na obra, tendo esta tecnologia se tornado bastante vantajosa e com ótimo desempenho (SILVESTRE, 2013). Este aumento quanto a utilização também tem sido verificado para os blocos de concreto sem função estrutural, exclusivos para vedação, especialmente nas grandes construções, uma vez que a utilização deste gera economia quando se trata do seu revestimento, porém seu consumo ainda não ultrapassa o dos blocos cerâmicos, nas construções mais tradicionais. Estes, se comparados com aqueles, são encontrados com mais facilidade nos pontos de venda, tornando-se ainda a primeira opção para pequenas construções (SANTOS, 2011). As regiões Norte e Nordeste do país ainda são as que apresentam menor consumo de blocos de concreto sem função estrutural, apenas 10%, enquanto que, por exemplo, na Grande São Paulo, este consumo chega a 50%, e no Sul a 40% (SANTOS, 2011). É fato que estes percentuais tendem a aumentar, por isso os fabricantes tem investido cada vez mais na produção de blocos de concreto com maior qualidade e melhor acabamento, existindo atualmente no mercado blocos com superfícies totalmente lisas ou com relevos decorativos, além de diferentes famílias e elementos complementares como meio bloco, canaleta, entre outros (FERNANDES, 2015).

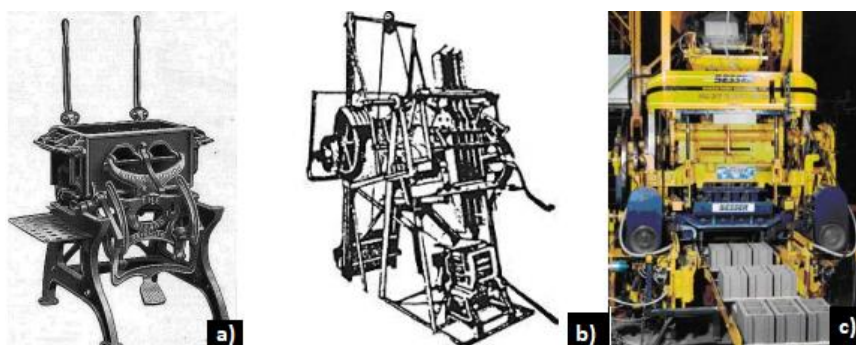
- **FABRICAÇÃO DOS BLOCOS**

Os primeiros blocos vazados de concreto surgiram nos Estados Unidos e na Inglaterra a partir de 1850, e eram fabricados manualmente em fôrmas de madeira. Por volta de 1866,

começaram os primeiros esforços para o desenvolvimento de métodos industriais para fabricar blocos vazados (BESSER, 2004). A primeira máquina para produção de blocos em escala foi patenteada pelos ingleses em 1904 (FERNANDES, 2015). A partir de 1910, o adensamento manual foi substituído por processos mecânicos, melhorando a densidade, resistência e uniformidade dos blocos. Talvez o maior avanço no maquinário para fabricação de blocos tenha sido nesta época, com a introdução da primeira máquina *strip-teaser*, que permite a utilização de paletes que não precisam ser perfilados com as paredes dos moldes. Nesse maquinário, automaticamente, o bloco é retirado por baixo do molde, como acontece nas máquinas modernas (AMÉRICO, 2007).

Nesta época foram desenvolvidas as máquinas semiautomáticas com capacidade de produção de até 2000 blocos/dia, utilizando-se a mesma quantidade de funcionários necessários para fabricar cerca de 200 blocos com as antigas máquinas. Concomitantemente a isto, as dimensões dos componentes foram sendo unificadas gradualmente, levando à completa coordenação dos dias atuais. Na década de 1940, a vibro-prensagem foi introduzida no processo de fabricação, aumentando a produção para 5000 blocos/dia, melhorando a aparência dos blocos e sua resistência. Doravante, só houve melhorias progressivas quanto a produtividade e qualidade de produto, estando, no entanto, o Brasil com uma defasagem de cerca de 30 anos com relação aos países europeus (HOFFMANN, 1941; AMÉRICO, 2007). A Figura 21 retrata máquinas utilizadas na confecção de blocos no século XIX, início do século XX e uma vibroprensa moderna.

**Figura 21 - Máquinas utilizadas na fabricação de blocos no século XIX, início do século XX e uma vibroprensa atual**



Fonte: a) [www.parks.ca.gov/pages/789/images/Block%20mach.jpg](http://www.parks.ca.gov/pages/789/images/Block%20mach.jpg); b) [www.masonryinstitute.com/guide/part2/prodbpg1a.gif](http://www.masonryinstitute.com/guide/part2/prodbpg1a.gif); c) [www.besser.com/equipment/images/vibrapac.jpg](http://www.besser.com/equipment/images/vibrapac.jpg)

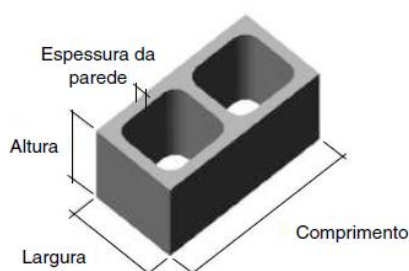
No Brasil, a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) e a Associação Bloco Brasil (Associação Brasileira do Fabricante de Blocos de Concretos do Brasil) entre os anos de 1995 e 2005 somaram esforços para difundir a utilização de blocos de concreto no país e estimular o crescimento do setor. Estas instituíram um selo de qualidade para o bloco de concreto, fato que praticamente dobrou o número de fabricantes formais no período. Neste contexto, os fabricantes das máquinas nacionais para confecção de blocos se aprimoraram também e os nossos equipamentos alcançaram elevado grau de desenvolvimento e automação, passando a serem exportados para diversos países, principalmente para África (FERNANDES, 2015).

O fato é que a produção em série de blocos de concreto contribui de forma significativa para a redução dos custos e melhoria da qualidade. Na atualidade, o processo de fabricação dos blocos envolve a moldagem do concreto seco em moldes com dimensões pré-estabelecidas do bloco, compactados e vibrados por máquinas, depois levados para cura e armazenagem até o momento da entrega. Em muitas fábricas de blocos, algumas das fases do processo de produção são totalmente automatizadas (AMÉRICO, 2007).

#### **2.4.2 DEFINIÇÕES**

Segundo a ABNT NBR 6136:2016, bloco vazado de concreto simples trata-se de um componente para execução de alvenaria, podendo ser com ou sem função estrutural, vazados nas faces superior e inferior, cuja área líquida é igual ou inferior a 75 % da área bruta. Podem ser produzidos por equipamentos manuais, pneumáticos ou hidráulicos através da vibro compactação e extrusão imediata (ABNT NBR 6136:2016 e FERNANDES, 2015). A Figura 22 retrata o bloco de concreto segundo a referida Norma Técnica.

**Figura 22 - Bloco de Concreto Vazado Simples**



Fonte: ABNT NBR 6136:2016.

Os blocos de concreto são constituídos exclusivamente de concreto, mistura homogênea de cimento, agregados e água, podendo ter aditivos, desde que os mesmos não acarretem efeitos prejudiciais comprovados por ensaios. Os agregados, no entanto, podem ser de diversos tipos, sendo os mais comuns, areia, pedrisco e pó de pedra, mas pode-se utilizar também argila expandida, cinzas volantes, entre outros. Os blocos devem ser fabricados e curados por processos que garantam a compactação e homogeneidade (YAZIGI, 2013).

Diversos fatores influenciam na trabalhabilidade do concreto seco utilizado na fabricação dos blocos, como o formato e granulometria dos agregados, proporção e natureza dos finos, relação água/cimento, uso de aditivos, entre outros. A qualidade dos agregados interfere diretamente nos requisitos físicos e químicos dos blocos. Os agregados graúdos e miúdos devem estar de acordo com a ABNT NBR 7211:2022. Aditivos químicos também podem ser usados na mistura cimentícia, sendo os plastificantes muito utilizados. O uso de aditivos, adições ou pigmentos é regido pela ABNT NBR 11768-1:2019. A resistência à compressão do graute, combinada com as propriedades mecânicas dos blocos e da argamassa definirão a resistência à compressão da alvenaria (FARIA, 2015).

Os blocos de concreto devem apresentar textura superficial livre de fissuras e trincas que possam vir a prejudicar o seu desempenho. Devem ser homogêneos e compactos, além de possuírem arestas vivas. Caso a alvenaria tenha revestimento, blocos com a superfície mais porosa e rugosa são indicados, pois facilitam a aderência com a argamassa. Caso contrário, blocos mais lisos e bem-acabados são indicados. É importante que a alvenaria com bloco de concreto atenda aos requisitos em relação à leveza, à estabilidade mecânica, à durabilidade em função da exposição à chuva, ao isolamento térmico, ao isolamento acústico, à resistência ao fogo e a regularidade das dimensões (FARIA, 2015).

Segundo Parsekian (2020), o bloco de concreto normalizado possui formato e dimensões padronizadas, e cada linha possui uma família de componentes que, aplicados dentro da boa técnica, proporcionam um sistema construtivo limpo, prático, rápido, econômico e eficiente. O bloco que cumpre os padrões de norma é vazado e, seu elemento predominante, tem apenas dois furos. O produto possui arestas firmes e bem definidas, textura uniforme e é produzido nas categorias estrutural e vedação, de acordo com a aplicação, para fins estruturais ou apenas de fechamento. Sua resistência à compressão pode variar de 3,0 a 25,0 MPa, de acordo com a aplicação a que se destina.

### 2.4.3 CONCRETO SECO

Dentre os concretos especiais, destaca-se o concreto seco, também conhecidos por “concreto farofa”, “zero-slump” ou ainda “no-slump”. De acordo com Ott & Andreas (2006), a utilização de produtos fabricados com concreto seco teve início há cerca de 70 anos, em um período pós Segunda Guerra Mundial, marcado pelo desprovidimento e elevado custo dos materiais de construção. O concreto “zero-slump” é utilizado na produção de artefatos de concreto como blocos, tubos, placas, peças de concreto para pavimentação, entre outros. A Figura 23 apresenta alguns produtos fabricados com concreto seco.

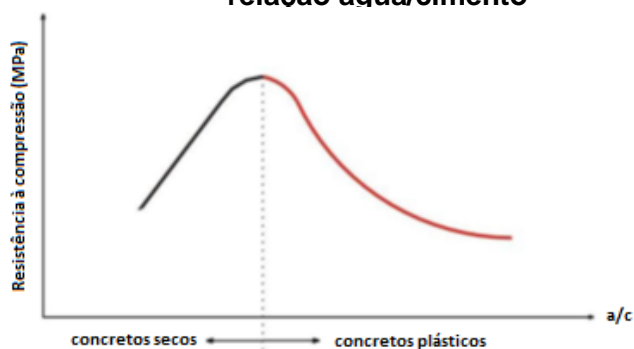
**Figura 23 - Artefatos produzidos com concreto seco**



Fonte: MARCHIONI (2012).

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 (RODRIGUES, 1984). Esse comportamento pode ser melhor verificado na Figura 24, a qual compara o efeito na resistência à compressão em função da elevação do teor de água em ambos os tipos de concreto.

**Figura 24 - Resistência à compressão em função da elevação da relação água/cimento**



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2004).

O concreto seco devido a menor quantidade de água utilizada na mistura, apresenta baixa relação água/materiais secos, elevada consistência e coesão, e ainda, diferencia-se pela forma como o ar aprisionado é retirado. 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 (OLIVEIRA, 2004).

Segundo Marchand et. al (1996), a consistência do concreto seco é superior que nos concretos plásticos devido a necessidade de desforma imediata, por isso utiliza-se uma menor quantidade de água nesse concreto. Para sua compactação torna-se necessária a adoção de equipamentos especiais, como as máquinas vibroprensa, cujo intuito é conferir à mistura elevada compacidade (OLIVEIRA, 2004).

De acordo com Marchioni (2012), o concreto “zero-slump” compacta com facilidade e isso se deve às características físicas da mistura e à mobilidade das partículas dentro da forma. Segundo a autora, compactar os blocos de concreto através da vibro prensagem é eficaz, pois diminui o volume de vazios, aumenta a resistência mecânica, reduzindo a permeabilidade do produto.

Segundo Fernandes (2011), equipamentos que empregam maior energia de compactação permitem alcançar maiores resistências. De acordo com o autor, para um mesmo traço e mesma relação a/c, aplicando-se maiores energias de compactação, obtêm-se maiores valores de resistência à compressão.

As propriedades requeridas no estado endurecido para os blocos de concreto como: resistência à compressão, absorção de água, 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).

#### 2.4.4 REQUISITOS E NORMALIZAÇÃO

Segundo a ABNT NBR 6136:2016, os blocos vazados de concreto são divididos em classes, por sua função e local de uso. As classificações gerais de uso das unidades são: Classe A – blocos com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima ou abaixo do nível do solo; Classe B – blocos com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do solo; Classe C – blocos com e sem função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do solo. Os blocos de concreto também são divididos por Linha, Família, Elemento Predominante e Elementos Complementares. Assim sendo, a Linha determina as dimensões da largura e comprimento da peça predominante da Família dos blocos. A Linha 15x40 é a mais conhecida e utilizada no Brasil, nela os blocos apresentam largura de 14 cm, altura de 19 cm e comprimento de 39 cm. As Famílias são formadas por diferentes peças de mesma linha e mesma largura. Cada Família é composta de um bloco predominante e seus complementos. Entende-se por Elemento Predominante o principal bloco de uma determinada família, e é quem determina o comprimento de uma linha e é utilizado para os ensaios de qualidade. Já os Elementos Complementares são os outros membros de cada uma das Famílias de blocos e são utilizados para facilitar o emprego do Elemento Principal. São os meios blocos, canaletas, bloco 34, bloco 54, compensadores, entre outros (FERNANDES, 2015).

A Tabela 2, extraída da ABNT NBR 6136:2016, designa os blocos por classe, largura dos blocos e espessura mínima das paredes.

**Tabela 2 - Designação por classe, largura dos blocos e espessura mínima das paredes**

Classe	Largura nominal (mm)	Paredes longitudinais (mm)	Paredes transversais	
			Paredes (mm)	Espessura equivalente (mm/m)
A	190	32	25	188
	140	25	25	188
B	190	32	25	188
	140	25	25	188
C	190	18	18	135
	140	18	18	135
	115	18	18	135
	90	18	18	135
	65	15	15	113

Fonte: Adaptado ABNT NBR 6136:2016.

- **REQUISITOS FÍSICO-MECÂNICO**

A ABNT NBR 6136:2016 rege os requisitos físico-mecânico e determina os limites de resistência, absorção e retração linear por secagem, conforme demonstra a Tabela 3.

**Tabela 3 - Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração**

Classificação	Classe	Resistência característica à compressão axial <sup>a</sup> (MPa)	Absorção %				Retração <sup>d</sup> %
			Agregado normal <sup>b</sup>		Agregado leve <sup>c</sup>		
			Individual	Média	Individual	Média	
Com função estrutural	A	$f_{bk} \geq 8,0$	$\leq 9,0$	$\leq 8,0$	$\leq 16,0$	$\leq 13,0$	$\leq 0,065$
	B	$4,0 \leq f_{bk} < 8,0$	$\leq 10,0$	$\leq 9,0$			
Com ou sem função estrutural	C	$f_{bk} \geq 3,0$	$\leq 11,0$	$\leq 10,0$			
<sup>a</sup>	Resistência característica à compressão axial obtida aos 28 dias.						
<sup>b</sup>	Blocos fabricados com agregado normal (ver definição na ABNT NBR 9935).						
<sup>c</sup>	Blocos fabricados com agregado leve (ver definição na ABNT NBR 9935).						
<sup>d</sup>	Ensaio facultativo.						

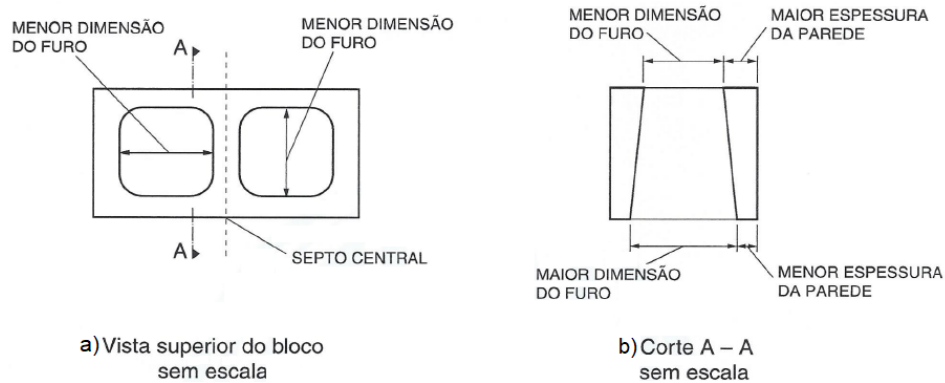
Fonte: Adaptado ABNT NBR 6136:2016.

Segundo a ABNT NBR 6136:2016, os blocos de concreto que serão utilizados abaixo do nível do solo devem ser Classe A. O bloco Classe C estrutural, com 90 mm de largura, deve ser utilizado em construções de até um pavimento. O bloco Classe C estrutural, com 115 mm de largura, pode ser utilizado em construções de até dois pavimentos. O bloco Classe C estrutural, com larguras de 140 e 190 mm, deve ser empregado em edificações de até cinco pavimentos. Os blocos de 65 mm de largura só podem ser utilizados para alvenaria sem função estrutural.

- **DIMENSÃO DOS FUROS E MÍSULAS**

Para os blocos classes A e B (com função estrutural) a menor dimensão dos furos, deve ser maior ou igual a 70 mm para blocos de 140 mm e maior ou igual a 110 mm para blocos de 190 mm. A Figura 25 demonstra o local onde devem ser medidas a menor e maior dimensão dos furos (NBR 12118:2013).

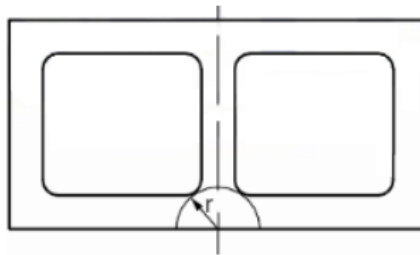
**Figura 25 - Dimensões dos furos: a) Vista superior do bloco; b) Corte A-A**



Fonte: NBR 12118:2013.

Os blocos classe A e B devem ter mísulas com raio mínimo de 40 mm e os classe C, raio mínimo de 20 mm. Na Figura 26 é demonstrado o local a partir do qual deve-se medir o raio (NBR 6136:2016).

**Figura 26 - Mísulas**



Fonte: ABNT NBR 6136:2016.

- **INSPEÇÃO**

Para inspeção dos blocos o fabricante deve informar os lotes que obrigatoriamente devem ser fabricados sob as mesmas condições e com os mesmos materiais. Estes devem ainda identificar o lote, informar a data de fabricação, a resistência característica à compressão, as dimensões nominais e a classe à qual pertence. O lote deve ter no máximo quarenta mil unidades. A amostragem colhida para os ensaios deve atender a as quantidades previstas na Tabela 4.

**Tabela 4 - Tamanho da amostra.**

Quantidade de blocos do lote	Quantidade de blocos da amostra		Quantidade mínima de blocos para ensaio dimensional e resistência à compressão axial		Quantidade de blocos para ensaios de absorção e área líquida
	Prova	Contraprova	Critério estabelecido em 6.5.1	Critério estabelecido em 6.5.2	
Até 5.000	7 ou 9	7 ou 9	6	4	3
5.001 a 10.000	8 ou 11	8 ou 11	8	5	3
Acima de 10.000	9 ou 13	9 ou 13	10	6	3

Fonte: ABNT NBR 6136:2016.

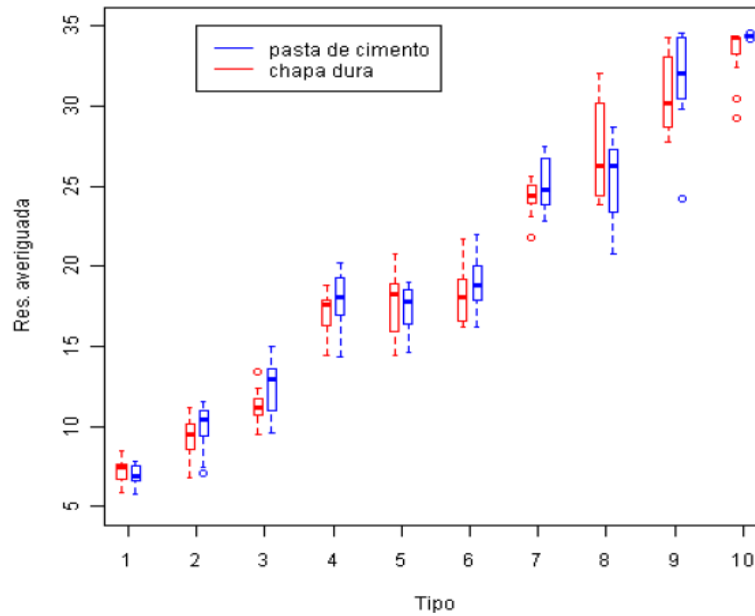
#### **2.4.5 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**

Os blocos serão submetidos aos ensaios de resistência à compressão cujos requisitos estão previstos na NBR 6136 (ABNT, 2016), e os métodos do ensaio descritos na NBR 12118 (ABNT, 2013).

- *DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO*

Na maioria das estruturas de concreto em situação de serviço, o material é submetido à esforços de compressão. Este fator, aliado à simplicidade e precisão do ensaio de determinação da resistência característica à compressão faz com que esta seja a propriedade mecânica mais avaliada na verificação da qualidade do concreto (ITAMBÉ, 2011). O referido ensaio foi proposto inicialmente para avaliar corpos de prova cilíndricos moldados ou extraídos de estruturas de concreto. Trata-se de um ensaio destrutivo cujo procedimento é regido e detalhado atualmente pela norma ABNT NBR 12118:2013. Para o ensaio de resistência característica à compressão utilizar-se-á uma prensa que atenda aos requisitos da ABNT NBR NM ISO 7500-1. Para o preparo dos corpos de prova não será possível realizar o capeamento ou retífica conforme preconização da ABNT NBR 12118:2013, pois os blocos serão ensaiados aos 02 dias de idade. Para tanto, utilizar-se-á o capeamento com o material chapa dura (Duratex). Fortes et al (2014) e Fortes (2017), verificaram em seus estudos que para as resistências nominais dos blocos analisados (3 a 30 MPa), não há diferença significativa entre as médias de resistência à compressão entre blocos de concreto capeados com chapa dura e blocos de concreto capeados com pasta de cimento, conforme demonstra a Figura 27.

**Figura 27 - Diagrama de caixa por tipos de blocos.**



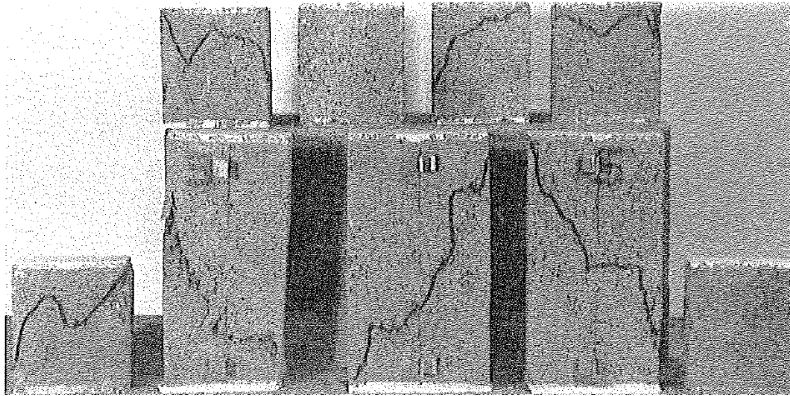
Fonte: Fortes et al (2014).

Assim sendo, empregar-se-á o capeamento com chapa dura para os ensaios de resistência à compressão axial dos blocos aos 02, 07 e 28 dias, visando-se padronizar o procedimento.

#### **2.4.6 ESTUDOS SOBRE CORRELAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL ENTRE BLOCOS E AMOSTRAS**

BECICA e HARRIS (1993) analisaram experimentalmente blocos vazados de concreto produzidos em laboratório com dimensão nominal de 190 × 190 × 390 mm e relação área líquida/área bruta de 0,54. Dez corpos de prova (CP) foram extraídos dos blocos com relação altura/comprimento variando entre 1:1 e 2:1 mantendo-se a espessura e geometria com a mesma inclinação observada nas paredes dos blocos. Os pesquisadores obtiveram relação CP/Bloco para resistência à compressão média dos corpos de prova na área líquida igual a 1,22. Os autores relataram que a ruptura se mostrou dúctil e, em alguns casos, um encurtamento significativo foi verificado. A Figura 28 demonstra os corpos de prova de ensaiados.

**Figura 28 - Ruptura dos corpos de prova extraídos dos blocos**



Fonte: Becica e Harris (1983).

Frasson Júnior (2000) observou que utilizar estritamente a fábrica e moldar apenas blocos de concreto para ensaios de compressão encareceria e dificultaria todo o estudo de dosagem. Por isto, a necessidade de se propor uma forma simples e eficaz de se prever resistências e características dos blocos de concreto foi altamente necessária. Posto isto, o autor resolveu trabalhar com blocos e corpos de prova, obtendo a correlação entre eles. Na sua pesquisa foram estudados blocos com mesma dimensão  $140 \times 190 \times 390$  mm, com três diferentes resistências nominais (6 MPa, 9 MPa e 12 MPa) e geometrias distintas, com paredes finas e paredes grossas, objetivando avaliar o efeito da geometria na relação de resistência entre CP e bloco. Para cada uma das séries de blocos foram produzidos 4 corpos de prova cilíndricos ( $50 \times 100$  mm – largura  $\times$  altura). O processo de produção deu-se da seguinte maneira, à medida em que iam sendo produzidas na vibro-prensa as séries de blocos desejadas, retirava-se uma amostra do concreto utilizado na fabricação dos artefatos e moldavam-se os CPs  $50 \times 100$  mm, sendo que para cada camada de concreto colocada dentro do molde, foram aplicados vinte golpes utilizando-se o mesmo soquete de CPs utilizado em ensaios com argamassa. A força aplicada através dos golpes foi distribuída igualmente em cada camada de maneira que o CP possuísse, ao final da compactação, uma altura em tomo de 100mm. Posteriormente, blocos e CPS foram colocados juntamente na cura. A cura aplicada, neste caso, foi cura térmica à vapor.

Tanto os blocos, como os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial e os valores obtidos, bem como a correlação entre eles estão apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5 - Correlação entre as resistências dos CPs e dos blocos de concreto.**

Resistência nominal do Bloco (MPa)	Resistência à compressão axial (MPa)					
	Parede Fina			Parede Grossa		
	CP	Bloco	CP/Bloco	CP	Bloco	CP/Bloco
6	14,5	18,5	0,8	13,0	16,4	0,8
9	21	27,0	0,8	17,4	21,4	0,8
12	26	32,4	0,8	25,3	32,8	0,8

Fonte: Adaptada de Frasson Júnior (2000).

Baseando-se nos resultados apresentados, Frasson Júnior (2000) concluiu que, para um corpo de prova cilíndrico (50 x 100) mm, com mesmo traço e massa específica do bloco de concreto, porém processos de compactação diferentes, sua resistência foi de aproximadamente 80% da resistência do bloco, este resultado mostrou-se praticamente constante para todas as séries e para blocos de diferentes geometrias (parede fina e grossa), considerando a área líquida.

Prudêncio Júnior (2003) afirma que a resistência do bloco, mesmo em área líquida, depende fundamentalmente da espessura de suas paredes e da conicidade dos furos. Portanto, a relação encontrada no trabalho de Frasson Júnior (2003) não é absoluta e deve ser pesquisada caso a caso.

Marzahn (2003) realizou ensaio de resistência à compressão axial em blocos maciços de concreto autoclavados (constituídos a partir de uma reação química entre cal, cimento, areia e pó de alumínio), dimensão de 200 x 240 x 500 mm, com ar incorporado e massas específicas diferentes; e em corpos de prova cilíndricos (100 x 200 mm) extraídos dos blocos. Os ensaios visaram investigar a referida propriedade mecânica das unidades de alvenaria. Para tanto, os blocos e os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial e os valores estão contidos na Tabela 6.

**Tabela 6 - Resistência à compressão dos blocos e corpos-de-prova e correlação**

Bloco	Massa específica (kgf/cm <sup>3</sup> )	Resistência à compressão média amostra (f <sub>a</sub> )(MPa)	Resistência à compressão média bloco (f <sub>b</sub> )(MPa)	f <sub>a</sub> /f <sub>b</sub>
A	544	3,9	4,1	0,95
B	450	2,8	3,2	0,86

Fonte: Adaptada de Marzahn (2003).

Portanto, por meio dos resultados apresentados foi possível concluir que os corpos de prova apresentaram resistências que equivalem a 86% e 95% do valor das resistências dos blocos de concreto. O autor justificou que a escolha da geometria dos corpos de prova (cilíndrica) se deu em virtude desta ser amplamente aceita no estudo das propriedades mecânicas do concreto.

Barbosa e Hannai (2006) compararam a resistência à compressão axial de blocos vazados de concreto com dimensões 140 × 190 × 390 mm e área líquida de aproximadamente 306,63 cm<sup>2</sup>. A produção dos blocos foi realizada em laboratório utilizando-se forma metálica, concreto plástico e não houve vibro-prensagem. Paralelamente à produção dos blocos foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensão de 100 × 200 mm. No geral, foram produzidos concretos para os blocos e corpos de prova, cuja resistência nominal era de 10 MPa, 20 MPa e 30 MPa (G1, G2 e G3, respectivamente). A resistência à compressão axial média de cada série de ensaios com blocos de concreto ( $f_b$ ) e seus respectivos corpos-de-prova ( $f_c$ ) está apresentada na Tabela 7. Nesta série, foram realizados ensaios com três blocos de concreto e quatro corpos-de-prova para cada grupo de resistência.

**Tabela 7 - Resistência à compressão de blocos e corpos de prova**

Grupo	$f_c$ (MPa)	$f_b$ (MPa)	$f_c / f_b$
G1	13,4	12,7	1,05
G2	22,1	26,5	0,83
G3	26,0	28,4	0,91

Fonte: Adaptada de Barbosa e Hannai (2006).

Observa-se que, na maioria dos grupos (G2 e G3), o valor da resistência à compressão obtido nos ensaios com blocos de concreto é maior que o obtido para seu respectivo corpo de prova. Os autores acreditam que tal motivo se deve ao fato de que os corpos de prova apresentam relação entre altura e maior dimensão transversal ( $h/t$ ) igual a 2, enquanto que os blocos possuem  $h/t \sim 0,5$ . Assim, em decorrência das diferentes geometrias e das condições de confinamento no topo e na base, não ocorre uma distribuição de tensões ao longo da altura do bloco tão uniforme quanto a que ocorre nos corpos de prova e, como consequência, os blocos apresentam maior capacidade resistente. A atuação do confinamento no bloco também é dependente de sua configuração geométrica (espessura das paredes e índice de vazios).

Buttler (2017) trabalhou com blocos vazados de concreto estrutural 140 × 190 × 390 mm e corpos de prova cilíndricos 50 × 100mm. Ambos foram produzidos utilizando-se concreto seco com agregados reciclados. Os CPs não foram vibro-prensados, mas adensados no

laboratório da indústria com uma energia de adensamento igual a 15 golpes de soquete para cada quatro camadas de preenchimento, após a moldagem os CPs foram submetidos à cura térmica conjuntamente com os blocos da sua série. A correlação entre a resistência à compressão dos corpos de prova e blocos de concreto, considerando-se as resistências nominais dos blocos de 4,5 MPa, 6,0 MPa e 8,0 MPa, a relação entre a resistência dos corpos de prova e dos blocos de concreto, levando-se em conta a área líquida, foi de 0,98, 0,88 e 0,73, respectivamente. O autor cita que assegurar a uniformização da energia de adensamento dos CPs é uma dificuldade, já que depende do operador de moldagem. Assim, para o emprego dessa metodologia, Buttler (2017) propõe como solução a adaptação de um dispositivo mecânico que uniformize a energia de adensamento por meio da queda livre de uma massa a partir de uma determinada altura.

Resumindo, Becica e Harris (1983) e Ganzerli et al. (2003), observaram que a resistência dos corpos de prova é em torno de 22% maior que a resistência dos blocos, já Frasson Júnior (2001) verificou resistências de corpo de prova aproximadamente 20% menores que as resistências dos blocos. Marzahn (2003) concluiu que a resistência da amostra variou entre 86% a 95% da resistência do bloco. Prudêncio Júnior (2003) cita ainda que como a resistência do bloco, mesmo em área líquida, depende fundamentalmente da espessura de suas paredes e também da conicidade dos furos, a relação encontrada no trabalho de Frasson Júnior (2001) não é absoluta e deve ser pesquisada caso a caso. Para Barbosa (2008 a) e Barbosa (2008 b), o avanço em busca de outras correlações deve vir acompanhado da definição de um corpo de prova que melhor represente o comportamento do bloco quando submetido aos ensaios de compressão. Para Buttler [16] para o processo de adensamento dos CPs, é essencial pleno domínio da técnica a fim de se obter uma energia próxima da qual estão submetidos os blocos na vibro-prensagem.

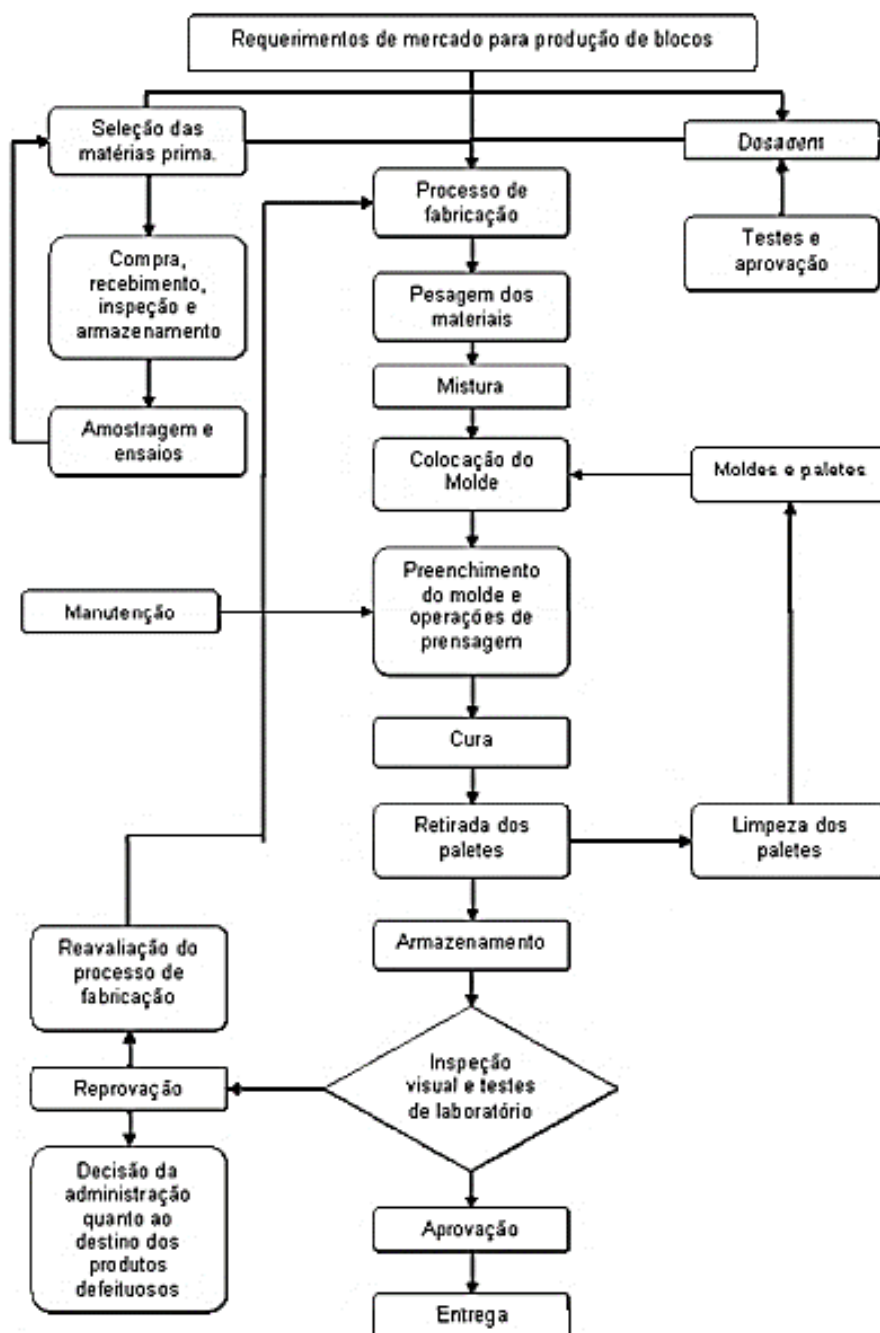
Por meio das pesquisas apresentadas foi possível observar que os trabalhos que visaram caracterizar as propriedades mecânicas dos blocos de concreto se depararam com a dificuldade referente ao processo de fabricação do mesmo, uma vez que esta envolve a vibro-prensagem do concreto seco. Sendo assim, muitas pesquisas produziram o bloco em laboratório com concreto plástico, utilizando-se formas, sem vibro-prensagem. Em nenhum dos estudos a amostra foi retirada diretamente do bloco fabricado por vibro-prensagem, a maioria apresentou formato cilíndrico e algumas foram compactadas com soquete. De fato, as pesquisas sobre o referido tema são escassas e os resultados encontrados são bastante divergentes, para tanto verifica-se a necessidade de uma maior padronização quanto aos

corpos de prova, uma vez que as diferentes geometrias empregadas exercem influência significativa nos resultados, bem como os processos por moldagem ou extração.

#### **2.4.7 PROCESSO PRODUTIVO DOS BLOCOS**

A produção em série dos blocos de concreto foi fundamental para a redução dos custos e melhoria da qualidade do produto. Basicamente o processo de fabricação dos blocos envolve as etapas de confecção do traço, em que há o proporcionamento dos materiais; mistura, em geral realizada em misturador orbital; produção (moldagem) do concreto seco em moldes (formas) com as dimensões pré-estabelecidas do bloco, compactados e vibrados por máquinas automáticas; cura e armazenagem até o momento da entrega (SALVADOR FILHO, 2007). As fases da produção são descritas detalhadamente no fluxograma da Figura 29.

Figura 29 - Fluxograma do processo de fabricação dos blocos de concreto.



Fonte: Adaptado de Construction Industry Development Board - CIDB, 2004).

A etapa com maior destaque devido a sua maior importância é a da produção (prensagem) dos blocos. É por meio 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 blocos (RODRIGUES, 1995 a).

Segundo Fernandes (2011) o 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 consequente resistência mecânica das peças.

Diversas são as vantagens que fazem com que esse processo produtivo seja o mais utilizado mundialmente, com destaque para a sua elevada produtividade, pouca mão de obra, maior controle da produção, homogeneidade e desempenho estético do produto (FERNANDES, 2011).

Neste 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. Para tanto, a seguir serão apresentadas as instalações mínimas e equipamentos que uma indústria de blocos deve apresentar para confeccionar o referido produto.

#### **2.4.7.1 Baías de armazenagem de agregados**

As baias para armazenamento dos agregados são separações físicas confeccionadas com o propósito de proteger cada agregado contra a contaminação (mistura com outros materiais), mantendo assim suas características originais. As dimensões das baias e sua capacidade de armazenamento, estão diretamente relacionadas à produtividade da fábrica e disponibilidade do fornecedor dos agregados (FERNANDES, 2015). A Figura 30 apresenta um modelo de baia.

**Figura 30 - Baia de agregados**



Fonte: Disponível em: <http://construcaomercado.pini.com.br/>. Acesso em: 12/02/2020.

### 2.4.7.2 Usina Dosadora de Agregados

A forma de proporcionamento dos agregados varia de acordo com o tamanho e grau de automação da indústria. Este pode ser realizado por meio de carrinhos de mão, giricas, correias transportadoras com seção controlada e usinas gravimétricas providas de balanças controladas por CLP (Controlador Lógico Programável). Em unidades de grande porte as usinas dosadoras gravimétricas são as mais utilizadas, uma vez que integradas aos demais equipamentos por meio dos CLPs, possibilitam o acionamento automático quando é verificada a falta de material no circuito de produção. As usinas gravimétricas propiciam a obtenção de produtos com baixíssimo desvio padrão em razão da constância absoluta nas quantidades de materiais proporcionados (FERNANDES, 2015). A Figura 31 ilustra uma usina dosadora de agregados.

**Figura 31 - Usina dosadora de agregados**



Fonte: Disponível em < <https://www.agostiniindustrial.com.br/produtos/13/central-dosadora-de-agregados>>. Acesso em 11/08/2020.

### 2.4.7.3 Silo de cimento a granel

O cimento a granel é levemente mais barato pois não utiliza a embalagem de papel e ainda facilita a operação de descarga e de uso em sistemas automatizados. A capacidade normal de um silo varia em torno de 60 a 120 toneladas. É comum em indústrias maiores e que se localizem próximo às fabricas ou centros de distribuição de cimento (FERNANDES, 2015). A Figura 32 demonstra um silo de cimento a granel.

**Figura 32 - Silo de cimento a granel**



Fonte: Disponível em < <http://www.hzen.ind.br/equipamentos/silo-de-cimento-a-granel/>>.

Acesso em 11/08/2020.

#### **2.4.7.4 Misturadores**

Como o concreto utilizado na fabricação de blocos é um concreto seco, o equipamento a ser empregado na mistura necessita de uma energia extra para homogeneizar os materiais. Os misturadores mais indicados são os biplanetários, os de eixo horizontal helicoidal, os de eixo vertical fixo e os horizontais de pás. A tradicional betoneira que mistura apenas por gravidade é contra indicada (FERNANDES, 2015). Na Figura 33 é apresentado um misturador planetário.

**Figura 33 - Misturador Planetário**



Fonte: Disponível em <<http://www.vibrafort.com.br/misturador-concreto.html>>. Acesso em

11/08/2020.

### 2.4.7.5 Dosadores de água e Controladores de umidade

Na questão umidade, quanto maior for o seu controle, maior será a qualidade dos blocos, sobretudo no quesito adensamento, densidade, peso, absorção, impermeabilidade e resistência à compressão. Para controle de umidade pode-se utilizar tanto um dosador de água como um controlador de umidade. O primeiro apenas mede a quantidade de água a ser adicionada ao concreto previamente definida pelo operador, já o segundo trata-se de um sistema inteligente que analisa a mistura que está sendo homogeneizada, define a quantidade de água a ser acrescentada, a adiciona e faz constantes análise até obtenção da umidade ótima para a extrusão dos blocos (FERNANDES, 2015).

### 2.4.7.6 Vibroprensas

De acordo com Salvador Filho (2007) a máquina vibro prensa é o elemento central de uma fábrica de blocos e a maioria das indústrias apresentam uma única máquina em operação, porém, não obstante é comum observar a presença de máquinas modernas funcionando concomitantemente com máquinas mais antigas, isso ocorre porque as empresas ao adquirirem novos maquinários não se desfazem dos antigos com isso conseguem aumentar a produção.

➤ **Tipos de vibroprensas:**

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

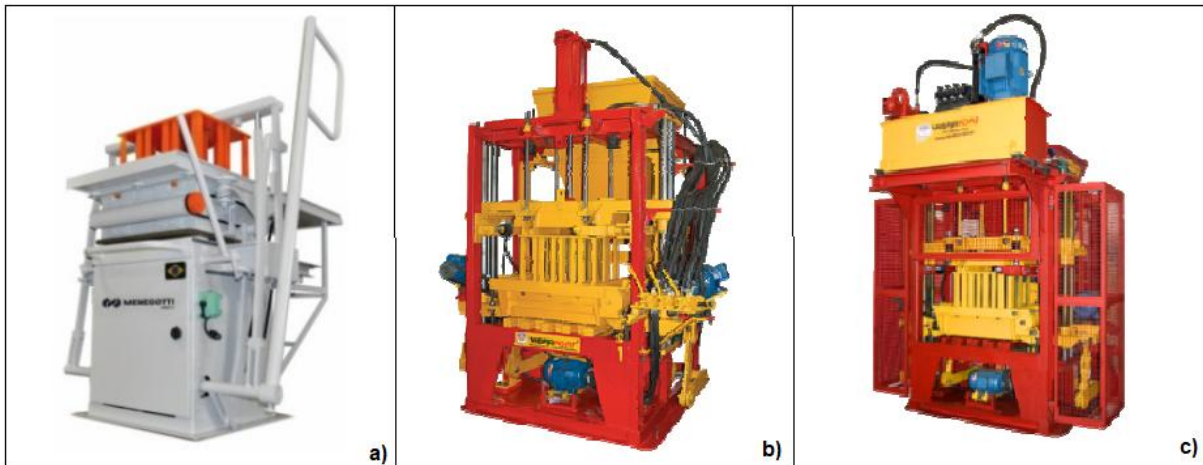
- *Manuais*: a produção é praticamente artesanal, pois estas máquinas não contam com sistema de prensagem, logo consomem grandes quantidades de cimento;

- *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;

- *Hidráulicas*: são as mais eficientes, pois utilizam bomba e pistões a óleo, sendo possível conciliar prensagem e vibração, e obter blocos bem compactados com baixo consumo de cimento. Estas vibro prensas podem ser dotadas de centrais programáveis, as quais possibilitam o controle dos tempos de alimentação, prensagem, acomodação e extrusão das peças.

A Figura 34 apresenta as vibroprensa mencionadas.

**Figura 34 - Tipo de vibroprensa empregas na confecção dos blocos: a) manual, b) pneumática, c) hidráulica**

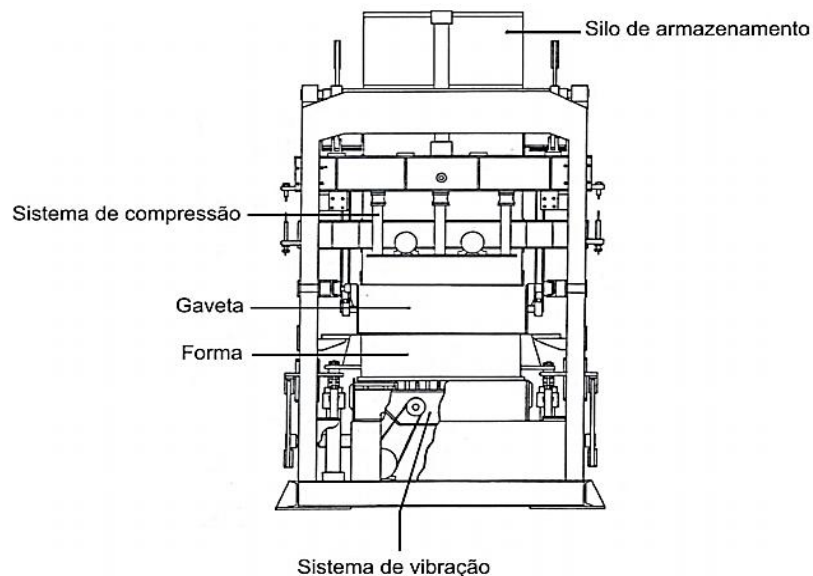


Fonte: Adaptado de Oliveira (2015).

- **Equipamentos constituintes:**

A máquina vibroprensa é composta pelo silo de armazenamento, gaveta, sistema de compressão, forma ou molde e sistema de vibração (OLIVEIRA, 2004). A Figura 35 demonstra as partes constituintes de uma máquina vibroprensa.

**Figura 35 - Partes constituintes de uma vibroprensa.**



Fonte: OLIVEIRA (2004).

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

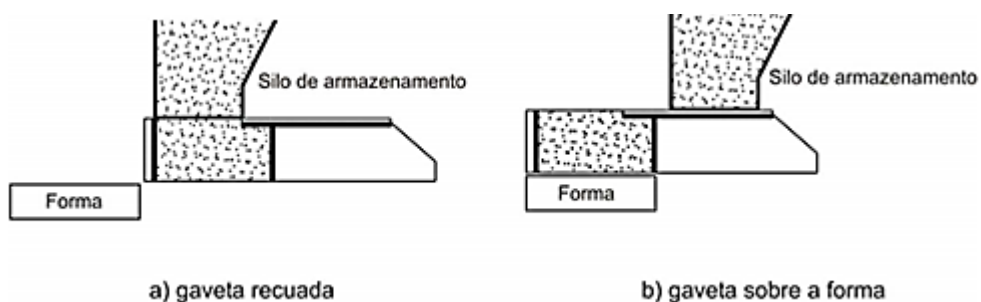
- **Silo de armazenamento:** compartimento que se situa na parte superior da máquina vibro prensa e seu volume varia de acordo com o fabricante, nele o concreto seco já misturado fica armazenado para posterior enchimento da gaveta.

- **Gaveta:** 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).

O tempo de alimentação é um fator importante para a qualidade final do produto, este equivale ao tempo em que a gaveta deve permanecer sobre a forma de modo a preenchê-la com concreto, em que concomitantemente o sistema de vibração é acionado. Observa-se que quanto maior for o tempo de alimentação, maior será a quantidade de concreto na forma, diminuindo o volume de vazios nos blocos e elevando, conseqüentemente à resistência à compressão dos mesmos (OLIVEIRA, 2004).

A Figura 36 , a seguir, mostra o funcionamento da gaveta.

**Figura 36 - Mecanismo de funcionamento da gaveta: a) gaveta recuada; b) gaveta sobre a fôrma.**

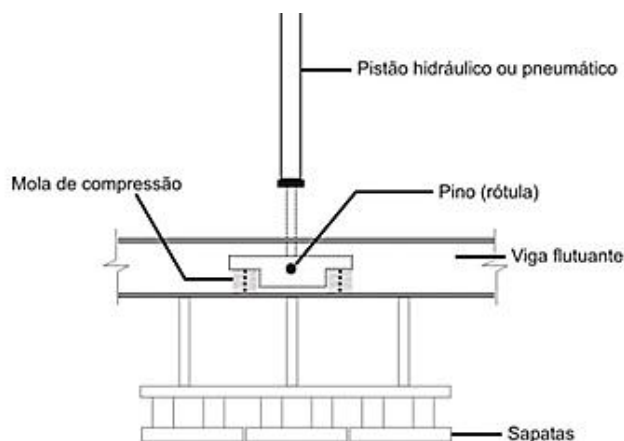


Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2004).

- **Sistema de compressão:** 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, a qual é responsável por comprimir o concreto contido na forma. O sistema de compressão atua durante a moldagem das peças aplicando a carga de compressão e está representado na Figura 37.

**Figura 37 - Sistema de compressão (Pistão atuando como aplicador de carga)**



Fonte: OLIVEIRA (2004).

O tempo de vibro compressão também é de suma importância para a qualidade final do produto e está relacionado ao tempo de vibro compressão, o qual corresponde ao tempo de descida das sapatas e contato das mesmas com o concreto até que a altura final dos blocos 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 dos blocos (OLIVEIRA,2004).

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 (ALBERO, 2001).

• **Forma:** também conhecida por molde, armazena o concreto advindo da gaveta. É a forma quem determina o formato e a dimensão dos blocos (OLIVIERA, 2004). A Figura 38, ilustra um dos tipos de formas empregados na produção vibro prensada dos blocos.

**Figura 38 - Forma para produção de blocos.**

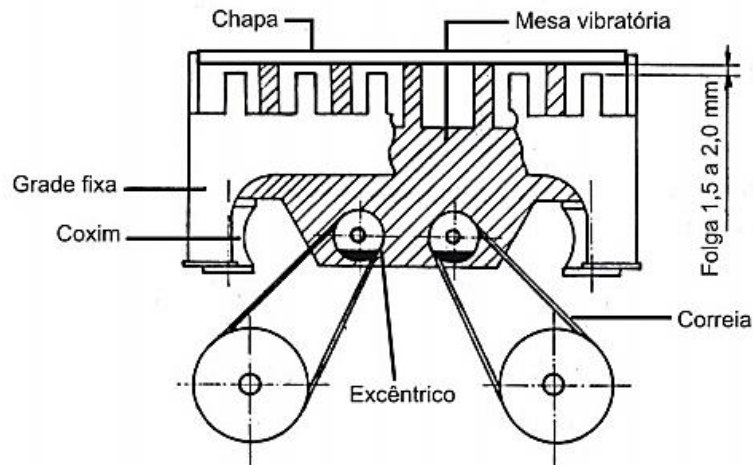


Fonte: Disponível em < <https://vibraforma.com.br/maquina-de-blocos-maquina-para-blocosmaquinas-para-fazer-blocos/formas-matriz-para-maquina-de-blocos/> Acesso em 11/08/2020.

• **Sistema de vibração:** o efeito de vibração possui influência direta na qualidade dos artefatos e produtividade da máquina (OLIVEIRA, 2004). Segundo Bresson (1981), a vibração é função de alguns parâmetros como direção, frequência, amplitude, velocidade e aceleração. De acordo com Neville (1988), a vibração promove a fluidificação dos componentes da argamassa, reduzindo o atrito interno e acomodando os agregados.

Segundo Oliveira (2004), em geral nas máquinas vibro prensas 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 39 ilustra o detalhe deste sistema de vibração.

**Figura 39 - Detalhe do sistema de mesa vibratória**

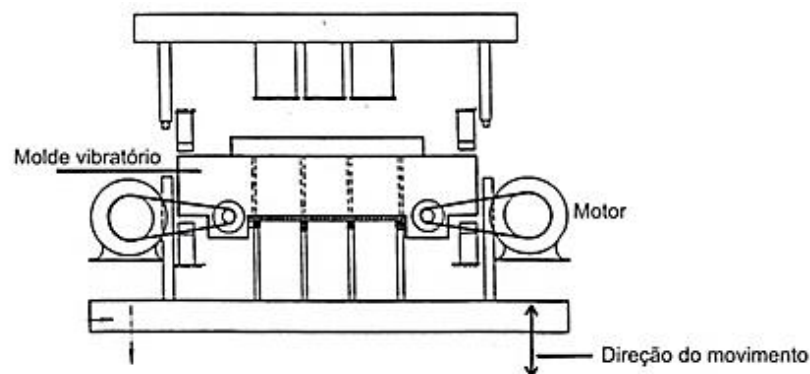


Fonte: OLIVEIRA (2004).

Segundo Bresson (1981), os sistemas de vibrações aplicados diretamente sobre as formas podem 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 40 demonstra o referido sistema de vibração.

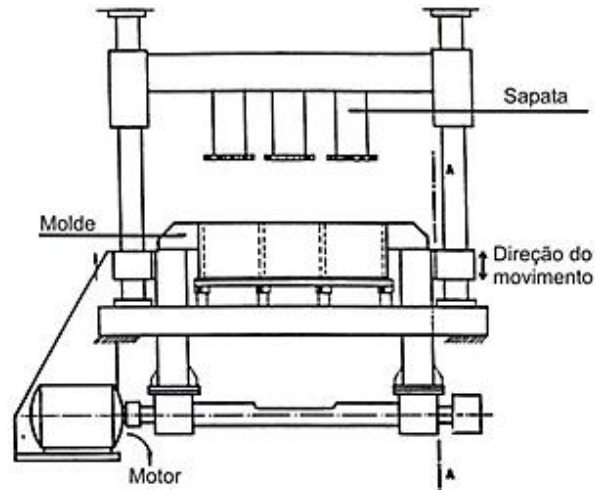
**Figura 40 - Detalhe de um sistema de vibração produzido por excêntricos fixados nas laterais da forma**



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 41, abaixo, mostra o referido sistema de vibração.

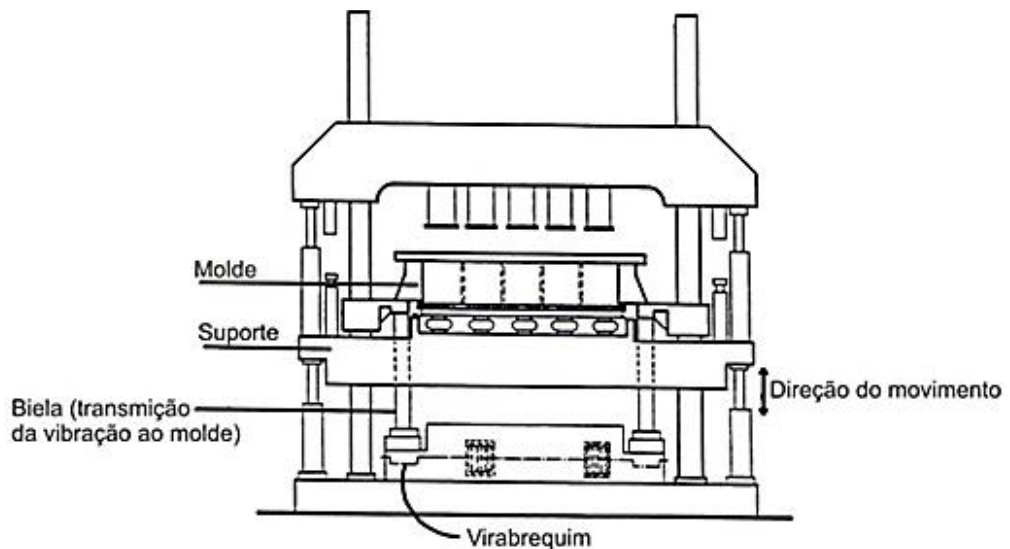
**Figura 41 - Detalhe de um sistema de vibração produzido por excêntricos sob a forma**



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 42, traz a representação deste sistema.

**Figura 42 - Detalhe de um sistema de vibração produzido por biela-virabrequim**



Fonte: BRESSON (1981).

- **Ciclos de produção:**

Segundo Oliveira (2004), as vibro prensas disponíveis no mercado possuem tempos de ciclo que variam de 8 a 25 segundos e o ciclo de produção dos blocos envolve as seguintes etapas na ordem apresentada:

- 1) Posicionamento da forma e avanço da gaveta: inicialmente posiciona-se a forma sobre a chapa em que os blocos serão moldados e posteriormente processa-se o avanço da gaveta sobre a forma; conforme mostra a Figura 43.

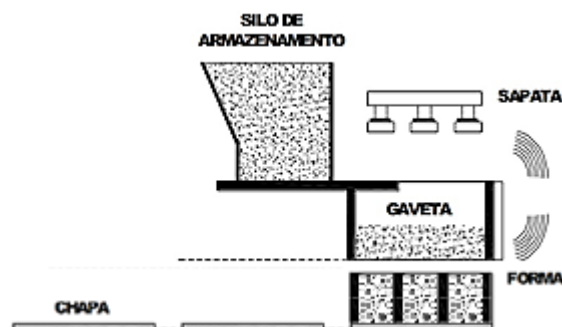
**Figura 43 - Posicionamento da forma e avanço da gaveta**



Fonte: Adaptado de PIROLA (2011).

- 2) Vibro - Alimentação: esta etapa é de suma importância pois está associada a compactação final dos produtos. Durante a vibro – alimentação, com o sistema de vibração acionado, a gaveta alimenta a forma com concreto. A Figura 44, mostra esta fase do ciclo produtivo.

**Figura 44 - 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 à posição inicial, sendo esta novamente preenchida com concreto, conforme mostra Figura 45.

**Figura 45 - Retorno da gaveta a posição inicial**



Fonte: Adaptado de PIROLA (2011).

- 4) Vibro - compressão: nesta etapa as sapatas juntamente com o sistema de vibração promovem a vibro-compressão do concreto até que a altura final dos blocos seja alcançada, conforme mostra Figura 46.

**Figura 46 - Etapa de Vibro - compressão**



Fonte: Adaptado de PIROLA (2011).

- 5) Desforma: desliga-se o sistema de vibração e ocorre a subida da forma juntamente a subida da sapata, enquanto isso, uma nova chapa é posicionada sob a forma de modo a reiniciar o ciclo, conforme mostra a Figura 47, abaixo.

**Figura 47 - Subida da forma concomitantemente à subida da sapata e liberação dos blocos**



Fonte: Adaptado de PIROLA (2011).

### 2.4.7.7 Cura

A cura dos blocos de concreto 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 dos blocos 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 concreto 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 por meio da utilização de cimentos de alta resistência inicial – ARI, aditivos aceleradores e associação de um sistema de cura eficaz (MELO, 1996). A Figura 48 ilustra uma câmara de cura em indústria fabricante de blocos de concreto.

**Figura 48 - Câmara de cura**



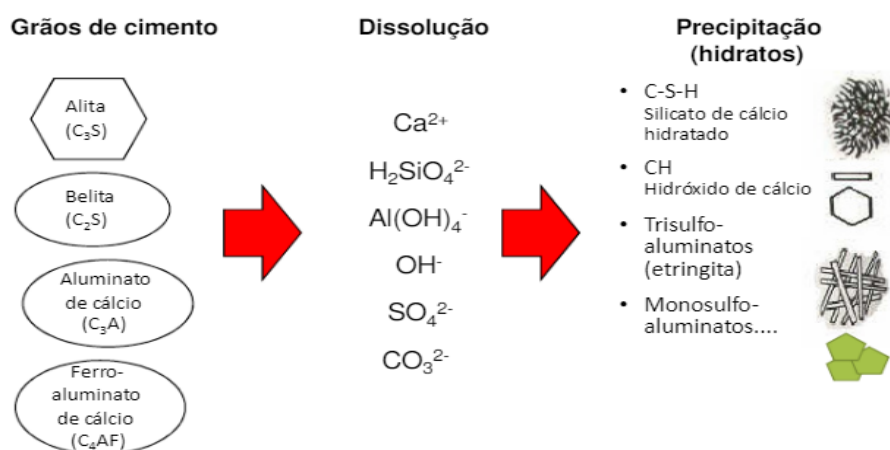
Fonte: Disponível em < <http://www.tecpre.com.br/premoldados/>>. Acesso em 11/08/2020.

