

ROSELI OLIVEIRA GUEDES MARTINS

**DESEMPENHO ESTRUTURAL E DURABILIDADE À CARBONATAÇÃO DE  
ALVENARIAS DE BLOCOS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2017

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

M386d  
2017  
Martins, Roseli Oliveira Guedes, 1977-  
Desempenho estrutural e durabilidade à carbonatação de  
alvenarias de blocos de concreto / Roseli Oliveira Guedes  
Martins. – Viçosa, MG, 2017.  
vii, 64f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Rita de Cássia Silva Sant Anna Alvarenga.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Alvenaria. 2. Blocos de concreto. 3. Materiais de  
construção - Vida útil. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação  
em Engenharia Civil. II. Título.

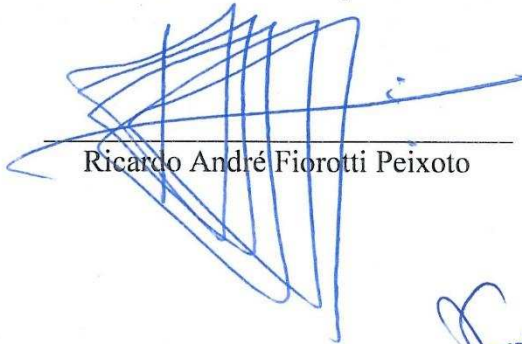
CDD 22 ed. 624.1

ROSELI OLIVEIRA GUEDES MARTINS


**DESEMPENHO ESTRUTURAL E DURABILIDADE À CARBONATAÇÃO DE  
ALVENARIAS DE BLOCOS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 9 de março de 2017.



Ricardo André Fiorotti Peixoto



Reginaldo Carneiro da Silva



André Fernando de Oliveira  
(Coorientador)



Leonardo Gonçalves Pedroti  
(Presidente da banca)

Dedico esta dissertação

Aos meus pais Luiz Otávio Pereira Guedes e Araci de Azevedo  
Oliveira Guedes, por seu amor incondicional e eterno apoio.

Ao meu marido e companheiro de jornada, Fábio Lúcio Martins  
Neto, pelo seu carinho, compreensão e ajuda. E a nosso amado e  
querido filho Elias Guedes Martins que são parte da minha alegria  
e força.

Aos amigos que Viçosa me deu e que espero levar por toda vida,  
por suas companhias e conselhos. Pois que muitas vezes é difícil  
estar longe de nosso lar de origem.

E a todos que direta ou indiretamente me ajudaram a concretizar  
esta conquista.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que com sua infinita bondade e justiça me concedeu a oportunidade e a graça da vida, pelo que sou e pelas conquistas que obtive até os dias de hoje.

À professora orientadora Rita de Cássia pelo estímulo necessário e orientação para desenvolver o trabalho e ao Departamento de Engenharia Civil da UFV.

Agradeço aos professores Leonardo Pedroti, André Fernando Oliveira, Gustavo de Souza Veríssimo e José Ivo Ribeiro Júnior que espontaneamente colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho compartilhando suas experiências e saber.

Aos companheiros de pós e amigos Gustavo Emílio, André Candian, Anderson Gusmão, Caio Torres, Lorena Sathler e Filipe Caldeira por fazerem parte também desta caminhada e a tornarem mais aprazível.

Aos companheiros estudantes da pós-graduação no Departamento de Química Francielle Chagas, Cristiane Almeida e Jaderson Milagres pela ajuda.

Aos estudantes de graduação e estagiários de iniciação científica, Gustavo Nalon, Marina Caetano, Beatryz Mendes, Igor Claus, Renan Rocha, Marcelo Alves, Paola e Andrés Mercado pelo apoio na realização da pesquisa.

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção, José Carlos, José Dias, Antônio e especialmente Wellington Fernandes, que colaboraram e ajudaram com os experimentos realizados nesse trabalho.

A empresa Blojaf pela doação dos blocos e por incentivarem a realização da pesquisa.

Agradeço à Universidade Federal de Viçosa, apoio importante para a realização e conclusão desse trabalho.

Agradeço à CAPES pela bolsa de estudo concedida.

## **AGRADECIMENTOS ESPECIAIS**

Agradeço aos meus pais Luiz Otávio Pereira Guedes e Araci de Azevedo Oliveira Guedes, pelo exemplo, pela força e confiança em tudo que faço.

A meu querido esposo, Fábio Lúcio Martins Neto pelo apoio, orientação, companheirismo, amor e amizade.

A meu amado filho, Elias Guedes Martins pela alegria constante, ensinamentos, companheirismos e amor incondicional.

Agradeço às amigas Tatiana Barrela, Ana Flávia Remiggi, Lili Mafra, Cristiane Simões, Monalisa Silveira e aos pais sempre juntos pela amizade e carinho.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>1</b>
1.2 – REFERÊNCIAS .....	3
<b>CAPÍTULO 2 – CONSTRUÇÃO E USO DE UMA CÂMARA DE CARBONATAÇÃO ACELERADA PROJETADA E MONTADA EM LABORATÓRIO</b> .....	<b>4</b>
2.1 – INTRODUÇÃO .....	4
2.2 – REFERENCIAL TEÓRICO .....	5
2.3 – MATERIAL E MÉTODOS .....	8
2.4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	18
2.5 – CONCLUSÕES .....	21
2.6 – REFERÊNCIAS .....	22
<b>CAPÍTULO 3 – AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL E DURABILIDADE DA ALVENARIA DE CONCRETO USANDO ENSAIO ACELERADO DE CARBONATAÇÃO</b> .....	<b>24</b>
3.1 – INTRODUÇÃO .....	24
3.2 – REFERENCIAL TEÓRICO .....	26
3.3 – MATERIAL E MÉTODOS .....	31
3.4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	37
3.5 – CONCLUSÕES .....	46
3.6 – REFERÊNCIAS .....	47
<b>CAPÍTULO 4 – CONCLUSÃO GERAL</b> .....	<b>50</b>
4.1 – SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	51
<b>ANEXO A – CÓDIGO DA PROGRAMAÇÃO E DIAGRAMA DE LIGAÇÃO DO ARDUÍNO</b> .....	<b>52</b>
<b>ANEXO B – CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS</b> .....	<b>59</b>
<b>ANEXO C – CARACTERIZAÇÃO DOS GRAUTES E SEUS MATERIAIS</b> .....	<b>62</b>

## RESUMO

MARTINS, Roseli Oliveira Guedes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2017. **Desempenho estrutural e durabilidade à carbonatação de alvenarias de blocos de concreto.** Orientadora: Rita de Cássia Silva Sant'Ana Alvarenga. Coorientadores: Leonardo Gonçalves Pedroti e André Fernando de Oliveira.

Este trabalho tem como objetivo estudar as propriedades mecânicas e de durabilidade da alvenaria estrutural de blocos de concreto utilizando ensaios recomendados pela norma de desempenho ABNT NBR 15575:2013. Para tanto, foram avaliados blocos inteiros e meios blocos da família (15 x 40) cm com resistência nominal à compressão de 4,5 MPa, 8 MPa e 12 MPa. Utilizando os métodos de avaliação estabelecidos pela ABNT NBR 12118: 2014, os blocos foram adquiridos e avaliados quanto à: análise dimensional, absorção de água, área líquida, resistência à compressão, módulo de deformação e aplicação do modelo de previsão do avanço de frentes de carbonatação, este último solicitado como parâmetro na ABNT NBR 15575-2: 2013. Executou-se blocos, de todos os lotes, grauteados com grautes de resistência (15, 20, 25 MPa), produzindo também corpos de prova de graute, que foram ensaiados quanto ao avanço da frente de carbonatação, resistência à compressão e módulo de deformação. Por meio dessas avaliações foi possível estabelecer o desempenho estrutural e durabilidade do material analisado de acordo com os parâmetros estabelecidos pela norma de desempenho.

## ABSTRACT

MARTINS, Roseli Oliveira Guedes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2017. **Structural performance and durability to carbonation of masonry of concrete blocks.** Adviser: Rita de Cássia Silva Sant'Ana Alvarenga. Co-advisers: Leonardo Gonçalves Pedroti and André Fernando de Oliveira.

This work aims to study the mechanical properties and durability of structural masonry of concrete blocks using tests recommended by the performance standard ABNT NBR 15575: 2013. For that, the family blocks (15 x 40) cm with nominal compressive strength of 4.5 MPa, 8 MPa and 12 MPa were evaluated. Using the evaluation methods established by ABNT NBR 12118: 2014, the blocks were acquired and evaluated for: dimensional analysis, water absorption, net area, compressive strength, modulus of deformation and application of the forward frontier prediction model Carbonation, the latter being requested as a parameter in ABNT NBR 15575-2: 2013. Blocks of all portion were grouting with resistance groute (15, 20, 25 MPa), also producing groute specimens, which were tested for carbonation front advancement, compressive strength and modulus of deformation. Through these evaluations it was possible to establish the structural performance and durability of the material analyzed according to the parameters established by the performance standard.

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

Possan (2013) afirma que com o passar dos anos, ocorreram grandes mudanças nos materiais de construção, ambiente de exposição e procedimentos de cálculos. Verificou-se que o concreto armado apresentava limitações e que somente o parâmetro resistência era insuficiente para atender às exigências de projeto. Então se enfatizou a durabilidade das estruturas e dos seus materiais constituintes, aliando posteriormente este conceito ao desempenho das mesmas, ou seja, ao comportamento em uso.

A ABNT NBR 15.575:2013, norma de desempenho veio para adicionar à construção civil novos parâmetros de construção e identificar um caminho para a qualidade das construções. Mas trata-se de uma normativa que ainda carece de pesquisas para delimitar alguns métodos de ensaios sugeridos em seu texto. E também possíveis ajustes para melhor estabelecer a avaliação dos materiais que compõem a matéria tratada na norma.

Este trabalho pretende estudar o desempenho estrutural e a durabilidade à carbonatação de alvenarias de blocos de concreto. Estruturas compostas por artefatos de concreto apresentam comportamentos variados em função do meio ambiente no qual estão inseridos. De acordo com Oliveira *et al.* (2006) para avaliação da durabilidade é possível recorrer a três metodologias: ensaios de envelhecimento acelerado, ensaios de envelhecimento natural e estudos de deterioração em uso. Nesta pesquisa foram realizados alguns ensaios de envelhecimento acelerado.

Segundo Parsekian *et al.* (2013) um elemento em alvenaria é composto de alguns ou todos os componentes: bloco, argamassa, graute e armaduras. O conhecimento das interações entre esses materiais e de outros aspectos que afetam as propriedades físicas e mecânicas do elemento é necessário para entender o funcionamento básico da alvenaria.

No presente trabalho foi estudada a aplicação da norma de desempenho ABNT NBR 15.575:2013 para a alvenaria estrutural de blocos de concreto, quanto à previsão do avanço da frente de carbonatação. Para tanto, foram avaliados blocos inteiros e meios blocos da família (15 x 40) cm com resistência nominal à compressão de 4,5 MPa, 8 MPa e 12 MPa. Utilizando os métodos de avaliação estabelecidos pelas normas ABNT NBR 12118:2014, 6136:2014, 15961:2011 e ABNT NBR 15575-2:2013 os blocos foram adquiridos e avaliados quanto à: absorção de água, resistência à compressão, módulo de deformação e aplicação do modelo de previsão do avanço de frentes de carbonatação.

Através destas avaliações foi possível estabelecer o desempenho estrutural e durabilidade do material analisado de acordo com os parâmetros estabelecidos pela norma referida.

Os grautes utilizados neste ensaio foram produzidos para que tivessem diferentes resistências à compressão (15, 20 e 25 MPa), e pudesse preencher os blocos, para identificar qual a sua contribuição no desempenho estrutural da alvenaria.

Para realizar o ensaio de carbonatação acelerada produziu-se um equipamento no laboratório que foi, projetado, executado e testado durante a pesquisa para poder realizar os ensaios previstos para este trabalho.

Os ensaios de carbonatação foram realizados nos blocos de diferentes resistências à compressão preenchidos com os grautes de diferentes traços. Adicionalmente foram realizadas comparações de blocos sem graute e também dos corpos de prova somente de graute. Nestas condições puderam ser avaliados como o graute pode influenciar o desempenho estrutural e a durabilidade da alvenaria estrutural.

Foram realizados ensaios de carbonatação acelerada para prever o avanço da frente de carbonatação no tempo. Este avanço pode produzir uma despassivação da armadura e levar a estrutura ao colapso em um tempo diferente do estabelecido como vida útil da estrutura. Como a armadura pode se localizar no centro do vazado ou próximo à borda, sempre observando o cobrimento necessário, é importante prever o tempo que o processo de carbonatação leva para poder avançar sobre as paredes dos blocos e chegar ao graute utilizado na execução da edificação.

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o comportamento da alvenaria de blocos de concreto, através da análise de blocos e grautes, com diferentes resistências à compressão. Os blocos preenchidos ou não com grautes de diferentes resistências à compressão, foram verificados quanto ao desempenho estrutural e à durabilidade na carbonatação.

A presente dissertação trata da avaliação da alvenaria estrutural de concreto quanto ao desempenho e à durabilidade à carbonatação e está organizada na forma de capítulos e artigos científicos, conforme uma das alternativas normativas da Pró-Reitoria de Pós-Graduação da Universidade Federal de Viçosa para apresentação de dissertações e teses. Assim sendo, o texto se encontra dividido de acordo com os trabalhos desenvolvidos para executar a pesquisa.

No capítulo 1 trata da introdução geral da pesquisa e descreve o planejamento da pesquisa como um todo e também a forma como o trabalho ficou organizado.

O capítulo 2 é referente à ao desenvolvimento do projeto da câmara de carbonatação construída durante a pesquisa, para realizar o ensaio de desenvolvimento da frente de carbonatação. Neste capítulo, é apresentado o projeto da câmara, bem como as etapas de execução e calibração desse equipamento para que ele ficasse em condições de realizar os ensaios.

O capítulo 3 são descritos os ensaios acelerados de carbonatação com os grautes e com os blocos grauteados e é apresentada a previsão de vida útil baseada neste ensaio para alvenaria de concreto grauteada, utilizando o modelo de previsão de vida útil de Possan (2010) para delimitar uma previsão de vida útil de projeto (VUP) dos materiais estudados.

A dissertação é encerrada com o capítulo 4, onde é apresentada a conclusão geral da pesquisa.

As referências bibliográficas são apresentadas ao final de cada capítulo.

## **1.2 – REFERÊNCIAS**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – **NBR 12.118. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio.** São Paulo, 2014. 20p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – **NBR 15.575-1. Edificações habitacionais - Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais.** São Paulo, 2013. 71p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – **NBR 15.575-4. Edificações habitacionais - Desempenho – Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas.** São Paulo, 2013. 63p.

OLIVEIRA, D. F.; SANTOS, V.S.; LIRA, H. L.; MELO, A. B.; NEVES, G.A. **Durabilidade de compósitos de concreto de Cimento Portland produzidos com agregados reciclados da construção civil.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Campina Grande, v.1.2 ,p 30-36, 2006.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural.** EdUFSCar, São Carlos, 2 ed., 2013.

POSSAN, E; **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano.** Tese (doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A.. **Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral.** Revista Técnico Científica, v. 1, n. 1, 2013.

## **CAPÍTULO 2 – CONSTRUÇÃO E USO DE UMA CÂMARA DE CARBONATAÇÃO ACELERADA PROJETADA E MONTADA EM LABORATÓRIO**

### **RESUMO**

*Pretende-se neste capítulo demonstrar o projeto, a montagem e as condições de utilização de uma câmara de carbonatação acelerada, parcialmente automatizada e possível de ser reproduzida para uso em laboratórios. A câmara se destina a avaliar a durabilidade de diferentes materiais de construção, principalmente os materiais compósitos. A princípio produziu-se um projeto que se orientou pelas dimensões dos corpos de prova e pela disponibilidade de material constituinte para executar a câmara. Num segundo momento, a câmara foi construída e testada quanto à estanqueidade. Na terceira etapa, realizaram-se os primeiros ensaios onde, a partir dos resultados obtidos, verificou-se a possibilidade de melhorar o projeto com um sistema automatizado, por meio de um arduino programado com um algoritmo de controle da umidade e registro da temperatura presente no interior da câmara. Na etapa seguinte, foi executada uma calibração dos sensores conectados ao sistema de automação e executou-se também um teste de 28 dias. Pode-se concluir que foi possível executar o projeto de construção de uma câmara de carbonatação acelerada em laboratório, com desempenho satisfatório.*

**Palavras-chave:** câmara de carbonatação, ensaio acelerado de carbonatação, propriedades dos materiais.

### **2.1 - INTRODUÇÃO**

Em seu estudo sobre a relação entre urbanização, uso de energia e emissão de carbono, Wang *et al.* (2016) chegam à conclusão que os resultados indicam claramente que a urbanização pode influenciar significativamente o consumo de energia elétrica e a emissão de carbono. E que o efeito do uso de energia elétrica no aumento das emissões de carbono é maior que o efeito da urbanização.

O aumento das emissões de dióxido de carbono na atmosfera afeta a vida humana na terra e também está interferindo na durabilidade das estruturas produzidas com material cimentício.

Segundo Jung *et al.* (2011), a carbonatação do concreto é um dos principais fatores que afetam a durabilidade das estruturas executadas com esse material. O processo de carbonatação ocorre quando o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) da atmosfera penetra nos poros de concreto e reage com o hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  da pasta de cimento. A carbonatação do concreto pode acelerar o processo de corrosão das barras de aço, reduzindo a alcalinidade do concreto e destruindo a camada de proteção da armadura.

Em condições normais, a armadura de aço incorporada dentro do concreto comum é protegida contra a corrosão pela elevada alcalinidade do concreto e por um revestimento adequado. No entanto, segundo LO *et al.* (2016), a carbonatação interfere diretamente na resistência, uma vez que durante esse processo o pH do concreto que é relativamente alto (cerca de 12) diminui para menos que 9, expondo a armadura à corrosão.

Uma forma de avaliar como o fenômeno da carbonatação afeta o concreto é o uso de câmaras de carbonatação, esse processo de aceleração da carbonatação é realizado adicionando concentrações de  $\text{CO}_2$  superiores à encontrada na atmosfera em ambientes controlados. Portanto, a determinação da concentração de  $\text{CO}_2$  presente nas câmaras é de suma importância para estudo e avaliação o processo.

Neste trabalho foi projetada e executada uma câmara de carbonatação acelerada com a proposta de verificar o desenvolvimento da frente de carbonatação em materiais compósitos.

## **2.2 – REFERENCIAL TEÓRICO**

Para Sheng e Guo (2016), as emissões de dióxido de carbono geradas por uma variedade de atividades humanas têm aumentado ao longo de décadas, sendo a principal causa do aquecimento global. Um grande número de pesquisas explora a relação entre a urbanização, um dos indicadores mais plausíveis para o desenvolvimento econômico e estrutura demográfica, e as emissões de dióxido de carbono.

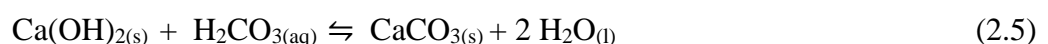
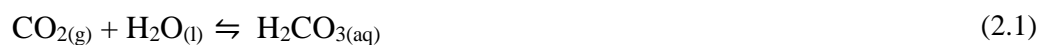
Segundo Villain *et al.* (2007), no concreto armado, a armadura de aço é fisicamente e quimicamente protegida da corrosão pelo concreto circundante. A solução intersticial dos poros constitui um ambiente muito alcalino (pH próximo de 13,5), no qual as barras são passivadas. Quando o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) da atmosfera penetra nos poros do concreto, ele se dissolve na solução intersticial e, assim, modifica os equilíbrios químicos entre a solução e os hidratos.

Pauletti (2009) indica que a carbonatação é fenômeno físico-químico de neutralização da solução intersticial dos poros do concreto, tendo como consequência deletéria a destruição da película passivadora que envolve o aço, deixando o material suscetível à corrosão da armadura. As reações ocorrem principalmente com o CO<sub>2</sub> da atmosfera, que penetra a partir da superfície para o interior do material. Dentro do período de vida útil previsto para uma determinada estrutura, deve-se evitar que a profundidade carbonatada atinja a armadura, ou seja, supere a espessura de cobrimento.

Kulakowsk (2002) diz que na reação de carbonatação são consumidos os compostos essencialmente alcalinos da pasta hidratada de cimento como o hidróxido de potássio (KOH), o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>). Desta maneira, o pH da pasta de cimento que é de cerca de 12,6 passa a valores em torno de 9.

Segundo Lo *et al.* (2016), a carbonatação natural do concreto é uma reação química entre o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no ar e produtos de hidratação do cimento do concreto. O dióxido de carbono atmosférico dissolve-se na água dos poros e produz um ácido carbônico fraco (ver Eq. 2.1) que se dissocia e reage com o hidróxido de cálcio (ver Eq. 2.5) e depois com os hidratos de silicato de cálcio (C-S- H) (ver Eq. 2.6), para formar carbonato de cálcio e água. Sem dúvida, essas reações diminuem a alcalinidade do concreto.

As equações químicas que descrevem esse processo podem ser observadas pelas Equações 2.1 a 2.6. Iniciando com a difusão do CO<sub>2</sub> da atmosfera na fase gasosa e sua posterior dissolução na água presente nos poros do concreto, em seguida ocorre a dissolução dos compostos álcalis presentes no concreto. Há formação do carbonato de cálcio, que progressivamente reduz o volume dos poros e causa a evaporação da água.



