



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

CLEBER MEDEIROS DE LUCENA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UMA CÂMARA DE
CARBONATAÇÃO ACELERADA PROJETADA E MONTADA EM
LABORATÓRIO**

NATAL

2016

CLEBER MEDEIROS DE LUCENA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UMA CÂMARA DE
CARBONATAÇÃO ACELERADA PROJETADA E MONTADA EM
LABORATÓRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^o. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.

Co-Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá.

NATAL

2016

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede
Catalogação da Publicação na Fonte

Lucena, Cleber Medeiros de.

Avaliação da eficiência de uma câmara de carbonatação acelerada projetada e montada em laboratório / Cleber Medeiros de Lucena. - Natal, RN, 2016.

154 f. : il.

Orientador: Prof^o. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Algoritmo - Dissertação. 2. Câmara de carbonatação acelerada automatizada - Dissertação. 3. Eficiência - Dissertação. 4. Microcontrole - Dissertação. I. Anjos, Marcos Alyssandro Soares dos. II. Almeida, Maria das Vitórias Vieira. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 004.414.32

CLEBER MEDEIROS DE LUCENA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UMA CÂMARA DE
CARBONATAÇÃO ACELERADA PROJETADA E MONTADA EM
LABORATÓRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos – Orientador (IFRN)

Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá – Co-Orientadora (UFRN)

Prof^o. Dr. José Neres da Silva Filho – Examinador Interno (UFRN)

Prof^o. Dr. Normando Perazzo Barbosa – Examinador Externo (UFPB)

Natal, 05 de maio de 2016.

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UMA CÂMARA DE CARBONATAÇÃO ACELERADA PROJETADA E MONTADA EM LABORATÓRIO

Cleber Medeiros de Lucena

Orientador: Prof^o. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos
Co-Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

RESUMO

O dióxido de carbono presente na atmosfera penetra na matriz porosa do concreto e se dissolve internamente alterando o equilíbrio químico do meio. Em decorrência dessa dissociação do CO₂ ocorre uma diminuição progressiva do pH, o que contribui para uma provável corrosão do reforço. Esta pesquisa foi pautada no projeto e construção de uma câmara de carbonatação acelerada, de forma automatizada, em quatro etapas distintas, capaz de equipar um laboratório destinado a estudar a durabilidade das edificações, principalmente no tocante às pesquisas relacionadas às análises de materiais cimentícios. A primeira etapa foi a realização do projeto propriamente dito, onde definiu-se dimensões e materiais a serem utilizados. A segunda etapa destinou-se a construção da câmara de carbonatação e finalizou com o teste de estanqueidade com o intuito de garantir sua vedação. A pesquisa teve continuidade em sua terceira etapa, com a automação e microcontrole da câmara de carbonatação através de um algoritmo desenvolvido e programado, capaz de interagir com a programação presente nos sensores e válvulas adquiridos comercialmente. Esta etapa, ainda contou com a calibração do sensor, utilizando padrões rastreáveis internacionalmente e a realização de pré-testes em modelo reduzido, antes da instalação definitiva na câmara de carbonatação. A quarta etapa foi submeter ao ensaio de carbonatação acelerada, amostras cilíndricas de concreto com dimensões de 100mm x 200mm, no interior da câmara de carbonatação acelerada, conforme os padrões da Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC E-391 (1993) e especificação FINAL DRAFT FprCEN/TS 12390-12, da European Committee Standardization de novembro de 2010. As amostras foram submetidas ao ensaio de carbonatação acelerada aos 7, 14, 28, 42 e 56 dias de exposição e obtiveram respectivamente, profundidades médias de carbonatação de 0,00mm, 1,62mm, 2,65mm, 3,35mm e 3,72mm. Por fim, a pesquisa cumpriu seus objetivos com a execução do projeto e construção da câmara de carbonatação acelerada em laboratório, bem como teve sua eficiência avaliada através da calibração de seus dispositivos avaliadores de CO₂ e sua estanqueidade, e garantiu sua funcionalidade através do ensaio de carbonatação acelerada em um concreto convencional com 365kg/m³ de cimento CP V ARI e fator a/c 0,50.

Palavras-chave: Câmara de carbonatação acelerada automatizada. Projeto. Algoritmo. Microcontrole. Eficiência.

EVALUATION OF AN ACCELERATED CARBONATION CHAMBER DESIGNED EFFICIENCY AND MOUNTED IN LABORATORY

Cleber Medeiros de Lucena

Adviser: Prof^o. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.
Co-adviser: Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá.

ABSTRACT

The carbon dioxide present in the atmosphere penetrates into the porous matrix of concrete internally and dissolves altering the chemical balance of the means. Due to this CO₂ dissociation occurs a gradual lowering of the pH, which likely contributes to corrosion of the reinforcement. This research was based on the design and construction of chamber accelerated carbonation, automatically, in four steps, able to equip a laboratory for studying the durability of buildings, especially as regards research related to analysis of cementitious materials. The first step was the realization of the project itself, which is defined dimensions and materials to be used. The second step is intended construction of the carbonation chamber and submitted to the tightness test in order to ensure its sealing. The research continued in its third stage, with automation and microcontroller carbonation chamber through an algorithm developed and programmed, able to interact with the programming present on the sensors and valves commercially available. This stage also included the sensor calibration using internationally traceable standards and conducting pre-tests in reduced model before final installation in the carbonation chamber. The fourth step was to submit the test of accelerated carbonation, cylindrical samples of concrete with dimensions of 100mm x 200mm, inside the accelerated carbonation chamber, according to the standards of the National Laboratory of Civil Engineering - LNEC E-391 (1993) and specification FINAL DRAFT FprCEN / TS 12390-12, the European Committee of Standardization November 2010. The samples were subjected to accelerated carbonation test at 7, 14, 28, 42 and 56 days of exposure and obtained respectively mean depths carbonation 0,00mm, 1,62mm, 2.65mm, 3,35mm and 3,72mm. Finally, the study met its goals with project execution and construction of accelerated carbonation chamber in the laboratory and had their assessed efficiency through calibration of its evaluators devices CO₂ and its tightness, and secured its functionality by test accelerated carbonation in a conventional concrete with 365kg / m³ cement CP V ARI and factor a / c 0.50.

Keywords: Chamber of automated accelerated carbonation. Project. Algorithm. Microcontroller. Efficiency.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha amada esposa Patrícia por contribuir diretamente para o início, desenvolvimento e finalização desse projeto, durante o período que compreendeu a gravidez e nascimento de nosso primeiro filho. Com sua incansável participação no sentido de me dar tempo para a finalização dessa pesquisa, contribuiu inteiramente para este momento marcante em minha vida. Um verdadeiro anjo em minha vida.

Ao meu precioso filho Elias, que em sua inocência infante, me ajudou na aquisição de forças nos momentos em que mais precisei, e com seu olhar angelical iluminou por diversas vezes minha caminhada até esta linha de chegada.

Ao meu orientador, Prof^o. Marcos Alyssandro, por acreditar e confiar que eu seria capaz de cumprir esta missão, bem como por ter a capacidade de motivar os que estão ao seu redor com a sua paixão pela pesquisa científica. Sem sua efetiva participação, quase que diariamente, não teria encontrado os caminhos mais seguros que me trouxeram até aqui, assim como não teria despertado para uma nova realidade em minha vida, o trabalho científico.

À minha co-orientadora, Maria das Vitórias, pela confiança depositada em mim e por sua extrema capacidade de enxergar, mesmo em momentos difíceis, um lado positivo e de crescimento pessoal, o que foi de suma importância à finalização dessa pesquisa. A dedicação, objetividade e simplicidade com que transmite seus conhecimentos solidificaram o caminhar dessa jornada.

A Ricardo França, do departamento de Mecânica do IFRN, cuja amizade foi um presente decorrente deste projeto, pois sem sua incansável ajuda durante horas a fio, no laboratório onde se desenvolveu esta pesquisa, a materialização da eletrônica envolvida neste projeto não teria se tornado realidade.

Ao amigo e Professor do IFRN, Ivanilson Júnior, da diretoria acadêmica de Informática, por sua efetiva participação no desenvolvimento da linguagem de

programação necessária à operacionalização e controle de funcionamento do equipamento.

Ao Prof^o do departamento de Engenharia Química da UFRN, Domingos Fabiano, por sua preciosa ajuda no entendimento da dinâmica do CO₂, presente em um espaço confinado.

Ao Prof^o do departamento de Engenharia Civil da UFRN, José Neres, por sua imensa contribuição no momento do exame de qualificação.

Ao amigo Elton Cortez, por sua ajuda e companheirismo em dividir angústias e felicidades durante todo o período do mestrado.

A Fernanda Karolline, por sua amizade e exemplo de determinação e trabalho, no qual, por muitas vezes, me espelhei no decorrer da pesquisa.

Ao CNPQ, pelo o apoio financeiro.

À Prof^a. Evilane Farias do IFRN, por sua ajuda e contribuição durante todo o processo, projeto e construção da câmara de carbonatação.

Aos bolsistas do laboratório de durabilidade do IFRN, Thiago Araújo e Aline Siqueira, pela ajuda no desenvolvimento dos ensaios laboratoriais que compuseram esta pesquisa.

Aos amigos da turma de mestrado, Wesley Fêu, Alisson Gadelha, José Daniel e Alba, pelos momentos de alegria, cansaço e angústias divididos durante o curso.

Acredito plenamente que o homem é a imagem e semelhança de Deus e tenho a plena certeza que sua presença foi manifestada em minha vida durante essa trajetória em cada um dos citados acima. Obrigado pessoas! Obrigado Deus!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classes de agressividade ambiental - Fonte: NBR ABNT NBR 6118 (2014).	25
Figura 2: Processo de carbonatação - Fonte: Cascudo (2005).	28
Figura 3: Câmara de sazonalização - (a) Sazonamento; (b) Croqui de funcionamento - Fonte: Pauletti (2004).	35
Figura 4: Câmara de carbonatação acelerada - Esquema de funcionamento para câmara de carbonatação acelerada para 6% de CO ₂ - Fonte: Pauletti (2004).....	36
Figura 5: Câmara de 6% de CO ₂ - (a) ventiladores instalados na parte superior da câmara de carbonatação; (b) vista lateral - Fonte: Pauletti (2004).	36
Figura 6: Vista frontal da câmara de carbonatação saturada - Fonte: Pauletti (2004).	37
Figura 7: Esquema da câmara de carbonatação - Fonte: McGrath (2005).	39
Figura 8: Esquema de funcionamento da câmara de carbonatação - Fonte: Barros (2008).	40
Figura 9: Croqui da câmara de carbonatação - Fonte: Salomão e Silva (2008).	41
Figura 10: Termo-higrômetro - Fonte: Salomão e Silva (2008).....	41
Figura 11: Câmara de carbonatação acelerada - Fonte: Salomão e Silva (2008).....	42
Figura 12: Posição em planta dos corpos de prova no interior da câmara de carbonatação. - Fonte: Salomão e Silva (2008).	42
Figura 13: Câmaras de carbonatação utilizadas no programa interlaboratorial - Fonte: Ferreira e Helene (2014).	44
Figura 14: Mudança de cor e intervalos de pH dos principais indicadores usados para observação visual da área carbonatada - Fonte: Figueiredo (2005).....	46
Figura 15: Planos de ruptura dos corpos de prova para o ensaio de carbonatação. - Fonte: Salomão e Silva (2008).	47
Figura 16: Planos de ruptura: (a) primeiro plano; (b) segundo plano. - Fonte: Salomão e Silva (2008).	47
Figura 17: Fluxograma - Fonte: Autor (2015).	49
Figura 18: Câmara de carbonatação acelerada do laboratório de materiais de construção da UMinho-Portugal - Fonte: Autor (2015).	50
Figura 19: Câmara de carbonatação acelerada do laboratório de materiais de construção da UMinho-Portugal - Fonte: Autor (2015).	51

Figura 20: Câmara de carbonatação acelerada do laboratório de materiais de construção da UMinho-Portugal - Fonte: Autor (2015).	52
Figura 21: Ventilador tipo cooler - Fonte: Autor (2015).....	57
Figura 22: Dispositivos para avaliação de CO ₂ : (a) sensor de avaliação de concentração de CO ₂ ; (b) kit para avaliação de fluxo de ar - Fonte: Catálogo CO ₂ Meter, Inc. (2015).....	62
Figura 23: Bomba para avaliação do volume de ar - Fonte: Catálogo CO ₂ Meter, Inc. (2015).	62
Figura 24: Mangueiras, conexões e filtros - Fonte: Sugestão catálogo CO ₂ Meter, Inc. (2015).....	63
Figura 25: Ligação sensor e bomba - Fonte: Catálogo CO ₂ Meter, Inc. (2015).....	63
Figura 26: Sensor de CO ₂ MH-Z16, faixa de avaliação 0% a 100% - Fonte: Zhengzhou Winsen Electronic Technology Co. , LTD. (2015).	64
Figura 27: Dispositivo de micro controle de temperatura – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).	65
Figura 28: Plano de ruptura transversal: (a) primeiro plano de ruptura; (b) fatia de 50mm - Fonte: Autor (2015).	72
Figura 29: (a) Plano de ruptura longitudinal; (b) Faces para avaliação da profundidade de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	73
Figura 30: Vista frontal, prateleiras, rodízios e porta da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	75
Figura 31: Vista lateral direita com dispositivos de saída de CO ₂ e ar - Fonte: Autor (2015).	75
Figura 32: Perspectivas da câmara de carbonatação: (a) corte isométrico; (b) corte superior - Fonte: Autor (2015).	76
Figura 33: Prateleira: (a) vista em planta; (b) detalhe da placa perfurada - Fonte: Autor (2015).	76
Figura 34: Perspectiva isométrica - Fonte: Autor (2015).	77
Figura 35: Ilustração contendo 18 corpos de provas separados entre si por 50mm - Fonte: Autor (2015).	77
Figura 36: Ilustração contendo a câmara de carbonatação repleta de corpos de prova - Fonte: Autor (2015).	78

Figura 37: Ilustração dos dispositivos de entrada de CO ₂ e ar - Fonte: Autor (2015).	78
Figura 38: Ilustração dos dispositivos de saída de CO ₂ e ar - Fonte: Autor (2015).	79
Figura 39: Ilustração da válvula tipo esférica - Fonte: Autor (2015).	79
Figura 40: Ilustração das instalações das válvulas tipo esférica e solenoide - Fonte: Autor (2015).	80
Figura 41: Ilustração da instalação dos ventiladores - Fonte: Autor (2015).	80
Figura 42: Ilustração em corte superior do fluxo ascendente e difração de ar no interior da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	81
Figura 43: Ilustração borracha de vedação e tranca da porta da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	81
Figura 44: Ilustração detalhada do projeto final da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	82
Figura 45: Ilustração detalhada da parte traseira da câmara de carbonatação: Entradas de cabeamentos - Fonte: Autor (2015).	82
Figura 46: Ilustração da ligação do cilindro de CO ₂ e bancada de apoio da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	83
Figura 47: Ilustração das dobras e marcações do gabinete da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	84
Figura 48: Ilustração das dobras e marcações do gabinete da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	85
Figura 49: Ilustração do gabinete interno da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	85
Figura 50: Ilustração da instalação da estrutura de base da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	86
Figura 51: Ilustração do invólucro da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	86
Figura 52: Ancoragem para suporte de pressão: (a) ancoragem do gabinete interno; (b) ancoragem do invólucro - Fonte: Autor (2015).	87
Figura 53: Retirada de excessos da espuma expansiva sólida - Fonte: Autor (2015).	88
Figura 54: Entrada de CO ₂ e ar - Fonte: Autor (2015).	88
Figura 55: Saída de CO ₂ e ar - Fonte: Autor (2015).	89

Figura 56: Tubulações em curva: (a) Curvatura da tubulação de entrada de CO ₂ e ar; (b) Curvatura da tubulação de saída de ar - Fonte: Autor (2015).	89
Figura 57: Válvula tipo esférica com ¼ de giro - Fonte: Autor (2015).	90
Figura 58: Dobradiças pivotantes - Fonte: Autor (2015).	90
Figura 59: Tranca para forno industrial - Fonte: Autor (2015).	91
Figura 60: Prateleira - Fonte: Autor (2015).	91
Figura 61: Vedação da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	92
Figura 62: Ventilação da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	92
Figura 63: Manômetro para aferição de pressão - Fonte: Autor (2015).	93
Figura 64: Vista frontal da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	94
Figura 65: Vista lateral direita da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015). ...	94
Figura 66: Vista lateral esquerda da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015)	95
Figura 67: Vista traseira da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	95
Figura 68: Vista superior da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	96
Figura 69: Vista da câmara de carbonatação aberta - Fonte: Autor (2015).	96
Figura 70: Base de suporte e rodízios da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	97
Figura 71: Tela do software do sensor principal: Gaslab Versão V2.0.8.10 - Fonte: CO ₂ Meter, Inc. (2015).	98
Figura 72: Apresentação da árvore de dados: Gaslab Versão V2.0.8.10 - Fonte: CO ₂ Meter, Inc. (2015).	99
Figura 73: Apresentação da seção de seleção de sensor: Gaslab Versão V2.0.8.10 - Fonte: CO ₂ Meter, Inc. (2015).	99
Figura 74: Apresentação da seção de comandos do sensor: Gaslab Versão V2.0.8.10 - Fonte: CO ₂ Meter, Inc. (2015).	100
Figura 75: Apresentação da seção de leituras do sensor: Gaslab Versão V2.0.8.10 - Fonte: CO ₂ Meter, Inc. (2015).	100
Figura 76: Apresentação de arquivo de dados do sensor: Gaslab Versão V2.0.8.10 - Fonte: CO ₂ Meter, Inc. (2015).	101
Figura 77: Apresentação das guias de navegação: Fonte: Autor (2015).	101
Figura 78: Conexão do sensor ao cilindro padrão de calibração: Fonte: Autor (2015).	102

Figura 79: Avaliação de concentração do cilindro sem calibração: Fonte: Autor (2015).	103
Figura 80: Conexão do sensor ao cilindro de nitrogênio: Fonte: Autor (2015).	103
Figura 81: Resultado da avaliação do cilindro de nitrogênio Fonte: Autor (2015).	104
Figura 82: calibração 0 (zero) do sensor - Fonte: Autor (2015).	104
Figura 83: Gráfico de resposta ao software para registro horário de temperatura – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).	105
Figura 84: Gráfico de resposta ao software para o registro diário de temperatura – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).	105
Figura 85: Gráfico de resposta ao software para registro semanal de temperatura – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).	105
Figura 86: Gráfico do histórico de leitura para 24 horas a 5% de concentração de CO ₂ – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).	106
Figura 87: Gráfico do histórico de leitura para 24 horas a 10% de concentração de CO ₂ – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).	107
Figura 88: Gráfico do histórico de leitura para 24 horas a 20% de concentração de CO ₂ – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).	108
Figura 89: Gráfico do histórico de leitura para 24 horas a 50% de concentração de CO ₂ – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).	108
Figura 90: Disposição dos sensores nas prateleiras da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	109
Figura 91: Arduíno - Fonte: Autor (2015).	109
Figura 92: Pasta para recepção de dados - Fonte: Autor (2015).	110
Figura 93: Dados armazenados no interior da pasta projeto CO ₂ - Fonte: Autor (2015).	110
Figura 94: Mensagem enviada à pasta para verificação de concentração e CO ₂ - Fonte: Autor (2015).	111
Figura 95: Tipo de solenoide utilizado para entrada e/ou saída de CO ₂ e ar - Fonte: Autor (2015).	111
Figura 96: Gráfico da atuação do arduíno e solenoide para atuar no controle de concentração de CO ₂ – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).	112
Figura 97: Tela de resposta do software com os valores de concentração de CO ₂ máximo, mínimo e a média. - Fonte: Autor (2015).	112

Figura 98: Solenoides: (a) solenoide de controle para CO ₂ ; (b) bomba com solenoide interna para controle de ar - Fonte: Autor (2015).	113
Figura 99: Gráfico do comportamento das avaliações no interior da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	117
Figura 100: Representação do valor médio de uma hora do 34 ^o de avaliação - Fonte: Autor (2015).	117
Figura 101: Gráfico da representação segundo a segundo em uma faixa de tempo do dia 18 - Fonte: Autor (2015).	118
Figura 102: Gráfico do início das avaliações - Fonte: Autor (2015).	118
Figura 103: Gráfico da abertura da porta aos 14 dias de exposição - Fonte: Autor (2015).	119
Figura 104: Gráfico do comportamento de enchimento da câmara de carbonatação aos 14 dias de exposição - Fonte: Autor (2015).	119
Figura 105: Gráfico do enchimento da câmara de carbonatação aos 28 dias de exposição - Fonte: Autor (2015).	120
Figura 106: Gráfico da abertura de porta aos 42 dias de exposição - Fonte: Autor (2015).	120
Figura 107: Gráfico do enchimento da câmara de carbonatação aos 42 dias de exposição - Fonte: Autor (2015).	120
Figura 108: Gráfico de problema durante leituras iniciais do sensor principal - Fonte: Autor (2015).	121
Figura 109: Gráfico de problema durante leituras iniciais do sensor principal - Fonte: Autor (2015).	122
Figura 110: Gráfico de representação da diferença entre as leituras realizadas conectadas à rede elétrica e bateria de um computador pessoal - Fonte: Autor (2015).	123
Figura 111: Gráfico da representação do problema ocasionado pela utilização em modo de economia do computador - Fonte: Autor (2015).	124
Figura 112 a e b: Aplicação de cera de parafina com pincel na base e no topo dos corpos de prova - Fonte: Autor (2015).	125
Figura 113: Fogão elétrico, pincel, recipiente para parafina e parafina - Fonte: Autor (2015).	125

Figura 114: Corpo de prova com o topo selado com cera de parafina - Fonte: Autor (2015).	126
Figura 115: Corpos de prova selados com cera de parafina aguardando inserção na câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	126
Figura 116: Posição dos corpos de prova nas prateleiras A e C - Fonte: Autor (2015).	127
Figura 117: Denominação dos corpos de prova nas prateleiras A e C - Fonte: Autor (2015).	127
Figura 118: Denominação dos corpos de prova na prateleira B - Fonte: Autor (2015).	127
Figura 119: distâncias dos corpos de prova na prateleira B - Fonte: Autor (2015).	128
Figura 120: Inserção dos corpos de prova na câmara de carbonatação acelerada - Fonte: Autor (2015).	128
Figura 121: 1º plano de ruptura do corpo de prova: (a) plano transversal; (b) fatia de 50mm - Fonte: Autor (2015).	129
Figura 122: 2º plano de ruptura do corpo de prova: sentido longitudinal - Fonte: Autor (2015).	129
Figura 123: Gráfico das profundidades médias de carbonatação - Fonte: Autor (2015).	130
Figura 124: Exemplo de corpo de prova não carbonatado aos 7 dias de exposição- Fonte: Autor (2015).	131
Figura 125: Exemplo de carbonatação acelerada nas 4 faces de um corpo de prova aos 14 dias de exposição- Fonte: Autor (2015).	132
Figura 126: Exemplo de carbonatação acelerada em 2 faces de um corpo de prova aos 28 dias de exposição- Fonte: Autor (2015).	132
Figura 127: Exemplo de carbonatação acelerada em 2 faces de um corpo de prova aos 42 dias de exposição- Fonte: Autor (2015).	133
Figura 128: Exemplo de carbonatação acelerada em 2 faces de um corpo de prova aos 56 dias de exposição- Fonte: Autor (2015).	133
Figura 129: Sugestão de avaliação da profundidade de carbonatação em todo o perímetro da face do corpo de prova no primeiro plano de ruptura - Fonte: Autor (2015).	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resistência à compressão.	114
Tabela 2: Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. ...	115
Tabela 3: Média diária da concentração de CO ₂ no interior da câmara de carbonatação.	116
Tabela 4: Média das profundidades de carbonatação em cada idade determinada.	130
Tabela 5: Média da temperatura e umidade relativa em cada idade determinada. .	134

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

°C – Graus Celsius.

a/c – Relação água/cimento.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ACGIH - American Conference Governmental Industrial of Hygienists.

ACI – Association Concrete Institute.

ASTM – American Society for Testing and Materials.

CAA – Concreto autoadensável.

CEB – Comitê Euro-International.

cm² - Centímetro quadrado.

CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

CO₂ – Dióxido de carbono.

IFRN – Instituto Federal do Rio Grande do Norte.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.

Kg – Quilograma.

kgf – Quilograma força.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

m – Metro.

m³ - Metro cúbico.

mm – Milímetro.

MTE – Ministério do Trabalho e Emprego.

NBR – Norma Brasileira Registrada.

NBR – Norma brasileira.

OPC – Ordinary Portland Cement.

PEC – Pós-Graduação em Engenharia Civil.

pH – Potencial hidrogeniônico.

ppm – Partes por milhão.

PVC – Policloreto de vinila.

RCMG – Resíduo de corte de mármore e granito.

RILEM – Réunion International des Laboratoires d'Essais et des Recherches sur.

STG - Scientific and Technical Gases.

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

USB – Universal serial bus.

V – Volts.

W – Watts.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	21
1 Introdução	21
1.1 Justificativa	22
1.2 Objetivo da pesquisa.....	22
CAPÍTULO 2.....	24
2 Fundamentação teórica.....	24
2.1 Durabilidade.....	24
2.2 Processo de carbonatação	26
2.3 Especificações e Normas para o ensaio de carbonatação acelerada	28
2.4 Fatores que influenciam o processo de carbonatação	31
2.4.1 Relação água/cimento.....	31
2.4.2 Tipo de cimento.....	32
2.4.3 Concentração de dióxido de carbono no ambiente	33
2.4.4 Umidade relativa do ar	33
2.4.5 Temperatura.....	34
2.5 Pesquisas e ensaios de carbonatação acelerada utilizando câmaras de carbonatação projetadas e montadas em laboratório.	35
2.5.1 Avaliação da profundidade de carbonatação acelerada em concreto	45
CAPÍTULO 3.....	48
3 Materiais e Métodos.....	48
3.1 Premissas para projeto da câmara de carbonatação acelerada – 1ª ETAPA.....	50
3.1.1 Visita técnica realizada ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho – Guimarães – Portugal.	50
3.1.2 Dimensões e divisões internas da câmara de carbonatação acelerada.....	52
3.1.3 Dispositivos de entrada e saída de gases (CO ₂ e ar).	53
3.1.4 Ventilação e vedação da câmara de carbonatação acelerada.	53
3.1.5 Concentração de CO ₂	54
3.2 Construção da câmara de carbonatação acelerada e materiais – 2ª ETAPA.....	54

3.2.1	 Materiais constituintes da câmara de carbonatação.	54
3.2.2	 Construção da câmara de carbonatação	55
3.2.3	 Revestimento térmico	56
3.2.4	 Válvulas de entrada e saída de gases (CO₂ e ar)	56
3.2.5	 Dobradiças e tranca da porta	56
3.2.6	 Prateleiras, vedação e ventilação.....	56
3.2.7	 Teste de estanqueidade.....	57
3.3	 Automação e micro controle de funcionamento da câmara de carbonatação – 3ª ETAPA.	58
3.3.1	 O algoritimo.	58
3.3.2	 Interface com os programas de micro controle de funcionamento da câmara de carbonatação.	59
3.3.3	 Variáveis mensuráveis.....	61
3.3.4	 Calibração do sensor.	61
3.3.5	 Dispositivos avaliadores de CO₂.	61
3.3.6	 Pré testes	64
3.3.7	 Processo de funcionamento da câmara de carbonatação acelerada.....	66
3.4	 Ensaio de carbonatação acelerada ao concreto – 4ª ETAPA.	69
3.4.1	 Ensaio do concreto no estado endurecido.....	69
3.4.2	 Ensaio do concreto à carbonatação acelerada	70
3.4.2.1	 Técnica utilizada para análise de carbonatação acelerada	71
3.4.2.2	 Posição dos corpos de prova no interior da câmara de carbonatação.....	71
3.4.2.3	 Medição da profundidade da carbonatação	72
 CAPÍTULO 4.....		74
4	 Resultados e discussões	74
4.1	 Projeto da câmara de carbonatação acelerada.	74
4.1.1	 Dimensões e divisões internas da câmara de carbonatação acelerada.....	74
4.1.2	 Dispositivos de entrada e saída de gases (CO₂ e ar).	78
4.1.3	 Ventilação e vedação da câmara de carbonatação acelerada.	80
4.2	 Construção da câmara de carbonatação acelerada e materiais.....	83
4.2.1	 Dobramentos, soldagem e montagem da câmara de carbonatação.....	83

4.2.2	Revestimento térmico.....	87
4.2.3	Tubulação e válvulas de entrada e saída de gases (CO ₂ e ar).....	88
4.2.4	Dobradiças e tranca da porta	90
4.2.5	Prateleiras, vedação e ventilação.....	91
4.2.6	Teste de estanqueidade.....	93
4.2.7	Apresentação final e instalação da câmara de carbonatação.....	94
4.3	Automação e micro controle de funcionamento da câmara de carbonatação.....	97
4.3.1	O algoritmo	97
4.3.2	Interface com o programa de micro controle de funcionamento da câmara de carbonatação.....	97
4.3.3	Calibração do sensor.....	102
4.3.4	Pré testes	105
4.3.5	Processo de funcionamento da câmara de carbonatação acelerada comandada pelo algoritmo.....	109
4.4	Ensaio no concreto.....	113
4.4.1	Ensaio do concreto no estado endurecido.....	114
4.4.1.1	Resistência à compressão axial.....	114
4.4.1.2	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.	114
4.4.2	Ensaio do concreto à carbonatação acelerada.....	115
4.4.3	Problemas enfrentados durante a pesquisa.....	121
4.4.4	Medidas de profundidade de carbonatação.....	124
4.4.4.1	Posição dos corpos de prova no interior da câmara de carbonatação....	127
4.4.4.2	Medição da profundidade de carbonatação no concreto.....	129
CAPÍTULO 5.....		135
5	Conclusões	135
CAPÍTULO 6.....		136
6	Sugestões para trabalhos futuros	136
Referências.....		137
Anexos.....		141

CAPÍTULO 1

1 Introdução

O estudo das estruturas de concreto, nos últimos anos, tem trazido à tona problemas que afetam seu comportamento diante dos mais diversos cenários onde estas se inserem. Nesse sentido, a durabilidade das estruturas de concreto armado tem se tornado alvo de pesquisas, principalmente no tocante à corrosão das armaduras.

O concreto, além de atuar como barreira física de proteção à armadura, tem a finalidade de oferecer uma segunda proteção atribuída ao caráter químico de sua composição.