## 2.5 CURA DO CONCRETO

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).

A Figura 49 descreve de forma simplificada as etapas da hidratação do cimento Portland, onde inicialmente os grãos de cimento anidro compostos por silicatos tricálcico ( $C_3S$ ) e bicálcico ( $C_2S$ ), aluminato de cálcio ( $C_3A$ ) e ferro aluminato de cálcio ( $C_4AF$ ), presentes em grandes quantidades (75 a 80%) na composição do cimento, em contato com a água resultam na dissolução dos íons  $Ca^{2+}$ ,  $Si^{4+}$  e  $Al(OH)^{3-}$ , a concentração destes na água vai aumentando até chegar na condição crítica (saturada) (RAMACHANDRAN, 1999), dando origem aos 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 ( $E_a$ ) e reduzam a energia livre de Gibbs, através do crescimento das fases hidratadas e da 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 [ $Ca(OH)_2$ ], 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).

**Figura 49 - Hidratação e Microestrutura do Cimento Portland**



Fonte: Scrivener (2017).

### **2.5.1 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 se mantenham úmidas e a temperatura mantida constante em  $(23 \pm 2)$  °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 com maior porosidade e com menor potencial de desenvolvimento de resistência mecânica final (SALVADOR FILHO, 2001).

### **2.6 CURA CARBÔNICA**

Durante a cura carbônica o material cimentício recém fabricado é inserido na câmara de carbonatação configurada com elevadas concentrações de CO<sub>2</sub>, condições adequadas de umidade relativa, pressão e temperatura. Inicia-se a reação química de carbonatação, a qual promove a captura do CO<sub>2</sub> presente na atmosfera da câmara e a conseqüente mineralização do dióxido de carbono, promovendo ganhos de resistência mecânica. Do ponto de vista

químico, a cura carbônica será eficiente quando a carbonatação acelerada for aplicada em materiais cimentícios em idades iniciais de hidratação, devido a maior quantidade de produtos reativos ( $\text{Ca(OH)}_2$  e C-S-H) ((SHAO et al. (2006), GALAN et al. (2010), WANG et al. (2012), B. ZHAN et al. (2013), NEVES JUNIOR et al., 2017b, 2018)).

Segundo Shao et al (2006), a cura carbônica de materiais cimentícios não armados favorece a indústria, uma vez que promove o aumento da produção, por conta do ganho de tempo, já que o tempo morto (tempo de cura) é reduzido (SHAO et al 2006). De acordo com El Hassan e Shao (2013) o uso comercial do  $\text{CO}_2$  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. Estudos mostram que a tecnologia de cura carbônica 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 países como Estados Unidos, Canadá e Reino Unido, empresas como Carbonclave, Solidia Technologies, Carbonbuilt e Carbicrete, reutilizam benéficamente o  $\text{CO}_2$  na cura de seus concretos. Em geral, o  $\text{CO}_2$  é capturado de usinas de carvão e fábricas de cimento, armazenado em tanques pressurizados e utilizado na etapa de cura. A Figura 50, mostra um dos tanques de confinamento e armazenamento de  $\text{CO}_2$ .

**Figura 50 - Tanque para armazenamento de  $\text{CO}_2$  capturado**



Fonte: Disponível em:< <http://www.carboncure.com>>. Acesso em: 06/08/2020.

A Figura 51 demonstra as câmaras de cura carbônica empregadas pela empresa fabricante de blocos de concreto Boehmers Hargest Blocks Ltd, a qual utiliza a tecnologia desenvolvida pela Carbonclave.

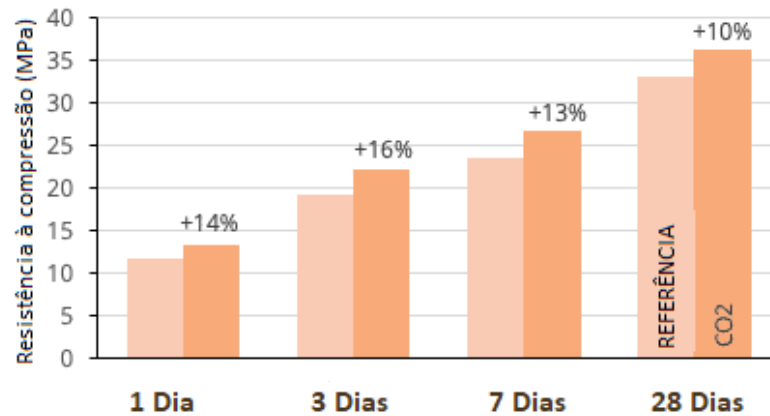
**Figura 51 - Câmara de cura carbônica localizadas na empresa Boehmers Hargest Blocks Ltd**



Fonte: Adaptado de Boehmers Hargest Blocks Ltd. Disponível em: <http://www.boehmerblock.com/carboclave.asp>. Acesso em: 20/10/2020.

As empresas verificaram que a cura carbônica, além de promover a captura permanente de CO<sub>2</sub>, aumenta a resistência, minimiza a ocorrência de eflorescências e fissuras por retração, e melhora a resistência ao congelamento e descongelamento. As propriedades do concreto fresco como tempo de pega e trabalhabilidade não são alteradas (MONKMAN e MACDONALD, 2016). A empresa CarbonCure realizou um estudo com 84 lotes de concreto de 13 clientes diferentes e verificou que os concretos submetidos à cura inicial com CO<sub>2</sub> obtiveram um ganho médio de resistência à compressão de 10% aos 28 dias, sendo que logo nos primeiros dias esses ganhos ainda foram superiores nos concretos carbonatados do que nos referenciais. Este estudo é apresentado na Figura 52.

**Figura 52 - Comparativo do ganho de resistência à compressão dos concreto carbonatados e referencias.**



Fonte: Adaptado de CarbonCure. Disponível em: <  
<https://www.carboncure.com/technology/>>. Acesso em 13/08/2020.

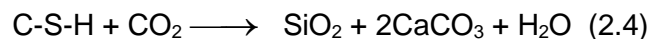
Boyd et al (2012) confrontaram a cura carbônica com a cura à vapor e observaram que após a cura carbônica o concreto apresenta maior resistência à permeabilidade de cloretos e à ataques de sulfatos e menores danos foram notados por congelamento e descongelamento; os pesquisadores atribuíram estes resultados ao teor significativamente reduzido de  $\text{Ca(OH)}_2$  na superfície do concreto carbonatado. Shao e Morshed (2015), observaram que a cura carbônica apresenta duração inferior quando comparada às curas tradicionais e contribui para melhora das propriedades de alta resistência inicial e baixa permeabilidade do concreto. Alguns estudos tem associado a cura por  $\text{CO}_2$  com curas tradicionais, He et al. (2016) curaram amostras com  $\text{CO}_2$  com posterior cura úmida, e observaram que a pós-hidratação por meio da cura com água aumentou a formação de gel C-S-H, etringita e monocarboaluminato, os quais reduziram a porosidade na matriz cimentícia. Lo e Lee (2002) compararam a cura ao ar com a cura úmida realizadas anteriormente à cura carbônica e observaram que concretos curados em água apresentam 72% da carbonatação dos concretos curados ao ar, após 03 meses de ensaio acelerado. Os pesquisadores 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 consequente aumento da velocidade de difusão de  $\text{CO}_2$ .

### 2.6.1 REAÇÃO DE CARBONATAÇÃO

O dióxido de carbono, quando em contato com o concreto e na presença da umidade presente nos poros, desencadeia a frente de carbonatação. A difusão da frente de carbonatação avança lentamente do exterior para o interior do concreto, provocando alterações nas propriedades físico-químicas do material. Portanto, a reação de carbonatação transcorre entre o CO<sub>2</sub> e os produtos de hidratação alcalinos do cimento, sendo o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) o principal deles, que em um processo de dissolução/precipitação, geram produtos à base de carbonato (NEVES JR, 2014). A reação é apresentada a seguir:



O hidróxido de cálcio é mais susceptível à carbonatação que o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) porque tal composto é altamente solúvel em meios ácidos. Papadakis et al. (1992) verificaram que a taxa de carbonatação não depende apenas da concentração do hidróxido de cálcio, mas também, do silicato de cálcio hidratado que contém CaO. Portanto, além da contribuição do Ca(OH)<sub>2</sub>, as fases de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) sofrem modificações estruturais devido à reação de carbonatação, porém de forma mais lenta (HASELBACH, 2003). A reação de carbonatação ao consumir os íons Ca<sup>+</sup>, oriundos do Ca(OH)<sub>2</sub> e presentes na solução dos poros, induz por equilíbrio químico a uma compensação por meio da liberação de Ca<sup>+</sup> do C-S-H, por meio da queda do pH. 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 (LAGERBLAD, 2005).



O carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) é o principal produto formado pelas reações de carbonatação, este é insolúvel e precipita nos poros do concreto sob a forma mineralógica de calcita, vaterita e aragonita (SMOCZYK, 1976).

A reação de carbonatação em materiais cimentícios pode trazer benefícios do ponto de vista mecânico e de durabilidade, a partir da redução da porosidade da matriz pela precipitação dos cristais de CaCO<sub>3</sub> nos poros. No entanto, deve-se evitar a carbonatação excessiva, pois pode ocorrer a redução da resistência dos materiais cimentícios quando o CO<sub>2</sub> em excesso atinge o C-S-H, podendo causar sua degradação (MO et al, 2013; YUAN et al, 2013; LU et al., 2018).

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

- 1) Difusão de  $\text{CO}_2$ , ocorre a difusibilidade efetiva, de regiões onde a concentração de  $\text{CO}_2$  é alta, para aquelas onde é baixa (poros do concreto) (PAPADAKIS et al., 1991)
- 2) Permeação de  $\text{CO}_2$  por meio do sólido;
- 3) Solvatação de  $\text{CO}_2$  (gasoso) para  $\text{CO}_2$  (aquoso);
- 4) Hidratação de  $\text{CO}_2$  (aquoso) para  $\text{H}_2\text{CO}_3$ . Este é um passo lento e determinante da taxa;
- 5) Ionização de  $\text{H}_2\text{CO}_3$  para  $\text{H}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ . 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  $\text{CaCO}_3$ , 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  $\text{CaCO}_3$ .

### **2.6.2 FATORES QUE INFLUENCIAM O PROCESSO DE CARBONATAÇÃO**

A reação de carbonatação sofre influência direta do ambiente em que a amostra está inserida e da composição química desta. Nem todos os concretos carbonatam a uma mesma velocidade, pois esta depende da difusividade do  $\text{CO}_2$  que está relacionada a numerosas variáveis, tais como: temperatura, concentração de  $\text{CO}_2$ , consumo e tipo de cimento, porosidade, umidade relativa, relação a/c, grau de hidratação, entre outras (ANDRADE, 1992, p. 78; NEVILLE, 1997, p. 499). Autores como Helene (1986) e Smolczyk (1976) afirmam que o progresso da carbonatação pode cessar após determinado período em função do aumento da compacidade pela deposição dos produtos de hidratação e carbonatação, dificultando a entrada do  $\text{CO}_2$ . Para tanto, os parâmetros relacionados a difusividade e reatividade do  $\text{CO}_2$  são os mais importantes e estão relacionados abaixo.

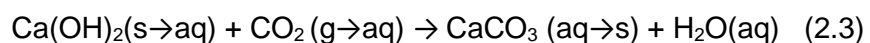
- Temperatura: a taxa de difusão e a taxa de reação de carbonatação aumentam com a temperatura (LIANG et al. (2000) e LAGERBLAD, (2005)). Tuutti (1982) concluiu que o aumento da temperatura, aumenta a mobilidade das moléculas, ou seja, o transporte de substâncias é facilitado. Temperaturas mais elevadas, aumentam a solubilidade de várias substâncias, enquanto temperaturas muito baixas, os líquidos congelam, impedindo o transporte. Para Papadakis et al (1991), a temperatura na faixa entre 20 e 40°C praticamente não influencia na carbonatação, pois o processo ainda é controlado pela difusão. Segundo Liu et al. (2001) e Haselbach e Thomle (2014) o sequestro de CO<sub>2</sub> à pressão atmosférica é crescente até alcançar a temperatura de 60°C, a partir daí ele começa a diminuir. Verificou-se nos referidos estudos que o incremento da temperatura até 60°C acarreta o aumento da difusão do CO<sub>2</sub> para o interior dos poros e da quantidade lixiviada de íons Ca<sup>2+</sup>, promovendo o aumento da carbonatação; já temperaturas maiores que 60°C diminuem a solubilidade do CO<sub>2</sub> na água, reduzindo assim a taxa de carbonatação.
- Concentração de CO<sub>2</sub> e Pressão: ambientes com elevada pressão e concentração de CO<sub>2</sub> aumentam a velocidade de difusão do CO<sub>2</sub>, 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 elevada pressão grandes quantidades de CO<sub>2</sub> na matriz cimentícia antes dos poros serem fechados gera um aumento da frente de carbonatação.
- Teor de água: com exceção da difusão do CO<sub>2</sub>, que se dá na fase gasosa dos poros do concreto, todos os outros processos físico-químicos envolvidos na carbonatação ocorrem nos poros preenchidos com água (PAPADAKIS et al., 1991). A água não é consumida durante a reação de carbonatação, mas é essencial para ativá-la, sendo a quantidade presente nos poros preponderante na velocidade da reação (PAPADAKIS et al., 1989). Logo, um concreto muito seco não carbonata devido à ausência de água necessária para que os íons se formem, reajam e produzam CaCO<sub>3</sub>. 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<sub>2</sub> 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: alterações na umidade relativa do ambiente alteram o teor de umidade dos poros e do material como um todo, e conseqüentemente, a velocidade de difusão do CO<sub>2</sub> para o interior da matriz cimentícia (KULAKOWSKI (2002); PAULETTI (2004)). Bertos et al (2004), consideram que a umidade relativa ótima encontra-se na faixa de 50 e 70% e enfatizam que a taxa de carbonatação decresce para baixos e altos níveis de umidade relativa. Estudos apontam como condições ótimas para carbonatação umidades relativas entre:
  - i. 65% a 85% (HELENE (1986));
  - ii. 50% a 65% (PAPADASKI (1989));
  - iii. 50% a 70% (YING-YU E QUI-DONG (1987));
  - iv. 50% a 70% (NEVILLE (1997));
  - v. 50% a 70% (KULAKOWSKI (2002));
- Composição química do Cimento Portland: Os elementos Ca, Mg, K e Na influenciam notavelmente na carbonatação dos produtos cimentícios. Os hidratos de cálcio presentes nas fases Ca(OH)<sub>2</sub>, C-S-H e C-A-S-H são os principais envolvidos na reação de carbonatação (PETER et al., 2008). No entanto, as adições como cinzas de carvão, escória de alto forno podem resultar na carbonatação de componentes como Mg(OH)<sub>2</sub>, KOH e NaOH (MEIER et al., 2007). Segundo Kobayashi e Uno (1989), Helene (1993), Stumpp et al (2003), em cimentos com adições minerais, o excedente de Ca(OH)<sub>2</sub> (reserva alcalina), dificulta a difusividade do CO<sub>2</sub> para o interior da matriz cimentícia, pois o progresso da carbonatação somente será possível após o consumo total do Ca(OH)<sub>2</sub> na zona de interface para formação de CaCO<sub>3</sub>. A seguir, destaca-se de forma particularizada a carbonatação dos produtos da hidratação do cimento CPV- ARI, utilizado na confecção dos blocos de concreto.

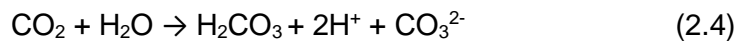
- *Reação com o hidróxido de cálcio:*

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

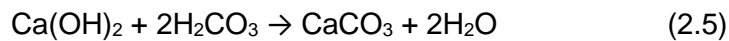


O hidróxido de cálcio é o hidrato produzido em maior quantidade durante a hidratação do cimento Portland e apresenta maior solubilidade em água; sendo

assim, a reação com o CO<sub>2</sub> prontamente progride. Conforme demonstra a Equação (2.3), a carbonatação do hidróxido de cálcio processa-se entre um sólido e um gás, sendo a presença de água fundamental para a dissociação iônica do hidróxido de cálcio e do CO<sub>2</sub>. Os poros capilares são preenchidos com uma solução de elevado pH e muitos cátions com íons hidróxido. O CO<sub>2</sub> de fontes externas entra, se dissolve na solução porosa e dá origem ao ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Conforme demonstra a Equação (2.4) (JOHANNESON et al, 2001; ZIVICA et al, 2001).



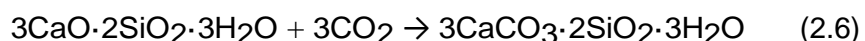
O ácido carbônico reage com o Ca(OH)<sub>2</sub> dissolvido na solução dos poros e precipita sob a forma de carbonato de cálcio, o qual apresenta baixa solubilidade, conforme demonstra a Equação(2.5).



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

- *Reação com o Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H):*

A hidratação do cimento Portland dá origem ao silicato de cálcio hidratado (C-S-H), Ca(OH)<sub>2</sub> e sulfoaluminatos de cálcio hidratados, tais como trissulfo aluminato (etringita) e monossulfato aluminato (Mehta e Monteiro, 2006). Segundo Morandeu et al (2014), a carbonatação do C-S-H inicia-se após a carbonatação do hidróxido de cálcio. Ocorre que a reação de carbonatação ao consumir os íons Ca<sup>+</sup>, advindos do Ca(OH)<sub>2</sub> e presentes na solução dos poros, induz por equilíbrio químico a liberação de Ca<sup>+</sup> do C-S-H. Este processo modifica a relação Ca/Si do C-S-H, alterando a sua composição e transformando o C-S-H em um gel de sílica. A reação de carbonatação que envolve o C-S-H, é demonstrada na Equação 2.6 (LAGERBLAD, B., 2005; SULAPHA et al, 2003).



- *Reação com os sulfoaluminato de cálcio hidratados:*

A reação de hidratação do C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF dá origem à etringita e às fases AFm (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-mono). A composição química da etringita e do AFm altera em conformidade com a duração da hidratação, sendo a concentração de SO<sub>4</sub> o fator mais influente. As fases do AFm em pasta de cimento Portland enrijecido consistem em monossulfatos (Mehta e Monteiro, 2006). Segundo Dilnesa et al. (2007) as fases de AFm são compostas por uma estrutura estratificada que consiste de uma camada primária carregada positivamente [Ca<sub>2</sub>(Al,Fe)(OH)<sub>6</sub>]<sup>+</sup> e uma camada intermediária negativamente carregada [X nH<sub>2</sub>O]<sup>-</sup>, onde o X pode ser substituído pelo possível ânion de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, OH<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> e CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Portanto, a fixação de CO<sub>2</sub> na pasta de cimento ocorre sob a forma de monocarbonato 3CaO(Al<sub>n</sub>Fe<sub>1-n</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(CaCO<sub>3</sub>)<sub>m</sub>H<sub>2</sub>O e bicarbonato 3CaO(Al<sub>n</sub>Fe<sub>1-n</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(CaCO<sub>3</sub>)<sub>0,5</sub>(Ca(OH)<sub>2</sub>)<sub>0,5m</sub>H<sub>2</sub>O. A carbonatação da etringita gera 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<sub>2</sub> e velocidade de carbonatação, portanto quanto maior for a porosidade, maior será a difusividade de CO<sub>2</sub> e a velocidade da carbonatação. Outros fatores também interferem na porosidade, dentre eles destacam-se a pressão de compactação e o tipo de cura (POON et al, 1986; ROYA et al, 1999). Ishida e Maekawa (2000) verificaram que o volume do cristal de carbonato de cálcio é cerca de 11,7% maior que do hidróxido de cálcio, ocorre que logo após a carbonatação os poros da matriz cimentícia reduzem de tamanho devido à precipitação do CaCO<sub>3</sub> e esta apresenta um ganho de resistência mecânica significativo. No entanto, deve-se tomar cuidado com a carbonatação excessiva, pois esta pode promover a redução da resistência mecânica dos materiais cimentícios, uma vez que o CO<sub>2</sub> excedente ao atingir o C-S-H pode promover sua degradação (LU et al., 2018). Atis (2004), estudando a relação entre carbonatação, porosidade e resistência à compressão, verificou haver a tendência de quanto maior for a resistência à compressão, menor a porosidade e, conseqüentemente, menor a profundidade de carbonatação. Mas o aumento da porosidade resulta no aumento da profundidade de carbonatação para uma resistência à compressão constante, ou seja, a resistência mecânica não é parâmetro único para o controle da carbonatação. Portanto, a permeabilidade e a

interconexão de poros devem ser consideradas ao avaliar a carbonatação em diferentes concretos.

- Tipo, tamanho e forma das amostras: as amostras e seus formatos podem influenciar na profundidade da frente de carbonatação. El Hassan et al (2013), Zhan et al (2013), e Master e Tavares (2015) realizaram a cura carbônica em blocos de concreto, já Shao e Lin (2011) realizaram a cura com CO<sub>2</sub> em peças de concreto para pavimentação. Ao analisar as pesquisas verificou-se que os blocos de concreto, os quais apresentam paredes com espessura em torno de 30 mm, absorveram mais CO<sub>2</sub> do que as peças de concreto para pavimentação com espessura da ordem de 60 mm, porém o percentual de CO<sub>2</sub> absorvido em nenhuma pesquisa foi correlacionado à forma e espessura do artefato de concreto. Kulakowski (2002), comparou a profundidade de carbonatação de amostras cilíndricas (diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm) e prismáticas (40 × 40 × 160 mm) produzidos com a mesma argamassa e mesmas condições de exposição ao CO<sub>2</sub>, 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 pesquisadora atribuiu o resultado à possível soma de vetores na difusão do CO<sub>2</sub> das amostras cilíndricas.
- Pressão de compactação: a pressão de compactação empregada durante a produção dos blocos de concreto objetiva o ganho de resistência mecânica do produto. Entretanto, em termos de carbonatação a compactação gera redução da porosidade e permeabilidade, o que dificulta a difusão de CO<sub>2</sub> e precipitação de CaCO<sub>3</sub> nos poros do concreto, resultando em menor desenvolvimento de resistência quando comparado a um concreto que não sofreu compactação (SOROCHKIN et. al (1975).

### **2.6.3 VANTAGENS DA CURA CARBÔNICA EM PRÉ-FABRICADOS CIMENTÍCIOS NÃO ARMADOS**

#### **2.6.3.1 Resistência Mecânica e Durabilidade**

A literatura demonstra que respeitando-se algumas condições impostas e considerando-se determinadas aplicações, o tratamento de materiais cimentícios com CO<sub>2</sub> pode trazer benefícios ao material do ponto de vista mecânico e de durabilidade, por conta da redução da porosidade da matriz cimentícia devido a precipitação dos cristais de CaCO<sub>3</sub> nos

poros (YE (2003), SHAO ET AL. (2006), ZHAN ET AL. (2013), NEVES JR (2014)). No entanto, deve-se tomar cuidado com a carbonatação excessiva, pois esta pode promover a redução da resistência mecânica dos materiais cimentícios, uma vez que o CO<sub>2</sub> excedente ao atingir o C-S-H pode promover sua degradação (LU et al., 2018).

### **2.6.3.2 Captura de CO<sub>2</sub>**

Diversas pesquisas demonstraram que ao expor o material cimentício não armado, recém fabricado, à cura carbônica (em câmara de carbonatação com elevada concentração de CO<sub>2</sub>, umidade relativa, pressão e temperatura adequadas), ocorre a reação de carbonatação acelerada, a qual promove a captura (fixação) permanente do CO<sub>2</sub> presente na atmosfera da câmara nos poros do concreto, devido a precipitação de CaCO<sub>3</sub> ((YE (2003), SHAO ET AL. (2006), LIN E SHAO (2011), ZHAN et al (2013), NEVES JR et al (2014), FORTUNATO et al (2018)).

## **2.6.4 MÉTODOS PARA AVALIAR E ESTIMAR A CAPTURA DE CO<sub>2</sub> EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS**

Para o procedimento experimental de cura carbônica, as matrizes cimentícias recém-fabricadas devem ser inseridas em câmara de carbonatação com parâmetros adequadamente configurados quanto à temperatura, pressão, umidade e concentração de CO<sub>2</sub>, onde dar-se-á início à reação de carbonatação acelerada.

Diferentes métodos de ensaios podem ser empregados para medir a profundidade da frente de carbonatação e a fixação de carbono nos poros da matriz cimentícia. A seguir serão descritos alguns deles.

### **2.6.4.1 Verificação do avanço da frente de carbonatação com aspersão de fenolftaleína ou Medição da Profundidade de Penetração de CO<sub>2</sub> com Indicador de pH**

A fenolftaleína diluída em álcool é empregada para avaliar a extensão da carbonatação por meio da aspersão desta solução. Neste procedimento, ao aspergir fenolftaleína na superfície do concreto, o Ca(OH)<sub>2</sub> adquire uma cor rosa e a parte carbonatada permanece incolor. No entanto, é importante lembrar que a cor rosa indica a presença de Portlandita, e não necessariamente a falta de carbonatação. Portanto, deve-se tomar cuidado para evitar

que o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  contamine a amostra, pois pode causar a falsa impressão de que não ocorreu a carbonatação (NEVILLE, 2011). Segundo Galan, Mora e Sanjuan (2010) não existe relação entre a profundidades de carbonatação e a quantidades de carbonato cálcio formado.

A avaliação da profundidade de carbonatação através da aplicação de fenolftaleína em superfícies fraturadas e/ou cortadas do concreto exposto à ação do  $\text{CO}_2$  por um intervalo de tempo é amplamente utilizada. No entanto, alguns estudos (FUKUSHIMA et al., 1998; RECOMENDAÇÕES DE RILEM, 1988) indicam que existe uma área parcialmente carbonatada onde a determinação do pH é complexa, mesmo com o uso da fenolftaleína.

A carbonatação se inicia na superfície e avança para o centro da amostra (PADE, GUIMARÃES, 2007). Portanto, é crucial que a medição da profundidade de carbonatação por meio do método da fenolftaleína seja realizada perpendicularmente nas amostras cortadas, evitando a obtenção de dados apenas da parte superficial que está diretamente em contato com o ambiente com  $\text{CO}_2$ . As análises da profundidade de carbonatação precisam ser realizadas imediatamente após a retirada das amostras do ambiente onde estão, para evitar que absorvam mais  $\text{CO}_2$ , o que pode modificar os resultados do teste. Se a medição não puder ser realizada imediatamente após a coleta, a amostra deve ser mantida em um local sem  $\text{CO}_2$  (a vácuo) (RILEM RECOMMENDATIONS, 1988).

A medição da profundidade de carbonatação deve ser realizada utilizando-se paquímetro e/ou softwares ImageJ e Adobe Photoshop.

#### **2.6.4.2 Método do Ganho de Massa**

Shao et al. (2006), Shao et al. (2010), Shao e Lin (2011), Rostami et al (2012), Zhan et al. (2013), Neves Jr. (2014), Fortunato et al (2018) verificaram que a carbonatação acelerada em materiais a base de cimento com pouca idade, obedecendo determinadas condições experimentais de umidade, temperatura, concentração de  $\text{CO}_2$  e tempo de exposição, aumenta a massa dos corpos de prova devido a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  na matriz cimentícia, alterando a porosidade, aumentando a densidade e por fim elevando a resistência, sendo o método de ganho de massa eficaz.

O aumento de massa é advindo do somatório das reações químicas que ocorrem concomitantemente durante a cura no interior da câmara de carbonatação, sendo estas: vaporização, hidratação e carbonatação.

A quantidade de CO<sub>2</sub> absorvida é estimada através do ganho de massa fornecido pela equação 2.3 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.

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

Onde:

(Massa)antes, CO<sub>2</sub> – Massa da amostra antes da carbonatação;

(Massa)depois, CO<sub>2</sub> – Massa da amostra depois da carbonatação;

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

(Massa)S.do. Aglomerante – Massa inicial dos aglomerantes reativos.

A água a ser computada na equação acima é advinda 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. Essa água é medida através de papéis absorventes dispostos no interior da câmara (SHAO et al., 2006).

Não se pode afirmar que os materiais cimentícios não armados curados ao ar livre, por possuírem menor umidade inicial, apresentarão menor potencial de carbonatação, uma vez que a menor formação de hidratos devido à cura seca poderá gerar uma menor barreira alcalina, permitindo o avanço da frente de carbonatação e conseqüentemente maior formação de CaCO<sub>3</sub> e H<sub>2</sub>O (EL-HASSAN E SHAO, 2013).

Portanto, para que o cálculo da captura de CO<sub>2</sub> seja realizado de forma correta não é possível negligenciar a água perdida. A Figura 53 demonstra o ensaio de ganho de massa.

**Figura 53 - Ensaio de ganho de massa realizado em peças de concreto para pavimentação**



Fonte: Fortunato et al (2018).

### **2.6.4.3 Método da Curva de Massa**

Utiliza-se uma balança eletrônica para registrar o aumento de massa dos materiais cimentícios não armados no decorrer da reação de carbonatação. A balança é zerada a partir do momento em que as amostras são inseridas na câmara e se inicia o processo de carbonatação. A partir do momento em que o CO<sub>2</sub> é injetado na câmara, o ganho de massa passa a ser registrado. Ao final do procedimento de cura o gás é liberado à pressão atmosférica e a massa residual registrada pela balança representa a captura total de massa de CO<sub>2</sub> (SHAO et al. (2006), SHAO et al. (2010), SHAO e LIN (2011), MACMASTER E TAVARES (2015).

A Figura 54 ilustra a câmara de carbonatação alocada sobre a balança, esta por sua vez registra o peso durante a reação carbonatação.

**Figura 54 - Quantificação da captura de CO<sub>2</sub> em blocos de concreto, através do método da curva de massa**



Fonte: MacMaster e Tavares (2015).

#### **2.6.4.4 Termogravimetria**

Entre as técnicas de análise térmica, a mais utilizadas para determinação quantitativa dos componentes de uma amostra é a termogravimetria e a termogravimetria derivativa (TG/DTG). Segundo Cavalheiro e Denari (2012), a análise termogravimétrica (TG) é uma técnica termo analítica que acompanha a variação da massa da amostra, em função do tempo ou temperatura. Já a termogravimetria derivada (DTG), trata-se de um arranjo matemático no qual a derivada da variação de massa em relação ao tempo ( $dm/dt$ ) é registrada em função da temperatura ou tempo. Ou seja, a DTG é a derivada primeira da TG.

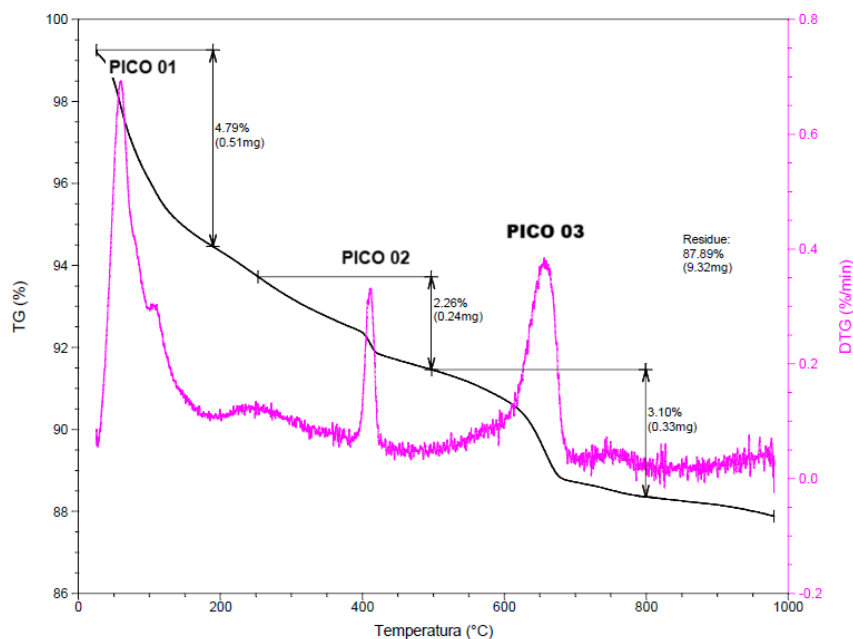
Além do monitoramento de massa, a técnicas analíticas como a termogravimetria e termogravimetria derivativa (TG/DTG), são importantes ferramentas utilizadas para a verificação da quantidade de CO<sub>2</sub> capturado (fixado) por meio da carbonatação, pois as faixas de decomposição correspondentes à desidroxilação do Ca(OH)<sub>2</sub> (380-450°C) e a descarbonatação do CaCO<sub>3</sub> (500-750°C), estão bem estabelecidas na literatura (TAYLOR, 1997; HEWLETT, 1998). Modificações que ocorrem nos silicatos hidratados por conta da carbonatação podem ser também verificadas por meio de alterações nos picos referentes à água total combinada até 380°C (ROSTAMI et al, 2012).

Segundo Neves Junior et al (2013) e Possan (2019), as análises termogravimétricas (TG/DTG) são exímias ferramentas para a determinação do CO<sub>2</sub> fixado na matriz cimentícia, sendo seu emprego indispensável nos estudos de captura de CO<sub>2</sub>. A determinação da captura de CO<sub>2</sub> pode ser realizada por meio da comparação entre uma amostra carbonatada e outra

não carbonatada, considerando a perda de massa dos compostos em relação à temperatura de ensaio, a partir de relações estequiométrica. A diferença entre as perdas de massa dos compostos da amostra carbonatada e não carbonatada confere o montante de CO<sub>2</sub> capturado na reação de carbonatação.

Galan, Mora e Sanjuan (2010) afirmaram que através de técnicas termogravimétricas pode ser determinado o CO<sub>2</sub> capturado, na forma de carbonato de cálcio. A Figura 55, demonstra a TG/DTG de uma amostra de bloco de concreto carbonatada, em que o Pico 01 trata-se da desidratação do C-S-H, monossulfatos e etringita, o Pico 02 trata-se da desidroxilação do Ca(OH)<sub>2</sub> e o Pico 03 da descarbonatação do CaCO<sub>3</sub>. Os pontos de início e fim dos picos mencionados foram determinados através da ferramenta *Data Reader*, do programa OriginPro 8.5.

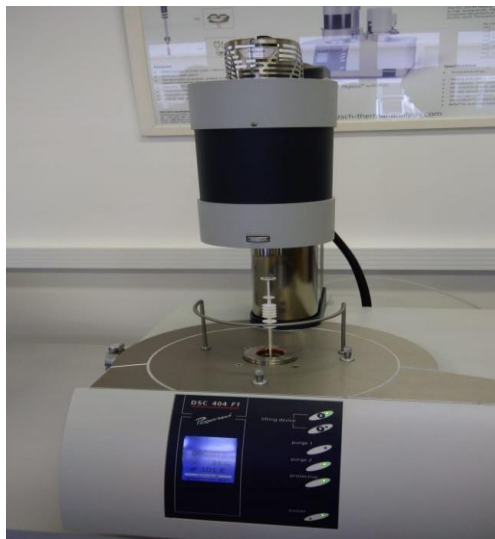
**Figura 55 - TG/DTG de uma amostra de concreto carbonatada.**



Fonte: Autor (2025).

Autores como Papadakis et al. (1992), Fukushima et al. (1998), Huijgen et al. (2005), Chang e Chen (2006), Huntzinger (2006), Rostami et al (2012), El-Hassan et al (2013), Zhan et al (2013), Neves Jr et al (2014), El-Hassan e Shao (2015), utilizaram as análises termogravimétricas (TG/DTG) para quantificar o CO<sub>2</sub> capturado pelas matrizes cimentícias. A Figura 56 demonstra um equipamento de análise termogravimétrica.

**Figura 56 - Equipamento para realização de análise termogravimétrica modelo 404 F1 Pegasus® marca Netzsch**



Fonte: Autor (2019).

#### **2.6.4.4 Considerações sobre os métodos**

Os métodos demonstrados para quantificar a captura de CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios foram utilizados pelos autores Ye (2003), Shao et al (2010), Lin e Shao (2011), Neves Jr (2014), Rostami et al (2012), Boyd et al (2012), El - Hassan et al (2013), Zhan et al (2013), El - Hassan e Shao (2015) e Fortunato et al (2018). Por meio dos métodos de ganho de massa, curva de massa e termogravimetria os referidos autores conseguiram determinar o percentual de CO<sub>2</sub> capturado. No entanto, a termogravimetria é um método antigo e consolidado, as suas definições e normas para nomenclatura existem desde 1965, foram traduzidas para a língua portuguesa em 1980, por Giolito e Ionashiro, por delegação da Confederação Internacional de Análise Térmica e Calorimetria (ICTAC) e Associação Brasileira de Análise Térmica e Calorimetria (ABRATEC) o que demonstra confiabilidade quanto ao método de ensaio, além disso verifica-se que por meio da termogravimetria é possível quantificar o produto resultante do processo químico, uma vez que envolve uma reação química com estequiometria definida. Logo, esse método pode ser considerado o mais confiável, por estar estabelecido há muitos anos no meio acadêmico, promovendo resultados precisos e fidedignos. Contudo, fatores como o tipo de forno, tipo de cadinho a quantidade de material, o tamanho dos grãos da amostra (quando sólido), a taxa do fluxo do gás, a taxa de aquecimento, o tipo de gás de purga (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, entre outros) e o tratamento prévio da amostra, influenciam diretamente os resultados das análises térmicas. Sendo assim, visando-se obter medições de TGA

confiáveis, deve-se manter um padrão de procedimento em todos os ensaios, sempre que possível (SCRIVENER, SNELLINGS, LOTHENBACH, 2016).

Os artigos constantes no estado da arte desta pesquisa (Ye (2003), Shao et al (2010), Lin e Shao (2011), Rostami et al (2012), Boyd et al (2012), El - Hassan et al (2013), Zhan et al (2013), El Hassan e Shao (2015) e Fortunato et al (2018)) atestam que os métodos de ganho de massa e curva de massa mensuram o CO<sub>2</sub> capturado, o fato é que os referidos métodos apesar de eficazes, foram desenvolvidos recentemente e não contam com normalização, porém esse fato não os invalida.

## ***2.7 ESTUDOS ENVOLVENDO O PROCESSO DE CURA CARBÔNICA EM PRÉ-FABRICADOS CIMENTÍCIOS NÃO ARMADOS***

Diversos estudos envolvendo a utilização da cura carbônica em pré-fabricados cimentícios não armados têm sido realizados buscando a obtenção de parâmetros ideais de cura, para que o material cimentício carbonatado não apenas adquira resistência à compressão exigida por Norma, mas também seja sustentável ao passo que promova a captura de CO<sub>2</sub> 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, por meio das Tabela 8 a Tabela 12 serão apresentadas breves descrições das metodologias bem como os resultados alcançados pelos trabalhos contidos na literatura.

**Tabela 8 - Pesquisas envolvendo a cura carbônica em pré-fabricados cimentícios não armados.**

Autores	Pré fabricado não armado	Dimensões (mm)	Processo de produção/ compactação	Tempo e tipo de cura inicial	Tempo de cura com CO <sub>2</sub>	Câmara de carbonatação				Captura de CO <sub>2</sub> (%)	Método Captura de CO <sub>2</sub> (%)	Resistência compressão
						Conc. de CO <sub>2</sub> (%)	Pressão (MPa)	T(°C)	Umid. (%)			
Ye (2003)	Cubos concreto seco	100x100x100	Não informado	sem cura inicial	2hs	100	0,05	Ambiente	Não informado	7,0 - 8,0	Ganho de massa	Os cubos carbonatados apresentaram resistências à compressão superiores a 40 MPa e módulos de ruptura superiores a 6 MPa, sendo estes superiores aos referenciais (não carbonatados)
Shao et al (2010)	Blocos de concreto	127x76x38	Compactados com prensa 10MPa	sem cura inicial	2hs	100	0,5	variou de 45 a 95	Não informado	9,8	Curva de massa e ganho de massa	Resistência logo após a carbonatação de 10,3 MPa e resistência aos 28 dias das peças referenciais (não carbonatadas) 20,5MPa
Lin e Shao (2011)	Amostras de concreto seco	127x76x20	Prensadas em maquina hidráulica	sem cura inicial	2hs	99,5	0,15	40 - 56	65	11,7	Curva de massa e ganho de massa	9,6 MPa valor equivalente a 60% da resistência da amostra referência (cura úmida) aos 28 dias

**Tabela 9 - Pesquisas envolvendo a cura carbônica em pré-fabricados cimentícios não armados (continuação).**

Autores	Pré fabricado não armado	Dimensões (mm)	Processo de produção/ compactação	Tempo e tipo de cura inicial	Tempo de cura com CO <sub>2</sub>	Câmara de carbonatação				Captura de CO <sub>2</sub> (%)	Método captura de CO <sub>2</sub> (%)	Resistência compressão
						Conc. de CO <sub>2</sub> (%)	Pressão (MPa)	T(°C)	Umid. (%)			
Lin e Shao (2011)	Peças de concreto para pavimentação	100x200x64	Vibrados	2hs cura ao ar livre	4hs	99,5	0,15	56	65	3,4	Curva de massa e ganho de massa	Resistência da peça carbonatada após 24 h da cura de 31 MPa, resistência referência 35MPa (cura úmida)
				19 horas cura ao ar livre	5hs	99,5	0,15	56	65	7,4	Curva de massa e ganho de massa	Resistência após 24 h da cura de 46 MPa, resistência referência 35MPa (cura úmida)
Boyd et al (2012)	Concreto seco a/c=0,36	Não informado	Vibração	18hs cura ao ar livre	2hs	100	0,15	25	Não informado	7,3	Curva de massa e ganho de massa	Resistências à compressão amostra carbonatada após 20 horas da cura de 23,3MPa e aos 28 dias 28,8MPa
				18hs cura ao ar livre	2hs+spray de água	100	0,15	25	Não informado	7,4	Curva de massa e ganho de massa	Resistências à compressão amostra carbonatada após 20 horas da cura de 23,3MPa e aos 28 dias 38,8MPa

Tabela 10 - Pesquisas envolvendo a cura carbônica em pré-fabricados cimentícios não armados (continuação).

Autores	Pré fabricado não armado	Dimensões (mm)	Processo de produção/ compactação	Tempo e tipo de cura inicial	Tempo de cura com CO <sub>2</sub>	Câmara de carbonatação				Captura de CO <sub>2</sub> (%)	Método captura de CO <sub>2</sub> (%)	Resistência compressão
						Conc. de CO <sub>2</sub> (%)	Pressão (MPa)	T(°C)	Umid. (%)			
El - Hassan et al (2013)	Blocos de concreto a/c=0,40	largura de 200mm e espessura variando de 25 a 33mm	Produzidos em maquina manual	cura ao ar livre de 18hs	4hs	100	0,1	25	50	23	Curva de massa, ganho de massa e termogravimetria	Resistências com spray de água após 1 dia da cura carbônica comparáveis aos não carbonatados aos 28 dias
Zhan et al (2013)	Blocos de concreto com 0%, 50% e 100% agregados de demolição reciclados	70x70x70	Moldados em forma de aço, compactados manualmente com martelo e haste de madeira e ao final uma compressão de 30 MPa foi aplicada	sem cura inicial	6hs, 12hs e 24hs	100	0,01	Não informado	Não informado	Valores variaram de 13,41% a 32,65% e aumentaram de acordo com o aumento do tempo de carbonatação e com maior adição de agregados	Ganho de massa e termogravimetria	Ganhos de resistência variando de 108% a 151% dentro das 24hs de carbonatação

**Tabela 11 - Pesquisas envolvendo a cura carbônica em pré-fabricados cimentícios não armados (continuação).**

Autores	Pré fabricado não armado	Dimensões (mm)	Processo de produção/ compactação	Tempo e tipo de cura inicial	Tempo de cura com CO <sub>2</sub>	Câmara de carbonatação				Captura de CO <sub>2</sub> (%)	Método captura de CO <sub>2</sub> (%)	Resistência compressão
						Conc. de CO <sub>2</sub> (%)	Pressão (MPa)	T(°C)	Umid. (%)			
El Hassan e Shao (2015)	Blocos de concreto produzidos com escória de alto forno expandida não sensível à carbonatação como agregado	127x76x38	Compactados com martelo vibrador	cura ao ar livre de 0hs, 4hs, 6hs, 8hs e 18hs	2hs, 4hs e 96hs	100	0,01	25	50	Valores variaram de 8,3% a 35,1% e aumentaram de acordo com o aumento do tempo de carbonatação	Curva de massa, ganho de massa e termogravimetria	Maiores resistências para maiores tempos de carbonatação logo nas primeiras idades
MacMaster e Tavares (2015)	Blocos de concreto	Largura de 100mm	Não informado	Não executado	2hs	100	1,39	30	50	8,62	Curva de massa	Após 2 hs resistência à compressão líquida de 35,72MPa bloco carbonatado e 10,14MPa bloco curado à vapor
Fortunato et al (2018)	Peças de concreto para pavimentação	100x200x60	Produzido industrialmente por vibro prensagem	12hs cura ao ar livre e 12hs cura inicial a vapor	4hs e 16hs	20	0,1	23	65	Maior captura de CO <sub>2</sub> para maior tempo de cura com CO <sub>2</sub> e cura inicial ao ar absorveu mais CO <sub>2</sub> também, valores variaram de 1,5% a 5,1%	Ganho de massa	Aos 02 dias a resistência à compressão das peças carbonatadas foi superior às peças referenciais e aos 28 dias a resistência das peças carbonatadas com cura inicial à vapor apresentam resistência equivalente às peças referenciais e ligeiramente superior às peças carbonatadas com cura inicial ao ar livre

**Tabela 12 - Pesquisas envolvendo a cura carbônica em pré-fabricados cimentícios não armados (continuação).**

<b>Autores</b>	<b>Pré fabricado não armado</b>	<b>Dimensões (mm)</b>	<b>Processo de produção/ compactação</b>	<b>Tempo e tipo de cura inicial</b>	<b>Tempo de cura com CO<sub>2</sub></b>	<b>Conc. de CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Pressão (MPa)</b>	<b>T(°C)</b>	<b>Umid (%)</b>	<b>Captura de CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Método captura de CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Resistência compressão</b>
Meng et al (2019)	Blocos (cubos) de concreto seco A/C=0,3 submetidos à elevadas temperaturas	70x70x70	Moldados em laboratório, mistura durante 60 s, 700 g peso do bloco cúbico, compactados sob pressão de 7,8 MPa durante 20 s.	Não informado	28 dias	20	0,1	20	70	5,19	TG/DTG	Após 28 dias de cura carbônica, amostras foram transferidas para forno elétrico com temperaturas (300 °C, 500 °C, 600 °C e 800 °C). A 600 °C, verificou-se melhora na resistência e absorção de água dos blocos curados com CO <sub>2</sub> em detrimento dos blocos curados ao ar.
Gulerla et al (2024)	Blocos (cubos) de concreto	100x100x100	Moldados em laboratório	18hs de cura em molde (27°C e 100% UR), 2hs de cura úmida (26°C e 50% UR), cura carbônica 6hs, 12hs e 24hs, 72 hs aspersão de água + saco plástico	6hs, 12hs, 24hs	100	0,1	-	-	14% (6hs), 20% (12hs) e 24% (24hs)	TG/DTG	A carbonatação por 12 horas apresentou os melhores resultados em termos de propriedades mecânicas, resistência e permeabilidade. A carbonatação em excesso, 24hs, prejudicou as propriedades de resistência.

### **2.7.1 Resumo das variáveis adotadas nas pesquisas apresentadas**

Durante o levantamento das pesquisas que tratam da cura carbônica em pré-fabricados cimentícios não armados observou-se que existe uma gama de variáveis a serem analisadas e consideradas, tais como: tipo de pré-fabricado não armado, dimensões da amostra e da câmara, processo de produção/compactação, tempo e tipo de cura inicial (úmida, ao ar livre, à vapor), tempo de cura com CO<sub>2</sub>, configurações da câmara de carbonatação (concentração de CO<sub>2</sub>, pressão, temperatura, umidade) e método empregado para quantificar a captura de CO<sub>2</sub>. Tais variáveis afetam diretamente os resultados de percentual de CO<sub>2</sub> absorvido (os quais apresentam elevada variabilidade) e ganho de resistência à compressão.

Nas pesquisas apresentadas, Fortunato et al (2018) produziram as peças de concreto para pavimentação na indústria e o processo de compactação foi o de vibro-prensagem, já Lin e Shao (2011) informaram que as peças de concreto para pavimentação foram produzidas em escala industrial, porém foram compactados apenas por vibração, El-Hassan et al (2013) produziram blocos em laboratório utilizando máquina manual e os demais estudos utilizaram materiais cimentícios produzidos em laboratório obtidos por processo de compactação não apropriado para a finalidade a que se destinam, pois segundo Fernandes (2011) a compactação de blocos e peças de concreto para pavimentação deve ser realizada por meio de máquinas manuais, pneumáticas ou hidráulicas. Contudo, segundo Sorochkin et. al (1975), a compactação reduz a porosidade, podendo interferir na difusividade do CO<sub>2</sub>, e talvez por esse motivo não tenha sido empregada na maioria das pesquisas, ou até mesmo por questões financeiras e/ou disponibilidade de indústria parceira. Observou-se que nos estudos de Shao et al (2006), Zhan et al (2013) e El-Hassan e Shao (2015) os blocos de concreto não apresentaram dimensões especificadas pela Norma ABNT NBR 6136:2016 e provavelmente não são vazados. Conforme já mencionado anteriormente neste texto (item 2.7), o processo de produção/compactação e as dimensões/formatos dos pré-fabricados cimentícios interferem diretamente na velocidade da reação de carbonatação e no avanço da frente carbonatação, promovendo importante variabilidade no percentual de CO<sub>2</sub> absorvido.

Quanto aos métodos de ensaio para verificação do percentual de CO<sub>2</sub> capturado, observa-se que a maioria dos estudos utilizam os métodos do ganho de massa e curva de massa e poucos utilizam a termogravimetria. Acredita-se que cada autor utiliza o método mais aproximado da realidade da sua pesquisa, seja por questões financeiras ou por

disponibilidade de equipamentos laboratoriais. Os métodos de ganho de massa e curva de massa não são normalizados, a termogravimetria segue normas como a ASTM E1131 - *Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry*, porém ainda não há um consenso ou norma para quantificar especificamente a captura de CO<sub>2</sub> por TG.

Na maioria dos estudos, a concentração de CO<sub>2</sub> empregada no interior da câmara de carbonatação foi de 100%. A máxima concentração de CO<sub>2</sub> no interior da câmara permite que a cura carbônica atinja o seu objetivo, o qual está relacionado à máxima produção de CaCO<sub>3</sub> na matriz cimentícia.

Nos estudos de Lin e Shao (2011), Rostami et al (2012), Boyd et al (2012), El - Hassan et al (2013), El - Hassan e Shao (2015) e Fortunato et al (2018), Gulerla et al (2024) foi possível verificar que a cura inicial (cura ao ar livre ou cura úmida) realizada anteriormente à cura carbônica, interferiu diretamente na hidratação do produto cimentício não armado, no avanço da frente de carbonatação, na captura de CO<sub>2</sub> e ganho de resistência. Os pré-fabricados cimentícios não armados submetidos à cura inicial ao ar livre absorveram mais CO<sub>2</sub> do que os submetidos à cura úmida inicial; com hipótese de que a não realização de cura úmida inicial gerou menos produtos de hidratação, reduzindo a barreira alcalina, propiciando um maior avanço da frente de carbonatação, permitindo que mais CO<sub>2</sub> fosse incorporado na matriz cimentícia. Os pré-fabricados cimentícios não armados submetidos à cura inicial ao ar livre absorveram mais CO<sub>2</sub> do que os carbonatados imediatamente após à produção; com hipótese de que a cura inicial ao ar livre reduziu a água livre da superfície, abrindo espaço para a difusão de gás e a precipitação de carbonato de cálcio. Em todas as pesquisas analisadas os pré-fabricados cimentícios não armados carbonatados (submetidos ao não à cura inicial) apresentaram maior resistência mecânica quando comparados aos não carbonatados (referenciais) logo nas primeiras idades, tal resultado foi atribuído ao fato de que a carbonatação torna a peça prematura, ou seja, sua maturação é acelerada e estes acabam adquirindo as propriedades mecânicas esperadas aos 28 dias muito mais rapidamente. Verificou-se também que os materiais cimentícios que receberam spray de água após a cura carbônica apresentaram maiores valores de resistência mecânica do que os carbonatados sem spray de água. A hipótese é que tal resultado é decorrente do fato de que, ao receber a água após a cura, o corpo de prova eleva sua umidade interna, permitindo que as reações de hidratação e conseqüente ganho de resistência continuassem de forma mais vigorosa ao longo do tempo. Dentre as amostras de pré-fabricados não armados ensaiadas, os blocos de concreto foram os que mais absorveram CO<sub>2</sub>, e provavelmente isso se deva à

menor espessura das paredes do bloco e a menor pressão de compactação durante sua produção, permitindo uma maior difusividade de CO<sub>2</sub>.

Por fim, observa-se que os estudos são escassos e apresentam elevada variabilidade, logo a existência de padronização e normalização tornam-se necessárias para que os resultados sejam mais congruentes, possibilitando a implantação desse procedimento de cura em indústrias de pré-fabricados cimentícios não armados no Brasil e ao redor do mundo.

### **2.7.2 Estudos sobre os parâmetros a serem controlados em câmaras de carbonatação fabricadas por pesquisadores**

As câmaras de carbonatação, em geral, são empregadas nos laboratórios de engenharia civil tanto para ensaios de verificação da vida útil do concreto armado, como para ensaios de cura com CO<sub>2</sub> de materiais cimentícios não armados. As referidas câmaras podem ser compradas de fabricantes especializados e apresentam elevado custo, ou podem ser construídas pelos próprios pesquisadores. Ocorre que na literatura não se encontra um manual de confecção e operação de câmara de carbonatação acelerada. Observa-se que o desenvolvimento e fabricação desta depende muito das necessidades e condições financeiras da pesquisa, não existindo um padrão ou Norma Técnica a ser seguido. O presente tópico traz uma revisão bibliográfica acerca das diferentes câmaras de carbonatação confeccionadas por pesquisadores, em que foi possível verificar grande variação quanto ao material a ser empregado na estrutura da câmara, localização das válvulas de entrada e saída de CO<sub>2</sub> e ar, controle de temperatura e umidade da mesma, entre outros. Para tanto, nas Tabela 13 a Tabela 17, serão apresentadas diferentes pesquisas em que as câmaras de carbonatação foram confeccionadas pelos pesquisadores e serão enfatizados os parâmetros que devem ser verificados e controlados devido a sua influência na reação de carbonatação.

**Tabela 13 - Resumo das diferentes câmaras de carbonatação, conforme relatado na literatura.**

Autor	Estrutura da câmara		Ventilação	Entrada e saída de CO <sub>2</sub> e ar	Configurações da câmara				Sensores	Automação	Estanqueidade
	Material	Dimensões (comp x prof x alt)			Concentração de CO <sub>2</sub>	Temperatura	Umidade	Pressão			
John (1995)	Não informado	Não informado	Ventilador de micro computador	Entrada de CO <sub>2</sub> e ar região superior da câmara e saída de CO <sub>2</sub> e ar na região inferior	5% - controlada pela proporção entre as vazões de CO <sub>2</sub> e ar (circuito aberto e alimentação contínua)	Controlada em sala climatizada	Não controlada, apenas registrada	Não informado	Temperatura e umidade, porém não foi informado se havia sensor de CO <sub>2</sub>	Não realizada	Não informado
Kulawoski (2002)	Não informado	50cm x 81cm x 117cm	Dois ventiladores 9cmx9cm instalados na região inferior da câmara	Válvulas agulha e redutoras de pressão	5% - controlada pela proporção entre as vazões de CO <sub>2</sub> e ar (circuito aberto e alimentação contínua)	Controlada em sala climatizada	Controlada com sais	Não informado	Temperatura e umidade, porém não foi informado se havia sensor de CO <sub>2</sub>	Não realizada	Não informado
Silva (2002)	metal e vidro	115x120x90	Não informado	Não informado	0% a 100% - controlada pela proporção entre as vazões de CO <sub>2</sub> e ar (circuito aberto e alimentação contínua)	Controlada em sala climatizada	Controlada através de recipiente com água e desumidificador elétrico automático	Não informado	Não informado	Não informado	Não informado

**Tabela 14 - Resumo das diferentes câmaras de carbonatação, conforme relatado na literatura (continuação).**

Autor	Estrutura da câmara		Ventilação	Entrada e saída de CO <sub>2</sub> e ar	Configurações da câmara				Sensores	Automação	Estanqueidade
	Material	Dimensões (comp x prof x alt)			Concentração de CO <sub>2</sub>	Temperatura	Umidade	Pressão			
Abreu (2004)	Construída em madeira com estrutura interna e prateleiras em ferro e malhas de aço	82x52x126	Ventilador de 9cm de diâmetro, localizado na parte inferior da câmara	Entrada de CO <sub>2</sub> e ar região superior da câmara e saída de CO <sub>2</sub> e ar na região inferior	5% - controlada pela proporção entre as vazões de CO <sub>2</sub> e ar (circuito aberto e alimentação contínua)	Não controlada, apenas registrada	Não controlada, apenas registrada	Não informado	Temperatura e umidade, porém não foi informado se havia sensor de CO <sub>2</sub>	Não informado	Não informado
Abreu (2004)	Fibra de vidro	80x50x50	Não utilizou ventilação	Entrada de CO <sub>2</sub> e ar na região inferior da câmara e saída de CO <sub>2</sub> e ar da região superior	50% - controlada pela proporção entre as vazões de CO <sub>2</sub> e ar (circuito aberto e alimentação contínua)	Não controlada, apenas registrada	Não controlada, apenas registrada	Não informado	Temperatura e umidade, porém não foi informado se havia sensor de CO <sub>2</sub>	Não informado	Não informado
Pauletti (2004)	Câmara é feita de acrílico e as bandejas internas em metal vazado	Volume de 245 litros	Dois ventiladores na parte superior e mais dois na parte inferior, para circulação do gás	Entrada de CO <sub>2</sub> é feita na parte inferior e o expurgo, na parte superior	60% ou mais - controlada pela proporção entre as vazões de CO <sub>2</sub> e ar (circuito aberto e alimentação contínua)	Controlada em sala climatizada	~70% - controlada por lastro de cloreto de sódio (NaCl), registrada por higrômetros	Pressão atmosférica controlada com Manometro tipo Bourbon	Temperatura e umidade, porém não foi informado se havia sensor de CO <sub>2</sub>	Não informado	Não informado

Tabela 15 - Resumo das diferentes câmaras de carbonatação, conforme relatado na literatura (continuação).

Autor	Estrutura da câmara		Ventilação	Entrada e saída de CO <sub>2</sub> e ar	Configurações da câmara				Sensores	Automação	Estanqueidade
	Material	Dimensões (comp x prof x alt)			Concentração de CO <sub>2</sub>	Temperatura	Umidade	Pressão			
McGrath (2005)	Dois tambores de 200 litros (altura: 85 cm; diâmetro: 57 cm)	Altura: 85 cm, Diâmetro: 57 cm	Ventiladores de baixa vazão permitem um fluxo ascendente	Controlada por válvula solenóide e válvula agulha	4% - controlada pela proporção entre as vazões de CO <sub>2</sub> e ar (circuito aberto e alimentação contínua)	Controlada por uma lâmpada de 250W conectada um circuito de controle e relé - variou entre 23°C e 26°C	Controlada com solução saturada de sal composta de NaNO <sub>2</sub> e água - variou entre 58% e 62%	Não informado	Temperatura e umidade, porém não foi informado se havia sensor de CO <sub>2</sub>	Não informado	Juntas e grampos de vedação foram usados para fazer um sistema quase hermético
Barros (2008)	Metal e vidro	Não informado	Ventilador de microcomputador	Entrada de CO <sub>2</sub> e ar região superior da câmara e saída de CO <sub>2</sub> e ar na região inferior	5% - controlada pela proporção entre as vazões de CO <sub>2</sub> e ar (circuito aberto e alimentação contínua)	Não controlada, apenas registrada	Não controlada, apenas registrada	Não informado	Temperatura e umidade, porém não foi informado se havia sensor de CO <sub>2</sub>	Não informado	Não informado

Tabela 16- Resumo das diferentes câmaras de carbonatação, conforme relatado na literatura (continuação).