Existem muitas formas de realizar o ensaio de avanço da frente de carbonatação, uma delas é o ensaio acelerado de carbonatação, executado através da avaliação de amostras de concretos submetidas a uma carbonatação acelerada em câmaras de

carbonatação. Há diversas maneiras de construí-las, e diferentes formas de controlar o ambiente interno das câmaras para que ela possa manter a temperatura, umidade e concentração de CO<sub>2</sub> dentro dos parâmetros estabelecidos por cada inventor. Muitas vezes a concentração de CO<sub>2</sub> é determinada pela capacidade de reação dos componentes cimentícios com o dióxido de carbono.

Costa *et al.* (2006) indicam que as mudanças de concentração do gás dentro da câmara podem ser medidas. Para isso, amostras de ar do interior da câmara são coletadas em intervalos de tempo previamente determinados, sendo a variação na concentração dos gases do efeito estufa (dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)) quantificadas *in situ* quando do uso de sistemas automatizados, ou posteriormente, no laboratório, por infravermelho ou cromatografia gasosa.

Castellote *et al.* (2009) fizeram ensaios com ambiente controlado que apresentava umidade de equilíbrio de 65%, temperatura de 22°C e concentração de 0,03% (natural) e 3%, 10% e 100% (acelerado). Neste trabalho indicam que para a curva com 100% de CO<sub>2</sub> a estabilização está entre 7 e 40 dias, e com relação à velocidade de carbonatação, embora a curva de 100% seja mais acentuada (formando maior ângulo com o eixo das abcissas), não é possível afirmar que tenha carbonatado mais rápido, pois o número de leituras é limitado.

De acordo com Helene (1993) o ingresso de CO<sub>2</sub> através do concreto é uma consequência direta da estrutura porosa do material, e depende do mecanismo de transporte de difusão para sua ocorrência. A difusão acelera à medida encontra uma disponibilidade de H<sub>2</sub>O no interior dos poros para as reações apresentadas nas Equações 2.1, 2.4 e 2.6. Sendo assim, a facilidade da difusão do CO<sub>2</sub> depende da umidade presente nos poros do concreto, com a UR ≤ 50% falta água para ocorrer a reação de carbonatação e nas condições em que a umidade se encontra acima de 95% praticamente não há carbonatação devido ao excesso de água nos poros do concreto. A reação de carbonatação aumenta ao controlar a umidade relativa do ambiente até atingir um patamar entre 65 a 85% é quando os poros têm água suficiente para acelerar a difusão do CO<sub>2</sub> sem que haja uma obstrução total dos poros.

McGrath (2005) construiu uma câmara de carbonatação acelerada produzida com dois tambores plásticos de duzentos litros (200 l) onde controlava a umidade para variar entre 58% e 62% usando uma câmara de fornecimento de ar condicionado e controlava a temperatura entre 23°C e 26°C através de uma lâmpada de 250W.

## 2.3 - MATERIAL E MÉTODOS

### 2.3.1 – PROJETO DA CÂMARA

A câmara de carbonatação inicialmente foi projetada para realizar dois procedimentos. O primeiro é a retirada do dióxido de carbono da atmosfera onde se encontravam os corpos de prova no interior da câmara, denominado de sazonalamento. Para realizar este processo utilizava-se uma solução de KOH que reagia com o CO<sub>2</sub> presente na atmosfera da câmara e produzia K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O reduzindo a quantidade de CO<sub>2</sub> no interior da câmara a 2,5 % da quantidade de dióxido de carbono presente na atmosfera. E o segundo procedimento é a carbonatação de corpos de prova de concreto e de material cimentício. Verificou-se que ao construir a câmara alguns parâmetros precisam ser bem ajustados e estabelecidos para que ela funcione de forma adequada, três destes parâmetros são umidade relativa, temperatura ambiente e concentração de dióxido de carbono.

O projeto usou um reservatório de água como recipiente para construir a câmara e executar o fluxo de CO<sub>2</sub> e pretendia realizar um fluxo de forma simplificada. A princípio optou-se por um método químico de sazonalamento e também de desumidificação como pode ser observado na Figura 2.1. Onde a retirada do dióxido de carbono, no período de sazonalamento, era efetuada com um direcionamento do fluxo da atmosfera no interior da câmara para uma tubulação que direcionava para uma solução de hidróxido de potássio (KOH) e continuava pela tubulação para um recipiente contendo sílica gel que seria responsável pela retirada da umidade presente na atmosfera.

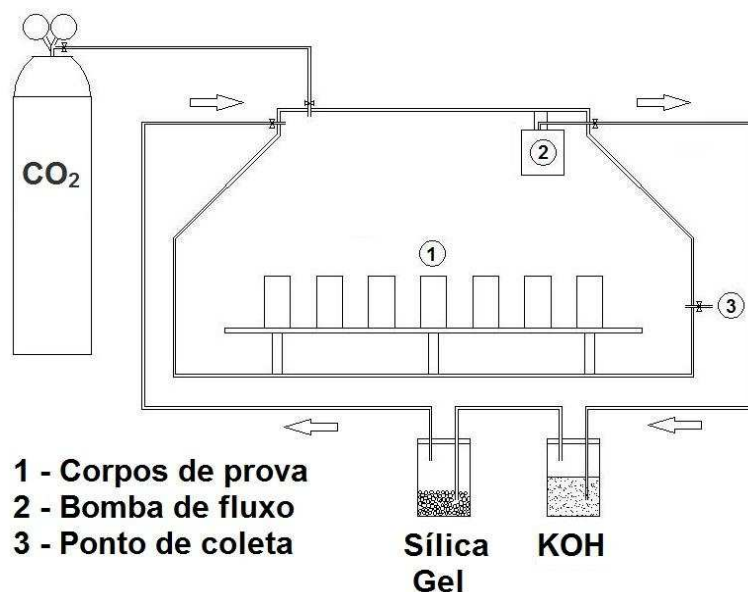


Figura 2.1 – Croqui inicial da câmara.

Para testar este projeto foram produzidos corpos de prova que foram ensaiados quanto ao desenvolvimento da frente de carbonatação. Neste ensaio preliminar, verificou-se a temperatura que se encontrava dentro dos padrões determinados para o ensaio. Porém a umidade da câmara permanecia muito alta durante o ensaio e que as leituras de concentração de CO<sub>2</sub> no interior da câmara era muito diferente quando se retiravam amostras na parte superior e na parte inferior da câmara. O que significava que o fluxo do dióxido de carbono no interior da câmara não era eficiente. Fez-se então uma modificação no projeto introduzindo na câmara um aparato com coolers instalados no interior da câmara, como pode ser visto na Figura 2.2, que iriam melhorar o fluxo de CO<sub>2</sub>. E também foi adicionada uma solução de cloreto de sódio (NaCl) para auxiliar na retirada de umidade do ambiente da câmara.

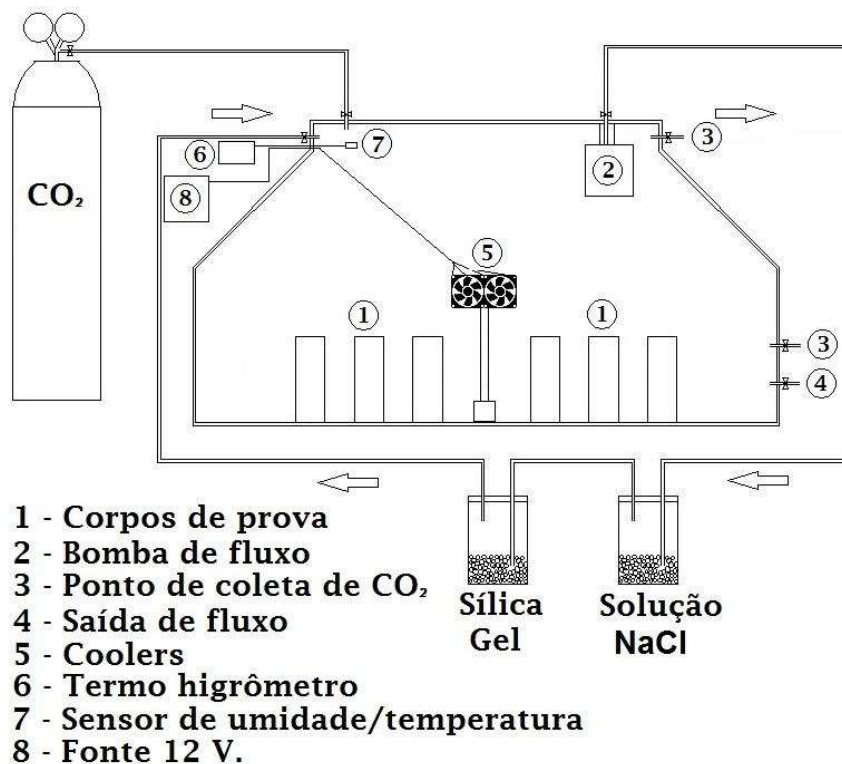


Figura 2.2 – Croqui da primeira adaptação da câmara de carbonatação.

Este novo projeto foi então testado com novos corpos de prova de concreto e verificou-se que tanto o fluxo no interior da câmara continuava muito diferente ao se fazer as leituras nos diferentes pontos de coleta. E a umidade ainda estavam em níveis fora dos desejados.

Para melhorar em definitivo o controle da umidade no interior da câmara foi instalado um desumidificador. Ele possui no seu interior um sistema de sucção da atmosfera que direciona o ar para uma serpentina e condensa o ar direcionando a água para um reservatório vedado em seu interior. E devolve o ar sem umidade por um sistema de ventilação interno. Sendo assim pode-se substituir também os coolers por este desumidificador que fazia com que o fluxo do CO<sub>2</sub> presente no interior da câmara ficasse mais constante e a concentração de dióxido de carbono nos dois pontos de coleta fossem iguais estatisticamente. O projeto final está apresentado na Figura 2.3.

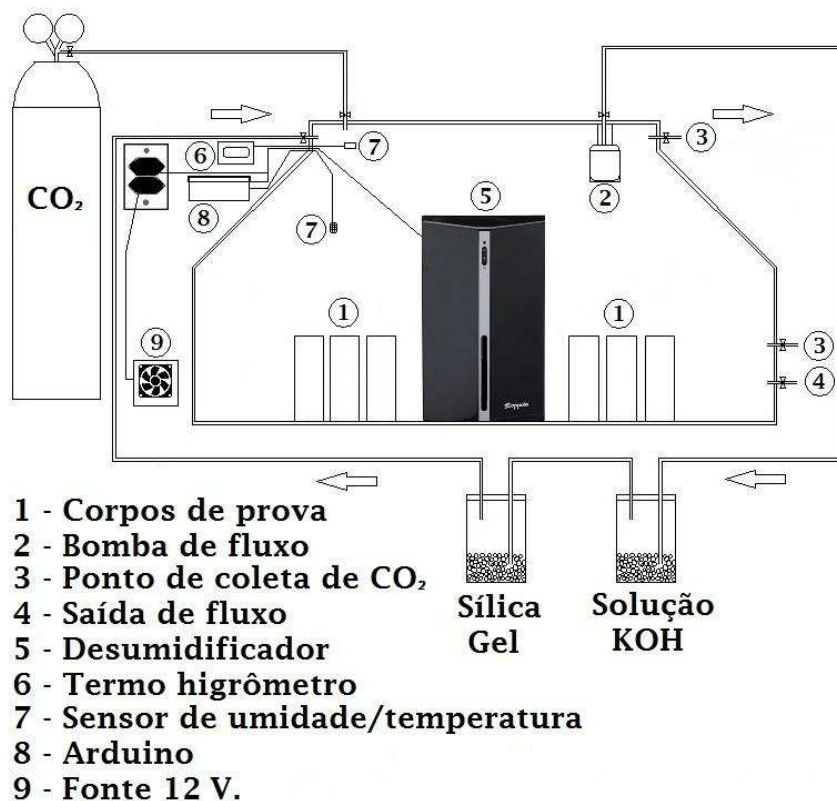


Figura 2.3 – Croqui final da câmara.

### 2.3.2 – CONSTRUÇÃO DA CÂMARA

O aparelho de câmara de carbonatação acelerada foi construído usando um tanque de água da marca Fortlev com capacidade para trezentos e dez litros, a tampa original do reservatório foi substituída por uma placa de polietileno cortada conforme desenho apresentado na Figura 2.4, o tanque foi vedado com borracha de alta densidade e tampado com a placa de polietileno aparafusada, parafusos e porcas de material inoxidável.

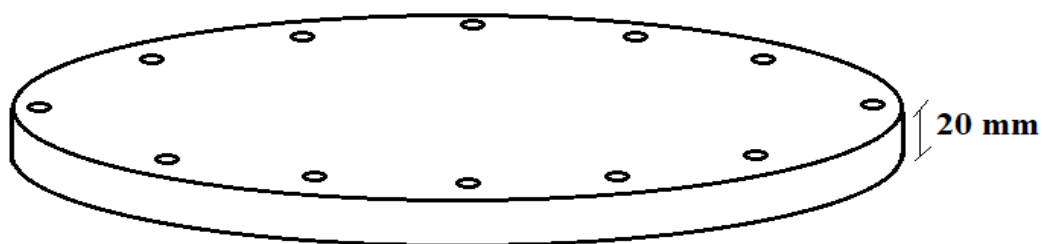


Figura 2.4 – Croqui em 3D da tampa produzida para a câmara de carbonatação.

Na tampa, adaptaram-se duas conexões de engate rápido para gás, em uma delas o  $\text{CO}_2$  é injetado e a outra é usada quando se planeja fazer a retirada do dióxido de carbono antes de iniciar a carbonatação.

A retirada do  $\text{CO}_2$  é feita forçando o fluxo da atmosfera no interior da câmara passar por uma solução de hidróxido de potássio (KOH) com concentração de  $4 \text{ mol.L}^{-1}$ . Esta solução reage com o dióxido de carbono, formando carbonato de potássio e água (ver Eq. 2.7), que permanecem na solução. Isto é feito com o auxílio de uma bomba de fluxo. Em seguida, esta atmosfera é direcionada para um recipiente com sílica gel, que absorve a sua umidade e, então, a retorna para o interior da câmara, preservando assim a sua umidade.



Em duas das protuberâncias existentes próximas à tampa no reservatório, foram adaptadas conexões tipo cap: uma delas perfurada e com o furo tampado por uma rolha de borracha butílica (Figura 2.5), que permitia o uso de uma seringa para retiradas de amostras da atmosfera dentro da câmara, e a outra perfurada para permitir a passagem de fiação de energia (Figura 2.6 – item 1), para alimentar o desumidificador Cappoia ou a bomba de fluxo presentes no interior da câmara, bem como a fiação dos sensores ligados ao arduino que controlam a umidade e registram a temperatura no interior da câmara.



Figura 2.5 – Montagem da câmara. Destaque da conexão cap instalada.

Para injetar o dióxido de carbono na câmara utilizou-se uma mangueira cristal atóxica (Figura 2.6 – item 2) com diâmetro de meia de polegada conectada a uma conexão T para gás (Figura 2.6 – item 3). Em cada saída da conexão T instalou-se um tubo de silicone (Figura 2.6 – item 4), fixada com o auxílio de uma braçadeira. Estas mangueiras, por sua vez, se conectam a um mini registro para gás (Figura 2.6 – item 5) com engate rápido e uma mangueira de polietileno (Figura 2.6 – item 6) de um quarto de polegada levava o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) até o outro engate rápido presente na tampa da câmara.

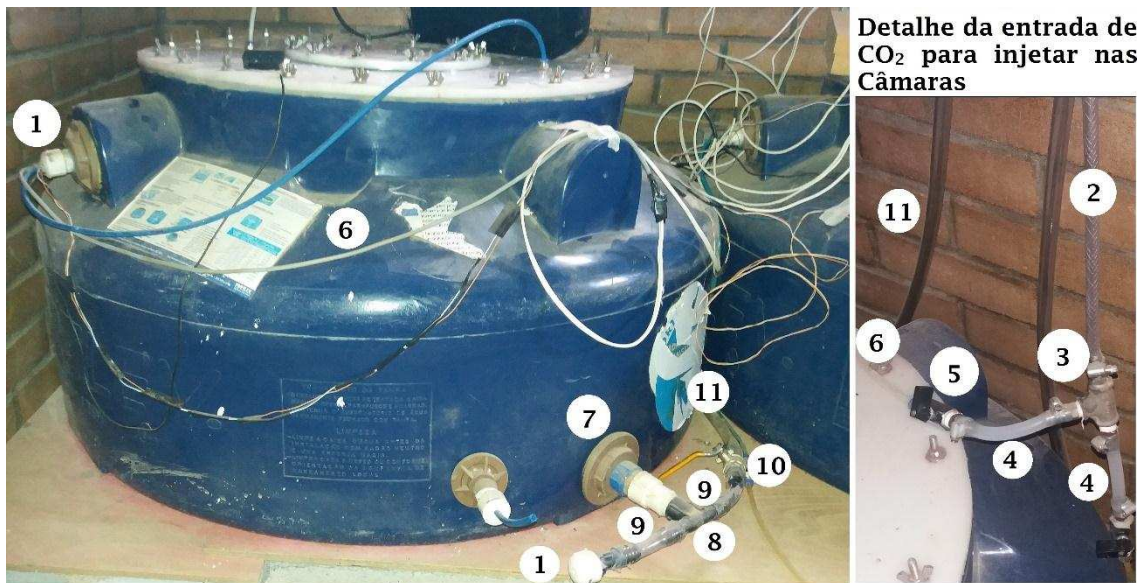


Figura 2.6 – Itens instalados na construção da câmara.

Onde:

- 1 – Conexão tipo Cap com fiação de conexão do arduino.
- 2 – Mangueira cristal atóxica que leva o CO<sub>2</sub> do cilindro até as Câmaras 1 e 2.
- 3 – Conexão tipo T para gás que conecta o CO<sub>2</sub> do e direciona para cada Câmara.
- 4 – Tubo de silicone hospitalar 207 com 14 x 8 mm de diâmetro externo e interno.
- 5 – Mini registro de esfera para gás fêmea com um conector pneumático macho acoplado.
- 6 – Mangueira de polietileno de ¼ de polegada.
- 7 – Conexão tipo flange para adaptar entradas e saídas das Câmaras.
- 8 – Conexão tipo T de irrigação.
- 9 – Conexão de irrigação tipo macho fêmea rosqueada.
- 10 – Registro de gás reto fêmea
- 11 – Mangueira tipo cristal de ½ polegada.

Na parte inferior do tanque existe uma conexão tipo flange (Figura 2.6 – item 7) que vem acoplada ao tanque de fábrica. Neste ponto, adaptou-se uma luva rosqueada internamente, um redutor e uma conexão tipo T de irrigação (Figura 2.6 – item 8) que se conectava a uma mangueira tipo cristal nas suas duas saídas (Figura 2.6 – item 9). Em um dos lados, esta mangueira se encaixava em uma conexão de irrigação rosqueada externamente que estava adaptada a um registro de gás (Figura 2.6 – item 10) e, na outra face do registro, havia outra desta conexão de irrigação na qual também se encaixava uma mangueira tipo cristal (Figura 2.6 – item 11), que direcionava a atmosfera da câmara para a área externa do prédio no momento em que eram realizados os fluxos de dióxido de carbono. No outro lado da conexão tipo T de irrigação, a mangueira tipo cristal (Figura 2.6 – item 9) possuía uma conexão de irrigação rosqueada fixada a ela e uma conexão tipo cap (Figura 2.6 – item 1) perfurada e com uma rolha de borracha butílica, que permitia o uso de uma seringa para retiradas de amostras da atmosfera dentro da câmara.

No interior da câmara foi instalado um desumidificador que tem seu acionamento controlado por um Arduino Uno R3 ATmega328 (Figura 2.7), que para Banzi (2015) é uma plataforma de prototipagem que permite um processo de manipulação constante de elementos de hardware e software. Na montagem do equipamento utilizou-se um Arduino Uno, que tinha conectado em seu sistema um sensor de temperatura e umidade Dht22, um *display* Lcd Keypad Shield 16x2, um relê de dois canais 5V da marca Raspberry Pi.

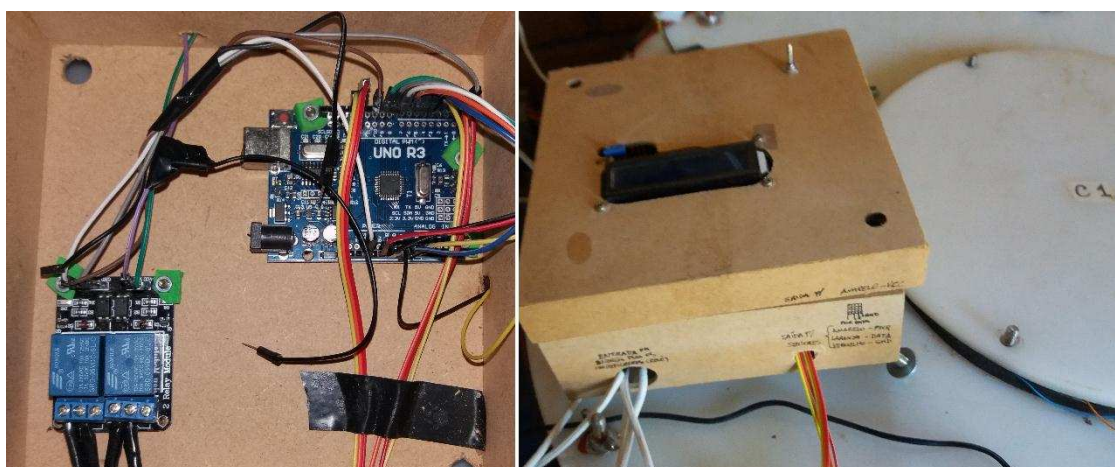


Figura 2.7 – Instalação do arduino na câmara.