Esta proteção química é conferida através da alcalinidade presente na solução dos poros do concreto. Esta alcalinidade promove uma proteção à armadura, denominada de passivação, mantendo o respectivo equilíbrio e protegendo-a da corrosão.

É sabido que a película passivadora que envolve o aço pode ser rompida através da diminuição da alcalinidade do concreto, mediante reações físico-químicas que ocorrem entre os produtos de hidratação do concreto e o dióxido de carbono presente na atmosfera.

Assim, é de suma importância desenvolver estudos que contribuam para o aperfeiçoamento de materiais utilizados no concreto armado, com o objetivo de garantir um equilíbrio entre suas propriedades, notadamente no tocante à durabilidade, a fim assegurar-lhe uma vida útil mais longa.

Ao interagir com o ambiente em que se insere, o concreto pode sofrer alterações expressivas, as quais podem apresentar consequências negativas à armadura de aço, como corrosão.

Dentre os agentes presentes neste meio encontra-se o dióxido de carbono – CO_2 , o qual apresenta um risco potencial às estruturas de concreto, em razão de ter

a capacidade de diminuir o pH do concreto e com isso favorecer o processo de corrosão das armaduras no interior das estruturas.

O crescente desenvolvimento da urbanização nas médias e grandes cidades, com estruturas continuamente mais densas, atreladas às adições minerais nos concretos, o estudo da avaliação da profundidade de carbonatação, através do teste acelerado em laboratório, bem como a preocupação da comunidade acadêmica no tocante ao assunto abordado, impulsionou o desenvolvimento desta pesquisa.

1.1 Justificativa

A necessidade de avaliar a carbonatação acelerada em concretos e materiais cimentícios requer equipamento específico denominado de câmara de carbonatação acelerada. A dificuldade de aquisição desta câmara de forma comercial, haja vista o fato de não haver representação regional para compra, bem como seu alto custo de importação, justificou a presente pesquisa de forma experimental.

Após pesquisa realizada no sítio eletrônico da ABNT foi verificado que para carbonatação acelerada em materiais cimentícios, o Brasil não dispõe de elementos normativos. Tal fato ensejou a utilização de normas Européias para a avaliação da profundidade de carbonatação acelerada em laboratório.

1.2 Objetivo da pesquisa

O objetivo principal desta pesquisa é projetar e construir em laboratório, uma câmara de carbonatação acelerada, com o intuito de avaliar carbonatação acelerada em concretos e materiais cimentícios.

Como objetivos específicos, tem-se:

- ✓ Avaliar sua eficiência através da calibração de seu dispositivo avaliador de CO₂, bem como sua estanqueidade;
- ✓ Realizar ensaio de carbonatação acelerada em concreto;
- ✓ Validar a câmara de carbonatação acelerada através da realização de ensaios em amostras de concreto;

- ✓ Contribuir com a realização de pesquisas na área de durabilidade, especificamente corrosão por carbonatação.

CAPÍTULO 2

2 Fundamentação teórica

2.1 Durabilidade.

Qualquer edificação deve ser projetada para resistir a esforços mecânicos submetidos ou não a condições de agressividades elevadas, bem como ação de intempéries, as quais interferem diretamente em sua vida útil, nisto está implícito o conceito de durabilidade.

No Brasil, o conceito de durabilidade foi introduzido pela NBR ABNT 6118 (2003), que a define como a capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.

A NBR ABNT 15575-1 (2013) define que a durabilidade de um produto se extingue quando ele deixa de atender às funções que lhe foram atribuídas, quer seja pela degradação, que o conduz a um estado insatisfatório de desempenho, quer seja por obsolescência funcional.

A mesma norma restringe esse conceito quando recomenda que a durabilidade para o sistema estrutural deva conservar a segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil.

A durabilidade tem seus objetivos definidos quando caracteriza o concreto em função da agressividade do meio no qual se encontra a estrutura e ajusta suas propriedades, a fim de adaptá-las à duração do uso desejado para garantir uma vida útil próximo aos parâmetros de projeto. (ROUGEAU & GUIRAUD, 2014).

A vida útil, por sua vez, é o período posterior em que há a utilização da edificação, durante a qual todas as propriedades relevantes do concreto estão acima de níveis mínimos aceitáveis, considerando uma manutenção corrente (ASTM E632-81, (1981) *apud* Branco *et al.*, (2013)).

A NBR ABNT 15575-1 (2013), em seu item 14.2.1, afirma que o projeto deve especificar o valor teórico para a vida útil de projeto para cada um de seus sistemas que o compõem.

A durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como sua capacidade de resistir à ação de intempéries, ataque químico, abrasão, e outras condições em serviço (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

A NBR ABNT 6118 (2014) em seu item 6.4. trata da agressividade do ambiente onde as estruturas de concreto se inserem. Através da tabela 6.1, a norma confere quatro graus de agressividade que permitem avaliar simplificada, segundo as condições de exposição das estruturas ou de suas partes, conforme demonstrado na Figura 1.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a Industrial ^{a, b}	Grande
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c} Respingos de maré	Elevado

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Figura 1: Classes de agressividade ambiental - Fonte: NBR ABNT NBR 6118 (2014).

Nesse cenário, verifica-se que o conceito de durabilidade está intrinsecamente associado ao conceito de vida útil e agressividade do meio. A predição destes parâmetros depende de ensaios laboratoriais que permitam avaliar o desempenho do concreto após ataques externos.

2.2 Processo de carbonatação

Conceito amplamente consagrado quimicamente, o dióxido de carbono – CO₂ apresenta-se como um gás incolor e inodoro; pode ser originado de múltiplas fontes tais como: combustão completa de fontes de carbono, processos fermentativos e respiração animal. Nas condições ambiente (25°C e 1 atm) a sua densidade é de 1,98 kg m⁻³, 1,5 vezes superior a densidade do ar (1,29 kg m⁻³). Nestas condições, é não inflamável e possui baixa reatividade. O dióxido de carbono pode oferecer riscos tanto a saúde humana, ocasionando morte por asfixia, bem como riscos ambientais que revertem no efeito estufa.

Segundo Damtoft *et al.*, (2008), a Ordinary Portland Cement (OPC) emitiu relatório anual sobre as emissões de CO₂ onde apontou que 0,53 Kg de CO₂ por quilograma de clínquer vem sendo gradativamente liberado devido a descarbonatação do calcário. Este inventário mostra uma tendência de elevação na liberação de CO₂ o que representa um problema tanto no ciclo de vida do concreto como no ambiente. Do mesmo modo, a exposição do concreto as condições ambiente, ao longo do tempo, conduz a uma reabsorção do CO₂ em um processo denominado de carbonatação.

Neste cenário, estima-se que cerca de 7,6 % da quantidade de CO₂ emitido com a descarbonatação pode ser reabsorvido (GADJA, 2001). Em um recente estudo, K.-H. Yang *et al.*, (2014) mostraram que em um ciclo de vida de 100 anos, estima-se que entre 15,5% a 17% de CO₂ liberado pela produção de concreto seja reabsorvido.

Sob o aspecto de agressividade do meio ambiente, o CO₂ age como um agente corrosivo. Neste caso, o dióxido de carbono presente na atmosfera penetra na matriz porosa do concreto e se dissolve internamente alterando o equilíbrio químico do meio. Em decorrência dessa dissociação do CO₂ ocorre uma diminuição progressiva do pH, o que contribui para uma provável corrosão do reforço (G. VILLAIN *et al.*, 2007).

Este fenômeno químico e difusional é o supracitado processo de carbonatação e o seu controle tem importância vital na durabilidade das estruturas de concreto armado. Assim, a manutenção da alcalinidade da camada de

cobrimento da armadura é de fundamental importância para a vida útil da estrutura (NUNES, 2014).

Segundo Figueiredo e Meira (2013), carbonatação é um dos fatores que influenciam na deterioração do aço no interior do concreto armado. Este fenômeno ocorre pela junção de gás carbônico e umidade, sobretudo nos casos em que o concreto não apresenta boa qualidade, quando há espessuras de cobrimento insuficientes ou pequenas, elevada relação água/cimento, reduzida quantidade de cimento e ciclos de umedecimento e secagem (RIBEIRO, 2014).

Segundo Parrot (1987), a carbonatação em concretos envolve uma reação química do gás dióxido de carbono atmosférico com os produtos hidratados do cimento. As principais fontes de dióxido de carbono, a destacar são os combustíveis fósseis (TASCA, 2012).

Inicialmente, o processo ocorre por difusão gasosa do CO₂ existente na atmosfera para o interior dos poros. Conforme Kazmierczak e Helene (1993), a penetração do gás carbônico no concreto dá-se preponderantemente por um mecanismo de difusão devido à diferença de concentração entre o meio externo e o interior do concreto. Sabe-se que a maior concentração de CO₂ no ar pode favorecer o aumento da taxa de carbonatação.

Em consequência da difusão do CO₂ para a interior do material, uma reação em fase aquosa resulta na formação do ácido carbônico e que, posteriormente, se dissocia quimicamente em CO₂ ionizado sob a forma de ácido carbônico - H₂CO₃ o qual reage com álcalis do cimento provocando as reações de carbonatação. Outros constituintes sólidos do cimento são carbonatáveis como : hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), o hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH), além do C-S-H, a longo prazo (NUNES, 2014).

O processo químico que envolve a reação de carbonatação pode ser representado pelas seguintes etapas: O hidróxido de cálcio, formado nas reações de hidratação do cimento, é dissociado pela água presente na solução dos poros, segundo a equação 1 a seguir:



O dióxido de carbono penetra no concreto, transporta-se por difusão através da matriz porosa e ioniza-se na solução aquosa, conforme as equações 2 e 3:



Em seguida, o carbonato (CO_3^{2-}) dissolvido reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dissolvido, bem como com os outros produtos carbonatáveis da pasta de cimento, formando os carbonatos como demonstra a equação 4:



A Figura 2 abaixo apresenta, esquematicamente, o processo de carbonatação (BAKKER, 1988 adaptado por CASCUDO, 2005).

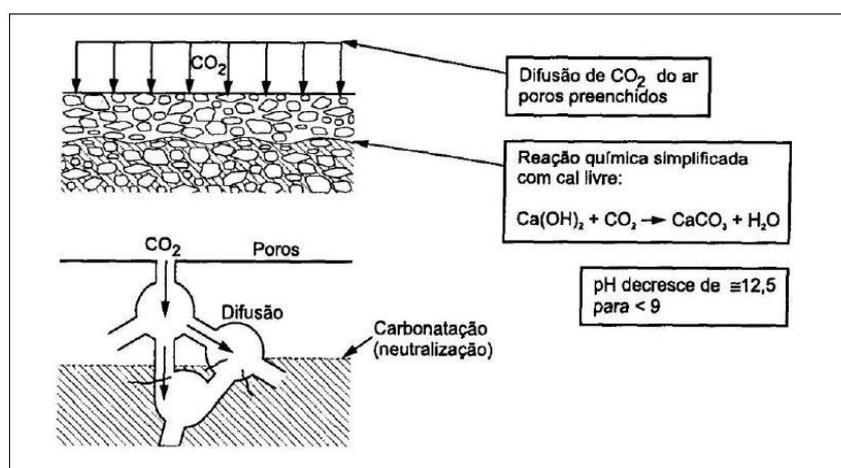


Figura 2: Processo de carbonatação - Fonte: Cascudo (2005).

2.3 Especificações e Normas para o ensaio de carbonatação acelerada

Quanto ao ensaio de carbonatação no concreto as especificações que orientam o teste acelerado de carbonatação têm em comum a previsão de uma avaliação de fatores contributivos que influenciam diretamente a profundidade de carbonatação, mesmo que analisados de forma diferente, conforme técnicas próprias.

A Réunion International des Laboratoires d'Essais et des Recherches sur - RILEM (1999) através de sua recomendação TC-116 PCD, determina que antes de submeter as amostras ao teste de penetração de CO_2 , sejam realizados os procedimentos para análise de permeabilidade, como condição para o estudo da durabilidade, procedimentos estes denominado de sazramento.

O sazonalamento consiste em três partes. A parte “A” especifica o acondicionamento das amostras do concreto para medição da permeabilidade aos gases e absorção capilar de água. A parte “B” trata da medição da permeabilidade ao gás no interior do concreto. Por fim, a parte “C” especifica a determinação da absorção capilar de água pelo concreto em seu estado endurecido.

A RILEM (1999) ainda especifica a avaliação da carbonatação a uma temperatura de 20°C e umidade relativa do ar de 70% ± 5%. A solução a ser considerada como reagente é solução de fenolftaleína a 1% dissolvida em álcool etílico.

A norma LNEC E-391 (1993) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil em Portugal, estabelece um ensaio acelerado em laboratório, com o objetivo de avaliar a resistência à penetração de CO₂ em concreto e materiais de reparação. O ensaio permite a avaliação da penetração do CO₂ em corpos de prova, moldados em laboratório ou retiradas por carotagem diretamente das estruturas do concreto. A norma LNEC E-391 (1993) especifica que o ensaio seja realizado a uma concentração de CO₂ de 5% ± 1%, umidade relativa do ar 60% ± 5% e temperatura de 23°C ± 3°C. O reagente a ser considerado é solução alcóolica de fenolftaleína a 0,1%.

A especificação DRAFT FprCEN/TS 12390-12 (2010), traça diretrizes para a avaliação do potencial de resistência à carbonatação do concreto utilizando o método acelerado. O ensaio normatiza a avaliação das condições de concentração de CO₂ de 4% ± 0,5%, temperatura 20°C ± 2°C e umidade relativa do ar de 55% ± 5%. A mesma especificação utiliza como reagente para determinação da profundidade de carbonatação uma solução de 1g de fenolftaleína, 70 ml de álcool e 30 ml de água destilada.

A DRAFT EN 12390-X (2012), projeto do Comitê Euro-Internacional – CEB, estabelece ainda critérios para avaliação da resistência à carbonatação em concreto a uma concentração de CO₂ de 0,035% ± 0,005%, temperatura 20°C ± 2°C e umidade relativa do ar de 65% ± 5%. O reagente a ser utilizado é 1% de timolftaleína diluído em 70% de álcool.

Todas as especificações citadas anteriormente, com exceção da DRAFT EN 12390-X, bem como a norma LNEC E-391 têm em comum a mesma solução utilizada como reagente.

A especificação RILEM (1999) utiliza como critério uma câmara de sazonalidade que precede a avaliação da carbonatação acelerada em câmara de carbonatação, ou seja, antes das amostras serem submetidas ao teste acelerado, permanecem no interior de uma câmara, com o objetivo de determinar o equilíbrio da concentração da umidade e a perda de massa necessária durante a pré-secagem, realizar a pré-secagem, bem como redistribuir a umidade relativa do ar, caso haja necessidade. As amostras podem ser cilíndricas ou prismáticas, moldadas em laboratório.

A norma LNEC E-391 (1993), submete amostras cilíndricas ou prismáticas ao teste acelerado de carbonatação em câmara específica nas formas prismáticas ou corpos de prova cilíndricos, moldadas em laboratório, bem como amostras retiradas de estruturas já edificadas.

A especificação DRAFT EN 12390-X é limitada pela concentração de CO₂ a ser aplicada ao teste, mesmo utilizando câmara específica e o princípio do teste acelerado. As amostras a serem ensaiadas são bastões de concreto ou argamassa com dimensões de 500mm x 100mm x 100mm, avaliadas as profundidades de carbonatação em fatias de 50mm.

A especificação DRAFT FprCEN/TS 12390-12 (2010), mesmo dispondo de diretrizes específicas para o ensaio como concentração de CO₂, temperatura e umidade relativa, permite que a pesquisa seja realizada variando, a critério desejado, os parâmetros de concentração, temperatura e umidade, desde que sejam registradas tais variações em documento. Dessa forma, esta norma se mostra bastante versátil para o estudo da carbonatação acelerada.

As especificações, assim como a norma aqui citadas, não estabelecem limite mínimo para concentração de dióxido de carbono, ou seja, não tratam de limites de tolerância para as estruturas de concreto.

No Brasil, não há norma específica para o ensaio acelerado de carbonatação. O Ministério do Trabalho e Emprego – MTE, através da Norma Regulamentadora N.º

15, estabelece o Limite de Tolerância (LT)¹ de exposição diária para o dióxido de carbono de 3.900 ppm (partes por milhão), o que representa 0,39% de CO₂. No Brasil, exceder este LT representa nocividade à saúde das pessoas no interior das edificações. Este limite é aplicado para tratar da insalubridade em ambientes como garagens, subsolos, espaços confinados, galerias, estações de tratamento de águas e esgotos.

Nos Estados Unidos e Canadá a *American Conference Governmental Industrial of Hygienists – ACGIH*, estabelece o limite de tolerância para qualquer situação, de 5.000 ppm (partes por milhão), isto é, 0,5% de concentração de CO₂ e limite teto de 30.000 ppm (partes por milhão), de exposição máxima para quinze minutos, o que representa 3% de concentração do dióxido de carbono. Este limite teto é taxativo, não podendo, em nenhum momento ser ultrapassado, sob pena de ser letal a pelo menos 50% da população exposta em ambiente sem troca de ar.

2.4 Fatores que influenciam o processo de carbonatação

2.4.1 Relação água/cimento

A relação água/cimento (a/c) está intrinsecamente ligada com a quantidade, tamanho dos poros do concreto endurecido e com suas propriedades mecânicas finais. Quanto maior essa relação maior será a porosidade e como consequência, maior será a intensidade de propagação da carbonatação (MEYER, 1968; METHA & MONTEIRO, 2014).

Pauletti (2004) avaliou carbonatação acelerada com dois diferentes tipos de cimento: CPI-S – Cimento Portland Comum sem Adições e CP-IV – Cimento Portland Pozolânico, em três diferentes relações a/c, sejam elas 0,40, 0,55 e 0,70.

Para relação a/c 0,40 tanto para ensaios com 6% de concentração de CO₂ e saturada, a profundidade de carbonatação foi de 0,00 mm, quando se trata do cimento CPI-S. Já para o cimento CPIV o ensaio com 6% de concentração de CO₂ apresentou uma variação entre 1,66 mm e 2,32 mm, ligeiramente superior ao ensaio

¹ É a concentração ou intensidade máxima ou mínima, relacionada com a natureza e o tempo de exposição ao agente, que não causará dano à saúde do trabalhador, durante a sua vida laboral.

saturado que obteve 1,38mm e 1,87mm. As avaliações foram realizadas aos 7, 14, 21 e 28 dias de exposição.

Para relação a/c 0,55, para o ensaio com 6% de concentração de CO₂, a profundidade de carbonatação teve variação para o cimento CPI-S entre 2,51mm e 3,99mm, enquanto o CPIV variou entre 4,72mm e 6,88mm. Já para o ensaio saturado a variação se deu entre 1,71mm e 3,19mm, quando se trata do CPI-S e entre 3,70mm e 5,17mm, quando se trata do CPIV.

Por fim, para a relação a/c 0,70 as profundidades médias de carbonatação para o ensaio com 6% de concentração de CO₂ foi entre 5,44mm e 8,25 para o cimento CPI-S e de 12,73mm a 13,84mm para o cimento CP-IV. Já para o ensaio saturado o CPI-S variou a profundidade de carbonatação entre 4,41mm e 5,66mm, enquanto CP-IV obteve variação de profundidade carbonatada entre 5,95mm e 7,20mm.

Desta forma, analisando as profundidades de carbonatação para as três relações a/c, denota-se ser provável que quanto maior for a relação a/c maior seja a penetração do CO₂ para as mesmas referências amostradas.

2.4.2 Tipo de cimento

O tipo de cimento desempenha um papel importante relacionado à carbonatação. Os tipos de cimentos como o CPIII – Cimento Portland de Alto forno, e o CPIV – Cimento Portland Pozolânico, recebem adições de escórias e pozolanas, respectivamente, entretanto, ao mesmo tempo em que conferem um bom desempenho à maioria de suas propriedades, podem causar um aumento na velocidade de carbonatação. Tal fato pode ser atribuído à alcalinidade, pois estes tipos de cimento favorecem uma baixa produção de Ca(OH)₂ na zona intersticial do concreto. Dessa forma, a velocidade de penetração do dióxido de carbono é favorecida formando CaCO₃ em uma atmosfera de pH baixo (MEYER, 1968; FERREIRA & HELENE, 2014).

2.4.3 Concentração de dióxido de carbono no ambiente

O aumento crescente do dióxido de carbono na atmosfera pode influenciar, significativamente, na profundidade de carbonatação das estruturas de concreto. Dessa forma, enfatiza-se que o teor de concentração de CO_2 na atmosfera é um parâmetro fundamental para a evolução da carbonatação de concretos (TASCA, 2012). A velocidade de carbonatação tende a aumentar quanto maior for a concentração de dióxido de carbono no meio ambiente onde se insere a estrutura, ou seja, há uma relação direta entre concentração de CO_2 e a velocidade de carbonatação. Tal relação se apresenta com maior segurança de afirmação para concretos com elevadas relações água/cimento (FIGUEIREDO & NEPOMUCENO, 2007). No entanto, esse fator, por si só, não é responsável pela profundidade carbonatada, devendo estar associado a outros fatores ambientais que facilitam a difusão do CO_2 no interior da matriz cimentícia.

2.4.4 Umidade relativa do ar

A umidade do ambiente é um importante fator que afeta a carbonatação do concreto, pois a difusão do CO_2 , através do concreto, é função do teor de umidade nos poros do material. Isso se dá, porque esse gás deve estar solubilizado sob a forma de ácido carbônico, para reagir com os álcalis dos compostos cimentícios. Em umidades elevadas, a água obstrui os poros, dificultando, assim, o processo de difusão. Por outro lado, em baixas umidades, não ocorre difusão por falta do agente de transporte do gás para o interior do concreto e pela insuficiência de moléculas de H_2O para reagir com o CO_2 (TASCA, 2012).

De acordo com Bakker (1988), quando o concreto não apresenta água nos poros a difusão do CO_2 ocorre normalmente, porém ele permanece na forma de gás e não reage com os compostos do cimento hidratado pela falta de solubilização. Já nos poros totalmente saturados, a carbonatação praticamente não ocorre devido à reduzida taxa de difusão do CO_2 na água.

A velocidade de difusão do CO_2 é bastante diferente quando o meio difusor é a água ou o ar, fazendo com que a taxa de carbonatação seja fortemente

influenciada pelo teor de umidade no concreto, a qual depende da umidade relativa do ambiente em que se encontra a estrutura. Para umidade relativa na faixa de 60 a 85% ocorre o maior grau de carbonatação. Em umidade relativa menor que 50% a velocidade de carbonatação torna lenta a reação e acima de 95% não há carbonatação (TERZIAN & HELENE, 1993).

A velocidade de carbonatação depende do grau de saturação dos poros, porquanto a difusão do CO₂ é maior na faixa de umidade relativa entre 50 e 80%, decrescendo à medida que a umidade se aproxima da saturação, pois o coeficiente de difusão na água é 10-40 vezes menor que no ar. (ISAIA, 1999).

2.4.5 Temperatura

Papadakis *et al.* (1991) afirmaram que o efeito da temperatura se apresenta insignificante para o ensaio acelerado de carbonatação. Loo *et al.* (1994) desenvolveram um estudo de carbonatação acelerada, variando a temperatura entre 20°C e 40°C e concluíram que o efeito da temperatura não foi significativo para a profundidade de carbonatação, mantendo a mesma concentração de CO₂.

Barros (2008), afirma que não existe consenso quanto à temperatura mais propícia à ocorrência de carbonatação.

McGrath (2005) analisou o efeito da carbonatação acelerada em câmara de carbonatação projetada e construída em laboratório. Em seu projeto consta a instalação de uma lâmpada para controle de temperatura. Em sua pesquisa estudou a variação de 23°C a 26°C e concluiu que tal variação não influenciou a velocidade da penetração do CO₂.

O estudo de Loo *et al.* (1994), demonstrou que a variação da temperatura em 20°C não influenciou na velocidade de penetração do dióxido de carbono.

O que se conclui com estes estudos realizados (Papadakis *et al.*, 1991; Loo *et al.*, 1994; Barros, 2008; McGrath, 2005), é que tais pesquisas demonstram a necessidade de uma análise mais aprofundada desse fenômeno, a fim de que se possa embasar de forma mais substancial a discussão sobre o tema.

2.5 Pesquisas e ensaios de carbonatação acelerada utilizando câmaras de carbonatação projetadas e montadas em laboratório.

Pauletti (2004) realizou o ensaio de carbonatação acelerada no concreto, tomando por base a determinação da RILEM (1999) no TC 116-PCD. Utilizou três relações água/cimento (0,40, 055 e 0,70) e três câmaras denominadas câmara de sazonalamento, câmara para concentração de 6% de CO_2 e câmara saturada de CO_2 . A determinação RILEM (1999), requer uma câmara de sazonalamento antes das amostras serem submetidas à carbonatação acelerada.

A Figura 3a mostra a câmara de sazonalamento utilizada por Pauletti (2004), juntamente com o croqui de funcionamento, enquanto que a 3b apresenta o croqui de funcionamento da câmara de sazonalamento.

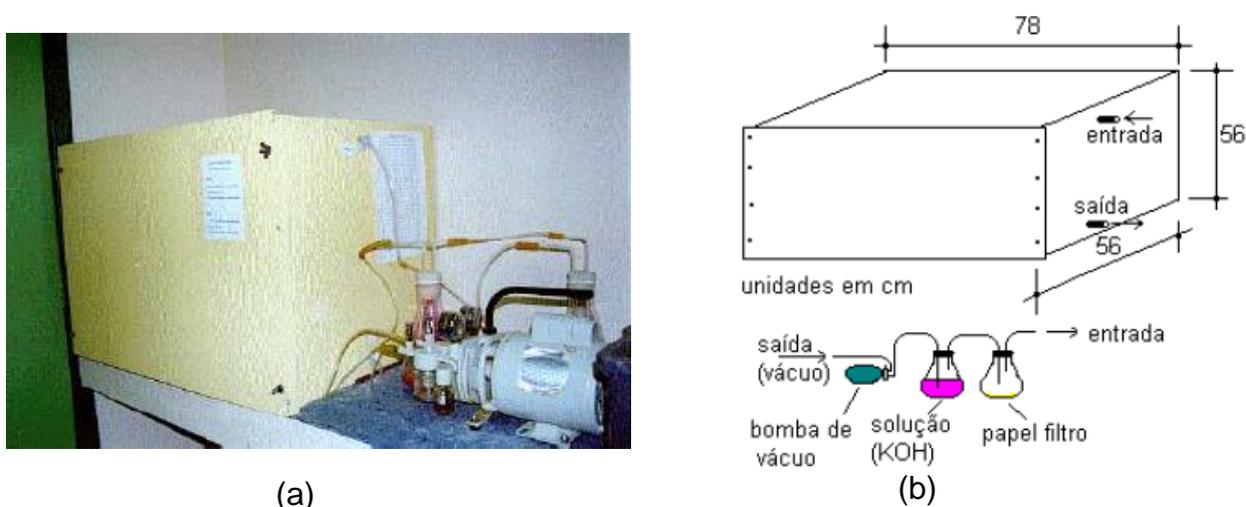


Figura 3: Câmara de sazonalamento - (a) Sazonamento; (b) Croqui de funcionamento - Fonte: Pauletti (2004).

Para o sazonalamento, o ar é forçado utilizando uma bomba de vácuo, através de uma solução de hidróxido de potássio, e filtrado em membranas de papel antes de entrar na câmara. O objetivo do sazonalamento é garantir o equilíbrio da umidade relativa no interior da câmara, fato este garantido através da solução do hidróxido de potássio ou hidróxido de sódio. A filtração se faz necessária para que a solução em sua forma líquida não penetre no interior da câmara (PAULETTI, 2004).

Após o sazonalamento, as amostras estão prontas para se submeterem ao processo de carbonatação acelerada. Pauletti (2004) utilizou uma câmara para

concentração de 6% de CO₂, conforme ilustrado na Figura 4, e outra para concentração saturada.

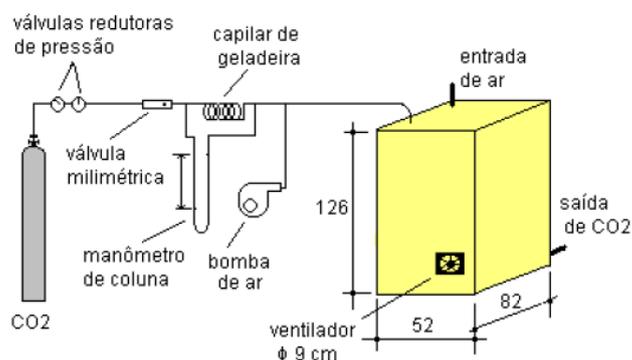


Figura 4: Câmara de carbonatação acelerada - Esquema de funcionamento para câmara de carbonatação acelerada para 6% de CO₂- Fonte: Pauletti (2004).

Para o funcionamento da câmara de carbonatação acelerada é necessário um cilindro de CO₂ diluído a 6%. A bomba de vácuo, juntamente com a própria pressão do cilindro, força a passagem do ar pressurizado de forma controlada por válvulas redutoras de pressão, através de um capilar de geladeira, utilizado para comprimir o ar e inseri-lo no interior da câmara de carbonatação, homogeneizado (PAULETTI, 2004). A câmara foi construída em madeira do tipo compensado com 52 cm de largura, 82 cm de profundidade e 126 cm de altura. Dotada de ventiladores eletrônicos tipo *cooler*, utilizados em microcomputadores, instalados na parte superior e inferior da câmara com o objetivo de circular o ar entre as amostras e manter a homogeneização da mistura, como mostra a Figura 5 (PAULETTI, 2004).



(a)



(b)

Figura 5: Câmara de 6% de CO₂ - (a) ventiladores instalados na parte superior da câmara de carbonatação; (b) vista lateral - Fonte: Pauletti (2004).

A Figura 6 mostra a câmara de carbonatação saturada, tal denominação se deu em função da concentração de CO_2 no seu interior ter permanecido sempre igual ou superior a 60%. A câmara foi feita em acrílico e as bandejas internas em metal vazado. Possui dois ventiladores na parte superior e mais dois na parte inferior, para a circulação do gás. A entrada de CO_2 é feita na parte inferior, e o expurgo na parte superior. O volume nesta câmara é de aproximadamente 245 litros, e sua alimentação não é contínua (PAULETTI, 2004).



Figura 6: Vista frontal da câmara de carbonatação saturada - Fonte: Pauletti (2004).

Conforme Pauletti (2004), após o fechamento da câmara de carbonatação, a válvula do cilindro de CO_2 é aberta com vazão de 5l/min. A válvula da parte superior também fica aberta, para favorecer a saída do ar de dentro da câmara. Como o CO_2 é mais pesado que o ar, esta relação vai completando o volume da câmara o que provoca a expulsão do ar.