Autor	Estrutura da câmara		Ventilação	Entrada e saída de CO <sub>2</sub> e ar	Configurações da câmara				Sensores	Automação	Estanqueidade
	Material	Dimensões (comp x prof x alt)			Concentração de CO <sub>2</sub>	Temperatura	Umidade	Pressão			
Salomão e Silva (2008)	Chapas de acrílico de 10 mm	100cm x 60cm x 65cm	Não utilizou ventilação	Apenas duas válvulas localizadas na região inferior da câmara para entrada e saída de CO <sub>2</sub> e ar	5% - controlada pela proporção entre as vazões de CO <sub>2</sub> e ar (circuito aberto e alimentação contínua)	Não controlada, registrada através de um termo-higrômetro	Não controlada, registrada através de um termo-higrômetro	Pressão atmosférica controlada com Manometro tipo Bourbon	Temperatura e umidade, porém não foi informado se havia sensor de CO <sub>2</sub>	Não informado	A vedação é feita como uma capela química
Saldanha (2013)	Dessecador de vidro	Não informado	Ventilador de 12 Volts	Entrada e saída de CO <sub>2</sub> e ar ocorrem pela parte superior do exsicador	O fluxo de CO <sub>2</sub> advém de um cilindro que entra em contato com o ar dentro do exsicador, de forma a obter as concentrações pretendidas para o ensaio a desenvolver.	Controlada e registrada através de um termo-higrômetro	Controlada com sais e registrada	Pressão atmosférica controlada com Manometro tipo Bourbon	Temperatura, umidade e CO <sub>2</sub>	Software DAS 100® e GasLab	Não informado

Tabela 17 - Resumo das diferentes câmaras de carbonatação, conforme relatado na literatura (continuação).

Autor	Estrutura da câmara		Ventilação	Entrada e saída de CO <sub>2</sub> e ar	Configuração da câmara				Sensores	Automação	Estanqueidade
	Material	Dimensões (comp x prof x alt)			Concentração de CO <sub>2</sub>	Temperatura	Umidade	Pressão			
Lucena (2016)	Câmara executada com chapa de madeira compensada, espuma líquida expansiva de poliuretano e chapa de aço inox	100cm x 60cm x 85cm	Dois ventiladores tipo coolers de computador	Quatro dispositivos de entrada e saída de gases (CO <sub>2</sub> e ar) - válvula solenoide para controle de entrada de CO <sub>2</sub>	0% a 100% - controlada pela proporção entre as vazões de CO <sub>2</sub> e ar (circuito aberto e alimentação contínua)	Não controlada, apenas registrada	Não controlada, apenas registrada	Pressão atmosférica controlada com Manômetro tipo Bourbon	Temperatura, umidade e CO <sub>2</sub>	Arduíno e software GasLab	Vedação com borracha de silicone em todo perímetro da porta e tranca auto ajustável a qual promove uma pressão adequada à borracha
Soares et al (2017)	Chapas e cantoneiras em aço inox e chapa de policarbonato	60x45x56	Dois ventiladores tipo coolers instalados nas laterais, um em cada nível	Duas válvulas na parte inferior para entrada e saída de CO <sub>2</sub> e ar e uma válvula da parte inferior para saída de ar	0% a 100% - controlada pela proporção entre as vazões de CO <sub>2</sub> e ar (circuito aberto e alimentação contínua)	Não controlada, apenas registrada	Não controlada, apenas registrada	Pressão atmosférica controlada com Manômetro tipo Bourbon	Temperatura, umidade e medidor de oxigênio	Não informado	Solda em aço inox e porta com fechamento hermético com duas roscas e porcas tipo borboleta e tecido esponjoso

## 2.8 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

O cimento é o produto mais fabricado do planeta Terra em massa. Ao ser misturado à água e agregados dá origem ao concreto, o qual é o segundo produto mais utilizado no mundo depois da água. O concreto é utilizado há muitas décadas como principal material para construção de prédios, hospitais, pontes e barragens, e tem seu uso em grande escala marcado por muitas das principais empreitadas arquitetônicas pelo mundo. O problema é o ônus ambiental gerado pelo consumo de cimento, uma vez que este durante sua produção emite elevadas quantidades de dióxido de carbono na atmosfera. Estratégias como eficiência energética dos fornos de clínquer, substituição de combustíveis fósseis por fontes alternativas, substituição do clínquer por adições minerais e tecnologia de captura e armazenamento de carbono já existem, porém deve haver um esforço em conjunto entre setores público e privado para implementá-las de forma mais concreta e assim conter o aquecimento global e suas consequências deletérias.

A presente pesquisa aborda a tecnologia de captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios não armados, especificamente blocos de concreto, pois verificou-se que sua produção ocorre em larga escala (o que propicia com que mais CO<sub>2</sub> seja capturado); é confeccionado em concreto seco, apresenta paredes estreitas e geometria vazada (PARSEKIAN, 2012), fatores que combinados permitem uma maior difusividade de CO<sub>2</sub> no interior da peça e um amplificado alcance da frente de carbonatação (POMMER E PADE, 2005); e além disso, o bloco de concreto apresenta crescente utilização, principalmente na alvenaria estrutural, nos médios e grandes centros urbanos (TAUIL e NESE, 2023). O intuito é desenvolver um procedimento de tratamento que otimize a cura carbônica, a fim de obter a máxima taxa de captura de CO<sub>2</sub> e concomitante ganho de resistência mecânica nos blocos de concreto, promovendo ganho ambiental relacionado à captura de CO<sub>2</sub> e reduzindo o tempo de espera nas indústrias.

O fato é que os estudos sobre essa temática apresentam uma lacuna de conhecimento relacionada às condições ideais de início de exposição à cura carbônica, tempo de exposição, temperatura, umidade e concentração de CO<sub>2</sub> 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, tipo de câmara e suas configurações, dimensão amostra x câmara, entre outros. Através do estado da arte das pesquisas na área observou-se que os blocos de concreto foram os pré-fabricados cimentícios não armados que mais absorveram CO<sub>2</sub>, provavelmente isso se deva ao fato deste ser

confeccionado em concreto seco, apresentar menor espessura de paredes e geometria vazada, permitindo, contudo, uma maior difusividade de CO<sub>2</sub>.

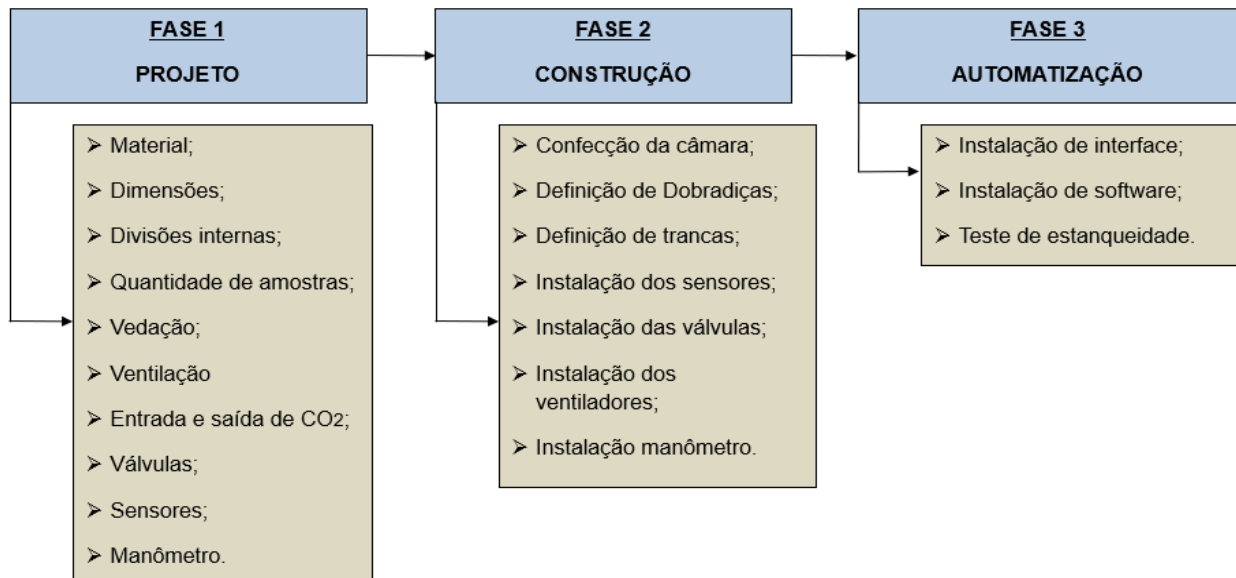
Quanto ao coeficiente de correlação referente à resistência à compressão axial entre amostras e os blocos de concreto, observou-se que não há uma padronização quanto as dimensões dos blocos e amostras/corpos de prova e muitos não são vibro-prensados, o que acarreta divergências nos resultados obtidos.

# 3. DESENVOLVIMENTO DE CÂMARA PARA PESQUISA DE CURA CARBÔNICA

A presente sessão foi publicada na revista *Matéria* com o título “*Developing an easy-to-build laboratory chamber for CO<sub>2</sub> experiments*” (DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0078>) e apresenta a metodologia experimental com desenvolvimento de protótipo de câmara de carbonatação para realização de cura carbônica em materiais cimentícios não armados. A câmara em questão foi construída para trabalhar com concentração de 100% de CO<sub>2</sub>, temperatura ambiente, faixa ótima de umidade variando de 50% a 70% (YING-YU E QUI-DONG (1987), (NEVILLE (1997), (KULAKOWSKI (2002), pressão atmosférica; e realizou a cura carbônica de amostras e blocos de concreto (14 x 19 x 39 cm) com duração de 2hs, 4hs, 8hs e 16hs.

A construção da câmara foi desenvolvida em três fases. A Fase 1 compreendeu a realização do projeto executivo; nesta fase foram determinadas as dimensões, material a ser utilizado para confecção da câmara, quantidade máxima de amostras a serem ensaiadas, vedações, dobradiças, trancas da porta, ventilação, divisões internas, sensores de temperatura, umidade e concentração de CO<sub>2</sub>, entre outros. A Fase 2 destinou-se à construção da câmara de carbonatação acelerada, instalação dos sensores, válvulas, manômetro, entre outros. E a Fase 3 compreendeu a automatização da câmara através da instalação da interface e software capazes de interagir com a programação presente nos sensores adquiridos comercialmente e o teste de estanqueidade. As fases do desenvolvimento desta pesquisa estão sumarizadas no fluxograma ilustrado na Figura 57.

**Figura 57 - Fases: projeto, construção e automatização da câmara por carbonatação**



Fonte: Autor (2020).

### 3.1 PROJETO CÂMARA DE CARBONATAÇÃO- FASE 1

A presente seção traz informações quanto ao projeto da câmara de carbonatação.

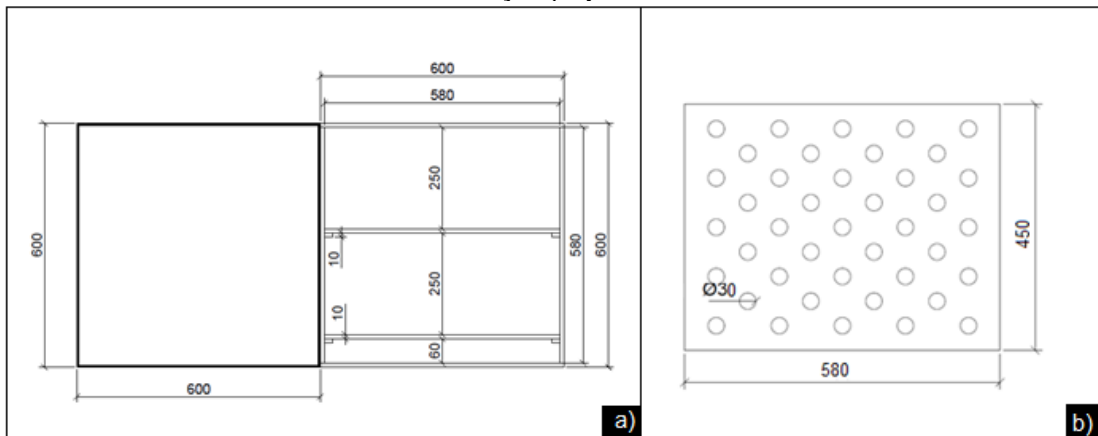
- **Material, dimensões, divisões internas e quantidade de amostras da câmara de carbonatação acelerada**

A câmara de carbonatação acelerada foi projetada utilizando chapas acrílicas de 10 mm com dimensões internas de 580 mm de largura x 580 mm de altura x 490 mm de profundidade, e dimensões externas de 600 mm de largura x 600 mm de altura x 500 mm de profundidade (Figura 58 (a)). A diferença de 20 mm se deve à espessura da chapa acrílica. As dimensões foram determinadas em função do espaçamento horizontal e vertical para colocação dos corpos de prova, visando uma melhor homogeneização do ar em função da altura. O interior foi projetado com duas prateleiras separadas verticalmente entre si com espaçamento de 250 mm. São capazes de suportar 72 amostras prismáticas de concreto com dimensões 50 mm x 50 mm, separadas entre si por 30 mm, para facilitar a circulação de ar. Os autores optaram por trabalhar com placas de acrílico por ser um material que permite a visualização completa do interior da câmara. Além disso, é mais resistente que o vidro, pesa menos da metade, tem uma resistência à abrasão comparável à do alumínio e possui um fator de condutividade térmica inferior ao do vidro e do metal, o que o torna também um bom isolante térmico.

As prateleiras também são confeccionadas em chapas acrílicas de 10 mm de espessura e dimensões de 580 mm de largura x 450 mm de profundidade. Sua superfície foi

perfurada por vários furos circulares de 30 mm. Para facilitar a circulação de ar no interior da câmara, foi deixado um espaçamento de 20 mm na parte frontal e inferior. A Figura 58 (b) mostra a vista superior da prateleira.

**Figura 58 - Projeto: a) Vistas frontais, prateleiras e porta da câmara de carbonatação; b) Prateleiras.**



Fonte: Autor (2020).

- **Ventilação e vedação da câmara de carbonatação acelerada**

A câmara de carbonatação acelerada foi projetada para dispor de dois ventiladores tipo coolers, localizados na parte inferior da câmara, com o objetivo de garantir a homogeneização do ar no seu interior. Dispõe de uma única porta de abertura e sua vedação é realizada através de borracha de silicone, com o objetivo de bloquear a saída de CO<sub>2</sub> do interior da câmara de carbonatação. A Figura 59 demonstra o ventilador tipo cooler e a posição destes na câmara.

**Figura 59 - Ventilador: a) Descrição; b) posição dos ventiladores na câmara.**

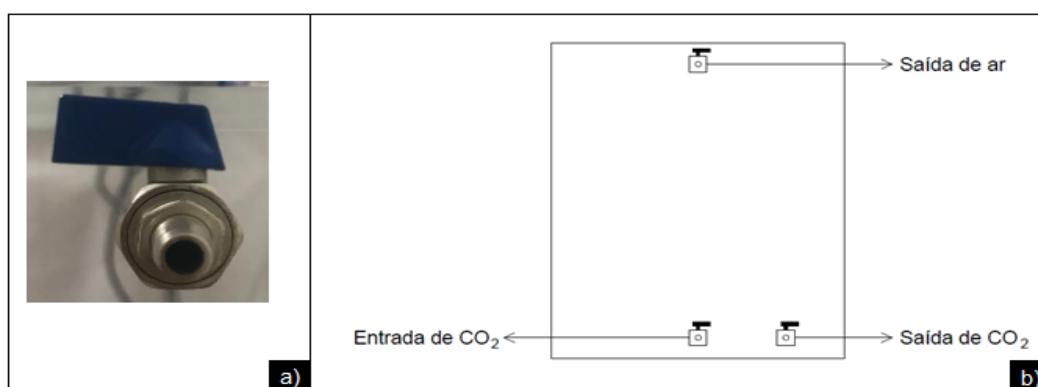


Fonte: Autor (2020).

- **Dispositivos de entrada e saída de CO<sub>2</sub>**

A câmara possui uma entrada de CO<sub>2</sub> localizada no lado esquerdo a 30 mm da parte inferior e 250 mm da frente face, equipada com uma válvula para controlar o fluxo de CO<sub>2</sub>. Além disso, possui saída de ar no lado esquerdo, 30 mm da parte superior e 250 mm da face frontal que também está equipada com uma válvula para controlar a passagem do ar fluxo. A saída de ar está localizada na parte superior da câmara, pois o CO<sub>2</sub> é mais pesado que o ar. Ao injetar CO<sub>2</sub> na parte inferior, a válvula superior deve permanecer aberta para controlar a concentração de ar. A câmara também possui uma saída de CO<sub>2</sub>, localizada no lado esquerdo, a 30 mm da parte inferior e 400 mm da frente, e será utilizada para esvaziar a câmara quando os testes forem concluídos. Nos experimentos, pretende-se trabalhar com uma concentração de 100% de CO<sub>2</sub>. A Figura 60 demonstra os dispositivos de entrada e saída de CO<sub>2</sub>.

**Figura 60 - Válvula para controle do fluxo de dióxido de carbono e ar: a) Modelo; b) Vista lateral esquerda com dispositivo de entrada de CO<sub>2</sub>.**



Fonte: Autor (2020).

- **Sensor de CO<sub>2</sub>, umidade e temperatura**

O sensor para avaliação de concentração de dióxido de carbono, apresenta faixa de avaliação entre 0% e 100%. O referido sensor mede os níveis de dióxido de carbono através de tecnologia de LED de estado sólido NDIR patenteada que oferece desempenho preciso de medição de CO<sub>2</sub> durante a vida útil do sensor. O bocal de entrada para coleta do gás para análise pelo sensor foi colocado na região superior da câmara, uma vez que o gás carbônico por ser mais pesado que o ar tende a ficar embaixo, dessa forma quando a leitura der 100%, demonstra-se que toda a estrutura da câmara estará preenchida com CO<sub>2</sub>. O Sensor de Umidade Relativa contém um circuito integrado que monitora a umidade relativa no intervalo de 0 a 95% (± 5%). Este sensor usa um polímero capacitivo para detectar a umidade; em seguida, um circuito integrado produz uma tensão de saída que varia com a umidade relativa,

detectando a mesma. O Sensor de temperatura realiza a avaliação da temperatura no interior da câmara, com faixa de avaliação entre  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $135^{\circ}\text{C}$ . Este sensor usa o  $20\text{ k}\Omega$  Termistor NTC, que é um resistor variável. Quando a temperatura aumenta, a resistência diminui. Os sensores de umidade relativa e temperatura foram posicionados na região intermediária da câmara, pois esta localização representa a média do todo. A Figura 61 demonstra os sensores para avaliação da concentração de  $\text{CO}_2$ , umidade e temperatura.

**Figura 61 - Sensores: a) Concentração de  $\text{CO}_2$ ; b) Umidade; c) Temperatura.**



Fonte: Autor (2020).

A umidade relativa desejada para a pesquisa foi obtida através de sílica gel, porém os sais, através de solução aquosa, também podem ser utilizados. Tanto a sílica quanto os sais, devem ser distribuídos por toda a câmara para que cumpram sua função de forma homogênea. A Tabela 18 demonstra uma lista de sais habitualmente utilizados e as suas respectivas umidades relativas produzidas (GREENSPAN, 1977).

**Tabela 18 - Umidade relativa produzida para diferentes tipos de solução aquosa.**

Solução Aquosa Sobressaturada		Umidade Relativa da Solução a $20^{\circ}\text{C}$ (%)
Composto Químico	Fórmula Química	
Fosfato Dissódico	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \times 12\text{ H}_2\text{O}$	95
Carbonato de Sódio	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10\text{ H}_2\text{O}$	92
Sulfato de Zinco	$\text{ZnSO}_4 \times 7\text{ H}_2\text{O}$	90
Cloreto de Potássio	KCl	86
Sulfato de Amônio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	80
Cloreto de Sódio	NaCl	76
Nitrato de Sódio	$\text{NaNO}_2$	65
Nitrato de Amônio	$\text{NH}_4\text{NO}_3$	63
Nitrato de Cálcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \times 4\text{ H}_2\text{O}$	55
Carbonato de Potássio	$\text{K}_2\text{CO}_3$	45
Nitrato de Zinco	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \times 6\text{ H}_2\text{O}$	42
Cloreto de Cálcio	$\text{CaCl} \times 6\text{ H}_2\text{O}$	32
Cloreto de Lítio	$\text{Li} \times \text{H}_2\text{O}$	15

Fonte: Adaptado de GREENSPAN (1977).

A Figura 62, demonstra a sílica gel, que apresenta coloração azul quando seca e cor rosa após absorver a umidade, distribuída nas prateleiras da câmara antes da cura carbônica.

**Figura 62 - Sílica gel distribuída no interior da câmara.**



Fonte: Autor (2024).

- **Manômetro**

O manômetro utilizado inicialmente apresentou sensor tipo Bourdon, caixa de aço inox e internamente liga de latão, controlava a pressão de 0 a 4 kgf/cm<sup>2</sup> e apresentava precisão de 0,2 kgf/cm<sup>2</sup>, conforme demonstra a Figura 63.

**Figura 63 - Manômetro para controle da pressão no interior da câmara.**



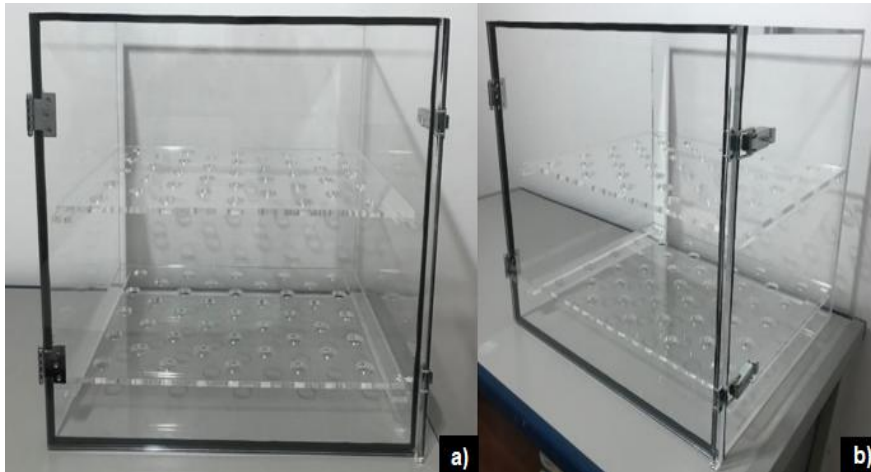
Fonte: Autor (2020).

### 3.2 CONSTRUÇÃO CÂMARA DE CARBONATAÇÃO – FASE 2

- **Estrutura da câmara, prateleiras e vedação**

A caixa da câmara e as prateleiras em acrílico foram confeccionadas por fabricante especializado. E foram demonstradas na Figura 64 abaixo.

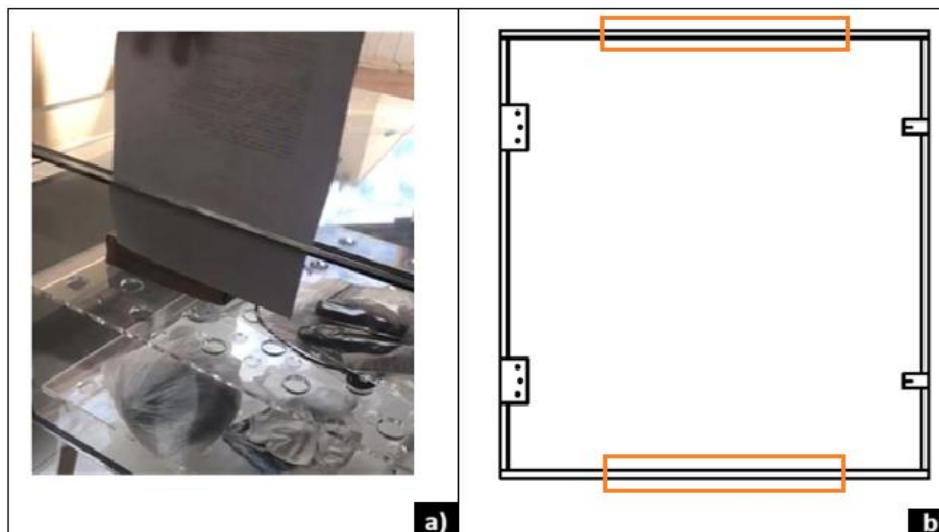
**Figura 64 - Estrutura da câmara de carbonatação (caixa e prateleiras em acrílico):  
a) vista frontal; b) vista em perspectiva.**



Fonte: Autor (2020).

A vedação inicial da câmara não foi satisfatória, pois verificou-se uma abertura no vão central superior e vão central inferior da porta em que era possível a inserção de uma folha sulfite, conforme Figura 65 abaixo.

**Figura 65 - Porta da câmara: a) Abertura no vão superior, b) Vista frontal da porta com destaque para as regiões críticas.**



Fonte: Autor (2020).

Verificou-se também, abertura na lateral superior e inferior da porta próximo à dobradiça, em que era possível a inserção de uma caneta (Figura 66) e “jogo” (movimentação) na porta ao abrir e fechar.

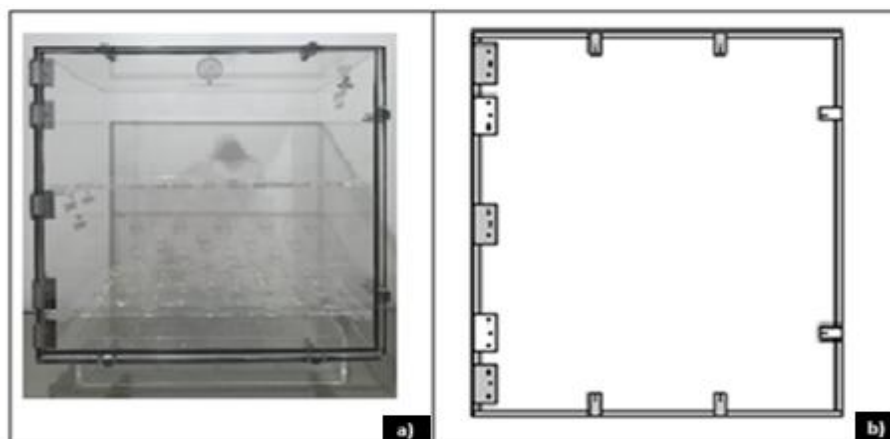
**Figura 66 - Abertura na lateral da porta.**



Fonte: Autor (2020).

Para solucionar as questões, optou-se pela inserção de 4 trincos (fechaduras), sendo 2 na região central superior da porta e 2 na região central inferior da porta. Além, do acréscimo de 03 dobradiças e se for necessário usar parafusos passantes com porcas para fixação, conforme demonstra Figura 67 abaixo.

**Figura 67 - Inserção de fechaduras e dobradiças: a) Câmara, b) Projeto.**



Fonte: Autor (2020).

Com relação às prateleiras, verificou-se que elas empenam com o peso dos blocos de concreto. Para tanto, a solução encontrada foi a confecção de dois calços em acrílico para suporte das mesmas na frente e no fundo, conforme demonstra Figura 68.

**Figura 68 - Prateleiras: a) Empenadas, b) Solução encontrada: calços, c) Prateleiras suportando o peso dos blocos com a inserção dos calços.**



Fonte: Autor (2020).

Após a verificação dessas questões iniciais, iniciou-se a etapa de testes de estanqueidade para verificação da inexistência de vazamentos de ar ou gás. O teste de estanqueidade consiste em conectar um compressor com capacidade de 16 kgf/cm<sup>2</sup> e um manômetro padrão de calibração à uma das válvulas de saída de gases da câmara de carbonatação, então registra-se a pressão no interior do reservatório, nas conexões, nas válvulas e nas tubulações da câmara de carbonatação e verifica-se a ocorrência de vazamento de ar. A Figura 69, demonstra um dos testes de estanqueidade realizado.

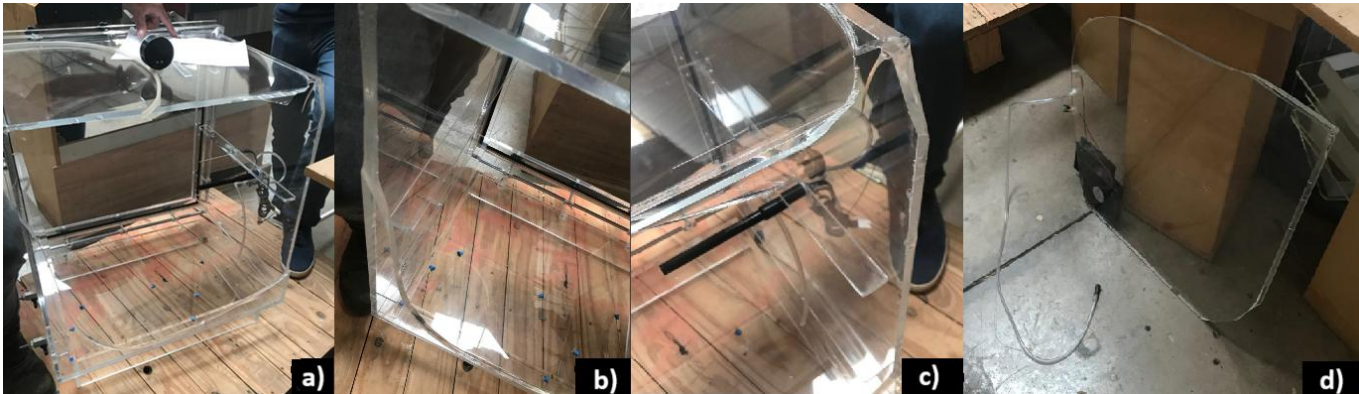
**Figura 69 - Teste de estanqueidade.**



Fonte: Autor (2021).

Ocorreu que, durante a realização de um dos testes de estanqueidade, houve um acidente em que a câmara explodiu, de maneira que a parede de acrílico do fundo se dilapidou, conforme demonstra a Figura 70.

**Figura 70 - Acidente com câmara de CO<sub>2</sub>.**



Fonte: Autor (2022).

Perante essa situação, foi necessário refazer a estrutura do fundo da câmara em acrílico, realizou-se a troca do manômetro, por outro de maior precisão. Logo, trocou-se o manômetro inicial por outro com sensor tipo Bourdon, caixa de aço inox e internamente liga de latão, controlava a pressão de 0 a 0,6 kgf/cm<sup>2</sup> e apresentava precisão de 0,01 kgf/cm<sup>2</sup>, conforme demonstra Figura 71.

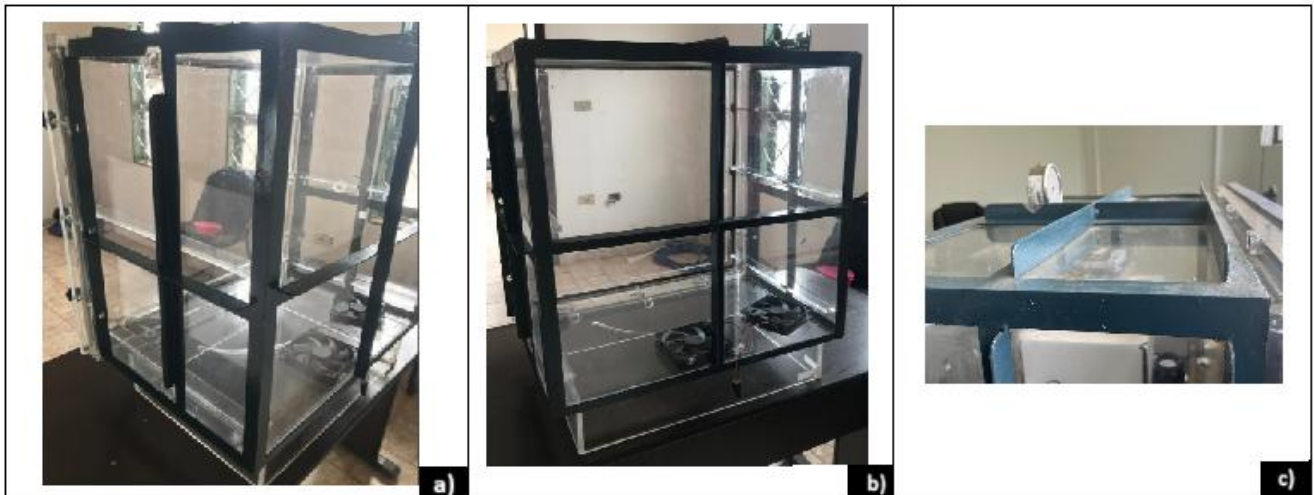
**Figura 71 - Manômetro com maior precisão.**



Fonte: Autor (2022).

Além disso, visando-se a prevenção de novos acidentes, o projeto da estrutura da câmara foi aprimorado e um dispositivo de reforço e travamento contendo cantoneiras metálicas foi instalado formando uma contenção em todas as faces da câmara, com exceção da porta. Na Figura 72, é possível ver a gaiola de contenção criada.

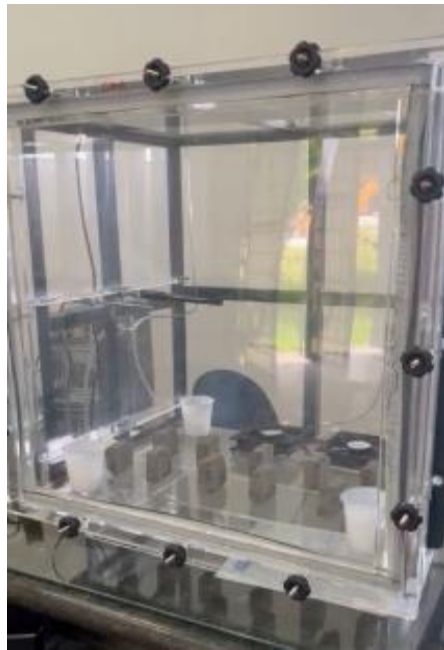
**Figura 72 - Sistema de contenção com cantoneiras: a) face lateral; b) fundo e c) face superior.**



Fonte: Autor (2022).

Durante a realização dos testes de estanqueidade, verificou-se a ocorrência de muitos vazamentos na porta, na região das dobradiças, fechaduras e cantos da câmara. Inicialmente, visando-se a vedação da porta da câmara de carbonatação, projetou-se e instalou-se cinco dobradiças do tipo pivotantes e auto ajustáveis, em que à medida que a porta era fechada, as dobradiças, deslizavam em seu eixo para evitar o efeito guilhotina na borracha de vedação; borracha de silicone imantada em toda extensão de contato entre a porta e a câmara; e duas trancas do tipo engate de pressão foram instaladas em cada lado da porta, conforme já mencionado anteriormente. Porém, todo esse dispositivo mencionado não foi eficaz, já que a câmara continuou não estanque. Resolveu-se então, aprimorar o projeto inicial. Para tanto, instalou-se um novo modelo de porta, aproveitando a chapa de acrílico inicial, dotado de parafusos e porcas do tipo borboleta em toda a extensão da porta, além de fita de vedação em borracha do tipo “EVA” em toda extensão de contato entre a porta e a câmara. Dessa forma, após a realização de diversos testes de estanqueidade, não se verificou vazamentos. A Figura 73, demonstra como ficou a nova instalação da porta.

**Figura 73 - Novos dispositivos de vedação da porta.**



Fonte: Autor (2022).

Grande parte dos ensaios foram realizados na câmara com essa configuração de porta. Porém, um novo acidente ocorreu. Durante a cura com CO<sub>2</sub>, ocorreu um lapso e não foi verificada a pressão interna da câmara por alguns minutos. Esse tempo foi o suficiente para uma nova explosão que culminou na dilaceração da chapa acrílica que compunha a estrutura da porta (único local que ficou mais frágil, devido a impossibilidade de instalação do dispositivo metálico para reforço e travamento). A Figura 70, demonstra o acidente mencionado.

**Figura 74 - Acidente com câmara de CO<sub>2</sub>.**

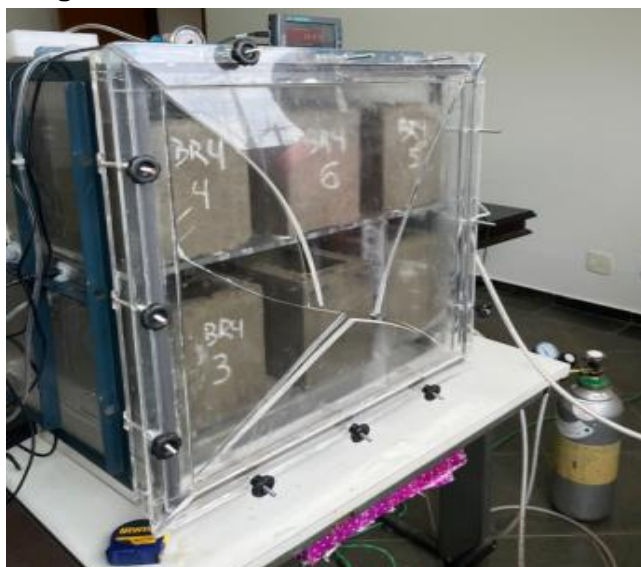


Foto: Autor (2024).

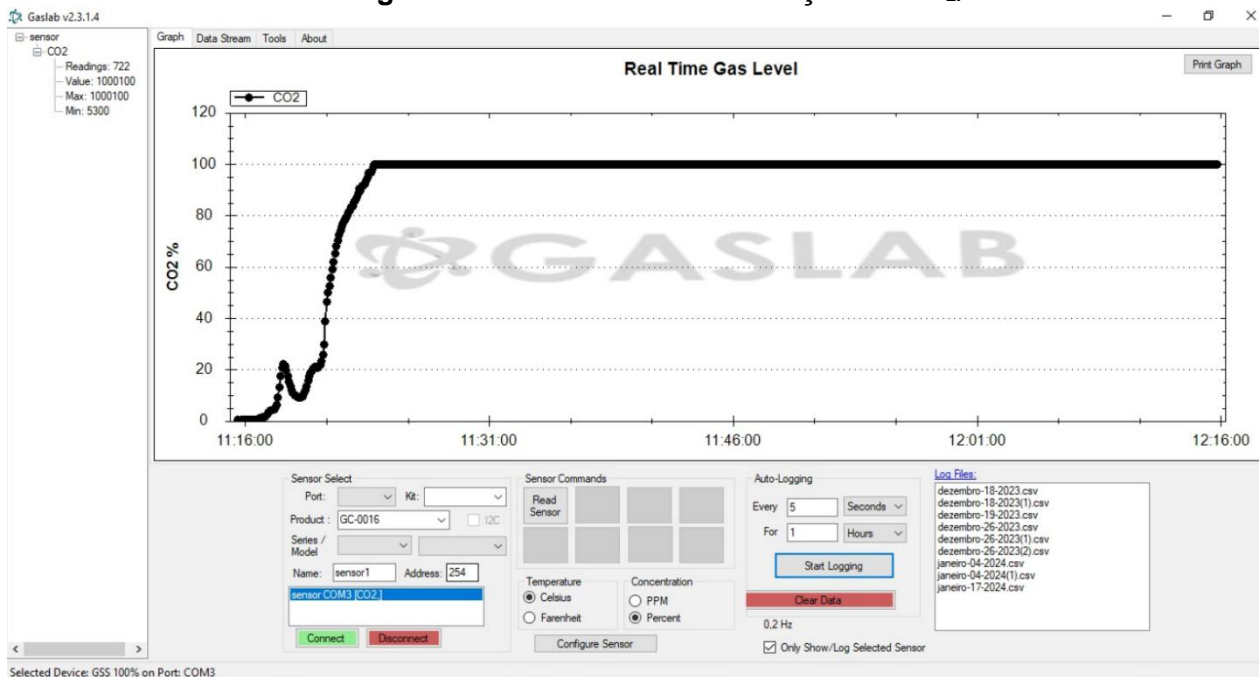
Para solucionar o problema, resolveu-se instalar porta confeccionada em chapa metálica, por conta de que este material apresenta maior ductibilidade que o acrílico, ou seja, suporta maior deformação sem fraturar. No entanto, apresenta maior condutividade térmica e não é transparente. Contudo, tais propriedades não promoveram grandes alterações quanto a temperatura interna da câmara e visibilidade, já que o referido material foi empregado unicamente na porta. Acredita-se que para a não ocorrência de novos eventos catastróficos como esse, deve-se instalar válvula de pressão de 0,1 kgf/cm<sup>2</sup>, com liberação de vazão de gás.

### 3.3 AUTOMATIZAÇÃO DA CÂMARA DE CARBONATAÇÃO – FASE 3

- **Instalação do software e interface**

Todos os dados recolhidos pelos sensores são analisados por programas especializados. No caso do sensor de CO<sub>2</sub>, os dados foram tratados a partir de um programa específico fornecido pelo fabricante e plotados em gráficos conforme demonstra a Figura 75.

**Figura 75 - Gráfico de concentração de CO<sub>2</sub>.**



Fonte: Autor (2020).

Para coleta de dados dos sensores de temperatura e umidade relativa utiliza-se uma interface autônoma, a qual apresenta aplicativo integrado de gráficos e análise. Os referidos sensores são instalados através de cabo do tipo USB. A Figura 76 demonstra a interface autônoma.

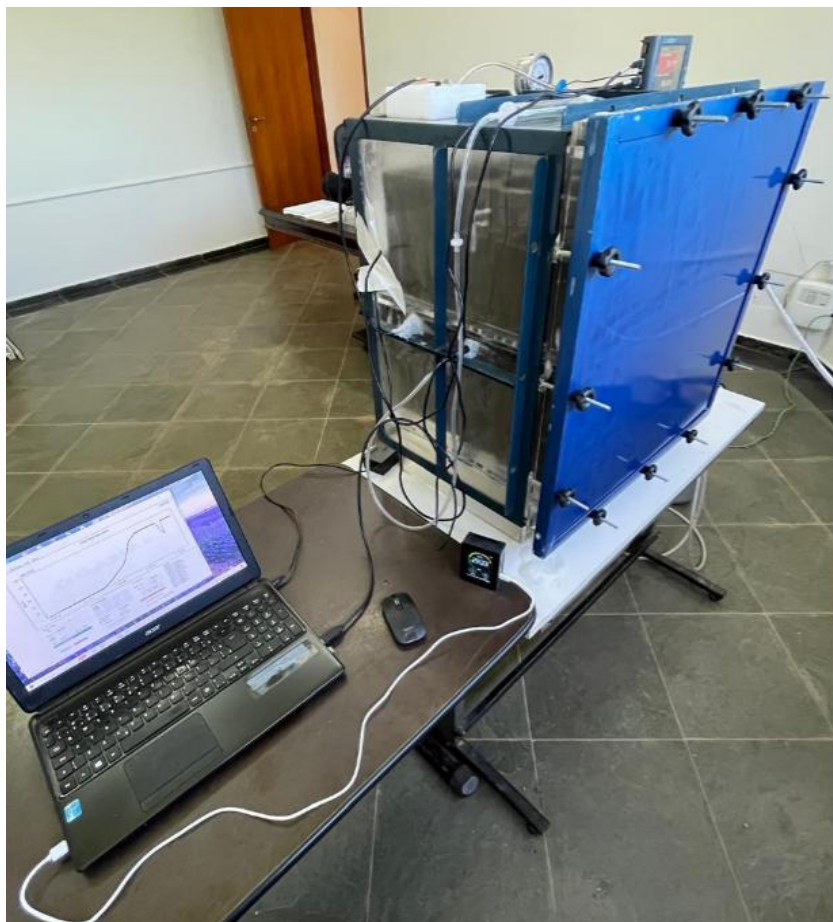
**Figura 76 - Interface autônoma.**



Fonte: Autor (2020).

- **Câmara finalizada**

Na Figura 77 é possível verificar a câmara de carbonatação com todos os dispositivos, sensores e válvulas instalados e em funcionamento.



Fonte: Autor (2024).

### 3.4 ORIENTAÇÕES PARA CONSTRUÇÃO DE CÂMARA DE CARBONATAÇÃO

A partir da revisão dos estudos da literatura observou-se que a construção das câmaras de carbonatação facilitou os experimentos. Porém, a ausência de padrões de procedimento e de automação podem levar à resultados não comparáveis entre si, principalmente em câmaras que trabalham com baixas concentrações de CO<sub>2</sub>. Nesta seção, serão discutidos os diferentes parâmetros de vários estudos.

- **Estrutura da câmara – Materiais:** nas pesquisas apresentadas, observou-se que não há padronização do material que compõe a estrutura das câmaras, utilizando-se vidro, aço inoxidável, acrílico, policarbonato, madeira e fibra de vidro. É sabido que os materiais possuem diferentes coeficientes de condutividade térmica, afetando a reação de carbonatação acelerada se a temperatura dentro da câmara não for controlada. Portanto, recomenda-se a utilização de materiais com menor coeficiente de condutividade térmica. Ou, caso o pesquisador opte por utilizar material metálico, considere adicionar uma camada composta por material de baixa condutividade térmica como a madeira (Lucena (2016)), para que não haja interferência do ambiente externo com o ambiente interno.
- **Estrutura da câmara – Dimensões:** as dimensões da câmara variam, devido aos diferentes objetivos das pesquisas, diferentes formatos e quantidades de corpos de prova.
- **Ventilação:** algumas câmaras não possuíam ventilação em seu interior, porém, isso é fundamental para a uniformização da concentração de CO<sub>2</sub> e ar. Também houve grande variação na quantidade, tamanho e localização dos ventiladores nas câmaras. A ausência, excesso ou falta de ventilação pode causar diferenças nas concentrações de CO<sub>2</sub> dentro do compartimento, e isso impacta diretamente na reação de carbonatação. Recomenda-se que a ventilação seja instalada em posição estratégica para que o CO<sub>2</sub> e o ar fluam na direção ideal (proporcionando uma maior superfície de contato entre o CO<sub>2</sub> e os corpos de prova), o número de ventiladores deve depender das dimensões da câmara e a sua distribuição deve considerar regras de proporção para que sejam igualmente espaçados, proporcionando uniformidade de CO<sub>2</sub> e ar no interior da câmara.
- **Entrada e saída de CO<sub>2</sub> e ar:** muitas pesquisas não informaram se havia válvula e o tipo de válvula instalada na câmara. Também foi observada uma variação no fato de que em algumas câmaras a saída de CO<sub>2</sub> ocorreu na parte inferior da câmara e em outras ocorreu na parte superior. Recomenda-se que a saída de ar esteja localizada

na parte superior da câmara, pois o dióxido de carbono é mais denso que o ar, portanto, ao injetar CO<sub>2</sub> na parte inferior, a válvula superior deve permanecer aberta para que o ar saia enquanto o dióxido de carbono entra. Fazer o contrário pode reduzir a eficiência.

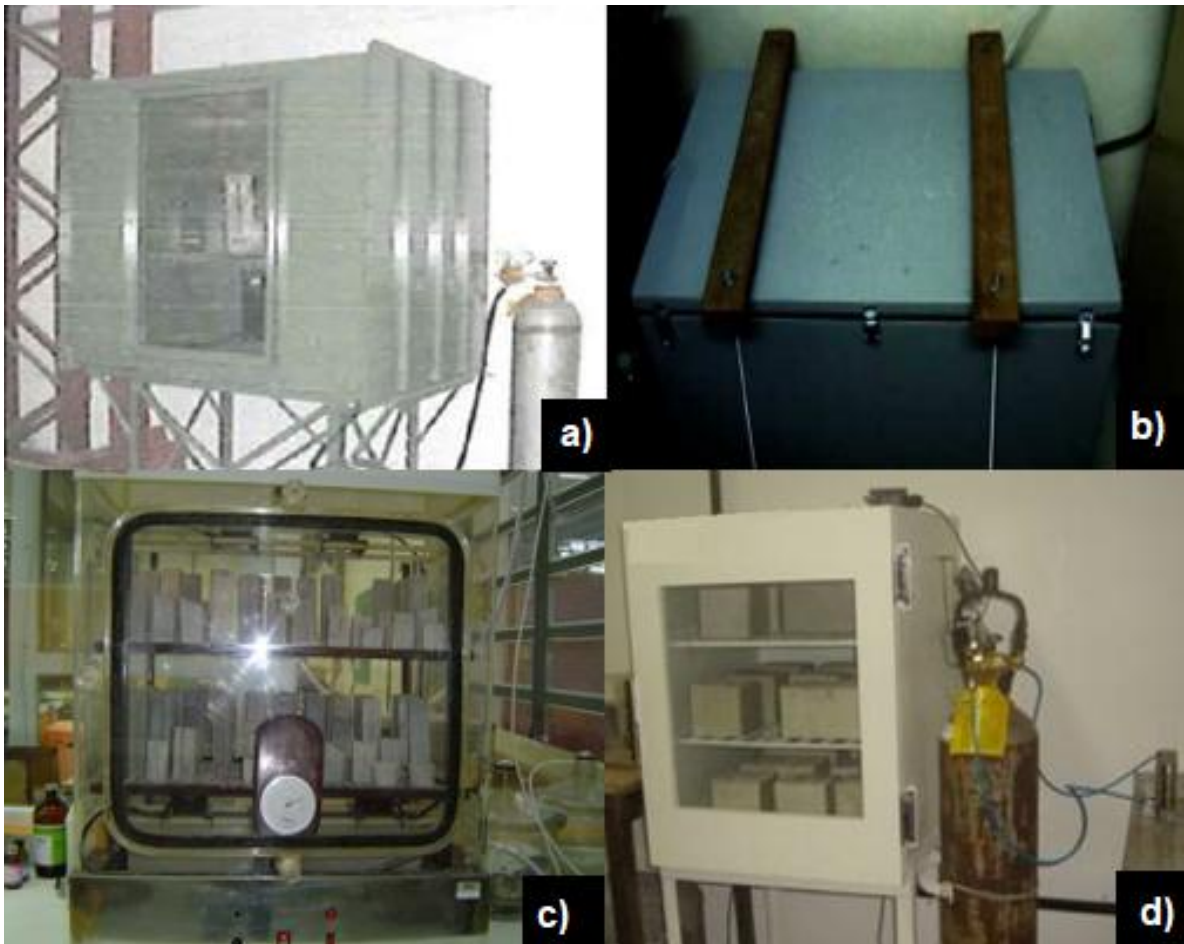
- **Configuração da câmara - Concentração de CO<sub>2</sub>:** a maioria das câmaras não trabalha saturada (100% CO<sub>2</sub>), e sim com baixas concentrações do gás. Em alguns casos, a concentração de CO<sub>2</sub> era muitas vezes controlada pela proporção volumétrica de CO<sub>2</sub> e ar e poucos utilizavam cilindros de CO<sub>2</sub> com o conteúdo recomendado ou sensor de CO<sub>2</sub>. Entende-se, então, que cada pesquisa trabalha com diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>, portanto, cada câmara deve atender a uma concentração específica. Recomenda-se a aquisição de um cilindro com teor de CO<sub>2</sub> compatível com os objetivos da pesquisa, para que o parâmetro analisado seja rigorosamente controlado, ou adquirir um cilindro com 100% de concentração de CO<sub>2</sub> e um sensor interno de CO<sub>2</sub> que indique a concentração de CO<sub>2</sub> em relação ao volume da câmara.
- **Configuração da câmara – Temperatura, Umidade e Pressão:** quanto à temperatura e umidade, verificou-se que alguns estudos não controlam esses parâmetros, apenas os registram. Isso pode causar variação nos resultados, pois a umidade e a temperatura afetam diretamente a reação de carbonatação. Então, sugere-se que além do registro, tanto a temperatura quanto a umidade sejam controladas no interior da câmara, por meio de dispositivos específicos como umidificadores, desumidificadores, aquecedores e condicionadores de ar. Ou então, quando não for possível, a câmara deve ser instalada em uma sala climatizada para controle de temperatura, assim como sais e/ou sílica gel devem ser distribuídos dentro dela para controle da umidade. Quanto à pressão, em geral, as pesquisas trabalham com a pressão atmosférica, que é registrada por meio de um manômetro do tipo Bourbon.
- **Sensores:** a maioria das pesquisas apresentou sensores de umidade e temperatura, e poucas relataram a existência de sensor de CO<sub>2</sub>. A verificação da porcentagem de CO<sub>2</sub> por meio de sensores apropriados confere maior credibilidade ao experimento do que a verificação por meio de fórmulas de proporção volumétrica. Recomenda-se a instalação de sensores de temperatura, umidade e concentração de CO<sub>2</sub> na câmara, pois são de baixo custo, são de fácil instalação e permitem ao pesquisador analisar importantes parâmetros de configuração da câmara.
- **Automatização:** foi realizada através de arduino e software específico nas câmaras de Saldanha (2013) e Lucena (2016). Recomenda-se a automatização da câmara, pois

esta é de suma importância para o controle dos parâmetros de configuração e obtenção de resultados confiáveis.

- **Estanqueidade:** Um fator pouco citado nas pesquisas está relacionado à estanqueidade da câmara, e isso é de fundamental importância, pois pode promover a redução da concentração de CO<sub>2</sub> no interior da mesma e, por ser um gás letal, a fuga deste deve ser evitada. Portanto, recomenda-se que a câmara seja perfeitamente vedada com cola, borracha, solda e outros, além de se realizar diversos testes de estanqueidade.

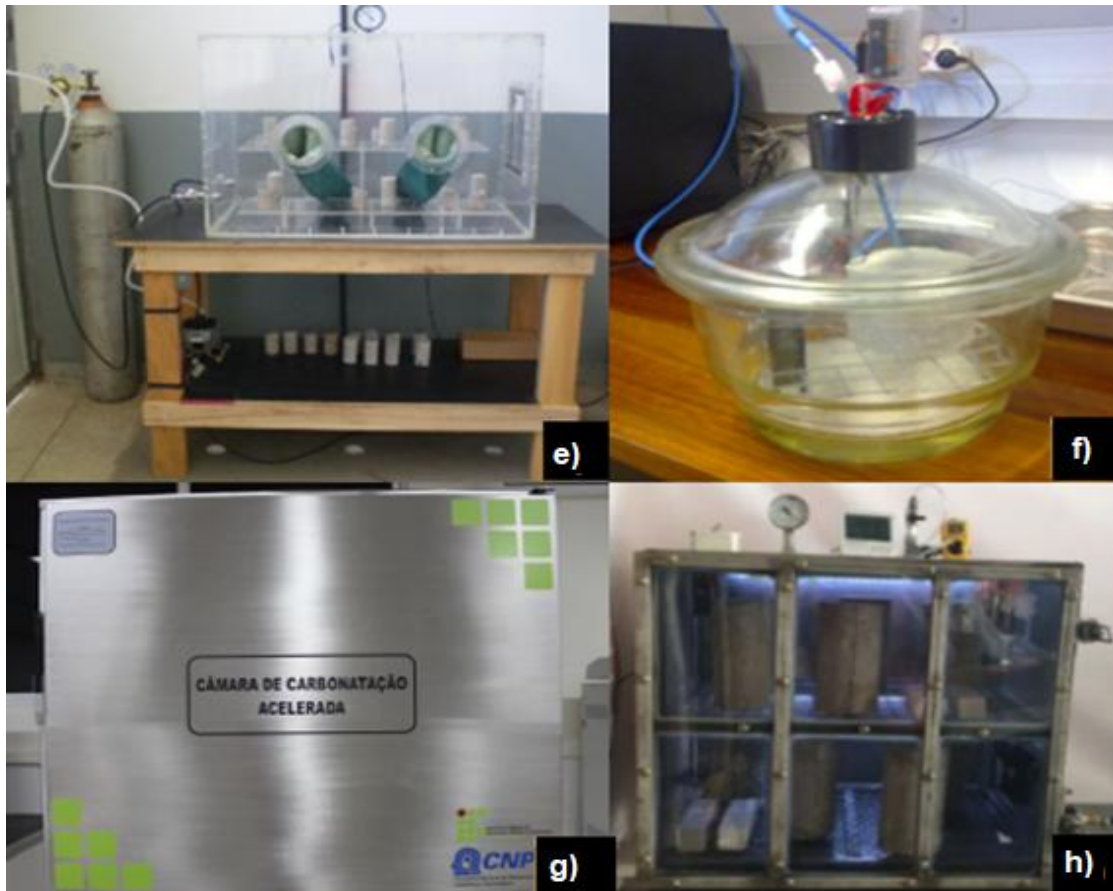
A Figura 78 e a Figura 79, mostram algumas das câmaras de carbonatação relatadas com parâmetros variados.

**Figura 78 - Câmara de carbonatação autores: a) Silva (2002); b) Abreu (2004); c) Pauletti (2004); d) Barros (2008).**



Fonte: Adaptado de: a) Silva (2002); b) Abreu (2004); c) Pauletti (2004); d) Barros (2008).

**Figura 79 - Continuação Câmara de carbonatação autores: e) Salomão e Silva (2008); f) Saldanha (2013); g) Lucena (2016); h) Soares et al (2017).**



Fonte: Adaptado de: e) Salomão e Silva (2008); f) Saldanha (2013); g) Lucena (2016); h) Soares et al (2017).

### 3.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Ao compilar teoria e prática, tornou-se possível reunir pontos positivos e negativos, e apresentar um manual descritivo para construção de câmara de carbonatação de baixo custo. A câmara desenvolvida foi utilizada para curar amostras e blocos de concreto com 100% de concentração de CO<sub>2</sub>, porém pode ser utilizada para a realização de ensaios de verificação da durabilidade e vida útil de concretos. Quanto a confecção e automatização da câmara de carbonatação os desafios encontrados foram a sua perfeita vedação, capacidade de suporte de peso das prateleiras e aquisição de um sensor de CO<sub>2</sub> que verificasse até 100% de concentração de CO<sub>2</sub>, uma vez que, em geral, as pesquisas relacionadas à carbonatação trabalham com baixas concentrações de gás carbônico; sendo assim, a maioria dos sensores encontrados no mercado verificam em média até 20% de concentração do referido gás.

Contudo, ao final, a câmara apresentou perfeito desempenho e acredita-se que seu projeto seja mais vantajoso em relação aos demais apresentados nesta tese, e os motivos serão listados a seguir.

- **Estrutura da câmara – Materiais:** a câmara foi construída com chapas de acrílico reforçadas com cantoneiras metálicas. Os autores escolheram este material por ser cristalino e transparente, com 92% de transmissão de luz (superior ao vidro e outros plásticos), apresentar melhor resistência ao impacto com menos da metade do peso do vidro; sua resistência à abrasão é comparável à do alumínio, mas quando riscado é totalmente recuperado por polimento; possuir boa resistência ao impacto e não estilhaçar como o vidro. Além disso, seu fator de condutividade térmica é inferior ao vidro e ao metal, sendo considerado um bom isolante térmico. Ocorre que o acrílico se apresentou frágil, não suportando pressões superiores a 0,15 kgf/cm<sup>2</sup>. Contudo, a solução encontrada, foi a confecção de um reforço em material metálico, o qual conferiu maior ductibilidade ao sistema estrutural da câmara;

- **Ventilação:** foram instalados dois ventiladores, na parte inferior da câmara, que permitiram a circulação e homogeneização do dióxido de carbono no interior da câmara. A localização e posição dos ventiladores foi determinada considerando as dimensões da câmara e o tamanho e formato das amostras;

- **Entrada e saída de CO<sub>2</sub> e ar:** a entrada e saída de CO<sub>2</sub> e ar foram realizadas através de válvulas específicas e localizadas em pontos estratégicos da câmara. A saída de ar estava localizada na parte superior da câmara, pois o dióxido de carbono é mais pesado que o ar, e a entrada de CO<sub>2</sub> estava localizada na parte inferior da câmara;

- **Sensores e automação:** foram instalados sensores de temperatura, umidade e concentração de CO<sub>2</sub>. Eles controlaram e registraram os parâmetros mencionados através de software específico;

- **Estanqueidade:** para perfeita vedação da câmara de carbonatação foram instalados em todo perímetro da porta parafusos e porcas do tipo borboleta e fita de borracha EVA dupla face, e não foram observados vazamentos durante a operação.

Portanto, pode-se concluir que o projeto, fabricação e automatização da câmara de carbonatação foram concluídos com sucesso, sendo esta uma solução econômica e viável para cura de pré-fabricados cimentícios não armados.

# **4. VIABILIDADE TÉCNICA E DE LOCALIZAÇÃO PARA IMPLEMENTAÇÃO DA CURA QUÍMICA COM CO<sub>2</sub> EM FÁBRICAS DE BLOCOS DE CONCRETO NA REGIÃO DE SÃO PAULO**

A presente sessão foi publicada na revista Riem com o título “*Feasibility analysis for implementing CO<sub>2</sub> curing in a concrete block industry in the São Paulo Region*” (<https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000600007>).

A análise de viabilidade de projetos determina se o projeto deve ou não ser colocado em prática e pode ser realizada a partir de diferentes esferas: estratégica, técnica, operacional, legal, econômico-financeira, ambiental, mercadológica, política, fiscal, localização, entre outras. As referidas análises não são excludentes, por conseguinte, é possível que para um único projeto sejam realizadas todas elas. No entanto, o enfoque desta pesquisa foi a análise da viabilidade técnica e de localização do projeto inovador de implementação da cura química com CO<sub>2</sub> em fábrica de blocos de concreto na região de São Paulo.

## **4.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA**

No estudo de viabilidade técnica também chamado de estudo de engenharia ou de tecnologia faz-se necessário compreender os processos produtivos necessários à fabricação do produto, bem como se é possível produzir em escala o produto ou serviço a ser comercializado. Por mais diferenciadas que as inovações possam ser, é necessário ter coerência do invento com a sua usabilidade (Schneider, 2019). Esse estudo de viabilidade técnica e inovação compreendeu: a) Características da inovação - descrição dos produtos,

serviços e da tecnologia a ser utilizada; b) Análises dos componentes do processo de inovação; c) Pesquisa de processos e produtos similares – Casos de Sucesso.

#### **4.1.1 CARACTERÍSTICAS DA INOVAÇÃO**

A indústria de blocos de concreto é um dos elos da cadeia produtiva do setor de construções, que compreende as cimenteiras, construtoras, fabricantes de equipamentos, comércio, empresas imobiliárias e de outros serviços ligados a obras e manutenção. A indústria ecológica de blocos de concreto agrega, de forma nada convencional, os fornecedores de CO<sub>2</sub> capturado.