Foi desenvolvido um código (Anexo A) para o Arduino controlar o ligamento do desumidificador caso o sensor de umidade lesse uma umidade maior ou igual a 80% e para desligar o desumidificador quando o sensor fazia uma leitura de umidade menor ou

igual a 65%, mantendo assim a umidade sempre abaixo de 80% como recomendado para realização dos ensaios acelerados de carbonatação.

### **2.3.3 – MÉTODO PARA LEITURA DE CO<sub>2</sub>**

O método denominado Método de Dois Pontos (M2P) é fundamentado na variação de pH de uma solução tampão de concentração e pH inicialmente conhecidos. Esse método foi desenvolvido a partir do método criado pelo Instituto Adolfo Lutz (2008) para a determinação da acidez de bebidas e é realizado por titulação volumétrica com detecção do ponto de equivalência com uso de indicador visual ou por medidas potenciométricas.

Para Oliveira (2009), o Método dos Dois Pontos é baseado, fundamentalmente, na força do tampão ou capacidade tamponante efetiva. Isso significa que a variação de pH que será observada devido à adição de dióxido de carbono sobre a solução tampão de borato depende da resistência à variação do pH tanto do sistema ácido base de Bronsted do borato quanto da concentração do dióxido de carbono. A força do tampão é, por sua vez, explicada considerando-se o balanço de carga da solução antes e após a variação do pH do meio.

Para fazer a leitura da concentração de dióxido de carbono no interior da câmara foi utilizado o Método de Dois Pontos (M2P), que é um método potenciométrico não titulométrico e consiste em utilizar um tampão para verificar, através da diferença de pH, determinadas características ou substâncias presentes em outra solução ou em uma atmosfera. No caso da câmara de carbonatação, as amostras de atmosfera eram coletadas em triplicata para garantir que as leituras efetuadas se encontravam realmente dentro dos níveis desejados.

Para produzir a curva de carbonato definitiva seguiram-se os passos: pesou-se a massa de carbonato de sódio, correspondente àquele número de mols, verteu-se a massa em um dos erlenmeyers, tampando-os com a borracha de vidraria do sistema. Colocou-se o tampão em um recipiente de acrílico de 15 ml, mediu-se o valor do pH inicial do tampão, ligou-se o sistema de bombeamento e injetou-se a solução de ácido sulfúrico no erlenmeyer contendo o carbonato de sódio, aguardando o término dos três minutos de bombeamento. Em seguida, homogeneizou-se a solução tampão com a ajuda de um agitador magnético e uma barra magnética revestida de teflon e mediu-se novamente o pH do tampão que agora estava borbulhado com o dióxido de carbono. Após terminada a reação, foi realizado procedimento de limpeza no sistema para garantir que não houvessem interferentes para a próxima medida.

As medições de pH foram realizadas com um pHmetro da marca TecnoPON modelo mPA-210, com eletrodo combinado de vidro. A calibração foi realizada diariamente no início dos procedimentos experimentais, utilizando soluções padrão de pH (Digimed) em valores de pH 4,0 e de 7,0.

Com base na curva de carbonato produzida elaborou-se uma planilha de conversão do nº mol em ppm<sub>v</sub> (partes por milhão por volume) que é uma medida comumente usada para medição de CO<sub>2</sub> na atmosfera e também é a unidade usada pelas publicações sobre uso de câmara de carbonatação e concentração de dióxido de carbono na atmosfera. Esta curva se utilizou da função do Excel “bascara”, que é utilizada para encontrar de maneira direta as soluções de uma equação quadrática através de um algoritmo para o programa Excel, desenvolvido por Oliveira (2012). Para efetuar esta conversão utilizou-se a equação de Clayperon (2.8) e a constante dos gases.

$$ppm_v = \frac{p}{p_{atm}} \cdot 10^6 = \left( \frac{n_{inj}}{V_{inj}} \right) \frac{RT \cdot 10^6}{p_{atm}} = \left[ \left( \frac{mmol}{mL} \cdot \right) \left( \frac{atm \cdot L}{mol \cdot K} \right) \frac{K}{atm} \right] \quad (2.8)$$

onde:

$p$  é a pressão do ambiente.

$p_{atm}$  é a pressão atmosférica.

$n_{inj}$  é o nº de mmol obtido pela variação de pH.

$V_{inj}$  é o volume de atmosfera amostrada em mL

$R$  é a constante dos gases, em (atm.L)/(mol.K)

$T$  é a temperatura em Kelvin (K).

Após o dimensionamento do sistema, suas principais características analíticas foram avaliadas visando sua aplicação a análises em larga escala.

A curva analítica obtida para o tampão borato de 5 mmol/L e um pH 10 apresentou coeficiente de determinação ajustado de 0,983 com um desvio padrão de 0,031, sensibilidade mínima de 0,2 mmol, e estimativa do desvio padrão dos resíduos de 0,017. A avaliação da sensibilidade mínima da curva, coeficiente de determinação e desvio padrão dos resíduos foi utilizada para escolher a curva com melhor condição de trabalho.

O limite de quantificação (LOQ) que é a menor concentração de analito que pode ser determinada a um nível de confiabilidade de 95%. Para este ensaio este valor do LOQ ficou em 0,998 mmol. E o limite de detecção (LOD) é a menor concentração do analito em uma amostra que pode ser medida com 95 % de confiança. Para esta curva o LOD foi de 0,645 mmol.

A seguir é apresentada a curva analítica (Figura 2.8) que foi produzida como resultado pelo programa Minitab 17.1.0 e vem expresso o resumo do modelo escolhido para executar o trabalho.

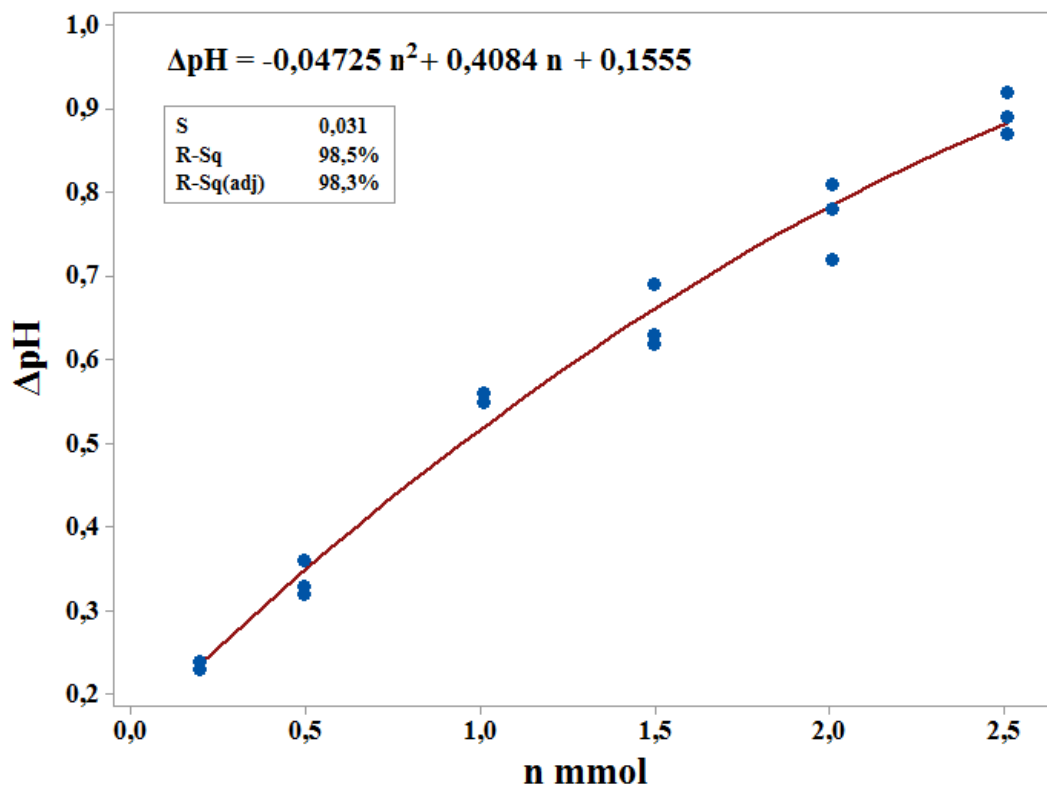


Figura 2.8 – Curva analítica produzida com todos os resultados das triplicatas do ensaio.

Chagas (2016) realizou ensaios com o Método de Dois Pontos utilizando uma faixa analítica de 0,5 a 0,35 n° mmol que produziram uma curva analítica com um coeficiente de determinação ajustado de 0,9921, um limite de determinação (LOD) 0,0184 mmol/L e um limite de quantificação de 0,0557 mmol/L. Além da estimativa do desvio padrão dos resíduos de 0,0079 mmol/L.

Afonso (2004) utilizou o Método do Termo Óptico para analisar a presença de carbono orgânico, carbono negro, dióxido de carbono e trióxido de carbono ele afirma que o método permite mais exatidão ao determinar a concentração total de carbono na amostra, estando no entanto, dependente das condições de operação para a separação e quantificação do carbono.

O Método de Dois Pontos executado neste trabalho é de fácil execução e tem uma boa reprodutividade e seus resultados estatísticos indicam que ele tem também uma

representatividade adequada para ser usado em avaliação de concentração de CO<sub>2</sub> em atmosfera.

### 2.3.4 – CALIBRAÇÃO DA CÂMARA

Com o intuito de produzir o ensaio em tempo hábil e de demonstrar a condição de reprodução do equipamento, foi montada uma nova câmara de carbonatação seguindo as mesmas características aqui descritas, porém utilizando o mesmo arduino que controlava a outra câmara (Câmara 1) para controlar a umidade e registrar a temperatura da denominada Câmara 2. As duas câmaras podem ser visualizadas na Figura 2.9.

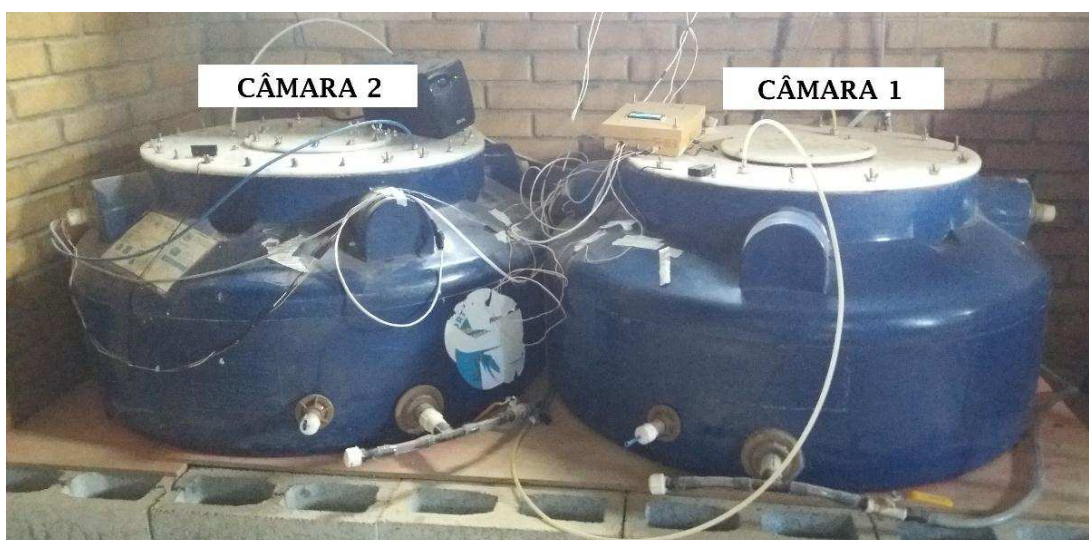


Figura 2.9 – Câmaras de carbonatação construídas no laboratório de materiais

Para verificar a melhor forma de executar o fluxo de dióxido de carbono na câmara foi efetuado um teste com diferentes intervalos de fluxo sempre medindo a concentração de CO<sub>2</sub> no interior da câmara após os fluxos. Durante estes testes a Câmara 1, havia no interior da câmara dezesseis corpos de prova de concreto que já estavam sendo utilizados nos testes de melhoria e ajuste da câmara. Verificou-se que a melhor forma é a injeção de dióxido de carbono durante 16 minutos com uma vazão de 10 L/min e observando um intervalo de pelo menos dez minutos entre os fluxos.

Os fluxos de dióxido de carbono foram executados com o princípio de que a câmara precisava se manter em estabilidade de concentração quando se faziam as leituras na parte superior e inferior da câmara. Como o consumo de CO<sub>2</sub> é muito grande nos primeiros dias de ensaio, a concentração final para estes dias foi sempre menor que 100%, porém

com a estabilização do consumo foi possível manter a concentração final, após o final do último fluxo de CO<sub>2</sub>, em 100%.

Após a calibração foram produzidos novos corpos de prova de concreto que foram ensaiados para devida verificação das câmaras de carbonatação. Desta vez utilizou-se um três diferentes traços de grautes com resistência característica à compressão (15 MPa, 20 MPa, 25 MPa) e foram produzidos oito corpos de prova de cada lote de resistência à compressão. Destes corpos de prova dois foram ensaiados à compressão aos vinte e oito dias e os outros seis ensaiados sobre o desenvolvimento da frente de carbonatação dentro e fora das câmaras de carbonatação. Os lotes ensaiados estão detalhados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Corpos de prova para ensaio de carbonatação.

CP	Resist. à comp. (MPa)	Ensaio de Compressão	Carbonatação (Fora)	Carbonatação (Dentro)
40 e 41	15	X		
42 e 47	15		X	
43, 44, 45, 46	15			X
48 e 49	25	X		
50 e 55	25		X	
51, 52, 53, 54	25			X
60 e 61	20	X		
62 e 67	20		X	
63, 64, 65, 66	20			X

## 2.4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.4.1 – TESTES DO FLUXO PARA USAR NAS CÂMARAS

Os ensaios realizados para verificação do melhor tempo de fluxo conduziu aos resultados apresentados na Tabela 2.2, demonstrando que o ciclo de 16 minutos é mais eficiente, pois o gasto de CO<sub>2</sub> é o mesmo porém a concentração de CO<sub>2</sub> no interior das câmaras se estabiliza com um valor de concentração maior.

Tabela 2.2 – Teste de fluxos da câmara.

Tempo de Fluxo	Vazão (L/min)	Nº de Ciclos	Concentração Inferior (mg/L)	Concentração Superior (mg/L)
8 min	10	4	161,9	221,9
10 min	10	3	189,1	227,3
16 min	10	2	402,7	372,9

Os dados de concentração de dióxido de carbono no interior da câmara durante o ensaio de 28 dias estão apresentados nas Figuras 2.10 e 2.11

#### 2.4.2 – LEITURAS DE CONTROLE E CALIBRAÇÃO DAS CÂMARAS

As duas câmaras foram construídas utilizando os mesmos materiais e os mesmos métodos, porém ao construir a câmara de número dois foram feitas algumas melhorias, tais como: o aumento do número de parafusos para vedação da tampa, uma maior precisão nos furos de entrada das fiações para que cada fiação entrasse na Câmara 2 sem deixar espaços e a implementação de válvulas com engate rápido para todos os registros que eram conectados a mangueiras de polipropileno de ¼ de polegada.

Desta forma, estas pequenas mudanças melhoraram a forma de trabalho e a vedação da nova câmara, além de fazerem com que os ensaios nas duas câmaras apesar de serem o mesmo terem um comportamento um pouco diferente com relação à concentração de dióxido de carbono no interior de cada câmara, como mostrados na Figura 2.10.

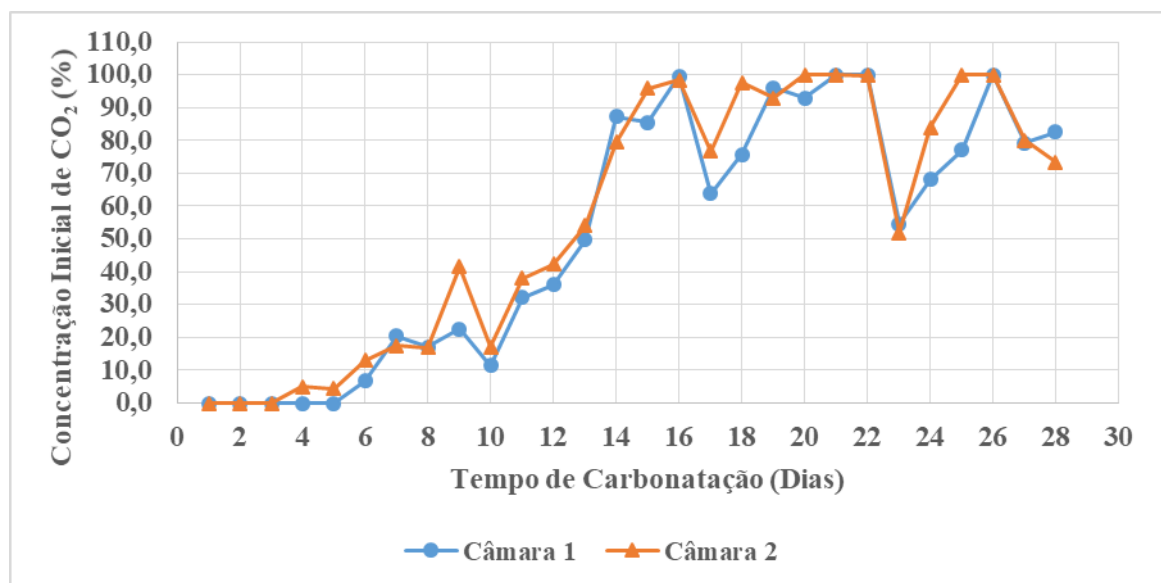


Figura 2.10 – Concentração de dióxido de carbono no interior das câmaras antes dos fluxos diários.

Avaliando a Figura 2.11 é possível perceber um comportamento mais regular do consumo de dióxido de carbono na Câmara 2 nos primeiros dias. Enquanto que na Câmara 1 a concentração parece menor, mesmo sendo realizado o mesmo número de fluxos durante o mesmo tempo para as duas câmaras. Isso se deve à maior capacidade de vedação da segunda câmara, possivelmente na Câmara 2 ocorre uma menor perda por vazamento.

Porém este fator não afetou os resultados dos ensaios realizados com os corpos de prova produzidos com o mesmo concreto. A média de concentração durante os ensaios nas duas câmaras foi de 85%.

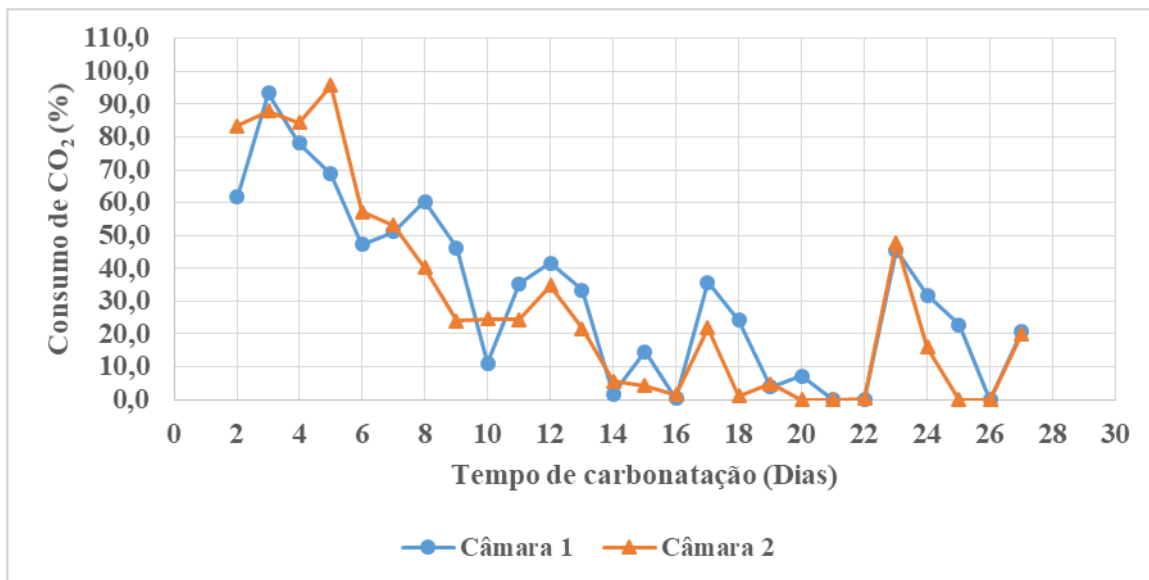


Figura 2.11 – Consumo de dióxido de carbono nas câmaras ao longo do ensaio.

Para verificar se o comportamento das duas câmaras era realmente semelhante realizou-se o teste *t* pareado com os dados de concentração de cada câmara e o resultado do teste foi um p-valor de 0,018 indicando que não existe diferença no comportamento de concentração de CO<sub>2</sub> no interior das duas câmaras.