Pauletti (2004) também afirma que o procedimento de substituição do ar por CO_2 , sempre teve duração mínima de 30 minutos, ou seja, pelo menos 61% do volume total da câmara ficou preenchido por CO_2 .

Após a troca do ar por CO_2 , as válvulas de saída e do cilindro de CO_2 são fechadas e os ventiladores ligados. Tal procedimento é realizado cada vez que a câmara é aberta para medição de carbonatação, ou a cada 7 dias.

De acordo com Pauletti (2004), a umidade relativa interna das câmaras de carbonatação (6% de CO_2 e saturada) foi registrada por higrômetros colocados em cada uma delas. Para manter a umidade relativa em torno dos 70% em ambas as

câmaras foram colocadas um lastro de cloreto de sódio (NaCl). No geral, a umidade registrada pelos higrômetros variou entre 70% e 75% (PAULETTI, 2004).

Como resultado, Pauletti (2004) para cada câmara, cada relação a/c assim como cada tipo de cimento obteve os seguintes resultados para a profundidade de carbonatação:

✓ Relação a/c 0,40

Tanto para as câmaras de 6% de concentração de CO₂ e saturada, a profundidade de carbonatação foi 0,00mm quando se trata do cimento Portland comum com adições - CPI-S. Já para o cimento Portland pozolânico - CPIV a câmara de 6% de concentração e CO₂ apresentou uma variação entre 1,66mm e 2,32mm e a câmara saturada apresentou uma variação entre 1,38mm e 1,87mm.

A resistência à compressão foi avaliada em 4 blocos distintos. Para o cimento CPI-S, tomando por parâmetro o bloco 1 foi de 32,7 MPa, 37,7 MPa e 44,1 Mpa para 7, 28 e 63 dias, respectivamente. Já para o cimento CPIV para 7, 28 e 63 dias, a resistência à compressão foi 30,6 MPa, 38,0 MPa e 50,8 Mpa respectivamente, tomando-se por parâmetro o mesmo bloco de avaliação.

✓ Relação a/c 0,55

Para a câmara de 6% de concentração de CO₂ a profundidade de carbonatação teve variação para o cimento CPI-S entre 2,51mm e 3,99mm, enquanto para o cimento CPIV houve variação entre 4,72mm e 6,88mm. Já para a câmara saturada a variação se deu entre 1,71mm e 3,19mm quando se trata do CPI-S e entre 3,70mm e 5,17mm quando se trata do CPIV.

A resistência à compressão para esta relação, também tomado por parâmetro o bloco 1 obteve os seguintes resultados: para o cimento CPI-S, de 24,4 MPa, 29,3 MPa e 32,1 Mpa para 7, 28 e 63 dias, respectivamente. Já para o cimento CPIV para 7, 28 e 63 dias, a resistência à compressão foi 19,6 MPa, 29,4 MPa e 33,1 Mpa respectivamente, tomando-se por parâmetro o mesmo bloco de avaliação.

✓ Relação a/c 0,70

Por fim analisando esta relação obtiveram-se as profundidades médias de carbonatação na câmara de 6% de concentração de CO₂ entre 5,44mm e 8,25mm

para o cimento CPI-S e variação entre 12,73mm e 13,84mm para o cimento CP IV, enquanto na câmara saturada quando se trata do cimento CPI-S a variação foi entre 4,41mm e 5,66mm e para o cimento CPIV a variação foi constatada entre 5,95mm e 7,20mm.

Finalmente a resistência à compressão para esta relação, também tomado por parâmetro o bloco 1 obteve os seguintes resultados: para o cimento CPI-S, de 15,4 MPa, 18,9 MPa e 20,4 MPa para 7, 28 e 63 dias, respectivamente. Para o cimento CPIV para 7, 28 e 63 dias, a resistência à compressão foi 12,7 MPa, 20,9 MPa e 27,6 MPa respectivamente, tomando-se por parâmetro o mesmo bloco de avaliação.

McGrath (2005) construiu uma câmara de carbonatação acelerada utilizando dois tambores plásticos de 200l, conforme a Figura 7. A câmara do lado direito é a câmara de fornecimento do ar condicionado a uma concentração de 4%, umidade relativa entre 58% e 62% e temperatura controlada através de uma lâmpada de 250W, que variou entre 23°C e 26°C.

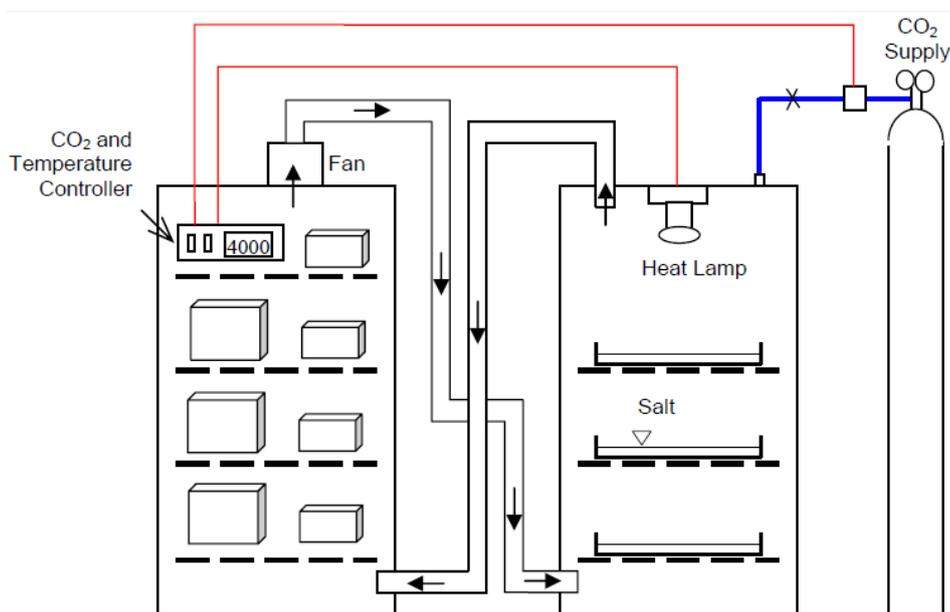


Figura 7: Esquema da câmara de carbonatação - Fonte: McGrath (2005).

Na câmara construída por McGrath (2005) os dois tambores que constituem a câmara, transformam o sistema em um circuito fechado de fluxo do ar. A câmara do lado direito recebe o dióxido de carbono diluído a 4%, submete a temperatura produzida pela lâmpada e a umidade relativa estabilizada por três bandejas contendo cloreto de sódio (NaCl).

O fluxo então é direcionado para a câmara da esquerda, através de ventiladores de baixa vazão, que alimentam a câmara pela parte inferior, permitindo um fluxo ascendente, de modo a garantir que todas as amostras sejam expostas ao CO_2 . A saída se encontra na parte superior da câmara e volta para a câmara da direita onde o ciclo de circulação recomeça.

Um aspecto importante na câmara de McGrath (2005), é que o ar permanece circulando e um ambiente independente da carbonatação, capaz de manter a temperatura e umidade controlados em um ciclo fechado de fluxo.

Barros (2008) construiu uma câmara de carbonatação em metal e vidro e avaliou as propriedades de durabilidade do concreto autoadensável – CAA obtido com Resíduo de Corte de Mármore e Granito - RCMG, dentre os ensaios realizados, foi avaliada a profundidade de carbonatação em uma concentração de 5% de CO_2 , avaliadas após 8 e 32 semanas de submissão à referida concentração no interior da câmara. O esquema de funcionamento da câmara utilizada é representado na Figura 8.

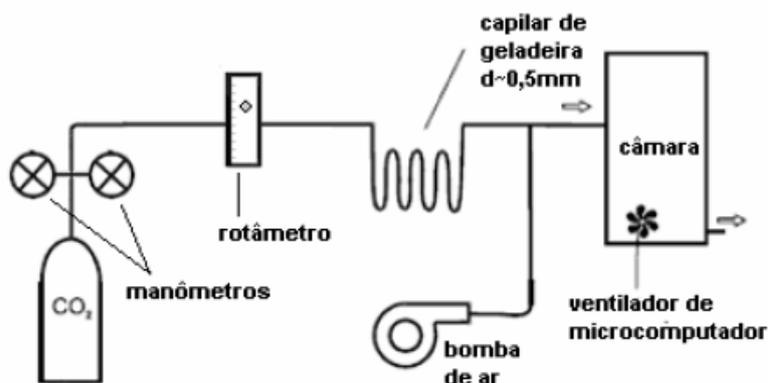


Figura 8: Esquema de funcionamento da câmara de carbonatação - Fonte: Barros (2008).

Salomão e Silva (2008) projetaram e montaram uma câmara de carbonatação, em chapas de acrílico de 10 mm. Tal câmara se apresenta como uma caixa com dimensões de 100cm x 60cm x 65cm (comprimento x profundidade x altura), vedada para aprisionar CO_2 em alta concentração, conforme exemplifica o croqui representado pela Figura 9.

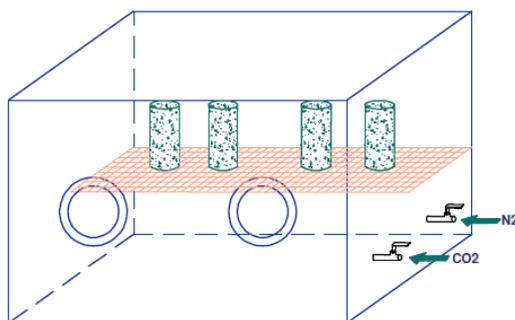


Figura 9: Croqui da câmara de carbonatação - Fonte: Salomão e Silva (2008).

O ensaio de carbonatação acelerada no concreto foi realizado por Salomão e Silva (2008) tomando por base a determinação da RILEM (1998). O objetivo da pesquisa foi construir um aparato para realizar ensaios acelerados de carbonatação, que reproduzam em poucos dias, as condições de anos de carbonatação do concreto. Com este aparelho, denominado de câmara de carbonatação, foi possível conferir o avanço da frente de carbonatação em dois traços de concreto. Os pesquisadores utilizaram o cimento CP II-E para o concreto 1 e CP III para o concreto 2. Para os primeiros ensaios os pesquisadores moldaram corpos de prova com dimensões 50mm x 100mm. Foram moldados 20 corpos de prova, destes, 10 destinados ao ensaio de compressão axial e 10 ao ensaio acelerado de carbonatação.

O funcionamento da câmara é dependente de uma bomba de vácuo utilizada que bombeia a quantidade de CO_2 para o interior da câmara, controlando a pressão através de reguladores de pressão e um monovacômetro. As temperaturas e umidades relativas são registradas através de um termo-higrômetro, conforme apresentado na Figura 10, posicionado no interior da câmara.



Figura 10: Termo-higrômetro - Fonte: Salomão e Silva (2008).

Um aspecto importante da câmara de Salomão e Silva (2008) é o caráter hermético que o ensaio é submetido, ou seja, após o início do teste a câmara não é mais aberta. Na parte frontal da câmara foi instalado um par de luvas em PVC, que permite a movimentação e/ou manipulação das amostras no interior da câmara sem o contato com o meio externo, como uma capela química. A Figura 11 apresenta o posicionamento das luvas.



Figura 11: Câmara de carbonatação acelerada - Fonte: Salomão e Silva (2008).

As amostras utilizadas no ensaio realizado por Salomão e Silva (2008) foram colocadas na câmara após 14 dias. A disposição dos corpos de prova no interior da câmara pode ser verificada na Figura 12. Uma vez que os corpos de prova estejam no interior da câmara, o sistema passará por fluxos intercalados de CO_2 e vácuo para garantir a alta concentração de CO_2 . Ao final, buscou-se que a concentração no interior da câmara fosse superior a 95%.

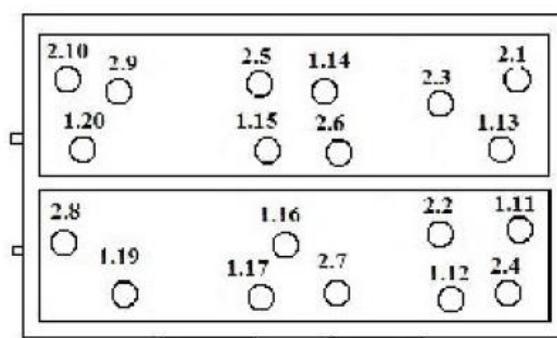


Figura 12: Posição em planta dos corpos de prova no interior da câmara de carbonatação. - Fonte: Salomão e Silva (2008).

Outro aspecto importante estudado por Salomão e Silva (2008) foi mapear fisicamente as amostras no interior da câmara, bem como identifica-las. Com isto a discussão dos resultados sob a ótica de eficiência de trabalho da câmara se torna mais consistente.

Salomão e Silva (2008) também relataram que a temperatura no interior da câmara de carbonatação foi em média 27°C e a umidade relativa de 40%. A umidade relativa mínima foi 35% e a temperatura de 30°C, resultados estes obtidos com uma sonda acoplada ao datalogger. As profundidades de carbonatação variaram entre 0,340cm e 0,800cm para diferentes idades, quais sejam 7,14 e 28 dias.

Ferreira e Helene (2014) desenvolveram um programa interlaboratorial com o objetivo de avaliar a reprodutibilidade do ensaio de carbonatação acelerada. O estudo envolveu a reprodução dos ensaios realizados por 6 universidades, denominados de concretos A, B, C, D, E e G, bem como 2 laboratórios comerciais denominados de F e H.

Os ensaios realizados por Ferreira e Helene (2014) foram obtidos no interior de câmara de carbonatação sob as mesmas condições, sejam elas, concentração de CO₂ de 5% ± 1%, temperatura 23°C ± 2°C e umidade relativa 75% ± 2%, durante 4 e 8 semanas de exposição com 6 corpos de prova para cada laboratório.

Os autores afirmaram que nos laboratórios universitários (A, B, C, D, E e G) foram obtidas uma média de profundidade carbonatada para 4 semanas de 2,0mm, 4,3mm, 0,3mm, 12,4mm e 5,6mm, respectivamente, enquanto que os laboratórios comerciais (F e H) obtiveram uma média 18,1mm.

A falta de normatização e critérios para as câmaras de carbonatação contribuem diretamente para a diferença dos resultados. O programa interlaboratorial desenvolvido por Ferreira e Helene (2014) confirma esta realidade, pois as avaliações acima relatadas foram realizadas sob as mesmas condições de fatores, ou seja, concentração de CO₂, temperatura, umidade relativa e tempo de exposição. As diferenças encontradas entre as câmaras de carbonatação foram significativas. A Figura 13 mostra as câmaras de carbonatação utilizadas no programa.



Figura 13: Câmaras de carbonatação utilizadas no programa interlaboratorial -
 Fonte: Ferreira e Helene (2014).

Alguns aspectos são relevantes para discussão. Cada câmara pesquisada apresenta características interessantes. Pauletti (2004) utilizou uma câmara de sazonalidade que garante que a secagem tenha um controle mais preciso. McGrath (2005) utilizou uma antecâmara que permite a mistura ser inserida na câmara de carbonatação na condição ideal necessária à sua pesquisa. Outro aspecto importante se dá através de Salomão e Silva (2008), que além de mapear fisicamente as amostras no interior de sua câmara, permitiu a manipulação das amostras sem que elas sofram a ação do meio externo.

Porém, nenhuma câmara pesquisada permitiu a avaliação de forma micro controlada dos fatores intervenientes como concentração de CO_2 , temperatura e umidade relativa.

2.5.1 Avaliação da profundidade de carbonatação acelerada em concreto

Segundo Nepomuceno (2005), entre as principais substâncias em sua fase gasosa que tendem a comprometer a durabilidade do concreto como o oxigênio, e o vapor de água, o dióxido de carbono se destaca pelo fato de carbonatar a reserva alcalina do concreto.

A penetração do CO₂ no interior do concreto se dá através da difusão, que é um processo de equilíbrio entre as diferentes concentrações do dióxido de carbono, mediante o fluxo e devido a diferentes pressões, o que se denomina de permeabilidade (NEPOMUCENO, 2005).

A determinação das áreas carbonatadas, e conseqüentemente da profundidade de carbonatação, pode ser feita através de diversas técnicas como difração de raios-X, análise térmica diferencial, considerados como ensaios qualitativos, e análise quantitativa como a termogravimetria (FIGUEIREDO, 2005).

Segundo Figueiredo (2005), a forma mais comum utilizada para determinação de áreas carbonatadas se dá através de indicadores de pH associadas a mudanças de cores referente a variações de intervalo de pH conforme demonstrado na Figura 14.

Indicador	Intervalo de mudança de cor		Solução
	Intervalo de pH	Mudança de cor	
Fenolftaleína [C ₆ H ₄ COOC(C ₆ H ₄ OH) ₂]	8,3 – 10,0	Incolor/Vermelho carmim	Dissolver 1g do reagente em 50cm ³ de etanol e diluir com água até 100cm ³
Timolftaleína [C ₆ H ₄ COOC(C ₁₀ H ₁₄ O) ₂]	9,3 – 10,5	Incolor/azul	Dissolver 0,4g do reagente em 600cm ³ de etanol e diluir com água até 1000cm ³
Amarelo de alizarina R (ácido paranitrobenzenoazosalicítico)	10,1 – 12,0	Amarelo/vermelho-alaranjado	Dissolver 0,5g do indicador em um litro de etanol a 80%

Figura 14: Mudança de cor e intervalos de pH dos principais indicadores usados para observação visual da área carbonatada - Fonte: Figueiredo (2005).

Para medir a profundidade de carbonatação no concreto, as amostras são rompidas em dois planos. Na primeira ruptura, em um plano transversal, nas duas faces expostas de ruptura. Com uma das metades faz-se a segunda ruptura sob um plano longitudinal de onde são extraídas medidas de uma das faces conforme mostram as Figuras 15 e 16. A medida da profundidade carbonatada é realizada mediante aspersão da solução indicadora de pH escolhida e aferida com paquímetro de precisão, conforme preconiza a orientação da RILEM 1999 (SALOMÃO E SILVA, 2008).

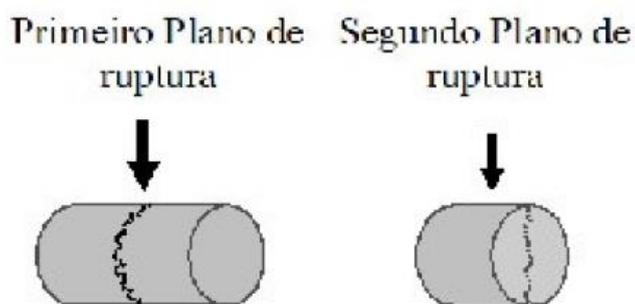


Figura 15: Planos de ruptura dos corpos de prova para o ensaio de carbonatação. -

Fonte: Salomão e Silva (2008).



Figura 16: Planos de ruptura: (a) primeiro plano; (b) segundo plano. - Fonte:

Salomão e Silva (2008).

Pode-se observar na Figura 16, uma diferença de coloração. A cor rósea avermelhada representa a área não carbonatada, enquanto a representação incolor representa a área da frente de carbonatação.

CAPÍTULO 3

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo são apresentados os materiais, procedimentos e equipamentos adotados para a fabricação e avaliação da eficiência de uma câmara de carbonatação acelerada, projetada e montada em laboratório.

A pesquisa foi estruturada em 4 etapas destinadas a garantir que o produto final fosse eficiente no estudo da carbonatação acelerada. A 1ª etapa foi o projeto propriamente dito, onde se pensou em dimensões, material a ser utilizado na fabricação, quantidade máxima de amostras ensaiadas, vedações, ventilação, divisões internas, variação de concentração de CO₂, revestimento térmico e entradas e saídas de gases (CO₂ e ar).

A 2ª etapa destinou-se a construção da câmara de carbonatação acelerada, como definição da forma, bem como o local onde seria feita, tipo válvulas utilizadas, dobradiças, tranca da porta, sistema de rodízios para transporte e por fim o teste de estanqueidade para garantir sua vedação.

Já a 3ª etapa foi automatizar e micro controlar o funcionamento da câmara de carbonatação através de um algoritmo programável capaz de interagir com a programação presente nos sensores e válvulas adquiridos comercialmente. Ainda nesta etapa se deu a calibração do sensor, com padrões rastreáveis internacionalmente e a realização de pré-testes em modelo reduzido, antes da instalação definitiva na câmara de carbonatação.

Por fim, a 4ª etapa foi submeter ao ensaio de carbonatação acelerada, amostras cilíndricas de concreto com dimensões de 100mm x 200mm, no interior da câmara de carbonatação acelerada, conforme os padrões da Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC E-391 (1993) e especificação FINAL DRAFT FprCEN/TS 12390-12, da European Committee Standardization de novembro de 2010.

As etapas do desenvolvimento desta pesquisa estão sumarizadas no fluxograma ilustrado na Figura 17.



Figura 17: Fluxograma - Fonte: Autor (2015).

3.1 Premissas para projeto da câmara de carbonatação acelerada – 1ª ETAPA

3.1.1 Visita técnica realizada ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho – Guimarães – Portugal.

Mesmo após a conclusão do projeto da câmara de carbonatação acelerada, foi realizada uma visita técnica ao laboratório de materiais de construção da Universidade do Minho na cidade de Guimarães em Portugal, sob a orientação do professor Aires Camões.

A referida câmara de carbonatação acelerada, tem suas dimensões internas 1.980mm x 720mm x 835mm, quer sejam altura, largura e profundidade respectivamente. A câmara de carbonatação do laboratório de materiais de construção da UMinho, não conta com um sistema microcontrolado que permita a atuação eletrônica para o controle da concentração de CO₂.

A câmara de carbonatação acelerada do laboratório de materiais da UMinho é dotada de um sistema de fluxo contínuo de CO₂, um painel que informa a concentração de CO₂, a temperatura e a umidade relativa do ar no seu interior, bem como um sistema de purga e filtros para uma possível retirada de umidade excessiva e material particulado, como demonstra a Figura 18.

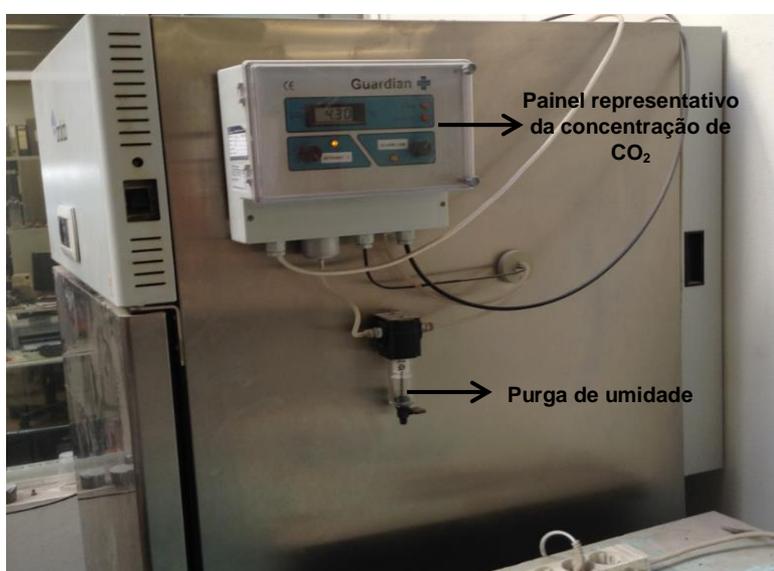


Figura 18: Câmara de carbonatação acelerada do laboratório de materiais de construção da UMinho-Portugal - Fonte: Autor (2015).

A câmara de carbonatação acelerada do laboratório de materiais de construção da UMinho, é fabricada em aço inoxidável 430, um aço ferrítico sem níquel. Conta com um painel frontal, o qual informa os valores da umidade relativa e a temperatura, conforme demonstra a Figura 19, bem como um painel lateral demonstrado na Figura 18 que informa a concentração de CO₂ instantânea. A referida câmara é capaz de submeter ao teste acelerado de carbonatação em uma concentração de CO₂ de até 30%, ou seja, o seu sistema de fluxo contínuo de CO₂, limita a avaliação da carbonatação a 30% de concentração.



Figura 19: Câmara de carbonatação acelerada do laboratório de materiais de construção da UMinho-Portugal - Fonte: Autor (2015).

A câmara de carbonatação acelerada é alimentada por um cilindro como demonstra a Figura 20, com capacidade nominal de 33kg de CO₂, dotado de um regulador de pressão e vazão e com ligação através de mangueira flexível emborrachada com diâmetro de 5/16”.

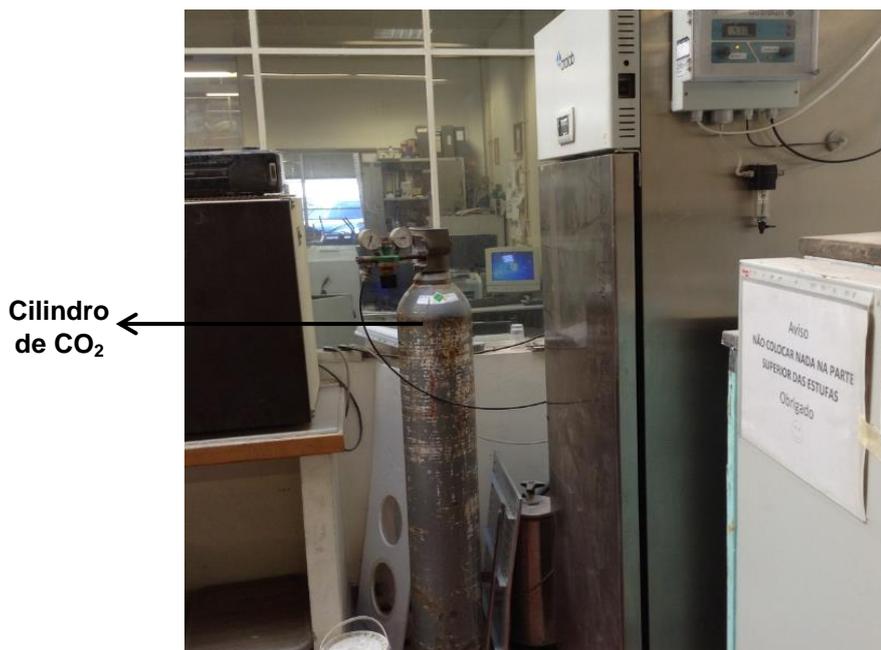


Figura 20: Câmara de carbonatação acelerada do laboratório de materiais de construção da UMinho-Portugal - Fonte: Autor (2015).

A visita realizada foi de fundamental importância, pois serviu para a reestruturação da câmara de carbonatação acelerada objeto desta pesquisa, no tocante a ventilação e vedação. A partir deste momento foi definida a ventilação de forma horizontal e ascendente, bem como a vedação da porta ser com borracha flexível de silicone imantada.

3.1.2 Dimensões e divisões internas da câmara de carbonatação acelerada.

A câmara de carbonatação acelerada foi projetada com dimensões internas de 1000mm de largura x 500mm de profundidade x 800mm de altura, dimensões externas de 1.100mm de largura x 600mm de profundidade x 900mm de altura. Tal diferença de 100mm se faz necessária para inserir o revestimento térmico, e com isso controlar a troca térmica entre o interior da câmara de carbonatação e o meio laboratorial onde se inserir e vice versa.

As dimensões foram determinadas em função do espaçamento horizontal destinada as amostras, bem como favorecer a homogeneização do ar de forma mais rápida em função da altura.

O seu interior foi projetado com 3 prateleiras separadas verticalmente entre si com espaçamento de 220mm, capaz de suportar 18 amostras cilíndricas de concreto com dimensões de 100mm x 200mm, separados entre si por 50mm, para facilitar a ventilação para cada prateleira. No total a câmara de carbonatação celerada objeto desta pesquisa, poderá avaliar 54 amostras cilíndricas de 100mm x 200mm ao mesmo tempo e permitirá ao pesquisador analisar mais de uma composição de concreto ou argamassa.

As prateleiras tem suas dimensões de 998mm de largura x 498mm de profundidade, sua superfície vazada com placas perfuradas com diâmetro de 30mm para facilitar a ventilação no interior da câmara de carbonatação acelerada.

3.1.3 Dispositivos de entrada e saída de gases (CO₂ e ar).

A câmara de carbonatação acelerada objeto deste trabalho, dispõe de 2 entradas de gases na parte superior, 1 localizada no centro geométrico da câmara de carbonatação, destinada a entrada de CO₂ e outra localizada a 200mm à sua esquerda destinada a entrada de ar, ambas equipadas com válvulas de passagem de fluxo. Também dispõe de 2 saídas de gases em sua lateral direita, localizadas a 400mm da face frontal da câmara de carbonatação, localizadas na parte superior destinada a saída do ar e outra na parte inferior destinada a saída do CO₂, haja vista o dióxido de carbono ser mais pesado que o ar.

3.1.4 Ventilação e vedação da câmara de carbonatação acelerada.

A câmara da carbonatação acelerada foi projetada para dispor de dois ventiladores tipo *coolers*, localizados na parte inferior da câmara, com o objetivo de garantir a homogeneização do ar no seu interior. Dispõe de uma única porta de abertura no sentido da esquerda para a direita, e sua vedação é realizada através de borracha de silicone imantada, com o objetivo de bloquear a saída de ar do interior da câmara de carbonatação.

3.1.5 Concentração de CO₂

A câmara de carbonatação acelerada foi projetada com o intuito de flexibilizar a concentração de CO₂ entre 0,1% e 100%. As aberturas de entrada e saída de gases são primordiais ao processo dessa variação de concentração de CO₂. A parte traseira da câmara de carbonatação dispõe de 6 entradas destinadas ao cabeamento de elétrica, eletrônica e lógica, questões estas primordiais ao controle dessa variação de CO₂.

3.2 Construção da câmara de carbonatação acelerada e materiais – 2ª ETAPA.

A câmara de carbonatação foi construída em 2 fases distintas, a 1ª fase se deu com a construção da câmara de carbonatação propriamente dita, ou seja, toda a parte interna onde serão ensaiadas as amostras e instalados os dispositivos de controle. A 2ª parte foi o invólucro de toda a caixa destinada à carbonatação acelerada, distante 50mm de cada face e destinada ao revestimento térmico.