Produzir blocos de concreto que armazenam CO<sub>2</sub> é inovador, uma vez que através da tecnologia de cura carbônica, o dióxido de carbono é convertido quimicamente em um mineral, o carbonato de cálcio, o qual precipita de forma definitiva nos poros do concreto; é sustentável, pois vai de encontro à tendência e necessidade mundial de reduzir os gases de efeito estufa na atmosfera, bem como minimizar as consequências do aquecimento global; e além disso, o produto é inexistente no mercado brasileiro.

Alguns fatores fazem dos blocos de concreto candidatos ideais para se armazenar uma importante quantidade de CO<sub>2</sub>, dentre eles destacam-se: sua produção ocorre em larga escala (o que propicia com que mais CO<sub>2</sub> seja absorvido); é confeccionado em concreto seco, apresenta paredes estreitas e geometria vazada (PARSEKIAN, 2012), fatores que combinados permitem uma maior difusividade de CO<sub>2</sub> no interior da peça e um amplificado alcance da frente de carbonatação (POMMER E PADE, 2005); e além disso, o bloco de concreto apresenta crescente utilização, principalmente na alvenaria estrutural, nos médios e grandes centros urbanos (TAUIL e NESE, 2023).

Diversos estudos verificaram que a carbonatação, faz com que os materiais cimentícios se tornem “maduros” precocemente, ou seja, apresentem resistência à compressão axial exigida por Norma, logo nas primeiras idades. Tal fato reduz o “tempo morto” nos pátios das indústrias e possibilita uma maior produtividade.

Tudo isso é possibilitado pelo procedimento de cura carbônica, através da qual os blocos são inseridos na câmara de carbonatação com condições adequadas de temperatura, pressão, umidade e concentração de CO<sub>2</sub>, e ao final do procedimento de cura verifica-se as prerrogativas de armazenamento permanente de CO<sub>2</sub> e ganho de resistência mecânica.

É fato que pré-fabricados cimentícios não armados possuem a capacidade de capturar CO<sub>2</sub>. Fortunato et al (2018) verificaram que peças de concreto para pavimentação quando submetidas à cura com gás carbônico, armazenaram 5,10% do CO<sub>2</sub> presente na atmosfera

da câmara. Sendo assim, considerando o consumo de cimento pela indústria de pré-fabricados não armados em 2019 de 5,66 Mton (SNIC, 2019) teria sido possível sequestrar no referido ano aproximadamente 290.000,00 ton de CO<sub>2</sub> caso toda produção tivesse sido curada com CO<sub>2</sub>. Este valor corresponde ao sequestro de CO<sub>2</sub> de 36.250.000,00 árvores em um ano, já que segundo segundo o Instituto Totum, uma árvore sequestra em um ano aproximadamente oito quilos de CO<sub>2</sub> (INSTITUTO TOTUM, 2013). Além disso, as peças de concreto para pavimentação carbonatadas apresentaram aos 02 dias de idade resistência à compressão axial superiores às peças referenciais (não carbonatadas) e aos 28 dias estas se tornaram equivalentes (FORTUNATO et al (2018)).

#### 4.1.1.1 Análises dos componentes do processo de inovação

- **Produção dos blocos de concreto que sequestram CO<sub>2</sub>**

O processo de fabricação dos blocos de concreto envolve as etapas de confecção do traço, em que há o proporcionamento dos materiais; mistura, em geral realizada em misturador orbital; produção (moldagem) do concreto seco em moldes (formas) com as dimensões pré-estabelecidas do bloco, compactação e vibração através de máquinas vibro prensas; cura e armazenagem até o momento da entrega (SALVADOR FILHO, 2007). Os blocos de concreto que armazenam CO<sub>2</sub> são produzidos da mesma forma que os blocos de concreto convencionais, independente da indústria que o for produzir, não é necessária a alteração de traço, equipamentos e tempo de ciclo; a diferenciação se dá no procedimento de cura, que ao contrário das indústrias tradicionais não é através de vapor ou elevada umidade, mais sim, CO<sub>2</sub>.

- **Tecnologia inovadora da cura química com CO<sub>2</sub>**

A tecnologia em questão trata-se de uma cura química que promove a mineralização do CO<sub>2</sub>, ou seja, o dióxido de carbono através da cura é convertido quimicamente em um mineral, o carbonato de cálcio. A captura de CO<sub>2</sub> de forma permanente nos poros do concreto é possível por conta da reação de carbonatação acelerada. A reação principal de carbonatação ocorre entre o Ca(OH)<sub>2</sub> e o CO<sub>2</sub> na presença de água e em um segundo momento, quando a maior parte do hidróxido de cálcio já foi consumido, relata-se a ocorrência da carbonatação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H). As reações estão descritas a seguir.

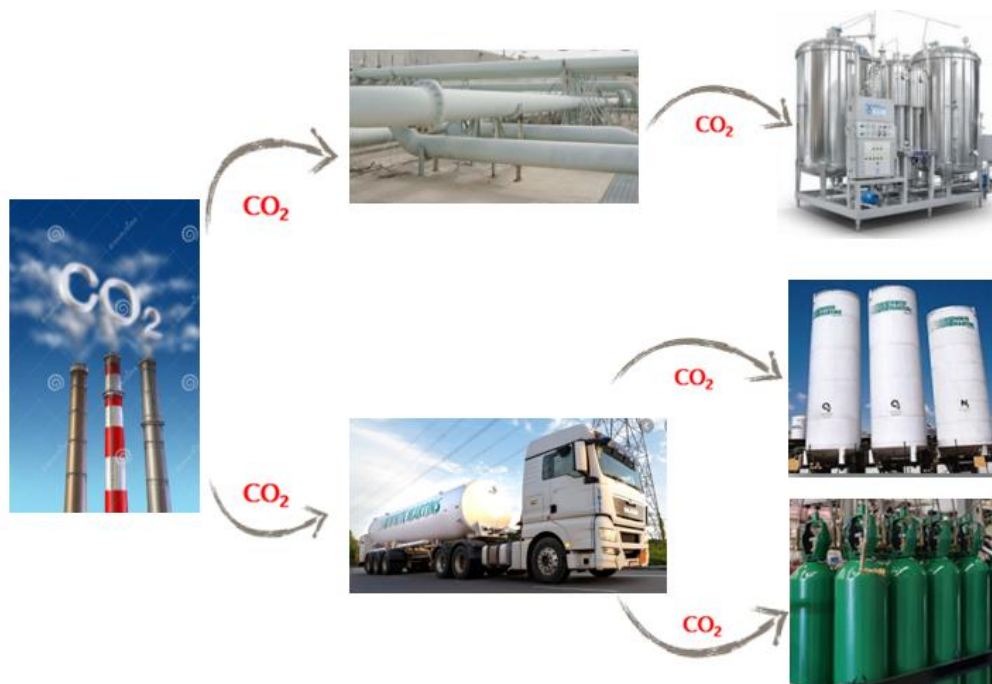


O principal produto da reação de carbonatação é carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), este é insolúvel e precipita nos poros do concreto sob a forma mineralógica de calcita, vaterita e aragonita (SMOCZYK, 1976).

- **Matéria prima –  $\text{CO}_2$  capturado**

O dióxido de carbono a ser empregado na cura é capturado por empresas especializadas como AirLiquide e WhiteMartins de fontes emissoras com elevadas concentrações (> 90% de  $\text{CO}_2$ ) e elevada pureza (ausência de contaminantes como umidade e/ou demais gases). Após a captura, o  $\text{CO}_2$  é purificado e liquefeito e poderá ser transportado por tubulação (pipes) dentro da própria indústria, como ocorre nos casos de cogeração de sistemas de utilidades, em que o próprio cliente de  $\text{CO}_2$  utiliza o  $\text{CO}_2$  produzido, ou então, o  $\text{CO}_2$  capturado é transportado em caminhões tanque que abastecerão clientes à granel ou se dirigirão para um centro de enchimento, onde o  $\text{CO}_2$  será descarregado em um tanque e posteriormente preencherá os cilindros (AirLiquide (2021); WhiteMartins(2021)). A Figura 80 demonstra de forma simplificada o percurso do  $\text{CO}_2$  da captura ao cliente final.

**Figura 80 - Transporte do  $\text{CO}_2$  para atender a própria indústria que o capturou e demais clientes.**



Fonte: Disponível em: <https://industrial.airliquide.com.br/modo-fornecimento/cilindros-e-dewars>. Acesso em 16/06/2021; Disponível em: <https://www.poder360.com.br/coronavirus/fornecedora-de-oxigenio-pediu-apoio-a-saude-antes-de-crise-e-nao-foi-atendida/>. Acesso em 16/06/2021; Disponível em: <http://wquestcnesaof2012.blogspot.com/2013/02/algumas-medidas-de-contribuicao-para.html>. Acesso em 16/06/2021.

Para armazenar o CO<sub>2</sub> nas dependências das indústrias brasileiras não há necessidade de licença ambiental Cetesb e/ou Prefeitura. As empresas fornecedoras disponibilizam ficha de segurança. Ocorre que o CO<sub>2</sub> por ser um gás inerte, mais pesado que o ar, pode ocupar o espaço deste. Contudo, todo cuidado deve ser tomado para se evitar casos de asfixia. Sendo assim, é importante que os tanques estejam alocados em local aberto e ventilado e a câmara onde será realizada a cura possua um sistema de exaustão eficiente.

- **Instalações da câmara de cura e equipamentos de controle de parâmetros**

Para futuras instalações na fábrica verifica-se a possibilidade de *retrofit* nas câmaras já existentes, desde que haja a perfeita vedação destas por meio da instalação de portas apropriadas, evitando assim, o risco de acidentes devido ao vazamento de CO<sub>2</sub>. Existe também a possibilidade de novas instalações da câmara de cura com CO<sub>2</sub> na indústria e estas vão desde instalações em alvenaria até containers e/ou câmaras apropriadas. O controle dos parâmetros de temperatura, umidade, pressão e concentração de CO<sub>2</sub> deve ser realizado através de equipamentos como manômetro para verificação da pressão interna da câmara; e sensores, como o sensor de CO<sub>2</sub>, sensor de temperatura, sensor de umidade, entre outros.

#### **4.1.1.2 Casos de Sucesso - Pesquisas de processos tecnológicos e produtos similares**

De acordo com Castro (2011) em um estudo de viabilidade técnica faz-se necessário verificar se a tecnologia a ser empregada é aplicada na prática e se o conhecimento técnico é disponível, pois a maioria das empresas optam em investir em tecnologias maduras, já utilizadas anteriormente, em que são conhecidos os problemas e melhorias; e poucas empresas optam por utilizar a tecnologia presente apenas no estado da arte. A tecnologia a ser apresentada neste tópico é aplicada na prática em países como Estados Unidos, Canadá e Reino Unido e é inédita no Brasil. Para tanto, serão apresentados alguns casos de sucesso de indústrias que aplicam a cura com CO<sub>2</sub> em pré-fabricados cimentícios não armados.

#### 4.1.1.2.1 Solidia Technologies

- **Empresa**

A start-up americana Solidia foi fundada em 2008, com um investimento de cerca de US\$ 80 milhões, através de investidores como LafargeHolcim, Total, Air Liquide, Oil & Gas Climate Initiative, BASF Venture Capital, BP Ventures, Kleiner Perkins Caufield & Byers, Bright Capital, entre outros (Meyer et al, 2018).

- **Produtos comercializados**

A empresa comercializa blocos de concreto e peças de concreto para pavimentação que armazenam CO<sub>2</sub>, bem como a tecnologia de cura com CO<sub>2</sub> (JAIN et al, 2014).

- **Confecção e moldagem dos pré-fabricados que armazenam CO<sub>2</sub>**

São empregados os mesmos equipamentos, traço, tempo ciclo utilizados na produção dos pré-fabricados tradicionais (DECRISTOFARO et al, 2014).

- **Cura carbônica**

- **Matéria prima:** segundo Meyer et al (2018) o CO<sub>2</sub> empregado pela empresa é fornecido pela parceira AirLiquide e geralmente fica armazenado em tanques como o da Figura 81.

**Figura 81 - Tanque para armazenamento de CO<sub>2</sub> capturado.**



Fonte: Adaptado de Meyer et al (2018).

- **Instalações:** de acordo com Meyer et al (2018) quanto a estrutura da câmara, a empresa inicialmente desenvolveu um protótipo aplicado em vários lugares do mundo com mais de 50

testes em empresas interessadas na tecnologia. A Figura 82, demonstra a câmara de testes empregada pela empresa para realização da cura com CO<sub>2</sub> em pequena escala.

**Figura 82 - Câmara de testes Solidia.**



Fonte: Adaptado de Meyer et al (2018).

De posse da comprovação da captura de CO<sub>2</sub> e ganho de resistência mecânica em pré-fabricados não armados por meio da cura carbônica, a tecnologia amadureceu e foram desenvolvidas estruturas permanentes de câmara de carbonatação que foram instaladas em diversas fábricas ao redor do mundo. A Figura 83 traz câmaras de carbonatação localizadas nos Estados Unidos, Canadá e Reino Unido.

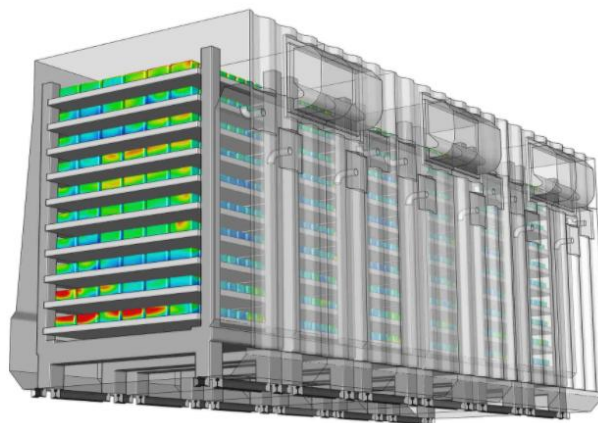
**Figura 83 - Câmaras de carbonatação desenvolvidas pela Solidia Technologies em estruturas de Container, localizadas: a) EUA, b) Canadá, c) d) Reino Unido.**



Fonte: Adaptado de Meyer et al (2018).

- **Equipamentos e acessórios:** de acordo com Hall (2019) o fluxo de gás na câmara ocorre de modo a garantir uma evaporação uniforme na superfície de todos os produtos. Isso permite que o tempo de processamento do lote seja minimizado, uma vez que o produto de cura mais lenta na câmara define a duração de todo o processo. A Figura 84 traz uma demonstração da dinâmica de fluidos computacional desenvolvido para as câmaras Solidia indicando a taxa de evaporação de água dentro das câmaras de cura.

**Figura 84 - Modelo de dinâmica dos fluidos computacional indicando a taxa de evaporação de água dentro das câmaras de cura.**



Fonte: HALL (2019). Acesso em: 10/04/2022.

A Figura 85 demonstra o modelo computacional de fluxo de gás desenvolvido que considera condições ideais. O CO<sub>2</sub> por ser mais denso que o ar é injetado por baixo da câmara e o ar é expelido por cima. A empresa trabalha com temperaturas elevadas no interior da câmara (60°C) (HALL, 2019).

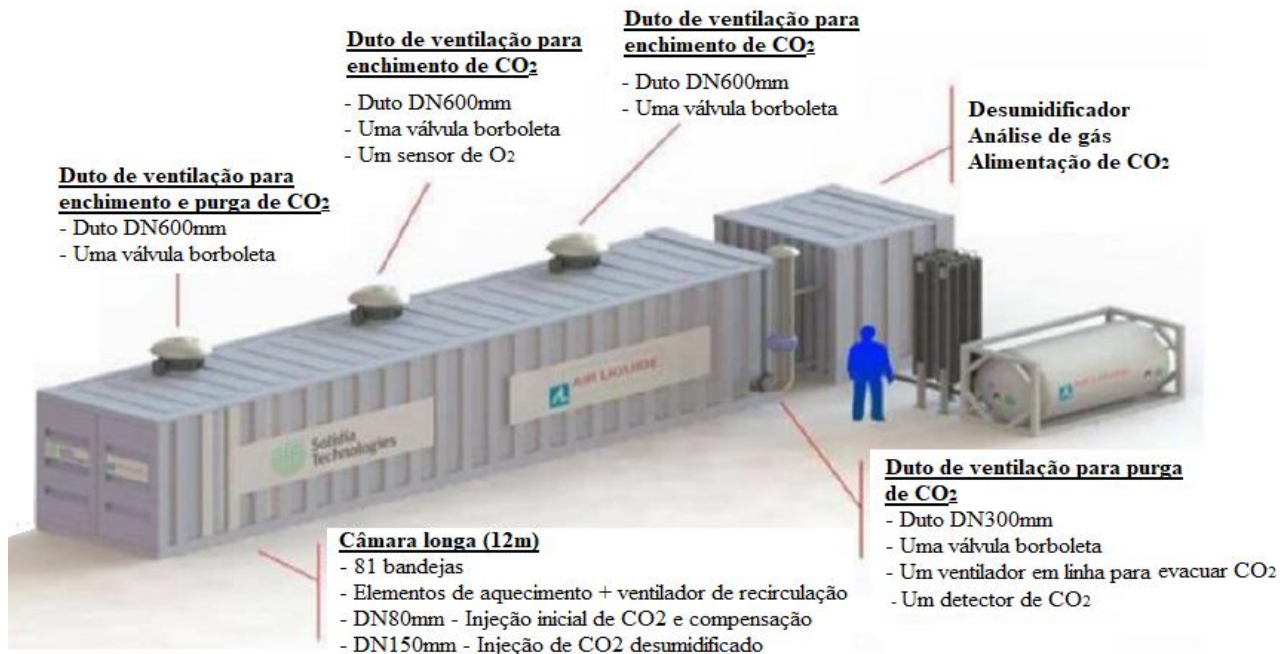
**Figura 85 - Fluxo de gás dentro das câmaras Solidia modelado para condições ideais.**



Fonte: HALL (2019). Acesso em: 10/04/2022.

A empresa Aldenlab em parceria com a Solidia já projetaram e construíram câmaras de 3,00 m de largura x 6,00 m de altura x 23,00 m de comprimento. E os dispositivos empregados para controle e ventilação foram demonstrados na Figura 86.

**Figura 86 - Fluxo de gás dentro das câmaras Solidia modelado para condições ideais.**



Fonte: Adaptado de MEYER et al (2018).

▪ **Vantagens da cura com CO<sub>2</sub> verificadas pela empresa:**

- Não consome água, mas sim CO<sub>2</sub>;
- Aproveita as dependências da fábrica, processo produtivo, equipamentos e matéria prima;
- É adaptável às linhas de produção existentes;
- Cura inteligente e rápida, pois os resultados de resistência à compressão dos pré-fabricados não armados curados com CO<sub>2</sub> obtidos em 24 horas equivalem aos resultados de resistência à compressão dos pré-fabricados não armados convencionais aos 28 dias;
- Redução do estoque, devido ao tempo de cura mais rápido, possibilitando a produção e entrega *just-in-time*;
- Melhor desempenho e maior durabilidade do que o concreto convencional;
- Não ocorrência de eflorescência primária.

## 4.1.1.2.2 Carboclave

### ▪ Empresa

*Start-up* canadense fundada em 2016, após demonstrar uma série de sucessos no desenvolvimento, validação e expansão de uma tecnologia mais sustentável, a cura com CO<sub>2</sub>, que não apenas superou a autoclavagem, mas também todos os outros métodos convencionais de cura de concreto.

### ▪ Produtos comercializados

A empresa comercializa blocos de concreto que armazenam CO<sub>2</sub>, bem como a tecnologia de cura com CO<sub>2</sub>.

### ▪ Confecção e moldagem dos pré-fabricados que armazenam CO<sub>2</sub>

São empregados os mesmos equipamentos, traço, tempo ciclo utilizados na produção dos pré-fabricados tradicionais.

### ▪ Cura carbônica

- **Matéria prima:** o CO<sub>2</sub> empregado pela empresa Carboclave é fornecido pela parceira Praxair e geralmente fica armazenado em tanques como o da Figura 87.

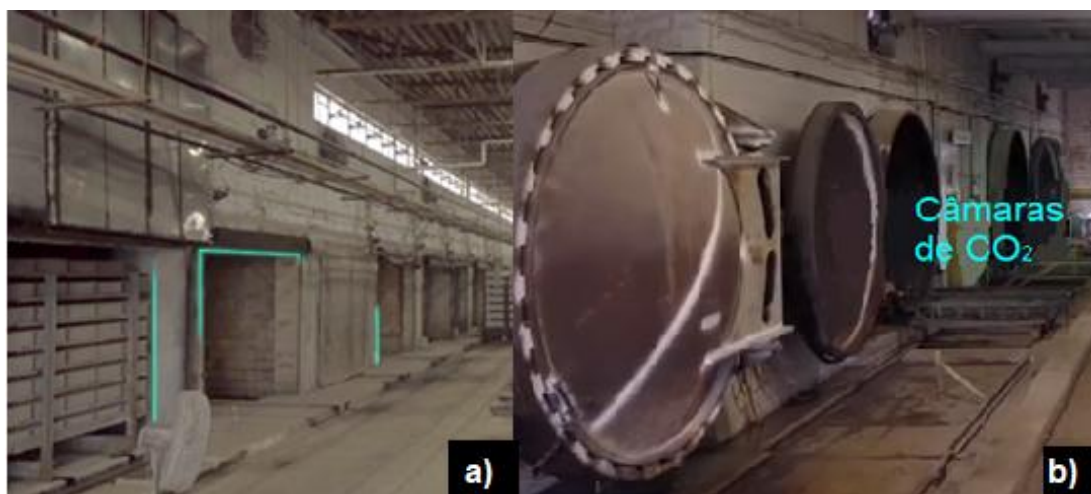
**Figura 87 - Tanque para armazenamento de CO<sub>2</sub> capturado.**



Fonte: Disponível em: <<http://www.carboclave.com>>. Acesso em: 16/04/2021.

- **Instalações:** quanto a estrutura da câmara, a empresa Carboclave, disponibiliza a tecnologia em duas possibilidades, *retrofit* e novas instalações. O *retrofit* é realizado quando são utilizadas as estruturas da câmara de cura já existentes na indústria com devidas adaptações trabalhando-se com pressão atmosférica; e a nova instalação, trata-se da câmara especialmente projetada e construída para a cura com CO<sub>2</sub> em autoclave com pressões elevadas. A Figura 88, demonstra câmaras de cura com CO<sub>2</sub> Carboclave *retrofit* e novas instalações.

**Figura 88 - Câmaras de carbonatação desenvolvidas pela Carboclave: a) Retrofit, b) Novas instalações.**



Fonte: Disponível em: <https://www.carboclave.com/#adoption>. Acesso em: 12/04/2021.

- **Equipamentos e acessórios:** os sistemas de fluxo de gás e segurança foram desenvolvidos pela empresa Praxair, já o suporte de desenvolvimento, engenharia, instalação e automatização foram implementados pela empresa Besser.

▪ **Vantagens da cura com CO<sub>2</sub> verificadas pela empresa:**

- Os blocos de concreto CarboClave são 25% mais ecológicos do que os blocos de concreto tradicionais, pois absorvem até 250g de CO<sub>2</sub> por bloco de 19x19x39cm;
- Os pré-fabricados não armados curados com CO<sub>2</sub> apresentam maior resistência à compressão axial do que os tradicionais, maior resistência ao congelamento/descongelamento; maior resistência ao ataque do sulfato; maior resistência à secagem e retração atmosférica; sensibilidade e permeabilidade reduzida; e efeito de eflorescência reduzido.

### 4.1.1.2.3 CarbonBuilt

- **Empresa**

A CarbonBuilt surgiu em 2014 no Institute for Carbon Management da University of California, Los Angeles (UCLA). Em 2020, com o apoio do Departamento de Energia dos EUA e da NRG COSIA Carbon XPRIZE, eles tiraram o protótipo do papel e desenvolveram a cura com CO<sub>2</sub> na prática (LEE, 2021).

- **Produtos comercializados**

A empresa comercializa tecnologias reversas de utilização de CO<sub>2</sub> para indústrias de que buscam utilizar de forma benéfica o CO<sub>2</sub> emitido nas plantas. A cura carbônica é uma delas. Inicialmente, estão produzindo blocos de concreto que absorvem CO<sub>2</sub> e brevemente pretendem ampliar a gama de pré-fabricados não armados ecológicos. Atualmente, desenvolvem projetos nos Estados Unidos, Europa e Índia e, seus produtos estarão disponíveis primeiro nesses mercados.

- **Confecção e moldagem dos pré-fabricados que armazenam CO<sub>2</sub>**

São empregados os mesmos equipamentos, traço, tempo ciclo utilizados na produção dos pré-fabricados tradicionais.

- **Cura carbônica**

- **Matéria prima:** o CO<sub>2</sub> empregado advém da própria planta que o emite. A Figura 89 demonstra a tubulação de CO<sub>2</sub> advinda de uma termoelétrica, o gás será encaminhado até a câmara de carbonatação instalada nas dependências da termoelétrica.

**Figura 89 - Tubulação contendo o CO<sub>2</sub> que será injetado na câmara de carbonatação.**



Fonte: Disponível em: < <https://www.carbonbuilt.com/technology>>. Acesso em: 16/06/2021.

- **Instalações:** para a estrutura da câmara utilizou-se um container adaptado para o carregamento dos blocos de concreto através de empilhadeiras. A Figura 90 demonstra o container-câmara.

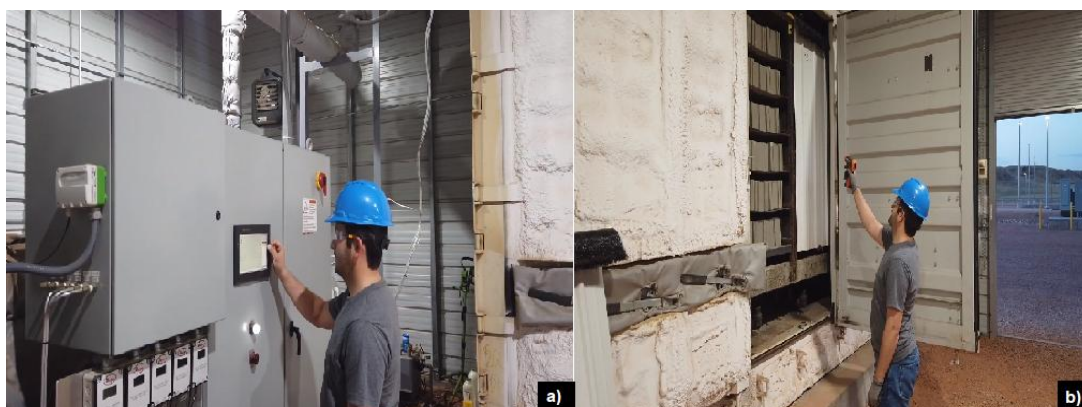
**Figura 90 - Container-câmara.**



Fonte: Disponível em: < <https://www.carbonbuilt.com/technology>>. Acesso em: 16/06/2021.

- **Equipamentos e acessórios:** a câmara é controlada por sensores de CO<sub>2</sub>, umidade e temperatura. A Figura 91 demonstra a inspeção dos mesmos.

**Figura 91 - Controle da câmara: a) configuração da injeção de CO<sub>2</sub>, b) aferição da temperatura.**



Fonte: Disponível em: < <https://www.carbonbuilt.com/technology>>. Acesso em: 16/06/2021.

- **Vantagem da cura com CO<sub>2</sub> verificada pela empresa:** a principal vantagem enfatizada pela empresa é a incorporação definitiva do CO<sub>2</sub> no concreto e remoção deste passivo ambiental da atmosfera.

#### 4.1.1.2.4 Carbicrete

- **Empresa**

A CarbiCrete é uma empresa Canadense que comercializa a tecnologia de captura de CO<sub>2</sub> em blocos e peças de concreto para pavimentação através da cura carbônica. A tecnologia patenteada pela empresa foi desenvolvida na McGill University e inclui a produção de um concreto com substituição de cimento por escória de aciaria.

- **Produtos comercializados**

A empresa licencia a tecnologia para os fabricantes de blocos de concreto e supervisionar o retrofit para implementação do processo na indústria.

- **Confecção e moldagem dos pré-fabricados que armazenam CO<sub>2</sub>**

São empregados os mesmos equipamentos e tempos de ciclo utilizados na produção dos pré-fabricados tradicionais. O traço tem substituição de cimento por escória de aciaria.

- **Cura carbônica**

- **Matéria prima:** o CO<sub>2</sub> empregado pela empresa Carbicrete é fornecido pela parceira Praxair e fica armazenado em tanques.

- **Instalações:** informou-se a possibilidade de *retrofit* em câmaras já existentes e novas instalações utilizando container adaptado. A Figura 92 demonstra a câmara executada em container.

**Figura 92 - Container-câmara.**



Fonte: Disponível em: <https://carbicrete.com/technology/>. Acesso em: 12/06/2021.

- **Equipamentos e acessórios:** a câmara é controlada por sensores de CO<sub>2</sub>, pressão, umidade e temperatura. Informou-se que o procedimento de cura com CO<sub>2</sub> tem duração de 5 hs a 6 hs.

▪ **Vantagem da cura com CO<sub>2</sub> verificada pela empresa:**

- Elevado ganho de resistência antes das 24 hs após a cura com CO<sub>2</sub>;
- Resistência à compressão do bloco curado com CO<sub>2</sub> é 30% do que no bloco curado convencionalmente
- Segundo a empresa para se produzir um bloco de concreto convencional gera-se 2 kg de CO<sub>2</sub>, já o bloco curado com CO<sub>2</sub> a geração é negativa (-1 kg), já que o CO<sub>2</sub> é absorvido.

## **4.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE QUANTO A LOCALIZAÇÃO**

### **4.2.1 LOCALIZAÇÃO**

Segundo CORREA (2011) decisões relacionadas a localização da implantação de um empreendimento são caras e difíceis de serem revertidas, além disso, o autor afirma que: “a localização de uma operação afeta tanto sua capacidade de competir, quanto outros aspectos internos e externos”. Ocorre que a localização afeta diretamente nos custos de transporte dos insumos e produto final, custos de mão-de-obra (uma vez que diferentes regiões, podem possuir diferentes níveis salariais) e custo e disponibilidade de energia, além disso a escolha do local influencia diretamente nas despesas, investimentos e até mesmo receitas. O estudo de localização tem como objetivo principal determinar o melhor local para o empreendimento. Este local, também conhecido como localização ótima pode ser compreendido como aquele que dê ao projeto a melhor relação custo/benefício em um prazo de tempo adequado.

#### **4.2.1.1 Variáveis Locacionais**

As variáveis locacionais tratam-se dos fatores que devem ser levados em consideração no momento da escolha da localização ideal do empreendimento. Em geral, deve-se considerar a disponibilidade de matérias-primas, proximidade com o mercado consumidor e/ou fatores ligados ao processo produtivo. As análises devem ponderar entre os principais gastos e ganhos entre as diferentes escolhas descritas a seguir (LIMA E SILVA, 2012):

- Quanto a disponibilidade de matérias primas: quando esta demandar grandes volumes e o transporte for dificultoso ou longínquo, recomenda-se que a localização do empreendimento seja próxima às fontes dos insumos;

- Quanto ao mercado consumidor: se o foco do empreendimento é a relação com os clientes, a localização deve ser próxima ao mercado consumidor;
- Quanto ao processo produtivo: alguns processos produtivos podem exigir determinadas condições para que se concretizem, por exemplo, podem necessitar de uma fonte de água próxima para resfriamento, ou estar próximo de uma subestação de energia para seu perfeito funcionamento, entre outros. Contudo, é desejável que a localização da unidade esteja alinhada com as necessidades do processo produtivo.

No tópico seguinte serão analisados os fatores que verificarão a viabilidade técnica de implantação da referida cura no Brasil, mais precisamente na região de São Paulo.

### **4.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E LOCALIZAÇÃO PARA IMPLEMENTAÇÃO DA CURA QUÍMICA COM CO<sub>2</sub> EM FÁBRICAS DE BLOCOS DE CONCRETO NA REGIÃO DE SÃO PAULO**

#### **4.3.1 METODOLOGIA**

Para verificar a viabilidade técnica e de localização da implantação da cura com CO<sub>2</sub> em fábricas de blocos de concreto localizadas na região de São Paulo, foram realizadas diversas rodadas de *brainstorming* com fabricantes de blocos de concreto, recrutados pela Associação Bloco Brasil, além de reuniões com fornecedores brasileiros de CO<sub>2</sub>. A partir da discussão, foram avaliados e elencados os equipamentos, materiais e outras necessidades, tanto para o caso de nova instalação de câmara como para *retrofit*. A localização dos fornecedores de CO<sub>2</sub> e produtores de blocos foi identificada no mapa do estado, além disso, foram avaliados os custos dos materiais, equipamentos, CO<sub>2</sub> e outros suprimentos, bem como o custo inicial estimado para uma câmara nova e reformada. A partir da revisão da literatura foi estimada a eficiência da cura com carbono. A partir desses dados foi possível avaliar a viabilidade técnica e locacional para implantação da cura com carbono em blocos de concreto na região de São Paulo.

#### **4.3.2 MATÉRIA PRIMA – CO<sub>2</sub> CAPTURADO**

Não resta dúvida que o fornecimento de CO<sub>2</sub> capturado é possível e viável de ser realizado no estado de São Paulo, existindo não apenas uma, mas algumas empresas fornecedoras do referido gás. O gás carbônico deverá ser transportado das plantas

fornecedoras de CO<sub>2</sub> capturado às fabricas de blocos de concreto por meio de caminhões tanques. Em seguida, este será armazenado em tanques localizados nas dependências da indústria de blocos e posteriormente será encaminhado por tubulações executadas pela fornecedora de CO<sub>2</sub> às câmaras de cura carbônica.

Para a instalação e operação do tanque de CO<sub>2</sub> não há necessidade de licença ambiental e/ou da Prefeitura. O gás é inerte, não explode ou pega fogo, porém deve ser armazenado em local arejado, pois pode causar asfixia.

#### 4.3.3 INSTALAÇÕES

Verifica-se a possibilidade de realização da cura carbônica tanto em novas instalações em estruturas como containers e/ou câmaras confeccionadas especificamente para tal finalidade; como a possibilidade de *retrofit* nas câmaras já existentes na indústria. Em ambos os casos deve-se garantir a estanqueidade. A Figura 93, demonstra um modelo de nova instalação, semelhante à uma câmara fria com controle de temperatura, umidade e estanqueidade confeccionada no Brasil e que pode ser empregada, com os devidos ajustes, na indústria fabricante de blocos de concreto com a finalidade de realização da cura com CO<sub>2</sub>.

**Figura 93 - Proposta de câmara de carbonatação: nova instalação.**



Fonte: Disponível em:

<https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/construcao/isomil/produtos/refrigeracao-ventilacao-e-exaustao/camara-frigorifica>. Acesso em: 19/08/2021.

O *retrofit* em câmaras de cura existentes nas dependências das indústrias fabricantes de blocos de concreto brasileiras é possível. A Figura 94, demonstra câmara de cura à vapor empregada em importante fábrica de blocos de concreto localizada na região de São Paulo.

**Figura 94 - Câmaras de cura à vapor em fábrica de blocos de concreto.**



Fonte: Autor (2018).

A análise foi realizada considerando câmara de cura confeccionada em estrutura de concreto armado, dotada de alvenaria de blocos de concreto e laje. Para a instalação da câmara de cura com CO<sub>2</sub>, deve-se garantir:

- **Estanqueidade**

A estanqueidade da câmara deve ser garantida com instalação de porta tipo guilhotina ou de correr em que seja garantido o não vazamento de gás carbônico e também deve-se realizar a impermeabilização das paredes e teto para garantir que o CO<sub>2</sub> não escape por frestas ou rachaduras. Indica-se a impermeabilização através da aplicação de revestimento impermeabilizante bicomponente semi-flexível.

- **Isolamento térmico**

O isolamento térmico é importante para padronizar o procedimento de cura e evitar que alterações climáticas de temperatura interfiram no processo. Para tanto, recomenda-se que as paredes e teto da câmara sejam revestidos com material isolante como lã de vidro, mantas térmicas e/ou espumas isolantes.

- **Entrada de CO<sub>2</sub>**

A entrada de CO<sub>2</sub> deverá ocorrer na região inferior da câmara já que o CO<sub>2</sub> é mais pesado que o ar. A tubulação que sai do tanque de CO<sub>2</sub> e entra na câmara deverá ser dimensionada pelo fornecedor de CO<sub>2</sub>, confeccionada em aço inox e deverá contar com um regulador de pressão antes da entrada na câmara, já que trabalhar-se-á com pressão atmosférica e no

tanque o gás encontra-se pressurizado com aproximadamente 15 bar. O fornecedor de CO<sub>2</sub> dimensionará o tempo de enchimento da câmara de acordo com a vazão possibilitada pelo diâmetro da tubulação.

- **Saída de CO<sub>2</sub> e ar (exaustão)**

Deverá ser providenciado um sistema de exaustão para que o ar seja retirado da câmara durante o enchimento desta com CO<sub>2</sub>, bem como o CO<sub>2</sub> seja expelido ao final do procedimento de cura. Recomenda-se a utilização de exaustores axiais dotados de válvulas borboletas acionadas por mecanismos hidráulicos ou pneumáticos, dimensionados de acordo com as dimensões da câmara. Um duto localizado na região inferior da câmara também deverá ser previsto para a exaustão do CO<sub>2</sub> após a cura carbônica.

- **Ventilação**

A ventilação no interior da câmara é essencial para que o CO<sub>2</sub> seja distribuído de forma homogênea. Os ventiladores (blowers) podem ser posicionados nas laterais das paredes, de um lado na região superior e do outro lado na região inferior, criando um fluxo de ar para promover um maior contato entre o CO<sub>2</sub> e as paredes dos blocos.

- **Climatização**

Deverá ser desenvolvida a climatização da câmara com temperatura e umidade específicas para a cura com CO<sub>2</sub>. O sistema deverá conter um padrão de funcionamento, controlado através de um painel de automação, a fim de possibilitar a alteração dos parâmetros desejados a qualquer momento. O fluxo de ar deverá ser efetuado através de um buster interligado em dutos flexíveis e blindados, confeccionados com material de alta performance a fim de evitar que haja fuga de CO<sub>2</sub>. O sistema de umidificação deverá ser acoplado juntamente com o equipamento de refrigeração.

- **Segurança**

Na parte externa à câmara deverá ser instalado painel de segurança automatizado dotado de luzes nas cores vermelha e verde, as quais indicarão a impossibilidade ou possibilidade de abertura da porta da câmara. A luz vermelha estará diretamente relacionada à elevada concentração de CO<sub>2</sub> no interior da câmara e a luz verde indicará a baixa concentração de CO<sub>2</sub> na câmara, comunicando ao operador a proibição ou permissão para abertura da porta da câmara de carbonatação.

#### **4.3.4 EQUIPAMENTOS E SENSORES PARA CONTROLE DE PARÂMETROS**

O controle dos parâmetros de temperatura, umidade, pressão e concentração de CO<sub>2</sub> deve ser realizado através de equipamentos como manômetro para verificação da pressão interna da câmara; e sensores, como o sensor de CO<sub>2</sub>, sensor de temperatura, sensor de umidade, entre outros.

- **Sensor de CO<sub>2</sub>**

O sensor para avaliação de concentração de dióxido de carbono, deverá apresentar faixa de avaliação entre 0% e 100%. Tal sensor mede os níveis de dióxido de carbono através de tecnologia de LED de estado sólido NDIR patenteada que oferece desempenho preciso de medição de CO<sub>2</sub> durante a vida útil do sensor. O sensor deverá ser instalado na região superior da câmara para verificar se a mesma está totalmente preenchida com CO<sub>2</sub>, já que este por ser mais pesado que o ar tende a ficar embaixo, dessa forma quando a leitura der 100%, demonstra-se que todo o interior da câmara estará preenchido com CO<sub>2</sub>. E na região inferior, próximo ao duto de ventilação para exaustão do CO<sub>2</sub>, uma vez que quando a concentração de CO<sub>2</sub> no interior da câmara for baixa, a mesma poderá ser aberta, comunicando o sistema de segurança que automaticamente acenderá a luz indicativa verde.

- **Sensor de umidade relativa**

O Sensor de Umidade Relativa contém um circuito integrado que monitora a umidade relativa no intervalo de 0 a 95% ( $\pm 5\%$ ). Este sensor usa um polímero capacitivo para detectar a umidade; em seguida, um circuito integrado produz uma tensão de saída que varia com a umidade relativa, detectando a mesma. Este sensor deverá ser posicionado na região intermediária da câmara, pois esta localização representa a média do todo.

- **Sensor de temperatura**

O Sensor de temperatura realizará a avaliação da temperatura no interior da câmara, com faixa de avaliação entre -40°C a 135°C. Este sensor usa o 20 k  $\Omega$  Termistor NTC, que é um resistor variável. Quando a temperatura aumenta, a resistência diminui. Este sensor deverá ser posicionado na região intermediária da câmara, pois esta localização representa a média do todo.

A Figura 95 demonstra os sensores para avaliação da concentração de CO<sub>2</sub>, umidade e temperatura.

**Figura 95 - Sensores: a) Concentração de CO<sub>2</sub>; b) Umidade; c) Temperatura.**

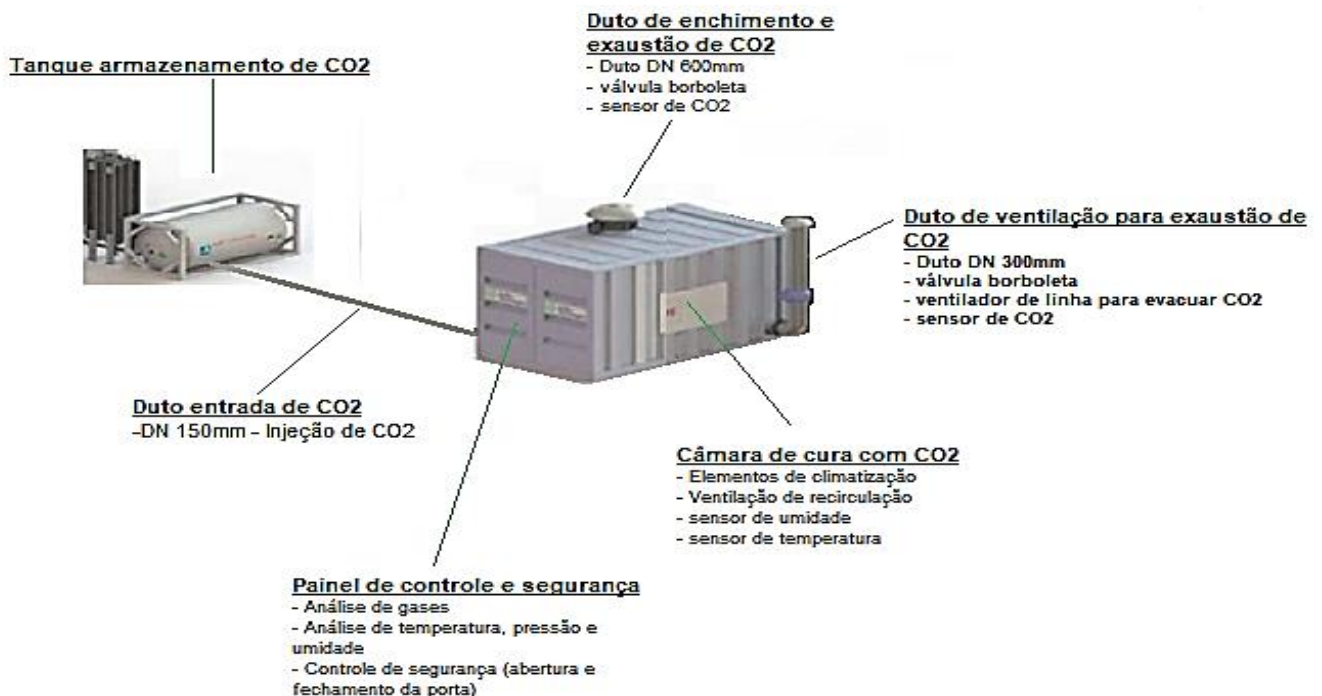


Fonte: Autor (2021).

- **Manômetro**

O manômetro a ser utilizado deverá apresentar sensor tipo Bourdon, caixa de aço inox e internos em liga de latão e sua especificação/configuração varia de acordo com as dimensões da câmara. Figura 96 demonstra as instalações da câmara e do fornecimento de CO<sub>2</sub>, bem como os equipamentos e sensores necessários para realização da cura com CO<sub>2</sub> na indústria, tanto para câmaras confeccionadas para tal finalidade como para câmaras *retrofit*.

**Figura 96 - Instalações da câmara e do fornecimento de CO<sub>2</sub>, equipamentos e sensores para realização da cura com CO<sub>2</sub> na indústria.**

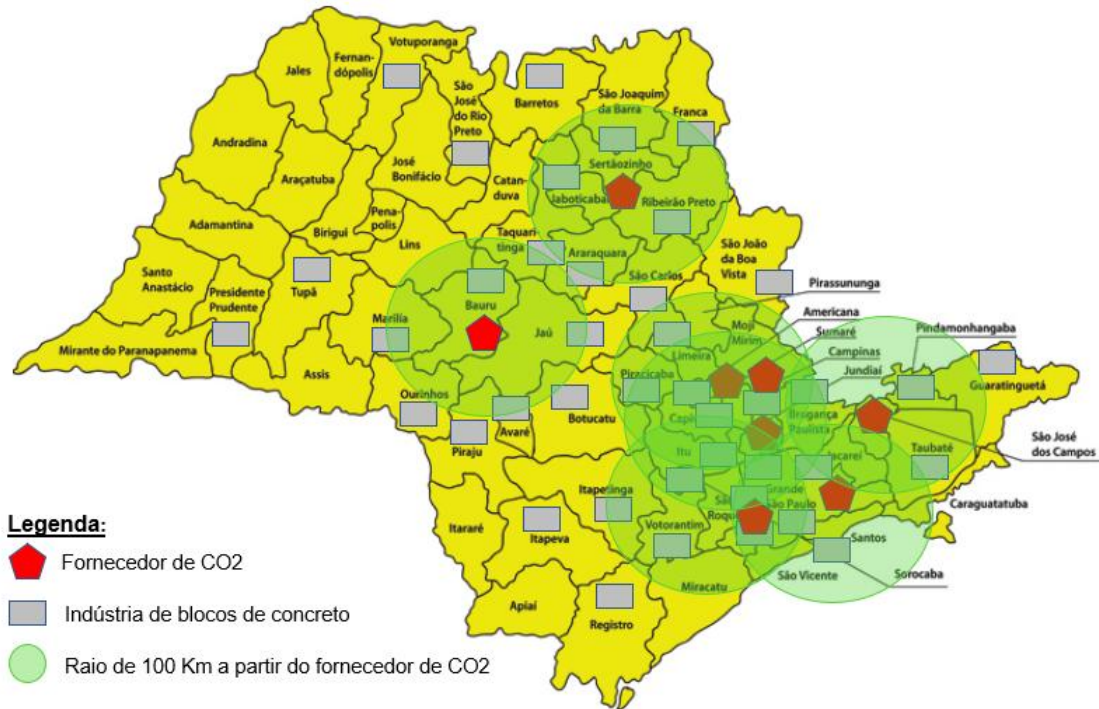


Fonte: Adaptado de Solidia Technologies. Disponível em: <https://www.solidiatech.com/solutions.html>. Acesso em: 16/04/2021.



com o oxigênio - em que toda cidade do estado de São Paulo possui o fornecimento (já que salva vidas); o CO<sub>2</sub>, dependendo da necessidade da sua captura e armazenamento, também poderá vir a ser distribuído para todas as fábricas paulistas.

**Figura 98 - Raio de 100 km para distribuição do CO<sub>2</sub>.**



Fonte: Autor (2021).

#### **4.3.6 ESTIMATIVA DE CONSUMO DE CO<sub>2</sub> PARA SATURAÇÃO DA CÂMARA DE CURA**

Para o cálculo do consumo de CO<sub>2</sub> para saturação da câmara de cura, considerou-se as dimensões e capacidade de armazenamento de blocos de uma câmara de cura à vapor já existente em fábrica de blocos de concreto localizada no estado de São Paulo, conforme demonstra a Figura 99.

**Figura 99 - Câmara de cura à vapor existente em indústria fabricante de blocos de concreto no estado de São Paulo.**



Fonte: Autor (2017).

Para tanto, foram levantadas as seguintes informações:

- Dimensão da câmara de cura: 4,00 × 4,00 × 4,00 m (comprimento × altura × profundidade);
- Dimensão da bandeja: 0,66 × 0,54 × 0,03 m;
- Dimensão da prateleira: 1,60 × 1,80 × 1,10 m;

A câmara em estudo acomoda 12 prateleiras empilhadas, sendo 06 embaixo e 06 em cima. Cada prateleira suporta 20 bandejas e 80 blocos de concreto com dimensões de 14×19× 39 cm. Portanto, torna-se possível curar 960 blocos ao mesmo tempo. A seguir serão demonstrados os cálculos.

- Volume câmara de cura: 64,00 m<sup>3</sup>;
- Volume líquido do bloco (14×19×39 cm): 0,0078 m<sup>3</sup>;
- Volume líquido ocupado pelos blocos na câmara: 7,49 m<sup>3</sup>;
- Volume ocupado pelas bandejas na câmara: 2,57 m<sup>3</sup>
- Volume ocupado pelas prateleiras na câmara: 1,00 m<sup>3</sup>

O cálculo do volume de CO<sub>2</sub> a ser injetado na câmara para sua saturação, trata-se de um cálculo geométrico, logo:

$$\text{Volume CO}_{2\text{injetado}} = \text{Vol}_{\text{câmara}} - \text{Vol}_{\text{liqbloco}} - \text{Vol}_{\text{bandejas}} - \text{Vol}_{\text{prateleiras}}$$

$$\text{Volume CO}_{2\text{injetado}} = 52,94\text{m}^3$$

1kg de CO<sub>2</sub> ocupa o 0,534m<sup>3</sup>, considerando-se 10% de perdas, serão necessários 109,00 kg de CO<sub>2</sub> para saturação da câmara de cura.

Considerando-se uma produção de 3 ciclos por minutos e 8 horas trabalhadas por dia, são produzidos 5760 blocos de concreto de 14x19x39 cm por dia. Esta produção preencherá seis

câmaras de cura/dia, consumindo cada ciclo 654 kg CO<sub>2</sub>/dia. Considerando 22 dias úteis por mês serão consumidos 14.388,00 kg CO<sub>2</sub>/mês para saturação da câmara de cura. Serão produzidos 126.720 blocos por mês.

#### **4.3.7 ESTIMATIVA DA CAPTURA DE CO<sub>2</sub> DURANTE A CURA PELOS BLOCOS DE CONCRETO**

Para o cálculo da estimativa mensal da captura de CO<sub>2</sub> pelos blocos de concreto foi considerado o traço:

Traço	Cimento (kg)	Pedrisco (l)	Areia de rio (l)	Pó de pedra (l)	Água (l)	Aditivo (l)	Fator a/c
Bloco	40	160	160	240	50	0,1	1,25

Com o referido traço produz-se 64 blocos, logo cada bloco é constituído por 0,625 kg de cimento. Considerando a produção mensal de 126.720,00 blocos, serão consumidos 79.200,00 kg cimento/mês.

Considerando a análise do estado da arte desta pesquisa, verificou-se que a menor taxa de captura de CO<sub>2</sub> em blocos de concreto produzidos com agregados naturais, curados com 100% de concentração de CO<sub>2</sub> foi de 8,62% (2 horas de cura com CO<sub>2</sub>) (MacMaster e Tavares (2015)) e a maior foi 36,03% (24 horas de cura com CO<sub>2</sub>) (B. Zhan et al. (2013)). Considerando a cura de 2 horas e a menor captura relatada, é possível sequestrar a partir de 6.827,00 kg CO<sub>2</sub>/mês. Como são necessários seis ciclos de 2 horas por dia, serão necessárias duas câmaras para a jornada de trabalho de 8 horas.

#### **4.3.8 ESTIMATIVA DE CUSTO INICIAL**

Para a nova instalação da câmara de cura foram feitos orçamentos considerando uma câmara fria com dimensões de 4,00 x 4,00 x 4,00 m (comprimento x altura x profundidade), equipada com sistema de temperatura, umidade, isolamento térmico e estanqueidade. O valor médio encontrado foi de R\$ 37.500,00. Os dispositivos de entrada e saída de CO<sub>2</sub> e ar, regulador de pressão e exaustores axiais, custam em torno de R\$ 5.525,00. Os sensores de CO<sub>2</sub>, umidade, temperatura, manômetro e sensores de interface custam em média R\$ 8.760,00. Totalizando R\$ 51.786,00.

Para modernização de uma câmara de cura existente com as mesmas dimensões de 4,00 x 4,00 x 4,00 m (comprimento x altura xprofundidade), verificou-se através do Boletim de Preços SINAPI (data base agosto/2022) que o serviço de impermeabilização de paredes e teto custa R\$ 3.594,00. Para isolamento térmico, após orçamento com empresas do setor, o

valor médio foi de R\$ 18.697,00. O sistema de ar condicionado, incluindo controle de umidade e temperatura, tem valor médio de R\$ 20.500,00. Os dispositivos necessários à entrada e saída de ar e CO<sub>2</sub>, dotados de regulador de pressão e exaustores axiais com venezianas para manutenção da vedação do sistema, totalizaram R\$ 5.525,00. Os sensores de CO<sub>2</sub>, umidade, temperatura, manômetro e sensores de interface custam em média R\$ 8.760,00. Totalizando R\$ 57.076,00.

Considerando que a câmara é um bem durável, diluindo o valor do investimento por um período mínimo de dez anos. Considerando que a produção de blocos de concreto no mesmo período é de 15.206.400,00; o aumento do custo por bloco será de R\$ 0,0034 para instalação nova e R\$ 0,0037 para *retrofit*, portanto, não há impacto no custo final do produto.

#### **4.3.9 ESTIMATIVA DE CONSUMO E CUSTO MENSAL DE CO<sub>2</sub>**

Para analisar o custo de CO<sub>2</sub> para produzir 126.720,00 unidades de alvenaria de concreto foram consideradas duas situações. O primeiro cenário considera que a fábrica de blocos de concreto localiza-se a 30 km do fornecedor de CO<sub>2</sub>. No segundo caso, a planta está a 100 km de distância do fornecedor de CO<sub>2</sub>. Na primeira situação, o custo do CO<sub>2</sub> será de R\$14.000,00/mês ou R\$ 0,11/bloco. E no segundo caso, o custo do CO<sub>2</sub> será de R\$ 46.673,00/mês ou R\$ 0,37/bloco. De acordo com uma pesquisa realizada com as indústrias do setor, em maio de 2022, a unidade de alvenaria de concreto convencionalmente curada 14x19x39 cm custou R\$ 2,65 (sem considerar a entrega custo de frete) cada. Portanto, os blocos de concreto curados com CO<sub>2</sub> apresentarão um custo extra que pode variar de 4% a 14%, a depender da distância da fábrica ao fornecedor de CO<sub>2</sub> e da taxa de captura de CO<sub>2</sub> aplicada. Quanto mais próxima a indústria estiver do fornecedor de CO<sub>2</sub>; mais viáveis serão os blocos de concreto curado com CO<sub>2</sub>.

De qualquer forma, considerando os benefícios ambientais, este custo não parece ser uma barreira para a implementação da tecnologia. Além disso, já foi discutido compensar monetariamente o sequestro de CO<sub>2</sub>. Contudo, quando a regulamentação estiver em vigor, este processo “amigo do ambiente” poderá, em breve, transformar-se em lucro monetário para as indústrias. A emissão de CO<sub>2</sub> relacionada à produção de cimento em 2020 no Brasil foi de aproximadamente 34.907.896,00 toneladas (SEEG, 2022). Naquele ano, foram produzidas 61.052.000,00 toneladas de cimento, das quais 3.952.000,00 foram consumidas pelo setor de pré-fabricados cimentícios não armados e 1.958.000,00 foram empregadas na fabricação de blocos de concreto (SNIC, 2022). Esta indústria utiliza cimento CP-V que emite cerca de 858 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento (CBCS, 2014). Com a taxa de captura de CO<sub>2</sub> considerada neste estudo, de 8,62%, teria sido possível sequestrar aproximadamente 168.780,00 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, se toda a produção de blocos de concreto tivesse sido submetida

à cura carbônica. Isto corresponde a ~0,5% do CO<sub>2</sub> total emitido pela produção brasileira de cimento em 2020, ou ~10% da emissão da indústria de blocos de concreto, e equivale ao sequestro de CO<sub>2</sub> de 21.100,00 árvores em um ano.

#### **4.3.10 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO**

A cura carbônica é uma inovação sustentável que ajuda a reduzir o aquecimento global. Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE, 2009), a tecnologia de captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>, até ao ano 2050, será responsável por uma redução de até 56% das emissões de CO<sub>2</sub> no setor cimenteiro. Portanto, a tecnologia de cura carbônica torna-se indispensável para atingir este objetivo.

Esta inovação já é aplicada com sucesso em países como Canadá, Estados Unidos e Reino Unido. Casos de sucesso são detalhados nesta tese.

De acordo com a viabilidade técnica aqui relatada, é possível implementar a tecnologia no estado de São Paulo, pois todas as necessidades requeridas pelo procedimento em questão foram atendidas. Foi apresentado um mapa mostrando os fornecedores de CO<sub>2</sub> e as fábricas de blocos de concreto localizadas no estado; quanto maior a distância entre o fornecedor e a fábrica, maior será o custo. Foi estimado um aumento de R\$ 0,11 a R\$ 0,37 após a implementação da cura carbônica se a planta estiver localizada a 30 km a 100 km do fornecedor de CO<sub>2</sub>, respectivamente. Esses custos representam de 4 a 14% do custo de produção dos blocos de concreto (sem considerar o custo do frete de entrega).

Se toda a indústria brasileira de blocos de concreto implementasse a cura carbônica, considerando a menor taxa de captura, seria possível sequestrar aproximadamente 168.780,00 toneladas de CO<sub>2</sub>/ano. Isso corresponderia a ~ 0,5% do total anual de CO<sub>2</sub> emitido pela produção brasileira de cimento, ou ~ 10% da indústria de blocos de concreto, e o sequestro de CO<sub>2</sub> possibilitado pela inovação apresentada equivaleria ao sequestro de 21.100.000,00 árvores em um ano.

# 5. METODOLOGIA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O estado da arte dos estudos que analisam a cura carbônica em pré-fabricados cimentícios não armados são escassos e não apresentam um consenso e padronização quanto ao processo produtivo e compactação dos materiais analisados, métodos de ensaio para verificação da captura de CO<sub>2</sub>, realização ou não de cura convencional anterior à cura carbônica e parâmetros de tratamento, corroborando para uma grande variabilidade de resultados.

A presente pesquisa contribuiu para reduzir essas variações ao otimizar os parâmetros e fatores relacionados à cura carbônica, na direção da máxima captura de CO<sub>2</sub> e concomitante ganho de resistência mecânica nos blocos de concreto. Para isso serão: i) empregados blocos normalizados produzidos industrialmente – acredita-se que a participação de uma empresa atuante no mercado de blocos de concreto, permitindo o emprego de equipamentos de qualidade, eficiência e compatíveis com a produção em escala industrial é um dos pontos principais do programa experimental, uma vez que aproxima ao máximo o estudo da realidade praticada no mercado atual; ii) analisados diversos parâmetros de tratamento de cura carbônica, como: início, duração, concentração de CO<sub>2</sub>, umidade, temperatura e pressão no interior da câmara; iii) empregadas técnicas analíticas como a termogravimetria e a termogravimetria derivativa para determinação do percentual de captura de CO<sub>2</sub> em blocos de concreto, proporcionando maior confiabilidade aos resultados encontrados.

Diversos motivos fizeram com que o bloco de concreto fosse o material cimentício não armado escolhido como objeto de estudo desta pesquisa, dentre eles, destacam-se: a) o fato deste ser produzido em larga escala o que propicia com que mais unidades sejam curadas e mais CO<sub>2</sub> absorvido; b) ser composto por concreto seco, apresentar paredes estreitas e geometria vazada, fatores que combinados permitem uma maior difusividade do CO<sub>2</sub> no interior da peça e um amplificado alcance da frente de carbonatação (POMMER E PADE, 2005); c) além de apresentar crescente utilização nos médios e grandes centros urbanos (PARSEKIAN, 2012; TAUIL e NESE, 2023).

Este estudo também pretende obter o coeficiente de correlação referente à resistência à compressão axial entre amostras cortadas dos blocos e os blocos inteiros, sendo estes vibro-prensados industrialmente; para tanto, trabalhar-se-á na etapa de laboratório com

amostras carbonatadas e referenciais, correlacionando-as com a unidade de alvenaria. Através do estado da arte não se observou a utilização de amostras extraídas dos blocos produzidos pelo processo de fabricação mencionado, além disso verificou-se grande variabilidade quanto aos formatos, compactação e tipo de concreto empregado (seco ou plástico), tanto na confecção das amostras como dos blocos, gerando importantes variações nos resultados obtidos. O intuito de correlacionar amostras e blocos deve-se ao fato de que os pesquisadores confeccionaram a câmara de carbonatação utilizada na pesquisa e ao trabalhar com amostras (5x5 cm) tornou-se possível reduzir as dimensões da câmara e ao mesmo tempo trabalhar com uma maior quantidade de variáveis.