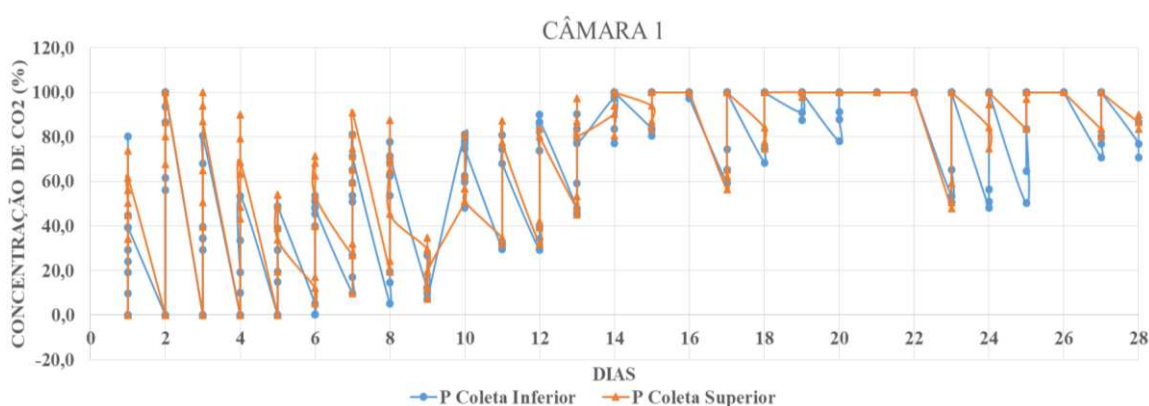


Figura 2.12 – Concentração de CO<sub>2</sub> na Câmara 1 ao longo do tempo.

Ao analisar o gráfico de concentração de CO<sub>2</sub> da Câmara 1 (Figura 2.12) durante o ensaio verificou-se que o consumo do dióxido de carbono é bastante elevado nos dez primeiros dias de ensaio. No entanto, o consumo é significativamente reduzido a partir

do décimo quinto dia de ensaio, mas, ainda assim, mantém-se um consumo lento do dióxido de carbono presente no interior da câmara.

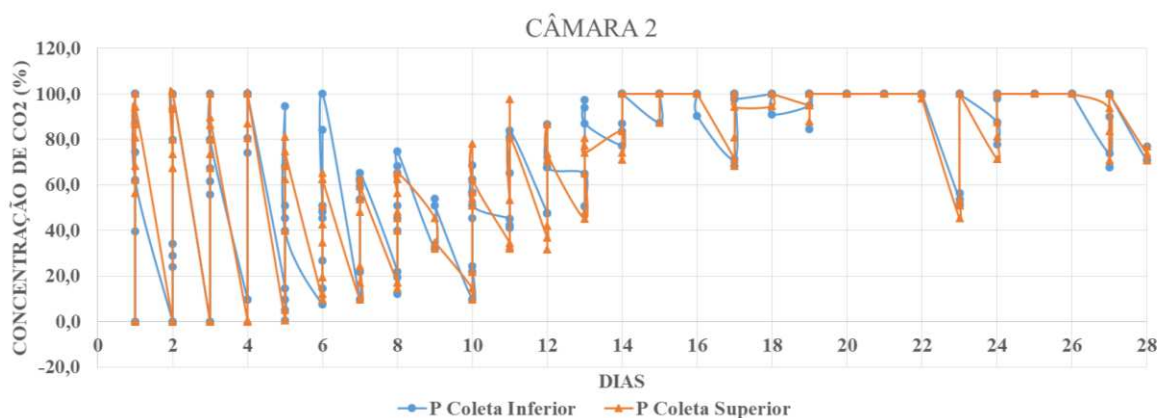


Figura 2.13 – Concentração de CO<sub>2</sub> na Câmara 2 ao longo do tempo.

Quando se avalia o gráfico de concentração de CO<sub>2</sub> da Câmara 2 (Figura 2.13) percebe-se que o comportamento foi o mesmo, havendo um grande consumo de dióxido de carbono nos dez primeiros dias e reduzindo o consumo a partir do décimo quinto dia de ensaio.

Este fato pode significar que a reação entre os hidratos do concreto e o dióxido de carbono tende a estabilizar com o tempo. Indica ainda que esta estabilização deve ocorrer por dois motivos, o primeiro é que ao reagir com o CO<sub>2</sub> e formar o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) os poros do concreto iniciam o processo de colmatação, e o segundo é que a capacidade de reação dos hidratos vai diminuindo à medida que estes já foram convertidos em CaCO<sub>3</sub> durante a carbonatação.

## 2.5 - CONCLUSÕES

O projeto de construção de uma câmara acelerada de carbonatação destinado ao uso em laboratório de materiais para ensaio de desenvolvimento de frente de carbonatação em materiais compósitos, foi desenvolvido com o intuito de verificar a possibilidade da construção deste equipamento em laboratórios de materiais de construção e a também analisar a capacidade de execução de ensaios do equipamento.

O estudo dos fluxos de dióxido de carbono para saturação da câmara demonstrou que uma menor quantidade de fluxos realizada por um tempo mais prolongado é mais eficiente para a estabilização da concentração de CO<sub>2</sub> no interior da câmara, verificando

que as concentrações na parte inferior e superior da câmara ficam com valores relativamente iguais quando o fluxo injetado era de 16 L/min.

A câmara de carbonatação acelerada se mostrou útil e eficiente para realização de ensaios de avanço da frente de carbonatação. Os testes na câmara demonstram que o consumo inicial de dióxido de carbono é bastante acelerado e tem sua primeira redução aos cinco dias de ensaio. Aos dez dias de ensaio acontece uma nova redução do consumo de CO<sub>2</sub>. E a partir de quinze dias de ensaio, o consumo se reduz significativamente, fazendo com que, em alguns dias, o fluxo seja desnecessário.

A redução do consumo de dióxido de carbono na câmara significa que os componentes presentes no interior da câmara de carbonatação começam a reduzir sua capacidade de reagir com o CO<sub>2</sub> injetado durante o ensaio.

O método para determinação da concentração de CO<sub>2</sub> usado na câmara de carbonatação foi eficiente para os fins propostos no sistema. Devido ao seu baixo custo e eficiência, pode ser aplicado a qualquer leitura de atmosfera com alta concentração de dióxido de carbono.

As duas câmaras possuem resultados de concentração médio iguais, as suas curvas de concentração demonstram o mesmo comportamento das câmaras ao longo do tempo e o teste *t* verificou que a concentração de CO<sub>2</sub> no interior das duas câmaras é estatisticamente igual. Portanto o projeto pode ser reproduzido, mantendo as mesmas características, e o comportamento em uso da câmara se conservará.

## 2.6 - REFERÊNCIAS

AFONSO, J.; PIO, C.; OLIVEIRA, T. Avaliação da determinação de carbono orgânico e carbono negro por um método termo óptico. In: **Actas da 8ª Conferência Nacional do Ambiente, Lisboa, Portugal**. 2004. p. 27-29.

BANZI, M; SHILOH, M. **Primeiros Passos com o Arduino–2ª Edição**. Novatec Editora, 2015.

CASTELLOTE, M.; FERNANDEZ, L.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO<sub>2</sub> concentrations. **Materials and structures**, v. 42, n. 4, p. 515-525, 2009.

CHAGAS, F.O. Método potenciométrico não-titulométrico (método dois pontos) para determinação de acidez em bebidas e gás carbônico em atmosfera controlada. Dissertação (Mestrado em Agroquímica). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2016.

COSTA, F.S; GOMES, J; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Métodos para avaliação de gases do efeito estufa no sistema solo-atmosfera. **Ciência Rural**, v.36, nº2, p.693-700, 2006.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. 1993. Tese de Doutorado. Tese, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil.

Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. São Paulo, 2008.

JUNG, S.H; LEE, M. K.; OH, B. H. Measurement Device and Characteristics of Diffusion Coefficient of Carbon Dioxide in Concrete. **ACI Materials Journal**, V.108, nº 6, p. 589-595, 2011.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

LO, T.Y.; LIAO, W.; WONG, C.K.; TANG, W. Evaluation of carbonation resistance of paint coated concrete for buildings. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 299-306, 2016.

MCGRATH, P. F. Accelerated carbonation of concrete protected with cement based coatings. In: **Proc. Of 3rd Int. Conf. on Cons. Perf. Innov. and Struc. Imp.** 2005.

OLIVEIRA, A.F. Equilíbrios em solução aquosa orientados à Aplicação, Campinas: Átomo, 2009.

OLIVEIRA, A. F.. ALFA - biblioteca de funções para Microsoft Excel. 2012. Patente: Programa de Computador. Número do registro: 13279-5, título: "ALFA - biblioteca de funções para Microsoft Excel" , Instituição de registro: INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 2009. 285. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SHENG, P.; GUO, X. The Long-run and Short-run Impacts of Urbanization on Carbon Dioxide Emissions. **Economic Modelling**, v. 53, p. 208–215, 2016.

VILLAIN, G.; THIERY, M.; PLATRET, G. Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. **Cement and Concrete Research**. V.37, p.1182-1191, 2007.

WANG, Y; CHEN, L.; KUBOTA, J. The relationship between urbanization, energy use and carbon emissions: evidence from a panel of Association of Southeast Asian Nations (ASEAN) countries. **Journal of Cleaner Production**, V. 112, p. 1368-1374, 2016.

## CAPÍTULO 3 – AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE ALVENARIA ESTRUTURAL DE CONCRETO USANDO ENSAIO ACELERADO DE CARBONATAÇÃO

### RESUMO

*A durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto estão relacionadas às condições ambientais e aos fatores degradantes presentes no ambiente. Um dos agentes agressivos que mais preocupa a indústria da construção civil é o dióxido de carbono, que penetra nos poros do concreto reagindo com os hidratos intersticiais reduzindo o seu pH, promovendo a despassivação das armaduras de aço presentes no interior do concreto o que permite o início do processo de corrosão. Neste trabalho foram produzidos corpos de prova com blocos estruturais de concreto com diferentes resistências à compressão (4,5MPa; 8MPa; 12MPa) preenchidos com grautes de diferentes resistências à compressão (15 MPa, 20 MPa, 25MPa). Estes corpos de prova foram submetidos a uma frente de carbonatação em uma câmara acelerada do Laboratório de Paredes, anexo ao Laboratório de Materiais de Construção da UFV. Fez-se então a previsão de vida útil dos blocos e dos grautes em seu interior e foi possível verificar que para os blocos de 4,5 MPa, 8 MPa e 12 MPa preenchidos com grautes de 20 MPa e 25 MPa os espécimes têm uma vida útil superior a 50 anos, que satisfazem à Norma de Desempenho. Já para os blocos de 4,5MPa, 8 MPa e 12 MPa preenchidos com graute de 15 MPa se identificou uma vida útil inferior a 40 anos, idade mínima de vida útil prevista pela ABNT NBR 15.575: 2013 para alvenaria de vedação. Sendo assim esta combinação, de acordo com a norma de desempenho, não poderia ser usada nem para sistemas de vedação.*

**Palavras-chave:** *alvenaria estrutural, durabilidade, vida útil, ensaio acelerado de carbonatação.*

### 3.1 - INTRODUÇÃO

A emissão de dióxido de carbono na atmosfera da Terra é uma questão ambiental de grande preocupação, pois dela pode decorrer uma mudança no clima o que afetará de forma significativa a vida humana no planeta. Além de afetar a vida na Terra, a emissão de CO<sub>2</sub> também age sobre a durabilidade e a vida útil das estruturas e edificações produzidas com concreto armado.

Segundo Jung *et al.* (2011), a carbonatação do concreto é um dos principais fatores que afetam a durabilidade das estruturas constituídas desse material. Este processo ocorre

quando o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) da atmosfera penetra nos poros de concreto e reage com o hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  presente na pasta de cimento. A carbonatação do concreto pode acelerar o processo de corrosão das barras de aço, reduzindo a alcalinidade do concreto e destruindo a camada de proteção da armadura.

Para Ferreira e Helene (2014), um dos principais problemas patológicos do concreto é a corrosão das armaduras, sendo considerada por muitos pesquisadores como o mais grave e frequente problema em estruturas de concreto armado, que além de se constituir em um problema técnico-econômico, ainda representa um grande desperdício de recursos naturais e um problema de caráter local e mundial.

Normalmente a armadura de aço presente no interior do concreto se encontra protegida do processo de corrosão pela elevada alcalinidade do concreto. Todavia, LO *et al.* (2016) indicam que a carbonatação interfere diretamente na resistência do concreto armado, pois durante esse processo o pH do concreto que é relativamente alto (cerca de 12) é reduzido para menos que 9, essa diminuição do pH expõe a estrutura de aço presente no interior do concreto à corrosão.

O desempenho e a vida útil das construções vêm se tornando cada vez mais uma preocupação das empresas de construção civil e de seus consumidores, conseqüentemente este assunto também desperta muito interesse por parte dos pesquisadores na área de construção civil. Uma das grandes preocupações levantadas é com a degradação precoce de edificações recém construídas e com a recuperação de estruturas que apresentam patologias ainda em execução. Para nortear e incentivar a melhoria das execuções dos projetos de engenharia e arquitetura, a Associação Brasileira de Normas Técnicas colocou em vigor a ABNT NBR 15.575:2013 (Edificações Habitacionais – Desempenho) que é a norma de desempenho.

Dal Molin (2016) *et al.* indicam que a ABNT NBR 15.575: 2013 conhecida como “Norma de Desempenho” entrou em vigor, em 2013 visando à melhoria da qualidade dos produtos da indústria da construção como um todo. A ABNT NBR 15.575: 2013 estabelece parâmetros mínimos de desempenho em uso para os sistemas construtivos, bem como para as edificações habitacionais, de modo a atender às necessidades e exigências dos usuários ao longo do ciclo de vida da habitação, atuando de forma complementar com o conjunto de normas prescritivas da ABNT vigentes e já difundidas na comunidade da construção.

A previsão de avanço da frente de carbonatação e o ensaio acelerado são recomendados como método de avaliação da durabilidade para sistemas estruturais no item 14.1.2 da ABNT NBR 15.575-2: 2013.

Neste trabalho construiu-se uma câmara de carbonatação acelerada para avaliar como o fenômeno da carbonatação afeta os blocos estruturais de concreto preenchidos com graute.

### **3.2 – REFERENCIAL TEÓRICO**

A ABNT NBR 15575:2013 indica que o desempenho é o comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas e as especificações de desempenho são o conjunto de requisitos e critérios de desempenho estabelecido para a edificação ou seus sistemas. As especificações de desempenho são uma expressão das funções exigidas da edificação ou de seus sistemas e que correspondem a um uso claramente definido; no caso dessa Norma, referem-se ao uso habitacional de edificações.

De acordo com Dal Molin *et al.* (2016), a ABNT NBR 15575:2013 visa à melhoria da qualidade dos produtos da indústria da construção como um todo, estabelecendo parâmetros mínimos de desempenho para os sistemas construtivos. Para cada um dos sistemas que compõe a edificação, o documento insere 12 critérios de desempenho, sendo um deles durabilidade, que pode ser mensurada por meio da vida útil de projeto (VUP).

Roy (1999) afirma que a corrosão da armadura é o problema de durabilidade mais importante das estruturas de concreto armado. Geralmente, o cimento presente no concreto hidrata-se para produzir um álcali,  $\text{Ca(OH)}_2$ , na solução no interior dos poros, que protege quimicamente o aço da corrosão. A proteção química conferida ao aço é através de um filme de óxido de proteção passivo que se forma no aço num ambiente a um pH de 10,5 ou superior.

Lo *et al.* (2016) afirmam que a carbonatação natural do concreto é uma reação química entre o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) do ar e os hidratos produzidos nas reações da pasta de cimento no concreto. O dióxido de carbono atmosférico dissolve-se na água dos poros e produz um ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) fraco que se dissocia e reage com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e depois também reagem com os hidratos de silicato de cálcio ( $\text{Ca-SiO}_3\text{-H}_2\text{O}$ ), para formar carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). As reações diminuem a alcalinidade do concreto.

Hobbs (1999) *apud* Lo *et al.* (2016) sugeriu que 9,5 é o valor limiar de pH para a despassivação do aço. No entanto, o fenômeno de carbonatação conduz a uma diminuição da alcalinidade do concreto de aproximadamente 12 para menos de 9, o que despassiva a armadura de aço e expõe as barras de aço à corrosão. Pauletti (2009) indica que dentro do período de vida útil previsto para uma determinada estrutura, deve-se evitar que a profundidade carbonatada atinja a armadura, ou seja, supere a espessura de cobrimento.

Barros *et al.* (2016) realizam a medida da profundidade de carbonatação, empregando indicadores de pH constituídos de uma solução de fenolftaleína a 1% dissolvida em álcool etílico. Esta solução é incolor em pH inferior a 8,3 e vermelho-carmim para valores de pH superiores a 9,5, podendo apresentar coloração variável de rosa para valores de pH entre 8,3 e 9,5.

Segundo Houst e Wittmann (2002), entre os principais fatores que influenciam a velocidade de carbonatação estão: a relação água/cimento, a cura, a quantidade e o tipo de cimento, a concentração de gás carbônico, a quantidade de água, a temperatura, o teor de álcalis e as fissuras.

Castellote *et al.* (2009) fizeram ensaios com ambiente controlado que apresentava umidade de equilíbrio de 65%, temperatura de 22°C e concentração de 0,03% (natural) e 3%, 10% e 100% (acelerado). A carbonatação foi acompanhada pela evolução do ganho de massa e os resultados foram apresentados em um gráfico que se encontra na Figura 3.1.

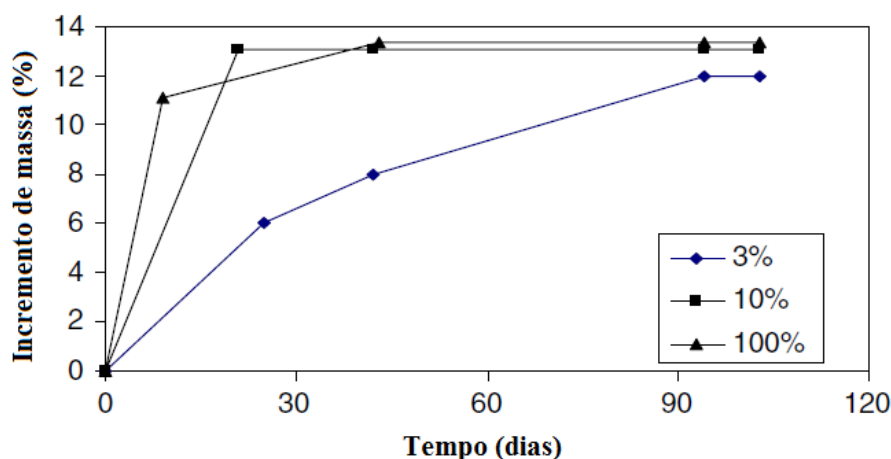


Figura 3.1 – Incremento de massa nas amostras submetidas à carbonatação acelerada (Adaptada de: Castellote *et al.* (2009))

Castellote *et al.* (2009) indicam que na curva com 100% de CO<sub>2</sub> a estabilização está entre 7 e 40 dias, e com relação à velocidade de carbonatação, embora a curva de 100%

seja mais acentuada (formando maior ângulo com o eixo das abcissas), não é possível afirmar que tenha carbonatado mais rápido, pois o número de leituras é limitado.

De acordo com Helene (1993) o ingresso de CO<sub>2</sub> através do concreto é uma consequência direta da estrutura porosa do material e depende do mecanismo de transporte de difusão para sua ocorrência. A facilidade da difusão depende da umidade dos poros do concreto.

Pauletti (2009) faz um resumo com dados de diversas pesquisas de carbonatação realizadas no Brasil e no mundo, principalmente para concretos e argamassas esta síntese adaptada do trabalho de Pauletti está apresentada na Tabela 3.1

Tabela 3.1 – Estudos de carbonatação em concreto adaptado de Pauletti (2009)

<b>Pesquisador</b>	<b>Ano</b>	<b>Amostra/ Forma (mm)</b>	<b>UR (%)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>CO2 (%)</b>	<b>Tempo Exposição (Dias)</b>
<b>Fattuhi</b>	1988	Prismas 50x50x285	50 a 70	20 a 26	100	-
<b>Isaia</b>	1995	Cilindros 100x100	-	-	10	28, 56, 84 e 112
<b>Rougeau</b>	1997	Cilindros 160x320	65	20	1, 5, 20, 70, 100	7, 14 e 28
<b>Lopes</b>	1999	Cilindros 100x200	55	27	100	7, 14, 21, 28 e 35
<b>Cunha e Helene</b>	2001	Prismas 279x152x114	65 a 70	23 a 24	100	2h/2h, a/c=0,35 4h/4h, a/c=0,65
<b>Sanjuán e Del Olmo</b>	2001	Cilindros 75x150	70	-	100	-
<b>Coelho <i>et al.</i></b>	2002	Cilindros 100x200	60 a 70	26	100	77, 91
<b>Kulakowski</b>	2002	Prismas 100x100x300	70	25	5	35, 56, 91 e 126
<b>Silva</b>	2002	Cilindros 50x100	60	25	100	7,14,28,63 e 91
<b>Stumpp</b>	2003	Cilindros 100x70	75	22	5	28, 56, 84
<b>Bourguignon</b>	2004	Cilindros 100x200	65	26	95	14 e 28
<b>Dalla Lana</b>	2005	Cilindros 100x50	75	22	5	28, 56, 84

<b>Thiery</b>	2005	Cilindros 50- 100x110	53	21	50	14 e 28
<b>Cadore</b>	2008	Cilindros 100x50	75	22	5 natural	28 à 84 91 e 300 dias

Possan (2010) propôs um modelo matemático destinado à estimativa da profundidade de carbonatação e à previsão de vida útil de projeto de estruturas de concreto, usou como base de dados as pesquisas de um grupo focal de *experts* que realizaram ensaios de carbonatação natural com diferentes condições de ambientais e de produção do concreto. O grupo realizou ensaios de desenvolvimento da frente de carbonatação em corpos de prova com até 35 anos de idade.