3.2.1 Materiais constituintes da câmara de carbonatação.

- 6m³ de chapa e aço inox nº 304 de 3mm de espessura;
- 0,5m³ de kit pré fresados de chapas em aço inox 304 de 3mm de espessura;
- 12m de cantoneiras em aço inox nº 304;
- 12m de tubos em aço inox de 1”;
- 2,5kg de argônio utilizado para soldagem em aço inox;
- 2 pares de dobradiças fabricados em aço inox nº 304;
- 4 flanges para conexões em aço inox;
- 4 válvulas do tipo esférica para controle de entrada e saída de gás;
- 4 pares de conectores para embuchamento das válvulas;
- 1 puxador de abertura;
- 4 rodízios para instalação nas bases da câmara;

- 1 Cilindro de CO₂ com capacidade de 33 kg;
- 1 Capacete de proteção para cilindro;
- 2 Válvulas reguladoras de pressão;
- 2 ventiladores para homogeneização do ar;
- 1 cilindro de CO₂ com 4kg para teste de amostragem;

3.2.2 Construção da câmara de carbonatação

Inicialmente as chapas de aço inox 304 foram marcadas, cortadas, dobradas, ponteadas (procedimento de marcação dos pontos de soldas utilizado antes de submeter à soldagem definitiva), fresadas e colocadas em esquadro, na oficina do laboratório de mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do rio Grande do Norte – IFRN.

Após estes procedimentos, as chapas foram levadas até uma oficina especializada para montagem e soldagem da estrutura da câmara de carbonatação. Ao terminar a parte principal da câmara de carbonatação, sua estrutura foi envolvida com uma segunda estrutura (invólucro) espaçada 50mm de cada face, espaço este destinado a receber o revestimento térmico.

Em seguida, de volta à oficina do laboratório de mecânica do IFRN, foram produzidas as dobradiças e os tubos onde foram conectadas as válvulas de entrada e saída de gases (CO₂ e ar).

De volta à oficina especializada, os tubos destinados a receber as válvulas foram soldados, assim como as dobradiças foram parafusadas à estrutura final da câmara de carbonatação. Por fim a câmara foi soldada a uma estrutura de suporte, confeccionada em tubo de aço inox 304 com diâmetro de 1” (uma polegada), com 4 bases estruturais dotadas de rodízios com o objetivo de facilitar seu deslocamento, caso necessário.

Em seguida a câmara de carbonatação foi retirada da oficina especializada e levada a uma segunda oficina, especializada em climatização onde foi realizado o procedimento de revestimento térmico, com o objetivo de evitar a troca de calor entre a câmara de carbonatação e o meio onde ela se inserir.

3.2.3 Revestimento térmico

O material utilizado no revestimento térmico foi espuma expansiva de poliuretano. Foram utilizados 31 litros da espuma durante o processo, o qual revestiu todas as faces da câmara de carbonatação, inclusive a porta.

3.2.4 Válvulas de entrada e saída de gases (CO₂ e ar)

Foram utilizadas 4 válvulas em aço inox, do tipo esférica com ¼ de giro, dispostas 2 em cima da câmara e 2 na lateral direita, conforme descrito no item 3.1.

3.2.5 Dobradiças e tranca da porta

Foram projetadas e construídas 2 dobradiças especiais, pivotantes, capazes de se ajustar conforme a pressão imposta pela tranca da porta da câmara de carbonatação sem causar o efeito guilhotina na borracha de vedação, instalada na porta.

Por sua vez a tranca, instalada na câmara de carbonatação foi uma tranca de forno industrial, regulável para garantir uma pressão suficiente capaz de não permitir a troca de ar entre o interior da câmara de carbonatação e o meio onde se inserir.

3.2.6 Prateleiras, vedação e ventilação.

A câmara de carbonatação dispõe de 3 prateleiras com dimensões de 998mm de largura x 498mm de profundidade x 30mm de altura, separadas entre si na vertical por 220mm. Fabricadas em barras de aço inox 304 de 3mm e cobertas com chapas tipo moeda com aberturas circulares de 30mm para facilitar a ventilação no interior da câmara de carbonatação.

Para garantir a vedação da câmara de carbonatação, foi instalada uma borracha flexível de silicone, imantada em todo o perímetro da porta, de forma a impedir a troca de ar entre o interior de câmara e o meio onde se inserir.

Para a ventilação no interior da câmara de carbonatação foram instalados 2 ventiladores do tipo *coolers* como demonstra a Figura 21, em sua base, com suas faces de ventilação positiva apontadas para cima de forma a garantir uma ventilação ascendente.

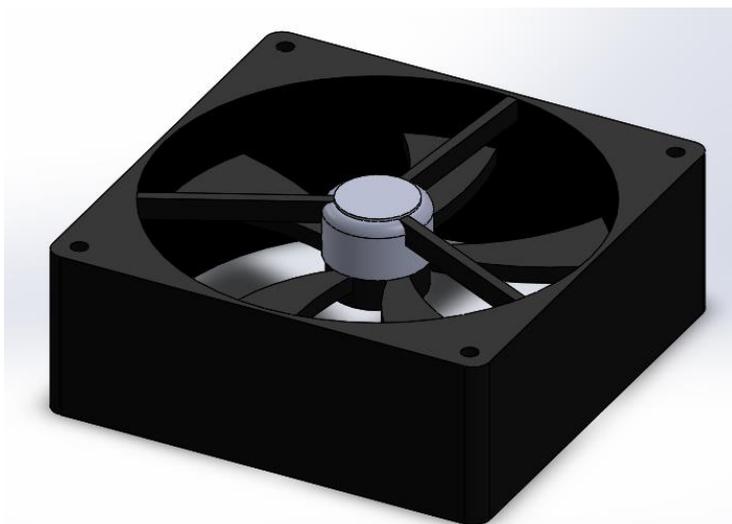


Figura 21: Ventilador tipo cooler - Fonte: Autor (2015).

3.2.7 Teste de estanqueidade

Por fim, a câmara de carbonatação foi levada a uma oficina especializada em projetar, fabricar e realizar ensaios em vasos sob pressão, e submetida ao teste de estanqueidade, com o intuito de detectar algum vazamento em sua estrutura.

O teste consistiu em conectar um compressor com capacidade de 16kgf/cm² a uma das válvulas de saída de gases da câmara de carbonatação, juntamente com um manômetro padrão de calibração, onde registrou durante 90 minutos a pressão no interior do reservatório, nas conexões, nas válvulas e nas tubulações da câmara de carbonatação. Ao final foi emitido um relatório do procedimento de ensaio (anexo A1), bem como o certificado de estanqueidade (anexo A2).

3.3 Automação e micro controle de funcionamento da câmara de carbonatação – 3ª ETAPA.

3.3.1 O algoritmo.

Para o funcionamento da câmara de carbonatação proposta, foi desenvolvido um algoritmo de programação em parceria com a diretoria de informática do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN, capaz de interagir e criar uma interface com os programas dos dispositivos de micro controle que foram utilizados no funcionamento da câmara de carbonatação. Este algoritmo permite atuar e comandar os programas dos dispositivos de micro controle em suas variáveis mensuráveis como concentração de CO₂, temperatura, umidade relativa e concentração de ar.

O algoritmo permite criar caminhos, denominados de “*log files*” os quais por sua vez são responsáveis por armazenar cada dado, minuto a minuto, das variáveis como concentração de CO₂, temperatura, umidade relativa e ar, bem como registrar seus picos máximos, mínimos, instantâneos e a média de cada variável mensurada.

O algoritmo foi programado em uma linguagem de programação denominada “C + +” no sistema operacional Linux o qual aparenta ser um sistema robusto e altamente personalizável que possibilita o seu funcionamento e instalação desde em um supercomputador dentro de um datacenter como também em hardwares mais modestos, como é o caso.

A linguagem de programação “C + +” é uma linguagem simples utilizada para propósitos gerais, imperativa e eficiente. A escolha por esta base de programação se deu por ser uma linguagem que produza um código otimizado, rápido nas leituras, que fornece um grande período para o armazenamento de dados e por dispor de uma imensa biblioteca capaz de interagir com outros sistemas operacionais como Windows, IOS, Andróide e Google.

O algoritmo permite ainda, dispor em uma rede de dados via internet, no interior de um aplicativo, todo o micro controle da câmara de carbonatação, e permite ainda que o pesquisador visualize, analise, e comande qualquer variável

mensurável como concentração de CO₂, temperatura, umidade relativa e ar, e com isso permita ao pesquisador atuar em seus ensaios, mediante uma rede de internet, sem sair do local onde esteja, ou seja, permite que o ensaio acelerado de carbonatação seja controlado de fora do laboratório, ou até mesmo de fora da cidade, estado ou país.

O algoritmo apresenta limitações em alguns aspectos como falta de energia, para este caso, quando detectado um corte súbito na eletricidade, por questão de segurança, todo o sistema precisa ser reinicializado. Tal procedimento só poderá ser executado manualmente no local onde esteja a câmara de carbonatação.

Outro aspecto limitador, também por uma questão de segurança, se dá quando o algoritmo detecta uma liberação de CO₂, por mais de 15 segundos contínuos, como é o caso de esquecer a porta aberta por exemplo. Diante de tal fato o algoritmo envia um comando aos dispositivos de solenoides que fecha automaticamente a saída de CO₂ diretamente no cilindro através de um solenoide programado para este fim. Também para este caso o sistema será reinicializado através do procedimento manual no local onde se encontrar a câmara de carbonatação.

3.3.2 Interface com os programas de micro controle de funcionamento da câmara de carbonatação.

Foi definido como micro controle de funcionamento a avaliação, análise e atuação da concentração de CO₂ no interior da câmara de carbonatação, bem como os recursos necessários para manter uma concentração definida, como aberturas de válvulas para entrada ou saída de CO₂ ou ar, injeção de CO₂ ou ar e desligamento automático por razões de segurança.

Para tal, o algoritmo permitiu interagir com o programa do sensor principal de avaliação de CO₂ em diversos aspectos aos quais descreve-se a seguir:

A interface apresenta em uma tela, diversos dados que podem ser visualizados em um computador, celular ou tablete utilizando o próprio software dos sensores adquiridos comercialmente.

Apresenta também o que se denomina de “árvore de dados”. Essa trata de uma coluna que apresenta dados da concentração de CO₂ como o número de leituras, o valor instantâneo, o pico máximo, a média e o pico mínimo da avaliação corrente.

Em seguida apresenta uma seção de seleção destinada à inclusão de outros sensores, caso seja necessário, em função da limitação comercial do sensor principal, caso aconteça.

A interface também apresenta uma seção de configuração do sensor onde se permite avaliar a concentração em porcentagem ou ppm (partes por milhão), a temperatura em Celsius ou Fahrenheit, e por fim permite entrar no setup do programa a ajustar a sensibilidade de leitura do sensor. Este procedimento denomina-se de “calibração”, ou seja, a qualquer momento o sensor pode ser calibrado utilizando este recurso.

Em seguida a interface dispõe de outra seção onde é permitido controlar o intervalo de leituras, seja minuto a minuto, ou hora a hora, em um espaço de tempo definido quer seja por hora ou por dia. Essa mesma seção dispõe do botão de inicialização das leituras.

Outra seção que a interface permite é realizar o “arquivo de dados”, nesta seção são arquivados todos os dados das leituras conforme programação, ou seja, caso a programação seja a cada minuto durante 28 dias, por exemplo, estes arquivos são armazenados por data durante os 28 dias, com leituras a cada minuto.

Por fim, a interface apresenta “guias de navegação”, onde é permitido observar os dados correntes de leituras, bem como a interação com a internet, para o envio de dados a um aplicativo. A guia de ferramentas, onde se pode conectar uma impressora, vídeo, projetor, computador, celular ou tablete. Para finalizar, a interface apresenta a guia de gráfico, instantâneo e um botão para impressão do gráfico.

3.3.3 Variáveis mensuráveis

As variáveis mensuráveis inerentes ao micro controle para a câmara de carbonatação acelerada são concentração de CO₂, temperatura, umidade relativa do ar, porém, as únicas variáveis microcontroladas são concentração de CO₂ e ar.

3.3.4 Calibração do sensor.

Antes da realização de pré-testes, bem como da instalação no interior da câmara de carbonatação, o sensor principal foi submetido ao procedimento de calibração em um laboratório certificado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO com padrões rastreáveis internacionalmente por Scientific and Technical Gases Ltd - STG CALGAZ. Após comprovada a calibração instrumental, foi emitido um certificado de calibração (anexo A3), juntamente com o certificado de rastreabilidade do cilindro padrão de calibração laboratorial (anexo A4).

3.3.5 Dispositivos avaliadores de CO₂.

Os dispositivos avaliadores de CO₂ foram adquiridos nos Estados Unidos da América, através da empresa CO₂ METER Inc, conforme ProForma Invoice nº 1995 de 28 de janeiro de 2015. Os dispositivos seguiram os trâmites oficiais de tributação do governo Brasileiro e retirado no dia 06 de abril de 2015.

A Figura 22a demonstra o sensor para avaliação de concentração de dióxido de carbono tipo SPRINTIR, com faixa de avaliação entre 0% e 100%, e funcionamento em 20Hz. A avaliação do fluxo de ar no interior da câmara será realizada através do Kit TUBE CAP CM 0013 conforme demonstra a Figura 22b.

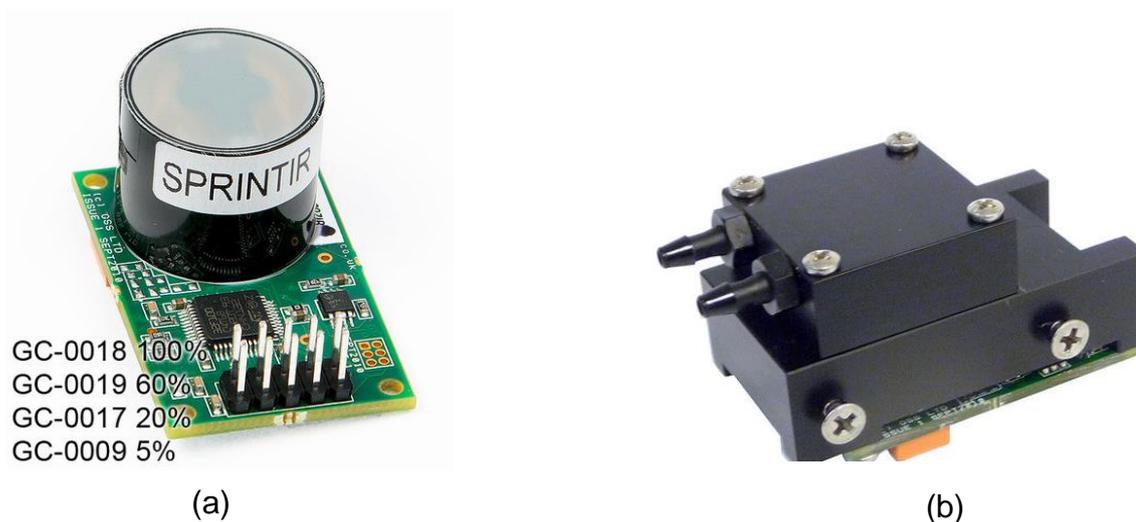


Figura 22: Dispositivos para avaliação de CO₂: (a) sensor de avaliação de concentração de CO₂; (b) kit para avaliação de fluxo de ar - Fonte: Catálogo CO₂ Meter, Inc. (2015).

Kit de bomba e sensor modelo CM-0111 conforme demonstra a Figura 23, com vazão de 30l/h, destinado à avaliação do volume da mistura entre CO₂ e ar no interior da câmara de carbonatação, assim como do fluxo de passagem.



Figura 23: Bomba para avaliação do volume de ar - Fonte: Catálogo CO₂ Meter, Inc. (2015).

O sensor, assim como a bomba foram conectados entre si, através de mangueiras e filtros contra partículas e umidade, conforme demonstram as Figura 24 e 25.

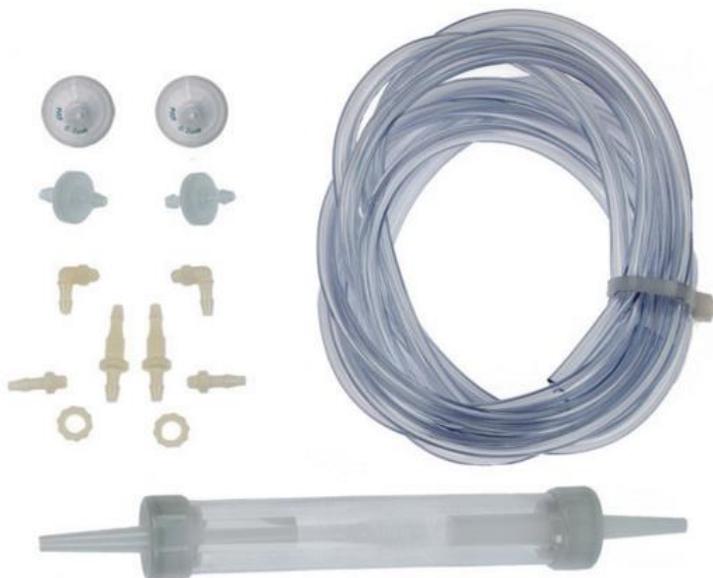


Figura 24: Mangueiras, conexões e filtros - Fonte: Sugestão catálogo CO2 Meter, Inc. (2015).



Figura 25: Ligação sensor e bomba - Fonte: Catálogo CO2 Meter, Inc. (2015).

Para garantir um rastreamento eficiente no interior da câmara de carbonatação foram adquiridos mais 2 sensores de CO₂ que atuarão como apoio ao sensor principal. Os sensores foram adquiridos através da empresa Zhengzhou Winsen Eletronic Technology Co. , LTD.

Os referidos sensores conforme demonstra a Figura 26, tem o objetivo de funcionar em paralelo com o sensor principal, nas prateleiras superior e inferior, e com isso monitorar se a concentração de CO₂ em todas as prateleiras são as mesmas. A variação de avaliação da concentração de CO₂ destes sensores é de 0% a 10%.



Figura 26: Sensor de CO₂ MH-Z16, faixa de avaliação 0% a 100% - Fonte: Zhengzhou Winsen Eletronic Technology Co. , LTD. (2015).

3.3.6 Pré testes

Foi realizado um teste com o algoritmo de programação em 2014, denominado de modelo experimental, com o objetivo de avaliar a eficiência da programação, bem como detectar possíveis falhas e com isso ter tempo suficiente para corrigi-las, reprogramá-las ou chegar à conclusão que o algoritmo pensado era ineficiente.

O modelo experimental conforme demonstra a Figura 27, foi calibrado e submetido ao teste durante 90 dias na sala da diretoria acadêmica de informática do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do rio Grande do Norte – IFRN. Na ocasião, o sistema foi programado para registrar os dados da variável

temperatura no interior da sala, no dia-a-dia de expediente normal, haja vista neste momento ainda não dispormos do sensor para a avaliação do CO₂.



Figura 27: Dispositivo de micro controle de temperatura – modelo experimental -
Fonte: Autor (2015).

De posse do sistema do sensor principal, foi realizado no interior do laboratório de informática do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN, em uma escala reduzida, antes da instalação na câmara de carbonatação, o primeiro teste real com a utilização de CO₂ e funcionamento através do algoritmo criado. Tal procedimento foi realizado com o objetivo de detectar qualquer problema e possibilitar sua correção antes da instalação definitiva na câmara de carbonatação.

Inicialmente o sensor foi conectado à bomba, que por sua vez foi conectada ao sistema de filtros, conforme apresentado na Figura 26. O teste foi realizado em uma escala reduzida, utilizando uma caixa de isopor com dimensões 400mm de comprimento x 300mm de largura x 350mm de profundidade.

As mangueiras de sucção e retorno foram colocadas na caixa através de furos selados com silicone para garantir plena vedação. O sensor, a bomba e os filtros foram inseridos no interior da caixa.

No interior da caixa foi instalado 1 ventilador tipo cooler, com o objetivo de homogeneizar o ar e o CO₂ para a avaliação. O ventilador foi preso à lateral da caixa, localizado no centro geométrico da largura, os fios que o alimentam, assim como as fitas que o prendem foram selados com silicone, tais quais as mangueiras de sucção e retorno, com o objetivo de garantir a vedação. O ventilador, assim como a bomba, foram conectados a uma bateria de 5V (volts).

O teste iniciou sem a presença de CO₂ o qual permaneceu durante 40 minutos. Após esse tempo foi injetado uma quantidade de CO₂ até atingir uma concentração de 20%, o que demorou 2 minutos para a estabilização nesta concentração. Após a estabilização a caixa foi lacrada com fita adesiva em sua tampa e permaneceu 6 horas até a sua abertura.

Durante o teste foi identificado que os botões de “imprimir gráfico, presente nas “abas de navegação”, não funcionaram. Foi enviado um e-mail ao fabricante do sensor explicando o problema. No dia seguinte o fabricante enviou uma atualização de seu software, o qual foi atualizado e o problema corrigido.

Após o pré teste realizado na caixa de isopor, o sistema foi instalado de forma definitiva na câmara de carbonatação e submetido as concentrações de 5%, 10%, 20% e 50% de CO₂, ou seja, cada concentração de CO₂ foi testada por 24 horas.

Foram necessários 4 dias de testes, em concentrações de CO₂ deferentes, para observar o desempenho do sistema na câmara de carbonatação real, sob a ótica de alguns aspectos como: vazamentos, estabilização da concentração de CO₂, capacidade de leituras e resistência dos instrumentos. Só após estes testes iniciais, foi decidido iniciar o ensaio do teste acelerado de carbonatação ao concreto.

Por fim, foi realizado já na câmara de carbonatação o teste do solenoide. Equipamento destinado ao controle de concentração de CO₂ no interior da câmara de carbonatação.

3.3.7 Processo de funcionamento da câmara de carbonatação acelerada.

Para assegurar a confiabilidade da câmara de carbonatação proposta, optou-se por elaborar um sistema informatizado através do algoritmo desenvolvido para

interagir com o software dos sensores, monitorar e manter os dados internos da câmara de carbonatação, relativos à concentração de CO_2 e temperatura. Para isso se utilizou um conjunto de 3 sensores eletrônicos que armazenam segundo a segundo os dados da concentração de CO_2 e temperatura no ambiente interno da câmara de carbonatação, e repassa para um programa de computador que grava a data e a hora da leitura. Este programa determina se existe a necessidade de se injetar mais gás dentro da câmara de carbonatação com o intuito de aumentar a sua concentração ou se é necessário adicionar mais ar para que se reduza esta concentração. Desta forma é possível manter um histórico com o nível de detalhamento da concentração de CO_2 a cada minuto, garantindo a exposição dos corpos de prova a uma alta confiabilidade da concentração de CO_2 .

Cada prateleira da câmara de carbonatação dispõe de um sensor nos seguintes moldes: As prateleiras superior e inferior são equipadas com sensores MH-Z16, com variação de avaliação da concentração de CO_2 entre 0% e 10%. Estes sensores funcionam como apoio ao sensor principal. A prateleira principal dispõe de um sensor com faixa de avaliação entre 0% e 100%, denominado de sensor principal, por permitir avaliações em grandes faixas de concentração.

Os sensores são conectados entre si, e comandados por um dispositivo eletrônico denominado de arduino. Que consiste em uma placa eletrônica que permite automação de sensores, projetos eletrônicos e robóticos através de pinos digitais e analógicos, com conexões a computadores através de portas tipo USB e seriais.

A programação dos sensores no arduino foi feita de modo que cada sensor não possa ter uma diferença entre si superior a 1% de CO_2 , ou seja, os 3 sensores instalados, fornecem uma leitura a cada minuto, o qual é a média entre si. Caso algum dos sensores instalados em cada prateleira forneça uma leitura superior a 1% dos outros 2 sensores, a avaliação é parada, e o arduino enviará uma mensagem a uma pasta localizada no google drive denominada "Projeto CO_2 ". Se em 30 segundos as leituras não estabilizarem o sistema terá que ser reinicializado manualmente no local onde se encontra a câmara de carbonatação.

Durante os testes na câmara de carbonatação foi colocado 1 dos sensores fora da câmara de carbonatação com o objetivo de testar o arduino. Ao detectar a

diferença superior a 1% de CO₂ dos outros 2 sensores que ficaram no interior da câmara de carbonatação o arduíno automaticamente enviou a mensagem à pasta, aos 31 segundos o arduíno comandou o travamento do teste e voltou à tela inicial do software, garantindo dessa forma que o sistema fosse reinicializado manualmente.

A câmara de carbonatação conta ainda com 4 solenoides, que são dispositivos eletromagnéticos controlados por eletroímãs através de bobinas, os quais provocam ações de abrir e fechar. Um solenoide é comandado pelo arduíno para injetar CO₂ caso seja necessário. O outro solenoide é comandado também pelo arduíno para injetar ar se for necessário.

Os solenoides funcionam da seguinte forma: após ser definida a concentração de CO₂ que se queira ensaiar, bem como o desvio padrão que poderá ser aplicado a essa concentração, o solenoide controlará através de aberturas e fechamentos a entrada de CO₂ ou ar de modo a manter uma concentração estabilizada no interior da câmara de carbonatação.

Foi realizado um teste com uma concentração superior a definida para o ensaio, 7,5% de CO₂, com o objetivo de avaliar a atuação do comando do arduíno assim como a operacionalização do solenoide.

O solenoide que controla a entrada de CO₂ foi conectado à válvula de esfera, presente no centro geométrico da parte superior da câmara de carbonatação e conectada ao cilindro de CO₂. Já o solenoide que controla a entrada de ar, foi conectado na válvula de esfera localizada na lateral direita superior da câmara de carbonatação e conectada a bomba de aquário com capacidade de vazão de 200l/h.

Por razão de segurança o arduíno foi programado de tal forma, que ao detectar uma abertura do solenoide que controla a entrada de CO₂ superior a 15 segundos, a enviar um comando ao sistema para fechar a válvula automaticamente e parar a avaliação totalmente. A partir deste ponto o funcionamento da câmara de carbonatação acelerada só poderá ser reinicializado manualmente.

Todo o sistema de arduíno, software do sensor e interface com o algoritmo, funciona em computador do tipo notebook, o qual dispõe de um sistema operacional Linux que utiliza o conceito de Data Logger, que é o instrumento que possui um registrador interno para armazenar medidas efetuadas a cada intervalo de tempo ajustado pelo usuário. Com este instrumento programado foi possível coletar todos

dados da concentração de CO₂ e temperatura, e armazená-los, gerando assim um histórico de valores para posterior utilização.

3.4 Ensaio de carbonatação acelerada ao concreto – 4ª ETAPA.

O concreto utilizado nesta pesquisa foi um concreto convencional, confeccionado com um consumo de cimento de 365 kg/m³ do tipo CP V ARI, e fator a/c de 0,50. Este traço, atualmente já é objeto de estudo pelo grupo de pesquisa do IFRN para aplicação em fábrica de pré-moldados para uso em postes de distribuição de energia. O estudo de durabilidade desses concretos está sendo desenvolvido para ataque por cloretos pelo mesmo grupo e será complementado no presente trabalho quanto à carbonatação.

3.4.1 Ensaios do concreto no estado endurecido.

A avaliação no estado endurecido do concreto se deu através dos ensaios da determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, aos 28 dias, conforme determina a ABNT NBR 9778 (1987), em 3 (três) corpos de provas e resistência à compressão com 1 dia, 7 dias e 28 dias, de acordo com ABNT NBR 5739 (2007) e utilizou 3 (três) corpos de prova para cada idade.

A absorção de água por imersão foi determinada pela equação 5.

$$Abs = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

M_{sat} é a massa do corpo-de-prova saturado;

M_s é a massa do corpo-de-prova seco em estufa.

O índice de vazios foi obtido através da equação 6.

$$IV = \frac{Msat - Ms}{Msat - Mi} \times 100$$

Onde:

M_i a massa do corpo-de-prova saturado, imerso em água.

Por fim a massa específica foi obtida através da equação 7.

$$ME = \frac{Ms}{Msat - Mi} \quad (7)$$

3.4.2 Ensaio do concreto à carbonatação acelerada

O ensaio do concreto à carbonatação acelerada consistiu em submeter os corpos de provas do concreto ao teste acelerado de carbonatação acelerada tomando-se por base a norma do Laboratório Nacional de Engenharia Civil LNEC E-391 (1993) e a especificação FINAL DRAFT FprCEN/TS 12390-12, da European Committee Standardization de novembro de 2010 no tocante ao procedimento e a variação adotada.

O ensaio foi realizado com o nível de concentração controlado de CO_2 de $7,5\% \pm 0,5\%$. A temperatura e a umidade relativa do ar foram apenas registradas.

O motivo da escolha por tal concentração de CO_2 seu deu por ser superior à concentração normatizada pela LNEC E-391 (1993), o que permite ao pesquisador realizar estudos experimentais que possam ser confrontados com a norma, por garantir que o sensor principal adquirido para esta pesquisa avalia concentração acima da normatizada pela LNEC E-391 e por permitir que os sensores auxiliares atuem em apoio à avaliação do sensor principal, haja vista os auxiliares avaliarem concentração de CO_2 até 10%, enquanto o sensor principal avalia concentração até 100%.

3.4.2.1 Técnica utilizada para análise de carbonatação acelerada

Após a cura submersa dos corpos de prova de dimensões cilíndricas de 100mm x 200mm, durante 28 dias em tanque com água, esses foram transportados ao laboratório onde permaneceram a uma temperatura de $22^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $62\% \pm 5\%$ por 7 dias.

Após o acondicionamento, a base e o topo dos corpos de prova foram selados utilizando cera de parafina, com o objetivo de evitar a entrada de dióxido de carbono e permitir a carbonatação apenas em suas laterais.

A cera de parafina foi aplicada com um pincel após ter sido derretida em um recipiente utilizando um fogão elétrico.

Após a selagem da base e topo, os corpos de prova foram introduzidos no interior da câmara de carbonatação e submetidos a uma concentração de $7,5\% \pm 0,5\%$. Os valores de temperatura e umidade no interior da câmara de carbonatação foram apenas registrados.

3.4.2.2 Posição dos corpos de prova no interior da câmara de carbonatação

Para a realização do ensaio de carbonatação acelerada, foram inseridos 11 corpos de prova no interior da câmara de carbonatação da seguinte forma: Nas prateleiras superior e inferior, denominadas de prateleira A e prateleira C respectivamente, foram posicionados 3 (três) corpos de prova no eixo central da prateleira, ou seja, separados entre si, em 150mm e das paredes laterais internas da câmara de carbonatação em 200mm na dimensão largura, e 200mm entre a parede traseira e a porta da câmara de carbonatação na dimensão profundidade. As amostras da prateleira "A" foram denominadas de A1, A2 e A3 e da prateleira "C" como C1, C2 e C3.