Portanto, a fim de atender aos objetivos propostos para a pesquisa, o programa experimental buscou verificar a captura de CO<sub>2</sub> em blocos de concreto que serão submetidos à cura carbônica e a influência desta nas suas propriedades mecânicas. Para tanto, o programa experimental foi dividido em três etapas. Sendo assim, na primeira etapa determinar-se-á a correlação quanto à resistência à compressão axial dos blocos de concreto x amostras extraídas dos blocos. Já a segunda etapa tratará dos ensaios termogravimétricos e mecânicos para verificação da máxima captura de CO<sub>2</sub> e do ganho de resistência mecânica em amostras extraídas dos blocos de concreto. Por fim, na terceira etapa, os blocos de concreto, serão submetidos às melhores condições de cura obtidas na Etapa 2 e verificar-se-á a captura de CO<sub>2</sub> e ganho de resistência para os mesmos.

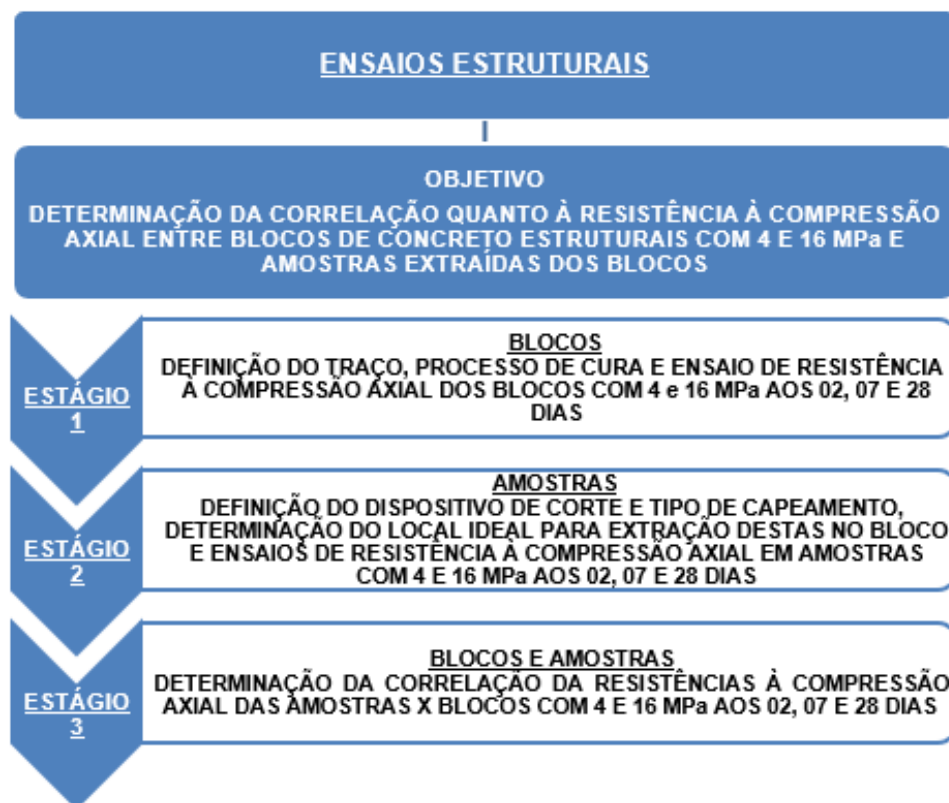
O programa experimental, sua metodologia e resultados referentes a Etapa 1 foram publicados na Revista Matéria com o título “*Determinação do fator de correlação quanto a resistência à compressão axial entre blocos de concreto e amostras extraídas dos blocos*” (<https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0004>).

## **5.1 ENSAIOS ESTRUTURAIS – ETAPA 1**

A referida etapa tem como objetivo determinar a correlação entre a resistência à compressão axial dos blocos e amostras. Para tanto, foi subdividida em 3 estágios. Assim sendo, o Estágio 1, refere-se a etapa de definição dos traços e processos de cura, bem como da realização de ensaios de resistência à compressão axial dos blocos de concreto com função estrutural de 4 MPa e 16 MPa aos 02, 07 e 28 dias. No Estágio 2 foi determinado o dispositivo de corte, tipo de capeamento, local ideal em que as amostras seriam extraídas dos blocos e, por fim, as amostras dos blocos com 4 e 16 MPa foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias. No Estágio 3, foi determinada a correlação quanto a resistência à compressão axial dos blocos e amostras com 4 e 16 MPa, aos 02, 07 e 28 dias. Optou-se por trabalhar com as referidas resistências, por estas apresentarem menor variação estatística, viabilizar a etapa dos ensaios termogravimétricos e

por tornar possível a verificação do comportamento quanto a captura de CO<sub>2</sub> para os extremos (menor e maior resistência). Quanto a idade para os ensaios de resistência à compressão axial, optou-se por trabalhar com 02 dias, pelo fato de que a pesquisa analisa os efeitos da cura carbônica no concreto e é sabido que esta promove elevado ganho de resistência logo nas primeiras idades; sendo assim, este é tempo mínimo ideal e necessário para analisarmos o comportamento estrutural do concreto devido a cura com CO<sub>2</sub>, já que com essa idade torna-se possível a realização dos ensaios. As idades de 07 e 28 dias, foram escolhidas por serem padrão de controle de materiais. A Figura 100, demonstra o fluxograma referente aos estágios citados.

**Figura 100 – Fluxograma referente à Etapa 1 do programa experimental.**



Fonte: Autor (2022).

### 5.1.1 ESTÁGIO 1

- **Blocos de concreto**

Os blocos de concreto utilizados na pesquisa foram produzidos por meio de máquina vibroprensa com dimensão nominal de 140 × 190 × 390 mm. Na Figura 101 é possível observar o bloco objeto de estudo da pesquisa. Os materiais e processos de fabricação foram os mesmos empregados no dia a dia da fábrica e são descritos a seguir.

**Figura 101 - Bloco de concreto empregado na pesquisa.**



Fonte: Autor (2022).

- **Aglomerante - Cimento Portland**

O Cimento Portland utilizado pela fábrica para produção dos blocos de concreto é o do tipo V de Alta Resistência Inicial (CPV - ARI) ensacado, com 40 kg.

- **Agregados naturais**

- a) Areia natural**

A areia natural utilizada na pesquisa é de origem quartzosa, oriunda do Porto de Areia Marimbondo situado à margem direita do Rio Grande no município de Fronteira - MG. Esta areia, classificada como agregado miúdo, foi utilizada na produção dos blocos. Amostras da referida areia foram coletadas para caracterização no Laboratório de Materiais e Componentes – LMC da UFSCar e as propriedades foram elencadas na Tabela 19, a seguir.

**Tabela 19 - Propriedades do agregado natural – areia média.**

PROPRIEDADE AVALIADA		AREIA MÉDIA
Teor de umidade total (%)		3,90
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	Estado solto	1480,18
	Estado compactado	1576,61
Volume de vazios (%)	Estado solto	42,18
	Estado compactado	38,41
Absorção de água (%)		6,03
Massa específica aparente no estado seco (g/cm <sup>3</sup> )		2,62
Massa específica na condição SSS (g/cm <sup>3</sup> )		2,64
Massa específica absoluta (g/cm <sup>3</sup> )		2,66
Teor de material pulverulento (%)		0,11

Fonte: Benitez (2020).

### b) Pó de pedra

O pó de pedra, como é popularmente conhecido, é uma areia industrial originária do processo de britagem de rocha basáltica. O material foi adquirido na Pedreira Constroeste, localizada à margem esquerda do Rio Grande no município de Icém - SP. Esse material também é utilizado na produção diária da fábrica e foi empregado na fabricação dos blocos. O pó de pedra também é classificado como agregado miúdo. Amostras do referido agregado foram coletadas para caracterização no Laboratório de Materiais e Componentes – LMC da UFSCar e as propriedades foram elencadas na Tabela 20, a seguir.

**Tabela 20 - Tabela 2: Propriedades do agregado natural – pó de pedra.**

PROPRIEDADE AVALIADA	PÓ DE PEDRA
Teor de umidade total (%)	2,11
Estado solto	1809,41
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	Estado compactado 1960,57
Estado solto	29,46
Volume de vazios (%)	Estado compactado 23,56
Absorção de água (%)	4,17
Massa específica aparente no estado seco (g/cm <sup>3</sup> )	2,65
Massa específica na condição SSS (g/cm <sup>3</sup> )	2,77
Massa específica absoluta (g/cm <sup>3</sup> )	3,01
Teor de material pulverulento (%)	21,25

Fonte: Benitez (2020).

### c) Pedrisco

O agregado graúdo utilizado tanto na pesquisa quanto no dia a dia da fábrica é o pedrisco de dimensão máxima ( $D_{máx}$ ) igual a 6,3 mm, de origem basáltica. Esse material foi adquirido na Pedreira Constroeste de Icém - SP. Amostras do referido agregado foram coletadas para caracterização no Laboratório de Materiais e Componentes – LMC da UFSCar e as propriedades foram elencadas na Tabela 21 a seguir.

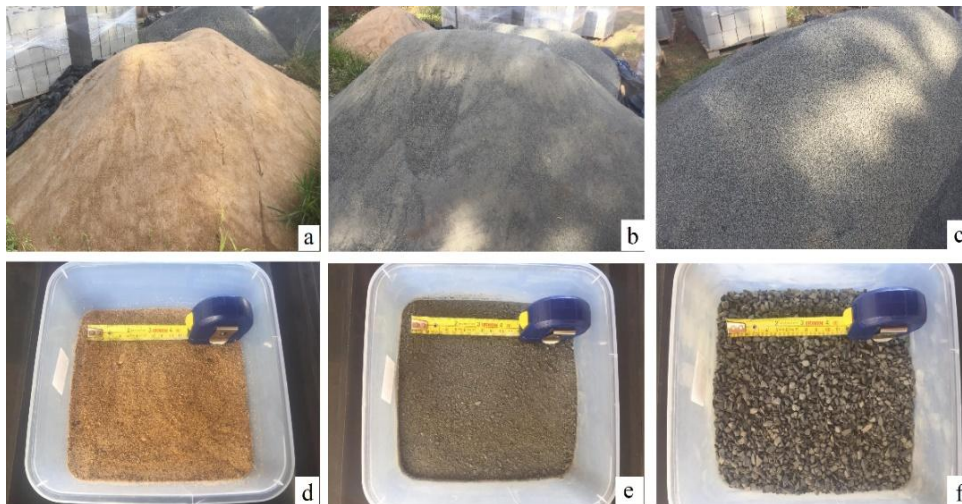
**Tabela 21 - Propriedades do agregado natural – pedrisco.**

PROPRIEDADE AVALIADA	PEDRISCO
Teor de umidade total (%)	0,91
Estado solto	1618,14
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	Estado compactado 1687,24
Estado solto	47,29
Volume de vazios (%)	Estado compactado 45,04
Absorção de água (%)	1,7
Massa específica aparente no estado seco (g/cm <sup>3</sup> )	3,02
Massa específica na condição SSS (g/cm <sup>3</sup> )	2,92
Massa específica absoluta (g/cm <sup>3</sup> )	2,87
Teor de material pulverulento (%)	-

Fonte: Benitez (2020).

A Figura 102, a seguir, demonstra os agregados empregados na produção dos blocos.

**Figura 102 - Agregados naturais. a) Areia natural; b) Pó de pedra; c) Pedrisco; d) Detalhe areia; e) Detalhe pó de pedra; f) Detalhe pedrisco.**



Fonte: Autor (2020).

- **Aditivo**

O aditivo plastificante empregado na produção de artefatos pela fábrica é o ADB-PLASTICIZER PREMIUM. O consumo empregado na pesquisa foi descrito na Tabela 4.

- **Traços**

Foram empregados blocos de concreto com função estrutural por estes apresentarem não apenas função de vedação, mas também de estrutura, sendo empregados em obras de

alvenaria estrutural. E quanto a resistência, a princípio, optou-se por empregar blocos com 4, 8 e 16 MPa, por serem comumente solicitadas nas obras e também para analisar a relação entre resistência do bloco e captura de CO<sub>2</sub>, já que com o aumento da resistência, há uma tendência a diminuição da difusão de CO<sub>2</sub> no interior da peça. No entanto, para estabelecimento dos coeficientes de correlação, foram escolhidos os traços que apresentaram os menores coeficientes de variação visando-se a padronização dos resultados. Para tanto, produziu-se blocos de concreto com função estrutural, 4, 8 e 16 MPa, com os traços convencionalmente utilizados pela empresa parceira da pesquisa; e blocos com os traços sugeridos pela Associação Bloco Brasil (após a análise dos insumos e dos equipamentos empregados pela indústria parceira). Após a fabricação, os blocos foram submetidos à ensaios de resistência à compressão axial e os resultados foram analisados estatisticamente, por meio da análise de variância ANOVA e Teste de Tukey. A nomenclatura utilizada para cada bloco foi a seguinte:

- Bloco Indústria 4 MPa – C 4
- Bloco Indústria 8 MPa – C 8
- Bloco Indústria 16 MPa – C 16
- Bloco Associação Bloco Brasil 4 MPa – BR 4
- Bloco Associação Bloco Brasil 8 MPa – BR 8
- Bloco Associação Bloco Brasil 16 MPa – BR 16

A Tabela 22, contém os traços unitários, em massa, dos blocos de concreto estudados.

**Tabela 22 - Traços para fabricação dos blocos de concreto.**

Traço	Cimento (kg)	Aditivo (l)	Pedrisco (kg)	Areia natural (kg)	Pó de pedra (kg)	Relação A/C
<b>C 4</b>	1	0,100	4,85	5,92	9,05	0,733
<b>C 8</b>	1	0,175	2,77	3,38	5,17	0,523
<b>C 16</b>	1	0,325	1,49	1,82	2,78	0,313
<b>BR 4</b>	1	0,075	6,47	6,91	3,62	1,670
<b>BR 8</b>	1	0,100	4,85	5,23	2,71	0,523
<b>BR 16</b>	1	0,200	2,43	2,61	1,36	0,337

Fonte: Autor (2022).

- **Fabricação do bloco**

Na indústria, os agregados naturais (pedrisco, areia e pó de pedra) são armazenados em baias separadas, conforme demonstrado na Figura 103 (a); o cimento Portland (CP V ARI - ensacado (40kg)) era armazenado em paletes conforme Figura 103 (b); a água utilizada no amassamento foi controlada através de um hidrômetro digital, com precisão de 0,005 e aferida em litros. A Figura 103 (c) demonstra os controles de água e aditivo.

**Figura 103 - Matérias – primas: a) baia de agregados naturais, b) cimento ensacado, c) dispositivos de controle de água e aditivo.**



Fonte: Autor (2022).

Os agregados, aglomerante, aditivo e água, foram homogeneizados em misturador (Figura 104 (a)), transportados em esteira (Figura 104 (b)) até a máquina vibroprensa hidráulica (Figura 104 (c)) onde realizou-se a moldagem, compactação e extrusão dos blocos.

**Figura 104 - Equipamentos empregados na fabricação dos blocos: a) misturador, b) esteira, c) máquina vibroprensa.**



Fonte: Autor (2022).

Após a extrusão, os blocos foram transportados, armazenados no barracão coberto da indústria (Figura 105 (a)) e submetidos à cura por 12 horas em lona plástica (Figura 105 (b)). Após a cura, os blocos foram armazenados em paletes em sala isolada (com janelas e portas fechadas) e umidificada (Figura 105 (c)), até as idades de 02, 07 e 28 dias.

**Figura 105 : Blocos de concreto: a) distribuídos no barracão, b) cobertos com lona, c) armazenados em sala isolada.**

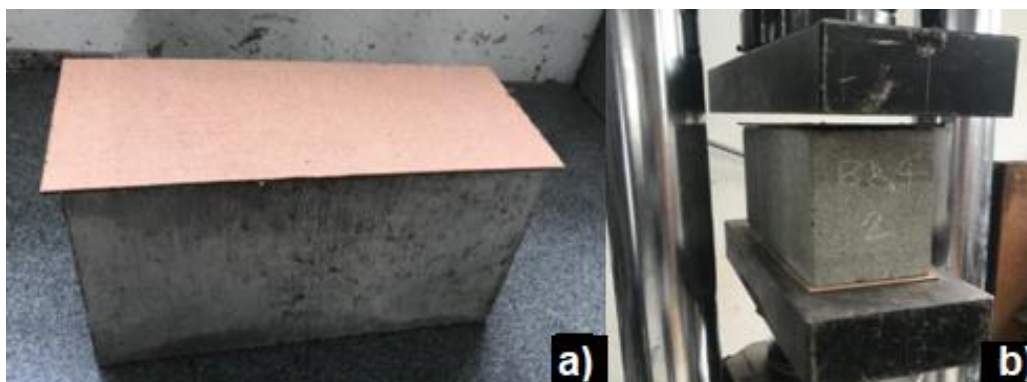


Fonte: Autor (2022).

- **Resistência à compressão axial**

Para os ensaios de resistência à compressão axial os blocos não apresentaram quebras, trincas, deformações ou irregularidade de arestas. Utilizou-se uma máquina universal de ensaios à compressão axial modelo EMIC DL60000 para romper as amostras e uma máquina de ensaio à compressão axial modelo EMIC PC200 para romper os blocos, ambas atendiam aos requisitos da ISO 7500-1 (2018). Quanto ao preparo dos blocos não foi possível realizar o capeamento ou retífica conforme preconização da ABNT NBR 12118:2013, pois os blocos foram ensaiados aos 02 dias de idade. Para tanto, utilizou-se o capeamento com o material chapa dura (Duratex). Fortes et al (2014) e Fortes (2017), verificaram em seus estudos que para as resistências nominais dos blocos analisados, não há diferença significativa entre as médias de resistência à compressão entre blocos de concreto capeados com chapa dura e blocos de concreto capeados com pasta de cimento. Assim sendo, empregou-se o capeamento com chapa dura para os ensaios de resistência à compressão axial dos blocos aos 02, 07 e 28 dias, visando-se padronizar o procedimento. A Figura 106 mostra o material de capeamento seco utilizado e o bloco capeado na prensa antes do ensaio.

**Figura 106 - Capeamento do bloco: a) chapa dura sobre o bloco; b) bloco posicionado na prensa hidráulica capeado na face inferior e superior com chapa dura.**



Fonte: Autor (2022).

- **Definição dos traços e processos de cura**

Após a fabricação, 36 blocos, sendo 06 de cada traço (C4, C8, C16, BR4, BR8 e BR16) foram submetidos à ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias e os resultados foram analisados estatisticamente. Verificou-se uma grande variação (10,34% a 25,60%), uma vez que os procedimentos de ensaios estavam sendo refinados. Para tanto, optou -se por eliminar o maior e menor resultado nessa análise preliminar, trabalhando-se com 04 blocos, dessa maneira o coeficiente de variação reduziu-se, variando entre 3,20% e 13,91%. Nesta configuração, os traços que apresentaram menor variação foram BR 4, coeficiente de variação de 3,20%; BR 8, coeficiente de variação de 4,10% e BR 16, coeficiente de variação de 8,16%. Acreditou-se que a referida variação se deu pelo emprego do processo de cura em que após a produção os blocos foram cobertos durante 12 horas com lona plástica e armazenados em barracão coberto e ventilado até completar a idade de 28 dias. Conforme demonstra a Tabela 23, a seguir.

**Tabela 23 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias para todos os blocos analisados.**

n=4	BR4	C4	BR8	C8	BR16	C16
<b>1</b>	6,65	4,51	7,31	7,21	15,81	11,71
<b>2</b>	6,88	4,52	7,33	7,46	16,52	12,22
<b>3</b>	6,91	4,71	7,92	8,19	16,75	14,64
<b>4</b>	7,27	5,26	7,97	8,49	19,49	16,46
<b>fbm</b>	6,93	4,75	7,6	7,84	17,14	13,76
<b>Desvio padrão (DV)</b>	0,22	0,31	0,31	0,52	1,40	1,91
<b>Coef. Variação (CV)</b>	3,20%	6,42%	4,10%	6,65%	8,16%	13,91%

Para viabilizar a etapa de ensaios deste programa experimental optou-se por trabalhar com dois traços, uma vez que a pesquisa depende diretamente da empresa para confeccionar os blocos, através do fornecimento de matérias primas, estrutura, maquinários, pessoal, logística e tempo. Assim sendo, definiu-se pelo emprego dos blocos com 4 MPa (traço BR 4) e 16 MPa (traço BR 16). Ao trabalhar com os referidos traços torna-se possível verificar a correlação entre a resistência à compressão e a capacidade de captura de CO<sub>2</sub> para as menores e maiores resistências.

Visando-se verificar se a variação entre as unidades de alvenaria se deu pelo processo de cura e estocagem, realizou-se a fabricação dos blocos com 4 MPa (BR 4), variando-se o procedimento de cura. Dessa maneira, seis blocos foram curados pelo processo tradicional da empresa com lona plástica durante 12 horas em barracão coberto e posterior armazenamento em sala isolada (porta e janela fechadas) e umidificada; e seis blocos foram transportados imediatamente após a produção para sala isolada, onde foram cobertos com lona plástica durante 12 horas e posteriormente armazenados sem lona até completar 02 dias. Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial foram apresentados na Tabela 24, a seguir.

**Tabela 24 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02 dias considerando 06 unidades de blocos BR4, submetidos a diferentes processos de cura.**

Corpo de prova nº	Resistência à compressão axial (MPa)	
	BR4 - curados lona plástica (barracão) + sala fechada	BR4 - curados lona plástica (em sala fechada)
<b>f<sub>bm</sub> (n=6)</b>	7,50	7,20
<b>Desvio padrão (DP)</b>	0,45	0,70
<b>Coef. Variação (CV)</b>	6,06%	9,77%

As análises apresentadas foram feitas considerando-se seis corpos de prova. Contudo, foi possível observar que o processo de cura que apresentou menor variação foi aquele em que os blocos após a fabricação foram cobertos com lona plástica durante 12 horas no próprio barracão em que foram produzidos e posteriormente armazenados em sala isolada e umidificada, apesar da diferença ter sido baixa. Logo, optou-se por empregar o procedimento de cura que promoveu menor variação de resistência aos blocos.

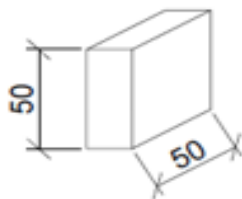
Posteriormente, os traços BR 4 e BR 16, foram submetidos novamente aos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias.

## 5.1.2 ESTÁGIO 2

- **Amostras dos blocos de concreto**

Amostras de dimensões nominais de 50 x 50 mm foram extraídas, com auxílio de serra de corte, das paredes longitudinais dos blocos de concreto com função estrutural de 4MPa e 16MPa, e tamanho nominal de 140 x 190 x 390 mm, todos produzidos pela empresa fabricante parceira da pesquisa. As amostras estudadas foram extraídas dos blocos, portanto apresentam o mesmo traço, processo produtivo e energia de compactação. A dimensão da amostra (Figura 107) foi pensada para viabilizar a etapa de cura com CO<sub>2</sub> em câmara de carbonatação projetada e construída para esta pesquisa.

**Figura 107 - Amostras extraídas das paredes longitudinais dos blocos.**

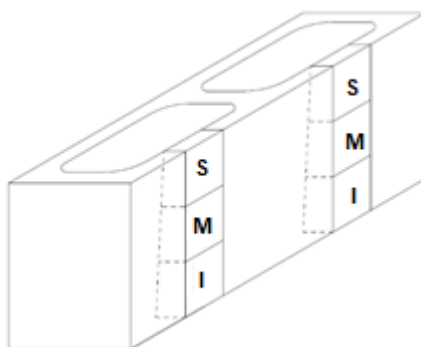


Fonte: Autor (2022).

A utilização das amostras tornou viável o programa experimental da pesquisa, uma vez que devido à elevada quantidade de combinações de ensaios e à dimensão da câmara de carbonatação, ficaria inviável trabalhar apenas com blocos.

Em razão da parede interna do bloco de concreto ser prismática de comprimento variável, sua espessura varia ao longo da altura, tal fato é demonstrado na Figura 108.

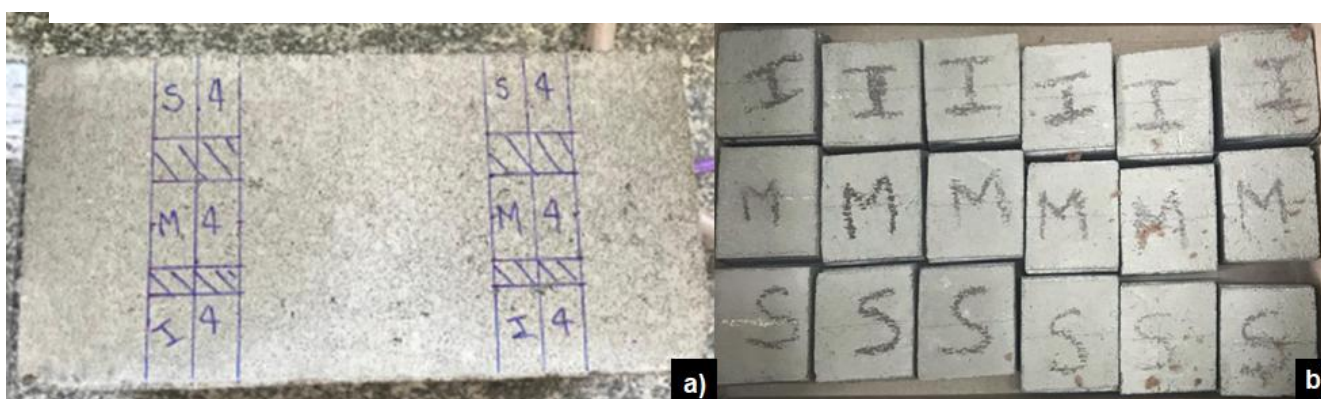
**Figura 108 - Posição em que amostras serão retiradas do bloco: a) superior (s), b) intermediária (m), e c) inferior (i).**



Fonte: Autor (2020).

Contudo, visando-se obter a resistência à compressão da amostra que mais se assemelha a do bloco, decidiu-se extrair amostras da região superior, intermediária (meio) e inferior da parede longitudinal do bloco (Figura 109). Portanto, foram extraídas 06 amostras da região superior, 06 amostras da região intermediária e 06 amostras da região inferior das paredes longitudinais dos blocos com função estrutural de 4 MPa e 16 MPa aos 02, 07 e 28 dias. O intuito foi determinar a resistência compressão axial das amostras e correlacionar com a resistência à compressão axial dos blocos. A Figura 109, demonstra as amostras e o locais em que foram retiradas.

**Figura 109 - Amostras: a) Local no bloco em que as amostras foram retiradas, b) Amostras extraídas das regiões inferior (i), intermediária (m) e superior (s) da parede longitudinal do bloco.**



Fonte: Autor (2022).

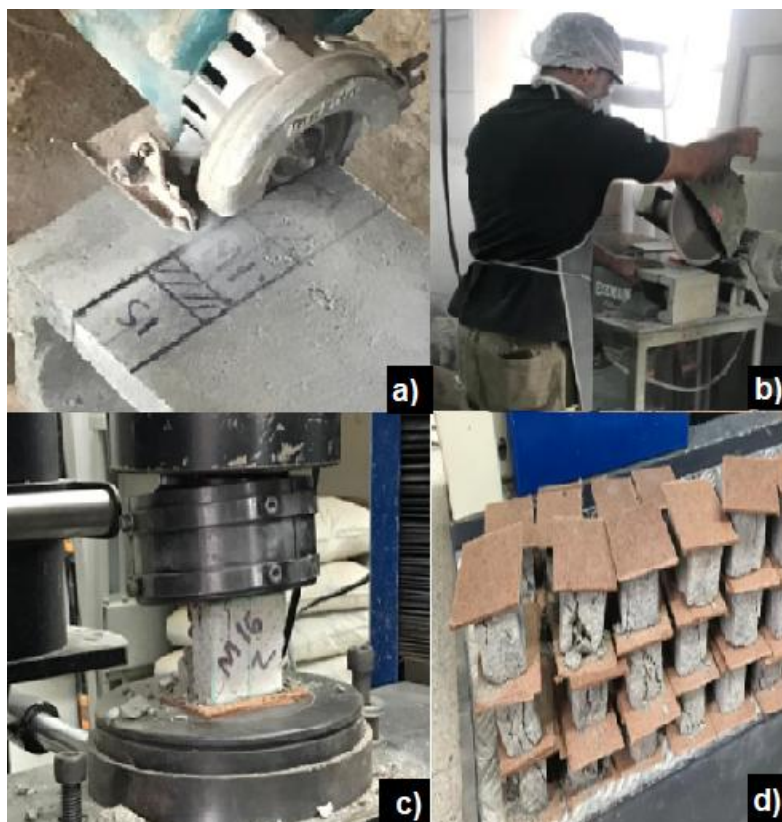
- **Resistência à compressão axial**

Conforme informado as amostras estudadas foram extraídas dos blocos com auxílio de serra de corte, portanto apresentaram o mesmo traço, processo produtivo e energia de compactação. Por se tratar de um corpo de prova extraído do bloco de concreto seguiremos as recomendações da ABNT NBR 5739:2018 para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial. À prensa utilizada acoplou-se uma célula de carga com capacidade de 600 kN, e as amostras com 4 e 16 MPa, todas foram carregadas a uma velocidade de carregamento de 0,5625 kN/s.

- **Definição do dispositivo de corte, tipo de capeamento e determinação do local ideal para extração das amostras**

Os corpos de prova (amostras) foram submetidos ao corte com serra circular manual e serra circular de bancada utilizando-se chapa dura chapa dura para distribuição uniforme da tensão na amostra, conforme demonstra Figura 110.

Figura 110 - Amostras: a) extração da amostra com serra circular manual; b) extração da amostra com serra circular de bancada; c) amostra capeada com chapa dura na prensa, d) amostras capeadas com chapa dura após ensaio.



Fonte: Autor (2022).

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial das amostras BR 4 estão apresentados na Tabela 25, a seguir.

Tabela 25 - Resistência à compressão axial das amostras BR 4.

Corpo de prova nº	Resistência à compressão axial (MPa) – Amostras BR 4					
	Serra circular manual + chapa dura (02 dias)			Serra circular de bancada + chapa dura (07 dias)		
	Superior	Intermediária	Inferior	Superior	Intermediária	Inferior
<b>Média (Mpa) (n=6)</b>	11,15	7,76	14,13	15,52	10,02	11,49
<b>Desvio padrão</b>	2,00	0,70	4,49	3,52	2,28	2,88
<b>Coef. Variação (CV)</b>	17,96%	9,00%	31,80%	22,65%	22,81%	25,11%

Com base nos resultados apresentados de resistências das amostras, realizou-se o teste estatístico ANOVA comparando-se as resistências de cada região (superior, intermediária e inferior) com os diferentes dispositivos de corte (serra circular manual e serra circular de bancada), os resultados foram:

- Superior: há variância ( $F=5,838268 > F \text{ crítico} = 4,964603$ )
- Intermediária: não há variância ( $F= 4,447996 < F \text{ crítico} = 4,964603$ )
- Inferior: não há variância ( $F= 1,221345 < F \text{ crítico} = 4,964603$ )

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial das amostras BR 16 foram demonstrados na Tabela 26, a seguir.

**Tabela 26 - Resistência à compressão axial das amostras BR 16.**

Resistência à compressão axial (MPa) - Amostras BR 16						
Corpo de prova nº	Serra circular manual + chapa dura (02 dias)			Serra circular de bancada + chapa dura (07 dias)		
	Superior	Intermediária	Inferior	Superior	Intermediária	Inferior
<b>Média (n=6)</b>	43,40	21,51	28,45	44,20	30,56	11,49
<b>Desvio padrão</b>	8,96	5,23	3,93	8,31	6,5	2,88
<b>Coef. Variação (CV)</b>	20,64%	24,32%	13,81%	18,79%	21,26%	25,00%

Com base nos resultados apresentados de resistências das amostras, realizou-se o teste estatístico ANOVA comparando-se as resistências de cada região (superior, intermediária e inferior) com os diferentes dispositivos de corte (serra circular manual e serra circular de bancada), os resultados foram:

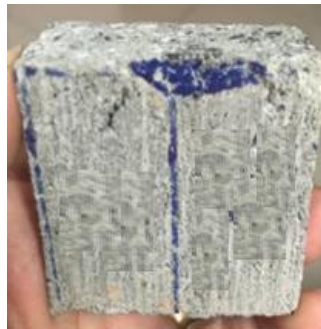
- Superior: não há variância ( $F= 0,021528 < F \text{ crítico} = 4,964603$ )
- Intermediária: há variância ( $F= 5,890204 > F \text{ crítico} = 4,964603$ )
- Inferior: não há variância ( $F=60,50734 < F \text{ crítico} = 4,964603$ )

Portanto, com base nos resultados apresentados, conclui-se que para as amostras BR 4 e BR 16 tanto o corte com serra circular manual como serra circular de bancada são viáveis de serem realizados. Porém, pela facilidade da utilização na prática, optou-se por empregar para todas as amostras serra circular manual.

O local ideal para extração das amostras (superior, intermediária e inferior) ainda não foi possível definir devido a elevada variação observada nos valores de resistência à compressão axial apresentados tanto para as amostras extraídas com serra circular manual como com serra circular de bancada. Acredita-se que a chapa dura não foi capaz de

regularizar as faces, não absorvendo as imperfeições, acarretando assim, elevada variação. A Figura 111, a seguir demonstra irregularidade verificada em amostra.

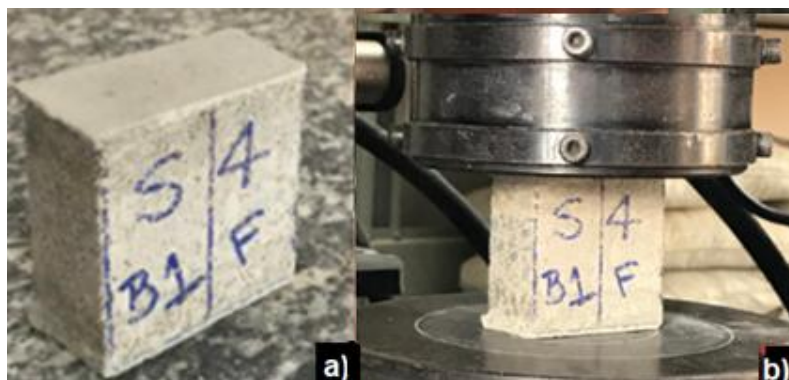
**Figura 111 - Amostra com partes desagregadas devido ao corte com serra circular manual e serra circular de bancada.**



Fonte: Autor (2022).

Visando-se reduzir a variação, propôs-se realizar os ensaios de resistência à compressão axial das amostras empregando-se capeamento com pasta de cimento com o intuito de preencher os vazios e corrigir imperfeições (Figura 112). Os resultados foram apresentados na Tabela 27.

**Figura 112 - Amostras: a) capeamento com pasta de cimento; b) ensaio na prensa.**



Fonte: Autor (2022).

**Tabela 27 - Resistência à compressão axial (MPa) aos 28 dias – serra circular manual + capeamento com pasta de cimento.**

Resistência à compressão axial (MPa) aos 28 dias - serra circular manual + pasta de cimento						
	Amostras BR 4			Amostras BR 16		
	Superior	Intermediária	Inferior	Superior	Intermediária	Inferior
<b>Média (MPa) (n=6)</b>	24,00	19,07	24,03	56,56	42,32	55,77
<b>Desvio padrão</b>	2,30	2,68	2,66	3,12	2,85	3,56
<b>Coef. Variação (CV)</b>	10%	14%	11%	6%	7%	6%

Verifica-se pela Tabela 27 que o capeamento com pasta de cimento proporcionou menor variação de que o capeamento com chapa dura tanto para as amostras BR 4 como BR 16. Acredita-se que o capeamento com pasta de cimento reduziu as irregularidades diminuindo a variação. Portanto, este foi o método adotado para capeamento das amostras.

Com o objetivo de verificar se houve variação entre as posições em que as amostras foram extraídas (superior, intermediária e inferior) realizou-se o teste estatístico ANOVA tanto para os blocos BR 4 como BR 16. Os resultados encontram-se nas Tabela 28 e Tabela 29, a seguir.

**Tabela 28 - ANOVA para verificar se ocorre variação da resistência à compressão da amostra BR 4 de acordo com sua posição na parede do bloco.**

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F
						crítico
Entre grupos	97,7169	2	48,85845	<b>7,50751</b>	0,005504	<b>3,68232</b>
Dentro dos grupos	97,61915	15	6,507943			
Total	195,33605	17				

**Tabela 29 -ANOVA para verificar se ocorre variação da resistência à compressão da amostra BR 16 de acordo com sua posição na parede do bloco.**

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F
						crítico
Entre grupos	97,7169	2	48,85845	<b>7,50751</b>	0,005504	<b>3,68232</b>
Dentro dos grupos	97,61915	15	6,507943			
Total	195,3361	17				

Verificou-se que tanto para as amostras BR 4 como BR 16 o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre as resistências à compressão destas de acordo com sua posição na parede do bloco. Logo, realizou-se o teste Tukey tanto para as amostras BR4 como BR16 conforme demonstra a Figura 113, a seguir.

**Figura 113 - Teste Tukey relacionando resistências à compressão das amostras dos blocos BR 4 e BR 16 e suas posições no bloco.**

	Intermediária	Inferior
Superior	DS	EQ
Intermediária		DS

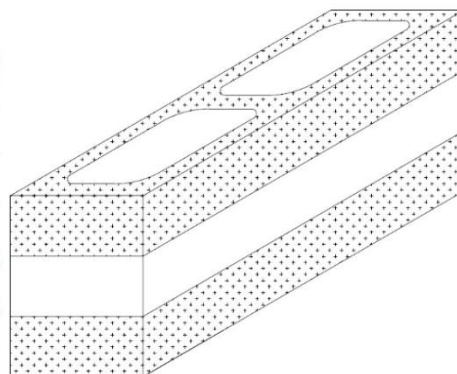
DS - diferença significativa

EQ - equivalentes

Fonte: Autor (2022).

O Teste estatístico Tukey forneceu o mesmo resultado tanto para as amostras dos blocos BR 4 como BR 16. Logo, foi possível concluir que as amostras retiradas tanto da região superior como inferior da parede do bloco apresentaram valores de resistência à compressão axial equivalentes, o mesmo não foi verificado para as amostras extraídas da região intermediária do bloco. Tal fato pode ser explicado pelo processo de vibração, durante a fabricação do bloco, em que as faces superior e inferior por estarem em contato direto com a prensa hidráulica são vibradas de forma equivalente e superior à região central do bloco, apresentando então valores de resistência equivalentes entre si e superiores à região central. A Figura 114, a seguir, ilustra o referido fato.

**Figura 114 - Regiões superior e inferior do bloco de concreto que apresentam maior resistência devido ao processo de vibração durante sua fabricação.**



Fonte: Autor (2023).

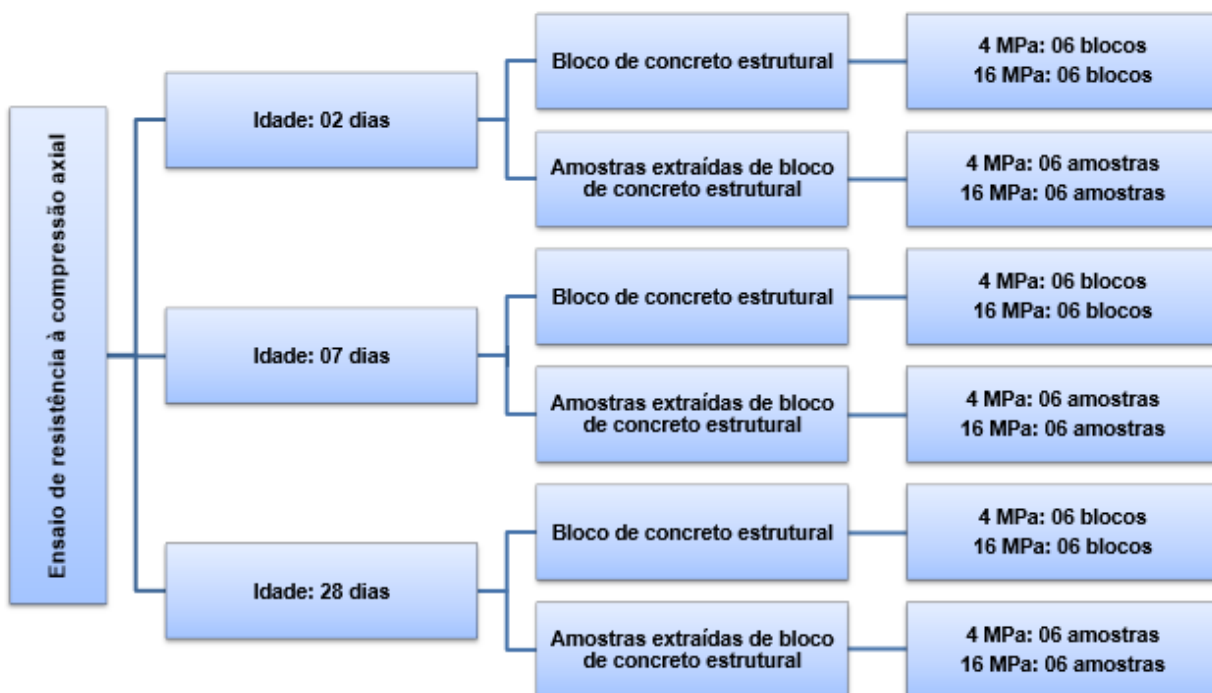
Dessa maneira, conclui-se que as amostras podem ser extraídas tanto da região superior, como inferior das paredes longitudinais dos blocos BR 4 e BR 16.

### 5.1.3 ESTÁGIO 3

- **Correlação entre a resistência à compressão axial das amostras x blocos com 4 e 16 MPa aos 02, 07 e 28 dias**

Após a definição do local ideal em que as amostras foram retiradas do bloco, iniciou-se a obtenção do fator de correlação entre a resistência à compressão axial das amostras com 4 MPa e 16 MPa, aos 02, 07 e 28 dias (ABNT NBR 5739:2018) e resistência à compressão axial dos blocos de 4MPa e 16MPa, aos 02, 07 e 28 dias (ABNT NBR 6136:2016 e ABNT NBR 12118:2013). O fluxograma da Figura 115 representa os ensaios que foram realizados a fim de obter as correlações mencionadas.

**Figura 115 - Fluxograma dos ensaios de resistência à compressão das amostras e dos blocos, a fim de obter o coeficiente de correlação entre amostras e blocos com 4 MPa e 16 MPa, aos 02, 07 e 28 dias.**



Fonte: Autor (2022).

## 5.2 ENSAIOS TERMOGRAVIMÉTRICOS E ESTRUTURAIS – ETAPA 2

Na etapa 2 do programa experimental trabalhou-se apenas com amostras extraídas dos blocos estruturais com 4 e 16 MPa. O objetivo desta etapa foi determinar o procedimento de cura ideal para máxima captura de CO<sub>2</sub> e concomitante ganho de resistência mecânica nas amostras estudadas. Para tanto, as amostras foram submetidas à diferentes combinações de cura inicial ambiente e posterior cura com CO<sub>2</sub> em câmara de carbonatação. Ao final de cada combinação de cura realizou-se os ensaios de termogravimetria e termogravimetria derivativa (que permitiram a verificação do percentual de CO<sub>2</sub> capturado) e os ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias.

Optou-se por realizar a cura ambiente anterior à cura carbônica, pois Fortunato et al (2018) verificaram melhores resultados quanto a captura de CO<sub>2</sub> para as peças de concreto para pavimentação. Segundo os pesquisadores durante a realização da cura ambiente, nas condições de temperatura e umidade ambientes, ocorre a evaporação natural da água dos poros da matriz cimentícia, regulando a sua umidade interna, propiciando um maior avanço da frente de carbonatação. El-Hassan e Shao (2015) também verificaram que a cura inicial ambiente reduziu a água livre, gerando espaço para a difusão do CO<sub>2</sub> e consequente precipitação de carbonato de cálcio nos poros do concreto. Lo e Lee (2002) concluíram que a cura ambiente faz com que os poros fiquem mais abertos, o que propicia o aumento da quantidade de canais intercomunicáveis e consequente aumento da velocidade de difusão de dióxido de carbono. Portanto, é nítido, que a cura ambiente anterior à cura carbônica potencializa a captura de CO<sub>2</sub> no material cimentício, porém o tempo de cura ambiente ideal ainda é uma lacuna no conhecimento. Com base nas pesquisas apresentadas no estado da arte o tempo de cura inicial variou de 0 hs a 18 hs, contudo visando-se aproximar a teoria da prática e viabilizar o tempo total de cura (cura inicial + cura carbônica) na indústria optou-se por realizar a cura ambiente inicial durante 2 hs, 3 hs e 4 hs (em galpão coberto, temperatura de aproximadamente 30°C e umidade de aproximadamente 40%).

Quanto ao tempo de cura com CO<sub>2</sub> a maioria das pesquisas do estado da arte trabalharam com 2 horas de exposição ao gás carbônico, porém em alguns estudos a cura chegou a durar 96 horas. Contudo, o tempo de cura com CO<sub>2</sub> ideal para a máxima captura do gás em blocos de concreto estruturais com 4 e 16 MPa ainda não foi determinado. Logo, na presente pesquisa, trabalhar-se-á com 2, 4, 8 e 16 hs de exposição dos blocos à 100% de CO<sub>2</sub>, por serem períodos funcionais dentro do processo industrial de produção e cura dos blocos.

Portanto, para a cura com CO<sub>2</sub>, configurou-se a câmara de carbonatação com 100% de concentração de CO<sub>2</sub>, pressão atmosférica de 1 bar ou 1 atm, umidade variando na faixa

ótima (50% a 70%) e temperatura interna (28°C a 34°C). Estas variáveis mantiveram-se fixas em todas as curas realizadas e os motivos foram explanados a seguir:

- Concentração de CO<sub>2</sub>: todas as pesquisas na área empregaram 100% de concentração de CO<sub>2</sub> durante a cura de materiais cimentícios não armados, dentre elas destacam-se Ye (2003), Shao et al (2010), Lin e Shao (2011), Boyd et al (2012), Rostami et al (2012), El - Hassan et al (2013), Zhan et al (2013), El Hassan e Shao (2015), MacMaster e Tavares (2015). Apenas Fortunato (2018) trabalhou com concentração de CO<sub>2</sub> de 20% por conta de que a câmara de carbonatação empregada nos estudos era dotada de um sensor que não permitia o aumento da concentração do gás. Contudo, nesta pesquisa optou-se por trabalhar com 100% de concentração de CO<sub>2</sub>.

- Pressão: Optou-se por trabalhar com a pressão atmosférica nesta pesquisa por esta ser amplamente empregada nos estudos presentes no estado da arte e por tornar mais seguro o experimento, principalmente quanto a estanqueidade da câmara de carbonatação.

- Umidade: verificou-se na revisão bibliográfica que não há uma umidade fixa ideal para carbonatar concretos e sim uma faixa de variação que oscila de:

- 65% a 85% (HELENE (1986));
- 50% a 65% (PAPADASKI (1989));
- 50% a 70% (YING-YU E QUI-DONG (1987));
- 50% a 70% (NEVILLE (1997));
- 50% a 70% (KULAKOWSKI (2002));

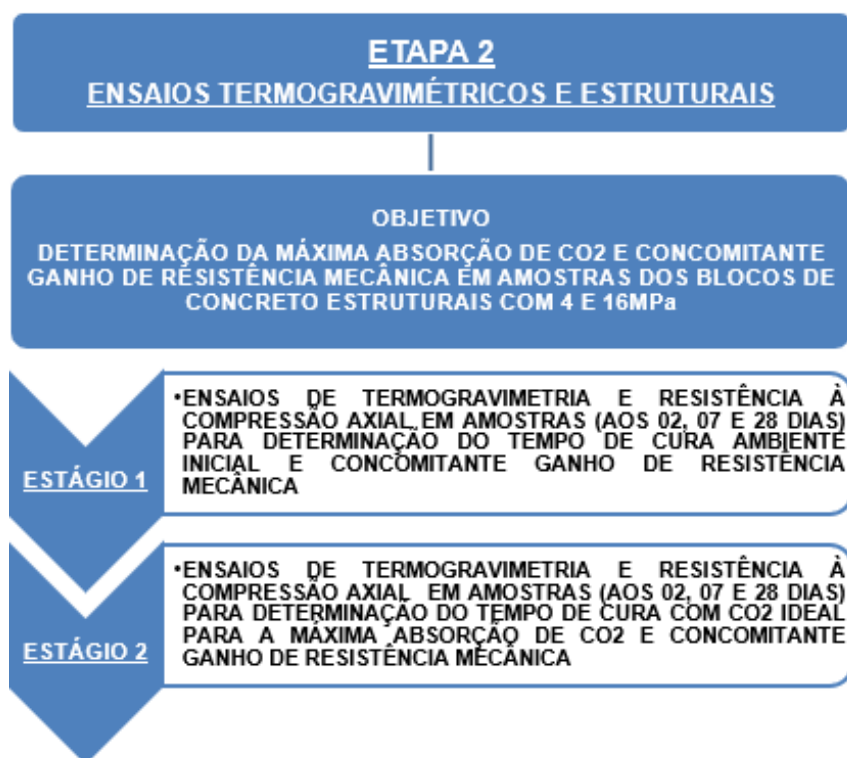
Nas pesquisas do estado da arte grande parte não fez referência à umidade empregada na câmara, algumas trabalharam com 50% e outras com 65%. Para tanto, na presente pesquisa pretende-se trabalhar dentro da faixa ótima de umidade que varia de 50% a 70%.

- Temperatura: Segundo Liu et al. (2001) e Haselbach e Thomle (2014) o sequestro de CO<sub>2</sub> à pressão atmosférica é crescente até alcançar a temperatura de 60°C, a partir daí ele começa a diminuir. A maioria dos estudos do estado da arte trabalharam com temperatura ambiente. Na pesquisa em questão, foi possível controlar a temperatura da sala em que a câmara se encontrava, logo esta apresentou temperatura em torno de 25°C (ambiente) e internamente à câmara a temperatura variou de 28°C a 34°C.

Após a cura ambiente e posterior cura com CO<sub>2</sub> as amostras foram encaminhadas aos laboratórios de análises térmicas (LIEC, FCM/NACA e CCDM) para os ensaios de termogravimetria e termogravimetria derivativa e ao Laboratório de Sistemas Estruturas da UFSCar (LSE) para os ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias.

Portanto, a etapa 2 do programa experimental, foi subdividida em estágios conforme demonstra o fluxograma da Figura 116 a seguir.

Figura 116 - Fluxograma referente à Etapa 2 do programa experimental.



Fonte: Autor (2022).

### **5.2.1 ESTÁGIO 1 – DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CURA AMBIENTE INICIAL IDEAL PARA MÁXIMA CAPTURA DE CO<sub>2</sub> E GANHO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA**

Neste estágio, as amostras dos blocos com 4 e 16 MPa foram submetidas à cura ambiente inicial durante 2 hs e 4 hs, com posterior cura carbônica de 2 hs. O tempo de cura ambiente inicial ideal para blocos de concreto ainda é uma lacuna no conhecimento; portanto, com base nas pesquisas apresentadas no estado da arte e visando-se viabilizar esse procedimento na indústria, optou-se por realizar a cura ambiente durante 2 h e 4 h (em galpão fechado, temperatura de aproximadamente 30°C e umidade ambiente do galpão ~ 40%).

- **Amostras dos blocos de concreto**

Na Etapa 1 deste programa experimental, concluiu-se que as amostras com dimensões nominais de 50 x 50 mm, poderiam ser extraídas do bloco tanto com auxílio de serra de corte circular manual como serra de corte circular de bancada; tanto da região superior como inferior da parede longitudinal do bloco. Para tanto, visando-se padronizar o procedimento, as amostras utilizadas na Etapa 2 foram cortadas na região superior da parede longitudinal do bloco, utilizando-se serra de corte.

- **Cura ambiente inicial**

Após a produção, os blocos com 4 e 16 MPa foram submetidas à cura ambiente (ca) durante 2 hs e 4 hs (em barracão coberto da indústria, temperatura de aproximadamente 30°C e umidade ambiente do galpão de 40 %), conforme demonstra a Figura 117 e Figura 118.

**Figura 117 - Blocos sendo curados em galpão coberto da indústria.**



Fonte: Autor (2024).

**Figura 118 - Umidade e temperatura aferidas no barracão.**



Fonte: Autor (2024).

Finalizada a cura ambiente, as amostras foram cortadas da região superior da parede longitudinal do bloco, conforme demonstra a Figura 119, e submetidas à cura com CO<sub>2</sub>.

**Figura 119 - Amostras sendo cortadas da região superior do bloco.**

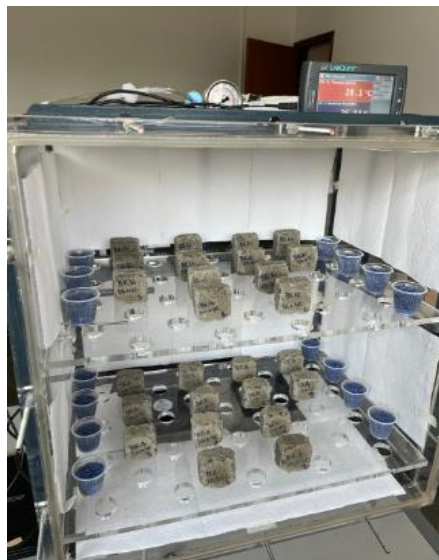


Fonte: Autor (2024).

- ***Cura carbônica***

Após a cura ambiente inicial as amostras dos blocos com 4 e 16 MPa foram submetidas à cura carbônica (c) durante 2 horas em câmara de carbonatação configurada com 100% de concentração de CO<sub>2</sub>, pressão atmosférica de 1 bar, umidade ótima de 50% a 70% e temperatura ambiente interna de 28°C a 34°C). Na Figura 120, é possível observar a referida cura.

**Figura 120 - Amostras submetidas à cura carbônica.**



Fonte: Autor (2024).

- **Cura referência**

Para a cura referência, os blocos foram cobertos por lona plástica durante 12 horas em barracão coberto da indústria, cuja temperatura do mesmo era de ~30°C e sua umidade de ~40 %), quando então as amostras foram extraídas, conforme demonstra a Figura 121.

**Figura 121 - Cura referência (com lona) e cura ambiente.**



Fonte: Autor (2024).

- **Verificação da frente de carbonatação**

Ao final da cura carbônica, dividiu-se as amostras (BR 4 e BR 16) ao meio e aspergiu-se fenolftaleína com o intuito de verificar o avanço da frente de carbonatação. A Figura 122, demonstra a amostra após a aplicação de fenolftaleína.

Figura 122 -Verificação da frente de carbonatação com fenolftaleína após 2 e 4 horas de cura carbônica nas amostras dos blocos BR 4 e 16.



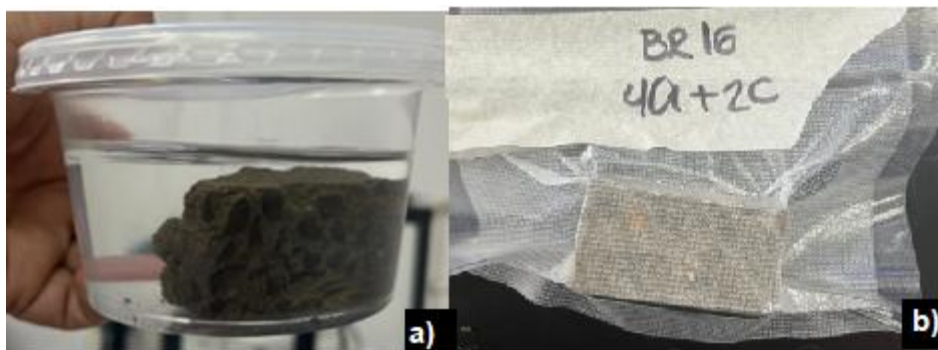
Fonte: Autor (2024).

Através do referido ensaio foi possível verificar que nas amostras BR 4 – 2a + 2c e BR 4 – 4a +2c, a frente de carbonatação avançou plenamente; enquanto que nas amostras, BR 16 – 2a + 2c e BR 16 – 4a +2c, o mesmo não ocorreu.

- ***Preparação da amostra para interromper a hidratação***

Ao final da cura carbônica, nas dependências da indústria, a outra metade da amostra foi submersa em álcool isopropílico, com o intuito de frear a reação de hidratação do concreto (SCRIVENER et al, (2016)). Em seguida, foi selada à vácuo para evitar o contato da amostra com o ar, conforme demonstra a Figura 123.

**Figura 123 - Preparação amostra após cura com CO<sub>2</sub>: a) submersa em álcool isopropílico;  
b) selada à vácuo.**



Fonte: Autor (2024).

Posteriormente, no Laboratório de Materiais e Componentes da UFSCar (LMC), a amostra foi triturada inicialmente com martelo e posteriormente com pilão (objetivando-se separar agregado graúdo de agregado fino e aglomerante), peneirada, separou-se o material pulverulento (passante na peneira granulométrica N° 200), e por fim, este foi filtrado novamente com álcool isopropílico e armazenado em eppendorf para a realização do ensaio de termogravimetria no Laboratório de Física da USP (FCM/NACA). A Figura 124, demonstra as etapas descritas. Este procedimento é crucial para aferição (através do ensaio de termogravimetria) do percentual de CO<sub>2</sub> absorvido pelo concreto durante a cura carbônica. Ao imergir a amostra em álcool isopropílico, interrompe-se a hidratação do concreto, tornando-se possível o estudo da matriz cimentícia naquela determinada idade. As referidas etapas de ensaio foram descritas por Scrivener et al (2016).

**Figura 124 - Preparação da amostra no Laboratório de Materiais e Componentes da UFSCar (LMC): a) trituração; b) maceração; c) peneiramento; d) amostra pulverolenta; e) filtragem em álcool isopropílico; e) armazenamento em eppendorf.**



Fonte: Autor (2024).

- ***Delimitação das condições de curas e ensaios realizados***

Após a realização de cada combinação de cura (ambiente inicial e posterior cura carbônica), as amostras foram submetidas aos ensaios de termogravimetria e resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias. O objetivo foi determinar a melhor combinação de cura para a máxima captura de CO<sub>2</sub> e concomitante ganho de resistência mecânica. A Tabela 30, traz informações das curas e dos ensaios, e a Tabela 31, fornece as diferentes combinações de cura empregadas e seus respectivos tempos, bem como a quantidade de amostras utilizadas no Estágio 1.

**Tabela 30 - Informações das curas e dos ensaios.**

Amostras	Curas						Ensaio	
	Tipo e tempo de cura inicial	Tempo de cura carbônica	Configuração câmara de carbonatação				Captura de CO <sub>2</sub> (%)	Ganho de Resistência
			Conc. de CO <sub>2</sub> (%)	Pressão (atm)	T(°C)	Umidade (%)		
Amostras dos blocos de concreto com função Estrutural 4MPa e 16MPa	Cura ambiente de 02 hs e 04 hs	02 hs	100	1	Ambiente	50% a 70%	Termogravimetria (TG)	Ensaio de Resistência à compressão aos 02, 07 e 28 dias
	Referência lona 12 hs	0 hs	-	-	-	-	Termogravimetria (TG)	Ensaio de Resistência à compressão aos 02, 07 e 28 dias

**Tabela 31 - Combinações de cura empregadas, tempos e quantidades de amostras.**

Amostras	Tipo e tempo de cura inicial	Tempo de cura carbônica	Quantidade amostras TG	Quantidade de amostras Ensaio de Resistência à compressão axial			Total amostras
				02 dias	07 dias	28 dias	
BR 4	Ambiente 02 hs	02 hs	1	3	3	3	10
	Ambiente 04 hs	02 hs	1	3	3	3	10
	Referência 12hs	0 hs	1	3	3	3	10
BR 16	Ambiente 02 hs	02 hs	1	3	3	3	10
	Ambiente 04 hs	02 hs	1	3	3	3	10
	Referência 12hs	0 hs	1	3	3	3	10
TOTAL AMOSTRAS							60

- *Resistência à compressão axial*

As amostras estudadas foram extraídas dos blocos com auxílio de serra de corte, portanto apresentaram o mesmo traço, processo produtivo e energia de compactação, e foram capeadas com pasta de cimento. A Figura 125 demonstra o capeamento das amostras. Por se tratar de um corpo de prova extraído do bloco de concreto foram seguidas as recomendações da ABNT NBR 5739:2018. Para a realização dos ensaios de resistência à

compressão axial, à prensa utilizada acoplou-se uma célula de carga com capacidade de 600 kN e a velocidade de carregamento empregada foi de 0,5625 kN/s. A Figura 126, demonstra

**Figura 125 - Capeamento das amostras: a) nivelamento, b) nivelamento, c) amostras capeadas e identificadas.**



amostra sendo ensaiada à resistência à compressão axial.

Fonte: Autor (2024).

**Figura 126 - Ensaio de resistência à compressão axial: a) amostra na prensa, b) amostras após rompimento.**



Fonte: Autor (2024).