Possan (2010) buscou produzir um modelo de comportamento com uma formulação de grande aplicação prática destinada às estimativas da carbonatação em situações reais de degradação, com parâmetros de entrada de fácil obtenção, contemplando as principais variáveis de influência do fenômeno, constituindo um modelo para fins de predição de vida útil das estruturas de concreto armado quando submetidas à ação do CO<sub>2</sub>, com abrangência no período de iniciação da corrosão. A equação de Possan (2010) é apresentada a seguir.

$$x_{ec}(t) = k_c * \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} * \left(\frac{t}{20}\right)^{0,5} * \exp \left[ \left( \frac{k_{ad} * ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c} \right) + \left( \frac{k_{co_2} * co_2^{0,5}}{60 + f_c} \right) - \left( \frac{k_{UR} * (UR - 0,58)^2}{100 + f_c} \right) \right] * k_{ce} \quad (3.1)$$

onde:

$x_{ec}(t)$  = profundidade de carbonatação média do concreto, em mm;

$f_c$  = resistência característica à compressão axial do concreto, em MPa;

$k_c$  = fator variável referente ao tipo de cimento empregado, tabelado;

$k_{fc}$  = fator variável referente resistência à compressão axial, em função do cimento usado, tabelado;

$t$  = idade do concreto, em anos;

$ad$  = teor de adição pozolânica no concreto, em % em relação à massa de cimento;

$k_{ad}$  = fator variável referente à adição pozolânica do concreto – sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz – em função do cimento usado, tabelado;

$UR$  = umidade relativa média, em % \* 0,01;

$k_{UR}$  = fator variável referente à umidade relativa, em função do cimento usado, tabelado;

$CO_2$  = teor de  $CO_2$  na atmosfera, em %.

$k_{CO_2}$  = fator variável referente à teor de  $CO_2$  do ambiente em função do cimento usado, tabelado;

$k_{ce}$  = fator variável referente à exposição à chuva em função das condições de exposição da estrutura, tabelado.

A tabela de referência da equação de Possan (2010) está apresentada a seguir.

Tabela 3.2 - coeficientes do modelo em função (a) das características do concreto e das condições ambientais (b) das condições de exposição.

Tipo de Cimento	(a)			(b)			
	Características do Concreto			Condições Ambientais		Condições de exposição da estrutura	
	Cimento	$f_c$	Adição	$CO_2$	UR	Proteção à chuva	$k_{ce}$
	$k_c$	$k_{fc}$	$k_{ad}$	$k_{CO_2}$	$k_{UR}$		
<b>CP I</b>	19,80	1,70	0,24	18,00	1300	Ambiente interno	1,30
<b>CP II E</b>	22,48	1,50	0,32	15,50	1300	protegido da chuva	
<b>CP II F</b>	21,68	1,50	0,24	18,00	1100	Ambiente externo	1,00
<b>CP II Z</b>	23,66	1,50	0,32	15,50	1300	protegido da chuva	
<b>CP III</b>	30,5	1,70	0,32	15,50	1300	Ambiente externo	0,65
<b>CP IV</b>	33,27	1,70	0,32	15,50	100	desprotegido da chuva	
<b>CP V ARI</b>	19,80	1,70	0,24	18,00	1300		

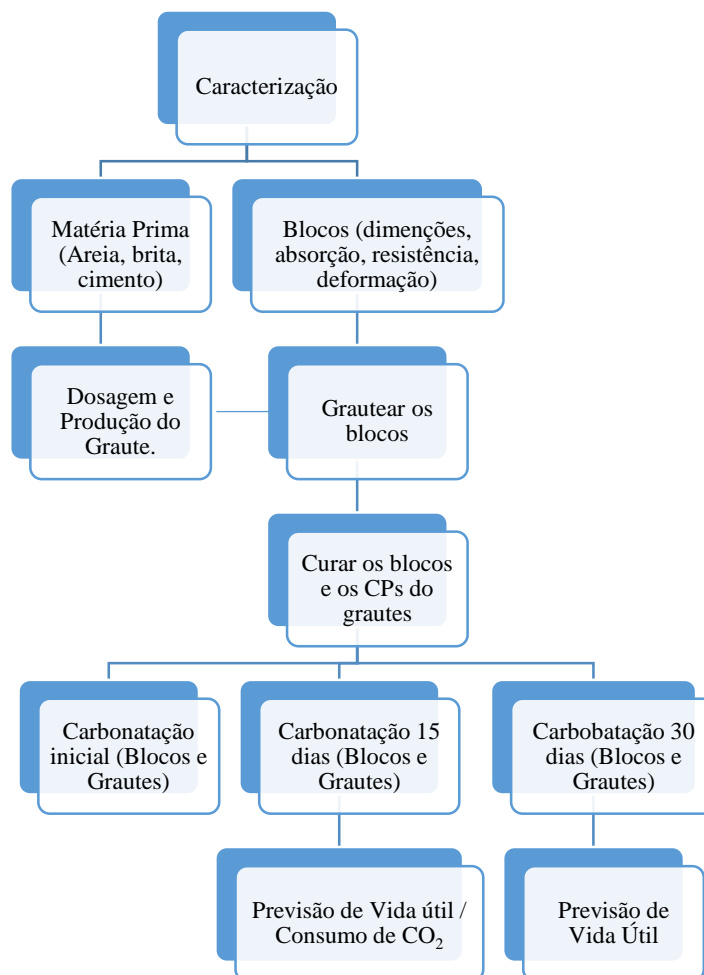
Fattuhi (1988) fez um ensaio de carbonatação acelerada para estudar a influência do regime de cura em corpos-de-prova de concreto com relação água/cimento de 0,70, submetidos à carbonatação acelerada com concentração de  $CO_2$  igual a 100%. Em seus experimentos foram utilizadas amostras sem cura úmida e amostras curadas em água por períodos de 1, 3, 5, 7, ou 28 dias, sendo o restante do tempo curados ao ar, de modo que cada corpo-de-prova completasse 28 dias. Os resultados demonstraram que os corpos de prova com cura fora da água apresentaram uma frente de carbonatação média de 25 mm aos 25 dias de carbonatação acelerada.

Bourguignon *et al.* (2004) realizaram uma pesquisa sobre a influência da resistência do concreto no desenvolvimento da profundidade de carbonatação onde produziu corpos

de prova cilíndricos de 100x200 usando os cimentos CII E 32 e CIII 32 RS com diferentes relações água/cimento (entre 0,39 e 0,75) e diferentes resistências à compressão (entre 25,2 MPa e 44,7 MPa). Submeteu estes corpos de prova a um ensaio de carbonatação acelerada a uma concentração de CO<sub>2</sub> de 95± 5%, umidade de 65± 5%, e temperatura de 26± 5°C. Para o traço de CP II E 32 com resistência à compressão de 26,2 MPa encontrou uma frente de carbonatação de 31,63 mm após 4 semanas de carbonatação acelerada.

### 3.3 - MATERIAL E MÉTODOS

A seguir será apresentado o fluxograma dos procedimentos de ensaio realizados.



Para realizar este trabalho foram utilizados três lotes de 200 blocos de concreto, com resistência nominal à compressão de 4,5 MPa, 8 MPa e 12 MPa, perfazendo um total de 600 blocos. Retiraram-se dez exemplares destes lotes, conforme recomenda a ABNT NBR 6136: 2014, e fez-se a caracterização física e mecânica dos blocos.

Realizou-se um estudo de traços para produzir grautes com resistências características de aproximadamente 15 MPa, 20 MPa e 25 MPa. No estudo de traço se utilizou uma adequação da metodologia de dosagem do American Concrete Institute (ACI) e Portland Cement Institute (PCI), anteriormente adaptado às condições brasileiras pela ABCP. O traço de menor valor de resistência nominal foi escolhido para verificar os padrões adotados pela ABNT NBR 15.961-1:2011 que recomenda no seu item 6.1.3 que para elementos de alvenaria armada, a resistência à compressão característica do graute deve ser especificada com valor mínimo de 15 MPa. Os outros valores de resistência do grautes adotados (20 MPa e 25 MPa) foram selecionados, por se tratarem de valores de uso comum do mercado da construção civil e também por serem valores que se aproximam do valor mínimo exigido por norma. Pois nestas condições pode-se verificar a durabilidade e a vida útil do material que se utiliza muito na construção civil e também os limites estabelecidos por norma.

### **3.3.1 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS**

#### **3.3.1.1 - GRAUTE**

Para produzir os grautes utilizaram-se os seguintes materiais: cimento Portland composto CII E-32 da Tupi; brita artificial gnáissica com graduação 0, proveniente da pedra MBC, em São Geraldo - MG; areia natural quartzosa procedente do Rio Piranga, em Porto Firme – MG e aditivo plastificante multifuncional.

A areia utilizada possuía dimensão máxima de 4,8 mm; módulo de finura de 2,77; material pulverulento de 0,87 %; massa específica (sss) de 2,63 g/cm<sup>3</sup>; absorção de 0,80 %; massa específica aparente de 1,07 g/cm<sup>3</sup>; massa unitária solta de 1,40 kg/dm<sup>3</sup>; massa unitária compactada de 1,49 kg/dm<sup>3</sup>.

O cimento usado tem uma massa específica de 2,95 g/cm<sup>3</sup>, índice de finura de 4,02% e resistência à compressão aos vinte e oito dias de 34,5 MPa.

A brita do ensaio possuía dimensão máxima de 12,5 mm; material pulverulento de 1,9 %; massa específica (sss) de 3,02 g/cm<sup>3</sup>; absorção de 0,20 %; massa unitária solta de 1,52 kg/dm<sup>3</sup>; massa unitária compactada de 1,63 kg/dm<sup>3</sup>.

Para cada lote de graute produzido foram retiradas oito (8) amostras, conforme a Figura 3.2. Dois corpos de prova de cada lote foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, seguindo a ABNT NBR 5739: 2007, enquanto a outra parte foi colocada no interior da câmara de carbonatação, juntamente com os exemplares dos blocos grauteados. Os grautes produzidos apresentaram *slump* variando de 19 a 23 cm,

proporcionando um bom adensamento sem apresentar exsudação. Os corpos de prova de graute foram submetidos ao ensaio de carbonatação a cada 3 dias, conforme item 3.3.1.3.



Figura 3.2 – Produção dos corpos de prova de graute para ensaios.

Os traços usados para produção do grautes, bem como os seus resultados de resistência à compressão ( $f_G$ ), são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Características dos grautes usados nos ensaios.

Traço	Cimento	Areia	Brita	Água	Aditivo	Slump (mm)	Resistência à Compressão (MPa)
25 MPa	1	2,042	2,39	0,57	0,005	190	25,0
20 MPa	1	2,333	2,566	0,63	0,005	190	21,0
15 MPa	1	2,928	2,928	0,75	0,005	202	16,3

### 3.3.1.2- BLOCOS

As amostras com os blocos foram produzidas posicionando os blocos em uma base regularizada coberta com uma lona e, logo após a execução do graute, este foi lançado nos furos dos blocos passaram por um processo de adensamento em duas camadas, com 12 golpes por camada, conforme recomenda a ABNT NBR 15961-2:2011. Estes blocos foram cobertos pela mesma lona que estava na sua face inferior e permaneceram em cura a vapor durante vinte e oito dias.

Os resultados dos ensaios de caracterização dos blocos tais como: análise dimensional, absorção de água, porosidade e resistência à compressão característica dos

blocos nas áreas bruta ( $f_{bk}$ ) e também a resistência à compressão média na área bruta estão apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Propriedades dos blocos de concreto.

Lotes de Blocos	Larg. Méd. (mm)	Altura Méd. (mm)	Comp. Méd. (mm)	Parede T. Méd. (mm)	Poros. Méd. (%)	Abs. Méd. (%)	$f_{bm}$ (MPa)	$f_{bk}$ (MPa)
<b>B4.5</b>	138,4	190,27	389,53	30,06	13,02	6,17	7,7	5,9
<b>B8</b>	139,6	190,3	389,67	32,87	11,84	5,54	9,4	8,2
<b>B12</b>	140,5	191,23	389,8	33,09	10,63	4,88	13,7	11,8

Para analisar a conformidade dos blocos, realizaram-se os ensaios de acordo com a ABNT NBR 6136:2014, que define as tolerâncias permitidas nas dimensões dos blocos da família (15 x 40) cm. Para as larguras a tolerância é de  $140 \pm 2,0$  mm, de  $190 \pm 3,0$  mm para a altura e de  $390 \pm 3,0$  mm para o comprimento. Sendo assim, do ponto de vista dimensional, todos os lotes de blocos atendem às exigências normativas. Esta mesma norma indica que para blocos com função estrutural da classe A, que têm  $f_{bk} \geq 8$  MPa, a absorção média deve ser menor ou igual a 6% e para os blocos da classe B, que têm  $4,5 \leq f_{bk} < 8$  MPa, a absorção média deve ser menor ou igual a 8%. Portanto, os lotes de blocos também estão conformes para este requisito.

Em se tratando da resistência à compressão, observa-se que os lotes de blocos B4.5 e B8 estão em conformidade com a ABNT NBR 6136:2014, pois suas resistências nominais são respectivamente de 4,5 MPa e 8 MPa e as resistências características apresentam valores superiores. Já o lote P12, que tem a resistência à compressão nominal de 12 MPa, está 1,67% aquém das exigências desta norma, no entanto, é importante ressaltar que para este lote o valor de  $f_{bm}$  foi de 13,7 MPa.

Após 28 dias os blocos foram cortados na transversal, no septo e no centro do furo, conforme Figura 3.3, de forma a produzir dois corpos de prova com o mesmo bloco e o mesmo graute que foram colocados, cada metade dentro de uma câmara. A metade (A) dentro da câmara 1 e a metade (B) dentro da câmara 2.

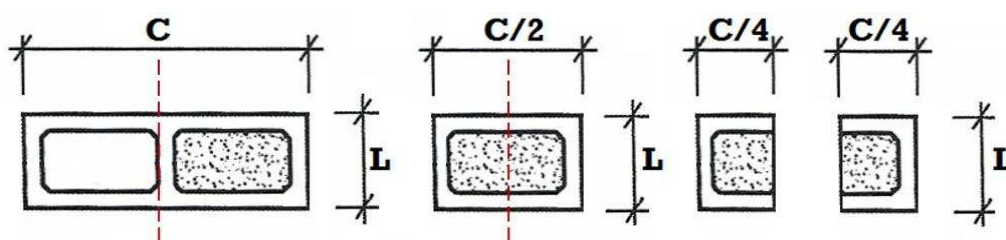


Figura 3.3 – Corte dos blocos para fazer os corpos de prova.

Os blocos cortados foram limpos e, em seguida, fez-se uma impermeabilização das cinco faces do corpo de prova, deixando somente uma face livre para desenvolver a frente de carbonatação.

A impermeabilização foi feita com imersão dos corpos de prova em parafina derretida em fogo médio e, para garantir uma impermeabilização mais homogênea, foi feita também a aplicação de uma outra camada de parafina derretida usando um pincel, o processo pode ser mais bem visualizado na Figura 3.4.



Figura 3.4 – Impermeabilização dos corpos de prova usando parafina nas 5 faces.

Após preparo das peças, estas foram levadas para a câmara de carbonatação. Nesse momento foram selecionados dois corpos de prova de cada traço de graute para realizar um ensaio prévio onde se verificaria a frente de carbonatação apresentada no interior do corpo de prova no momento em que ele iria iniciar o ensaio de carbonatação.

### 3.3.1.3 - CÂMARA

Para proceder à leitura do desenvolvimento da frente de carbonatação, utilizou-se a solução indicadora fenolftaleína, produzindo uma solução a 1% dissolvida em álcool etílico de 96%. A verificação do desenvolvimento da frente de carbonatação foi feita

usando o padrão também utilizado por Barros *et al.* (2016) que está apresentada na tabela 3.4. Segundo Hobbs (1999) quando o pH do concreto está abaixo de 9,5, a despassivação das armaduras inicia, portanto, quando a fenolftaleína está rosa claro, o pH dos poros do concreto está abaixo de 9 e já pode ocorrer a corrosão da armadura, somente quando se encontra rosa carmim é que o ambiente permanece alcalino.

Tabela 3.4 – Cor da solução de fenolftaleína em função do pH.

Titulador	pH							
	7	8	8,5	9	9,5	10	11	12
Fenolftaleína								

Como já destacado no Capítulo 2, a câmara de carbonatação usada para o ensaio foi construída para funcionar com uma concentração de dióxido de carbono de aproximadamente 100% a leitura média de concentração durante o ensaio foi de 85% e chegou a 792.281 ppm<sub>v</sub> e o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas indica uma concentração atmosférica no ano de 2016 de 400 ppm<sub>v</sub>. Sendo assim, a câmara produziu um ambiente 1.980 vezes mais concentrado de CO<sub>2</sub> para uma umidade controlada na faixa de 65% a 80%.

As espécies dos blocos preparados e os corpos de prova cilíndricos de graute, foram submetidas ao ensaio de carbonatação acelerada por um período de trinta dias, posteriormente, os corpos de prova foram retirados, cortados (Figura 3.5), lavados e aplicou-se fenolftaleína na região cortada para verificar o avanço da frente de carbonatação.



Figura 3.5 – Corte dos corpos de prova para medir frente de carbonatação.

O processo na câmara de carbonatação foi dividido em duas partes iniciais e uma terceira complementar. A inicial foi constituída de um ensaio onde dois corpos de prova de cada graute (15 MPa, 20 MPa e 25 MPa), que constitui o lote que foi ensaiado na câmara de carbonatação, foram verificados quanto ao desenvolvimento da frente de carbonatação no dia em que os outros corpos de prova foram levados à câmara de carbonatação acelerada para iniciar o ensaio.

Para o ensaio de trinta dias realizou-se um ensaio de carbonatação acelerada realizando fluxos contínuos de 16 minutos até que a câmara se encontrasse em equilíbrio de concentração, buscando manter a câmara sempre com a concentração em torno de 100 %, com um controle da umidade relativa no ambiente entre 65 % e 80 %, realizou-se uma retirada do material após trinta dias de ensaio. Nesse ensaio não possível chegar à conclusão sobre a frente de carbonatação ao final do ensaio, como poderá ser observado no item 3.4.2. Por este motivo, optou-se pela realização de um ensaio complementar.

Para verificar como ocorre o desenvolvimento da frente de carbonatação ao longo do tempo realizou-se um ensaio complementar que teve a duração de 15 dias e onde os corpos de prova foram retirados da câmara a cada 3 dias. Esse ensaio acompanhou o desenvolvimento da frente de carbonatação para os grautes e as paredes dos blocos ao longo do tempo. Para tanto, foram usados 12 corpos de prova cilíndricos de graute com as dimensões de 60 mm x 100 mm Ø e 12 pedaços das paredes dos blocos com as dimensões de 90 mm x 100 mm x 30 mm. As paredes dos blocos foram parafinadas em cinco faces, da mesma forma que foi executado nos blocos, permitindo assim que a carbonatação das paredes ocorresse em um único sentido. Os corpos de prova de concreto tiveram a base e o topo parafinados para que estas faces não interferissem no avanço lateral da frente de carbonatação.

### **3.4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os ensaios de carbonatação que foram objeto desta pesquisa, foram realizados em três etapas. Sendo um ensaio inicial, para diminuir a possibilidade de erro. O ensaio principal que verificou o desenvolvimento da frente de carbonatação do graute dentro e fora do bloco após trinta dias de carbonatação acelerada. E posteriormente um ensaio complementar que verificava o avanço da frente de carbonatação no bloco e no graute ao longo do tempo. Este item é produzido conforme a cronologia dos resultados obtidos durante os ensaios.

### 3.4.1 – ENSAIOS DE AVANÇO INICIAL (EAI)

Fez-se uma verificação inicial do avanço da frente de carbonatação dos corpos de prova que ficaram fora da câmara de carbonatação acelerada, realizada no dia em que os corpos de prova foram colocados no interior da câmara para iniciar o ensaio. Desse modo o ensaio teve verificação inicial e produziu uma medida real de desenvolvimento da frente de carbonatação acelerada, pois pode-se considerar essa medida inicial como ponto de partida do ensaio. Este avanço inicial está registrado na Tabela 3.5, onde os corpos de prova foram numerados colocando primeiro a resistência nominal do corpo de prova e depois a numeração seguida pelo laboratório para execução de ensaios. Como o corpo de prova CP 25.50, que tem resistência de 25 MPa e numeração no laboratório de 50.

Tabela 3.5 – Frente de carbonatação no dia do início do ensaio

Amostra	Câmara de Carbonatação	Leituras de frente (mm)			Média (mm)
		L1	L2	L3	
CP 25.50	F	4,20	2,93	3,55	3,56
CP 20.62	F	4,58	5,52	4,11	4,74
CP 15.42	F	5,72	5,44	3,64	4,93

### 3.4.2 – ENSAIOS DE AVANSO NA CÂMARA APÓS 30 DIAS (EA30)

#### 3.4.2.1 - GRAUTE

O avanço da frente de carbonatação dos corpos de prova de concreto (100 x 200) mm foi medido após trinta dias de ensaio acelerado de carbonatação sob o efeito de uma concentração média de 85% de CO<sub>2</sub> e são apresentados na Figura 3.6.



Figura 3.6 - Frente de carbonatação dos corpos de prova de graute.