Na prateleira central denominada de B foram posicionados 5 corpos de prova da seguinte forma: foram posicionados 3 corpos de prova no eixo central da prateleira, ou seja, separados entre si, em 150mm e das paredes laterais internas da câmara de carbonatação em 200mm na dimensão largura, e 200mm entre a

parede traseira e a porta da câmara de carbonatação na dimensão profundidade, tal qual nas prateleiras A e C e mais 2 corpos de prova reservas afastados da parede interna traseira da câmara de carbonatação em 50mm, das laterais em 325mm e separados entre si em 150mm.

3.4.2.3 Medição da profundidade da carbonatação

A medição da profundidade de carbonatação nos corpos de prova de concreto foi realizada aos 7, 14, 28, 42 e 56 dias de exposição à concentração do dióxido de carbono.

Aos 7 dias de exposição os corpos de prova foram partidos em dois planos de ruptura, um no sentido transversal conforme demonstra a Figura 28, em fatias de 50mm, e outro no sentido longitudinal, conforme demonstram as Figuras 29a e 29b, formando assim 2 faces para a avaliação da profundidade de carbonatação.

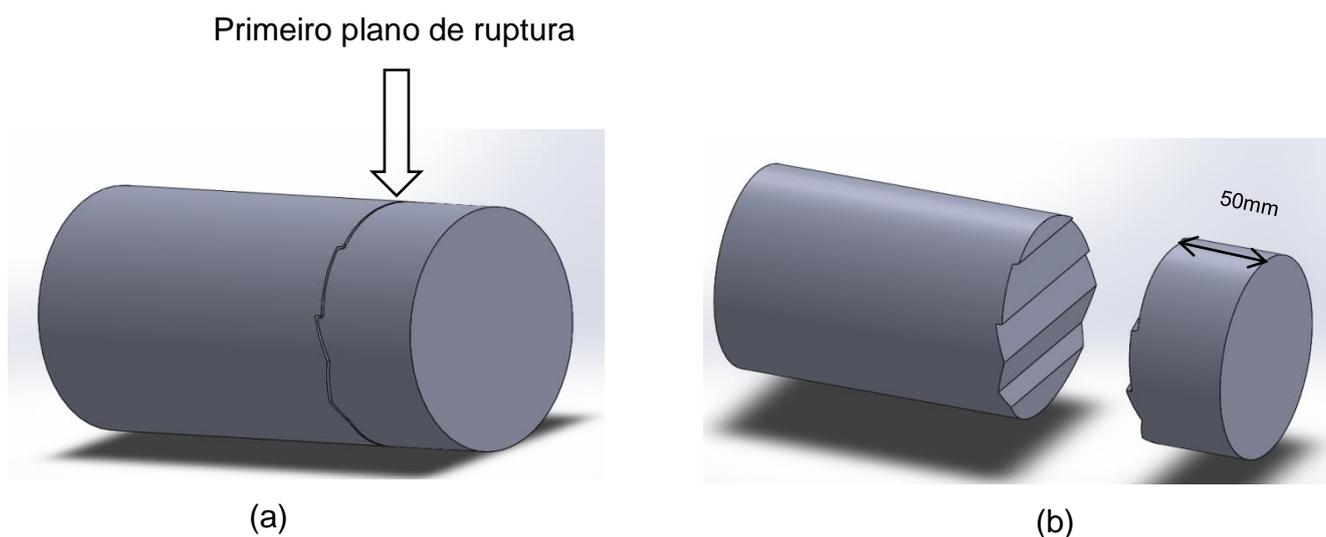


Figura 28: Plano de ruptura transversal: (a) primeiro plano de ruptura; (b) fatia de 50mm - Fonte: Autor (2015).

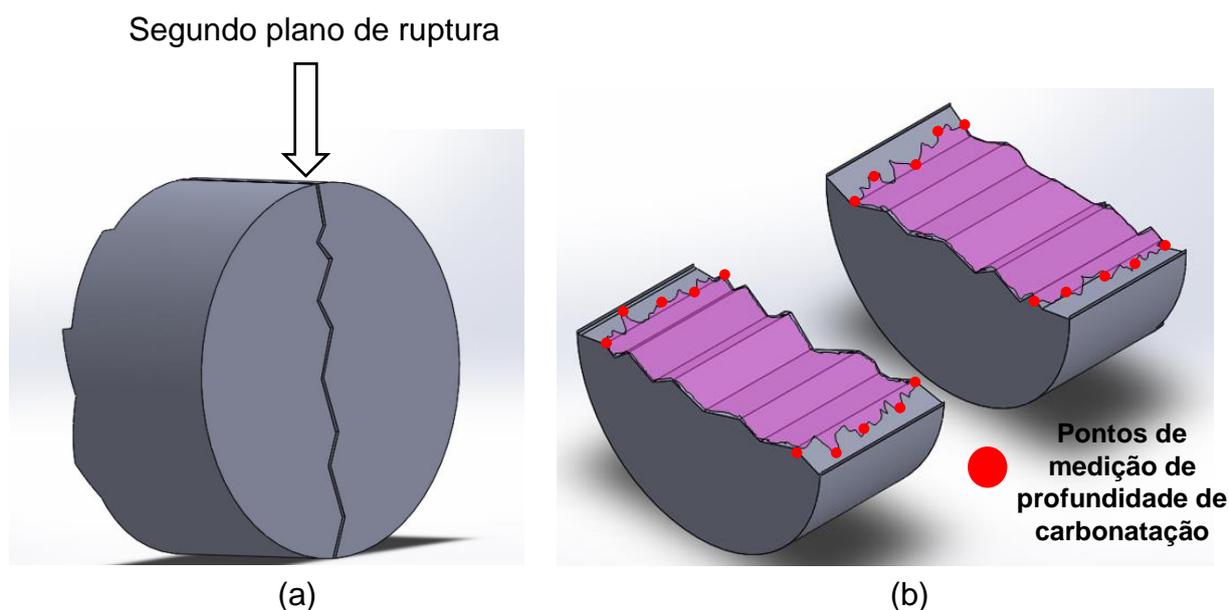


Figura 29: (a) Plano de ruptura longitudinal; (b) Faces para avaliação da profundidade de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

Após a ruptura dos planos, foi aspergido uma solução de 1g de fenolftaleína dissolvido em uma solução de 70ml de álcool e 30 ml de água destilada conforme determina a especificação FINAL DRAFT FprCEN/TS 12390-12, da European Committee Standardization de novembro de 2010.

Após 30 minutos, tempo detectado para a secagem da solução foi realizada a medição da carbonatação com a utilização de um paquímetro de alta precisão milimétrica, nas laterais longitudinais do corpo de prova rompido.

Após a medição da profundidade de carbonatação, a parte restante dos corpos de prova, utilizada para a medição da profundidade de carbonatação, foi selada com cera de parafina, na face rompida, e retornaram ao interior da câmara de carbonatação os quais ocuparam os mesmos lugares onde ficaram expostos à concentração de CO_2 , para posterior avaliação aos 14, 28, 42 e 56 dias. O mesmo procedimento foi realizado aos 14, 28, 42 e 56 dias de exposição.

Para cada dia de exposição no interior da câmara da carbonatação, as avaliações foram registradas a cada segundo para posterior discussão dos resultados.

CAPÍTULO 4

4 Resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões obtidos nesta pesquisa, referente ao projeto e construção da câmara de carbonatação acelerada, bem como sua automação e micro controle de funcionamento. Serão apresentados e discutidos aspectos como calibração do sensor principal, realizado em laboratório especializado, aprovado pelo INMETRO e com rastreabilidade internacional.

Por fim, são apresentados e discutidos os resultados dos testes que antecederam a instalação definitiva da câmara de carbonatação acelerada, assim como o ensaio de carbonatação acelerada aplicado ao concreto aos 7, 14, 28, 42 e 56 dias de exposição.

4.1 Projeto da câmara de carbonatação acelerada.

Diante da pesquisa realizada, foram observados detalhes de cada câmara tomada como referencial, ou seja, cada referência utilizada serviu ao desenvolvimento do projeto, a construção e funcionamento do equipamento. A visita ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho, em Guimarães, Portugal, conduzida pelo Professor Aires Camões, foi fator primordial ao desenvolvimento do projeto.

4.1.1 Dimensões e divisões internas da câmara de carbonatação acelerada.

O projeto apresenta dimensões internas e externas bem definidas e pensadas para promover o mínimo de solda possível, haja vista, o aço inox 304 não ter apresentado uma boa resistência ao calor. A Figura 30 apresenta as dimensões em milímetros da vista frontal, prateleiras, rodízios e porta da câmara de carbonatação acelerada.

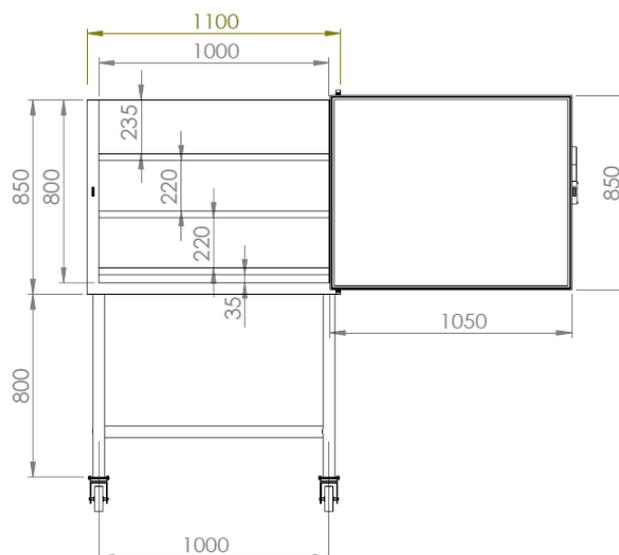


Figura 30: Vista frontal, prateleiras, rodízios e porta da câmara de carbonatação -
Fonte: Autor (2015).

A diferença das dimensões internas e externas se faz necessária para promover o revestimento térmico destinado a conter a troca térmica entre o interior da câmara e o meio onde se instalar. A Figura 31 demonstra a vista lateral direita da câmara de carbonatação com os dispositivos de saída de CO₂ e ar.

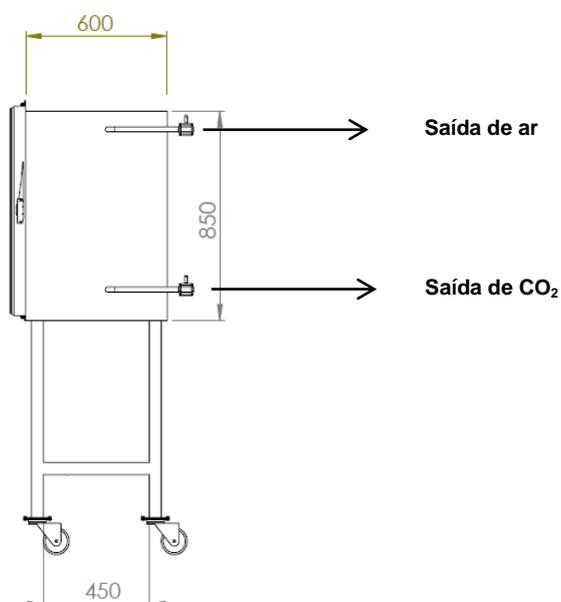


Figura 31: Vista lateral direita com dispositivos de saída de CO₂ e ar - Fonte: Autor
(2015).

Os dispositivos de saída de CO_2 e ar foram determinados nas posições constantes na Figura 33, pelo fato do CO_2 ter seu peso superior ao ar, com isso sua saída será facilitada pela parte inferior da câmara de carbonatação. As Figuras 32a e 32b demonstram a perspectiva isométrica e superior respectivamente da câmara de carbonatação.

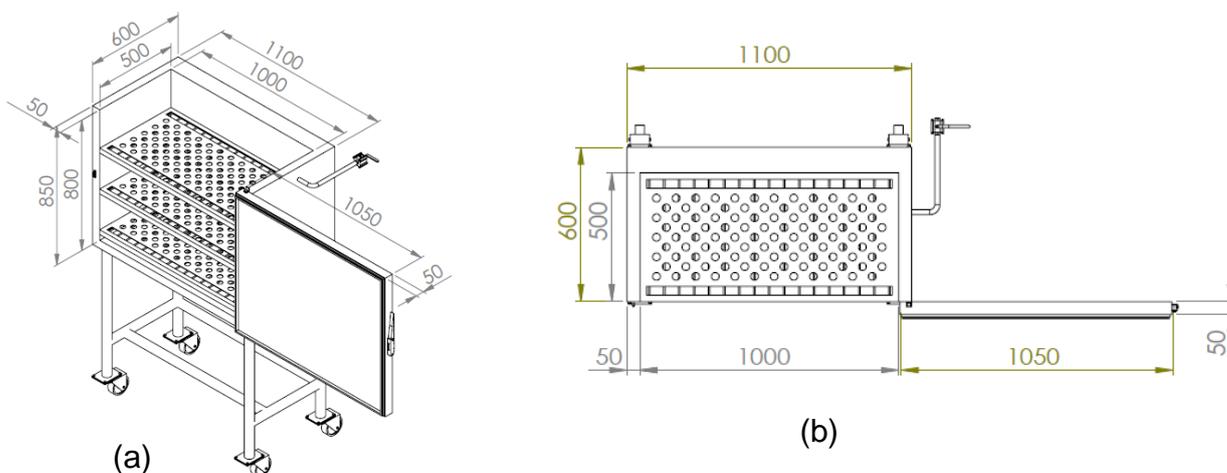


Figura 32: Perspectivas da câmara de carbonatação: (a) corte isométrico; (b) corte superior - Fonte: Autor (2015).

Conforme demonstrado na Figura 32a, a câmara de carbonatação acelerada foi projetada com 3 prateleiras com dimensões de 998mm de largura x 498mm de profundidade, sua superfície vazada com placas perfuradas com diâmetro de 30mm como demonstram as Figuras 33a e 33b, para facilitar a ventilação no seu interior.

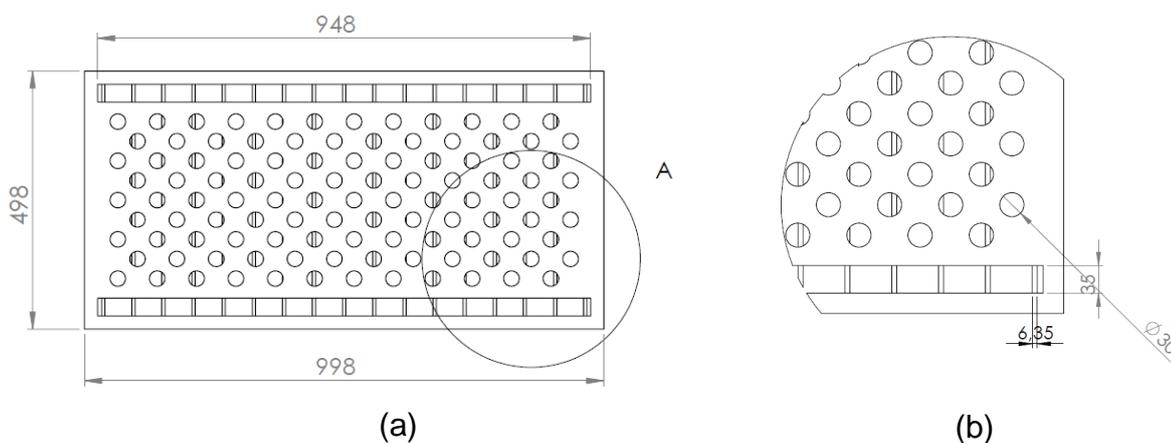


Figura 33: Prateleira: (a) vista em planta; (b) detalhe da placa perfurada - Fonte: Autor (2015).

A diferença de 2mm com relação as dimensões internas da câmara de carbonatação, se faz necessário para promover o ajuste deslizante atribuídas à sua funcionalidade, ou seja, as prateleiras dispõem de um espaço de 1mm para cada face e permite sua retirada total do interior da câmara de carbonatação. A Figura 34 demonstra uma perspectiva isométrica da prateleira.

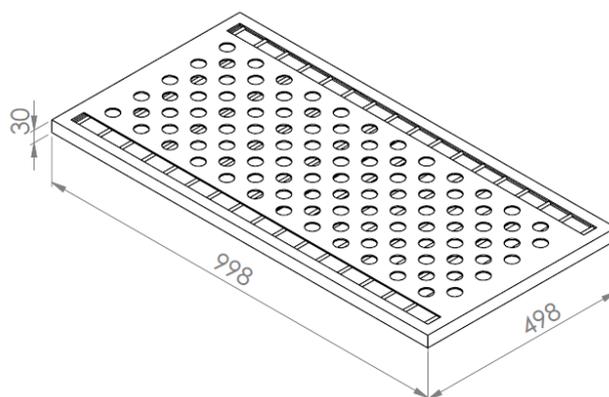


Figura 34: Perspectiva isométrica - Fonte: Autor (2015).

Cada prateleira foi projetada para comportar 18 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 100mm x 200mm separados entre si, assim como das faces das paredes internas da câmara de carbonatação por 50mm, conforme demonstra a Figura 35 para facilitar a ventilação para cada prateleira. No total a câmara de carbonatação comportará 54 (cinquenta e quatro) desses corpos de prova.

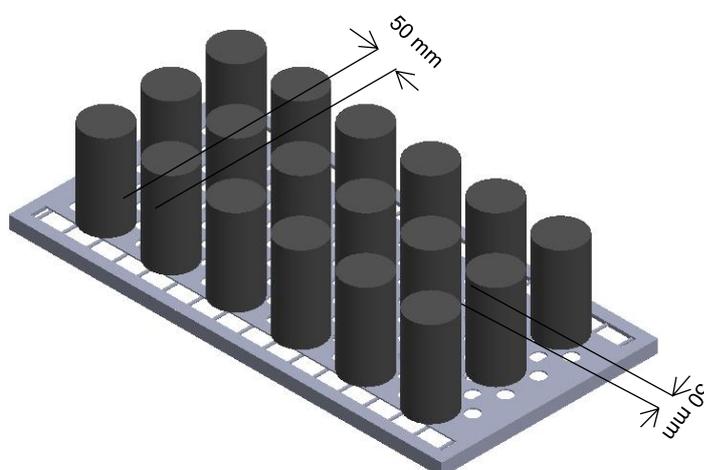


Figura 35: Ilustração contendo 18 corpos de provas separados entre si por 50mm -
Fonte: Autor (2015).

A Figura 36 demonstra uma ilustração das prateleiras repletas de corpos de provas no interior da câmara de carbonatação.

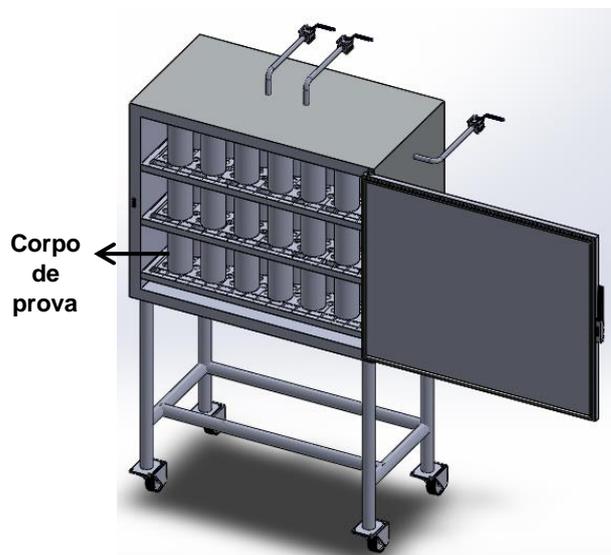


Figura 36: Ilustração contendo a câmara de carbonatação repleta de corpos de prova - Fonte: Autor (2015).

4.1.2 Dispositivos de entrada e saída de gases (CO₂ e ar).

O projeto da câmara de carbonatação dispõe de 4 dispositivos de entrada e saída de gases (CO₂ e ar). A entrada de CO₂ se localiza no centro geométrico da câmara de carbonatação sendo ladeada na sua margem esquerda mais precisamente a 200mm pelo dispositivo de entrada de ar como demonstra a Figura 37.

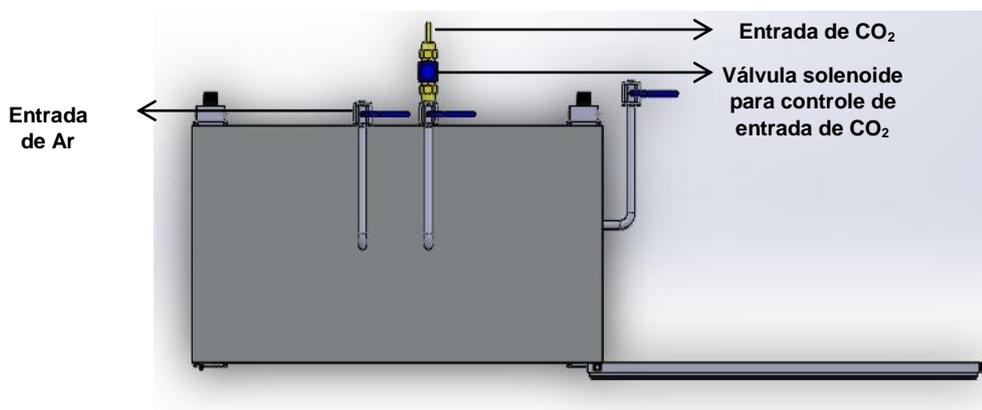


Figura 37: Ilustração dos dispositivos de entrada de CO₂ e ar - Fonte: Autor (2015).

A sua lateral direita dispõe de 2 saídas de gases destinadas ao CO₂ e ar como demonstra a Figura 38. As saídas estão foram projetadas na região mediana da dimensão profundidade, sendo a saída de ar disposta na parte superior e a saída de CO₂ disposta na parte inferior da câmara de carbonatação em função do seu peso ser superior ao ar, assim a localização facilitará a dispersão do CO₂ caso seja necessário.

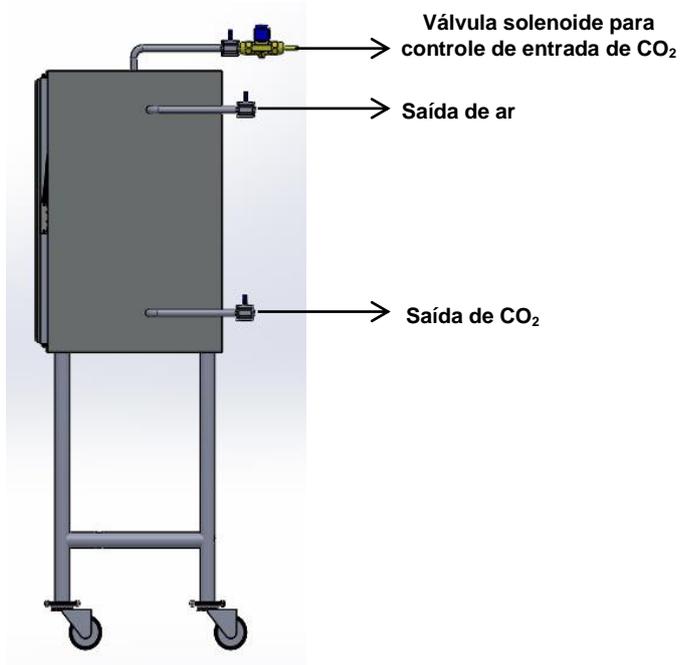


Figura 38: Ilustração dos dispositivos de saída de CO₂ e ar - Fonte: Autor (2015).

Todas as entradas e saídas de gases (CO₂ e ar) da câmara de carbonatação são dotadas de válvulas do tipo esféricas conforme demonstra a Figura 39, com fechamento e/ou abertura através de ¼ de giro.

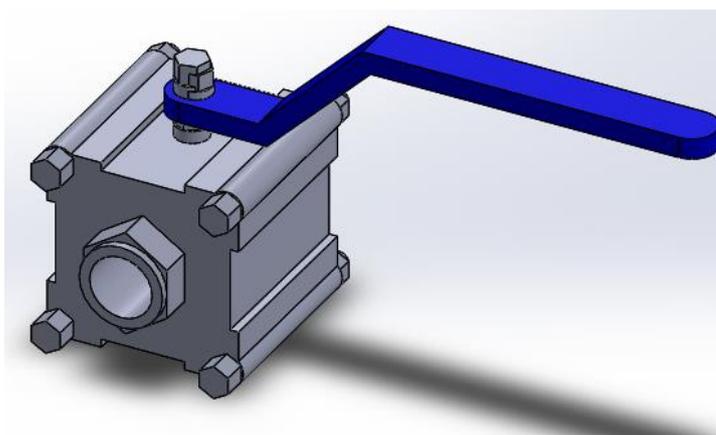


Figura 39: Ilustração da válvula tipo esférica - Fonte: Autor (2015).

As válvulas esféricas foram projetadas para serem instaladas aos dispositivos de entrada e/ou saída de gases (CO_2 e ar), através de roscas confeccionadas conforme a bitola 0,16mm presente nas válvulas comerciais. A Figura 40 demonstra a localização da instalação.

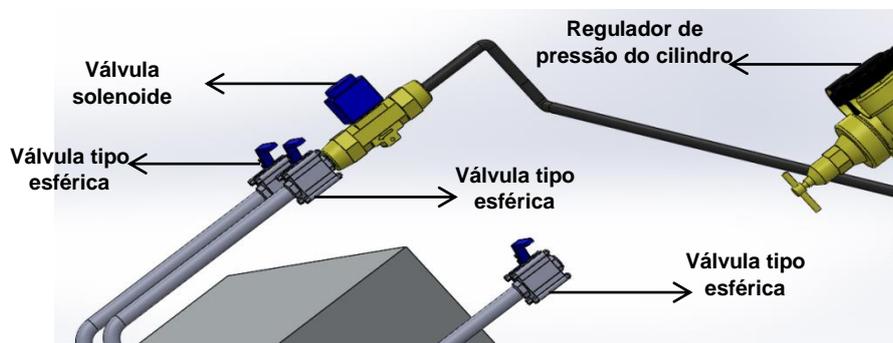


Figura 40: Ilustração das instalações das válvulas tipo esférica e solenoide - Fonte: Autor (2015).

4.1.3 Ventilação e vedação da câmara de carbonatação acelerada.

A câmara de carbonatação foi projetada para dispor de 2 ventiladores tipo coolers de computador com o objetivo de homogeneizar o ar no interior da câmara de carbonatação. Os ventiladores foram instalados na parte inferior da câmara de carbonatação como demonstra a Figura 41, com o sentido de ventilação ascendente.

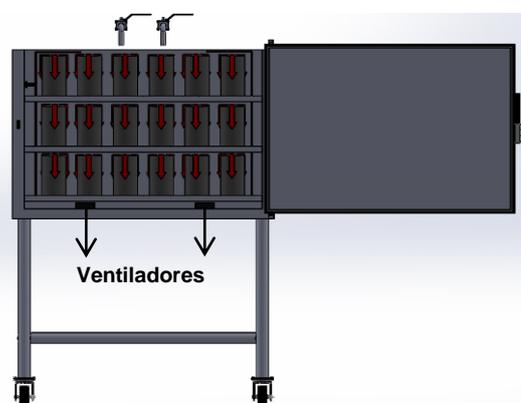


Figura 41: Ilustração da instalação dos ventiladores - Fonte: Autor (2015).

A Figura 42 demonstra a ilustração em corte superior, do ar sendo dispersado em fluxo ascendente no interior da câmara de carbonatação.

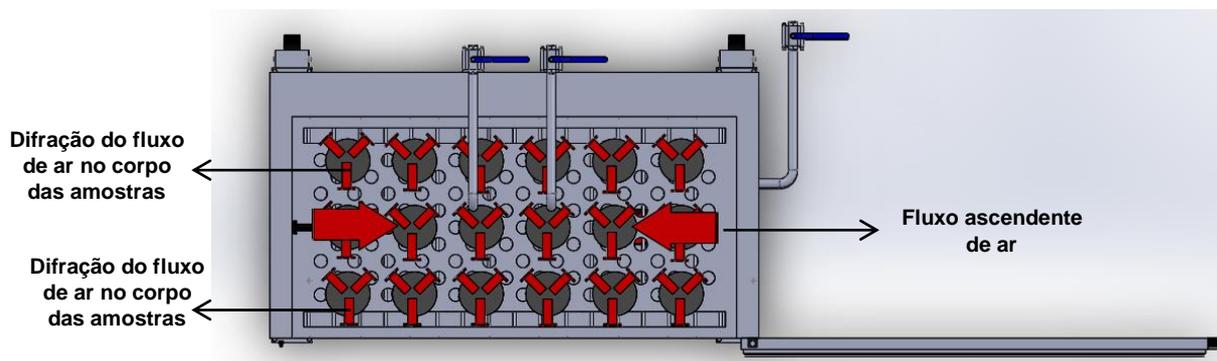


Figura 42: Ilustração em corte superior do fluxo ascendente e difração de ar no interior da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

Por fim o projeto dispõe de uma vedação através de uma borracha de silicone, como demonstra a Figura 43, circundando todo o perímetro da porta da câmara de carbonatação, bem como uma tranca auto ajustável a qual promove uma pressão adequada à borracha.

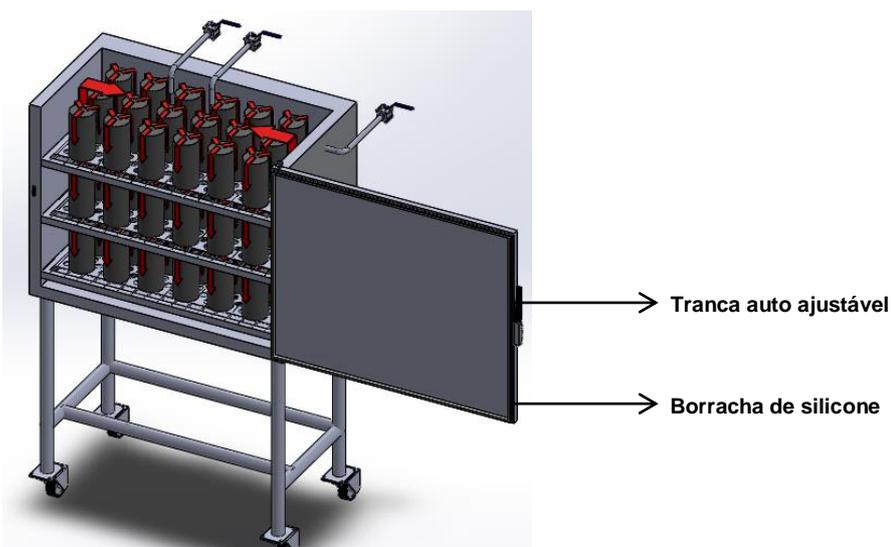


Figura 43: Ilustração borracha de vedação e tranca da porta da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

A Figura 44 demonstra a ilustração final do projeto da câmara de carbonatação em uma perspectiva tridimensional, o qual permite visualizar de forma clara, simples e objetiva todos os detalhes necessários à sua fabricação.