- *Termogravimetria (TG)*

No decorrer da pesquisa, os ensaios de análises térmicas foram realizados em diferentes laboratórios. Isso ocorreu por conta de danos nos aparelhos que impossibilitaram a sua utilização por tempo indeterminado. No entanto, as condições de preparação da amostra e condições de ensaio foram mantidas:

- Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica – LIEC – Departamento de Química da UFSCar: equipamento marca Netzsch, modelo STA (TGA/STA) 409 Cell, porta amostras de alumina, foram medidos aproximadamente 50 mg de amostra para cada análise. A rampa de aquecimento empregada foi de 30°C a 1000°C, taxa de aquecimento de 10°C/min, atmosfera de Nitrogênio e o fluxo de Nitrogênio de 50 ml/min;

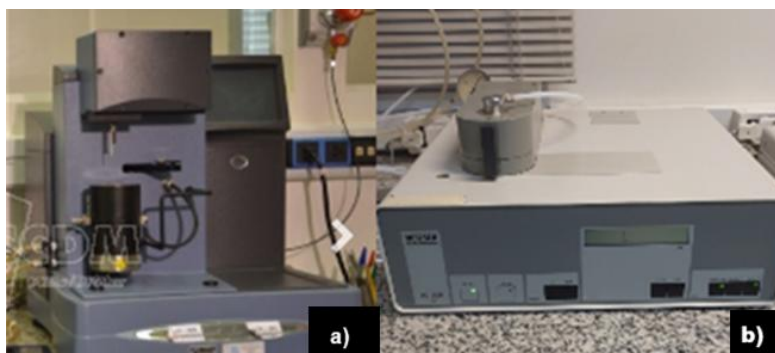
- FCM/NACA - Grupo de Nanomateriais e Cerâmicas Avançadas - – Departamento da Física da USP: UFSCar: equipamento marca Netzsch, modelo STA (TGA/STA) 209, porta amostras de alumina, foram medidos aproximadamente 50 mg de amostra para cada análise. A rampa de aquecimento empregada foi de 30°C a 980°C, taxa de aquecimento de 10°C/min, atmosfera de Argônio e o fluxo de Argônio de 20 ml/min;

- CCDM – Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais – Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar: equipamento marca TA Instruments, modelo Q500, porta amostras de alumina, foram medidos aproximadamente 10 mg de amostra para cada análise. A rampa de aquecimento empregada foi de 30°C a 1000°C, taxa de aquecimento de 10°C/min, atmosfera de Nitrogênio e o fluxo de Nitrogênio de 90 ml/min;

Todas as amostras foram analisadas com o auxílio do programa OriginPro 8.5. Os pontos foram selecionados por meio da ferramenta Data Reader do programa analisando-se os picos entre 500°C e 750°C, onde ocorre a perda de massa do carbonato de cálcio devido a evaporação do CO<sub>2</sub> (TAYLOR, 1997; HEWLETT, 1998). A diferença entre as perdas de massa dos compostos da amostra carbonatada e não carbonatada confere o montante de CO<sub>2</sub> capturado na reação de carbonatação (POSSAN, 2019; NEVES JR, 2014).

A Figura 127, demonstra alguns dos equipamentos empregados para as análises termogravimétricas TG/DTG.

**Figura 127 - Equipamentos TG/DTG: a) Laboratório CCDM, b) Laboratório NACA.**



Fonte: Autor (2025).

**5.2.2 ESTÁGIO 2 – DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CURA COM CO<sub>2</sub> IDEAL PARA MÁXIMA CAPTURA DE CO<sub>2</sub> E GANHO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA**

No Estágio 1, definiu-se que a cura ambiente inicial ideal terá duração de 3 horas. Esse parâmetro de cura inicial foi fixado no Estágio 2, variando-se o tempo de cura carbônica em 4, 8 e 16 horas. As Tabela 32 e Tabela 33, demonstram as diferentes combinações de cura empregadas no Estágio 2 e a quantidade de amostras utilizadas.

**Tabela 32 - Informações das curas e dos ensaios.**

Amostras	Curas						Ensaio	
	Tipo e Tempo de cura inicial	Tempo de cura carbônica	Configuração câmara de carbonatação				Captura de CO <sub>2</sub> (%)	Ganho de Resistência
			Conc. de CO <sub>2</sub> (%)	Pressão (atm)	T(°C)	Umidade (%)		
Amostras dos blocos de concreto com função Estrutural 4MPa e 16MPa	Ambiente 03 hs	4, 8 e 16 hs	100	1	Ambiente	50% a 70%	Termogravimetria (TG)	Ensaio de Resistência à compressão aos 02, 07 e 28 dias
	Referência Iona 12 hs	0 hs	-	-	-	-	-	Ensaio de Resistência à compressão aos 02, 07 e 28 dias

**Tabela 33 - Combinações de cura empregadas, tempos e quantidades de amostras.**

Amostras	tempo de cura ambiente inicial	Tempo de cura com CO <sub>2</sub>	Quantidade amostras TG	Quantidade de amostras Ensaio de Resistência à compressão axial			Total amostras
				02 dias	07 dias	28 dias	
				BR 4	Ambiente 03 hs	04 hs	
08 hs	1	3	3			6	13
16 hs	1	3	3			6	13
Referência 12 hs	0 hs	0	3		3	6	12
BR 16	Ambiente 03 hs	04 hs	1	3	3	6	13
		08 hs	1	3	3	6	13
		16 hs	1	3	3	6	13
	Referência 12 hs	0 hs	0	3	3	6	12
<b>TOTAL AMOSTRAS</b>							<b>102</b>

Os procedimentos de extração das amostras, cura ambiente, cura carbônica, cura referência, preparação das amostras para os ensaios, verificação da frente de carbonatação por fenolftaleína, bem como os ensaios de resistência a compressão axial e termogravimetria, realizados no Estágio 1, foram igualmente executados no Estágio 2.

Após a realização das diferentes combinações de tempo de cura com CO<sub>2</sub> foi possível definir a combinação ideal que permitiu a máxima captura de CO<sub>2</sub> e concomitante ganho de resistência mecânica em amostras dos blocos de concreto com 4 e 16 MPa.

### **5.3 ENSAIOS TERMOGRAVIMÉTRICOS E ESTRUTURAIS – ETAPA 3**

Na Etapa 3 do programa experimental os blocos de concreto com 4 e 16 MPa foram submetidos à melhor condição de cura determinada após a avaliação dos resultados da Etapa 2. Feito isso, blocos e meios blocos foram encaminhados ao Laboratório de Sistemas Estruturas da UFSCar (LSE) para realização dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias, e as amostras ao Laboratório de Engenharia de Materiais da UFSCar (CCDM) para realização dos ensaios de termogravimetria visando a verificação do percentual de CO<sub>2</sub> capturado.

- **Cura ambiente inicial**

Após a produção, os blocos com 4 e 16 MPa foram submetidas à cura ambiente (ca) durante 2 hs e 4 hs, respectivamente (em barracão coberto da indústria, temperatura de aproximadamente 30°C e umidade ambiente do galpão de 40 %), conforme demonstra a Figura 117 e Figura 118.

- **Cura carbônica**

Após a cura ambiente inicial, 06 blocos com 4 MPa e 06 blocos com 16 MPa foram submetidos à cura carbônica durante 2 horas em câmara de carbonatação, configurada com 100% de concentração de CO<sub>2</sub>, pressão atmosférica, umidade ótima de 50% a 70% e temperatura ambiente de aproximadamente 26°C). Na Figura 128, é possível observar a referida cura.

**Figura 128 - Cura dos blocos de concreto com CO<sub>2</sub>.**



Fonte: Autor (2024).

- **Resistência à compressão axial**

Para o referido ensaio, foram utilizados 03 blocos BR 4, 03 blocos BR 16, 03 meios blocos BR 4 e 03 meios blocos BR 16, que não apresentaram quebras, trincas, deformações ou irregularidade de arestas. Utilizou-se para os ensaios uma máquina de ensaio a compressão modelo EMIC PC200 que atendia aos requisitos da ISO 7500-1 (2018). Dando continuidade ao procedimento já realizado anteriormente, utilizou-se o capeamento com o material chapa dura (Duratex). Fortes et al (2014) e Fortes (2017), verificaram em seus estudos que para as resistências nominais dos blocos analisados, não há diferença significativa entre as médias de resistência à compressão entre blocos de concreto capeados com chapa dura e blocos de concreto capeados com pasta de cimento. Assim sendo, empregou-se o capeamento com chapa dura para os ensaios de resistência à compressão axial dos blocos e meios blocos aos 28 dias, visando-se padronizar o procedimento. O preparo dos meios blocos foi realizado com a utilização de makita, lixadeira e esquadro, da seguinte maneira: após a cura carbônica, 03 blocos BR 4 e 03 blocos BR 16, foram cortados com auxílio de makita e esquadro nas dimensões do meio bloco (14 × 19 × 20 cm), em seguida realizou-se o desbaste com lixadeira e disco apropriado com a finalidade de aparar as arestas, conforme demonstra Figura 129. A Figura 130, mostra os blocos e meios blocos em ambiente de laboratório, e por fim, a Figura 131, mostra a realização do ensaio com o bloco e meio bloco na prensa hidráulica.

**Figura 129 - Preparo dos meios blocos: a) Corte dos blocos com makita, b) Desbaste com lixadeira, c) Regularização final com utilização de makita e esquadro.**



Fonte: Autor (2024).

**Figura 130 - Blocos e meios blocos em ambiente de laboratório.**



Fonte: Autor (2024).

**Figura 131 - Ensaio com o bloco e meio bloco na prensa hidráulica.**



Fonte: Autor (2024).

- **Verificação da frente de carbonatação**

Ao final da cura carbônica, 03 blocos BR 4 e 03 blocos BR16 foram cortados ao meio e transformados em meios blocos (14 × 19 × 20 cm). Com uma metade do bloco, realizou-se o ensaio de resistência à compressão axial e com a outra metade, realizou-se os ensaios de verificação da frente de carbonatação e captura de CO<sub>2</sub>. Para tanto, extraiu-se da região superior da parede do bloco, amostras com dimensão 5 × 5 cm para os ensaios de aspersão de solução de fenolftaleína e termogravimetria. As amostras (BR 4 e BR 16) foram divididas ao meio e aspergiu-se fenolftaleína com o intuito de verificar o avanço da frente de carbonatação, a outra metade, foi preparada (conforme já demonstrado no item 5.2.1, para o ensaio de termogravimetria).

Também foram extraídas 03 amostras dos blocos BR 4 e 03 dos blocos BR16 referenciais (não submetidos à cura carbônica) para a realização de ensaio de termogravimetria.

- **Ensaio**

As Tabelas 34 e Tabela 35, demonstram as diferentes combinações de cura empregadas na Etapa 3 e a quantidade de amostras utilizadas.

**Tabela 34 - Informações das curas e dos ensaios**

Blocos	Curas						Ensaio	
	Tipo e Tempo de cura inicial	Tempo de cura carbônica	Configuração câmara de carbonatação				Captura de CO <sub>2</sub> (%)	Ganho de Resistência
			Conc. de CO <sub>2</sub> (%)	Pressão (atm)	T(°C)	Umidade (%)		
BR 4	Ambiente 02 hs	02 hs	100	1	Ambiente	50% a 70%	Termogravimetria (TG)	Resistência à compressão aos 28 dias
	Referência lona 12 hs	0 hs	-	-	-	-	-	Resistência à compressão aos 28 dias
BR 16	Ambiente 04 hs	02 hs	100	1	Ambiente	50% a 70%	Termogravimetria (TG)	Resistência à compressão aos 28 dias
	Referência lona 12 hs	0 hs	-	-	-	-	-	Resistência à compressão aos 28 dias

**Tabela 35 - Combinações de cura empregadas, tempos e quantidades de amostras.**

Blocos	Tipo e tempo de cura inicial	Tempo de cura carbônica	Quantidade amostras TG	Quantidade e tipo de amostras		Total amostras
				Ensaio de Resistência à compressão axial 28 dias	Blocos Meios blocos	
BR 4	Ambiente 2 hs	2 hs	3	3	3	9
	Referência 12 hs	0 hs	3	3	3	9
BR 16	Ambiente 4 hs	2 hs	3	3	3	9
	Referência 12 hs	0 hs	3	3	3	9
TOTAL						36

# 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 6.1 ENSAIOS ESTRUTURAIS – ETAPA 1

### 6.1.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS BLOCOS COM 4 E 16 MPA AOS 02, 07 E 28 DIAS

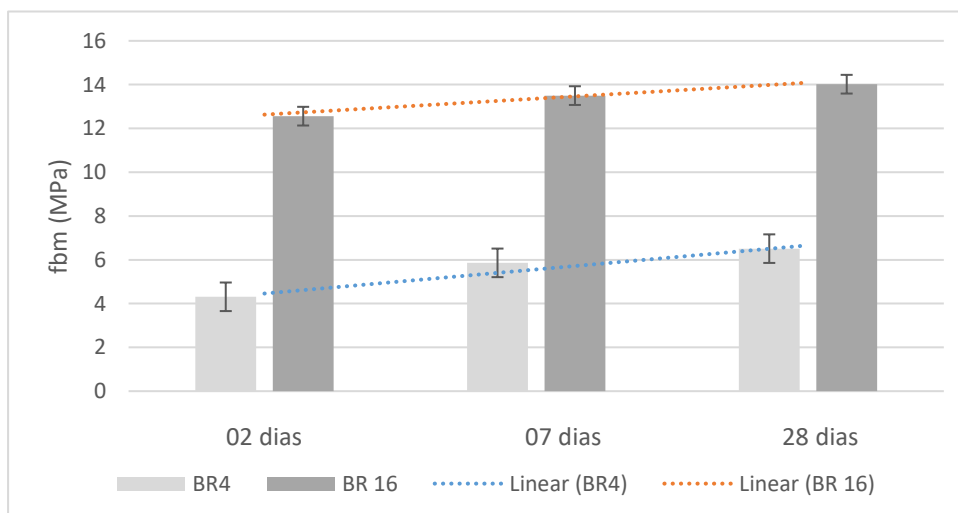
Após a definição dos traços objeto de estudo da pesquisa (BR 4 e BR 16), os blocos foram fabricados novamente e ensaiados aos 02, 07 e 28 dias. Os resultados foram apresentados na Tabela 36, a seguir.

**Tabela 36 - Ensaio de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para os blocos BR 4 e BR 16.**

	Resistência à compressão axial (MPa)					
	Blocos BR 4			Blocos BR 16		
	2 dias	07 dias	28 dias	02 dias	07 dias	28 dias
<b>fbm (MPa) (n=6)</b>	4,31	5,86	6,51	12,56	13,50	14,02
<b>Desvio padrão</b>	0,46	0,25	0,18	1,28	1,00	0,6
<b>Coef. Variação (CV)</b>	10,77%	4,24%	2,81%	10,17%	7,41%	4,31%

O gráfico contido na Figura 132 ilustra o ganho de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para os blocos BR 4 e BR 16. Percebe-se que as linhas de tendência para as duas resistências são paralelas, o que indica haver comportamento semelhante em relação ao ganho de resistência a compressão com idade.

**Figura 132 - Resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para os blocos BR 4 e BR 16.**



Fonte: Autor (2023).

Com o intuito de verificar se houve diferença significativa entre as médias das resistências à compressão axial obtidas aos 02, 07 e 28 dias para os blocos BR 4 e BR 16, realizou-se o teste estatístico ANOVA e os resultados encontram-se na Tabela 37 e Tabela 38, respectivamente.

**Tabela 37 - ANOVA para resistência à compressão axial para blocos BR 4.**

ANOVA						
<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	15,28004	2	7,640022	<b>61,53423</b>	5,89E-08	<b>3,68232</b>
Dentro dos grupos	1,862383	15	0,124159			
<b>Total</b>	<b>17,14243</b>	<b>17</b>				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial em todas as idades. Logo, comprova-se o ganho de resistência para os blocos BR 4 ao longo do tempo.

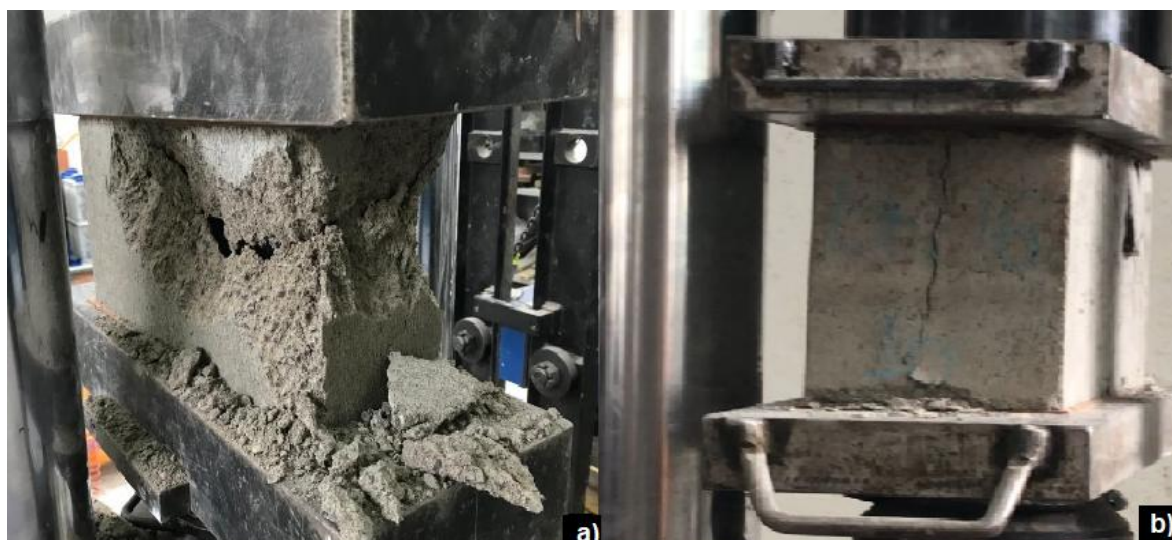
**Tabela 38 - ANOVA para resistência à compressão axial para blocos BR 16.**

ANOVA						
<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	6,637478	2	3,318739	<b>2,931846</b>	0,084188	<b>3,68232</b>
Dentro dos grupos	16,97943	15	1,131962			
<b>Total</b>	<b>23,61691</b>	<b>17</b>				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial. Logo, não houve incremento de resistência para os blocos BR 16 ao longo do tempo.

Os blocos BR 4 e BR 16 apresentaram um padrão de ruptura cônica (Figura 133 (a)) e vertical (Figura 133 (b)), típicas da compressão de um corpo de prova confinado nas extremidades. Long et al (2005), Barbosa e Hanai (2008), Aryana (2006), Fortes et al. (2014), observaram o mesmo tipo de ruptura.

**Figura 133 - Ruptura dos blocos: a) BR 4; b) BR 16.**



Fonte: Autor (2022).

### **6.1.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS COM 4 E 16 MPA AOS 02, 07 E 28 DIAS**

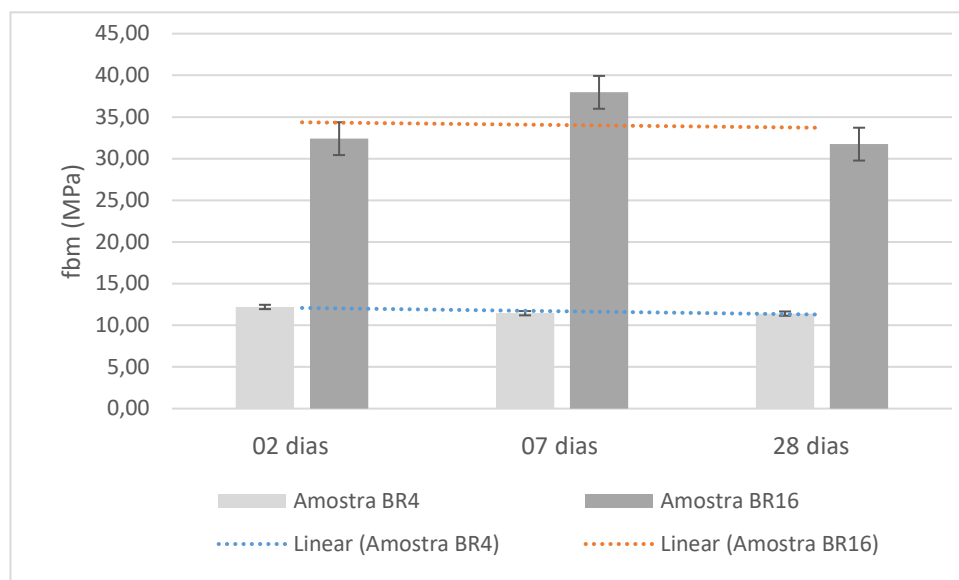
Amostras BR 4 e BR 16 foram extraídas com auxílio da serra circular manual, capeadas com pasta de cimento e submetidas aos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias. Os resultados foram apresentados na Tabela 39, a seguir.

**Tabela 39 - Ensaio de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras com BR 4 e BR 16.**

	<b>Resistência à compressão axial (MPa)</b>					
	<b>Amostras BR 4</b>			<b>Amostras BR 16</b>		
	<b>02 dias</b>	<b>07 dias</b>	<b>28 dias</b>	<b>02 dias</b>	<b>07 dias</b>	<b>28 dias</b>
<b>fbm (MPa) (n=6)</b>	12,20	11,45	11,4	32,4	37,96	31,74
<b>Desvio padrão</b>	1,03	2,1	2,04	1,82	2,56	5,7
<b>Coef. Variação (CV)</b>	8,47%	18,33%	17,92%	5,62%	6,73%	17,96%

O gráfico contido na Figura 134 ilustra o comportamento da resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras BR 4 e BR 16. Percebe-se que as linhas de tendência para as duas resistências são paralelas e praticamente retas, o que indica não haver ganho significativo de resistência à tração na flexão com idade.

**Figura 134 - Resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras BR 4 e BR 16.**



Fonte: Autor (2023).

Com o intuito de verificar se houve diferença significativa entre as médias das resistências à compressão axial obtidas aos 02, 07 e 28 dias para as amostras BR 4 e BR 16, realizou-se o teste estatístico ANOVA e os resultados encontram-se na Tabela 40 e Tabela 41, respectivamente.

**Tabela 40 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4.**

ANOVA						
<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	2,431744	2	1,215872	<b>0,315266</b>	0,734313	<b>3,68232</b>
Dentro dos grupos	57,84983	15	3,856656			
<b>Total</b>	<b>60,28158</b>	<b>17</b>				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4.

**Tabela 41 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16.**

ANOVA						
<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	139,905	2	69,95251	<b>4,128416</b>	0,037287	<b>3,68232</b>
Dentro dos grupos	254,1623	15	16,94415			
Total	394,0673	17				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial em todas as idades.

Então realizou-se teste estatístico ANOVA entre as amostras de BR 16 e os resultados encontram-se na Tabela 42, Tabela 43 e Tabela 44.

**Tabela 42 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 02 e 07 dias.**

ANOVA						
<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	92,68521	1	92,68521	<b>15,69329</b>	0,00268	<b>4,964603</b>
Dentro dos grupos	59,06042	10	5,906042			
Total	151,7456	11				

Observou-se que o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial entre as idades de 02 e 07 dias. Pelos valores das médias verifica-se um incremento de resistência.

**Tabela 43 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 e 28 dias.**

ANOVA						
<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	115,8787	1	115,8787	<b>4,946347</b>	0,050349	<b>4,964603</b>
Dentro dos grupos	234,2712	10	23,42712			
Total	350,1499	11				

Observou-se que por poucos décimos o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial entre as idades de 07 dias e 28 dias. Pelos valores das médias verifica-se um decréscimo de resistência com o passar dos dias.

**Tabela 44 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 02 e 28 dias.**

ANOVA						
<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	1,29363	3	1,29363	<b>0,06017</b>	0,811186599	<b>4,96460</b>
Dentro dos grupos	214,993	10	21,4993			
Total	216,286	6				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 16 nas idades analisadas. Logo, não houve acréscimo, nem decréscimo de resistência para as amostras de BR 16 aos 02 e 28 dias.

As amostras BR 4 e BR 16, apresentaram um padrão de ruptura com fissuras na vertical, típica da compressão de um corpo de prova confinado nas extremidades, como mostra a Figura 135 e Figura 136, em todas as idades.

**Figura 135 - Ruptura das amostras dos blocos BR 4.**



Fonte: Autor (2023).

**Figura 136 -Ruptura das amostras dos blocos BR 16.**



Fonte: Autor (2023).

### **6.1.3 CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA DAS AMOSTRAS E BLOCOS COM 4 E 16 MPA AOS 02, 07 E 28 DIAS**

As resistências à compressão axial dos blocos e amostras extraídas dos blocos com 4MPa e 16 MPa foram correlacionadas. Na análise de correlação entre conjunto de dados, o coeficiente de correlação varia de -1 a 1, sendo que um valor absoluto de exatamente 1 implica que uma equação linear descreve perfeitamente a relação entre X e Y, com todos os pontos de dados situados em uma linha, conforme indica Moore et al. (2018).

A Tabela 45 indica os valores individuais dos resultados e o coeficiente de correlação obtido para cada idade e para cada resistência de bloco. Também é indicado o coeficiente de correlação para o conjunto todo de dados. No caso do bloco BR4, o coeficiente de correlação entre a resistência de blocos de concreto e a resistência considerando todas as idades retiradas desses blocos é de aproximadamente 0,02 o que indica uma correlação praticamente inexistente, no conjunto das três idades. Portanto, existe forte diferença entre as correlações entre as idades. Nas idades de 2 dias e 7 dias, os fatores de correlação obtidos são 0,63 e 0,51, respectivamente, sugerindo uma correlação moderada. Na idade de 28 dias, a correlação aumenta para aproximadamente 0,82, sugerindo uma correlação muito forte. Conclusão semelhante é possível de se observar para o caso BR16. Os coeficientes de correlação obtidos foram 0,30; 0,43, 0,14 e 0,92, para o conjunto de todas as amostras, e para as idades de 2, 7 e 28 dias, respectivamente. Desta forma, a correlação entre a resistência da amostra e do bloco é diferente conforme idade, é sujeita a maior variação para as idades de 2 e 7 dias, porém tende a uma boa correlação para a idade de 28 dias.

**Tabela 45 - Correlação entre as resistências à compressão axial das amostras extraídas dos blocos e blocos com 4MPa e 16MPa.**

Idade (dias)	BR 4			BR 16				
	Resistência à compressão axial (MPa)		Coeficiente de Correlação para cada idade	Coeficiente de Correlação para todo o conjunto	Resistência à compressão axial (MPa)		Coeficiente de Correlação para cada idade	Coeficiente de Correlação para todo o conjunto
	Amostra	Bloco			Amostra	Bloco		
2	10,03	3,76	0,63	-0,02	32,16	11,16	0,43	0,30
	12,88	3,93			29,38	11,46		
	12,32	4,02			34,99	11,94		
	12,48	4,40			31,05	12,17		
	12,22	4,62			33,69	14,18		
	13,27	5,12			33,12	14,42		
7	8,36	5,44	0,51	-0,02	38,02	11,82	0,14	0,30
	13,53	5,67			41,21	13,32		
	9,26	5,79			33,48	13,34		
	13,21	5,99			38,64	13,57		
	13,51	6,10			36,20	14,09		
	10,82	6,14			40,19	14,83		
28	8,63	6,17	0,82	-0,02	26,89	13,29	0,92	0,30
	10,09	6,35			27,51	13,36		
	10,14	6,57			27,86	14,06		
	11,55	6,64			31,03	14,10		
	13,38	6,64			33,86	14,23		
	14,58	6,66			43,30	15,10		

Nas Tabela 46 e 47, são indicados os valores médios e a correlação entre a resistência da amostra e a resistência do bloco a cada idade. Ainda que os resultados em idades menores sejam mais variáveis, verifica-se que a correlação para as amostras e blocos com 4 MPa e 16MPa, aos 02 dias é maior e aos 28 dias é menor.

Traçando-se um paralelo com os blocos, acredita-se que esse comportamento é esperado, uma vez que a relação tração e compressão nas menores idades também é maior e se reduz com o passar dos dias, ficando na faixa de 2, devido a relação de área bruta e área líquida.

Aos 28 dias existe forte correlação e observa-se a tendência, para ambas as resistências de blocos, desta ficar em torno de 2,0.

**Tabela 46 - Correlação entre as resistências à compressão axial das amostras extraídas dos blocos e blocos com 4MPa.**

CP n°	Resistência à compressão axial (MPa) - 4 MPa					
	02 dias		07 dias		28 dias	
	Amostras BR 4	Blocos BR 4	Amostras BR 4	Blocos BR 4	Amostras BR 4	Blocos BR 4
<b>Média (n=6)</b>	12,20	4,31	11,45	5,86	11,40	6,51
<b>Correlação</b>	2,83		1,95		1,75	

**Tabela 47 - Correlação entre as resistências à compressão axial das amostras extraídas dos blocos e blocos com 16 MPa.**

CP n°	Resistência à compressão axial (MPa) - 16 MPa					
	02 dias		07 dias		28 dias	
	Amostras BR 16	Blocos BR 16	Amostras BR 16	Blocos BR 16	Amostras BR 16	Blocos BR 16
<b>Média (n=6)</b>	32,4	12,56	37,96	13,50	31,74	14,02
<b>Correlação</b>	2,58		2,81		2,26	

#### **6.1.4 CONCLUSÕES**

No presente tópico foi possível determinar algo inédito na literatura atual, a correlação quanto à resistência à compressão axial entre blocos fabricados e compactados em indústria (utilizando-se máquina vibro - prensa) e amostras extraídas do próprio bloco, logo com mesmo traço e processo de compactação/vibração.

Durante o processo, foi verificado que o dispositivo de corte empregado para cortar as amostras do bloco pode ser tanto a serra de corte manual como a de bancada. Quanto, ao capeamento das amostras, verificou-se menor variação quando empregado a pasta de cimento, uma vez que esta regulariza a superfície de contato amostra/prensa, tornando a superfície uniforme para receber e distribuir os esforços.

Definiu-se que, tanto a região superior, como inferior da parede longitudinal do bloco, podem ser utilizadas para extração das amostras. Tal fato pode ser explicado pelo processo de vibração, durante a fabricação do bloco, em que as faces superior e inferior por estarem em contato direto com a prensa hidráulica são vibradas de forma equivalente e superior à

região central do bloco, apresentando então valores de resistência equivalentes entre si e superiores à região central.

Por fim, ao correlacionar os valores de resistência à compressão dos blocos BR4 e BR 16 e suas respectivas amostras aos 02, 07 e 28 dias; verificou-se que esta, para ambas as resistências estudadas, aos 02 dias é maior e aos 28 dias é menor. Existe maior variabilidade de resultados aos 02 e 07 dias, com baixo coeficiente de correlação para essas idades. Aos 28 dias existe forte correlação entre amostra e bloco. Observou-se a tendência, em ambos os casos, desta ficar em torno de 2,0, aos 28 dias.

Traçando-se um paralelo com os blocos, acredita-se que esse comportamento é esperado, uma vez que a relação tração e compressão nas menores idades também é maior e se reduz com o passar dos dias, ficando na faixa de 2,0, devido a relação de área bruta e área líquida.

## **6.2 ENSAIOS TERMOGRAVIMÉTRICOS E ESTRUTURAIIS – ETAPA 2**

As amostras dos blocos com 4 e 16 MPa, após as curas: *ambiente (ca) durante 2hs e 4hs + carbônica (c) durante 2hs*, foram ensaiadas à resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias; realizou-se também a aspersão com fenolftaleína para verificação da frente de carbonatação e termogravimetria para verificação do percentual de CO<sub>2</sub> capturado. Os resultados serão apresentados nos tópicos seguintes.

- **2 hs cura ambiente (a) + 2 hs cura carbônica (c)**

### **6.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS BR 4 E BR 16 SUBMETIDAS ÀS CURAS 2A+2C E REFERÊNCIA, AOS 02, 07 E 28 DIAS**

- **AMOSTRAS BR 4**

Os resultados de *resistência à compressão axial* das amostras dos blocos BR 4 foram apresentados na Tabela 48, a seguir.

**Tabela 48 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 4, submetidas às curas 2a+2c e referência.**

Resistência à compressão axial (MPa) - Amostras dos Blocos BR 4						
Idade	02 dias		07 dias		28 dias	
Cura	2a+2c	Referência	2a+2c	Referência	2a+2c	Referência
fam (MPa)	8,10	11,09	11,47	15,27	13,87	13,52
Desvio padrão	1,97	0,96	0,67	1,8	2,54	2,61
Coef. Variação (CV)	24,30%	8,70%	5,90%	11,80%	18,30%	19,30%

Com o objetivo de verificar se houve variância para a mesma idade e diferentes tipos de cura (2a+2c e referência), aos 02, 07 e 28 dias, realizou-se o teste estatístico ANOVA. Os resultados encontram-se na Tabela 49, Tabela 50 e Tabela 51, a seguir.

**Tabela 49 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 02 dias, considerando as curas 2a+2c e referência.**

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	13,47002	1	13,47002	<b>5,623324</b>	0,076708	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	9,581533	4	2,395383			
Total	23,05155	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4 para as curas 2a+2c e referência, aos 02 dias.

**Tabela 50 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 07 dias, considerando as curas 2a+2c e referência.**

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	21,66	1	21,66	<b>11,68547</b>	0,026819	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	7,414333	4	1,853583			
Total	29,07433	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre as resistências à compressão das amostras dos blocos BR 04, submetidas aos diferentes tipos de cura 2a+2c e referência, aos 07 dias. Sendo assim, as amostras referenciais apresentaram resistência superior às carbonatadas aos 07 dias.

**Tabela 51 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 28 dias, considerando as curas 2a+2c e referência.**

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,18375	1	0,18375	<b>0,02773</b>	0,875825	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	26,50593	4	6,626483			
Total	26,68968	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4 para as curas 2a+2c e referência, aos 28 dias.

- **AMOSTRAS BR 16**

A Tabela 52, a seguir, apresenta os resultados de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias, das amostras dos blocos com 16 MPa, após as curas: ambiente (ca) durante 2 hs + carbônica (c) durante 2hs e referencial.

**Tabela 52 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 16, submetidas às curas 2a+2c e referência.**

Resistência à compressão axial (MPa) - Amostras dos Blocos BR 16						
Idade	02 dias		07 dias		28 dias	
	2a+2c	Referência	2a+2c	Referência	2a+2c	Referência
fam (MPa)	21,93	26,89	26,39	33,36	23,98	34,61
Desvio padrão	1,78	2,52	1,52	4,10	4,07	6,89
Coef. Variação (CV)	8,10%	9,39%	5,77%	12,28%	17,00%	19,90%

Com o objetivo de verificar se houve variância para a mesma idade e diferentes tipos de cura (2a+2c e referência), aos 02, 07 e 28 dias, realizou-se o teste estatístico ANOVA. Os resultados encontram-se na Tabela 53, Tabela 54 e Tabela 55, a seguir.

**Tabela 53 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 02 dias, considerando as curas 2a+2c e referência.**

ANOVA						
<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	37,00167	1	37,00167	<b>7,772589</b>	0,049416	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	19,04213	4	4,760533			
Total	56,0438	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre as resistências à compressão das amostras dos blocos BR 16, submetidas aos diferentes tipos de cura 2a+2c e referência, aos 02 dias. Sendo assim, as amostras referenciais apresentaram resistência superior às carbonatadas aos 02 dias.

A Tabela 54 a seguir, apresenta o teste estatístico ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 dias, considerando as curas 2a+2c e referência.

**Tabela 54 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 dias, considerando as curas 2a+2c e referência.**

ANOVA						
<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	72,80167	1	72,80167	<b>7,623956</b>	0,05079	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	38,19627	4	9,549067			
Total	110,9979	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 16 para as curas 2a+2c e referência, aos 07 dias.

A Tabela 55 a seguir, apresenta o teste estatístico ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 2a+2c e referência.

**Tabela 55 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 2a+2c e referência.**

ANOVA						
<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	169,3891	1	169,3891	<b>5,295963</b>	0,082821	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	127,9383	4	31,98457			
Total	297,3273	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 16 para as curas 2a+2c e referência, aos 28 dias.

### 6.2.2 VERIFICAÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO COM FENOLFTALEÍNA

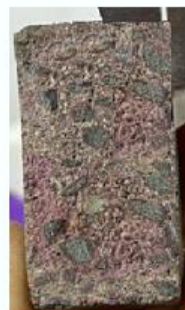
A Figura 137, abaixo, demonstra que a amostra BR 4 carbonatou por completo, enquanto que a BR 16 não. Na Figura 138, foi mensurado o avanço da frente de carbonatação na amostra BR 16 – 2a+2c.

**Figura 137 - Amostras BR 4 e BR 16, após aspensão de fenolftaleína.**

**BR 4 - 2a+2c**



**BR 16 - 2a+2c**



Fonte: Autor (2024).

**Figura 138 - Mensuração do avanço da frente de carbonatação na amostra BR 16.**

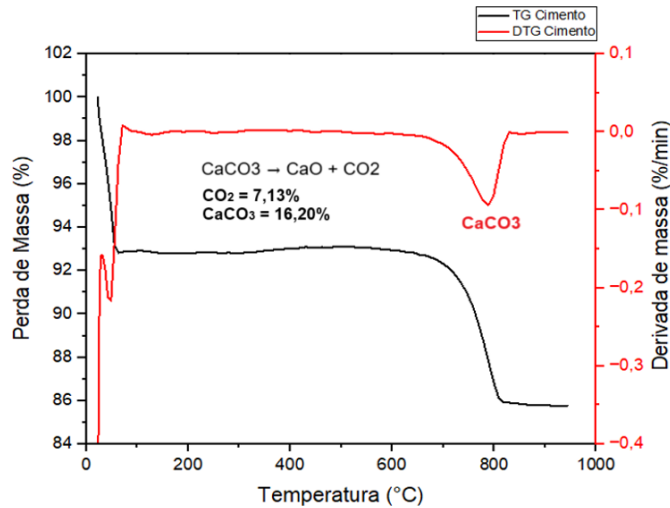


Fonte: Autor (2024).

### **6.2.3 ENSAIOS TERMOGRAVIMÉTRICOS**

A quantidade de carbonato equivalente ao  $\text{CO}_2$  foi calculada utilizando-se o procedimento de Neves Junior et al (2012). Com base nisso, foram plotadas todas as curvas de TG e DTG a partir das quais foi determinada a perda de massa referente a descarbonatação do  $\text{CaCO}_3$ . Considerando que há uma quantidade inicial de  $\text{CaCO}_3$  apenas no cimento anidro (Figura 142), a quantidade adicional de  $\text{CaCO}_3$  no concreto, após a cura carbônica é devida exclusivamente à reação de carbonatação, advinda das fases hidratadas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e silicato de cálcio (C-S-H). Assim, a metodologia utilizada para determinar a captura de  $\text{CO}_2$  foi baseada na comparação da decomposição do  $\text{CaCO}_3$  nas curvas de TG e DTG para os blocos curados convencionalmente (Bloco BR 4 e Bloco BR 16 – não carbonatados) e blocos tratados com  $\text{CO}_2$  (Bloco BR 4 e Bloco BR 16 - após a cura carbônica). A quantidade de carbonato equivalente ao  $\text{CO}_2$  das duas curvas representa o  $\text{CO}_2$  absorvido quimicamente durante as reações de carbonatação em cada região considerada (NEVES JUNIOR, 2013).

**Figura 142 - TG/DTG cimento anidro - CPV ARI.**



Fonte: Autor (2025).

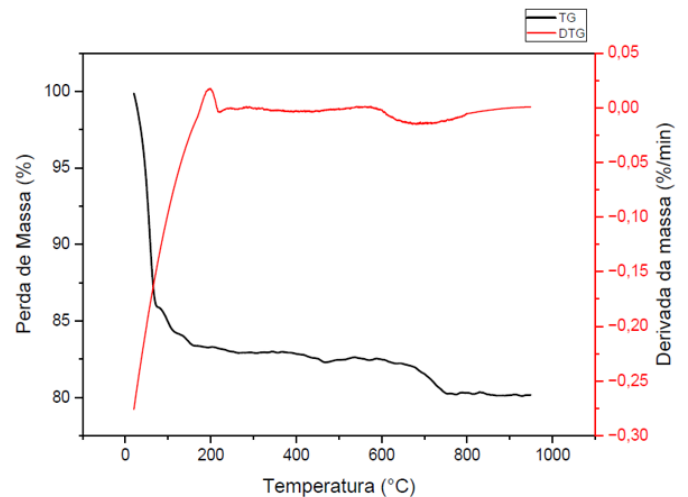
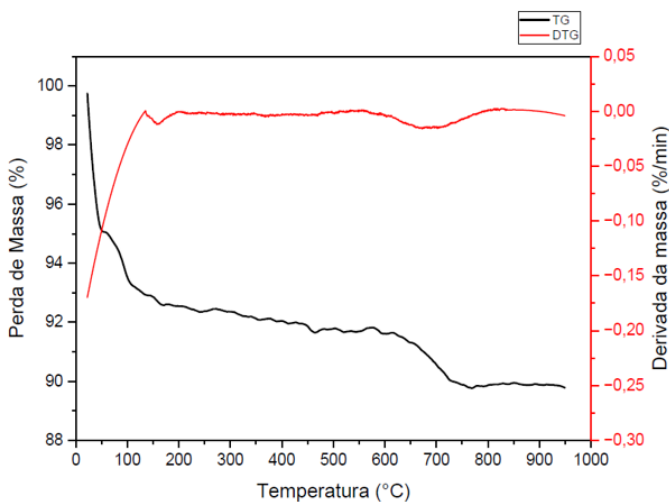
a) Antes da cura carbônica

Amostras dos blocos BR 4 e BR 16 foram submetidas aos ensaios de termogravimetria antes da cura carbônica, para verificação da quantidade de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) presente na composição química da amostra. Este valor obtido inicialmente, será excluído do valor obtido após o tratamento com  $\text{CO}_2$  para verificação do real percentual de captura de  $\text{CO}_2$ . A Figura 139 demonstra os gráficos de TG e DTG dos blocos BR 4 BR 16, não carbonatados.

**Figura 139 - TG/DTG – amostras BR 4 e BR 16 – não carbonatados.**

• **BR 4 – ANTES DA CARBONATAÇÃO –  $\text{CO}_2 = 1,80\%$**

• **BR 16 – ANTES DA CARBONATAÇÃO –  $\text{CO}_2 = 1,95\%$**



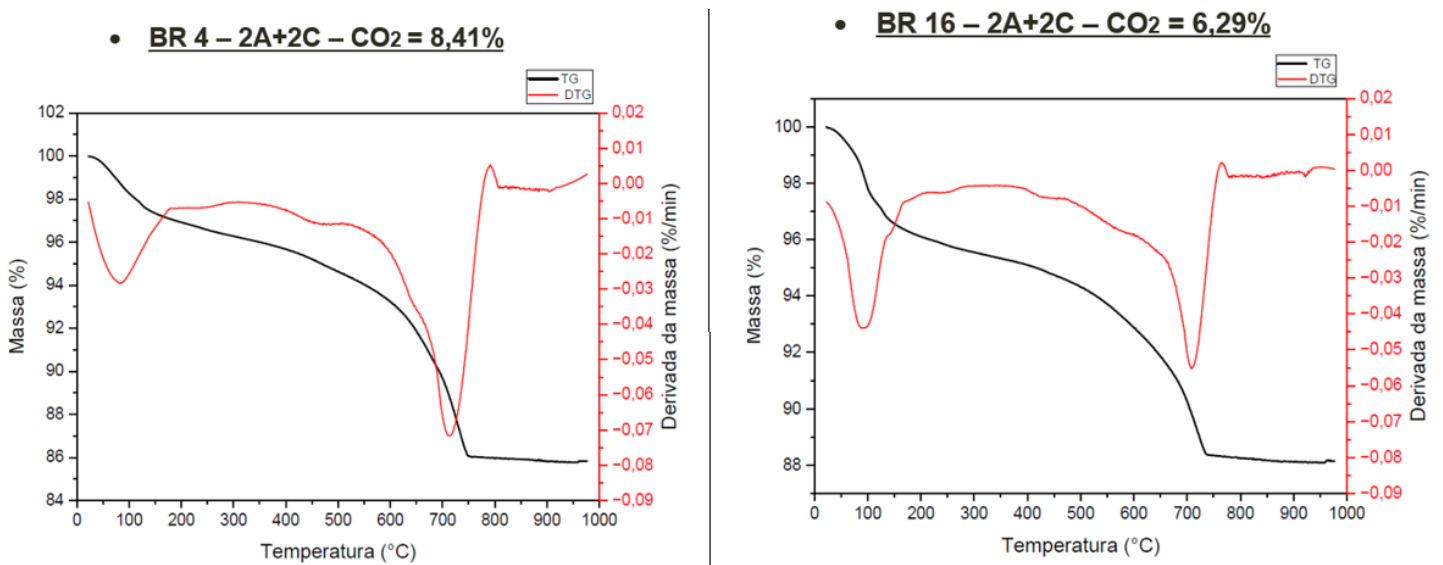
Fonte: Autor (2024).

A quantidade de carbonato inicial da amostra, equivalente ao CO<sub>2</sub> é de 1,8% para o BR4 e de 1,95% para o BR 16.

b) Depois da cura carbônica

Após a cura carbônica durante 2 horas as amostras dos blocos BR 4 e BR 16, foram submetidas aos ensaios de termogravimetria e os gráficos foram apresentados na Figura 140, a seguir.

**Figura 140 - TG/DTG – amostras BR 4 - 2a+2c e BR 16 - 2a+2c.**



Fonte: Autor (2024).

Para verificação do percentual de CO<sub>2</sub> realmente capturado, deve-se subtrair do percentual de CO<sub>2</sub> verificado após a cura carbônica, a quantidade de carbonato inicial da amostra, equivalente ao CO<sub>2</sub> já presente nela (item 6.2.3 (a)). Os resultados foram apresentados na Tabela 56, a seguir.

**Tabela 56 - Resultados de captura de CO<sub>2</sub> pelo ensaio de termogravimetria para amostras BR 4 - 2a+2c e BR 16 - 2a+2c.**

Captura de CO <sub>2</sub> (%) - TG/DTG		
Cura	2a+2c	
Amostra	BR 4	BR 16
CO <sub>2</sub> (%)	6,61	4,34

#### 6.2.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

- Quanto a resistência à compressão axial:

As amostras BR 4 (2a+2c e referência) aos 02 e 28 dias, após análise estatística dos resultados, não apresentaram diferença significativa entre si. No entanto, aos 28 dias, verificou-se uma tendência das amostras BR4 (2a+2c) apresentarem uma maior resistência que as referenciais. Já, aos 07 dias, foi constatado através do teste estatístico ANOVA que a resistência das amostras BR4 – 2a+2c foi inferior que às referenciais.

Para amostras BR 16 (2a+2c e referência) aos 02 dias, verificou-se que houve diferença significativa entre suas resistências. Já, aos 07 e 28 dias as referidas amostras apresentaram resistência à compressão sem diferença significativa entre si.

Portanto, tanto para as amostras BR 4, como BR 16, aos 28 dias, a cura com CO<sub>2</sub> durante 2hs não prejudicou, nem favoreceu a resistência, pois as amostras carbonatadas e referenciais apresentaram resistências equivalentes. Além disso, não se verificou para as amostras BR 4 e BR 16 carbonatadas ganho de resistência superior às peças referenciais, logo nas primeiras idades (02 e 07 dias).

- Quanto a captura de CO<sub>2</sub>:

As amostras BR 4 - 2a+2c, absorveram 6,61% de CO<sub>2</sub>. E as amostras BR 16 - 2a+2c, absorveram 4,34% de CO<sub>2</sub>.

- **4 hs cura ambiente (a) + 2 hs cura carbônica (c)**

#### 6.2.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS BR 4 E BR 16 SUBMETIDAS ÀS CURAS 4A+2C E REFERÊNCIA, AOS 02, 07 E 28 DIAS

- **AMOSTRAS BR 4**

Os resultados de *resistência à compressão axial* das amostras dos blocos BR 4 foram apresentados nas Tabela 57 e Tabela 68, a seguir.

**Tabela 57 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 4, submetidas às curas 4a+2c e referência.**

Resistência à compressão axial (MPa) - Amostras dos Blocos BR 4						
Idade	02 dias		07 dias		28 dias	
	4a+2c	Referência	4a+2c	Referência	4a+2c	Referência
fam (MPa)	9,48	11,09	12,23	15,27	10,32	13,52
Desvio padrão	1	0,96	2,53	1,8	1,42	2,61
Coef. Variação (CV)	10,50%	8,70%	20,70%	11,80%	13,80%	19,30%

Com o objetivo de verificar se houve variância para a mesma idade e diferentes tipos de cura (4a+2c e referência), aos 02, 07 e 28 dias, realizou-se o teste estatístico ANOVA. Os resultados encontram-se na Tabela 58, Tabela 59 e Tabela 60, a seguir.

**Tabela 58 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 02 dias, considerando as curas 4a+2c e referência.**

ANOVA						
<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	3,142803	1	3,142803	<b>3,315057</b>	0,166199	<b>10,12796</b>
Dentro dos grupos	2,844117	3	0,948039			
Total	5,98692	4				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4 para as curas 4a+2c e referência, aos 02 dias.

**Tabela 59 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 07 dias, considerando as curas 4a+2c e referência.**

ANOVA						
<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	13,8624	1	13,8624	<b>2,878894</b>	0,164986	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	19,26073	4	4,815183			
Total	33,12313	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4 para as curas 4a+2c e referência, aos 07 dias.

**Tabela 60 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 28 dias, considerando as curas 4a+2c e referência.**

ANOVA						
<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	15,36	1	15,36	<b>3,478038</b>	0,135621	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	17,66513	4	4,416283			
Total	33,02513	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4 para as curas 4a+2c e referência, aos 28 dias.

- **AMOSTRAS BR 16**

A Tabela 61, a seguir, apresenta os resultados de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias, das amostras dos blocos com 16 MPa, após as curas: ambiente (ca) durante 4 hs + carbônica (c) durante 2hs e referencial.

**Tabela 61 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 16, submetidas às curas 4a+2c e referência.**

Resistência à compressão axial (MPa) - Amostras dos Blocos BR 16						
Idade	02 dias		07 dias		28 dias	
Cura	4a+2c	Referência	4a+2c	Referência	4a+2c	Referência
fam (MPa)	19,06	26,89	25,16	33,36	26,44	34,61
Desvio padrão	0,36	2,52	0,97	4,10	3,21	6,89
Coef. Variação (CV)	1,89%	9,39%	3,86%	12,28%	12,10%	19,90%

Com o objetivo de verificar se houve variância para a mesma idade e diferentes tipos de cura (4a+2c e referência), aos 02, 07 e 28 dias, realizou-se o teste estatístico ANOVA. Os resultados encontram-se na Tabela 62, Tabela 63 e Tabela 64, a seguir.

**Tabela 62 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 02 dias, considerando as curas 4a+2c e referência.**

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	73,72736	1	73,72736	<b>17,18464</b>	0,025499	<b>10,12796</b>
Dentro dos grupos	12,87092	3	4,290306			
Total	86,59828	4				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre as resistências à compressão das amostras dos blocos BR 16, submetidas aos diferentes tipos de cura 4a+2c e referência, aos 02 dias. Sendo assim, as amostras referenciais apresentaram resistência superior às carbonatadas aos 02 dias.

A Tabela 63 a seguir, apresenta o teste estatístico ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 dias, considerando as curas 4a+2c e referência.

**Tabela 63 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 dias, considerando as curas 4a+2c e referência.**

ANOVA						
<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	100,86	1	100,86	<b>11,383</b>	0,027943	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	35,44233	4	8,860583			
Total	136,3023	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre as resistências à compressão das amostras dos blocos BR 16, submetidas aos diferentes tipos de cura 4a+2c e referência, aos 07 dias. Sendo assim, as amostras referenciais apresentaram resistência superior às carbonatadas aos 07 dias.

A Tabela 64 a seguir, apresenta o teste estatístico ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 4a+2c e referência.

**Tabela 64 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 4a+2c e referência.**

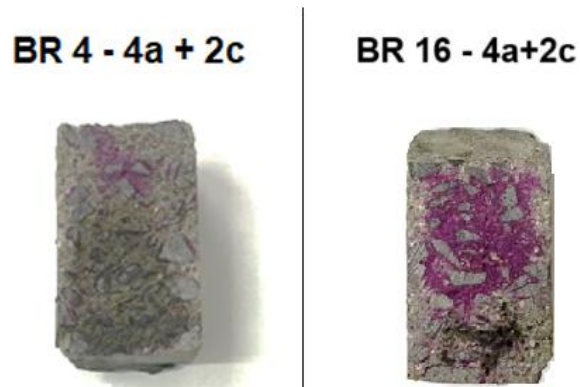
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	100,0417	1	100,0417	<b>3,465767</b>	0,136139	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	115,4627	4	28,86567			
Total	215,5043	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 16 para as curas 4a+2c e referência, aos 28 dias.

#### **6.2.6 VERIFICAÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO COM FENOLFTALEÍNA**

A Figura 141 abaixo, demonstra que a amostra BR 4 carbonatou por completo, enquanto que a BR 16 não. Na Figura 142, foi mensurado o avanço da frente de carbonatação na amostra BR 16 – 2a+2c.

**Figura 141 - Amostras BR 4 e BR 16, após aspersione de fenolftaleína.**



Fonte: Autor (2024).

**Figura 142 - Mensuração do avanço da frente de carbonatação na amostra BR 16.**

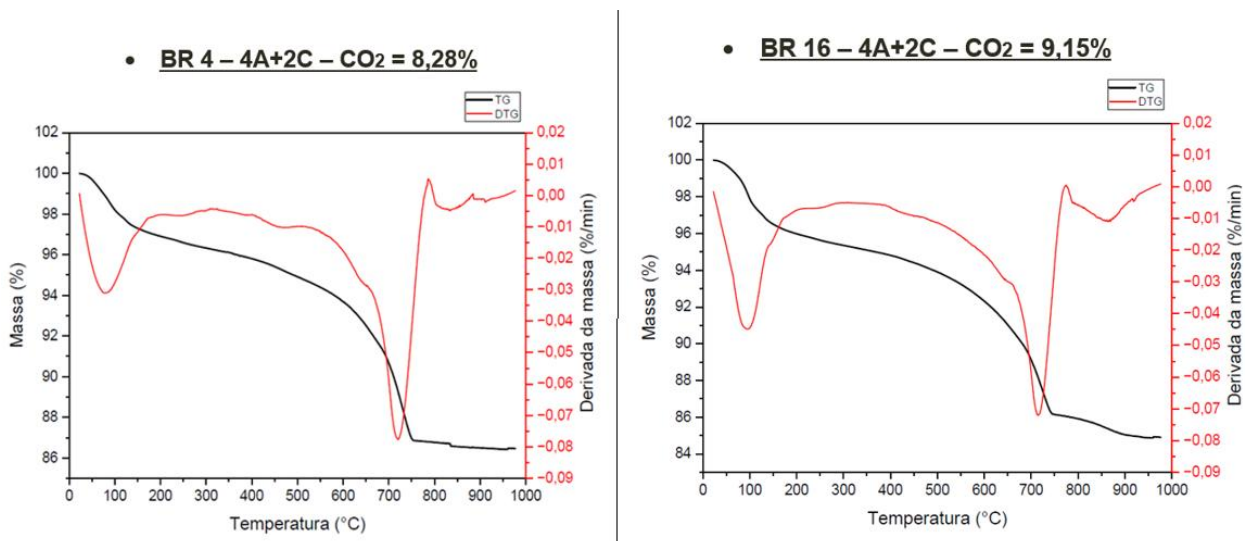


Fonte: Autor (2024).

### **6.2.7 ENSAIOS TERMOGRAVIMÉTRICOS**

Após as curas carbônica durante 2 horas as amostras dos blocos BR 4 e BR 16, foram submetidas aos ensaios de termogravimetria e os gráficos serão apresentados a seguir, na Figura 143.

Figura 143 - TG/DTG – amostras BR 4 - 4a+2c e BR 16 - 4a+2c.



Fonte: Autor (2024).

Para verificação do percentual de CO<sub>2</sub> realmente capturado, deve-se subtrair do percentual de CO<sub>2</sub> verificado após a cura carbônica, a quantidade de carbonato inicial da amostra, equivalente ao CO<sub>2</sub> já presente nela (item 6.2.3 (a)). Os resultados foram apresentados na Tabela 65, a seguir.

Tabela 65 - Resultados de captura de CO<sub>2</sub> pelo ensaio de termogravimetria para amostras BR 4 - 4a+2c e BR 16 - 4a+2c.

Captura de CO <sub>2</sub> (%) - TG/DTG		
Cura	4a+2c	
Amostra	BR 4	BR 16
CO <sub>2</sub> (%)	6,48	7,20

### 6.2.8 CONCLUSÕES PARCIAIS

- Quanto a resistência à compressão axial:

As amostras BR 4 (4a+2c e referência) aos 02, 07 e 28 dias, após análise estatística dos resultados, não apresentaram diferença significativa entre si. Já as amostras BR 16 (4a+2c e referência) aos 02 e 07 dias, após a análise estatística, verificou-se que estas apresentaram diferença significativa entre si, de maneira que as amostras referenciais manifestaram maior resistência. Aos 28 dias, as resistências das amostras referenciais e carbonatadas se equivaleram.

- Quanto a captura de CO<sub>2</sub>:

As amostras BR 4 - 4a+2c, capturaram 6,48% de CO<sub>2</sub>. E as amostras BR 16 - 4a+2c, capturaram 7,20% de CO<sub>2</sub>.

### 6.2.9 CONSIDERAÇÕES: 2 HS E 4 HS CURA AMBIENTE + 2 HS CURA CARBÔNICA

Este tópico pretende fazer uma análise dos resultados obtidos para resistência à compressão axial, frente de carbonatação e captura de CO<sub>2</sub>, para as amostras submetidas a 02 e 04 horas de cura ambiente inicial e posterior cura carbônica durante 02 horas. As Tabela 66 e Tabela 67 trazem um compilado dos resultados para as amostras BR4 e BR 16.

**Tabela 66 - Resumo dos itens analisados para as amostras BR 4: resistência à compressão, frente de carbonatação e captura de CO<sub>2</sub>.**

Curas	Resistência à compressão axial - BR 4			Frente de carbonatação	Captura CO <sub>2</sub>
	Idades				
	02 dias	07 dias	28 dias		
2a+2c	igual	REF ↑	igual	total	6,61%
4a+2c	igual	igual	igual	total	6,48%

Igual – não houve diferença significativa

REF ↑ - resistência à compressão axial superior para a amostra referência

**Tabela 67 - Resumo dos itens analisados para as amostras BR 16 : resistência à compressão, frente de carbonatação e captura de CO<sub>2</sub>.**

Curas	Resistência à compressão axial - BR 16			Frente de carbonatação	Captura CO <sub>2</sub>
	Idades				
	02 dias	07 dias	28 dias		
2a+2c	REF ↑	igual	igual	0,88 mm	4,34%
4a+2c	REF ↑	REF ↑	igual	3,27 mm	7,20%

Igual – não houve diferença significativa

REF ↑ - resistência à compressão axial superior para a amostra referência

Ao analisar os resultados verificou-se que para as amostras BR 4, houve uma tendência de as amostras curadas com 2 horas de cura ambiente apresentarem maior resistência à compressão axial aos 28 dias e maior percentual de CO<sub>2</sub> absorvido, do que as curadas com 4 horas de cura ambiente. Já as amostras BR 16, apresentaram uma tendência de as amostras curadas com 4 horas de cura ambiente apresentarem maior resistência à compressão axial aos 28 dias e maior percentual de CO<sub>2</sub> absorvido, do que as curadas com 2 horas de cura ambiente.

Na prática, verificou-se que cortar as amostras com 2 horas de cura ambiente não é o ideal, uma vez que pelo pouco tempo de cura, as mesmas apresentam elevada umidade e em consequência disso, desagregam bastante durante o corte com serra circular, o que pode gerar elevado coeficiente de variação. A Figura 144, demonstra algumas das amostras que foram cortadas após 2 horas de cura.

**Figura 144 - Amostras após 2 horas de cura ambiente.**



Fonte: Autor (2024).

Portanto, visando-se reduzir a desagregação das amostras, reduzir o coeficiente de variação e padronizar o tempo de cura inicial, optou-se por trabalhar com 3 horas de cura ambiente inicial, por este tempo ser uma média entre as horas analisadas.

- **3 hs cura ambiente + 4 hs cura carbônica**

**6.2.10 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS BR 4 E BR 16 SUBMETIDAS ÀS CURAS 3A+4C E REFERÊNCIA, AOS 02, 07 E 28 DIAS**

- **AMOSTRAS BR 4**

Os resultados de resistência à compressão axial das amostras dos blocos BR 4 foram apresentados na Tabela 68, a seguir.

**Tabela 68 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 4, submetidas às curas 3a+4c e referência.**

Resistência à compressão axial (MPa) - Amostras dos Blocos BR 4						
Idade	02 dias		07 dias		28 dias	
	3a+4c	Referência	3a+4c	Referência	3a+4c	Referência
fam (MPa)	9,59	8,28	11,04	8,68	9,94	9,88
Desvio padrão	1,57	0,23	0,66	1,31	1,29	0,37
Coef. Variação (CV)	16,4%	2,73%	5,95%	15,05%	13,01%	3,70%

Com o objetivo de verificar se houve variância para a mesma idade e diferentes tipos de cura (3a+4c e referência), aos 02, 07 e 28 dias, realizou-se o teste estatístico ANOVA. Os resultados encontram-se na Tabela 69, Tabela 70 e Tabela 71, a seguir.

**Tabela 69 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 02 dias, considerando as curas 3a+4c e referência.**

ANOVA						
<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	2,561067	1	2,561067	<b>2,034099</b>	0,226955325	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	5,036267	4	1,259067			
Total	7,597333	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4 para as curas 3a+4c e referência, aos 02 dias.