Com os resultados de avanço da frente de carbonatação do graute, foi possível perceber que o graute de 15 MPa, com relação água/cimento de 0,75, carbonatou completamente durante o ensaio, impossibilitando determinar o tempo de vida útil para ele. Sendo assim, este traço de graute pode ser melhor avaliado com retiradas da câmara em intervalos menores do que o intervalo mínimo estabelecido para este ensaio, que foi de trinta dias. Os grautes de 20 MPa também tiveram um avanço bem profundo da frente de carbonatação. E os grautes de 25 MPa resistiram mais ao desenvolvimento da frente de carbonatação. Isso pode ser observado na Figura 3.7. Os resultados encontrados para o graute de 25 MPa são parecidos com os resultados encontrados por Fattuhi (1988) para as mesmas condições de cura e de ensaio acelerado.

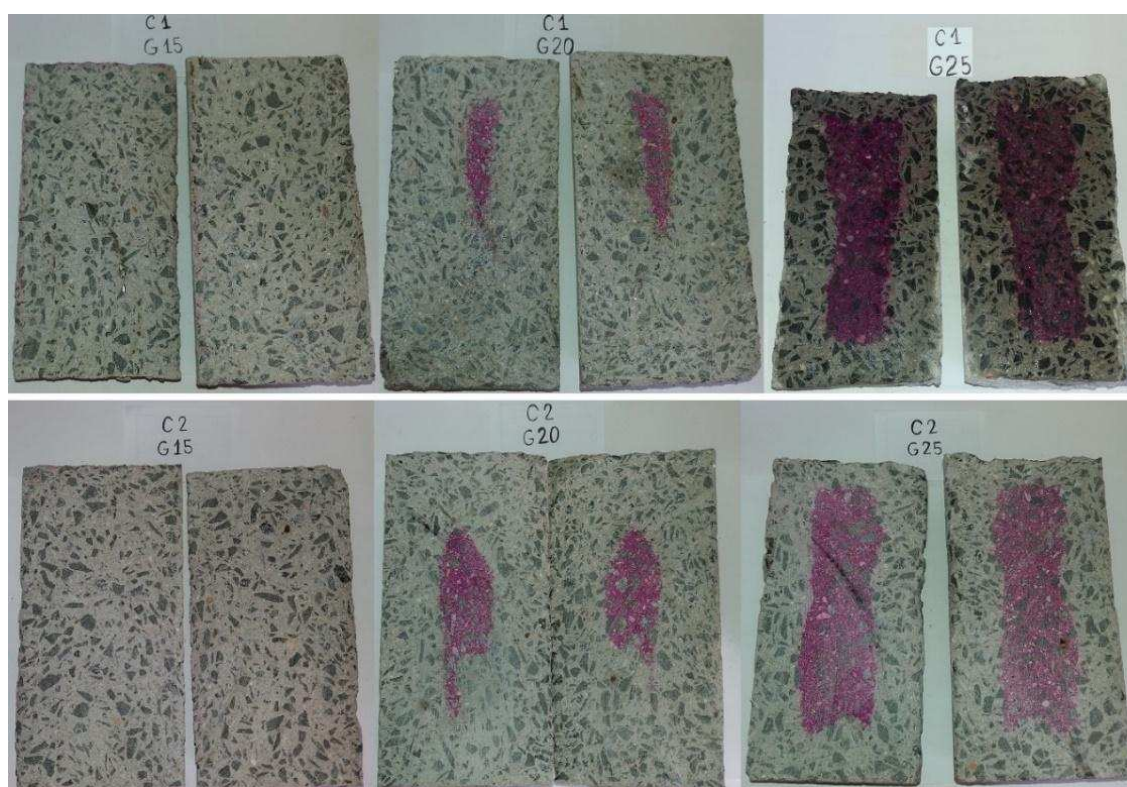


Figura 3.7 – Carbonatação dos corpos de prova de graute.

#### 3.4.2.2 – BLOCOS GRAUTEADOS

Nas espécies de blocos de 4,5 MPa e de 8 MPa preenchidos com graute de 15 MPa, carbonataram por completo não permitindo assim fazer uma previsão de vida útil para eles. A seguir apresentam-se os dados da carbonatação dos grautes no interior dos blocos (Figura 3.8).

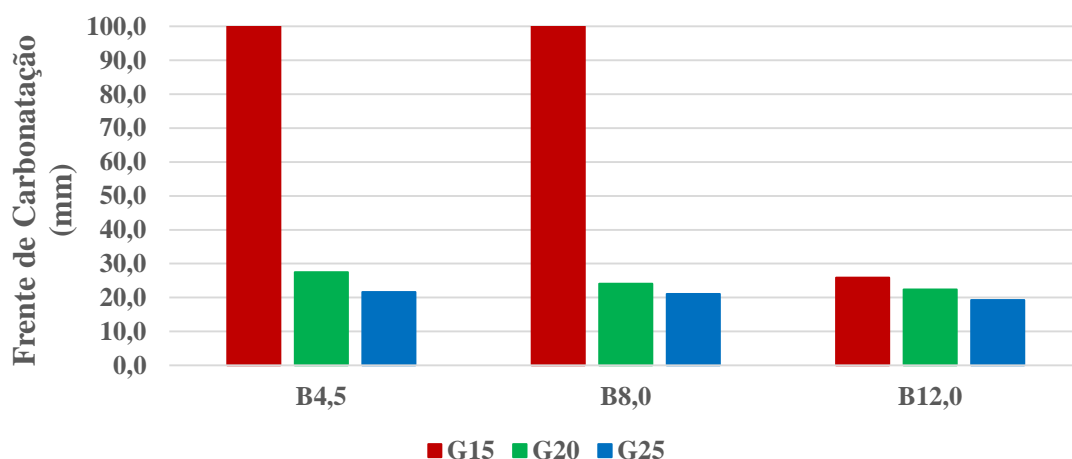


Figura 3.8 – Frente de carbonatação dos grautes no interior dos blocos.

No ensaio realizado durante 30 dias verificou-se que os blocos retardam, ainda que em pequena proporção, o desenvolvimento da frente de carbonatação dos grautes em seu interior (Tabela 3.6). Porém para os blocos com resistência nominal de 4,5 MPa e 8MPa preenchidos com grautes de resistência à compressão de 15 MPa não foi possível determinar em quanto tempo se desenvolveu o avanço da frente de carbonatação, pois ao final do ensaio os grautes no interior dos blocos já se encontravam completamente carbonatados, o que não permite determinar com exatidão qual seria o período em que ele completou o desenvolvimento da frente de carbonatação. Os corpos de prova do graute com resistência à compressão de 15 MPa também carbonataram completamente nesse ensaio. Sendo assim não existe uma leitura mínima que permita comparar a carbonatação do corpo de prova fora do bloco e dentro do bloco.

Tabela 3.6 – Comparação da redução de desenvolvimento da frente de carbonatação do graute dentro e fora do bloco.

Amostra	Média de carbonatação dos CPs dos grautes (mm)	Amostra	Média de carbonatação dos grautes dentro dos blocos (mm)	Redução da carbonatação dos grautes (%)
G 15	50,00	B4,5 G15	50,00	0
		B8 G15	50,00	0
		B12 G15	26,22	48
G 20	39,19	B4,5 G20	25,82	34
		B8 G20	24,30	38
		B12 G20	23,38	40
G25	27,55	B4,5 G25	21,81	21
		B8 G25	21,39	22
		B12 G25	18,78	32

Ao se colocar o graute no interior dos blocos houve uma diminuição do desenvolvimento da frente de carbonatação que chegou a 40% para os grautes de 20 MPa que foram ensaiados nos blocos de 12 MPa.

Neste trabalho utilizou-se como referência a concentração de 410 ppm para definir a vida útil do concreto do graute e da espessura da parede do bloco. (metodologia – carbonatação prévia). Este nível de concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera ainda não foi alcançado e os esforços para que não seja alcançado por parte das organizações internacionais estão se multiplicando. Porém, como medida de segurança adotou-se este valor para aplicar na equação de Possan (2010) (Eq. 3.1) e efetuar a previsão de vida útil do concreto aplicando os coeficientes recomendados por Possan (2010) e apresentados na Tabela 3.2.

A previsão de vida útil (VU) dos grautes é apresentada seguindo a Equação 3.1 e suas recomendações. Os coeficientes e os dados da pesquisa usados na equação e também a (VU) estão apresentados na Tabela 3.7. Para fazer a previsão da vida útil dos grautes utilizou-se as o valor mínimo de cobrimento para as armaduras recomendado pela ABNT NBR 15961: 2011, que no seu item 12.1 recomenda um cobrimento de 15 mm. ( $x_{ec}$ ).

Tabela 3.7 - Dados usados para efetuar o cálculo de vida útil do graute

<b>Graute</b>	$x_{ec}$ (mm)	$k_c$	$f_c$ (MPa)	$k_{fc}$	$k_{CO_2}$	CO <sub>2</sub> (%)	$k_{UR}$	UR (%)	$k_{ce}$	VU (anos)
<b>G 15</b>	15,00	22,48	16,33	1,5	15,5	0,041	1300	75	0,65	20,16
<b>G 20</b>	15,00	22,48	21,00	1,5	15,5	0,041	1300	75	0,65	42,01
<b>G 25</b>	15,00	22,48	25,02	1,5	15,5	0,041	1300	75	0,65	69,91

Ao se observar os dados das Tabelas 3.7, pode-se verificar que o graute de 15 MPa tem uma vida útil de 20 anos, portanto a combinação desse material com qualquer outro sistema construtivo, seja ele um bloco de concreto ou um bloco cerâmico deve ser bem avaliada. Pois, de acordo com a recomendação de VU da norma de desempenho, para sistemas estruturas a vida útil deve ser maior ou igual a 50 anos e para vedação a vida útil deve ser maior ou igual a 40 anos. Neste caso a frente de carbonatação atingiria a armadura de aço presente no interior do concreto após 20 anos de construção, o que permitiria a despassivação da armadura fazendo com que sua resistência à tração fosse reduzindo gradativamente e levando a estrutura ao colapso.

Como apresentado na Tabela 3.7 os grautes de 20 MPa apresentam um resultado de VU de 42,01 anos o que por si só garantiria a sua condição de vida útil dentro de um sistema de vedação, segundo a norma de desempenho. Ao observarmos os dados de redução do desenvolvimento da frente de carbonatação dos grautes no interior dos blocos apresentados na Tabela 3.6 verificamos que este graute poderia ser utilizado no interior de todos os lotes de blocos ensaiados para um sistema estrutural de projeto de edificação, pois sua vida útil aumentaria para no mínimo 56 anos se estes grautes preenchessem um dos blocos de resistência à compressão de 4,5 MPa.

Conforme Tabela 3.7, para os grautes de 25 MPa o resultado de vida útil é de 69,91 anos o que indica que ele pode ser usado como preenchimento tanto em sistemas estruturais como em sistemas de vedação garantindo a durabilidade recomendada pela norma de desempenho.

### 3.4.2 – ENSAIO DE 15 DIAS

#### 3.4.2.1 GRAUTES

Para avaliar melhor o desenvolvimento da frente de carbonatação nos grautes, em especial dos grautes de resistência à compressão de 15 MPa, realizou-se novos ensaios complementares cujos resultados são apresentados a seguir na figura 3.9.

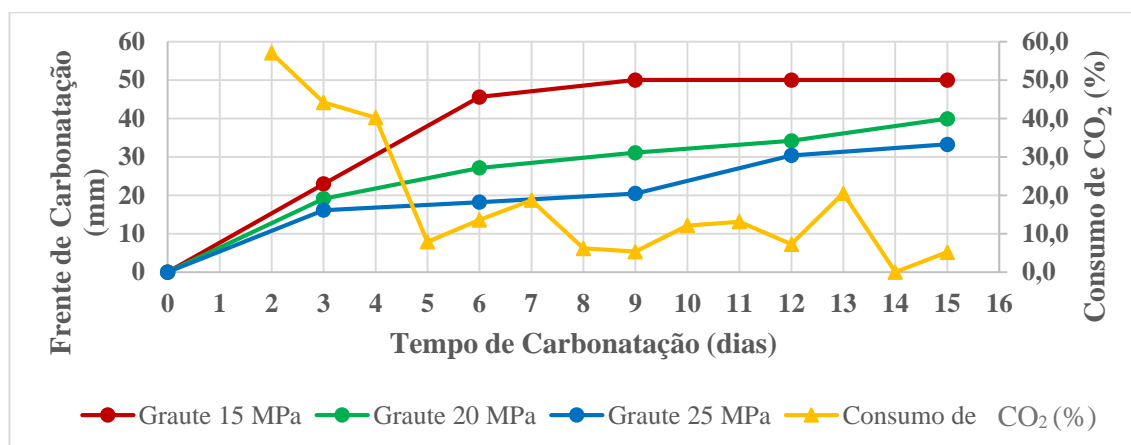


Figura 3.9 – Desenvolvimento da frente de carbonatação e concentração de CO<sub>2</sub> na câmara de carbonatação ao longo do tempo.

Neste ensaio foi possível verificar a redução da velocidade do desenvolvimento da frente de carbonatação após seis dias de ensaio e a consequente redução do consumo de dióxido de carbono no interior da câmara. Para os corpos de prova com resistência à

compressão de 15 MPa observou-se que a carbonatação completa ocorreu entre os seis e os nove dias de ensaio.

Nos resultados apresentados por Castellote *et al.* (2009) ele indica que para um ensaio de carbonatação com uma concentração de 100% de CO<sub>2</sub> a estabilização da carbonatação acontece entre os 7 e os 40 dias. O que se repete nos ensaios apresentados no presente trabalho.

Nos ensaios complementares também foi efetuada uma previsão do avanço da frente de carbonatação com base nos parâmetros apresentados na Tabela 3.7 e na Eq 3.1, os resultados de frente de carbonatação para os grautes de resistência à compressão de 15 MPa estão apresentados na Figura 3.10 e as imagens de carbonatação na Figura 3.11.

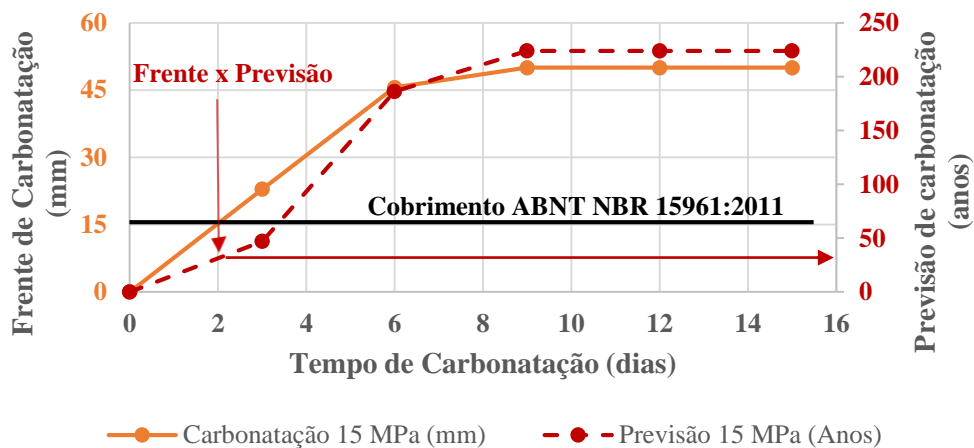


Figura 3.10 – Avanço da frente de carbonatação e previsão de carbonatação pelo modelo de Possan (2010) ao longo do tempo de ensaio para os grautes com resistência à compressão de 15 MPa.



Figura 3.11 – Demonstração da frente de carbonatação para grautes de 15 MPa com uso de fenolftaleína.

A previsão de avanço da frente de carbonatação ao longo dos anos está representada pelas linhas pontilhadas. E o desenvolvimento da frente de carbonatação em milímetros está representado pelas linhas contínuas. Verificou-se que existe uma redução da velocidade do avanço da frente de carbonatação aos 6 dias de ensaio. Observou-se

também que os grautes de 15 MPa atingem os 15mm de carbonatação – valor de cobrimento mínimo para alvenaria armada – aos 20 anos de previsão de vida. Ou seja, antes de completarem 50 anos de vida útil, que é o tempo de vida útil recomendado para sistemas estruturais pela ABNT NBR 15.575-2: 2013.

A seguir são apresentados os resultados de previsão de avanço da frente de carbonatação para os grautes de 20 MPa, aplicando a Eq. 3.1. (Figuras 3.12 e 3.13)

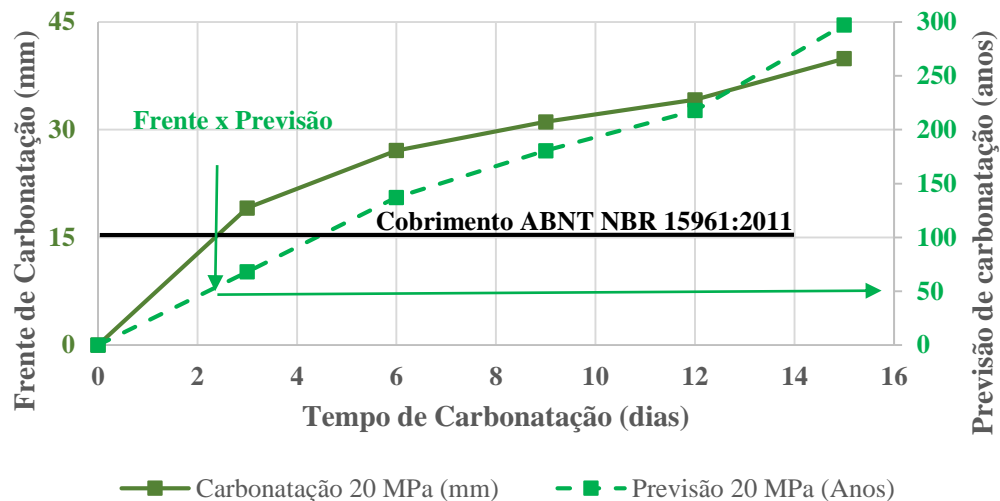


Figura 3.12 – Avanço da frente de carbonatação e previsão de carbonatação pelo modelo de Possan (2010) ao longo do tempo de ensaio para os grautes com resistência à compressão de 20 MPa.

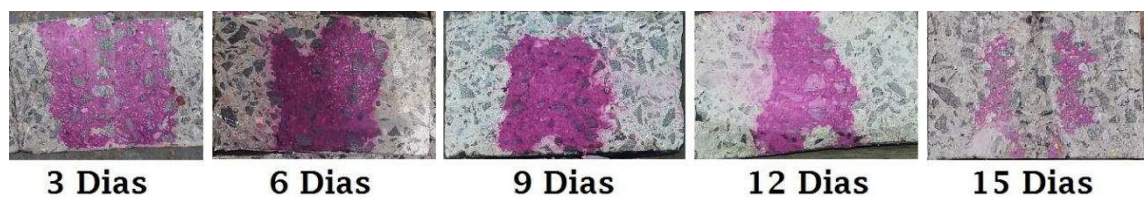


Figura 3.13 – Demonstração da frente de carbonatação para grautes de 20 MPa com uso de fenolftaleína.

Os grautes com resistência à compressão de 20 MPa atingem os 15mm de carbonatação com uma previsão de vida útil de 42 anos de previsão de vida. Não chegando, portanto aos recomendados 50 anos de vida útil. Observa-se que há uma desaceleração do avanço da frente de carbonatação após os seis dias de ensaio, da mesma forma como ocorre com os grautes de resistência à compressão de 15 MPa.

Para os grautes de 25 MPa os resultados são diferentes, como pode-se observar nas Figuras 3.14 e 3.15.

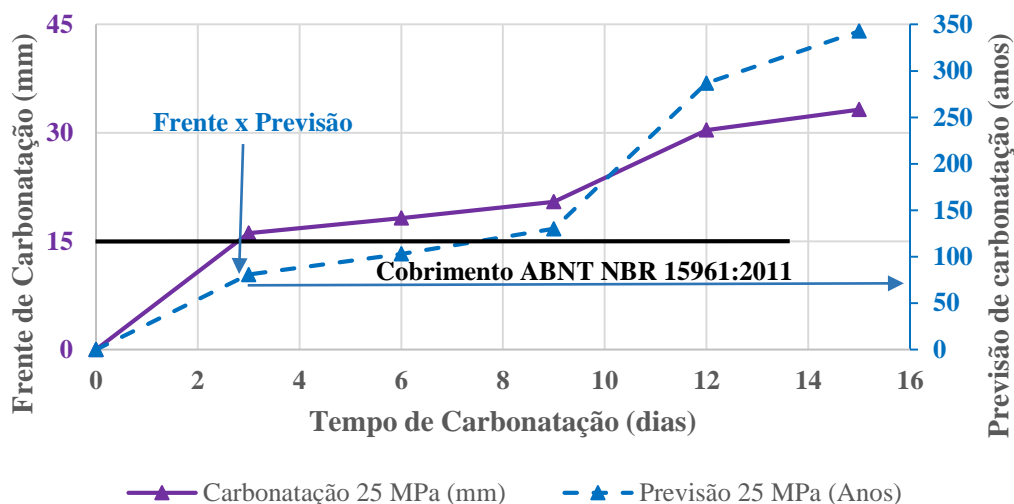


Figura 3.14 – Avanço da frente de carbonatação e previsão de carbonatação pelo modelo de Possan (2010) ao longo do tempo de ensaio para os grautes com resistência à compressão de 25 MPa.



Figura 3.15 – Demonstração da frente de carbonatação para grautes de 25 MPa com uso de fenolftaleína.