A Câmara de carbonatação foi projetada para funcionar com um cilindro padrão de CO₂ com capacidade de 33 kg, juntamente com uma bancada para apoio, como demonstra a Figura 46.

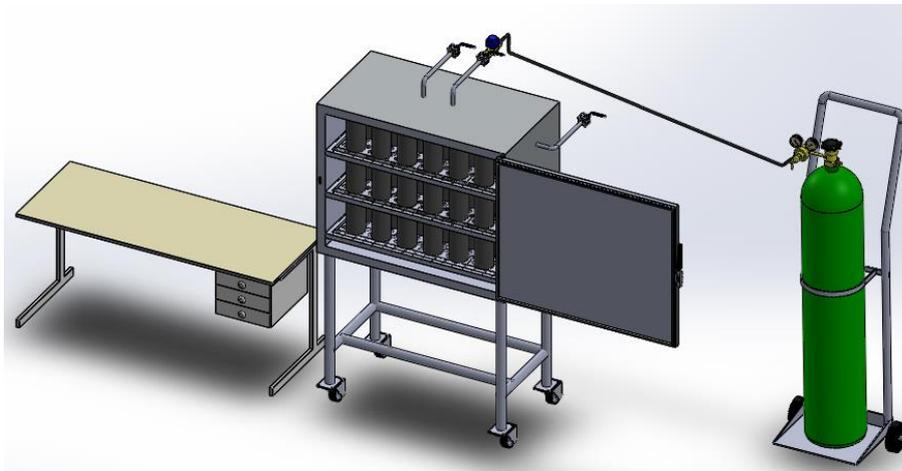


Figura 46: Ilustração da ligação do cilindro de CO₂ e bancada de apoio da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

4.2 Construção da câmara de carbonatação acelerada e materiais.

Após as marcações, cortes, dobras, ponteamientos (procedimento de marcação dos pontos soldas utilizado antes de submeter à soldagem definitiva), fresamentos e ajustes das dimensões em esquadro, realizado na oficina do laboratório de mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN, as chapas de aço inox 304 foram levadas a oficina especializada para montagem e soldagem da estrutura interna da câmara de carbonatação, bem como sua base de apoio.

4.2.1 Dobramentos, soldagem e montagem da câmara de carbonatação.

As chapas de aço inox 304 foram dobradas o máximo possível. O processo de dobramento consiste em evitar cortes desnecessários para posterior soldagem, ou seja, quanto mais dobras a chapa apresentar menor será a quantidade de soldas aplicadas, haja vista a chapa utilizada no revestimento interno ter sua espessura em 3mm. O calor prolongado, provocado pela fusão da solda é capaz de danificar a

chapa de aço inox 304, ao ponto de torná-la inutilizável para o projeto. Portanto, a decisão de utilizar o maior número de dobras possíveis, tornou a chapa de aço inox 304, viável com relação ao custo benefício para a pesquisa, haja vista a chapa de aço inox 304 ser a mais barata comercialmente em nossa região.

A Figura 47 demonstra as primeiras dobras na chapa de aço inox, bem como as marcações para deixar o gabinete da câmara em esquadro.



Figura 47: Ilustração das dobras e marcações do gabinete da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

Após os dobramentos, e colocação da estrutura do gabinete no esquadro, iniciou-se o procedimento de ponteamento. O procedimento de ponteamento consiste em aplicar pequenas quantidades de soldas denominadas de pontos, ao longo da estrutura, com o objetivo de garantir estabilidade à montagem antes de iniciar o procedimento final de soldagem. O ponteamento garante uma soldagem rápida e objetiva, haja vista o mecânico já visualizar a estrutura final da montagem, e com isso submeter o aço ao calor provocado pelo processo de soldagem, um curto espaço de tempo de tempo suficiente para não danificar a chapa de aço. A Figura 48 demonstra todo o gabinete dobrado, preso em esquadro e início do processo de ponteamento.



Figura 48: Ilustração das dobras e marcações do gabinete da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

Ao final desse procedimento o gabinete interno da câmara de carbonatação ficou pronto para receber a porta, a estrutura de apoio que a sustenta e o invólucro externo, destinado a criar o espaço para ser aplicado o revestimento térmico. A Figura 49 mostra o gabinete interno totalmente soldado e com as dobras à espera de receber o invólucro externo.

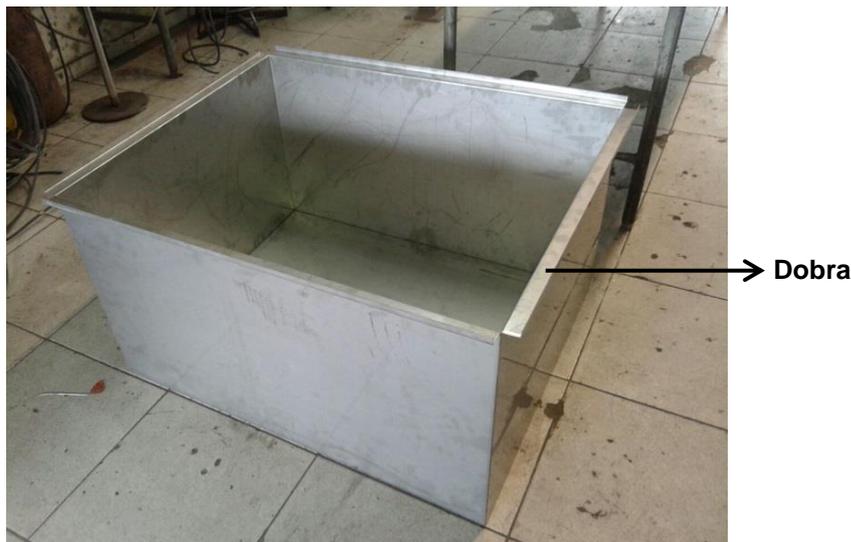


Figura 49: Ilustração do gabinete interno da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

Após a finalização do gabinete interno da câmara de carbonatação, o próximo passo foi instalar provisoriamente a estrutura de base para sustentação da câmara de carbonatação como demonstra a Figura 50. A instalação dessa estrutura neste momento foi provisória, pelo fato de no momento da realização da instalação do invólucro, assim como do revestimento térmico, tal estrutura precisar ser removida.



Figura 50: Ilustração da instalação da estrutura de base da câmara de carbonatação
- Fonte: Autor (2015).

A Figura 51 mostra o invólucro que foi instalado sobre o gabinete interno da câmara de carbonatação, deixando-a pronta para receber o revestimento térmico.



Figura 51: Ilustração do invólucro da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

4.2.2 Revestimento térmico.

Após a construção do gabinete interno, do invólucro e da base de apoio a câmara de carbonatação foi levada a uma oficina especializada em climatização onde foi realizado o revestimento térmico, com espuma líquida expansiva de poliuretano. Após a instalação do invólucro no gabinete interno da câmara de carbonatação, foi criado um suporte de ancoragem em madeira do tipo chapa compensada de 30mm de espessura, apoiadas em traves de madeira maciça, travadas com parafusos, tanto na parte interna do gabinete como demonstra a Figura 52a, quanto na parte externa junto ao invólucro da câmara de carbonatação como demonstra a Figura 52b.

Tal procedimento é de suma importância para garantir que as chapas do gabinete interno, assim como as chapas do invólucro, não sofram quaisquer danos em função da pressão exercida pela expansão da espuma líquida expansiva de poliuretano.



Figura 52: Ancoragem para suporte de pressão: (a) ancoragem do gabinete interno; (b) ancoragem do invólucro - Fonte: Autor (2015).

Após a retirada das chapas e traves que promovem a ancoragem do gabinete final da câmara de carbonatação, a espuma expansiva, neste caso, já sólida, é retirado seus excessos através de uma serra de corte e um estilete, conforme demonstra a Figura 53, e por fim sua regularização é realizada com uma lixa nº 1.200, com o objetivo de nivelar a superfície, da face que recebeu a última chapa de inox 304.



Figura 53: Retirada de excessos da espuma expansiva sólida - Fonte: Autor (2015).

Finalizada esta etapa, a estrutura da base de apoio foi instalada de forma definitiva, assim como as dobradiças, fabricadas no laboratório de mecânica do IFRN, e a tranca da porta.

4.2.3 Tubulação e válvulas de entrada e saída de gases (CO₂ e ar)

No interior do laboratório de segurança do trabalho do IFRN, foram instaladas as tubulações para entrada de CO₂ e ar como demonstra a Figura 54 e saída de CO₂ e ar como demonstra a Figura 55.



Figura 54: Entrada de CO₂ e ar - Fonte: Autor (2015).

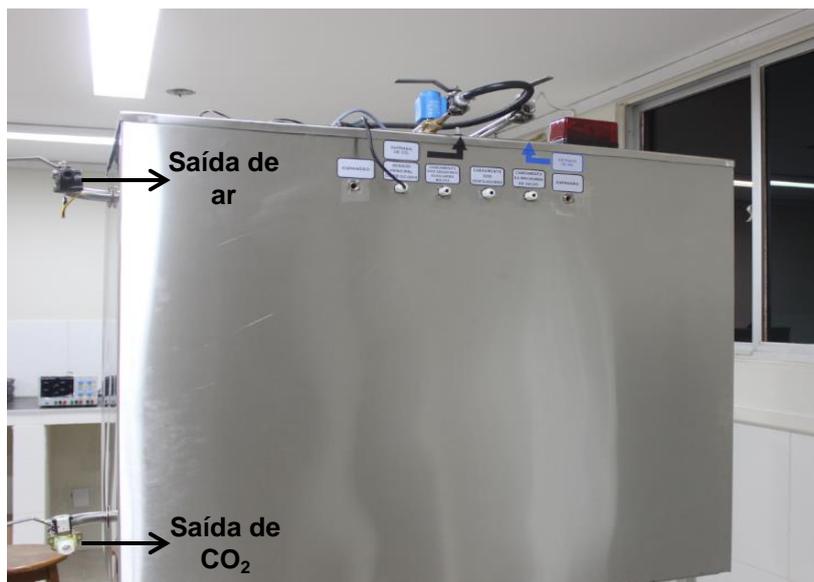


Figura 55: Saída de CO₂ e ar - Fonte: Autor (2015).

Todas as tubulações onde foram instaladas as válvulas para entrada e/ou saída de gases (CO₂ e ar) foram fabricadas em curva, conforme demonstra as Figuras 56a e 56b, isto para causar o mínimo de perda de carga possível, em função do fluxo de CO₂, que é liberado de um cilindro pressurizado. Quanto mais perda de carga no fluxo do CO₂ como conexões de engate, luvas, curvas 90°, maior a probabilidade do CO₂ congelar, em função da velocidade de expansão.



Figura 56: Tubulações em curva: (a) Curvatura da tubulação de entrada de CO₂ e ar; (b) Curvatura da tubulação de saída de ar - Fonte: Autor (2015).

Nos terminais das tubulações de entrada e/ou saída de gases (CO_2 e ar), foram conectadas válvulas do tipo esféricas como demonstra a Figura 57, com abertura e/ou fechamento com $\frac{1}{4}$ de giro.



Figura 57: Válvula tipo esférica com $\frac{1}{4}$ de giro - Fonte: Autor (2015).

4.2.4 Dobradiças e tranca da porta

Foram confeccionadas no laboratório de mecânica do IFRN 2 (duas) dobradiças pivotantes, e instaladas na parte superior e inferior da câmara de carbonatação, como demonstra a Figura 58. As dobradiças são auto ajustáveis, ou seja, à medida que a porta é fechada, as dobradiças, deslizam seu eixo em média 2mm, para evitar o efeito guilhotina na borracha de vedação e com isso impedir que a borracha seja cortada quando no momento do fechamento da porta.



Figura 58: Dobradiças pivotantes - Fonte: Autor (2015).

A tranca instalada na câmara de carbonatação é uma tranca de ajuste regulável utilizada em forno industrial como mostra a Figura 59.



Figura 59: Tranca para forno industrial - Fonte: Autor (2015).

4.2.5 Prateleiras, vedação e ventilação.

A câmara de carbonatação dispõe de 3 prateleiras internas confeccionadas em tubos de aço inox 304 paralelos, com 6mm de espessura e revestida com chapa tipo moeda como demonstra a Figura 60, com o objetivo de garantir a estabilidade das amostras sobre elas e permitir o fluxo de ventilação no interior da câmara de carbonatação.



Figura 60: Prateleira - Fonte: Autor (2015).

A vedação da câmara de carbonatação foi feita com borracha de silicone imantada, instalada em todo o perímetro da porta como demonstra a Figura 61.

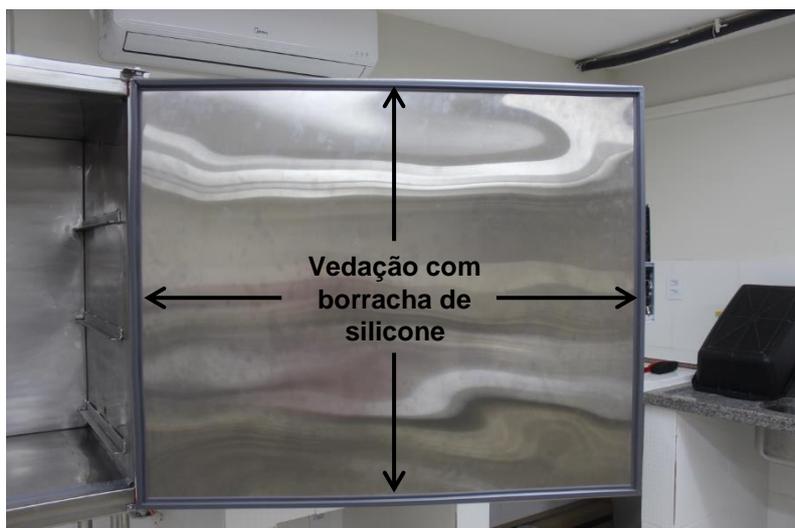


Figura 61: Vedação da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

A ventilação da câmara de carbonatação é realizada através de 2 coolers de computador conforme demonstra a Figura 62, instalados na parte inferior da câmara de carbonatação,.

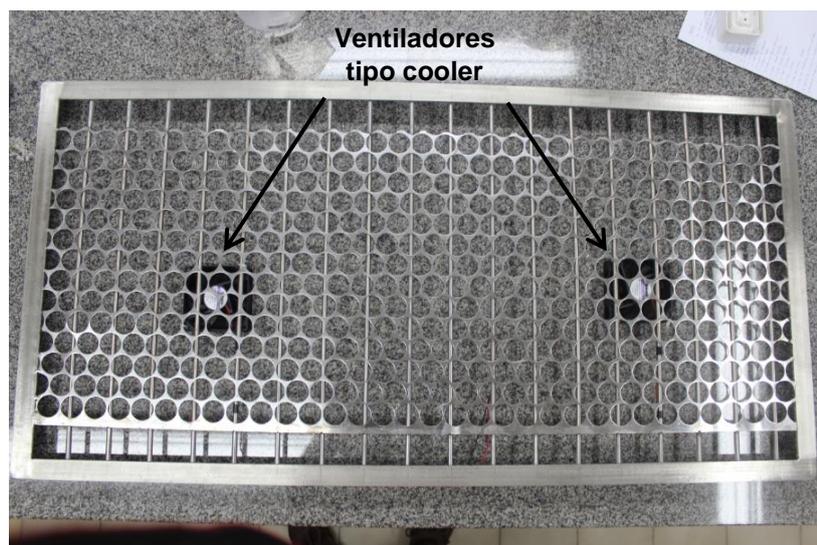


Figura 62: Ventilação da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

4.2.6 Teste de estanqueidade

A câmara de carbonatação foi levada a uma oficina especializada em projetar, fabricar e realizar ensaios em vasos sob pressão, e submetida ao teste de estanqueidade, com o intuito de detectar algum vazamento em sua estrutura.

Foi utilizado o método de ensaio por queda de pressão durante 90 minutos ininterruptos, utilizando um compressor com capacidade de 16kg/cm², instalado na válvula inferior da lateral direita da câmara de carbonatação, e avaliada com um manômetro padrão de aferição de pressão como demonstra a Figura 63. Ao final a câmara de carbonatação foi considerada estanque, sem qualquer vazamento e expedido o relatório de ensaio bem como o certificado de estanqueidade, constantes nos anexos A1 e A2 respectivamente.



Figura 63: Manômetro para aferição de pressão - Fonte: Autor (2015).

Após ser considerada estanque através do teste de estanqueidade a câmara de carbonatação foi transportada de volta ao laboratório de segurança do trabalho do IFRN, onde foi preparada para instalação da elétrica, eletrônica e transmissão de dados.

4.2.7 Apresentação final e instalação da câmara de carbonatação

Por fim a construção da câmara de carbonatação procurou cumprir todos os aspectos de projeto, quer sejam físicos ou eletrônicos como se seguem.

A Figura 64 mostra a vista frontal da câmara de carbonatação.



Figura 64: Vista frontal da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

A Figura 65 mostra a vista lateral direita com as válvulas de saída de CO₂ e ar.



Figura 65: Vista lateral direita da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

A Figura 66 mostra a vista lateral esquerda.



Figura 66: Vista lateral esquerda da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015)

A Figura 67 mostra a vista traseira com a identificação da elétrica, eletrônica e transmissão de dados, bem como a vista frontal das válvulas de entrada e saída de gases (CO_2 e ar).



Figura 67: Vista traseira da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

A Figura 68 mostra a vista superior da câmara de carbonatação com o detalhe dos tubos e das válvulas de entrada e saída de gases (CO_2 e ar).

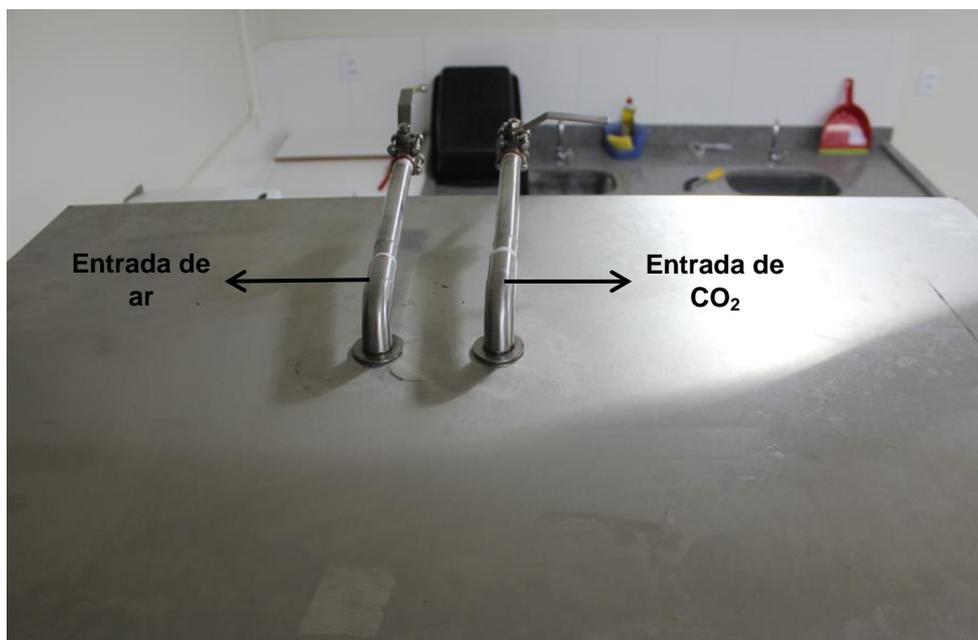


Figura 68: Vista superior da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

A Figura 69 mostra a vista da câmara de carbonatação aberta.



Figura 69: Vista da câmara de carbonatação aberta - Fonte: Autor (2015).

A Figura 70 mostra o detalhe da base de suporte juntamente com o sistema de rodízio para transporte horizontal.



Figura 70: Base de suporte e rodízios da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

4.3 Automação e micro controle de funcionamento da câmara de carbonatação.

4.3.1 O algoritmo

O algoritmo desenvolvido permite a interação com o software do sensor principal, de forma a comandar, e controlar por meio de uma interface todo o ensaio de carbonatação acelerada. A linguagem de programação utilizada para a programação foi “C++”, realizada no sistema operacional LINUX, mas que permite interação com os sistemas Windows, IOS, Andróid e Google.

4.3.2 Interface com o programa de micro controle de funcionamento da câmara de carbonatação.

O algoritmo permitiu interagir com o software do sensor principal em diversos aspectos relacionados ao controle da concentração de CO₂ e temperatura. A Figura 71 mostra a tela de controle do sensor principal e suas diversas seções de atuação.

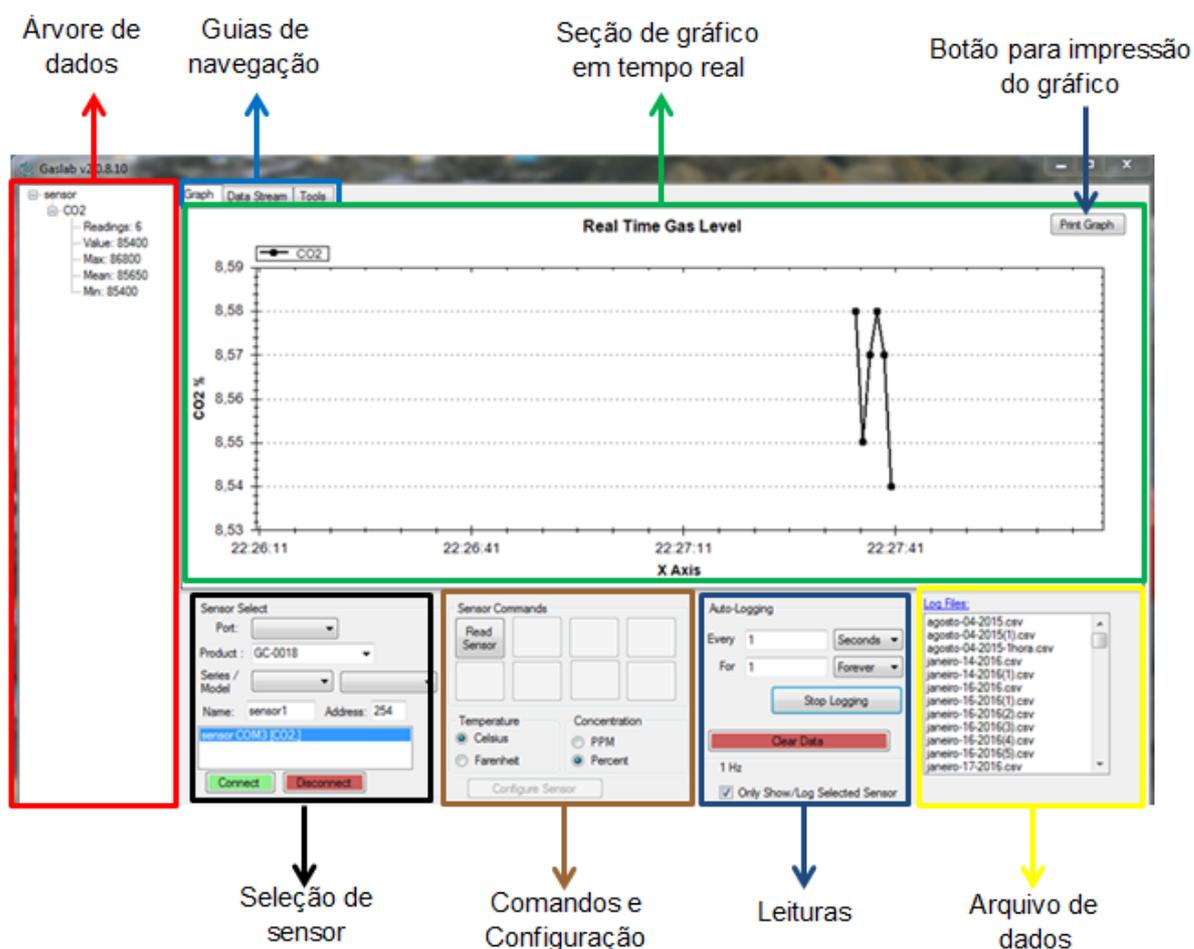


Figura 71: Tela do software do sensor principal: Gaslab Versão V2.0.8.10 - Fonte: CO2 Meter, Inc. (2015).

O algoritmo desenvolvido interage, comanda e controla cada seção apresentada no software do sensor principal de modo que a pesquisa possa ser o tempo todo monitorada.

A seção árvore de dados apresenta a variável que se encontra em avaliação, o número de leituras, o valor instantâneo da leitura, o valor de pico máximo, a média das leituras e o valor mínimo da leitura, conforme demonstra a Figura 72.

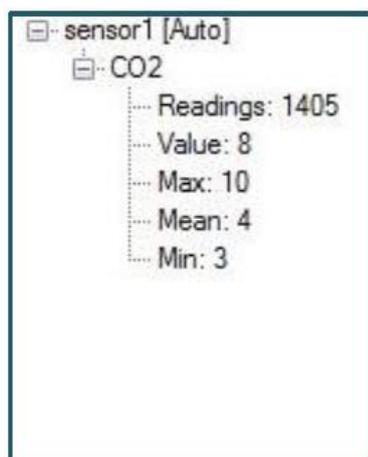


Figura 72: Apresentação da árvore de dados: Gaslab Versão V2.0.8.10 - Fonte: CO2 Meter, Inc. (2015).

A seção seguinte possibilita a inclusão de outros sensores com a mesma linguagem de programação criada para o Gaslab (software do sensor principal). Ao conectar outro sensor, se sua programação for compatível com a linguagem de programação do software, o reconhecimento é automático, e sua instalação fica disponibilizada na seção de seleção como demonstra a Figura 73.

Figura 73: Apresentação da seção de seleção de sensor: Gaslab Versão V2.0.8.10 - Fonte: CO2 Meter, Inc. (2015).

O software do sensor dispõe de uma seção de comandos que permite escolher qual unidade de leitura para a variável de mensuração conforme demonstra a Figura 74.

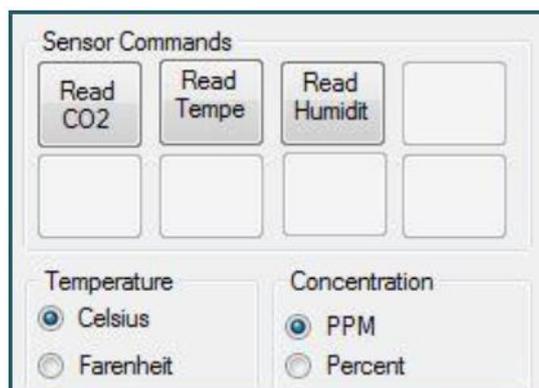


Figura 74: Apresentação da seção de comandos do sensor: Gaslab Versão V2.0.8.10 - Fonte: CO2 Meter, Inc. (2015).

A próxima seção permite controlar o intervalo de leitura em um prazo de tempo determinado, ou indeterminado, ou seja, as leituras podem ser avaliadas segundo a segundo a cada hora ou indeterminado por exemplo. A Figura 75 ilustra as faixas de intervalo de tempo.

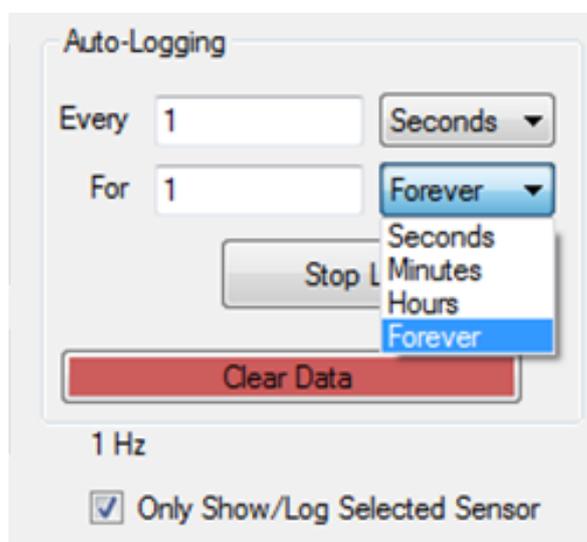


Figura 75: Apresentação da seção de leituras do sensor: Gaslab Versão V2.0.8.10 - Fonte: CO2 Meter, Inc. (2015).

A seção de arquivo de dados gera um arquivo com extensão “.csv”, o qual pode facilmente ser lido por uma planilha excel. Os arquivos são armazenados na memória do computador por dia, mês e ano da leitura e permite o acesso a qualquer momento. A Figura 76 demonstra a seção de arquivo de dados.

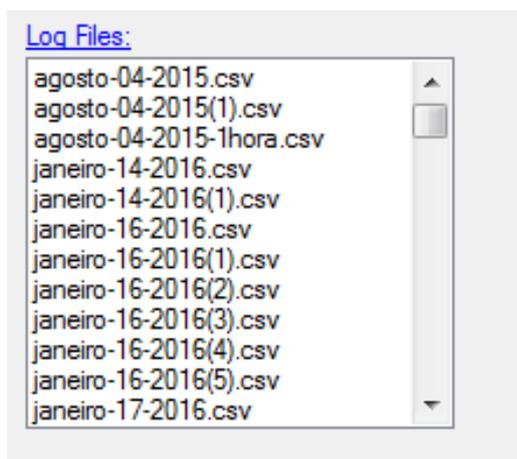


Figura 76: Apresentação de arquivo de dados do sensor: Gaslab Versão V2.0.8.10 -
Fonte: CO2 Meter, Inc. (2015).

Por fim a seção das guias de transmissão de dados permite a conexão do software por meio do algoritmo à rede de internet, o qual permite que a recepção desses dados possa ser em computadores, ou qualquer dispositivo móvel como tablets, e celulares. Para esta pesquisa o algoritmo desenvolvido, interage com o software do sensor principal de modo a tornar possível a criação de um aplicativo capaz de comandar todo o controle da câmara de carbonatação acelerada, projetada e montada em laboratório. A Figura 77 demonstra as linhas de transmissão de dados.



Figura 77: Apresentação das guias de navegação: Fonte: Autor (2015).

4.3.3 Calibração do sensor.

A calibração do sensor foi realizada em laboratório situado na cidade de Mossoró/RN, certificado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO com padrões rastreáveis internacionalmente por Scientific and Technical Gases Ltd - STG CALGAZ. Ao chegar ao laboratório, o técnico laboratorista solicitou que conectássemos o sensor ao cilindro padrão de calibração, conforme demonstra a Figura 78.



Figura 78: Conexão do sensor ao cilindro padrão de calibração: Fonte: Autor (2015).