**Tabela 70 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 07 dias, considerando as curas 3a+4c e referência.**

ANOVA						
<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	8,378017	1	8,378017	<b>7,837124</b>	0,048837109	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	4,276067	4	1,069017			
Total	12,65408	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4 para as curas 3a+4c e referência, aos 07 dias. Sendo, os valores de resistência à compressão axial das amostras BR 4 - 3a+4c, maiores que os das amostras referenciais.

**Tabela 71 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 28 dias, considerando as curas 3a+4c e referência.**

ANOVA						
<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	0,009633	1	0,009633	<b>0,01068</b>	0,919732415	<b>4,964603</b>
Dentro dos grupos	9,019833	10	0,901983			
Total	9,029467	11				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4 para as curas 3a+4c e referência, aos 28 dias.

- **AMOSTRAS BR 16**

A Tabela 72, a seguir, apresenta os resultados de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias, das amostras dos blocos com 16 MPa, após as curas: ambiente (ca) durante 3 hs + carbônica (c) durante 4hs e referenciais.

**Tabela 72 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 16, submetidas às curas 3a+4c e referência.**

Resistência à compressão axial (MPa) - Amostras dos Blocos BR 16						
Idade	02 dias		07 dias		28 dias	
Cura	3a+4c	Referência	3a+4c	Referência	3a+4c	Referência
fam (MPa)	25,31	25,99	25,63	25,68	28,59	32,86
Desvio padrão	3,51	3,19	3,98	3,76	1,87	2,46
Coef. Variação (CV)	13,9%	12,26%	15,51%	14,63%	6,5%	7,48%

Com o objetivo de verificar se houve variância para a mesma idade e diferentes tipos de cura (3a+4c e referência), aos 02, 07 e 28 dias, realizou-se o teste estatístico ANOVA. Os resultados encontram-se na Tabela 73, Tabela 74 e Tabela 75, a seguir.

**Tabela 73 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 02 dias, considerando as curas 3a+4c e referência.**

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,6868167	1	0,686817	<b>0,061148</b>	0,81686462	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	44,928267	4	11,23207			
Total	45,615083	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 16 para as curas 3a+4c e referência, aos 02 dias.

A Tabela 74 a seguir, apresenta o teste estatístico ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 dias, considerando as curas 3a+4c e referência.

**Tabela 74 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 dias, considerando as curas 3a+4c e referência.**

ANOVA						
<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	0,0028167	1	0,002817	<b>0,000188</b>	0,98970966	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	59,844533	4	14,96113			
Total	59,84735	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 16 para as curas 3a+4c e referência, aos 07 dias.

A Tabela 75 a seguir, apresenta o teste estatístico ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 3a+4c e referência.

**Tabela 75 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 3a+4c e referência.**

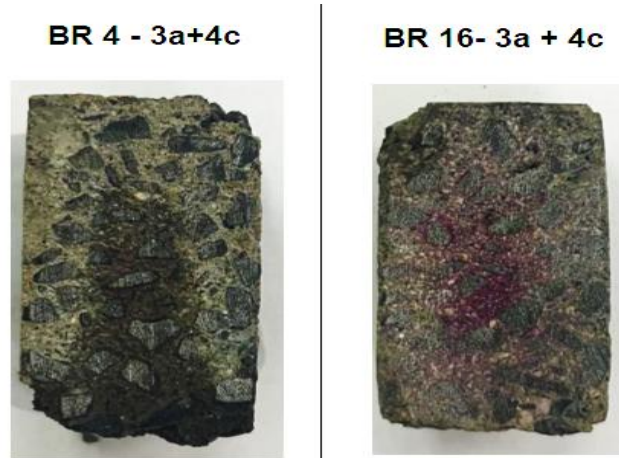
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	54,826875	1	54,82688	<b>11,48702</b>	0,006894517	<b>4,964603</b>
Dentro dos grupos	47,729417	10	4,772942			
Total	102,55629	11				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre as resistências à compressão das amostras dos blocos BR 16, submetidas às curas 3a+4c e referência, aos 28 dias. Logo, as amostras referenciais apresentaram maior resistência à compressão que as carbonatadas.

#### **6.2.12 VERIFICAÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO COM FENOLFTALEÍNA**

A Figura 145, abaixo, demonstra que a amostra BR 4 carbonatou por completo, enquanto que a BR 16 não. Na Figura 146, foi mensurado o avanço da frente de carbonatação na amostra BR 16 – 3a+4c.

**Figura 145 - Amostras BR 4 e BR 16, após aspersão de fenolftaleína.**



Fonte: Autor (2024).

**Figura 146 - Mensuração do avanço da frente de carbonatação na amostra BR 16 – 3a+4c.**

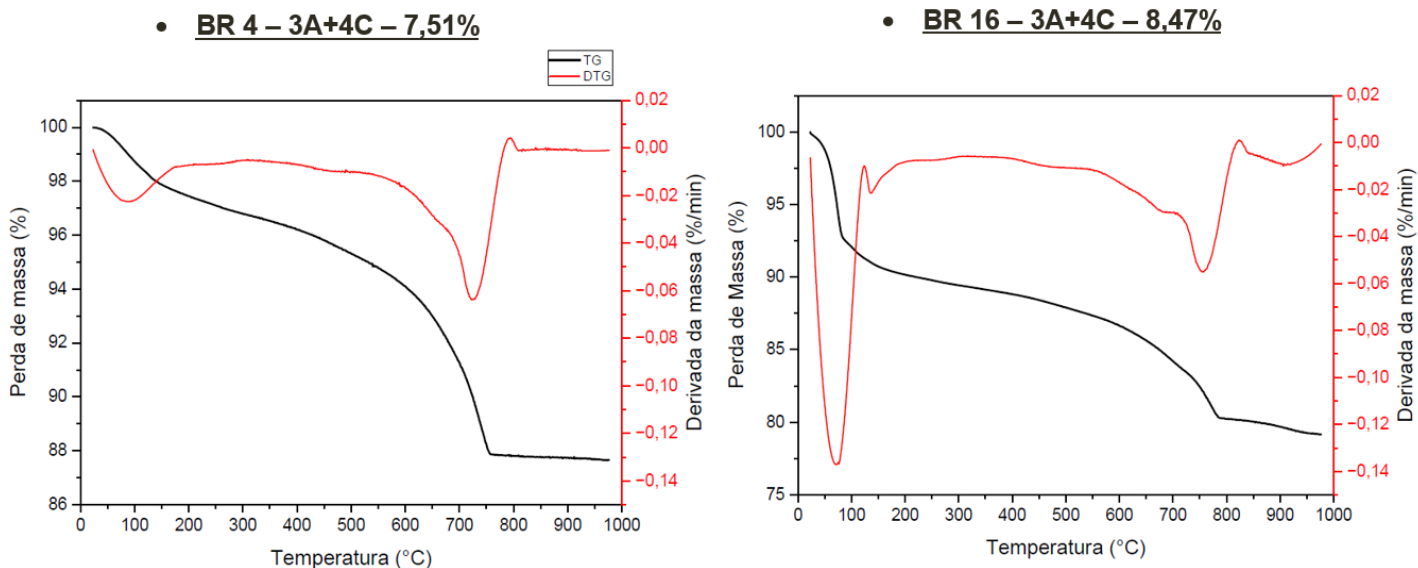


Fonte: Autor (2024).

### 6.2.13 ENSAIOS TERMOGRAVIMÉTRICOS

Após as curas carbônicas durante 3 horas as amostras dos blocos BR 4 e BR 16, foram submetidas aos ensaios de termogravimetria e os gráficos serão apresentados a seguir, na Figura 147.

**Figura 147 - TG/DTG – amostras BR 4 - 3a+4c e BR 16 - 3a+4c.**



Fonte: Autor (2024).

Para verificação do percentual de CO<sub>2</sub> realmente capturado, deve-se subtrair do percentual de CO<sub>2</sub> verificado após a cura carbônica, a quantidade de carbonato inicial da amostra, equivalente ao CO<sub>2</sub> já presente nela (item 6.2.3 (a)). Os resultados foram apresentados na Tabela 76, a seguir.

**Tabela 76 - Resultados de captura de CO<sub>2</sub> pelo ensaio de termogravimetria para amostras BR 4 – 3a+4c e BR 16 – 3a+4c.**

Captura de CO <sub>2</sub> (%) - TG/DTG		
Cura	3a+4c	
Amostra	BR 4	BR 16
CO <sub>2</sub> (%)	5,71	6,52

### 6.2.14 CONCLUSÕES PARCIAIS

- Quanto a resistência à compressão axial:

As amostras BR 4 (3a+4c e referência) aos 02 e 28 dias, após análise estatística dos resultados, não apresentaram diferença significativa entre si. No entanto, verificou-se uma

tendência das amostras BR4 - 3a+4c, apresentarem maior resistência que as referenciais nessas idades. Já, aos 07 dias, foi constatado através do teste estatístico ANOVA que a resistência das amostras BR4 – 3a+4c foi superior que às referenciais.

As amostras BR 16 (3a+4c e referência) aos 02 e 07 dias apresentaram resistência à compressão sem diferença significativa entre si, porém verificou-se uma tendência das amostras BR 16 referenciais apresentarem maior resistência à compressão axial. Aos 28 dias, verificou-se que houve diferença significativa entre as resistências das amostras BR 16 (3a+4c e referência), sendo a resistência das referenciais superiores às carbonatadas.

Portanto, para as amostras BR 4, a cura com CO<sub>2</sub> durante 4hs não prejudicou, nem favoreceu a resistência, pois as amostras carbonatadas e referenciais apresentaram resistências equivalentes. Já, para as amostras BR 16, verificou-se que as amostras referenciais apresentaram melhores valores de resistência à compressão que as carbonatadas.

- Quanto a captura de CO<sub>2</sub>:

Segundo o ensaio de termogravimetria as amostras BR 4 - 3a+4c, capturaram 5,71% de CO<sub>2</sub> e carbonataram por completo (ensaio de aspersão de fenolftaleína), enquanto que as amostras BR 16 - 3a+4c, capturaram 6,52% (termogravimetria) e avanço da frente de carbonatação de 12,45 mm (aspersão de fenolftaleína). Aqui fica claro que o maior avanço da frente de carbonatação não significa, necessariamente, maior captura de carbono, já que BR 16 – 4a+2c, absorveu 7,20% e teve uma frente de carbonatação de 3,27mm. Ocorre que só é possível evidenciar, calcular a captura de carbono, pelo ensaio de termogravimetria (quantitativo), a fenolftaleína é um ensaio apenas qualitativo (NEVES JUNIOR, 2014).

- **3hs cura ambiente + 8 hs cura carbônica**

#### **6.2.15 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS BR 4 E BR 16 SUBMETIDAS ÀS CURAS 3A+8C E REFERÊNCIA, AOS 02, 07 E 28 DIAS**

- **AMOSTRAS BR 4**

Os resultados de *resistência à compressão axial* das amostras dos blocos BR4 foram apresentados na Tabela 77, a seguir.

**Tabela 77 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 4, submetidas às curas 3a+8c e referência.**

Resistência à compressão axial (MPa) - Amostras dos Blocos BR 4						
Idade	02 dias		07 dias		28 dias	
Cura	3a+8c	Referência	3a+8c	Referência	3a+8c	Referência
fam (MPa)	9,61	11,72	7,77	9,4	7,68	10,59
Desvio padrão	0,99	1,94	0,13	1,18	0,56	1,04
Coef. Variação (CV)	10,26%	16,51%	1,61%	12,57%	7,23%	9,83%

Com o objetivo de verificar se houve variância para a mesma idade e diferentes tipos de cura (3a+8c e referência), aos 02, 07 e 28 dias, realizou-se o teste estatístico ANOVA. Os resultados encontram-se nas Tabela 78 a Tabela 80, a seguir.

**Tabela 78 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 02 dias, considerando as curas 3a+8c e referência.**

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	6,699267	1	6,699267	<b>2,840157</b>	0,167216649	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	9,435067	4	2,358767			
Total	16,13433	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4 para as curas 3a+8c e referência, aos 02 dias.

**Tabela 79 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 07 dias, considerando as curas 3a+8c e referência.**

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,98535	1	3,98535	<b>5,646305</b>	0,076304476	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	2,823333	4	0,705833			
Total	6,808683	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4 para as 3a+8c e referência, aos 07 dias.

**Tabela 80 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 28 dias, considerando as curas 3a+8c e referência.**

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	25,37521	1	25,37521	<b>36,5075</b>	0,000124904	<b>4,964603</b>
Dentro dos grupos	6,950683	10	0,695068			
Total	32,32589	11				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4 carbonatadas e referenciais, aos 28 dias. Sendo as resistências das amostras referenciais superiores às das carbonatadas.

Portanto, verificou-se a tendência das amostras BR4 referenciais apresentarem maiores resistências que as carbonatadas aos 02 e 07 dias, e aos 28 dias essa tendência foi constatada através do teste estatístico ANOVA.

- **AMOSTRAS BR 16**

A Tabela 81, a seguir, apresenta os resultados de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias, das amostras dos blocos com 16 MPa, após as curas ambiente (ca) durante 3hs + carbônica (c) durante 8hs e referenciais.

**Tabela 81 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 16, submetidas às curas 3a+8c e referência.**

Resistência à compressão axial (MPa) - Amostras dos Blocos BR 16						
Idade	02 dias		07 dias		28 dias	
	3a+8c	Referência	3a+8c	Referência	3a+8c	Referência
<b>fam (MPa)</b>	32,39	36,56	22,77	25,79	38,74	34,76
<b>Desvio padrão</b>	4,63	4,33	4,94	4,95	6,84	2,00
<b>Coef. Variação (CV)</b>	14,30%	11,84%	21,70%	19,20%	17,66%	5,74%

Com o objetivo de verificar se houve variância para a mesma idade e diferentes tipos de curas (3a+8c e referência), aos 02, 07 e 28 dias, realizou-se o teste estatístico ANOVA. Os resultados encontram-se nas Tabela 82 a Tabela 84, a seguir.

**Tabela 82 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 02 dias, considerando as curas 3a+8c e referência.**

ANOVA						
<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	26,08335	1	26,08335	<b>1,298267</b>	0,318130942	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	80,3636	4	20,0909			
Total	106,447	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre as resistências à compressão das amostras dos blocos BR 16, submetidas aos diferentes tipos de cura 3a+8c e referência, aos 02 dias.

A Tabela 83 a seguir, apresenta o teste estatístico ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 dias, considerando as curas 3a+8c e referência.

**Tabela 83 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 dias, considerando as curas 3a+8c e referência.**

ANOVA						
<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	13,74107	1	13,74107	<b>0,561723</b>	0,495239019	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	97,84933	4	24,46233			
Total	111,5904	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre as resistências à compressão das amostras dos blocos BR 16, submetidas aos diferentes tipos de cura 3a+8c e referência, aos 07 dias.

A Tabela 84 a seguir, apresenta o teste estatístico ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 3a+8c e referência.

**Tabela 84 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 3a+8c e referência.**

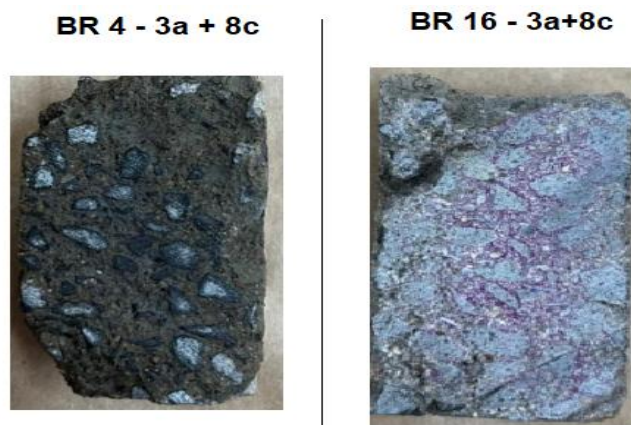
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	47,44163	1	47,44163	<b>1,51975</b>	0,245852494	<b>4,964603</b>
Dentro dos grupos	312,1673	10	31,21673			
Total	359,609	11				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 16 para as curas 3a+8c e referência, aos 28 dias. Contudo, verifica-se uma tendência das amostras carbonatadas apresentarem maior resistência aos 28 dias.

#### 6.2.16 VERIFICAÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO COM FENOLFTALEÍNA

A Figura 148 abaixo, demonstra que a amostra BR 4 carbonatou por completo, enquanto que a BR 16 não. Na Figura 149, foi mensurado o avanço da frente de carbonatação na amostra BR 16 – 3a+8c.

**Figura 148 - Amostras BR 4 e BR 16, após aspensão de fenolftaleína.**



Fonte: Autor (2024).

**Figura 149 - Mensuração do avanço da frente de carbonatação na amostra BR 16 – 3a+8c.**



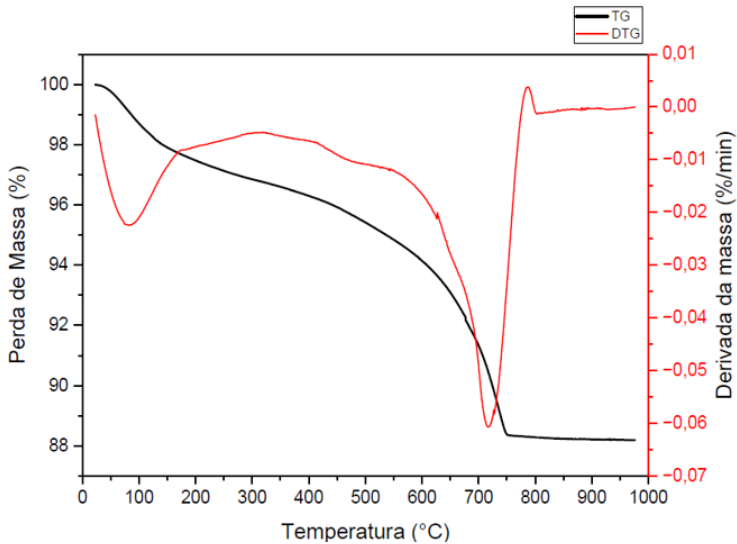
Fonte: Autor (2024).

### 6.2.17 ENSAIOS TERMOGRAVIMÉTRICOS

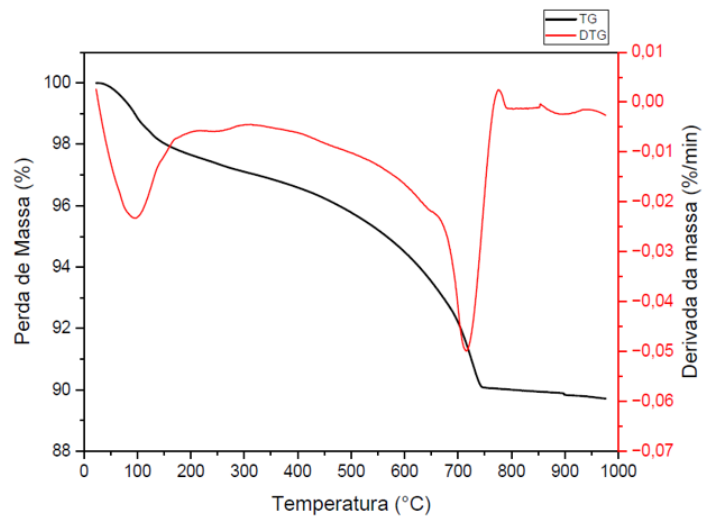
Após as curas carbônicas durante 3 horas as amostras dos blocos BR 4 e BR 16, foram submetidas aos ensaios de termogravimetria e os gráficos estão contidos na Figura 150, a seguir.

**Figura 150 - TG/DTG – amostras BR 4 - 3a+8c e BR 16 - 3a+8c.**

• **BR 4 – 3A+8C – 7,03%**



• **BR 16 – 3A+8C – 5,88%**



Fonte: Autor (2024).

Para verificação do percentual de CO<sub>2</sub> realmente capturado, deve-se subtrair do percentual de CO<sub>2</sub> verificado após a cura carbônica, a quantidade de carbonato inicial da amostra, equivalente ao CO<sub>2</sub> já presente nela (item 6.2.3 (a)). Os resultados foram apresentados na Tabela 85, a seguir.

**Tabela 85 - Resultados de captura de CO<sub>2</sub> pelo ensaio de termogravimetria para amostras BR 4 e BR 16 - 3a+8c.**

Captura de CO <sub>2</sub> (%) - TG/DTG		
Cura	3a+8c	
Amostra	BR 4	BR 16
CO <sub>2</sub> (%)	5,23	3,93

### 6.2.18 CONCLUSÕES PARCIAIS

- Quanto a resistência à compressão axial:

As amostras BR 4 (3a+8c e referenciais) aos 02 e 07 dias, após análise estatística dos resultados, não apresentaram diferença significativa entre si. No entanto, aos 28 dias verificou-se uma tendência das amostras BR4 referenciais apresentarem uma maior resistência que as demais (3a+8c).

Já as amostras BR 16 carbonatadas (3a+8c) e referenciais apresentaram resistência à compressão sem diferença significativa entre si para todas as idades; porém, verificou-se a tendência das amostras carbonatadas apresentarem maior resistência que as referenciais aos 28 dias.

Portanto, a cura carbônica durante 8 horas, promoveu melhores valores de resistência à compressão para as amostras BR 4 referenciais do que para as carbonatadas. E para as amostras BR 16, a cura carbônica durante 8 horas, não promoveu diferença significativa entre os valores de resistência à compressão tanto para as amostras carbonatadas, como referenciais. No entanto, verifica-se uma tendência das amostras carbonatadas apresentarem melhores valores de resistência à compressão, aos 28 dias.

- Quanto a captura de CO<sub>2</sub>:

Segundo o ensaio de termogravimetria as amostras BR 4 - 3a+4c, capturaram 5,23% de CO<sub>2</sub> e carbonataram por completo (ensaio de aspersão de fenolftaleína), enquanto que as amostras BR 16 - 3a+4c, capturaram 3,93% (termogravimetria) e avanço da frente de carbonatação de 4,68 mm (aspersão de fenolftaleína).

- **3 hs cura ambiente + 16 hs cura carbônica**

#### **6.2.19 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS BR 4 E BR 16 SUBMETIDAS ÀS CURAS 3A+16C E REFERÊNCIA, AOS 02, 07 E 28 DIAS**

- **AMOSTRAS BR 4**

Os resultados de *resistência à compressão axial* das amostras dos blocos BR4 foram apresentados na Tabela 86, a seguir.

**Tabela 86 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 4, submetidas às curas 3a+16c e referência.**

Resistência à compressão axial (MPa) - Amostras dos Blocos BR 4						
Idade	02 dias		07 dias		28 dias	
	3a+16c	Referência	3a+16c	Referência	3a+16c	Referência
fam (MPa)	7,19	7,08	9,9	10,97	8,06	9,39
Desvio padrão	0,86	0,9	0,63	1,09	0,91	0,42
Coef. Variação (CV)	11,98%	12,66%	6,32%	9,90%	11,30%	4,48%

Com o objetivo de verificar se houve variância para a mesma idade e diferentes tipos de cura (3a+16c e referência), aos 02, 07 e 28 dias, realizou-se o teste estatístico ANOVA. Os resultados encontram-se nas Tabela 87 a Tabela 89, a seguir.

**Tabela 87 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 02 dias, considerando as curas 3a+16c e referência.**

ANOVA

<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	0,0192667	1	0,019267	<b>0,024927</b>	0,882198258	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	3,0916667	4	0,772917			
Total	3,1109333	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4 para as 3a+16c e referência, aos 02 dias.

**Tabela 88 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 07 dias, considerando as curas 3a+16c e referência.**

ANOVA

<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	1,7388167	1	1,738817	<b>2,215523</b>	0,210854922	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	3,1393333	4	0,784833			
Total	4,87815	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4 para as 3a+16c e referência, aos 07 dias.

**Tabela 89 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4 aos 28 dias, considerando as curas 3a+16c e referência.**

ANOVA

<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	5,2934083	1	5,293408	<b>1,405254</b>	0,263250528	<b>4,964603</b>
Dentro dos grupos	37,668683	10	3,766868			
Total	42,962092	11				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4 para as curas 3a+16c e referência, aos 28 dias.

- **AMOSTRAS BR 16**

A Tabela 90, a seguir, apresenta os resultados de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias, das amostras dos blocos com 16 MPa, após as curas ambiente (ca) durante 3hs + carbônica (c) durante 16hs e referenciais.

**Tabela 90 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras dos blocos BR 16, submetidas às curas 3a+16c e referência.**

Resistência à compressão axial (MPa) - Amostras dos Blocos BR 16						
Idade	02 dias		07 dias		28 dias	
Cura	3a+16c	Referência	3a+16c	Referência	3a+16c	Referência
<b>fam (MPa)</b>	28,87	21,47	35,88	34,01	31,08	28,76
<b>Desvio padrão</b>	2,15	2,66	5,75	3,40	4,72	3,83
<b>Coef. Variação (CV)</b>	7,46%	12,39%	16,04%	10,01%	15,20%	13,33%

Com o objetivo de verificar se houve variância para a mesma idade e diferentes tipos de cura (3a+16c e referência), aos 02, 07 e 28 dias, realizou-se o teste estatístico ANOVA. Os resultados encontram-se nas Tabela 91 a Tabela 93, a seguir.

**Tabela 91 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 02 dias, considerando as curas 3a+16c e referência.**

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	82,21401667	1	82,21402	<b>14,04008</b>	0,019999	<b>7,708647422</b>
Dentro dos grupos	23,42266667	4	5,855667			
Total	105,6366833	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que há diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4 para as curas 3a+16c e referência, aos 02 dias.

A Tabela 92 a seguir, apresenta o teste estatístico ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 dias, considerando as curas 3a+16c e referência.

**Tabela 92 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 dias, considerando as curas 3a+16c e referência.**

ANOVA						
<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	5,264066667	1	5,264067	<b>0,23555</b>	0,652823	<b>7,708647422</b>
Dentro dos grupos	89,39206667	4	22,34802			
Total	94,65613333	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4 para as curas 3a+16c e referência, aos 07 dias.

A Tabela 93 a seguir, apresenta o teste estatístico ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 28 dias, considerando curas 3a+16c e referência.

**Tabela 93 - ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 3a+16c e referência.**

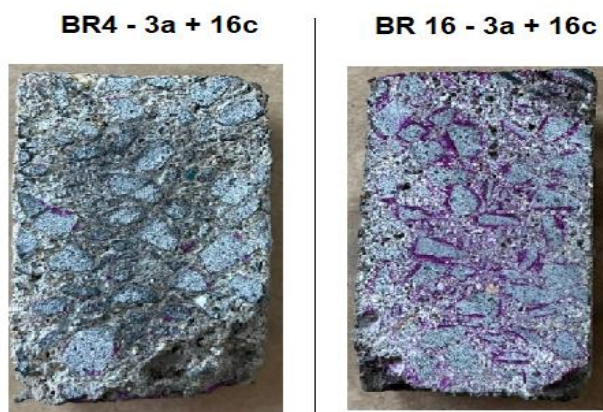
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	16,17040833	1	16,17041	<b>0,714448</b>	0,417736	<b>4,964602744</b>
Dentro dos grupos	226,3342833	10	22,63343			
Total	242,5046917	11				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não há diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 16 para as curas 3a+16c e referência, aos 28 dias.

#### **6.2.20 VERIFICAÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO COM FENOLFTALEÍNA**

A Figura 151 abaixo, demonstra que a amostra BR 4 carbonatou por completo, enquanto que a BR 16 não. Na Figura 152, foi mensurado o avanço da frente de carbonatação na amostra BR 16 – 3a+16c.

**Figura 151 - Amostras BR 4 e BR 16, após aspersão de fenolftaleína.**



Fonte: Autor (2024).

**Figura 152 - Mensuração do avanço da frente de carbonatação na amostra BR 16 – 3a+16c.**

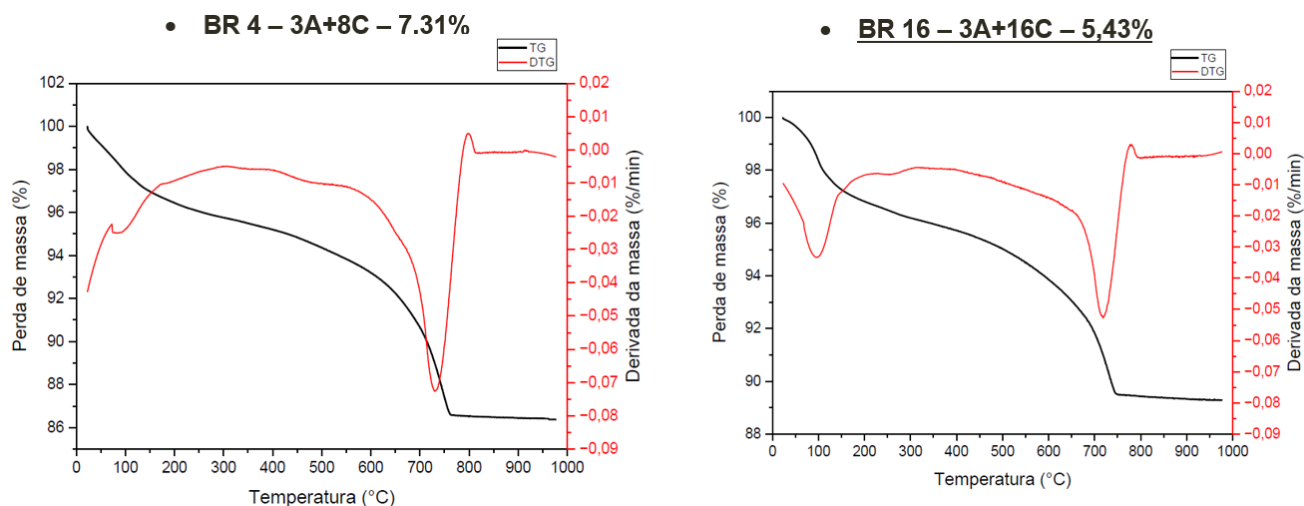


Fonte: Autor (2024).

### **6.2.21 ENSAIOS TERMOGRAVIMÉTRICOS**

Após as curas carbônicas durante 3 horas as amostras dos blocos BR 4 e BR 16, foram submetidas aos ensaios de termogravimetria e os gráficos estão contidos na Figura 153, a seguir.

**Figura 153 - TG/DTG – amostras BR 4 - 3a+16c e BR 16 - 3a+16c.**



Fonte: Autor (2024).

Para verificação do percentual de CO<sub>2</sub> realmente capturado, deve-se subtrair do percentual de CO<sub>2</sub> verificado após a cura carbônica, o percentual de CO<sub>2</sub> inicial (item 6.2.3 (a)). Os resultados foram apresentados na Tabela 94, a seguir.

**Tabela 94 - Resultados de captura de CO<sub>2</sub> pelo ensaio de termogravimetria para amostras BR 4 e BR 16 - 3a+8c.**

Captura de CO <sub>2</sub> (%) - TG/DTG		
Cura	3a+16c	
Amostra	BR 4	BR 16
CO <sub>2</sub> (%)	5,51	3,48

### 6.2.22 CONCLUSÕES PARCIAIS

- Quanto a resistência à compressão axial:

As amostras BR 4 (3a+16c e referência) aos 02, 07 e 28 dias, após análise estatística dos resultados, não apresentaram diferença significativa entre si. No entanto, aos 28 dias verificou-se uma tendência das amostras referenciais apresentarem maior resistência que as carbonatadas.

Já as amostras BR 16 carbonatadas e referenciais, aos 02 dias apresentaram diferença significativa entre si, já aos 07 e 28 dias; não apresentaram diferença significativa. Porém, aos 28 dias, verificou-se uma tendência das amostras carbonatadas apresentarem maior resistência que as referenciais.

- Quanto a captura de CO<sub>2</sub>:

Segundo o ensaio de termogravimetria as amostras BR 4 - 3a+4c, capturaram 5,51% de CO<sub>2</sub> e carbonataram por completo (ensaio de aspensão de fenolftaleína), enquanto que as amostras BR 16 - 3a+4c, capturaram 3,48% (termogravimetria) e avanço da frente de carbonatação de 1,30 mm (aspensão de fenolftaleína).

### 6.2.23 DEFINIÇÃO DA MELHOR CONDIÇÃO DE CURA

- Ganho de Resistência Mecânica

Para as amostras BR4, a análise do ganho de resistência, considerando as diferentes curas analisadas demonstrou que, em geral, as amostras carbonatadas e referenciais apresentaram ganho de resistência equivalentes em todas as idades. Sendo que, ocorreu diferença significativa aos 28 dias apenas para a cura 3a+8c, em que a amostra referencial demonstrou um ganho de resistência superior à carbonatada.

Para as amostras BR16, a análise do ganho de resistência, considerando as diferentes curas analisadas demonstrou que, em geral, as amostras carbonatadas e referenciais apresentaram ganho de resistência equivalentes em todas as idades. Sendo que, ocorreu diferença significativa aos 28 dias apenas para a cura 3a+4c, em que as amostras referenciais demonstraram ganho de resistência superior às carbonatadas.

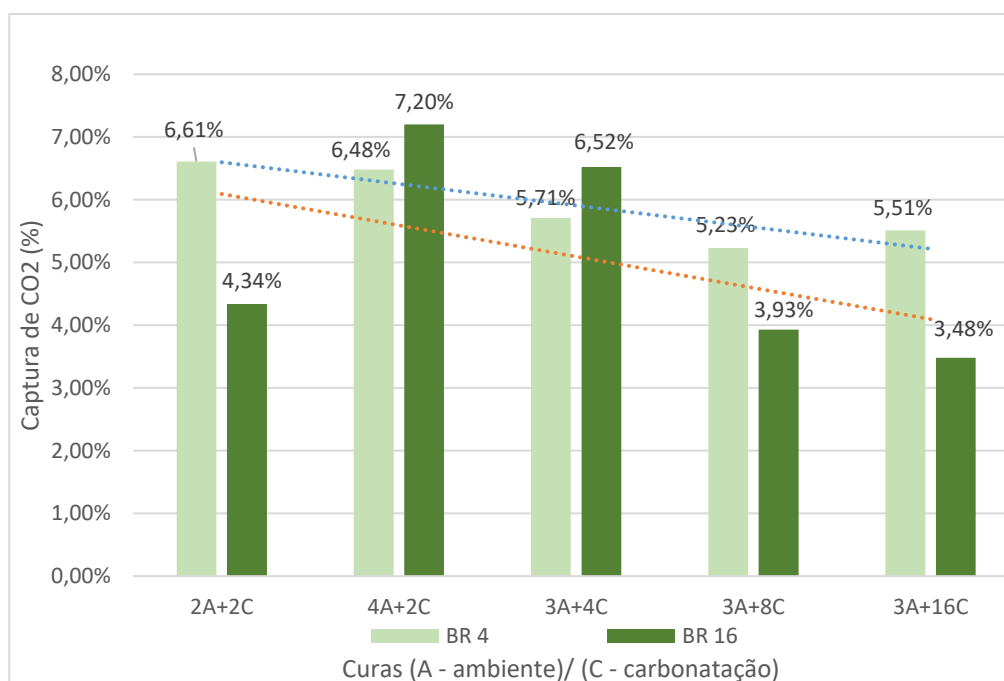
- Captura de CO<sub>2</sub>

Todos os resultados obtidos por meio dos ensaios de termogravimetria foram inseridos na Tabela 95 e no gráfico da Figura 154 a seguir.

**Tabela 95 - Resultados de captura de CO<sub>2</sub> para todas as curas analisadas.**

Cura	Captura de CO <sub>2</sub> (%) - TG/DTG									
	2a+2c		4a+2c		3a+4c		3a+8c		3a+16c	
Amostra	BR 4	BR 16	BR 4	BR 16	BR 4	BR 16	BR 4	BR 16	BR 4	BR 16
CO <sub>2</sub> (%)	6,61%	4,34%	6,48%	7,20%	5,71%	6,52%	5,23%	3,93%	5,51%	3,48%

**Figura 154 - Captura de CO<sub>2</sub> verificada para os diferentes tipos de cura para as amostras BR 4 e 16.**



Fonte: Autor (2024).

As Tabela 96 e Tabela 97 trazem um compilado dos resultados para as amostras BR4 e BR 16.

**Tabela 96 - Resumo dos itens analisados para as amostras BR 4: resistência à compressão, frente de carbonatação e captura de CO<sub>2</sub>.**

Resistência à compressão axial - BR 4				Frente de carbonatação	Captura CO <sub>2</sub>
Curas	Idades				
	02 dias	07 dias	28 dias		
2a+2c	equivalentes	REF ↑	equivalentes	total	6,61%
4a+2c	equivalentes	equivalentes	equivalentes	total	6,48%
3a+4c	equivalentes	3a+4c (↑)	equivalentes	total	5,71%
3a+8c	equivalentes	equivalentes	REF ↑	total	5,23%
3a+16c	equivalentes	equivalentes	equivalentes	total	5,51%

Equivalentes – não houve diferença significativa entre amostras carbonatadas e referenciais

REF ↑ - resistência à compressão axial superior para a amostra referência

3a+4c (↑) - resistência à compressão axial superior para a amostra carbonatada (3a+4c)

**Tabela 97 - Resumo dos itens analisados para as amostras BR 16: resistência à compressão, frente de carbonatação e captura de CO<sub>2</sub>.**

Curas	Resistência à compressão axial - BR 16			Frente de carbonatação	Captura CO <sub>2</sub>
	Idades				
	02 dias	07 dias	28 dias		
2a+2c	REF ↑	equivalentes	equivalentes	0,88 mm	4,34%
4a+2c	REF ↑	REF ↑	equivalentes	3,27 mm	7,20%
3a+4c	equivalentes	equivalentes	REF ↑	12,46 mm	6,52%
3a+8c	equivalentes	equivalentes	equivalentes	4,68 mm	3,93%
3a+16c	equivalentes	equivalentes	equivalentes	1,30 mm	3,48%

Equivalentes – não houve diferença significativa entre amostras carbonatadas e referenciais  
 REF ↑ - resistência à compressão axial superior para a amostra referência

Através da Tabela 97 foi possível evidenciar que o maior avanço da frente de carbonatação (12,46 mm), não significa, necessariamente, maior captura de carbono (6,52%), assim como, o menor avanço (0,88 mm), não significa menor captura (4,34%). Contudo, só é possível evidenciar, calcular a captura de carbono, pelo ensaio de termogravimetria (quantitativo), sendo a fenolftaleína apenas um ensaio qualitativo (NEVES JUNIOR, 2014).

Todavia, durante a cura carbônica, os efeitos se sobrepõem, pois ocorrem ao mesmo tempo as reações de hidratação, evaporação e carbonatação. Tais eventos não são isolados e sim, concomitantes. Para as amostras dos blocos BR4, com 02 horas de cura ambiente + 2 horas de cura com CO<sub>2</sub>, verificou-se que os hidratos formados foram suficientes para a máxima captura. Verificou-se que para as amostras BR4, os maiores tempos de cura inicial e cura carbônica, resultaram em capturas inferiores, possivelmente por conta da formação da barreira alcalina, que de início captura muito e depois pára de carbonatar. A mesma analogia pode ser empregada para as amostras BR 16.

Portanto, considerando a máxima captura de CO<sub>2</sub> e concomitante ganho de resistência mecânica, a melhor condição de cura para a amostra BR 4 foi 2a+2c, e para amostra BR 16 foi 4a+2c.

### 6.3 ENSAIOS TERMOGRAVIMÉTRICOS E ESTRUTURAIS – ETAPA 3

Os blocos e meio blocos com 4 e 16 MPa, foram submetidos a melhor condição de cura verificada na ETAPA 2, sendo BR 4 – 2a+2c e BR 16 – 4a+2c. Em seguida, foram ensaiados à resistência à compressão axial aos 28 dias; realizou-se também a aspersão com fenolftaleína para verificação da frente de carbonatação e TG/DTG para verificação do percentual de CO<sub>2</sub> capturado. Os resultados serão apresentados nos tópicos seguintes.

**6.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS BLOCOS E MEIOS BLOCOS BR 4 E BR 16 SUBMETIDOS ÀS CURAS BR 4 – 2A+2C, BR 16 – 4A+2C E REFERÊNCIA, AOS 28 DIAS**

- **BLOCOS E MEIOS BLOCOS BR 4**

Os resultados de resistência à compressão axial para os blocos e meios blocos BR4, considerando área líquida, foram apresentados na Tabela 98 a seguir.

**Tabela 98 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias para os blocos e meios blocos BR 4, submetidos às curas 2a+2c e referência.**

Resistência à compressão axial (MPa) - 28 dias				
CP n°	Bloco BR 4		Meio bloco BR 4	
	2a+2c	Referência	2a+2c	Referência
1	12,1	12,5	11,9	9,5
2	9,7	14,8	8,5	8,3
3	12,0	13,2	7,3	7,9
<b>Média</b>	<b>11,3</b>	<b>13,5</b>	<b>9,23</b>	<b>8,57</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1,4</b>	<b>1,2</b>	<b>2,4</b>	<b>0,8</b>
<b>Coef Variação</b>	<b>12%</b>	<b>9%</b>	<b>26%</b>	<b>10%</b>

Com o objetivo de verificar se houve variância para a mesma idade e diferentes tipos de cura (2a+2c e referência), realizou-se o teste estatístico ANOVA por pares. Os resultados encontram-se nas Tabela 99 e Tabela 100, a seguir.

**Tabela 99 - ANOVA para resistência à compressão axial dos blocos BR 4 aos 28 dias, considerando as curas 2a+2c e referência.**

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7,481666667	1	7,481667	<b>4,627835052</b>	0,097845	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	6,466666667	4	1,616667			
Total	13,94833333	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial para os blocos BR 4 submetidos às curas 2a+2c e referência, aos 28 dias.

**Tabela 100- ANOVA para resistência à compressão axial dos meios blocos BR 4 aos 28 dias, considerando as curas 2a+2c e referência.**

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,666667	1	0,666667	<b>0,208768</b>	0,671447	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	12,773333	4	3,193333			
Total	13,44	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial para os meios blocos BR 4 submetidos às curas 2a+2c e referência, aos 28 dias.

- **BLOCOS E MEIOS BLOCOS BR 16**

A Tabela 101, a seguir, apresenta os resultados de resistência à compressão axial considerando *área líquida*, aos 28 dias, dos blocos e meios blocos com 16 MPa, após as curas 4a+2c e referência.

**Tabela 101 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias para os blocos e meios blocos BR 16, submetidas às curas 4a+2c e referência.**

Resistência à compressão axial (MPa) - 28 dias				
CP n°	Blocos BR 16		Meios blocos BR 16	
	4a+2c	Referência	4a+2c	Referência
1	18,9	26	23,0	16,2
2	23,8	19,5	23,4	21,9
3	18,2	22	18,3	20,6
<b>Média</b>	<b>20,3</b>	<b>22,5</b>	<b>21,6</b>	<b>19,6</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>3,1</b>	<b>3,2</b>	<b>2,8</b>	<b>3,0</b>
<b>Coef Variação</b>	<b>15%</b>	<b>14%</b>	<b>13%</b>	<b>15%</b>

Com o objetivo de verificar se houve variância para a mesma idade e diferentes tipos de cura (4a+2c e referência), realizou-se o teste estatístico ANOVA por pares. Os resultados encontram-se nas Tabela 102 e Tabela 103, a seguir.

**Tabela 102 - ANOVA para resistência à compressão axial dos blocos BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 4a+2c e referência.**

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7,26	1	7,26	<b>0,723828514</b>	0,442823	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	40,12	4	10,03			
Total	47,38	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial para os blocos BR 16 submetidos às curas 4a+2c e referência, aos 28 dias.

**Tabela 103 - ANOVA para resistência à compressão axial dos meios blocos BR 16 aos 28 dias, considerando as curas 4a+2c e referência.**

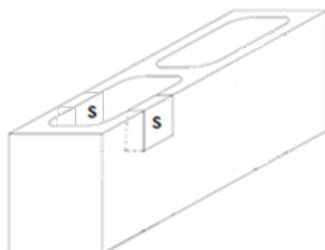
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	6	1	6	<b>0,707269</b>	0,447688	<b>7,708647</b>
Dentro dos grupos	33,93333	4	8,483333			
Total	39,93333	5				

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial para os meios blocos BR 16 submetidos às curas 4a+2c e referência, aos 28 dias.

### 6.3.2 VERIFICAÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO COM FENOLFTALEÍNA

Para os ensaios de aspensão de fenolftaleína e termogravimetria, após a cura carbônica dos blocos BR 4 e BR 16, retirou-se amostras com dimensão 5x5 cm, da região superior da parede longitudinal do bloco, empregando-se o mesmo critério utilizado em todas as etapas do programa experimental, conforme demonstra a Figura 155 e Figura 156, a seguir.

**Figura 155 - Local em que as amostras foram retiradas dos blocos após a cura carbônica.**



Fonte: Autor (2025).

- **BLOCOS BR 4**

A Figura 156 abaixo, demonstra as amostras BR 4 retiradas de 3 blocos BR4 – 2a+2c, após aspersão de fenolftaleína. Considerou-se que as amostras carbonataram por completo.

**Figura 156 - Amostras dos blocos BR 4 - 2a+2c, após aspersão de fenolftaleína.**



Fonte: Autor (2025).

- **BLOCOS BR 16**

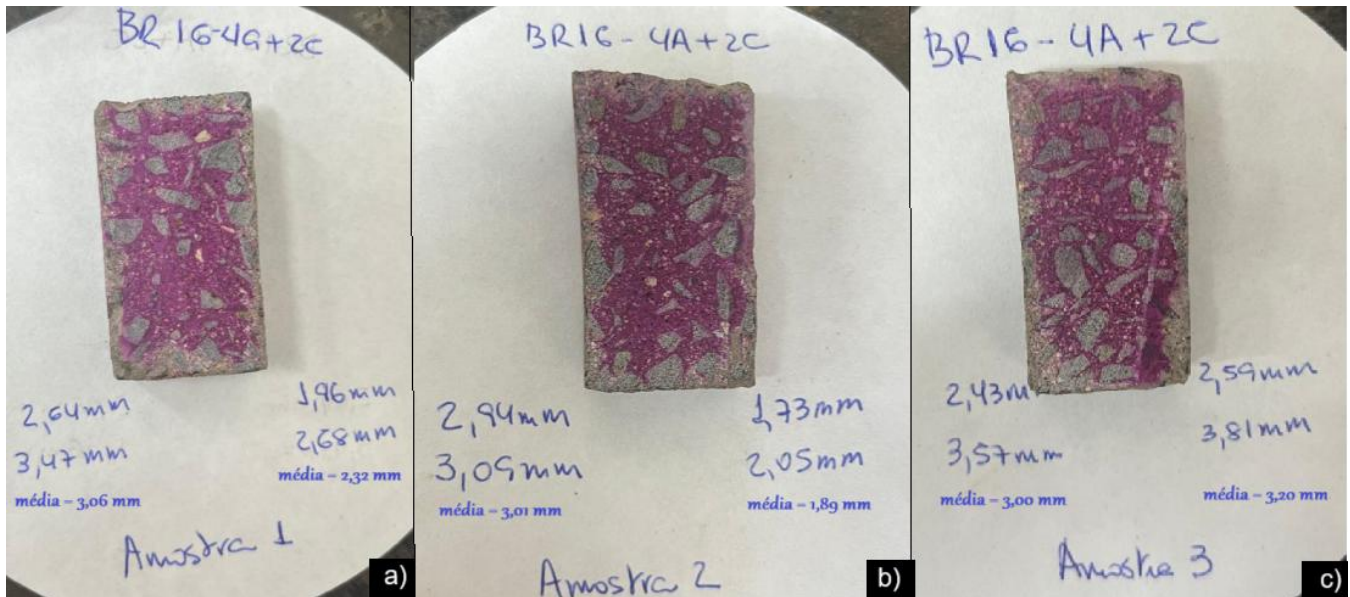
A Figura 157 abaixo, demonstra que as amostras BR 16 – 4a+2c carbonataram. Na Figura 158, foi mensurado o avanço da frente de carbonatação das amostras BR 16 – 4a+2c.

**Figura 157 - Amostras dos blocos BR 16 - 4a+2c, após aspersão de fenolftaleína.**



Fonte: Autor (2025).

Figura 158 - Mensuração do avanço da frente de carbonatação na amostra BR 16 – 4a+2c.



Fonte: Autor (2025).

Profundidade média: Amostra 1 = 2,69 mm; Amostra 2 = 2,45 mm e Amostra 3 = 3,10mm.

### 6.3.3 ENSAIOS TERMOGRAVIMÉTRICOS

Após as curas carbônicas, 02 amostras foram retiradas da região superior da parede longitudinal de 02 blocos BR 4 (sendo retirada uma amostra de cada bloco) e 02 amostras foram retiradas da região superior da parede longitudinal de 02 blocos BR 16 (sendo retirada uma amostra de cada bloco), também foram retiradas 02 amostras da região superior da parede longitudinal de 02 blocos BR 4 (sendo retirada uma amostra de cada bloco) e 02 amostras da região superior da parede longitudinal de 02 blocos BR 16 (sendo retirada uma amostra de cada bloco) - não carbonatados. Totalizando, 8 amostras. Todas as amostras foram submetidas aos ensaios de TG e DTG. Todas amostras foram retiradas do mesmo local em todas as etapas do programa experimental, ou seja, da região superior da parede longitudinal dos blocos. A Tabela 104 demonstra a quantidade de amostras e sua identificação.

**Tabela 104 - Quantidade e identificação das amostras.**

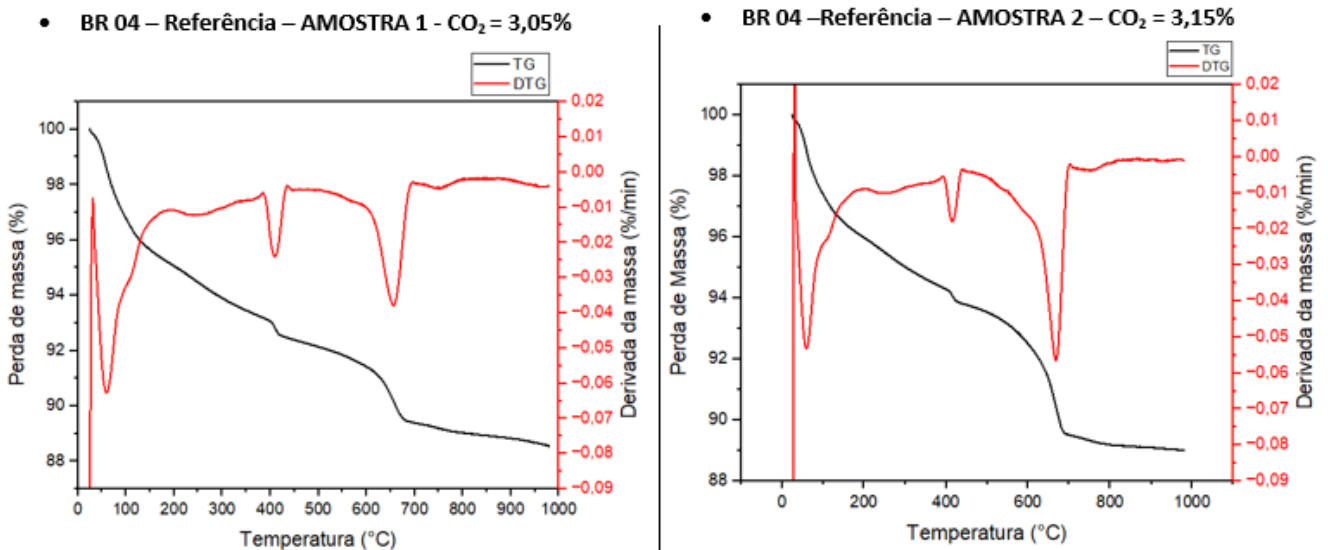
Amostra nº	Identificação
1	BR4 - Referência - 1
2	BR4 - Referência - 2
3	BR4 - 2a+2c - 1
4	BR4 - 2a+2c - 2
5	BR16 - Referência - 1
6	BR16 - Referência - 1
7	BR16 - 4a+2c - 1
8	BR16 - 4a+2c - 2

• **BLOCOS BR 04**

a) Antes da cura carbônica

Amostras dos blocos BR 4 foram submetidas aos ensaios de termogravimetria antes da cura carbônica, para verificação da quantidade de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) presente na composição química da amostra. Este valor obtido inicialmente, será excluído do valor obtido após o tratamento com  $\text{CO}_2$  para verificação do real percentual de captura de  $\text{CO}_2$ . Pois, de acordo com Possan (2019) e Neves Junior (2013) a diferença entre as perdas de massa dos compostos da amostra carbonatada e não carbonatada confere o montante de  $\text{CO}_2$  capturado na reação de carbonatação. A Figura 159, demonstra os gráficos de TG e DTG dos blocos BR 4 não carbonatados.

**Figura 159 - TG/DTG – Blocos BR 4 – não carbonatados.**



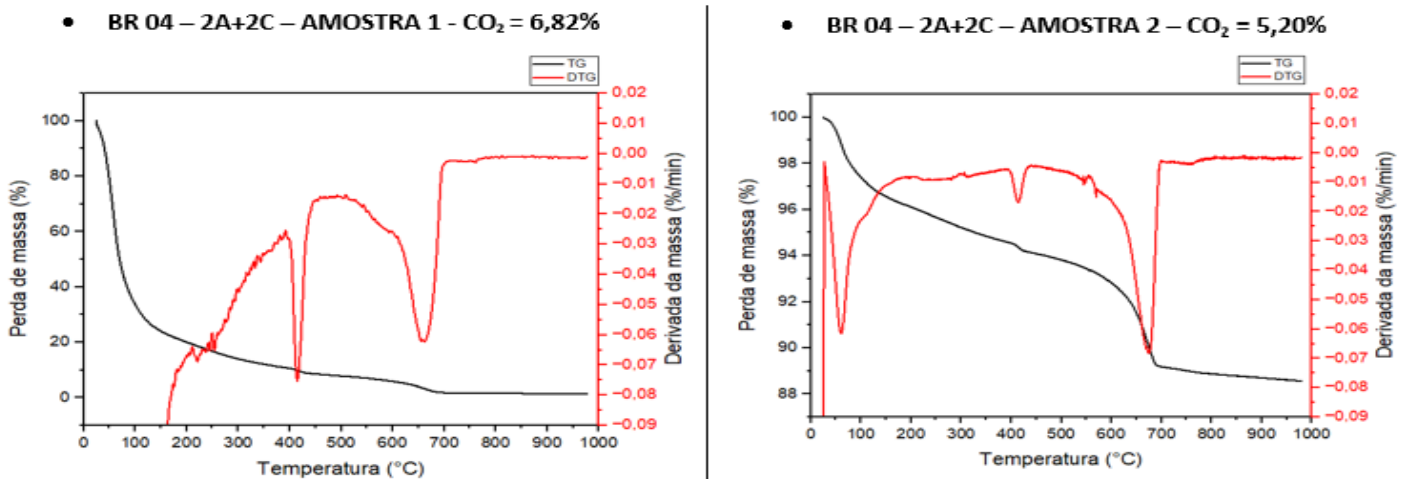
Fonte: Autor (2025).

Média da captura de  $\text{CO}_2$  (blocos BR 4 não carbonatados - referência) = 3,10%.

b) Depois da cura carbônica

Os blocos BR 4 - 2a+2c, foram submetidos a 2 horas de cura ambiente + 2 horas de cura carbônica. Após a cura com CO<sub>2</sub>, as amostras foram extraídas, preparadas utilizando-se o mesmo procedimento descrito no item 5.2.1, e submetidas aos ensaios de termogravimetria. Os gráficos foram apresentados na Figura 160, a seguir.

**Figura 160 - TG/DTG – Blocos BR 4 - 2a+2c.**



Fonte: Autor (2025).

Média da captura de CO<sub>2</sub> (blocos carbonatados - 2A+2C) = 6,01%.

Para verificação do percentual de CO<sub>2</sub> realmente capturado, deve-se subtrair do percentual de CO<sub>2</sub> verificado após a cura carbônica, o percentual de CO<sub>2</sub> inicial (capturado pela carbonatação natural). Os resultados foram apresentados na Tabela 105, a seguir.

**Tabela 105 - Resultados de captura de CO<sub>2</sub> pelo ensaio de termogravimetria para amostras BR 4 - 2a+2c.**

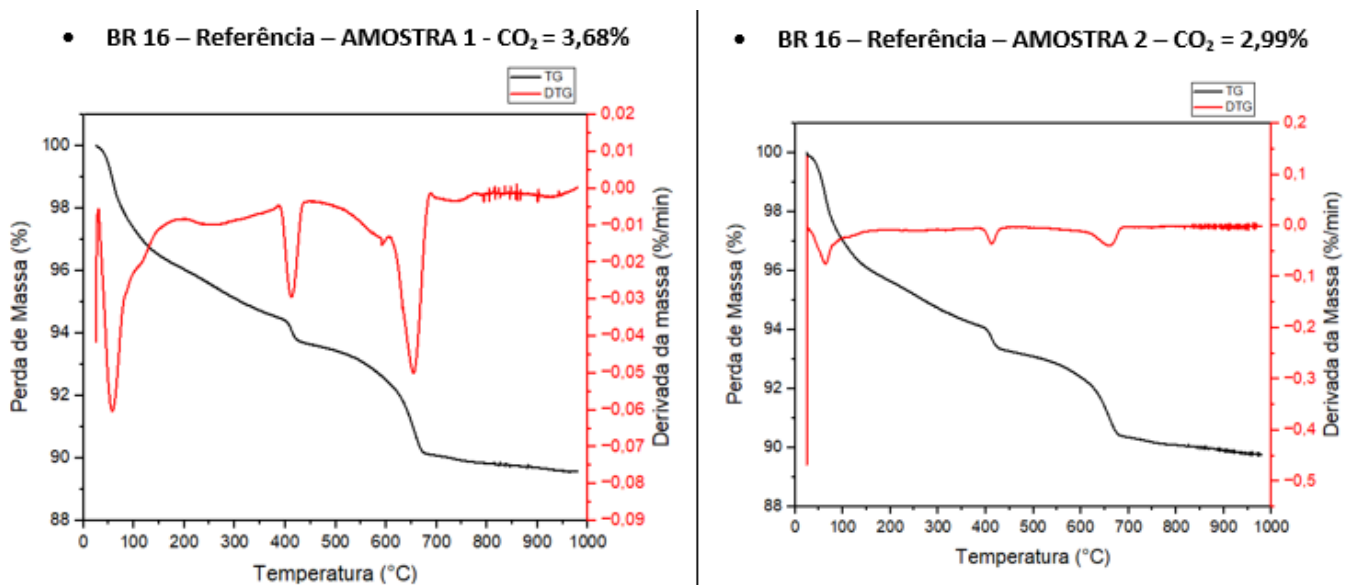
Captura de CO <sub>2</sub> (%) - TG/DTG	
Cura	2a+2c
Amostra	BR 4
CO <sub>2</sub> (%)	2,91

- **BLOCOS BR 16**

- a) Antes da cura carbônica

Amostras dos blocos BR 16 foram submetidas aos ensaios de termogravimetria antes da cura carbônica, para verificação da quantidade de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) presente na composição química da amostra. Este valor obtido inicialmente, será excluído do valor obtido após o tratamento de cura carbônica para verificação do real percentual de captura de  $\text{CO}_2$ . A Figura 161 demonstra os gráficos de TG e DTG dos blocos BR 4 não carbonatados.

**Figura 161 - TG/DTG – Blocos BR 16 – não carbonatados.**



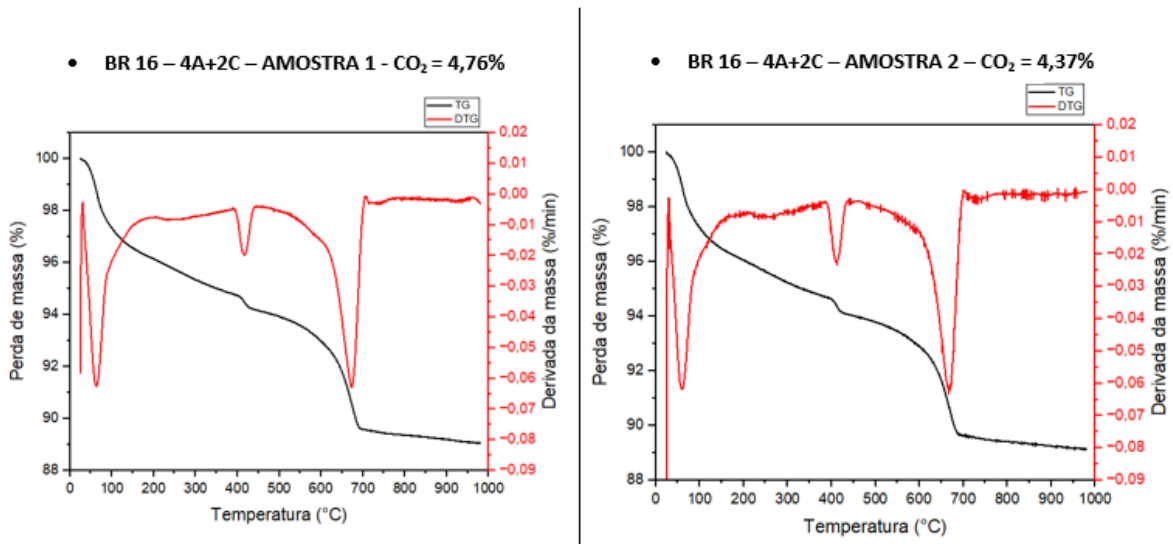
Fonte: Autor (2025).