Os grautes com resistência à compressão de 25 MPa atingem os 15mm de carbonatação com uma previsão de vida útil 69 anos, se mantendo assim dentro dos padrões recomendados pela norma de desempenho para sistemas estruturais. Verifica-se que há uma desaceleração do avanço da frente de carbonatação após os três dias de ensaio, que pode ser causada pela colmatação dos poros do concreto. E acontece uma nova aceleração após os 9 dias de ensaio como pode ser observado na curva e nas imagens.

Bourguignon *et al.* (2004) em suas pesquisas usando o mesmo cimento adotado neste trabalho e com resistência à compressão de 26,2 MPa encontrou uma frente de carbonatação de 31,6 mm que é um resultado similar ao encontrado neste ensaio.

### 3.4.2.1 BLOCOS

As paredes dos blocos com resistências de 4,5 MPa e 8 MPa que passaram pelo ensaio complementar de 15 dias sofreram um avanço total da frente de carbonatação ao final de 3 dias de ensaio como pode ser visto na Figura 3.16. E as paredes dos blocos com

resistência de 12 MPa permaneceram com alguns pontos sem carbonatar até o final dos 15 dias de ensaio, apresentando, porém, pontos de carbonatação que ultrapassavam por completo as paredes ensaiadas.



Figura 3.16 – Paredes dos blocos com fenolftaleína após 3 dias de carbonatação.

### 3.5 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foram avaliados os blocos de alvenaria de concreto e os grautes quanto ao desenvolvimento da frente de carbonatação. O ensaio de carbonatação foi usado como parâmetro para determinação da Vida Útil destes componentes e então foi avaliado se estes componentes estão em conformidade com a previsão de VU recomendadas pela norma de desempenho.

Nos ensaios de caracterização dos materiais foi possível identificar que os blocos recebidos em doação para a pesquisa se apresentavam em conformidade, quanto às suas dimensões, à absorção e que os blocos dos lotes de 4,5 MPa e 8 MPa também estavam conformes quanto à resistência à compressão. Os grautes produzidos no laboratório para montar as espécies de blocos preenchido alcançaram as características de resistência à compressão e de fluidez requeridas para os ensaios.

Os ensaios de carbonatação foram desenvolvidos para os blocos e para os grautes, em dois diferentes ensaios com durações de 30 dias e 15 dias. Para os ensaios de 30 dias não foi possível identificar claramente como se desenvolveria a frente de carbonatação nas paredes de todos os lotes de blocos e nos grautes de resistência de 15 MPa. Mas para os grautes de 20 MPa e de 25 MPa foi possível identificar uma previsão de vida útil dentro do recomendado pela norma de desempenho. É importante ressaltar que estes grautes atingem uma previsão de vida útil contanto que estejam com um cobrimento mínimo de 15mm como recomendado pela ABNT NBR 15961: 2011.

Nesse ensaio também foi possível identificar que, quando comparados os dados de carbonatação dos grautes e dos blocos, o desenvolvimento da frente de carbonatação dos corpos de prova de grautes e dos graute dentro dos blocos foram diferentes. Havendo uma redução da frente de carbonatação quando o graute se encontrava no interior do bloco.

Nos ensaios de 15 dias observou-se que o avanço da frente de carbonatação nos grautes com resistência à compressão de 15 MPa é realmente muito maior do que nos grautes de 20 MPa e de 25 MPa. Pois estes corpos de prova já se encontravam quase que completamente carbonatados aos 6 dias de ensaio, enquanto que os corpos de prova de 20 MPa e 25 MPa ainda não havia concluído sua carbonatação após os 15 dias de ensaio. Isso só vem corroborar com os resultados de previsão de vida útil usando o método de Possan, que indica que este material produzido para os ensaios com uma resistência à compressão de 15 MPa não é recomendado para uso em alvenarias de vedação ou estrutural.

Ainda sobre esse ensaio é possível concluir que os espécimes com 20 MPa e 25 MPa possuem uma frente de carbonatação mais desacelerada à medida que a resistência à compressão dos corpos de prova cresce. Ou seja, quanto maior a resistência, mais provável que o avanço da frente de carbonatação seja menor.

Nesse ensaio as paredes dos blocos que foram submetidos à carbonatação se encontravam completamente carbonatados com 3 dias de ensaio, não sendo assim possível verificar como a frente se desenvolve na espessura das paredes dos blocos.

De um modo geral ao realizar este ensaio é possível perceber a importância do uso dos espaçadores para garantir um cobrimento mínimo da armadura.

Os grautes aqui utilizados com resistência à compressão mínima exigida por norma, não atenderam às recomendações de vida útil da norma de desempenho, seria importante um efetuar um estudo detalhado com grautes de diferentes traços que tivessem esta mesma resistência à compressão para verificar se esta faixa de resistência atinge esses requisitos.

### **3.6 - REFERÊNCIAS**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – **NBR 6.136. Blocos vazados de concreto simples para Alvenaria - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2014. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – **NBR 15.961-1. Alvenaria estrutural – Blocos de concreto – Parte 1: Projeto.** Rio de Janeiro, 2011. 42p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – **NBR 15.575-1. Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos Gerais.** Rio de Janeiro, 2013. 71p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – **NBR 15.575-2. Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 2: Requisitos para os Sistemas Estruturais.** Rio de Janeiro, 2013. 31p.

BARROS, T.; BERENQUER, R.; GUIMARÃES, N.; LIMA, N.; BARRETO, L. **Análise de fatores contribuintes para a ocorrência de corrosão de armaduras.** In: Seminário de Patologia e Recuperação Estrutural. UPA - SEMIPAR, Recife, 2016.

BOURGUIGNON, K. M. B. G.; SILVA, M. G. da; LORDÊLLO, F. dos S. S.; ZANDONADE, E. **Influência da resistência na profundidade de carbonatação de concretos com diferentes teores de escória de alto-forno.** In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. X - ENTAC, São Paulo, 2004.

CASTELLOTE, M.; FERNANDEZ, L.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO<sub>2</sub> concentrations. **Materials and structures**, v. 42, n. 4, p. 515-525, 2009.

COSTA, F.S; GOMES, J; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Métodos para avaliação de gases do efeito estufa no sistema solo-atmosfera. **Ciência Rural**, v.36, nº2, p.693-700, 2006.

DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, A. B.; ANDRADE, J. J. O.; POSSAN, E.; MASUERO, J. R.; MENNUCCI, M. M. Contribuição à Previsão da Vida Útil de Estruturas de Concreto. **Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Materiais e Sustentabilidade. 1ed.:** Editora Scienza, p. 223-270, 2016.

FATTUHI, N. I. Concrete carbonation as influence by curing regime. **Cement and Concrete Reserch**, v.18, n.3, p. 426-430, 1988.

FERREIRA, F.G.S.; HELENE, P.R.L. **Avaliação da reprodutibilidade do ensaio de carbonatação acelerada a partir de um programa interlaboratorial.** In: 56º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, Natal, 2014.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** São Paulo, 1993. 1993. Tese de Doutorado. Tese, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil.

HOUST, Yves F.; WITTMANN, Folker H. **Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation.** **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 12, p. 1923-1930, 2002.

JUNG, S.H; LEE, M. K.; OH, B. H. Measurement Device and Characteristics of Diffusion Coefficient of Carbon Dioxide in Concrete. **ACI Materials Journal**, V.108, nº 6, p. 589-595, 2011.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

LO, T.Y.; LIAO, W.; WONG, C.K.; TANG, W. Evaluation of carbonation resistance of paint coated concrete for buildings. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 299-306, 2016.

Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas – PBMC – Concentração de CO<sub>2</sub> passa de 400 ppm em 2016. Disponível em <http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/es/noticias-es/644-concentracao-de-co2-passa-400-ppm-em-2016>. Acesso em: 01 de janeiro de 2017.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de previsão**. 2009. 285. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

POSSAN, E; **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese (doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ROY, S. K.; POH, K. B.; NORTHWOOD, D. O. Durability of concrete – accelerated carbonation and weathering studies. **Building and Environment**, v.34, p. 597-606, 1999.

SHENG, P.; GUO, X. The Long-run and Short-run Impacts of Urbanization on Carbon Dioxide Emissions. **Economic Modelling**, v. 53, p. 208–215, 2016.

VILLAIN, G.; THIERY, M.; PLATRET, G. Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. **Cement and Concrete Research**. V.37, p.1182-1191, 2007.

## CAPÍTULO 4 – CONCLUSÃO GERAL

Este trabalho foi produzido para avaliar a alvenaria estrutural e alguns de seus componentes quando às suas características mecânicas, de desenvolvimento da frente de carbonatação e sua previsão de vida útil. Com seus resultados pode-se validar diversos estudos produzidos sobre alvenaria estrutural dentro dos temas de resistência à compressão e durabilidade. Sendo que, levantar algumas possibilidades de avaliar o desempenho estrutural da alvenaria de concreto, de acordo com a norma de desempenho ANBT NBR 15.575, é um dos principais diferenciais deste trabalho.

Todas as conclusões elencadas neste trabalho identificam tendências gerais dos materiais particularmente produzidos para estes ensaios. Elas possibilitam conhecer as propriedades dos componentes estudados, com vista a compreender o comportamento mecânico e de durabilidade da alvenaria. Assim como, também, desenvolver métodos de aferição e de desenvolvimento de ensaio de carbonatação e de previsão de vida útil para materiais cimentícios.

Na montagem da câmara de carbonatação acelerada verificou-se que as montagens de equipamentos em laboratórios são possíveis e podem ser feitas com materiais que podem ser facilmente encontrados no mercado de construção civil. Desde que bem projetadas e executadas com a preocupação de produzir ensaios de alta qualidade e eficiência. Os ensaios preliminares identificaram a importância de avaliar e reavaliar o projeto de um equipamento e sempre que possível melhorá-lo. O consumo de dióxido de carbono no interior da câmara se mostrou bastante acentuado no início do ensaio e tendo ciclos de diminuição do ritmo a cada cinco dias de ensaio. O tempo de estabilização da câmara pode ser identificado como sendo em torno do décimo ao décimo quinto dia de ensaio.

A utilização do método de dois pontos (M2P) para verificação da concentração de CO<sub>2</sub> no interior da câmara foi a melhor alternativa para leitura de concentração possível para este ensaio, devido ao seu baixo custo e à facilidade de verificar a concentração de dióxido de carbono imediatamente após a leitura, aumentando a frequência analítica. Com ele foi possível medir a concentração de CO<sub>2</sub> e monitorar consumo de dióxido de carbono ao longo do tempo.

Na análise de vida útil dos blocos de alvenaria estrutural de concreto estudados não foi possível verificar se sua previsão de vida útil se encontra dentro dos padrões estabelecidos pela ABNT NBR 15.575: 2013. Para os ensaios realizado com os grautes

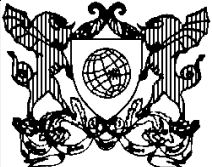
identificou-se que o graute executado com resistência à compressão de 15 MPa não atende às exigências de vida útil estabelecidas pela norma de desempenho. Porém os grautes de 20 MPa e 25 MPa estão dentro da faixa de previsão de vida útil estabelecida pela norma, desde que observadas as exigências de cobrimento estabelecidas pela ABNT NBR 15961: 2011.

#### **4.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Após a realização do presente trabalho algumas questões foram levantadas que podem ser objeto de outras pesquisas, tais como:

- Uma pesquisa mais aprofundada sobre a resistência mínima exigida para o graute na alvenaria estrutural.
- Avaliar concretos com resistência característica de 15 MPa quanto ao desenvolvimento da frente de carbonatação, fazendo verificações de avanço da frente de carbonatação em diferentes tipos de traços produzidos com materiais que tenham um empacotamento melhor.
- Fazer ensaios acelerados de carbonatação com retiradas de corpos de prova em um tempo menor para paredes de alvenaria estrutural. Desta forma, seria possível verificar o real desenvolvimento da frente de carbonatação para esses elementos de concreto com as características de resistências à compressão avaliadas.
- Fazer ensaios acelerados de carbonatação usando uma concentração de dióxido de carbono máxima de 20%.
- Realizar ensaios de desenvolvimento da frente de carbonatação em alvenarias argamassadas e pintadas.

## ANEXO A

	<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA</b> <b>Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas</b> <b>Departamento de Engenharia Civil</b> Campus Universitário, s/n 36570-000 - VIÇOSA - MG - BRASIL Tel: 73 99828-0108 – e-mail: roseli.martins@ufv.br	<b>PROGRAMAÇÃO</b>
---	--	--------------------

Assunto:	<b>Código do controle de umidade e temperatura das câmaras</b>				
Data:	29/05/2016	Local:	UFV	Versão:	01
Autor (a):	Alterado por Roseli e Renan (estudante de graduação em Eng. Civil – UFV)				

O código de controle e automação parcial da câmara de carbonatação

### CÓDIGO PARA CÂMARA DE CO<sub>2</sub> DO LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Criado por Renan Rocha Ribeiro, 29 de Maio de 2016

Este sketch incorpora o LCD Keypad Shield para mostrar as informações: umidades nas câmaras, temperaturas nas câmaras, estados dos umidificadores (ligado ou desligado), temperaturas mínima e máxima em cada câmara.

#### OBSERVAÇÕES A RESPEITO DO SENSOR DE UMIDADE/TEMPERATURA

Este sketch trabalha com 2 sensores DHT22. Sendo assim, eles serão nomeados Sensor 1 e Sensor 2. O Sensor 1 será ligado nos pinos digitais 3,2,1 e o Sensor 2 será ligado nos pinos digitais 13,12,11.

O processo de leitura dos valores do sensor podem demorar até 250 milissegundos, uma vez que o DHT22 é um sensor relativamente lento.

O sensor necessita de um intervalo de pelo menos 2 segundos a cada leitura.

Ou seja, uma leitura fornecida agora pode ser referente à medições feitas a 2 segundos atrás.

Sketch para sensor DHT22 modificado com base no exemplo publicado em:

<http://www.electroschematics.com/11291/arduino-dht22-am2302-tutorial-library/>

**CONEXÕES DE ENERGIA:** como o DHT22 é um sensor de baixo consumo de energia (cerca de 2.5mA no máximo), pode-se fornecer energia a ele por meio de pinos digitais. Assim, fazendo dois pinos digitais serem output, pode-se fornecer energia por meio de um pino no estado HIGH e fornecer um terra por meio de um pino no estado LOW. Lembrar de fazer essas declarações antes de inicializar o DHT (dht.begin). É válido frisar que tal procedimento só é viável para alguns sensores que não exigem altas correntes, uma vez que os pinos digitais do Arduino possuem um limite de fornecimento de corrente (por volta de 40 mA para o Arduino UNO).

Assim, para cada sensor tem-se:

Sensor 1	Sensor 2
5V -> D3	5V -> D13
Leitura -> D2	Leitura -> D12
GND -> D1	GND -> D11

#### OBSERVAÇÕES A RESPEITO DO RELAY

Este sketch trabalha com 2 umidificadores. Sendo assim, serão usados relays 1 e 2. O relay 1 é conectado ao pino digital 0 do Arduino pela entrada IN1 do módulo relay. O relay 2 é conectado ao pino digital 10 do Arduino pela entrada IN2 do módulo relay.

Checar se o relay é ligado quando é enviado um output HIGH (ACTIVE HIGH) ou LOW (ACTIVE LOW) para ele (Saber se ele é Active LOW ou Active HIGH)

Um relay Active HIGH ao receber um sinal HIGH fecha o circuito, ou seja, se torna ativo. Um relay Active LOW ao receber um sinal LOW fecha o circuito, ou seja, se torna ativo.

Sendo assim, a depender da natureza do relay, o sinais HIGH e LOW devem ser modificados ao longo deste código.

NO CASO DOS RELAYS DO LMC (2 Relay Module - Sangle), OS RELAYS SÃO ACTIVE LOW. LOGO, PARA DESLIGAR O DESUMIDIFICADOR DEVEMOS USAR INPUT HIGH, E PARA LIGAR O DESUMIDIFICADOR DEVEMOS USAR O INPUT LOW.

```
*/
#include <LiquidCrystal.h>
#include <DHT.h>

//Definir os pinos de ligação para o Sensor 1 e definir o tipo do Sensor 1 como DHT22
#define DHTTYPE1 DHT22
#define power1 3
#define DHTPIN1 2
#define gnd1 1

//Definir os pinos de ligação para o Sensor 2 e definir o tipo do Sensor 2 como DHT22
#define DHTTYPE2 DHT22
#define power2 13
#define DHTPIN2 12
#define gnd2 11

//Definir os pinos de ligação para os dois relays (IN1 e IN2)
int relay_direita = 0; //chave que liga umidificador da câmara da direita
int relay_esquerda = 10; //chave que liga umidificador da câmara da esquerda

//Definir as variáveis que indicarão se os umidificadores estão ligados ou desligados. Se a
variável for 0 estão desligados, se for 1 estão ligados
int relay_direita_ligado = 0;
int relay_esquerda_ligado = 0;

//Definir a faixa de umidade aceita dentro da câmara
int umidade_maxima = 80;
int umidade_minima = 65;

//Definir as variáveis que guardarão as leituras de cada sensor
float umidade_direita;
float umidade_esquerda;
float temperatura_direita = 0;
float temperatura_esquerda = 0;
float temperatura_esquerda_max = 0;
float temperatura_esquerda_min = 100;
float temperatura_direita_max = 0;
float temperatura_direita_min = 100;

//Definir as variáveis Erro1 e Erro2, que contabilizam quantos erros de leitura cada sensor teve
durante a execução do programa.
int Erro1 = 0;
int Erro2 = 0;

//Instanciar os sensores Sensor1 e Sensor 2
DHT dht1(DHTPIN1, DHTTYPE1);
DHT dht2(DHTPIN2, DHTTYPE2);
```

```

//Instanciar a tela lcd
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7);

//Código a ser repetido apenas uma vez, na inicialização do Arduino
void setup() {

    //Definir os pinos 3 e 1 para alimentação do Sensor 1 (DHT22), sendo o pino 3 (power1) a
    fonte de 5v definido como HIGH, e o pino 1 (gnd1) o terra e definido como LOW.
    pinMode(power1,OUTPUT);
    digitalWrite(power1,HIGH);
    pinMode(gnd1,OUTPUT);
    digitalWrite(gnd1,LOW);

    //Definir os pinos 13 e 11 para alimentação do Sensor 2 (DHT22), sendo o pino 13 (power2) a
    fonte de 5v definido como HIGH, e o pino 11 (gnd2) o terra e definido como LOW.
    pinMode(power2,OUTPUT);
    digitalWrite(power2,HIGH);
    pinMode(gnd2,OUTPUT);
    digitalWrite(gnd2,LOW);

    delay(1000);
    //Serial.begin(9600); //Não haverá monitor serial neste sketch e estamos usando o PIN0 e 1
    (pinos de comunicação serial) como OUTPUT e INPUT, então não podemos incluir
    Serial.begin
    dht1.begin();
    dht2.begin();
    lcd.begin(16, 2);

    //Mensagem de inicialização no LCD
    lcd.setCursor( 0, 0);
    lcd.print("Camara de ataque");
    lcd.setCursor( 0, 1);
    lcd.print("de CO2 - LMC/UFV");
    delay(3000);
    lcd.clear();

    lcd.setCursor( 0, 0);
    lcd.print("Inicializando");
    lcd.setCursor( 0, 1);
    lcd.print("sistema...");

    pinMode(relay_direita, OUTPUT);
    pinMode(relay_esquerda, OUTPUT);

}

//Código a ser repetido indefinidamente.
void loop() {
    // Esperar alguns segundos para estabilização dos DHTs, para que uma nova leitura possa ser
    feita.
    delay(2000);

    //Ler valor da umidade
    umidade_direita = dht1.readHumidity();
    umidade_esquerda = dht2.readHumidity();

```

```

//Ler valor da temperatura em Celsius
temperatura_direita = dht1.readTemperature();
temperatura_esquerda = dht2.readTemperature();

//Verificar os valores máximos e mínimos de temperatura
if (temperatura_direita > temperatura_direita_max) {
    temperatura_direita_max = temperatura_direita;
}
if (temperatura_direita < temperatura_direita_min) {
    temperatura_direita_min = temperatura_direita;
}
if (temperatura_esquerda > temperatura_esquerda_max) {
    temperatura_esquerda_max = temperatura_esquerda;
}
if (temperatura_esquerda < temperatura_esquerda_min) {
    temperatura_esquerda_min = temperatura_esquerda;
}

// Checar se alguma leitura falhou, e, se houver falhado, sair da rotina (return) e reinicializar o
código (comando return;)
if (isnan(umidade_direita) || isnan(temperatura_direita)) {
    //Serial.println("Falha em ler valor do Sensor 1!");
    Erro1 ++;
    //Mostrar mensagem de erro no LCD
    lcd.clear();
    lcd.setCursor( 0, 0);
    lcd.print("Erro no sensor 1");
    lcd.setCursor( 0, 1);
    lcd.print("Qtde erros: ");
    lcd.print(Erro1);
    delay(2000);
    //return;
}

if (isnan(umidade_esquerda) || isnan(temperatura_esquerda)) {
    //Serial.println("Falha em ler valor do Sensor 2!");
    Erro2 ++;
    //Mostrar mensagem de erro no LCD
    lcd.clear();
    lcd.setCursor( 0, 0);
    lcd.print("Erro no sensor 2");
    lcd.setCursor( 0, 1);
    lcd.print("Qtde erros: ");
    lcd.print(Erro2);
    delay(2000);
    //return;
}

//Checar se é necessário ligar algum dos relays, de acordo com as leituras obtidas de cada
sensor.
if(umidade_direita > umidade_maxima) {
    digitalWrite(relay_direita, LOW); //Modificar de acordo com a característica do relay: se ele
é Active HIGH ou Active LOW. Aqui deve-se garantir que o relay será ligado (umidificador
será ligado).