O cilindro padrão de calibração é utilizado para calibrar sensores que avaliam 15 ppm (partes por milhão) de sulfureto de hidrogênio, 50 ppm (partes por milhão) de monóxido de carbono, 2% de dióxido de carbono, 2,5% de metano e 18% de oxigênio, ou seja, o cilindro padrão contém os 5 gases citados anteriormente nestas proporções. Um segundo cilindro foi empregado contendo 100% de hidrogênio, utilizado para zerar a leitura dos sensores quando submetidos à sua exposição.

O procedimento de calibração foi realizado em 3 passos distintos. O primeiro passo consistiu em submeter o sensor à leitura do CO₂ existente no interior do cilindro, ou seja, 2%. O tempo de leitura da avaliação durou 3 (três) minutos, o sensor submetido a leitura com a concentração conhecida de 2% de CO₂ avaliou a leitura em 3,15% de CO₂, como demonstra a Figura 79, quando deveria avaliar os 2% de CO₂ que o cilindro continha, isto é, avaliou 1,5% de CO₂ acima do que realmente o cilindro continha. Tal procedimento comprovou que o sensor estava sem calibração.

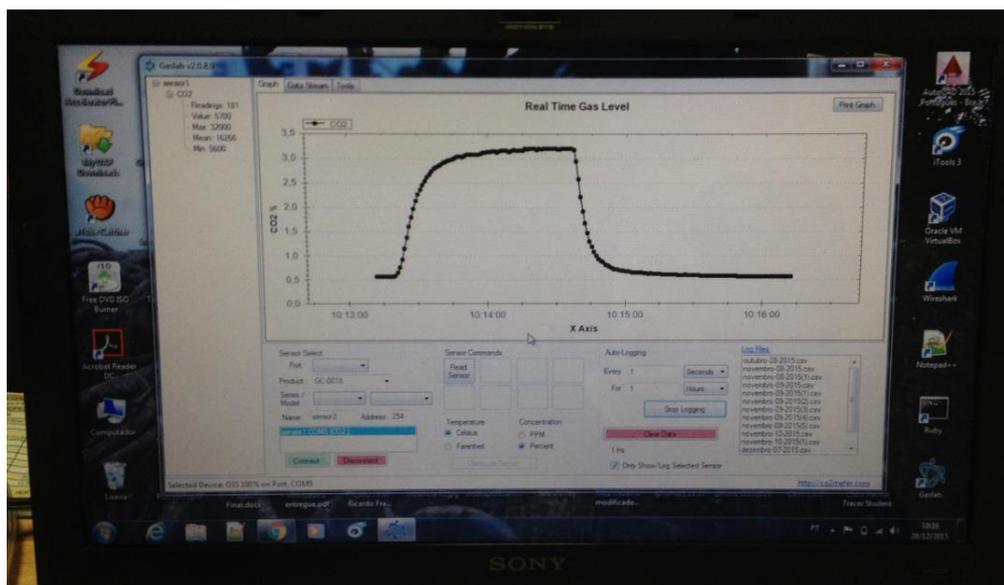


Figura 79: Avaliação de concentração do cilindro sem calibração: Fonte: Autor (2015).

O segundo passo consistiu em conectar o sensor ao cilindro de nitrogênio conforme demonstra a Figura 80 e realizou nova avaliação. Neste momento o sensor realizou a leitura de 0% de CO_2 como demonstra a Figura 81. Neste momento foi acessado as configurações do sensor e digitado o valor 0 (zero) como demonstra a Figura 82.



Figura 80: Conexão do sensor ao cilindro de nitrogênio: Fonte: Autor (2015).

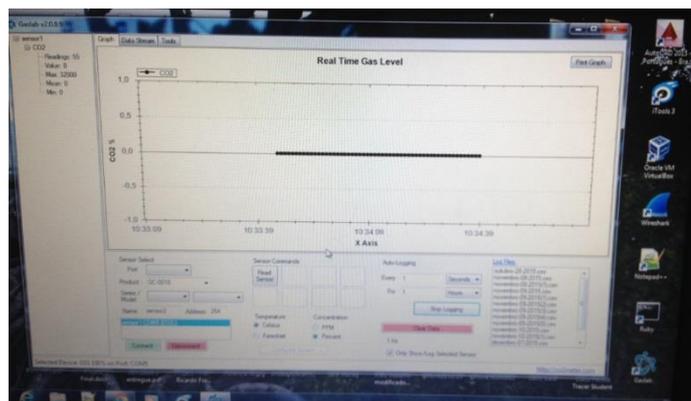


Figura 81: Resultado da avaliação do cilindro de nitrogênio Fonte: Autor (2015).

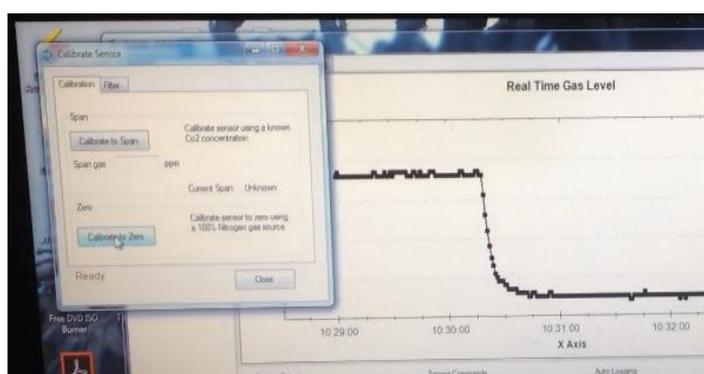


Figura 82: calibração 0 (zero) do sensor - Fonte: Autor (2015).

O terceiro e último passo da calibração foi novamente realizar a avaliação com a concentração padrão de CO_2 do cilindro de calibração, ou seja, 2%. Quando a leitura do sensor atingiu a estabilização de 2% de concentração, o mesmo procedimento de configuração que foi aplicado para configuração 0 (zero), foi realizado para concentração de 2%, isto é, foi digitado o valor de 2%. Portanto, terminado os 3 passos da calibração o sensor foi reconhecido como calibrado. Ao final foi emitido um certificado de calibração (anexo A3), bem como o relatório e certificado de rastreabilidade internacional (anexo A4) e procedimento do ensaio adotado. Conforme as orientações do fabricante o procedimento de calibração será realizado a cada dois anos.

4.3.4 Pré testes

O algoritmo foi submetido ao teste de funcionamento experimental com a variável temperatura e demonstrou uma excelente resposta no registro, diário, semanal e mensal da variável em questão.

O algoritmo registrou e controlou os dados da temperatura na sala da diretoria acadêmica de informática do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN, conforme a necessidade da pesquisa. As Figuras 83, 84 e 85 mostram o desempenho das avaliações de forma horária, diária, e semanal respectivamente.

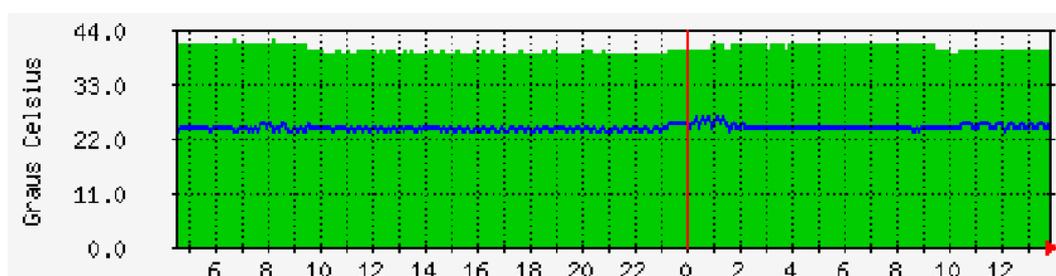


Figura 83: Gráfico de resposta ao software para registro horário de temperatura – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).

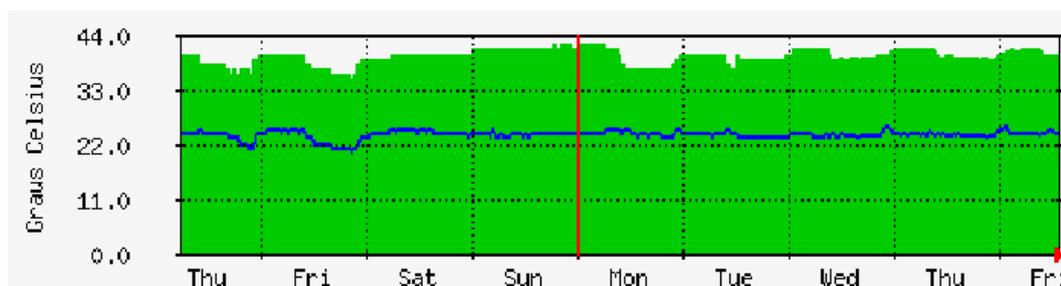


Figura 84: Gráfico de resposta ao software para o registro diário de temperatura – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).

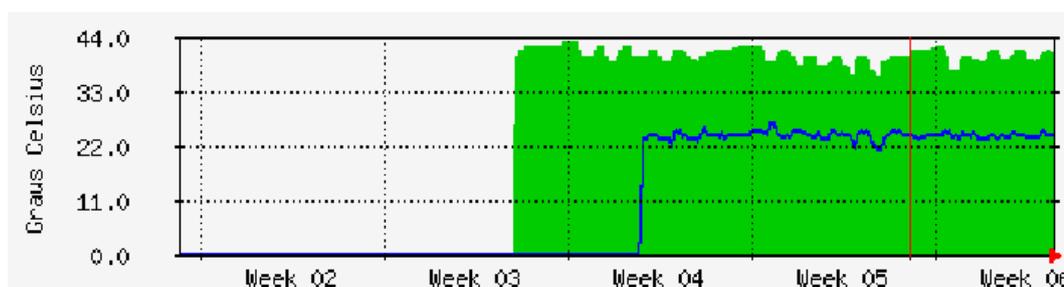


Figura 85: Gráfico de resposta ao software para registro semanal de temperatura – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).

Após a certeza de que o algoritmo apresentou uma excelente resposta a uma variável mensurável, bem como a calibração do sensor ter sido realizada em uma escala reduzida, antes da instalação na câmara de carbonatação, o primeiro teste real com a utilização de CO₂ e funcionamento através do algoritmo foi realizado em laboratório. Na ocasião foi utilizada uma caixa de isopor conforme discriminado no Anexo A5.

O teste permitiu adquirir confiança para realizar a instalação definitiva no interior da câmara de carbonatação, já finalizada. O próximo passo foi realizar a instalação dos sensores, minibomba, filtros e ventilação na câmara.

Mesmo após a instalação foram realizados 4 testes de forma manual, com objetivo de avaliar o desempenho dos sensores, bem como a estanqueidade da câmara de carbonatação. Os testes foram realizados durante 24 horas para as concentrações de 5%, 10%, 20% e 50% de CO₂.

A Figura 86 demonstra o desempenho dos sensores, bem como a estanqueidade da câmara de carbonatação para a concentração de 5% de CO₂.

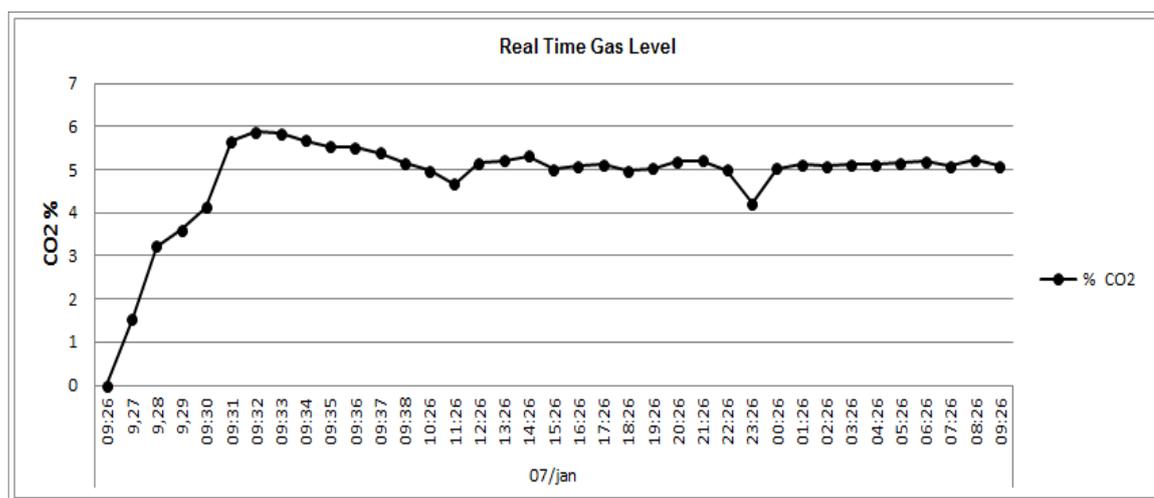


Figura 86: Gráfico do histórico de leitura para 24 horas a 5% de concentração de CO₂ – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).

Para esse teste foi percebido que o tempo de estabilização da concentração foi de 12 minutos. A partir daí a leitura permaneceu estável até a hora 23h23min, onde houve uma diferença de 0,71% da leitura. Tal diferença não foi atribuída a vazamento da câmara, haja vista a hora seguinte à concentração ter estabilizado e

permanecido até o final do teste. Para a concentração de 5% de CO₂ o teste foi considerado satisfatório.

Em seguida a câmara de carbonatação foi preparada e submetida ao teste de concentração para 10% de CO₂ durante as próximas 24 e quatro horas. Para esse teste o tempo de estabilização foi de 9 minutos. Isso se deveu a velocidade com que foi injetado o CO₂ no interior da câmara de carbonatação. Quando o sensor avaliou 10% de concentração de CO₂ a injeção foi parada rapidamente, porém o CO₂ presente na mangueira foi introduzido no interior da câmara de carbonatação o que explica o pico de 14,66% de CO₂ nos primeiros 9 minutos. A Figura 87 demonstra o histórico deste teste.

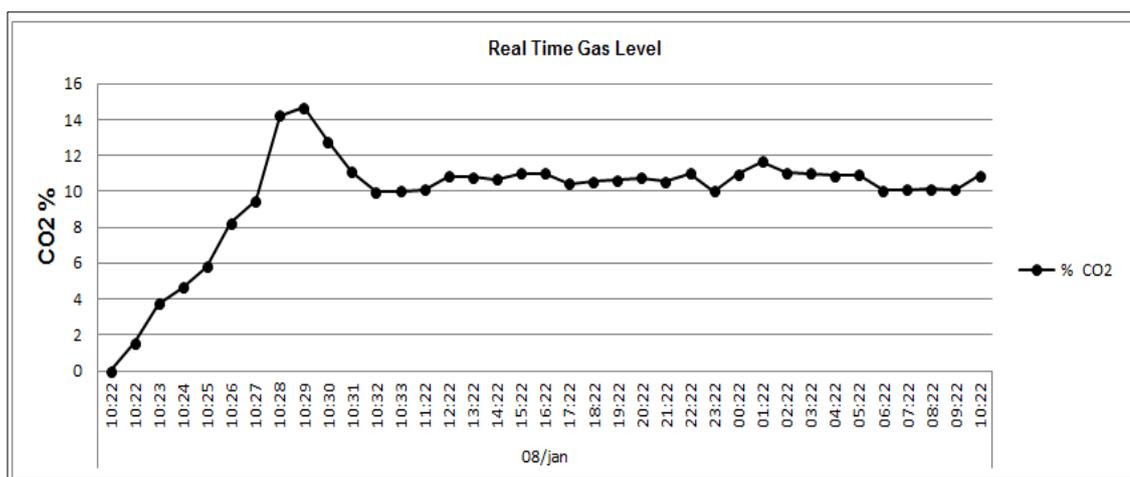


Figura 87: Gráfico do histórico de leitura para 24 horas a 10% de concentração de CO₂ – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).

As variações após a estabilização da concentração foram consideradas normais, assim como o teste para a concentração de 10% de CO₂ foi considerado um sucesso. Também se percebe que durante as 24h a câmara de carbonatação permaneceu estanque.

O teste seguinte foi a concentração de 20% de CO₂. O tempo de estabilização foi de 10 minutos. Após a estabilização o teste se mostrou bem constante com relação à concentração de CO₂ como mostra a Figura 88. Assim como os testes anteriores, este também foi considerado satisfatório e a câmara de carbonatação estanque.

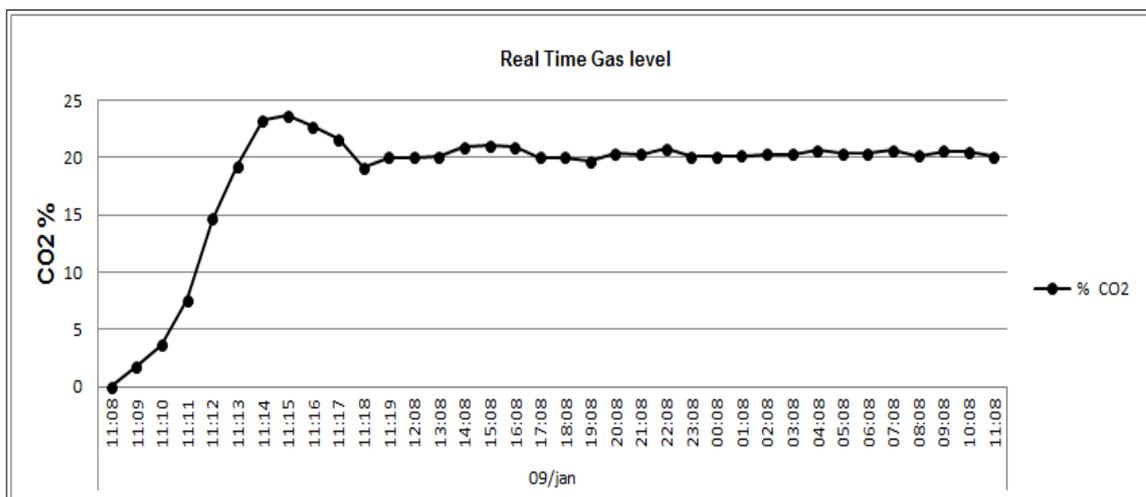


Figura 88: Gráfico do histórico de leitura para 24 horas a 20% de concentração de CO₂ – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).

Por fim o teste final foi submeter a câmara de carbonatação, assim como os dispositivos avaliadores de CO₂ ao teste de concentração de 50% de CO₂. A estabilização demorou 11 minutos, porém a partir desse momento a concentração foi bem constante ao longo das 24 horas, como demonstra a Figura 89.

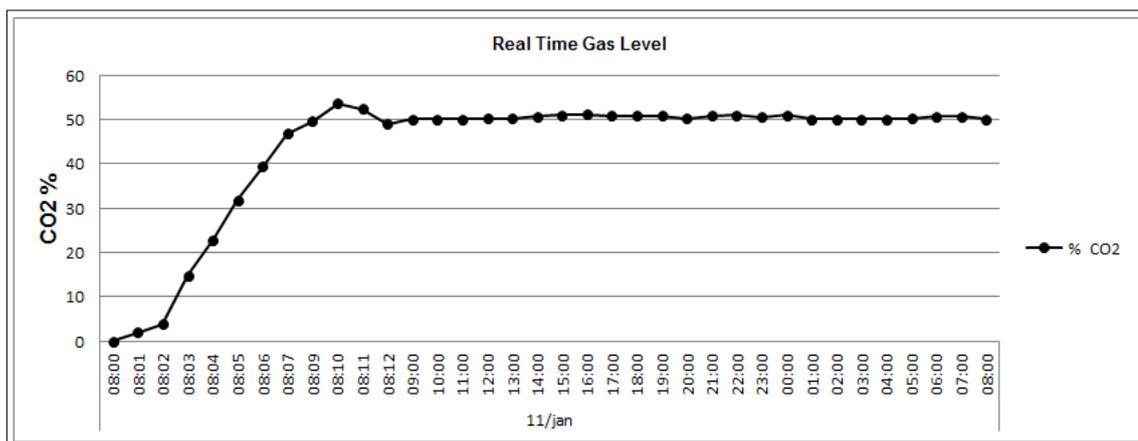


Figura 89: Gráfico do histórico de leitura para 24 horas a 50% de concentração de CO₂ – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).

Realizado os testes iniciais de concentração de CO₂ e estanqueidade, na câmara de carbonatação, conforme discutido anteriormente, o próximo passo foi testar o processo de funcionamento da câmara de carbonatação com os dispositivos controlados pelo algoritmo.

4.3.5 Processo de funcionamento da câmara de carbonatação acelerada comandada pelo algoritmo.

O funcionamento da câmara de carbonatação se dá inicialmente através dos sensores instalados em cada prateleira interna. Os dados de leitura dos sensores são registrados através do software do sensor principal, comandados pelo algoritmo que interagem com as respostas de leitura dos sensores e controla um sistema de válvulas do tipo solenoides. Os sensores foram instalados em cada prateleira, da seguinte forma: as prateleiras superior e inferior com sensores com faixa de avaliação de 0% a 10% funcionam como apoio ao sensor principal e são denominados de sensores auxiliares; a prateleira principal foi equipada com um sensor denominado de sensor principal por dispor de uma faixa de avaliação de 0% a 100%. A Figura 90 demonstra a posição dos sensores em cada prateleira da câmara de carbonatação.

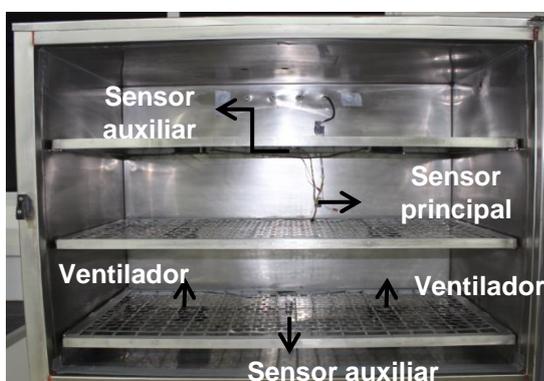


Figura 90: Disposição dos sensores nas prateleiras da câmara de carbonatação -

Fonte: Autor (2015).

Os sensores são controlados por uma placa eletrônica denominada de arduíno, como mostra a Figura 91.

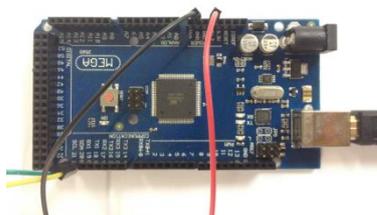


Figura 91: Arduíno - Fonte: Autor (2015).

Quando identificada uma diferença entre os sensores superior a 1%, a avaliação é parada automaticamente e uma mensagem enviada a uma pasta no google drive denominada projeto CO₂ como mostram as Figuras 92 e 93, e caso em 30 segundos não houver estabilização, todo o processo deverá ser reinicializado manualmente.

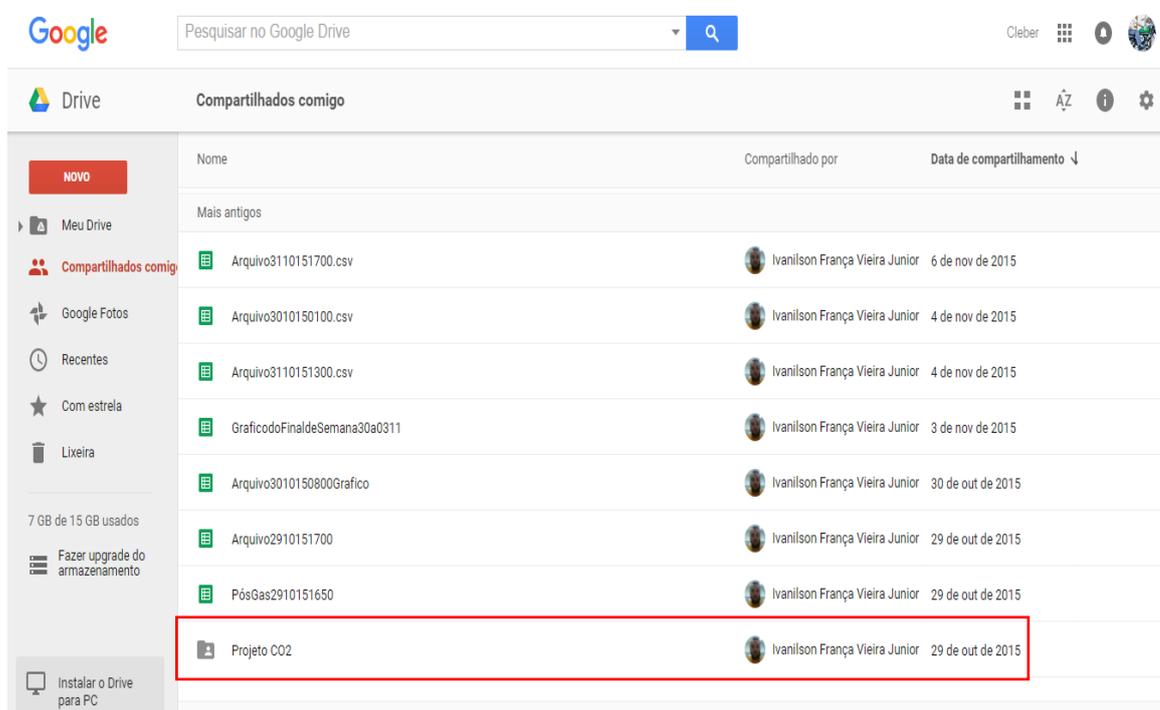


Figura 92: Pasta para recepção de dados - Fonte: Autor (2015).

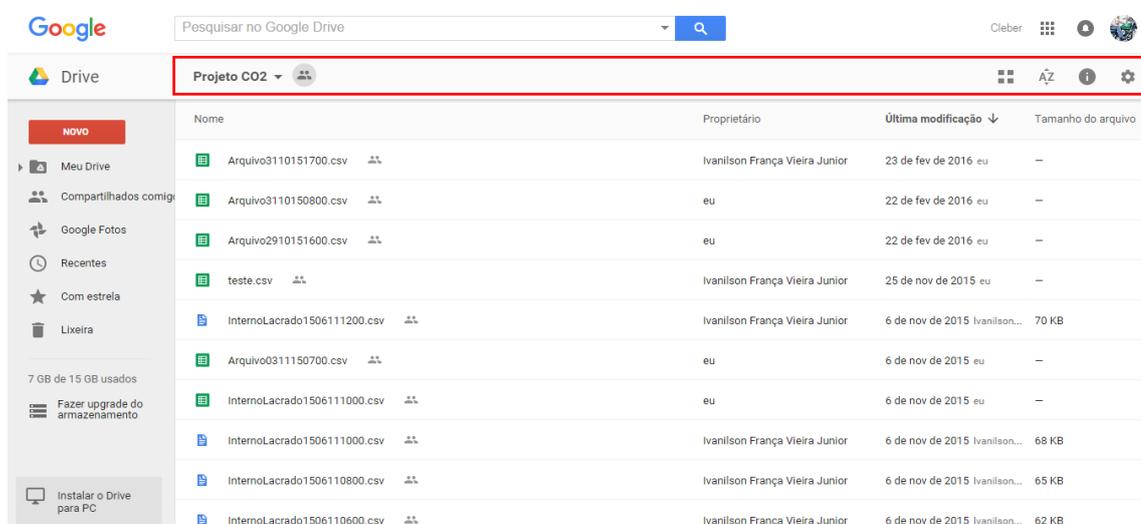


Figura 93: Dados armazenados no interior da pasta projeto CO₂ - Fonte: Autor (2015).

Com o objetivo de testar o controle de avaliação, foi realizado um teste o qual consistiu em colocar um dos sensores do lado de fora da câmara de carbonatação. Ao detectar uma diferença superior a 1% entre os sensores durante 31 segundos o arduino automaticamente enviou uma mensagem à pasta localizada no google drive, como mostra a Figura 94, o que causou um desligamento total no sistema de avaliação.

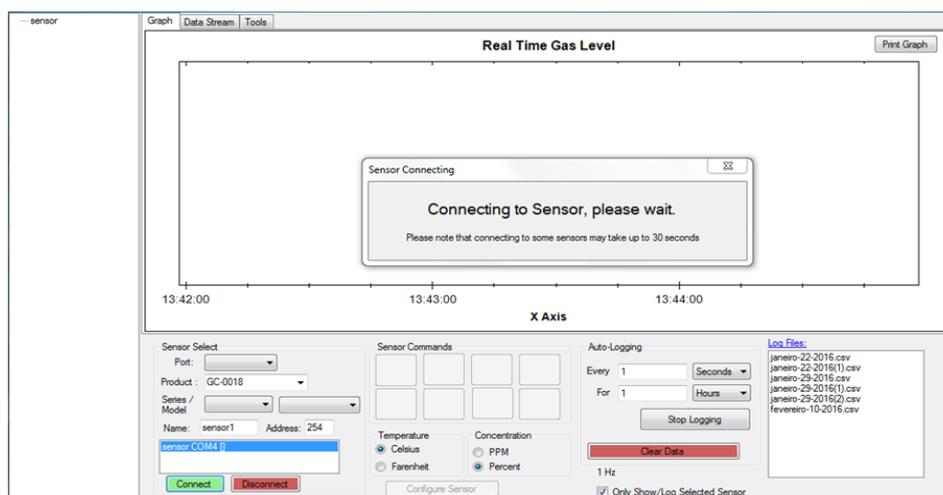


Figura 94: Mensagem enviada à pasta para verificação de concentração e CO₂ -
Fonte: Autor (2015).

A câmara de carbonatação acelerada foi equipada com solenoides, como mostra a Figura 95, responsável pelo controle de abertura que promove a entrada e/ou saída de CO₂ e ar.

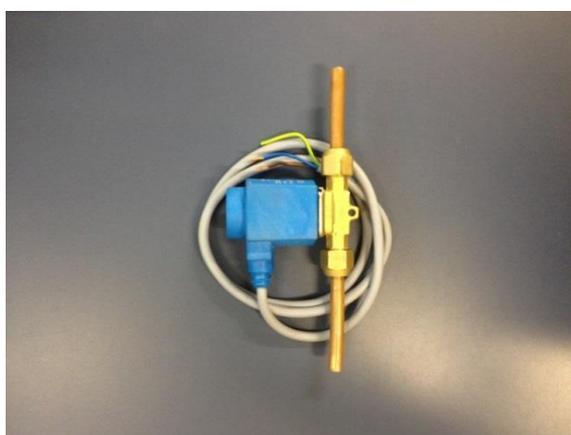


Figura 95: Tipo de solenoide utilizado para entrada e/ou saída de CO₂ e ar - Fonte:
Autor (2015).