A média da quantidade de carbonato inicial da amostra, equivalente ao  $\text{CO}_2$  já presente é de 3,33%.

- b) Depois da cura carbônica

Os blocos BR 16 - 4a+2c, foram submetidos a 4 horas de cura ambiente + 2 horas de cura carbônica. Após a cura com  $\text{CO}_2$ , as amostras foram extraídas e preparadas utilizando-se o mesmo procedimento descrito no item 5.2.1, e submetidas aos ensaios de análises térmicas. Os gráficos da Figura 162, demonstram a TG e DTG dos blocos BR 16 carbonatados.

**Figura 162 - TG/DTG – Blocos BR 16 - 4a+2c.**



Fonte: Autor (2025).

A média da captura de CO<sub>2</sub> (blocos carbonatados - 4A+2C) = 4,56%.

Para verificação do percentual de CO<sub>2</sub> realmente capturado, deve-se subtrair do percentual de CO<sub>2</sub> verificado após a cura carbônica, a quantidade de carbonato inicial da amostra (equivalente ao CO<sub>2</sub> já presente). Os resultados foram apresentados na Tabela 106, a seguir.

**Tabela 106 - Resultados de captura de CO<sub>2</sub> pelo ensaio de termogravimetria para amostras BR 16 - 4a+2c.**

Captura de CO <sub>2</sub> (%) - TG/DTG	
<b>Cura</b>	<b>4a+2c</b>
<b>Amostra</b>	<b>BR 16</b>
<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	1,23

### 6.3.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

- Quanto a resistência à compressão axial:

Os blocos BR4 (2a+2c e referência) aos 28 dias, após análise estatística por pares, não apresentaram diferença significativa entre si. E os meios blocos BR4 (2a+2c e referência) aos 28 dias, após análise estatística por pares, também não apresentaram diferença significativa entre si. Isso, equivale a dizer que, os blocos BR 4 curados com CO<sub>2</sub> não

apresentaram resistência superior aos blocos BR 4 curados convencionalmente pela fábrica. Estas se mantiveram equivalentes. O mesmo raciocínio é válido para os meios blocos BR 4.

Os blocos BR16 (4a+2c e referência) aos 28 dias, após análise estatística por pares, não apresentaram diferença significativa entre si. Assim como, os meios blocos BR16 (4a+2c e referência) aos 28 dias, após análise estatística por pares, também não apresentaram diferença significativa entre si. Isso, equivale a dizer que, os blocos BR 16 curados com CO<sub>2</sub> não apresentaram resistência superior aos blocos BR 16 curados convencionalmente pela fábrica. Estas se mantiveram equivalentes. O mesmo raciocínio é válido para os meios blocos BR 16.

- Quanto a captura de CO<sub>2</sub>:

Segundo a análise termogravimétrica os blocos BR 4 - 2a+2c, capturaram 2,91% de CO<sub>2</sub> e carbonataram por completo (ensaio de aspensão de fenolftaleína). Já BR 16 - 4a+2c, segundo a análise termogravimétrica capturaram 1,23% e a profundidade de carbonatação foi de 2,76 mm (aspensão de fenolftaleína). Os resultados dos ensaios qualitativos de aspensão de fenolftaleína seguiram a mesma tendência para os blocos e amostras. A eventual mudança aparente de comportamento das capturas verificadas por termogravimetria, devem-se a outros fatores que serão explanados no tópico a seguir. Os estudos envolvendo blocos de concreto evidenciados no estado da arte apresentaram captura superior à verificada nesta pesquisa, porém deve-se considerar que em nenhum dos estudos utilizou-se máquina vibro prensa e os blocos não foram confeccionados em indústria (assemelhando-se a realidade praticada no mercado). Além deste, outros fatores que afetam a carbonatação, como os formatos e dimensões dos blocos, tipos de agregados, tipos e tempos de cura, configurações da câmara; não foram os mesmos da pesquisa, não tornando-se possível uma correlação.

#### **6.4 ANÁLISE CAPTURA DE CO<sub>2</sub> BLOCO X AMOSTRA**

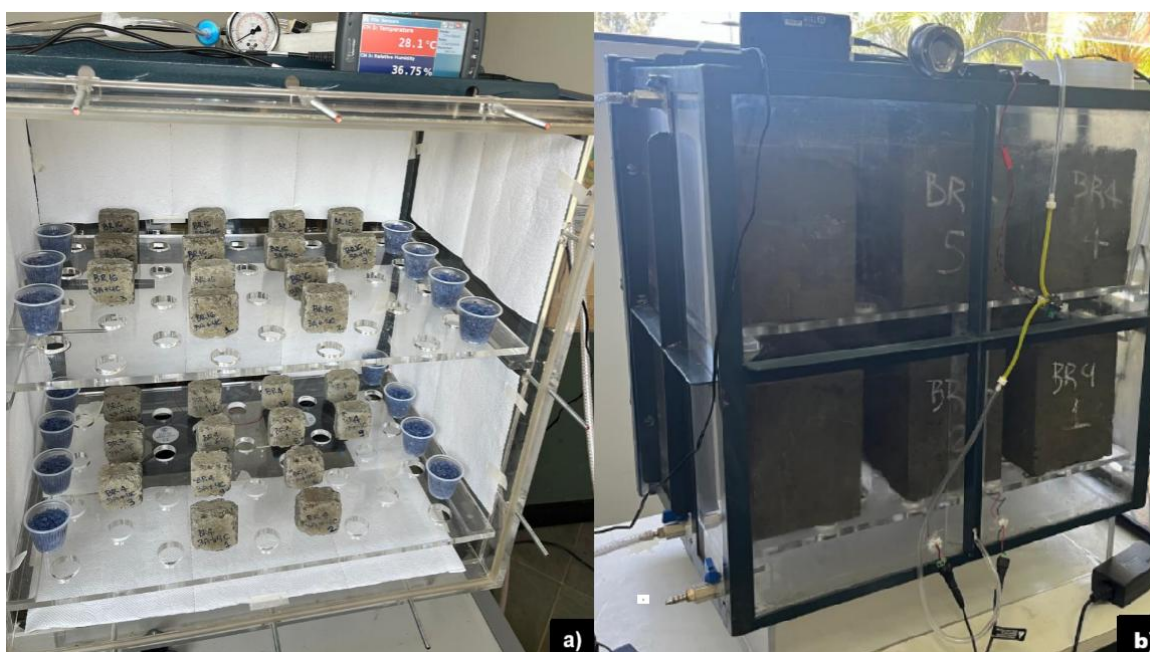
Inicialmente, realizou-se os estudos de captura de CO<sub>2</sub> em amostras, posteriormente com a melhor condição de cura verificada (BR4 – 2a+2c e BR 16 – 4a+2c), replicou-se para os blocos. Os valores de captura de CO<sub>2</sub> considerando amostras e blocos verificados através das análises de termogravimetria e termogravimetria derivativa, compõem a Tabela 107, a seguir.

**Tabela 107 - Captura de CO<sub>2</sub> verificados por meio das análises térmicas: termogravimetria e termogravimetria derivativa.**

Captura de CO <sub>2</sub> (%) - TG/DTG			
BR 4 - 2a+2c		BR 16 - 4a+2c	
Amostra	Bloco	Amostra	Bloco
6,61%	2,91%	7,20%	1,23%

Na primeira condição de cura (AMOSTRA – Figura 163(a)), a amostra foi extraída do bloco e só depois submetida à cura carbônica. Na segunda condição de cura (BLOCO - Figura 163- (b)), o bloco inteiro foi curado com CO<sub>2</sub> e só depois a amostra foi extraída do bloco. A Figura 163, demonstra as condições de cura mencionadas.

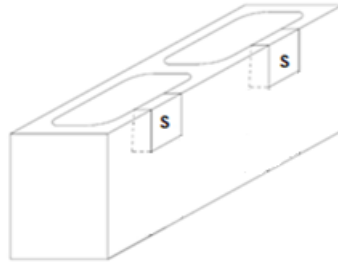
**Figura 163 - Cura carbônica: a) amostras; b) blocos.**



Fonte: Autor (2025).

Para análise dos resultados deve-se considerar que o local em que as amostras foram retiradas do bloco, foi o mesmo para as duas situações de cura, conforme demonstra Figura 164.

**Figura 164 - Local em que as amostras foram retiradas dos blocos após a cura carbônica.**

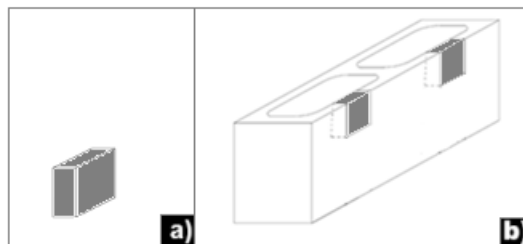


Fonte: Autor (2025).

Tanto para BR4 – 2a+2c, quanto para BR 16 – 4a+2c, verificou-se as amostras capturaram mais CO<sub>2</sub> que os blocos, e acredita-se que isso se deva a alguns fatores que serão explanados a seguir:

- i) Área de exposição ao CO<sub>2</sub>: a amostra possui todas as faces em contato direto com o CO<sub>2</sub>, enquanto que no bloco, a amostra retirada apresenta área de exposição inferior, conforme demonstra a Figura 165.

**Figura 165 - Área de contato com CO<sub>2</sub> (cor cinza): a) amostra; b) amostra retirada do bloco.**



Fonte: Autor (2025).

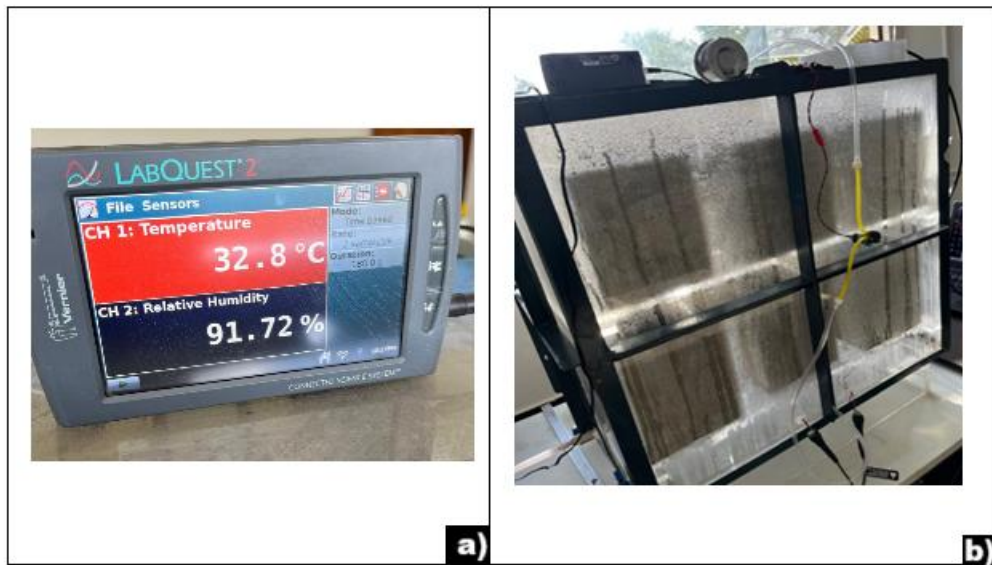
- ii) Fator de escala: esse fator considera o volume da amostra em relação ao volume da câmara. Ao analisar, verifica-se que o volume da amostra (0,00005 m<sup>3</sup>) é muito inferior ao volume da câmara (0,165 m<sup>3</sup>), já o volume do bloco (0,01 m<sup>3</sup>) é um volume importante com relação ao volume da câmara. Após os cálculos, concluiu-se que o volume da amostra equivale a 0,03% do volume da câmara, enquanto que o volume do bloco equivale a 6,29% do volume da câmara. Portanto, para que a cura carbônica do bloco ocorresse seguindo a mesma proporção volumétrica e fator de escala da amostra, o bloco deveria ser curado em uma câmara com volume de 33,33 m<sup>3</sup> o que equivaleria a uma sala de cura com dimensões de 3,70

x 3,00 x 3,00 m. Portanto, a geometria e/ou dimensão do corpo de prova x espaço interno da câmara, interferem diretamente na captura de carbono. Contudo, sugere-se como trabalhos futuros a construção de sala de cura carbônica nas dimensões citadas para a cura de blocos.

iii) Espaço para circulação de CO<sub>2</sub>: o espaço para circulação de CO<sub>2</sub>, devido a relação tamanho da câmara x tamanho dos blocos/amostras, é muito superior na cura das amostras do que na cura dos blocos. Ocorre que na cura dos blocos, o espaço para o gás circular entre eles e internamente a eles, é bastante reduzido; diferentemente do que ocorre na cura das amostras, em que o CO<sub>2</sub> apresenta maior espaço para circulação, apresentando, inclusive, uma velocidade de maior. O maior espaço para circulação de CO<sub>2</sub> disponível e a maior velocidade favorecem a difusividade do gás na amostra (YE, 2003 e STUMPP, 2003).

iv) Umidade Relativa: a umidade interna na câmara durante a cura dos blocos foi superior do que na cura das amostras, tanto que foi constatado, através de visualização, as paredes da câmara condensadas durante a cura dos blocos (Figura 166). Tal fato não ocorreu durante a cura das amostras. Comparando-se os blocos, para o BR 16 verificou-se uma umidade interna maior que para o BR 4, com maior condensação de água nas paredes da câmara. Esse fenômeno de condensação deve-se a própria reação de carbonatação, que por ser exotérmica, promove a evaporação da água presente nos poros do concreto. É fato que a água desempenha um papel muito importante na cura carbônica, pois a dissolução do CO<sub>2</sub> para formar ácido carbônico é a primeira etapa do processo da reação de carbonatação. No entanto, o excesso de água bloqueia os poros e o movimento do CO<sub>2</sub> de fora para dentro (SHI et al (2012). Segundo Liang et al (2000) e Lagerblad (2005), em condições saturadas a carbonatação torna-se lenta devido à redução da velocidade de difusão do gás. Shi et al (2012) e Pham (2013) verificaram que a umidade excessivamente alta inibe a difusão de CO<sub>2</sub>, pois o coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> na água ((0,0016 mm<sup>2</sup>/s) é muito menor do que no ar (16 mm<sup>2</sup>/s). Portanto, como verificado, é de se esperar que o bloco capture menos CO<sub>2</sub> que a amostra.

Figura 166 – Cura carbônica dos blocos: a) umidade interna; b) parede da câmara condensada.



Fonte: Autor (2025).

# 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor da construção civil impacta grandemente o meio ambiente, sendo responsável pela emissão de mais de um terço do total de gases de efeito estufa emitidos pela humanidade (UNEP, 2019), a indústria cimenteira sozinha responsabiliza-se pelo lançamento de cerca de 2 giga toneladas de CO<sub>2</sub> à atmosfera, o que corresponde a 8% das emissões mundiais (IEA, 2008). Visando contribuir com a mudança deste cenário, a presente pesquisa se propôs a analisar a “captura de CO<sub>2</sub>” em blocos de concreto, através da cura carbônica. Sintetizam-se, a seguir, os achados de relevância e as respostas às questões inicialmente propostas.

- Quais os parâmetros ideais de concentração de CO<sub>2</sub>, temperatura, umidade e tempo de cura para maximizar a captura de CO<sub>2</sub>, sem prejudicar as propriedades mecânicas?

Nesta pesquisa realizou-se a cura ambiente durante 2hs, 3hs e 4hs e a cura com CO<sub>2</sub> durante com 2, 4, 8 e 16hs, tanto para amostras dos blocos com 4 MPa, como 16 MPa. Em geral, tanto para BR 4, como BR 16, aos 28 dias, as amostras carbonatadas e referenciais apresentaram resistências equivalentes. Isso só não aconteceu para BR 4 – 3a+8c, BR 16 – 3a+4c. Conforme demonstram as Tabela 108 e Tabela 109, a seguir.

**Tabela 108 - Resumo dos itens analisados para as amostras BR 4: resistência à compressão, frente de carbonatação e captura de CO<sub>2</sub>.**

Curas	Resistência à compressão axial - BR 4			Frente de carbonatação	Captura CO <sub>2</sub>
	Idades				
	02 dias	07 dias	28 dias		
2a+2c	equivalentes	REF ↑	equivalentes	total	6,61%
4a+2c	equivalentes	equivalentes	equivalentes	total	6,48%
3a+4c	equivalentes	3a+4c (↑)	equivalentes	total	5,71%
3a+8c	equivalentes	equivalentes	REF ↑	total	5,23%
3a+16c	equivalentes	equivalentes	equivalentes	total	5,51%

Equivalentes – não houve diferença significativa entre amostras carbonatadas e referenciais

REF ↑ - resistência à compressão axial superior para a amostra referência

3a+4c (↑) - resistência à compressão axial superior para a amostra carbonatada (3a+4c)

**Tabela 109 - Resumo dos itens analisados para as amostras BR 16: resistência à compressão, frente de carbonatação e captura de CO<sub>2</sub>.**

Curas	Resistência à compressão axial - BR 16			Frente de carbonatação	Captura CO <sub>2</sub>
	Idades				
	02 dias	07 dias	28 dias		
2a+2c	REF ↑	equivalentes	equivalentes	0,88 mm	4,34%
4a+2c	REF ↑	REF ↑	equivalentes	3,27 mm	7,20%
3a+4c	equivalentes	equivalentes	REF ↑	12,46 mm	6,52%
3a+8c	equivalentes	equivalentes	equivalentes	4,68 mm	3,93%
3a+16c	equivalentes	equivalentes	equivalentes	1,30 mm	3,48%

Equivalentes – não houve diferença significativa entre amostras carbonatadas e referenciais

REF ↑ - resistência à compressão axial superior para a amostra referência

Para tanto, os parâmetros ideais de concentração de CO<sub>2</sub>, temperatura, umidade e tempo de cura para maximizar a captura de CO<sub>2</sub>, sem prejudicar as propriedades mecânicas para as amostras do bloco BR 4 foi 2 horas de cura ambiente + 2 horas de cura com CO<sub>2</sub>, e para as amostras do bloco BR 16 foi 4 horas de cura ambiente + 2 horas de cura com CO<sub>2</sub>. Sendo que, a cura ambiente ocorreu em galpão fechado, temperatura de aproximadamente 30°C e umidade de aproximadamente 40%. Já, a cura com CO<sub>2</sub>, apresentou a seguinte configuração: concentração de CO<sub>2</sub> de 100%, temperatura (25°C (ambiente) e internamente à câmara a temperatura variou de 28°C a 33,7°C) e umidade (50 a 70%).

Verificou-se também que para as amostras BR 4, em todos os tratamentos de cura empregados, que a captura de CO<sub>2</sub> ficou em torno de 6%, logo o menor tempo de cura ambiente inicial e o menor tempo de cura com CO<sub>2</sub>, tornam o procedimento mais rápido e econômico para a indústria fabricante. Já para as amostras BR 16, verificou-se que os maiores tempos de cura com CO<sub>2</sub>, diminuiram a captura, sendo 2 horas o tempo ideal para a máxima captura de gás carbônico pelos blocos.

Durante a cura carbônica dos blocos, percebeu-se que quanto maior a resistência do bloco, ou seja, quanto maior o seu teor de cimento, maior foi a água liberada pelas reações exotérmicas de hidratação, evaporação e carbonatação, que são eventos concomitantes. Dessa forma, verificou-se uma maior umidade interna à câmara (alcançando 91%) para blocos BR 16. Entende-se que a maior umidade interna foi fator preponderante para a redução da captura nos blocos BR 16, quando comparados aos blocos BR 4. Sabe-se que alterações na umidade relativa do ambiente alteram o teor de umidade dos poros e do material como um todo, e conseqüentemente, a velocidade de difusão do CO<sub>2</sub> para o interior da matriz cimentícia (KULAKOWSKI (2002); PAULETTI (2004)). Bertos et al (2004), consideram que a umidade relativa ótima se encontra na faixa de 50 e 70% e enfatizam que a taxa de carbonatação

decrece para baixos e altos níveis de umidade relativa. Sendo assim, sugere-se para trabalhos futuros, estudar a possibilidade de controlar a umidade na câmara de carbonatação, por exemplo com a instalação de desumidificador, para potencializar a captura de CO<sub>2</sub>.

- Qual dos tratamentos de cura carbônica dos blocos de concreto com função estrutural de 4MPa e 16MPa, apresentará melhores resultados quanto à captura de CO<sub>2</sub> e ganho de resistência?

Após diferentes combinações de cura ambiente inicial e cura com CO<sub>2</sub>, concluiu-se que para os blocos estruturais com 4 MPa (BR 4), a melhor condição de cura foi de 2 horas de cura ambiente com posterior cura carbônica de 2 horas. E para os blocos estruturais com 16 MPa (BR 16), a melhor condição de cura foi de 4 horas de cura ambiente com posterior cura carbônica de 2 horas.

- O processo de ganho de resistência das amostras carbonatadas é acelerado com relação às amostras referenciais, ou seja, as amostras carbonatadas adquirirem resistências superiores às referenciais logo nas primeiras idades (02 e 07 dias)?

Para as amostras BR 4 – 2a+2c e BR 16 – 4a+2c, que representam as melhores condições de cura verificadas, não se observou ganho de resistência superior para as amostras carbonatadas, pelo contrário, estas se mostraram inferiores ou equivalentes às referenciais. Porém, quando se compara a resistência das amostras carbonatadas e referenciais com a resistência esperada para o concreto CPV- ARI, segundo a relação da ABNT NBR 6118:2014 ( $f_{ckj} = \beta_{fck} \rightarrow \beta = \exp\left[s \left(1 - \sqrt[2]{\frac{28}{t}}\right)\right]$ ,  $t \rightarrow$  idade efetiva, em dias;  $s \rightarrow 0,20$  cimento CPV) verifica-se que as resistências obtidas foram equivalentes para as amostras BR 4 – 2a+2c e superiores ao esperado para o cimento CP V – ARI, para as amostras BR 16 – 4a+2c. Apesar do processo de cura carbônica não acelerar o ganho de resistência nas primeiras idades, tampouco prejudicou-a, uma vez que atende ao esperado pela Norma ABNT NBR 6118:2014. Acredita-se que a aplicação de 2 horas de cura carbônica sob 100% de concentração de CO<sub>2</sub>, a carbonatação ficou no limite de se tornar excessiva (pois aos 28 dias – BR4 com 8 horas de cura carbônica já apresentou resistência inferior ao referencial e BR 16, aos 28 dias, com 4 horas de cura carbônica apresentou resistência inferior ao referencial), pois ao passo que não houve a aceleração do ganho de resistência nas primeiras idades, esta também não foi prejudicada. É sabido que a carbonatação em excesso

pode promover a redução da resistência dos materiais cimentícios, quando o CO<sub>2</sub> excessivo atinge o C-S-H, podendo causar sua degradação (MO et al, 2013; YUAN et al, 2013; LU et al., 2018). Quanto à duração da carbonatação, Neves Junior et al. (2015) constataram que a carbonatação sob concentração de 20% de CO<sub>2</sub> durante 1 hora melhorou as propriedades mecânicas de pastas de cimento Portland resistentes à sulfato, enquanto que a carbonatação por 24 horas reduziu significativamente seu desempenho. Esses resultados indicaram que o ajuste da duração da carbonatação é crítico, pois a carbonatação excessiva pode levar à descalcificação de C-S-H para formar SiO<sub>2</sub> amorfo. Gulerla et al (2024) carbonataram cubos de 100 mm, 100% concentração de CO<sub>2</sub> e pressão atmosférica, e verificaram que 24 horas de cura carbônica foram prejudiciais ao ganho de resistência, e atribuíram esse resultado à perda excessiva de água causada pela natureza exotérmica da carbonatação e descalcificação de C-S-H (GOODBRAKE et al, 1979; MORANDEAUE et al, 2014). As Tabela 110 e Tabela 111 demonstram os resultados verificados e análises realizadas para as amostras BR 4 – 2a+2c, BR 16 – 4a+2c e referenciais.

**Tabela 110 - Análises e resultados de resistência à compressão axial para as amostras BR4 - 2a+2c e referência.**

<b>Resistência à compressão axial (MPa) - Amostras dos Blocos BR 4</b>						
<b>Idade</b>	<b>02 dias</b>		<b>07 dias</b>		<b>28 dias</b>	
	<b>2a+2c</b>	<b>Referência</b>	<b>2a+2c</b>	<b>Referência</b>	<b>2a+2c</b>	<b>Referência</b>
<b>1</b>	7,21	10,23	12,22	13,19	15,21	16,43
<b>2</b>	10,35	12,13	11,26	16,17	10,94	12,73
<b>3</b>	6,73	10,92	10,92	16,44	15,45	11,39
<b>fam (MPa)</b>	8,10	11,09	11,47	15,27	13,87	13,52
<b>ANOVA</b>	equivalentes		REF ↑		equivalentes	
<b>fam,j/fam,28</b>	0,58	0,82	0,83	1,13	1,00	1,00
<b>β (NBR 6118:2014)</b>	0,58		0,82		1,00	
<b>Desvio padrão</b>	1,97	0,96	0,67	1,8	2,54	2,61
<b>Coef. Variação (CV)</b>	24,30%	8,70%	5,90%	11,80%	18,30%	19,30%

Equivalentes – não houve diferença significativa entre amostras carbonatadas e referenciais

REF ↑ - resistência à compressão axial superior para a amostra referência

**Tabela 111 - Análises e resultados de resistência à compressão axial para as amostras BR 16 - 4a+2c e referência.**

Resistência à compressão axial (MPa) - Amostras dos Blocos BR 16						
Idade	02 dias		07 dias		28 dias	
CP nº /Cura	4a+2c	Referência	4a+2c	Referência	4a+2c	Referência
1	19,31	24,21	26,16	32,45	23	42,06
2	18,80	29,22	24,22	37,83	26,97	28,48
3	19,05	27,25	25,09	29,79	29,36	33,29
<b>fbm (MPa)</b>	19,06	26,89	25,16	33,36	26,44	34,61
<b>ANOVA</b>	REF ↑		REF ↑		equivalentes	
<b>fbm<sub>j</sub>/fbm<sub>28</sub></b>	0,72	0,78	0,95	0,96	1,00	1,00
<b>β (NBR 6118:2014)</b>	0,58		0,82		1,00	
<b>Desvio padrão</b>	0,36	2,52	0,97	4,1	3,21	6,59
<b>Coef. Variação (CV)</b>	1,90%	9,40%	3,86%	12,28%	12,10%	19,90%

Equivalentes – não houve diferença significativa entre amostras carbonatadas e referenciais

REF ↑ - resistência à compressão axial superior para a amostra referência

- A correlação quanto a resistência à compressão axial amostra x bloco BR 4 e BR 16, apresentou resultados coerentes aos verificados através dos ensaios de resistência à compressão axial dos blocos na prática?

Os valores de correlação verificados na pesquisa aos 28 dias, estão contidos na Tabela 112, a seguir.

**Tabela 112 - Correlação entre as resistências à compressão axial das amostras extraídas dos blocos e blocos com 4MPa e 16 MPa.**

	Resistência à compressão axial (MPa)			
	BR 4		BR 16	
	Amostras	Blocos	Amostras	Blocos
<b>Média (n=6)</b>	11,4	6,51	31,74	14,02
<b>Correlação</b>	<b>1,75</b>		<b>2,26</b>	

Estes valores correlacionam a resistência da amostra com a resistência do bloco considerando área bruta, sendo a correlação próxima a relação entre área líquida e área bruta.

Os resultados mostraram também que a resistência do concreto do bloco varia ao longo da altura deste. As resistências são maiores nas partes inferiores e superiores do que na região central do bloco. Isso pode ser explicado pelo fato das regiões inferior e superior serem melhor vibro-prensadas durante o processo de fabricação (a parte central está afastada da base de apoio e da cabeça de vibração do equipamento).

- Quanto seria possível sequestrar de CO<sub>2</sub> no Brasil considerando o percentual de CO<sub>2</sub> capturado pelos blocos analisados na pesquisa?

De acordo com o Relatório Anual 2023, do Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC, 2023), no ano de 2023 foram produzidas 62.210.000,00 toneladas de cimento no Brasil, destas 2.050.000,00 foram empregadas na fabricação de blocos de concreto. Esta indústria utiliza cimento CP-V que emite cerca de 858 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento (CBCS, 2014). Com a taxa de captura de CO<sub>2</sub> considerada neste estudo, de 6,61% para os blocos BR 4 e 7,20% para os blocos BR 16, teria sido possível capturar de 135.505,00 a 147.600,00 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, se toda a produção de blocos de concreto tivesse sido submetida à cura carbônica. Considerando que a emissão de CO<sub>2</sub> relacionada à produção de cimento em 2023 no Brasil foi de aproximadamente 32.163.396 toneladas (SEEG, 2025). Isto corresponde de 0,42% a ~0,46% do CO<sub>2</sub> total emitido pela produção brasileira de cimento em 2023, e equivale ao sequestro de CO<sub>2</sub> que 16.938.125,00 a 18.450.000,00 árvores fariam em um ano através da fotossíntese.

- A câmara de carbonatação desenvolvida para os ensaios em laboratório atende às necessidades de pesquisas?

A câmara atendeu aos objetivos da pesquisa, tornando possível a cura com 100% de concentração de CO<sub>2</sub>, de amostras e blocos de concreto. Ao longo dos ensaios alguns ajustes foram feitos em sua estrutura, para atender a finalidade para qual se destinava e inclusive a solução final é descrita no capítulo 3. Essa solução foi tornada pública em artigo publicado e tem sido replicada em outras universidades.

- Será viável financeiramente aplicar a cura carbônica em indústrias fabricantes de blocos de concreto?

De acordo com o estudo de viabilidade técnica apresentado, a cura carbônica em indústrias fabricantes de blocos de concreto no estado de São Paulo, foi considerada viável, pois todas as necessidades requeridas pelo procedimento em questão foram atendidas. Para tanto, foi apresentado um mapa mostrando os fornecedores de CO<sub>2</sub> e as fábricas de blocos de concreto localizadas no estado; quanto maior a distância entre o fornecedor e a fábrica, maior será o custo. Foi estimado um aumento de R\$ 0,11 a R\$ 0,37 após a implementação da cura carbônica se a planta estiver localizada de 30 km a 100 km do fornecedor de CO<sub>2</sub>, respectivamente. Estes custos representam de 4 a 14% do custo de produção dos blocos de concreto (sem considerar o custo do frete de entrega).

Contudo, a viabilidade financeira depende da quantificação da compensação monetária possível de ser aferida pela maior sustentabilidade do produto final. Essa resposta depende de políticas públicas nacionais e internacionais e tende a ser temporal à medida em que maior importância à questão ambiental é exigida e convertida em valor monetário.

## 7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho alcançou seu objetivo ao contribuir para a implementação da tecnologia de *Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)* no Brasil, por meio da cura carbônica de blocos de concreto, uma vez que inexistem relatos desse tipo de procedimento no setor. Contudo, muito ainda pode ser feito. Desta forma, recomenda-se para elaboração de trabalhos futuros:

- Construção de câmara de carbonatação (*retrofit* ou nova instalação) em indústria para a cura carbônica dos blocos de concreto, com volume de pelo menos 33,33 m<sup>3</sup>, simulando a mesma relação volume câmara x amostra empregada na cura das amostras desta pesquisa;
- Estudar a possibilidade de instalação de desumidificador na câmara de carbonatação construída pelos pesquisadores, visando-se o controle de umidade para potencializar a captura de CO<sub>2</sub>; bem como a instalação de válvula de pressão para prevenção de acidentes;
- Verificação da captura de CO<sub>2</sub> e resistência mecânica em blocos de concreto produzidos com agregados reciclados com elevado teor de cimento;
- Estudo de durabilidade e desempenho dos blocos carbonatados.

# 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, A.G. **Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul– Porto Alegre: PPGECC/UFRGS, 2004.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL – ABDI. **Subsídios para a elaboração de uma estratégia industrial brasileira para a economia de baixo carbono: caderno 3: nota técnica cimento**. São Paulo, 2012.

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

Alarcon Ruiz. L, Platret. G, Massieub. E, Ehrlacher. **A. The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste**. Cem. Concr. Res. 2005; 35,609-13.

Archer, D., and B. Buffett (2005), **Time-dependent response of the global ocean clathrate reservoir to climatic and anthropogenic forcing**, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 6, Q03002, doi:10.1029/2004GC000854.

ARYANA, SAMAN AFQAH. Statistical analysis of compressive strength of clay brick masonry prisms. University of Texas at Arlington. Degree of master of science in civil engineering the university of texas at arlington. May 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Guia básico de utilização do cimento portland**.7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106). ISBN 85-87024-23-X.

ASSOCIAÇÃO Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 6136: **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2016. 10p.

ASSOCIAÇÃO Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 11768-1: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019. 27p.

ASSOCIAÇÃO Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 7211: Agregados de concreto: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009. 10p.

ASSOCIAÇÃO Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 9479: Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2006. 2p.

ASSOCIAÇÃO Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBRISO7500-1 DE 03/2023: Materiais metálicos — Calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial - Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão — Calibração e verificação do sistema de medição de força. Rio de Janeiro, 2023. 19p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA – ABCI (1990). **Manual Técnico de Alvenaria**. São Paulo, Ed. Pro Editores.

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.wbcds.org/web/projects/cement/articles/sdi.pdf>) (accessed 3.06.11).

BARBOSA, C.S.; HANAI, J.B. (2008a). **Comparison of standard test results and in-place mechanical properties of embedding mortars and concrete blocks**. In: INTERNATIONAL BRICK & BLOCK MASONRY CONFERENCE, 14., 2008, Sydney, Australia. Proceedings.

BARBOSA, C.S.; HANAI, J.B. (2008b). **Deformability of hollow concrete blocks and platen effect on axial compression tests**. In: INTERNATIONAL BRICK & BLOCK MASONRY CONFERENCE, 14., 2008, Sydney, Australia. Proceedings.

BARROS, P.G.S., **“Evaluation of the durability properties of self-compacting concrete obtained with marble and granite cutting waste”**, M.Sc. Thesis, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2008.

BBC News. **Os 15 países que emitiram mais CO<sub>2</sub> nos últimos 20 anos (e em que posição está o Brasil)**, 21 de dezembro de 2019. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-50811386>. Acesso em: 21/02/2020.

Benhelal a, Gholamreza Zahedi a,\* , Ezzatollah Shamsaei b , Alireza Bahadori. **Global strategies and potentials to curb CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> capture**. Progress in Energy and Combustion Science 36, 260–279.

Bosoaga, A., Masek, O., Oakey, J., 2009. **CO<sub>2</sub> 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.

BOTKIN, DANIEL B.; KELLER, EDWARD A. **Environmental Science: Earth as a living planet**. Hoboken, NJ: Wiley, p.466-486. 2016.

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, Tecnologia e Inovação. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa Brasil**. 2. ed. Brasília, 2014.

Bukowski, J.M., R.L. Berger. **Reactivity and strength development of CO<sub>2</sub> 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.

CarbonCure – **Projetos de Referência.** Acesso em: <https://www.carboncure.com/resources/mgm-national-harbor/>, 22 de julho de 2020.

Carvalho, M.B. **Impactos e conflitos da Produção de cimento no Distrito Federal.** Dissertação de Mestrado. Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília. Brasília. 2008.187p.

CCS Task Force Report, 2010. Disponível em: [www.fe.doe.gov/programs/sequestration/ccstf/CCSTaskForceReport2010.pdf](http://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.

International Energy Agency (IEA), **Cement roadmap targets**, 2009. Disponível em: [www.iea.org/papers/2009/Cement\\_Roadmap\\_targets\\_viewing.pdf](http://www.iea.org/papers/2009/Cement_Roadmap_targets_viewing.pdf).

CETESB, BID. **Estudo de baixo carbono para a indústria de cimento no estado de São Paulo de 2014 a 2030.** 1.ed. atual. – São Paulo: CETESB, 2018.

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.

CIDB – **Precast Concrete Products: Brick and Block Making.** Disponível em: <http://www.cidb.org.za/initiatives/Part%203-concrete.pdf#search=%22cidb%20%22block%20machine%22%20pdf%22..>  
Acesso em: 05/05/2020.

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.

Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. **Projeto avaliação de ciclo de vida modular de blocos e pisos de concreto**, São Paulo: CBCS, 2014, 93 p.

Copernicus Climate Change Service (C3S), **European State of Climate (ESOTC)**. European Center for Medium-Term Meteorological Forecasts (ECMWF), 2019.

Costa, J. R. V. **Planeta água**. Tribuna de Santos, Santos, 20 set. 2004. Caderno de Ciência e Meio Ambiente, p. D-2.

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.

Dweck. J, Buchler. P. M, Coelho. A. C. V, Cartledge. F. K. **Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate**. Thermoch Acta, 2000; 346: 105-13.

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.

DRYSDALE, R. G., AND HAMID, A. A., "Behavior of Concrete Block Masonry under Axial Compression," ACI J 1979;76(6):707–21, 2005.

Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR). **Fossil CO<sub>2</sub> emissions of all world countries, 2018 report**. Disponível em: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=booklet2018&sort=des9>. Acesso em: 21/07/2019.

EDGAR - The Emissions Database for Global Atmospheric Research. **Fossil CO<sub>2</sub> & GHG emissions of all world countries, 2017**. Disponível em: < <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/>>. Acessado 02/05/2018.

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, Ghouleh,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: CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>.** Journal of Hazardous Materials B112 (2004).

FORTUNATO, L. R.; PARSEKIAN, G. A.; NEVES JUNIOR, A. **ESTUDO SOBRE A ABSORÇÃO DE CO<sub>2</sub> EM PEÇAS PRÉ-FABRICADAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO.** In: 60° Congresso Brasileiro do Concreto, 2018, Foz do Iguaçu. 60° Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo: IBRACON, 2018. v. 1. p. 1-12.

FREITAS, et al. **Importância do concreto na geração de CO<sub>2</sub> em um caso de obra de um edifício.** Paraná, 2010.

FREITAS, Eduardo de. **"A origem da atmosfera";** Brasil Escola.2010. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/a-origem-atmosfera.htm>. Acesso em 01 de julho de 2020.

FORTES 2012: FORTES, E. S. Influencia do Capeamento e Caracterização da resistência à compressão de Alvenaria Estrutural de Blocos de concreto. Dissertation (MS) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 303p.

FORTES, E. S., PARSEKIAN, G. A., and FONSECA, F. S., "Relationship between the Compressive Strength of Concrete Masonry and the Compressive Strength of Concrete Masonry Units," J. Mater. Civ. Eng. 2014, Vol. 27, No. 9, 04014238.

Fortes, Ernesto Silva. **Caracterização da Alvenaria Estrutural de Alta Resistência.** 2017. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2017.

GALAN, C I A; MORA, P; SANJUAN, M A. **Sequestration of CO<sub>2</sub> by concrete carbonation**. Environmental Science and Technology, Washington, USA, v. 44, n. 8, p. 3181–3186, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es903581d>

G. A. Parsekian, A. L. Christoforo, A. D. E. Mazzú, and G. M. Dalfré, “Humidity and specimen preparation procedure: influence on compressive strength of concrete blocks,” Rev. IBRACON Estrut. Mater., vol. 14, no. 2, e14210, 2021, <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000200010>.

GANZERLI, S. et al. (2003). **Compression strength testing for nonstandard concrete masonry units**. In: NORTH AMERICAN MASONRY CONFERENCE, 9., 2003, Clemson, South Carolina. Proceedings. p.60-71.

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 CO<sub>2</sub> de los Materiales de Base cemento**. Cemento Hormigón. Nº 939. Jul/ago 2010. PP. 70-83.

GARTNER, E. **Industrially interesting approaches to “lowCO<sub>2</sub>” cements**. Cement and Concrete Research, Elmsford, n.34, p.1489-1498,2004.

GULERLA, H., SHARMA, D., GOYAL, S. **Long term performance of concrete using accelerated carbonation curing: an effective CCUS technique**. EUROPEAN JOURNAL OF ENVIRONMENTAL AND CIVIL ENGINEERING2024, VOL. 28, NO. 9, 2138–2159 <https://doi.org/10.1080/19648189.2023.2295502>.

GREENSPAN, L. “**Humidity, fixed points of binary saturated aqueous solutions**”; Journal of rechearch of the National Bureau of Standards, volume 81A, 1977.

Hassan, S.M.N., 2005. **Techno-Economic Study of CO<sub>2</sub> 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 Construido. São Paulo. Vol. 01, 1997.

Helene, M. E; Pacheco, M.R. **Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO<sub>2</sub>**. Estud. av. vol.4 no.9 São Paulo May/Aug. 1990.

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

Higuchi Takayuki, Minoru Morioka, Ichiro Yoshioka, Kosuke Yokozeki, **Development of a new ecological concrete with CO<sub>2</sub> emissions below zero**, Construction and Building Materials 67 (2014) 338–343.

Ho, M., Allinson, G., Wiley, D., 2011. **Comparison of MEA capture cost for low CO<sub>2</sub> emissions sources in Australia**. International Journal of Greenhouse Gas Control 5, 49–60.

HOBBSAWM, Eric J. **A Era das Revoluções 1789-1848**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2014, p. 59.

Hu, Minghe; Liu, Yanchun (Roxanne). **CO<sub>2</sub> 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.

HUMPHREYS, K.; MAHASANAN, M. **Climate Change: toward a sustainable cement industry**. Battelle - World Business Council of Sustainable Development, 2002. Disponível em: <<https://www.wbcsd.org/pages/edocument/edocum>>. Acesso em: 26 jul. 2020.

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

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](http://www.iea.org/papers/2009/Cement_Roadmap.pdf)). Acesso em 27/12/2018.

IEA GHG, 2002. **Opportunities for Early Application of CO<sub>2</sub> Sequestration Technology**. IEA GHG PH4/10. Cheltenham, UK.

IEA GHG, 2008. **CO<sub>2</sub> 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>.

IEA, 2018a. **Cement Technology Roadmap Plots Path to Cutting CO<sub>2</sub> Emissions**. Disponível em: <https://www.iea.org/news/cement-technology-roadmap-plots-path-to-cutting-co2-emissions-24-by-2050>. Acesso em: 12/02/2025.

INPE - **INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA**. INPE-7177-PUD/38. São José dos Campos, 2010.

INTERCEMENT. **Relatório Anual 2010: como funciona o mercado cimenteiro**. Disponível em: <https://intercement.com/RS2010/pt/como-funciona-o-mercado-cimenteiro/>. Acesso em: 15/05/2020.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2013**. 2013. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/noticia/sustentabilidade-inoxidavel/>>. Acesso em: 18 junho 2020.

IPCC, 2013: **Mudança Climática 2013: A Base da Ciência Física**. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [Stocker, TF, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, SK Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex e PM Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova York, NY, EUA, 1535 pp.

IONASHIRO, M. Princípios básicos da termogravimetria e Análise Térmica Diferencial/Calorimetria Exploratória Diferencial. Editora Giz. Araraquara, 2004.

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

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) - **Global Warming of 1.5°C**. Primeira Sessão Conjunta dos Grupos de Trabalho I, II e III do IPCC, e acatado pela 48ª Sessão do IPCC, em Incheon, República da Coreia, em 6 de outubro de 2018.

JACOBSEN, S., JAHREN, P. **Binding of CO<sub>2</sub> by Carbonation of Norwegian OPC Concrete**. CANMET/ACI International Conference on Sustainability and Concrete Technology, Lyon, 2002.

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. **Cimento – Produção mundial pode dobrar sem aumentar CO<sub>2</sub>.** Agência USP de Notícias. São Paulo, 2025. Editoria: Tecnologia. 1p. Disponível em: <<https://www.poli.usp.br/noticias/1527-cimento-producao-mundial-pode-dobrar-sem-aumentar-co2.html#:~:text=%E2%80%9CEstima%2Dse%20que%20para%20cada,de%20cl%C3%ADnquer%E2%80%9D%2C%20explica%20Pileggi.>>>. Acesso em: 12/02/2025.

JOHN, V. **Nova técnica diminui emissão de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>.** 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.

Kaefer, LF. **A Evolução do Concreto Armado.** PEF 5707 – Concepção, Projeto e Realização das estruturas: aspectos históricos – 1998.3. São Paulo dezembro - 1998

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

Kaufaman et all, **Recent Warming Reverses Long-Term Arctic Cooling.** Science 04 Sep 2009: Vol. 325, Issue 5945, pp. 1236–1239 DOI: 10.1126/science.1173983.

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).

LEE. F .C, Roy. A, Samrow. H. A, Dooley. K. M. **High-Pressure Molding and Carbonation of Cementitious Materials Materials and Interfaces**. Ind. Eng.Chem.Res, 1999;38, 2641-649.

Lee, C.W. **Team led by UCLA professor wins \$7.5 million NRG COSIA Carbon XPRIZE**, 2021. Disponível em: <><https://newsroom.ucla.edu/releases/ucla-nrg-cosia-carbon-xprize-concrete>. Acess in: 10/04/2022.

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

Leite, J.C. **Do mistério das eras do gelo às mudanças climáticas abruptas**. scientiæ zudia, São Paulo, v. 13, n. 4, p. 811-39, 2015.

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

Lenz, K. **The Foundations of a Sustainable Resort**. Disponível em: <<https://gbdmagazine.com/the-foundations-of-a-sustainable-resort/>>. Acesso em: 12/02/2025.

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.

Lindsey, R. **Alterações Climáticas: Dióxido de Carbono Atmosférico. Notícias, histórias, imagens e vídeo sobre clima** - Revista ClimateWatch. Disponível em: <<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>>. Acesso em: 20/02/2020.

LONG, L., HAMID, A.A., and DRYSDALE, R.G. (2005). **Small-Scale Modeling of Concrete Masonry Using 1/2-Scale Units: A Preliminary Study**. Proceedings of the Tenth Canadian Masonry Symposium, Banff, Canada, pp. 484-493.

LO, Y.; LEE, H. M. **Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy.** Building and Environment, v. 37, n. 5, p. 507-514, May 2002.

Lüthi, D., M. Le Floch, B. Bereiter, T. Blunier, J.-M. Barnola, U. Siegenthaler, D. Raynaud, J. Jouzel, H. Fischer, K. Kawamura e TF Stocker. (2008). **Registro de concentração de dióxido de carbono de alta resolução 650.000-800.000 anos antes do presente.** *Nature*, vol. 453, pp. 379-382. doi: 10.1038 / nature06949.

MacMaster, D.; Tavares, O. **Carbon Sequestration of Concrete Masonry Units.** ACI Materials Journal, V. 112, No. 6, November-December 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Efeito Estufa e Aquecimento Global.** Disponível em: <https://www.mma.gov.br/informma/item/195-efeito-estufa-e-aquecimento-global.html>. Acesso em: 10/04/2020.

Mehta, P. K, Monteiro, P. J. M. Concrete, **Microstructure, Properties and Materials.** 3 ed. IBRACON, 2008. (In Portuguese).

MELO, Aluisio Braz de. **Estudo da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica na produção de elementos pré-moldados.** 1996. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Sao Carlos, 1996. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18131/tde-01082024-111451/>. Acesso em: 26 mar. 2020.

Meng, Y., Ling, T., Mo, K, H., Tian, W., **Enhancement of high temperature performance of cement blocks via CO<sub>2</sub> curing.** Science of the Total Environment 671 (2019) 827–837. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.411> 0048-9697/© 2019 Elsevier B.V.

Meyer, V., et al., 2018. **Solidia Cement an Example of Carbon Capture and Utilization.** KEM 761, 197–203. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.761.197>.

Mit, J.M., Takahashi, T., Goldberg, D., McGrail, B.P., 2007. **Experimental evaluation of in situ CO<sub>2</sub>-water-rock reactions during CO<sub>2</sub> injection in basaltic rocks.** Implications for geological CO<sub>2</sub> sequestration. Geochem. Geophys. Geosyst..

Monkman, S, Shao, Y, **Integration of carbon sequestration into curing process of precast concrete**, NRC Research Press Web (2010) 302-310.

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

Morandea 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).

Moore, D. S., McCabe, G. P., & Craig, B. A. (2018). **Introduction to the Practice of Statistics**. W. H. Freeman.

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

Muller, R. A., Gordon J. F. MacDonald (1997). **“Glacial Cycles and Astronomical Forcing”**. Science.277 (5323).

MULLER, N.; HARNISH, J. **A blueprint for a climate friendly Cement industry**. Gland: WWF Lafarge Conservation Partnership, 2008. 94p. (WWF-Lafarge Conservation Partnership Report).

Naranjo, M., Brownlow, D., Garza, A., 2011. **CO<sub>2</sub> 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.

NASA. **The acceleration has been driven mainly by increased ice melting in Greenland and Antarctica, and it has the potential to double the total sea level rise projected by 2100**. Disponível em: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/91746/sea-level-rise-is-accelerating>. Acesso em: 18/12/2019.

NETL (US Department of Energy National Energy Technology Laboratory), 2009. **Recovery Act: Carbon Capture and Sequestration from Industrial Sources and Innovative**

**Concepts for Beneficial CO<sub>2</sub> Use.** Disponível: (<http://fossil.energy.gov/sequestration/publications/arra/DE-FOA-0000015.pdf>).

NEVES, M. L. R.; LORDSLEEM JÚNIOR, A. C.; MONTEIRO, E. C. B. **Indicador de avaliação para gestão da tecnologia construtiva das vedações em alvenaria.** XXVIII Encontro nacional de engenharia de produção, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13 a 16 de outubro, 2008.

NEVES, J.A.; **Captura de CO<sub>2</sub> em Materiais Cimentícios através da Carbonatação Acelerada** / Alex Neves Junior – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

Alex Neves Junior, Romildo Dias Toledo Filho, Jo Dweck and Eduardo de Moraes Rego Fairbairn. Early Stages Hydration of High Initial Strength Portland Cement – Part I – Thermogravimetric Analysis on Calcined Mass Basis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2012.

NEVES JUNIOR, A et al. **Determination of CO<sub>2</sub> capture during accelerated carbonation of engineered cementitious composite pastes by thermogravimetry.** *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Suíça, v. 138, n. 1, p. 97–109, 2019. Disponível em:<https://doi.org/10.1007/s10973-019-08210-y>

A.N. Junior, R.D. Toledo Filho, E.d.M.R. Fairbairn, and J. Dweck, **The effects of the early carbonation curing on the mechanical and porosity properties of high initial strength Portland cement pastes.** *Construction and Building Materials*, 2015, 77, 448-454.

Oliveira, A.S, **Análise Ambiental da viabilidade de seleção de produtos da construção civil através da ACV e do Software BEES 3.0.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

Oliveira, Gilvan Sampaio de. **Mudanças climáticas.** Gilvan Sampaio de Oliveira, Neilton Fidelis da Silva, Rachel Henriques. – Brasília: MEC, SEB; MCT; AEB, 2009. 348 p. il. – (Coleção Explorando o ensino; v. 13).

Oliveira, Jr. **O SEQÜESTRO DE CARBONO PARA O COMBATE AO EFEITO ESTUFA.** Trabalho final do curso de pós-graduação em Gestão Ambiental. Faculdade da Região dos Lagos – FERLAGOS. Uberaba – 2004.

OLIVEIRA, V. C. H. C.; DAMINELI, B. L.; AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **Estratégias para a minimização da emissão de CO<sub>2</sub> de concretos.** *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 167-181, out./dez. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

Oliveira, L.S. **Avaliação do ciclo de vida de blocos de concreto do mercado brasileiro: Alvenaria e Pavimentação.** Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.155p.

PACHECO, Maria Raquel Pereira dos Santos; HELENE, Maria Elisa Marcondes. **Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO<sub>2</sub>.** *Estudos Avançados*, São Paulo, Brasil, v. 4, n. 9, p. 204–220, 1990. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/8567..> Acesso em: 26 mar. 2023.

PADE, C., GUIMARAES, M. **The CO<sub>2</sub> uptake of concrete in a 100 year perspective.** *Cemente and Concrete Research*, p.1384–1356, 2007.

PARSEKIAN, G. A. 121088 – **Alvenaria Estrutural.** São Carlos: UFSCar/DECiv, 2012. Apostila do curso.

Pauletti, C. (2004) **Análise Comparativa de Procedimentos para Ensaios Acelerados de Carbonatação,** Dissertação, MSc, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brazil.

PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. **Trends in global CO<sub>2</sub> emissions and total greenhouse gas emissions: 2019 report.** Disponível em: <https://www.pbl.nl/en/trends-in-global-co2-emissions>. Acesso em: 17/06/2020.

PLASYNSKI, S., DAMIANI, D. —**Carbon Sequestration through Enhanced Oil Recovery**, 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).

Possan, E.; Fogaça, J.; Pazuch, C. **SEQUESTRO DE CO<sub>2</sub> DEVIDO À CARBONATAÇÃO DO CONCRETO: POTENCIALIDADES DA BARRAGEM DE ITAIPU**. REA – Revista de estudos ambientais (Online) v. 14, n. 2esp, p. 28-38, 2012.

PRESS, F.; GR OTZINGER, J.; SIERVER, R.; JORDAN, T. H. **Para entender a Terra**. 4ª ed. Porto Alegre: Bookam, 2006.

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

ROADMAP tecnológico do cimento: **potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050** / coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019 64 p.

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 CO<sub>2</sub>ll**, 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).

Saldanha, F. J.M, **Desenvolvimento de um Dispositivo de Ensaio de Carbonatação Acelerada com Controle de Humidade Relativa**, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, Covilhã, outubro de 2013.

Salvador Filho, A. J. **Bloco de concreto para alvenaria em construções industrializadas**. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. USP.2007.

Santos, M. 2023. **Identificação dos impactos ambientais causados pela indústria cimenteira no Brasil**. Natural Resources. Mar a Mai 2023- v.13 - n.2.<https://orcid.org/0009-0009-7418-2111>.

Science & Nature, 2022. **Cement Carbon Dioxide Emissions Quietly Double in 20 Years**. Disponível em: <<https://news.wttw.com/2022/06/22/cement-carbon-dioxide-emissions-quietly-double-20-years>>. Acesso em: 12/02/2025.

Scrivener, Snellings, Lothenbach. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. Taylor & Francis Group, LLC, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742, 2016. International Standard Book Number-13: 978-1-4987-3867-5 (eBook - PDF).

Scrivener, John, Gartner. **Eco-efficient Cements: Pottencial, economically, viable solutions a low-CO<sub>2</sub>, Cement based materials industry**. United Nations Environment Programme, Paris 2016.

Scrivener, K. **Hidratação e Microestrutura do Cimento Portland** – Apostila PoliUSP, 2017.

Shao Y, X Lin. **Early-age carbonation curing of concrete using recovered CO<sub>2</sub>**. Concrete International, 2011 - concrete.org. McGill University, Montreal, QC, Canada, 2011.

SHAO Y., MONKMAN S., WANG S., —Market analysis of CO<sub>2</sub> sequestration in concrete building productsII. 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Italy, Ancona, 28–30 June 2010.

SHAO Y., ZHOU X., MONKMAN S., —**A new CO<sub>2</sub> sequestration process via concrete products production**. EIC Climate Change Technology, Canada, Ottawa, 10-12 May 2006.

Shi, C., He, F., Wu, Y., 2012. **Effect of pre-conditioning on CO<sub>2</sub> curing of lightweight concrete blocks mixtures**. Constr. Build. Mater. 26 (1), 257–267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.020>.

Silva, J.G.R. 2007. **Ciclos orbitais ou ciclos de Milankovitch**. Textos de Glossário Geológico Ilustrado. Disponível em: <file:///D:/Documents/Downloads/Ciclos%20deMilankovith.pdf>. Acesso em: 18/06/2020.

Silva R. W. C., Paula B. L. 2009. **Causa do aquecimento global: antropogênica versus natural**. Terræ Didática, 5(1):42-49.

SNIC. **Relatório Anual 2013**. Disponível em: [http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/rel\\_anual\\_2013.pdf](http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf). Acesso em: 05/05/2020.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, Relatório sobre produção anual de cimento Portland. 2012. (accessed May 10, 2022). [http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/rel\\_anual\\_2020.pdf](http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2020.pdf)

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Sobre Produção anual de cimento Portland. 2012**. Disponível em: <http://snic.org.br/pdf/snic-relatorio2012-13web.pdf> . Acesso em: 18 junho 2020.

SEEG - Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa. **Emissões por atividade econômica, Brasil: SEEG**. <https://plataforma.seeg.eco.br/sankey> (accessed Apr. 1, 2022).

SEEG - Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa. **Emissões por atividade econômica, Brasil: SEEG**. [https://plataforma.seeg.eco.br/?highlight=br-emissions-by-sector-energy&\\_gl=1\\*5gtbbr\\*\\_ga\\*MjExNDUyMjY1Ny4xNzM4Njc4MTA0\\*\\_ga\\_XZWSWEJDWQ\\*MTczODY3ODEwMy4xLjAuMTczODY3ODEwMy4wLjAuMA..](https://plataforma.seeg.eco.br/?highlight=br-emissions-by-sector-energy&_gl=1*5gtbbr*_ga*MjExNDUyMjY1Ny4xNzM4Njc4MTA0*_ga_XZWSWEJDWQ*MTczODY3ODEwMy4xLjAuMTczODY3ODEwMy4wLjAuMA..) (acesso em fevereiro, 2025).

Solidia Technologies, 2019. **The Science behind Solidia**. [https://assets.ctfassets.net/jv4d7wct8mc0/5DwEAeEYqsFAYA9UC53EF7/4f8b7566221a8d9cb38f970867003226/Solidia\\_Science\\_Backgrounder\\_11.21.19\\_\\_5\\_.pdf](https://assets.ctfassets.net/jv4d7wct8mc0/5DwEAeEYqsFAYA9UC53EF7/4f8b7566221a8d9cb38f970867003226/Solidia_Science_Backgrounder_11.21.19__5_.pdf).

STUMPP, M. J., 2003, —**Carbonatação de Concretos com Altos Teores de Adições Minerais e de Cal Hidratada**. 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.

Szabó, I. Hidalgo, J.C. Císcar, A. Soria, P.Russ, **Energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions from the world cement industry**, European Commission Joint Research Center (DGJRC), 2003. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaia/fulltext/energy.pdf>.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. 2ª ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009.

TAUIL, C.A.; NESE, F.J.M. 2023. **ALVENARIA ESTRUTURAL**. 2. ed. – São Paulo : Blucher, 2023. 314 p. ISBN 978-65-5506-765-1.

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).

UN ENVIRONMENT PROGRAM (UNEP). **Relatório da Global Alliance aponta o caminho para reduzir o impacto da construção civil**. Disponível em: <https://www.unenvironment.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/relatorio-da-global-alliance-aponta-o-caminho-para>. Acesso em: 13/11/2020.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2015). **World Urbanization Prospects: The 2014 Revision**, (ST/ESA/SER.A/366).

Vasconcellos, P.C. **EFEITO ESTUFA: CAUSAS ANTROPOGÊNICAS**. São Paulo.2012. Disponível em: <file:///D:/Documents/Downloads/EfeitoEstufaCausasAntopognicas.pdf>. Acesso em: 23/03/2020.

- Varadi F.; B. Runnegar; M. Ghil (2003). “**Successive refinements in Long-Term Integrations of Planetary Orbits**”. The Astrophysical Journal. 592: 620–630.
- Venhuis M.A., E.J. Reardon, **Vacuum method for carbonation of cementitious waste forms**. Environ. Sci. Technol. 35 (2001).
- 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.
- YAN, J; ZHANG, Z. **Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)**. Applied Energy, Amsterdã, v. 235, p. 1289–1299, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.019>>.
- YING-YU, L.; QUI-DONG, W. **The mechanism of carbonation of mortars and the dependence of carbonation on pure structure**. In: CONCRETE DURABILITY, [s. ed], 1987, Detroit. Proceedings...Detroit, ACI, 1987. p. 1915 – 1943 (SP-100).
- YE, G., 2003, —**Carbon Dioxide Uptake By Concrete Through Early-Age Curing**. M.Sc Dissertation, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal, Canadá.
- Zhan, B; Poon, C, Caijun, S. **CO<sub>2</sub> curing for improving the properties of concrete blocks containing recycled aggregates**. Cement & Concrete Composites 42 (2013) 1–8.
- ZHANG, Z et al. **Recent advances in carbon dioxide utilization**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Amsterdã, v. 125, n. March, p. 109799, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109799>.
- Zivica, V., A. Bajza, **Acidic attack of cement based materials – a review: part 1**. Principle of acidic attack, Constr. Build. Mater. 15 (2001).
- Walker, M. 2005. **A provisional Quaternary and Neogene lithostratigraphic framework Great Britain**. Netherland Journal of Geosciences, vo. 84, n.2, pp. 87-107.

WOLF, T. 2024. The Chemistry of Clinker. Disponível em: <https://carbonre.com/the-chemistry-of-clinker/>. Acesso: 12/02/2025.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. **Global Cement Industry Energy and CO<sub>2</sub> Performance- Getting the Numbers Right, 2009**. 44p. (CSI Report).

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. **Global Cement Sustainability Initiative (CSI) Progress Report, 2005**. 28p. (CSI Report).

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. **Cement Sustainability Initiative. Cement technology roadmap 2009: carbon emissions reductions up to 2050**. Paris, 2010.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. **Global Cement Database on CO<sub>2</sub> and Energy Information – “ Getting the Numbers Right” (GNR)**, 2011.

World Economic Forum, 2022. **Analysis: Global CO<sub>2</sub> Emissions from Fossil Fuels Hits Record High in 2022**. <https://www.weforum.org/agenda/2022/11/global-co2-emissions-fossil-fuel>.