```

```

    relay_direita_ligado = 1;
}

else if (umidade_direita < umidade_minima) {
    digitalWrite(relay_direita, HIGH); //Modificar de acordo com a característica do relay: se ele
    é Active HIGH ou Active LOW. Aqui deve-se garantir que o relay será desligado (umidificador
    será desligado).
    relay_direita_ligado = 0;
}

    if(umidade_esquerda > umidade_maxima) {
        digitalWrite(relay_esquerda, LOW); //Modificar de acordo com a característica do relay: se
        ele é Active HIGH ou Active LOW. Aqui deve-se garantir que o relay será ligado (umidificador
        será ligado).
        relay_esquerda_ligado = 1;
    }

else if (umidade_esquerda < umidade_minima) {
    digitalWrite(relay_esquerda, HIGH); //Modificar de acordo com a característica do relay: se
    ele é Active HIGH ou Active LOW. Aqui deve-se garantir que o relay será desligado
    (umidificador será desligado).
    relay_esquerda_ligado = 0;
}

/*Imprimir os resultados no monitor serial
Serial.print("Umidade no Sensor 1: ");
Serial.print(umidade_direita);
Serial.print(" %\t");
Serial.print("Temperatura no Sensor 1: ");
Serial.print(temperatura_direita);
Serial.print(" *C ");
Serial.print(" %\t");
Serial.print(" Erros de leitura no Sensor 1: ");
+ Serial.println(Erro1);*/

//Imprimir os resultados do sensor 1 no LCD
lcd.clear();
lcd.setCursor( 0, 0);
lcd.print("CamDir ");
lcd.print("h");
lcd.print(umidade_direita, 0);
lcd.print("% ");
lcd.print("U");
if (relay_direita_ligado == 0) {
    lcd.print("D");
}
else if (relay_direita_ligado == 1) {
    lcd.print("L");
}
else {
    lcd.print("E");
}
lcd.setCursor( 0, 1);
lcd.print("T");
lcd.print(temperatura_direita,0);

```

```

lcd.print("C ");
lcd.print("T+");
lcd.print(temperatura_direita_max,0);
lcd.print("C ");
lcd.print("T-");
lcd.print(temperatura_direita_min,0);
lcd.print("C ");

delay(4000);

/*Serial.print("Umidade no Sensor 2: ");
Serial.print(umidade_esquerda);
Serial.print(" %\t");
Serial.print("Temperatura no Sensor 2: ");
Serial.print(temperatura_esquerda);
Serial.print(" *C ");
Serial.print(" %\t");
Serial.print(" Erros de leitura no Sensor 2: ");
Serial.println(Erro2);*/

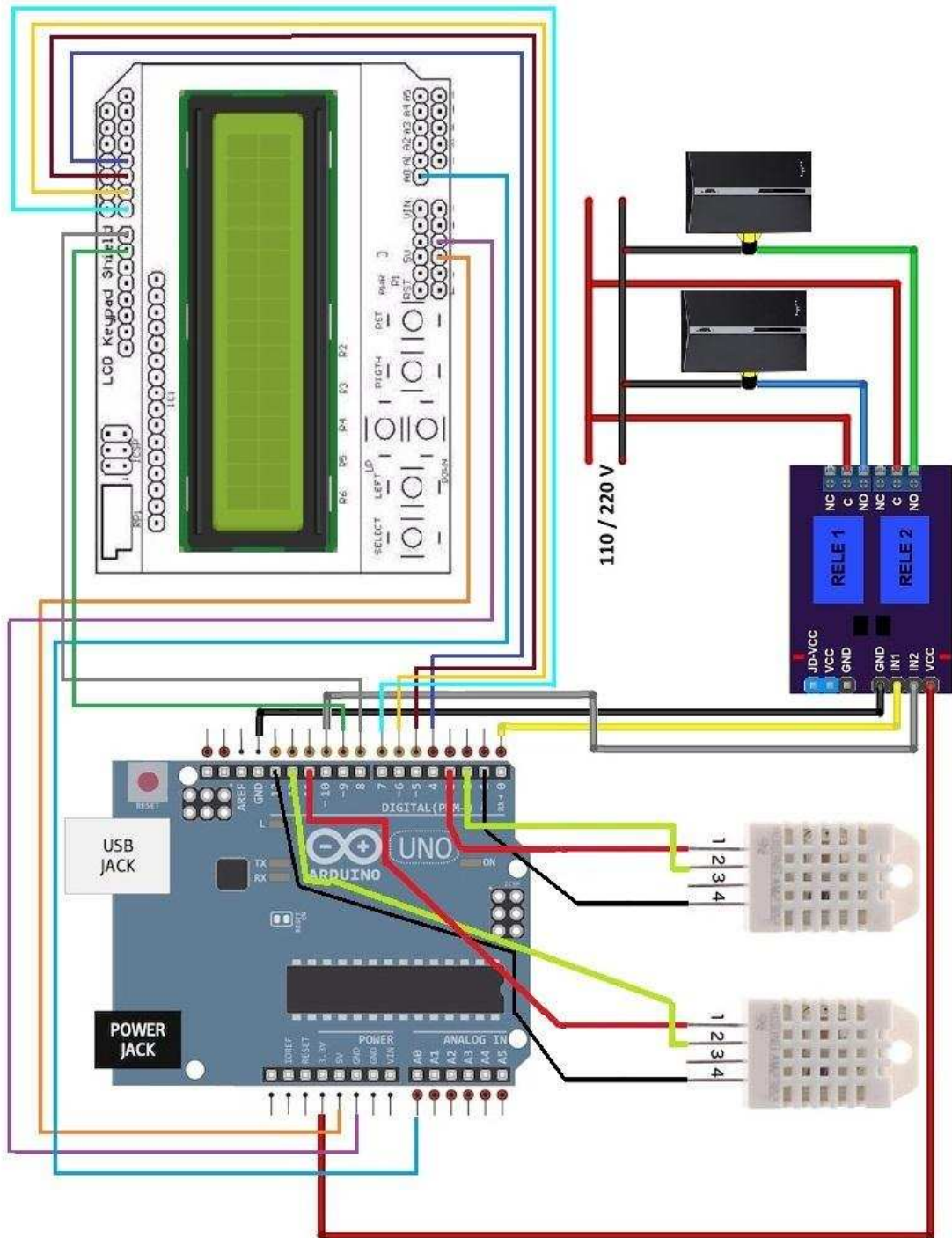
//Imprimir os resultados do sensor 2 no LCD
lcd.clear();
lcd.setCursor( 0, 0);
lcd.print("CamEsq ");
lcd.print("h");
lcd.print(umidade_esquerda, 0);
lcd.print("% ");
lcd.print("U");
if (relay_esquerda_ligado == 0) {
  lcd.print("D");
} else if (relay_esquerda_ligado == 1) {
  lcd.print("L");
} else {
  lcd.print("E");
}
lcd.setCursor( 0, 1);
lcd.print("T");
lcd.print(temperatura_esquerda, 0);
lcd.print("C ");
lcd.print("T+");
lcd.print(temperatura_esquerda_max, 0);
lcd.print("C ");
lcd.print("T-");
lcd.print(temperatura_esquerda_min, 0);
lcd.print("C ");

delay(2000);
}

```

O código dos sensores de umidade usou como parâmetro a umidade máxima de 80% e mínima de 65% para acionar o desumidificador existente no interior das câmaras de carbonatação.

# DIAGRAMA DE LIGAÇÃO DO ARDUÍNO



## ANEXO B – CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**  
**Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas**  
**Departamento de Engenharia Civil**  
 Campus Universitário, s/n  
 36570-000 - VIÇOSA - MG - BRASIL  
 Tel: 73 99828-0108 – e-mail: roseli.martins@ufv.br

# ENSAIOS

Assunto:	<b>Caracterização dos Blocos de Concreto</b>		
Data:	02/04/2017	Local:	UFV
Autor (a):	Roseli Oliveira Guedes Martins		
			Versão: 01

<b>Material: Bloco de concreto</b>	<b>Data do recebimento do lote: 09/02/2015</b>
<b>Fabricante: BLOJAF Artefatos de Concreto</b>	Data dos ensaios: 04/03/2015

### Lote BB143940

<b>Data de Fabricação: 30/01/2015</b>	<b>Idade na data do ensaio: 33 dias</b>
<b>Resistência à compressão nominal: 4,5 MPa</b>	$f_{bk,est}$ : 5,9 MPa

Corpos de prova	Largura (mm)	Altura (mm)	Comp. (mm)	Espessura (mm)		Men. dim. furo (mm)	Mísula (mm)	Tensão (MPa)
				Par. Long.	Par. Trans.			
<b>01</b>	139,67	189,33	390,33	31,30	29,60	154,0	47,0	
<b>02</b>	138,33	189,67	389,33	30,80	29,90	151,5	46,0	
<b>03</b>	138,00	190,00	389,67	31,35	30,67	150,5	45,5	
<b>04</b>	137,67	191,33	389,67	31,30	30,07	151,0	46,0	6,15
<b>05</b>	137,67	191,33	388,67	31,65	29,00	152,0	45,0	7,06
<b>06</b>	138,33	190,00	389,33	30,78	29,23	151,5	49,0	7,29
<b>07</b>	139,67	191,33	389,33	31,23	29,87	151,5	47,0	7,54
<b>08</b>	138,00	190,33	389,33	29,98	31,13	149,0	46,5	7,64
<b>09</b>	138,33	189,33	389,33	32,18	30,63	151,5	45,5	8,81
<b>10</b>	138,67	190,00	390,33	31,43	30,47	151,5	46,0	9,05
<b>Média</b>	<b>138,43</b>	<b>190,27</b>	<b>389,53</b>	<b>31,20</b>	<b>30,06</b>	<b>151,5</b>	<b>46,4</b>	<b>7,65</b>
<b>Especificação</b>	<b>140 ± 2</b>	<b>190 ± 3</b>	<b>390 ± 3</b>	<b>≥ 25</b>	<b>≥ 25</b>	<b>≥ 70</b>	<b>≥ 40</b>	<b>≥ 4,5</b>

Corpos de prova	Absorção (%)	A <sub>liq</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>Bruta bloco</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>liq</sub> /A <sub>bruta</sub> (%)	Porosidade Estimada
<b>1</b>	6,5	29477	54517	54,07	13,53
<b>2</b>	6,1	29394	53858	54,58	13,00
<b>3</b>	5,9	29411	53774	54,69	12,53
<b>Média</b>	<b>6,2</b>	<b>29427</b>	<b>54049</b>	<b>54,45</b>	<b>13,02</b>
<b>Especificação</b>	<b>≤ 8</b>			<b>≤ 75</b>	

**Lote BA143980**

<b>Data de Fabricação: 26/11/2014</b>	<b>Idade na data do ensaio: 98 dias</b>
<b>Resistência à compressão nominal: 8,0 MPa</b>	$f_{bk,est}$ : 8,2 MPa

Corpos de prova	Largura (mm)	Altura (mm)	Comp. (mm)	Espessura (mm)		Men. dim. furo (mm)	Mísula (mm)	Tensão (MPa)
				Par. Long.	Par. Trans.			
<b>01</b>	139,67	190,67	389,00	30,90	33,13	146,5	46,5	
<b>02</b>	139,67	190,33	390,33	31,90	32,93	146,5	48,0	
<b>03</b>	139,00	191,33	389,33	32,00	33,07	146,0	50,0	
<b>04</b>	139,67	189,67	390,33	31,98	33,03	146,5	49,0	8,66
<b>05</b>	139,00	190,67	390,00	32,48	33,03	146,0	49,0	8,66
<b>06</b>	140,33	190,00	390,33	31,98	31,37	146,5	48,0	9,11
<b>07</b>	140,33	189,33	390,00	32,05	33,13	145,5	50,0	9,26
<b>08</b>	139,67	190,33	389,67	31,78	32,60	146,0	51,0	9,60
<b>09</b>	138,67	190,33	389,33	33,53	33,70	144,5	49,0	9,65
<b>10</b>	140,00	190,33	388,33	32,40	32,67	147,5	47,5	11,13
<b>Média</b>	<b>139,60</b>	<b>190,30</b>	<b>389,67</b>	<b>32,10</b>	<b>32,87</b>	<b>146,1</b>	<b>48,8</b>	<b>9,44</b>
<b>Especificação</b>	<b>140 ± 2</b>	<b>190 ± 3</b>	<b>390 ± 3</b>	<b>≥ 25</b>	<b>≥ 25</b>	<b>≥ 70</b>	<b>≥ 40</b>	<b>≥ 8,0</b>

Corpos de prova	Absorção (%)	A <sub>liq</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>Bruta bloco</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>liq</sub> /A <sub>bruta</sub> (%)	Porosidade Estimada
<b>1</b>	5,5	30052	54330	55,31	11,69
<b>2</b>	5,4	30100	54517	55,21	11,61
<b>3</b>	5,8	29932	54117	55,31	12,22
<b>Média</b>	<b>5,5</b>	<b>30028</b>	<b>54049</b>	<b>55,28</b>	<b>11,84</b>
<b>Especificação</b>	<b>≤ 6</b>			<b>≤ 75</b>	

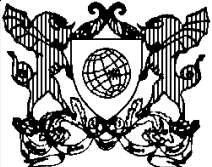
**Lote BA143912**

<b>Data de Fabricação: 22/12/2014</b>	<b>Idade na data do ensaio: 72 dias</b>
<b>Resistência à compressão nominal: 12 MPa</b>	$f_{bk,est}$ : 12,0 MPa

Corpos de prova	Largura (mm)	Altura (mm)	Comp. (mm)	Espessura (mm)		Men. dim. furo (mm)	Mísula (mm)	Tensão (MPa)
				Par. Long.	Par. Trans.			
<b>01</b>	141,33	191,00	390,33	32,60	33,50	146,0	49,5	
<b>02</b>	140,33	190,67	391,00	33,35	33,27	147,0	49,0	
<b>03</b>	140,67	191,33	389,33	32,68	33,13	146,5	50,0	
<b>04</b>	140,00	191,67	389,33	32,48	32,20	148,0	48,5	12,22
<b>05</b>	139,67	190,67	390,00	32,13	32,23	157,5	43,0	13,21
<b>06</b>	141,33	191,67	389,33	32,53	33,53	146,0	47,0	13,47
<b>07</b>	140,00	191,67	389,33	32,25	33,07	145,5	50,5	13,84
<b>08</b>	140,33	191,00	389,33	33,23	33,33	146,5	49,0	14,28
<b>09</b>	140,67	191,00	389,33	32,10	33,83	146,5	48,0	14,68
<b>10</b>	140,67	191,67	390,67	33,05	32,83	145,5	48,5	14,05
<b>Média</b>	<b>140,50</b>	<b>191,23</b>	<b>389,80</b>	<b>32,64</b>	<b>33,83</b>	<b>147,5</b>	<b>48,3</b>	<b>12,00</b>
<b>Especificação</b>	<b>140 ± 2</b>	<b>190 ± 3</b>	<b>390 ± 3</b>	<b>≥ 25</b>	<b>≥ 25</b>	<b>≥ 70</b>	<b>≥ 40</b>	<b>≥ 12,0</b>

Corpos de prova	Absorção (%)	A <sub>liq</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>Bruta bloco</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>liq</sub> /A <sub>bruta</sub> (%)	Porosidade Estimada
<b>1</b>	4,8	30450	55167	55,20	10,49
<b>2</b>	5,2	30483	54870	55,55	11,36
<b>3</b>	4,6	30470	54766	55,64	10,03
<b>Média</b>	<b>4,9</b>	<b>30468</b>	<b>54935</b>	<b>55,46</b>	<b>10,63</b>
<b>Especificação</b>	<b>≤ 6</b>			<b>≤ 75</b>	

## ANEXO C – CARACTERIZAÇÃO DOS GRAUTES E SEUS MATERIAIS

	<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA</b> Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas Departamento de Engenharia Civil Campus Universitário, s/n 36570-000 - VIÇOSA - MG - BRASIL Tel: 73 99828-0108 – e-mail: roseli.martins@ufv.br	<h1 style="margin: 0;">ENSAIOS</h1>
---	--	-------------------------------------

Assunto:	<b>Caracterização dos Grautes</b>	
Data:	20/11/2015	Local: UFV
Autor (a):	Roseli Oliveira Guedes Martins	

### Massas Específica dos Materiais (g/cm<sup>3</sup>)

Material	Massas unitárias (g/cm <sup>3</sup> )		
	1ª amostra	2ª amostra	Média
Cimento CP II E 32	2,941	2,956	<b>2,948</b>
Areia Natural	2,59	2,61	<b>2,6</b>
Brita 0	3,02	3,01	<b>3,02</b>

### Resistência á compressão do cimento

CIMENTO		TUPY CP II E 32						
CP's	IDADE (dias)	DATA	DIÂMETRO (cm)			Carga (kgf)	Tensão (MPa)	fc médio (MPa)
			1	2	Média			
13	3	23/11/2015	5,00	5,01	5,01	5250	26,70	26,89
14	3	23/11/2015	5,00	4,99	5,00	5170	26,40	
19	3	23/11/2015	5,00	5,00	5,00	5310	27,06	
20	3	23/11/2015	5,00	5,02	5,01	5400	27,41	

CIMENTO		TUPY CP II E 32						
CP's	IDADE (dias)	DATA	DIÂMETRO (cm)			Carga (kgf)	Tensão (MPa)	fc médio (MPa)
			1	2	Média			
15	7	30/11/2015	5,00	5,01	5,01	6370	32,39	32,15
16	7	30/11/2015	4,98	5,01	5,00	6410	32,73	
21	7	30/11/2015	5,00	5,00	5,00	6270	31,95	
22	7	30/11/2015	5,00	5,02	5,01	6210	31,52	

CIMENTO		TUPY CP II E 32						
CP's	IDADE (dias)	DATA	DIÂMETRO (cm)			Carga (kgf)	Tensão (MPa)	fc médio (MPa)
			1	2	Média			
17	28	21/12/2015	5,00	5,02	5,01	6850	34,77	34,47
18	28	21/12/2015	5,02	5,03	5,03	6840	34,51	
23	28	21/12/2015	5,04	5,02	5,03	6810	34,29	

24	28	21/12/2015	5,04	5,02	5,03	6820	34,34
----	----	------------	------	------	------	------	-------

**Resistência à Compressão do graute Traço 15 Mpa**

**Ensaio de dosagem: moldagem de CP's 08/12/2015**

3 dias					
CP n°	Resistência à Compressão Axial				
	Diâmetro (cm)	Carga(kgf)	Tensão(MPa)	$f_c$ Méd (MPa)	DP (MPa)
01	10,00	6680	8,51	<b>8,81</b>	4,16
02	9,98	7130	9,12		
7 dias					
CP n°	Resistência à Compressão Axial				
	Diâmetro (cm)	Carga(kgf)	Tensão(MPa)	$f_c$ Méd (MPa)	DP (MPa)
03	10,02	10420	13,23	<b>13,25</b>	6,25
04	9,99	10380	13,26		
28 dias					
CP n°	Resistência à Compressão Axial				
	Diâmetro (cm)	Carga(kgf)	Tensão(MPa)	$f_c$ Méd (MPa)	DP (MPa)
05	9,94	11980	15,41	<b>15,70</b>	7,40
06	10,01	12520	15,98		

**Resistência à Compressão do graute Traço 20 Mpa**

**Ensaio de dosagem: moldagem de CP's 08/12/2015**

3 dias					
CP n°	Resistência à Compressão Axial				
	Diâmetro (cm)	Carga(kgf)	Tensão(MPa)	$f_c$ Méd (MPa)	DP (MPa)
01	9,97	8470	10,85	<b>10,68</b>	0,17
02	9,98	8210	10,51		
7 dias					
CP n°	Resistência à Compressão Axial				
	Diâmetro (cm)	Carga(kgf)	Tensão(MPa)	$f_c$ Méd (MPa)	DP (MPa)
03	9,95	12440	16,02	<b>16,21</b>	0,18
04	9,95	12740	16,39		
28 dias					
CP n°	Resistência à Compressão Axial				
	Diâmetro (cm)	Carga(kgf)	Tensão(MPa)	$f_c$ Méd (MPa)	DP (MPa)
05	9,97	16890	21,67	<b>21,56</b>	0,11
06	9,95	16670	21,45		

### Resistência à Compressão do graute Traço 25 Mpa

#### Ensaio de dosagem: moldagem de CP's 08/12/2015

3 dias					
CP nº	Resistência à Compressão Axial				
	Diâmetro (cm)	Carga(kgf)	Tensão(MPa)	$f_c$ Méd (MPa)	DP (MPa)
01	9,95	11900	15,33	<b>15,58</b>	0,25
02	9,99	12390	15,83		
7 dias					
CP nº	Resistência à Compressão Axial				
	Diâmetro (cm)	Carga(kgf)	Tensão(MPa)	$f_c$ Méd (MPa)	DP (MPa)
03	9,96	18190	23,38	<b>22,98</b>	0,40
04	10,00	17720	22,57		
28 dias					
CP nº	Resistência à Compressão Axial				
	Diâmetro (cm)	Carga(kgf)	Tensão(MPa)	$f_c$ Méd (MPa)	DP (MPa)
05	10,02	20970	26,63	<b>26,51</b>	0,13
06	10,01	20750	26,38		