A concentração de CO₂ definida para esta pesquisa foi de 7,5%. Durante os testes que antecederam o ensaio de carbonatação acelerada do concreto, foi realizado o teste do solenoide com o objetivo de verificar a atuação do algoritmo, bem como o comando do arduíno ao solenoide, quando o interior da câmara de carbonatação exceder a concentração de CO₂ definida.

Na ocasião foi injetado manualmente 11,45% de CO₂. Automaticamente o arduíno identificou a concentração acima do valor definido para a pesquisa, ou seja, 7,5% e comandou a injeção de ar até a concentração voltar para o valor definido para pesquisa, conforme demonstra a Figura 96.

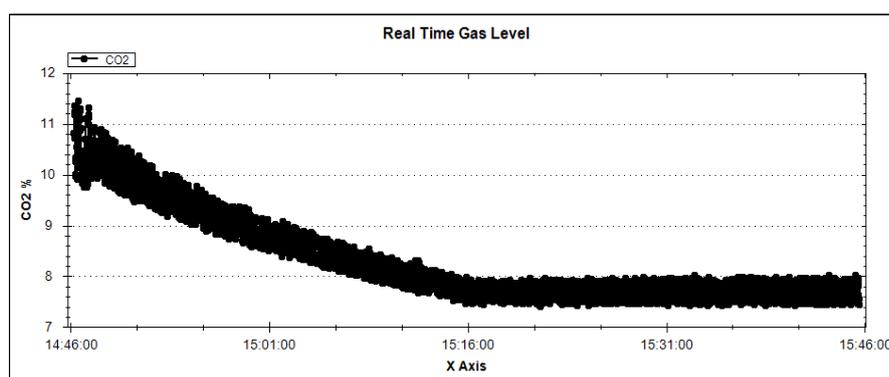


Figura 96: Gráfico da atuação do arduíno e solenoide para atuar no controle de concentração de CO₂ – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).

O teste teve duração de 1 hora, o valor máximo atingido foi de 11,45% de CO₂, o valor mínimo de 7,41% de CO₂, conforme mostra a Figura 97.

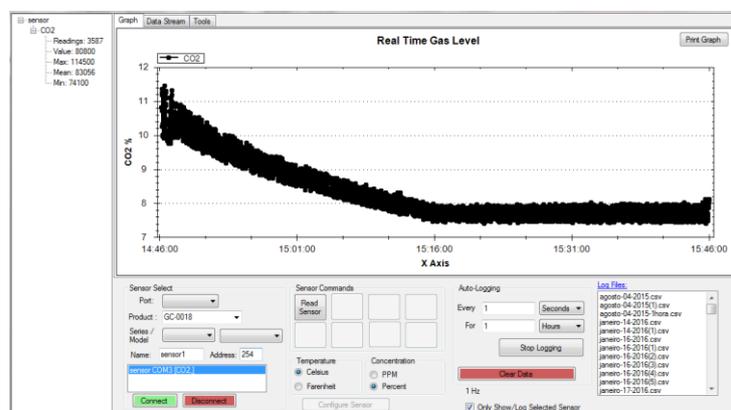


Figura 97: Tela de resposta do software com os valores de concentração de CO₂ máximo, mínimo e a média. - Fonte: Autor (2015).

A partir deste momento a concentração de CO_2 permaneceu em 7,5% o qual foi o valor utilizado para carbonatação ao concreto. O teste realizado foi considerado um sucesso e provou que o algoritmo, interage perfeitamente com o software do sensor principal, bem como comanda o arduino que por sua vez comanda o solenoide para controlar a concentração de CO_2 no interior da câmara de carbonatação.

O solenoide que controla a entrada de CO_2 foi instalado na válvula do tipo esférica presente no centro geométrico da parte superior da câmara de carbonatação como demonstra a Figura 98a e a bomba com solenoide interna que controla a entrada de ar instalada na válvula tipo esfera localizada na parte superior direita como demonstra a Figura 98b.

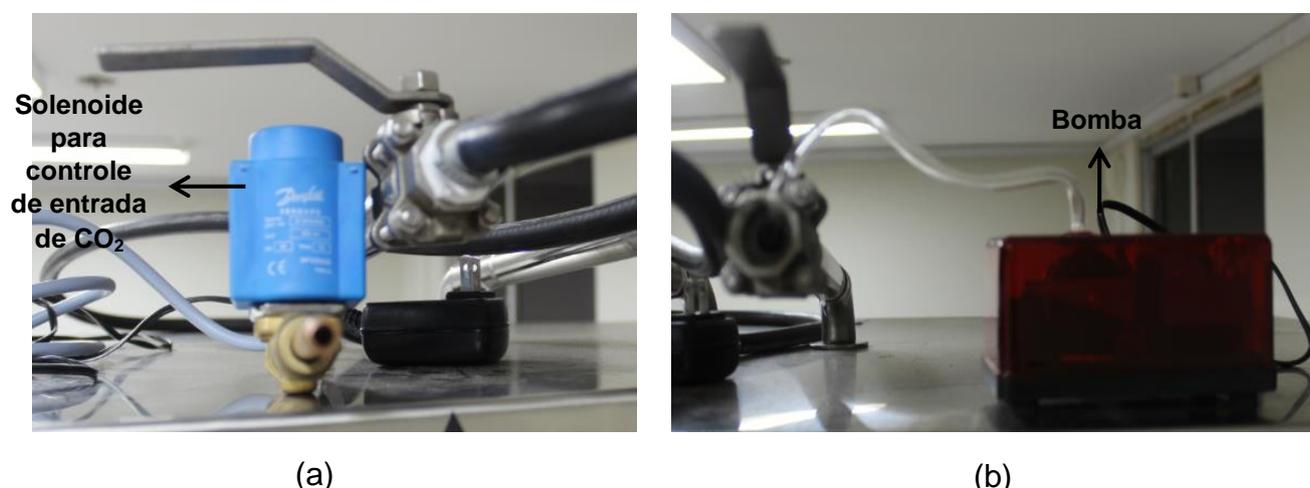


Figura 98: Solenoides: (a) solenoide de controle para CO_2 ; (b) bomba com solenoide interna para controle de ar - Fonte: Autor (2015).

4.4 Ensaios no concreto

Foi decidido utilizar para esta pesquisa um concreto convencional objeto de estudo pelo grupo de pesquisa do IFRN conforme comentado no capítulo 3, com consumo de cimento de 365kg/m^3 . Além dos ensaios de carbonatação acelerada foram realizados ensaios mecânicos, como resistência à compressão axial, absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.

4.4.1 Ensaios do concreto no estado endurecido

Os ensaios no estado endurecido se resumiram a resistência à compressão, absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, por serem ensaios capazes de caracterizar algumas propriedades físicas, e desta maneira, no futuro poder ser utilizado o mesmo traço para o concreto utilizado, bem como realizar os ensaios de reprodutibilidade a serem feitos na câmara de carbonatação.

4.4.1.1 Resistência à compressão axial.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com 1 dia e aos 7 e 28 dias. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Resistência à compressão.

Idade (dias)	Corpo de prova (100mmx200mm)	Resistência (Mpa)
1	CP 1	11,9
	CP 2	14,5
7	CP 3	30,6
	CP 4	32,3
28	CP 5	43,0
	CP 6	42,8
	CP 7	38,6

Fonte: Autor (2016)

Como o concreto já é objeto de estudo pelo grupo de pesquisa do IFRN, os resultados foram considerados satisfatórios e dentro das respostas esperadas, haja vista, o grupo dispor de vários ensaios de resistência à compressão para esse mesmo traço.

4.4.1.2 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.

A Tabela 2 apresenta os resultados para absorção de água por imersão, massa específica, e índice de vazios realizados após 28 dias de cura. Assim como

os resultados de resistência à compressão, estes servirão futuramente para os ensaios de reprodutibilidade da câmara de carbonatação em concretos de mesma composição.

Tabela 2: Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.

Ensaio	Corpo de prova (100mmx200mm)	Resultados (g/cm³)
Absorção de água por imersão	CP 1	6,16
	CP 2	6,32
	CP 3	6,01
Índice de vazios	CP 1	13,93
	CP 2	14,21
	CP 3	13,63
Massa específica	CP 1	2,26
	CP 2	2,24
	CP 3	2,26

Fonte: Autor (2016).

4.4.2 Ensaio do concreto à carbonatação acelerada.

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado durante 56 dias a uma exposição de 7,5% de concentração de CO₂ com uma variação de ± 0,5% conforme determina e especificação FINAL DRAFT FprCEN/TS 12390-12, da European Committee Standardization de novembro de 2010.

Durante esse período a concentração no interior da câmara de carbonatação foi monitorada diariamente e relatada a média diária desta concentração. A Tabela 3 apresenta a média diária para cada dia de exposição à concentração definida.

Tabela 3: Média diária da concentração de CO₂ no interior da câmara de carbonatação.

Dia	Concentração média diária de CO ₂ (%)	Dia	Concentração média diária de CO ₂ (%)	Dia	Concentração média diária de CO ₂ (%)	Dia	Concentração média diária de CO ₂ (%)
01	7,6261	15	7,8623	29	7,6433	43	7,6734
02	7,6264	16	7,5027	30	7,6291	44	7,6748
03	7,7173	17	7,6405	31	7,6147	45	7,6754
04	7,8981	18	7,7825	32	7,7092	46	7,6867
05	7,6520	19	7,7143	33	7,6027	47	7,6897
06	7,6865	20	7,9206	34	7,7843	48	7,6840
07	7,7198	21	7,2493	35	7,8007	49	7,6798
08	NA	22	7,7798	36	7,8552	50	7,6843
09	NA	23	7,7017	37	7,7172	51	7,6701
10	NA	24	7,8317	38	7,7006	52	7,6884
11	NA	25	7,7017	39	7,6829	53	7,6765
12	6,9155	26	7,8317	40	7,6865	54	7,6821
13	7,4268	27	7,8048	41	7,6899	55	7,6791
14	7,6492	28	7,7060	42	7,6493	56	7,6774

Fonte: Autor (2016). NA = Não Avaliado.

As médias representadas na Tabela 3 se referem às médias de leituras estabilizadas, ou seja, os valores de enchimento e abertura da câmara de carbonatação foram desprezados, por entender que estes valores interfeririam no entendimento do desempenho de efetiva avaliação da eficiência da câmara de carbonatação, portanto, os valores apresentados são os de efetiva avaliação no interior da câmara de carbonatação.

Os dias 08, 09, 10 e 11 não foram avaliados em função da explosão da subestação que alimenta o bloco onde se localiza o laboratório de Segurança do Trabalho, local este onde se desenvolveu esta pesquisa.

O reinício das avaliações se deu no dia 12 às 22h48min, como o programa encerra o dia de avaliação às 23h59min de cada dia, o tempo necessário para homogeneização foi menos de 2 (duas) horas. Tal fato explica a média do 12º (décimo segundo) dia ter sido 6,9155, conforme Tabela acima e abaixo do limite inferior determinado para nossa pesquisa.

Tal afirmação pode ser corroborada pelo dia seguinte, o qual apresenta uma média de avaliação dentro do padrão definido para a pesquisa.

A Figura 99 apresenta o comportamento dos 56 dias de efetiva avaliação no interior da câmara de carbonatação.

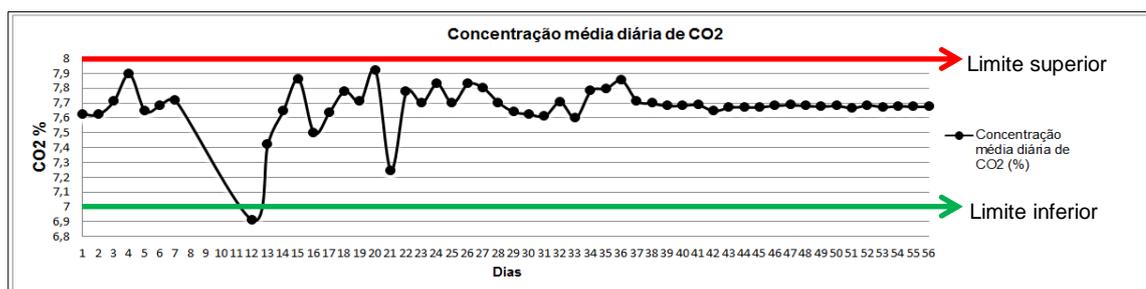


Figura 99: Gráfico do comportamento das avaliações no interior da câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

Os valores médios das avaliações diárias no interior da câmara de carbonatação foram representados com 4 casas decimais, objetivando analisar as variações ocorridas durante o período das avaliações.

Como é possível observar o gráfico é expandido conforme a variação da concentração de CO₂ definida para pesquisa, ou seja, $\pm 0,5\%$.

Durante o período das avaliações, observa-se que em momento algum essa variação foi excedida, exceto com relação ao 12º dia, conforme explicado anteriormente em função do reinício das avaliações após problema ocorrido com a subestação que alimenta o laboratório.

Os 4 dígitos são apresentados na tela principal do software de controle da câmara de carbonatação conforme apresentado na Figura 100, a qual representa a avaliação do 34º dia.

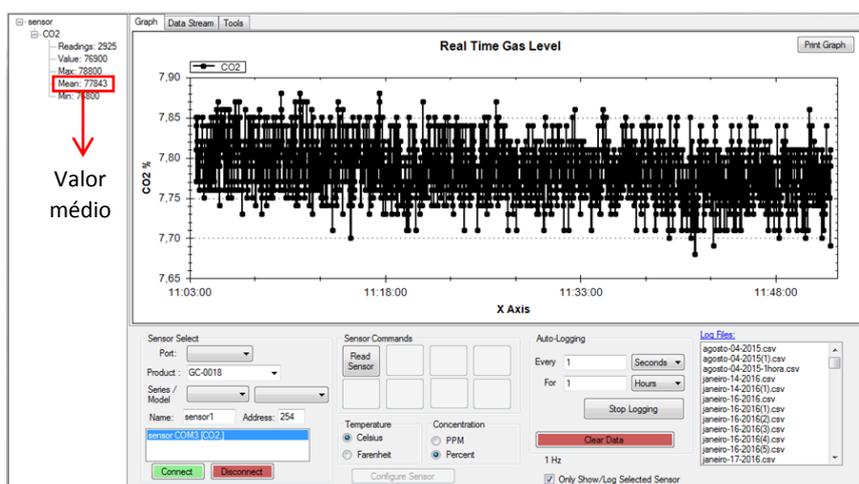


Figura 100: Representação do valor médio de uma hora do 34º de avaliação - Fonte: Autor (2015).

Diariamente foi escolhida uma faixa de 1 hora aleatoriamente para análise da avaliação em curso. A escolha de 1 hora foi definida, por ser o período que denota-se, com uma melhor visualização no gráfico a variação em cada casa decimal da avaliação em curso. A Figura 101 representa de forma bem definida os pontos de avaliação segundo a segundo em 30 minutos entre às 12h e 13h do 18º dia. Cada ponto representado significa 1 avaliação em 1 segundo. É possível perceber a variação em cada casa decimal.

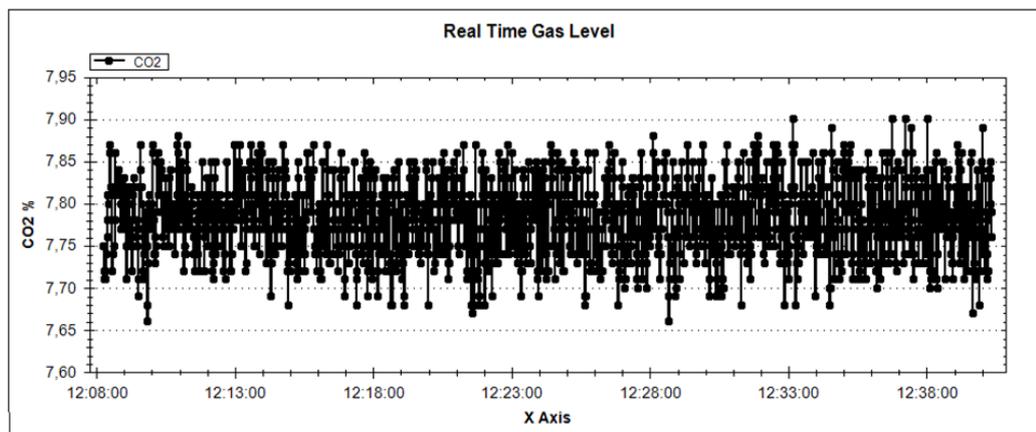


Figura 101: Gráfico da representação segundo a segundo em uma faixa de tempo do dia 18 - Fonte: Autor (2015).

Outro ponto importantíssimo a ser observado na Figura 101, é a precisão das avaliações registradas. A qualquer momento, em qualquer faixa de intervalo de tempo das avaliações a função "log file" do software gera o gráfico do dia conforme desejar.

Alguns gráficos não podem deixar de ser apresentados. A figura 102 representa o início das avaliações.

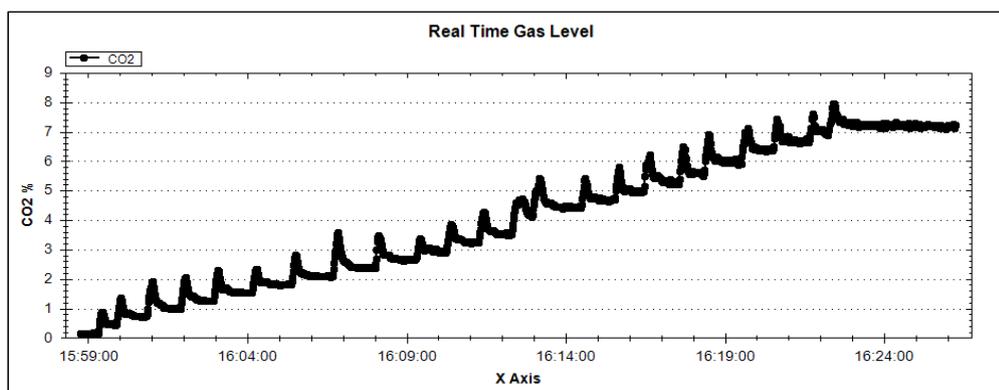


Figura 102: Gráfico do início das avaliações - Fonte: Autor (2015).

Percebem-se vários picos de injeção de CO₂, e curtos espaços de estabilização até a estabilização definitiva o que ocorreu em 23 minutos. A injeção gradativa de CO₂ se dá pela rápida taxa de expansão do dióxido de carbono, ao ponto de causar congelamento nas conexões.

A Figura 103 apresenta o momento de abertura da câmara de carbonatação, para avaliação da profundidade de carbonatação aos 14 dias de exposição ao CO₂.

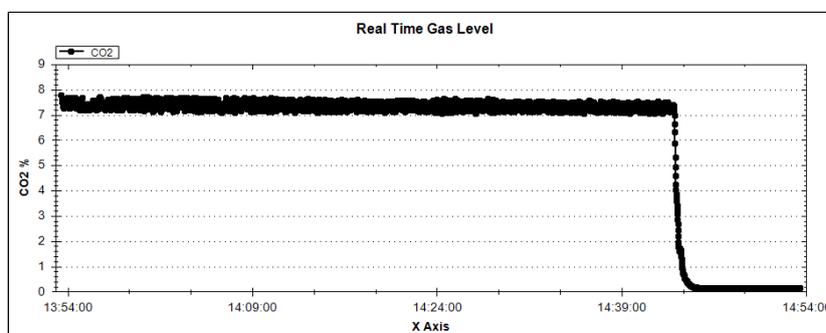


Figura 103: Gráfico da abertura da porta aos 14 dias de exposição - Fonte: Autor (2015).

O gráfico representa nitidamente a resposta do software à realidade instantânea sobre o comportamento da câmara de carbonatação.

Posteriormente ao procedimento de avaliação da profundidade de carbonatação os corpos de prova foram submetidos à selagem dos topos e inseridos no interior da câmara de carbonatação. A Figura 104 demonstra o comportamento de enchimento da câmara de carbonatação para posterior avaliação aos 28 dias de exposição até o momento da estabilização.

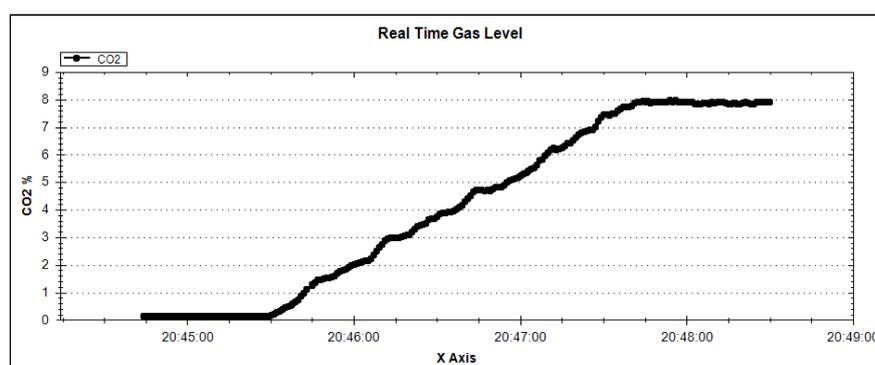


Figura 104: Gráfico do comportamento de enchimento da câmara de carbonatação aos 14 dias de exposição - Fonte: Autor (2015).

Para os dias posteriores de avaliação o procedimento foi realizado da mesma forma e a resposta do controle se manteve eficiente, como demonstra a Figura 105, para o enchimento da câmara de carbonatação aos 28 dias de exposição.

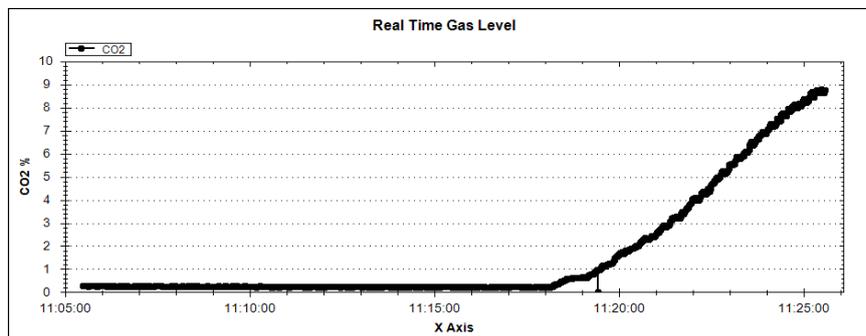


Figura 105: Gráfico do enchimento da câmara de carbonatação aos 28 dias de exposição - Fonte: Autor (2015).

As Figuras 106 e 107 representam a abertura de porta e enchimento da câmara de carbonatação em virtude de teste de carbonatação acelerada aos 42 dias de exposição.

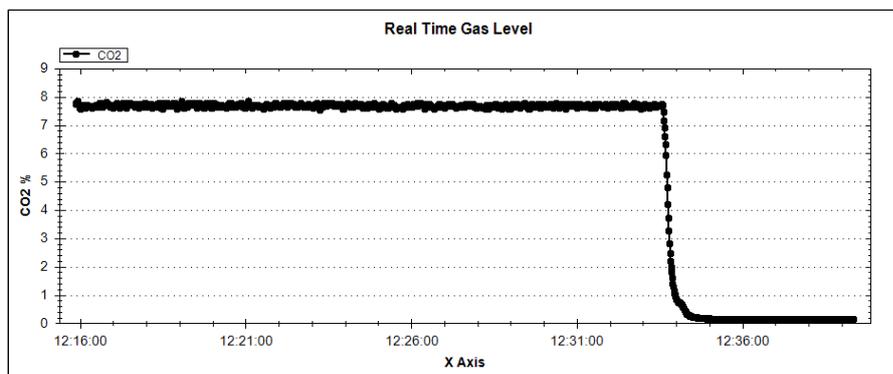


Figura 106: Gráfico da abertura de porta aos 42 dias de exposição - Fonte: Autor (2015).

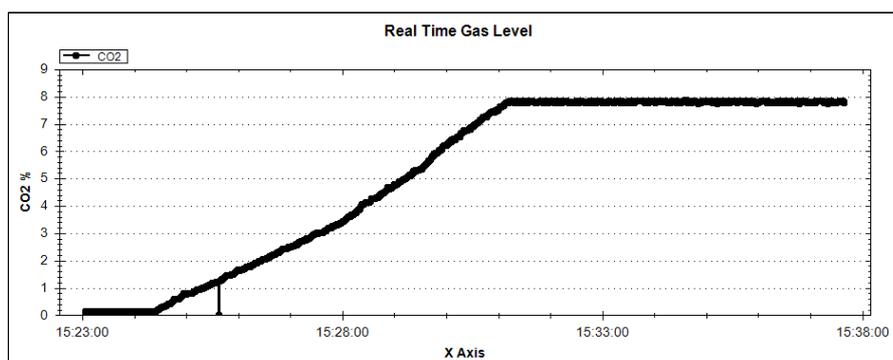


Figura 107: Gráfico do enchimento da câmara de carbonatação aos 42 dias de exposição - Fonte: Autor (2015).

Como foi possível observar através dos gráficos de enchimento da câmara de carbonatação, de desempenho das avaliações, bem como as aberturas de portas devido ao ensaio acelerado de carbonatação, o comportamento entre eles foram semelhantes o que representa um indicador de confiabilidade de todo o sistema.

4.4.3 Problemas enfrentados durante a pesquisa

Para se chegar a esse nível de desempenho foram enfrentados muitos problemas com potencialidades de tornar a pesquisa ineficaz.

A Figura 108 demonstra um problema que foi observado no momento em que o sistema de leitura do sensor principal foi posto em prática.

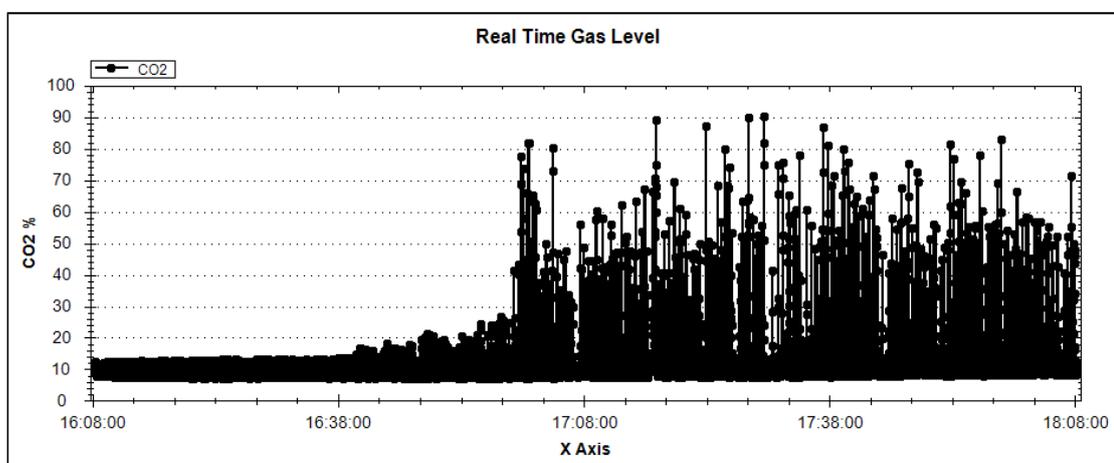


Figura 108: Gráfico de problema durante leituras iniciais do sensor principal - Fonte: Autor (2015).

Para esse caso específico foi injetado 10% de CO_2 comprovadamente através dos sensores auxiliares, presente em uma caixa de isopor. A partir do 38º minuto a leitura ficou descontrolada ao ponto de atingir picos de até 90% de concentração de CO_2 , quando ao mesmo tempo os sensores auxiliares avaliavam 10% de concentração de CO_2 .

Os gráficos não tinham um padrão definido, o problema se repetia dia após dia. A Figura 109 demonstra outra representação deste problema.

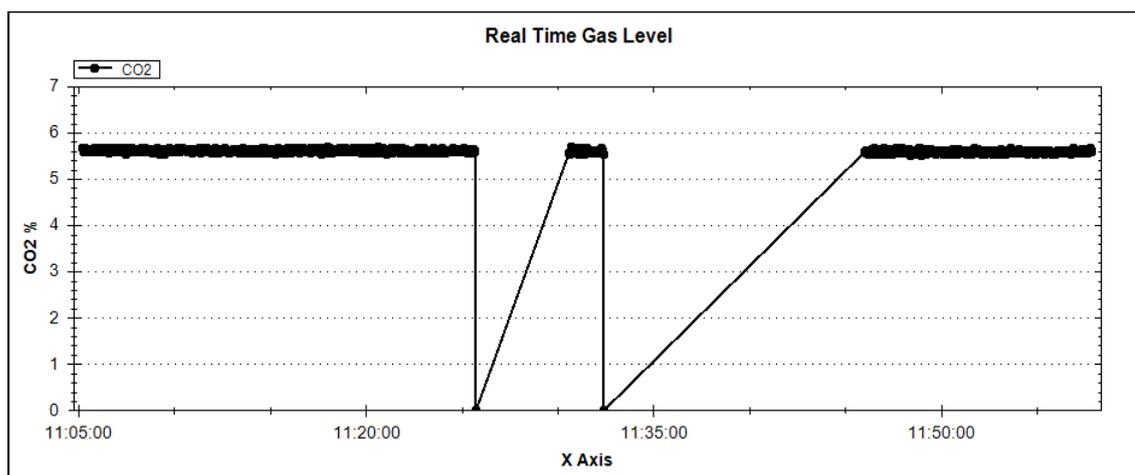


Figura 109: Gráfico de problema durante leituras iniciais do sensor principal - Fonte: Autor (2015).

Quanto mais se ajustava a sintonia de leitura do sensor principal, mais diversificado se tornava a representação dos gráficos e a imprecisão das leituras, o que gerava uma extrema falta de confiança no sensor. Ao longo de exatos 18 dias os problemas se repetiam ao ponto de pensar em adquirir outro sensor, fato este imediatamente descartado em função de seu alto valor de aquisição.

Diante de várias pesquisas sobre o assunto, desde análise da programação do sensor principal, até correspondências eletrônicas com o fabricante do equipamento, foi observado em uma nota de aula da co-orientadora desta pesquisa, que em sua tese de doutorado, sua pesquisa havia sido prejudicada em função de um ruído presente na rede elétrica do laboratório onde se desenvolvia sua pesquisa. Após a confirmação de tal fato com a co-orientadora, o passo seguinte foi avaliar a rede do laboratório de segurança do trabalho, local onde foi realizada esta pesquisa, com um equipamento denominado de osciloscópio e detectado que a rede inteira apresentava ruído.

A Figura 110 representa nitidamente a diferença entre o tempo em as leituras foram realizadas conectadas à rede elétrica, e o tempo das leituras realizadas utilizando apenas a energia da bateria de um computador pessoal.

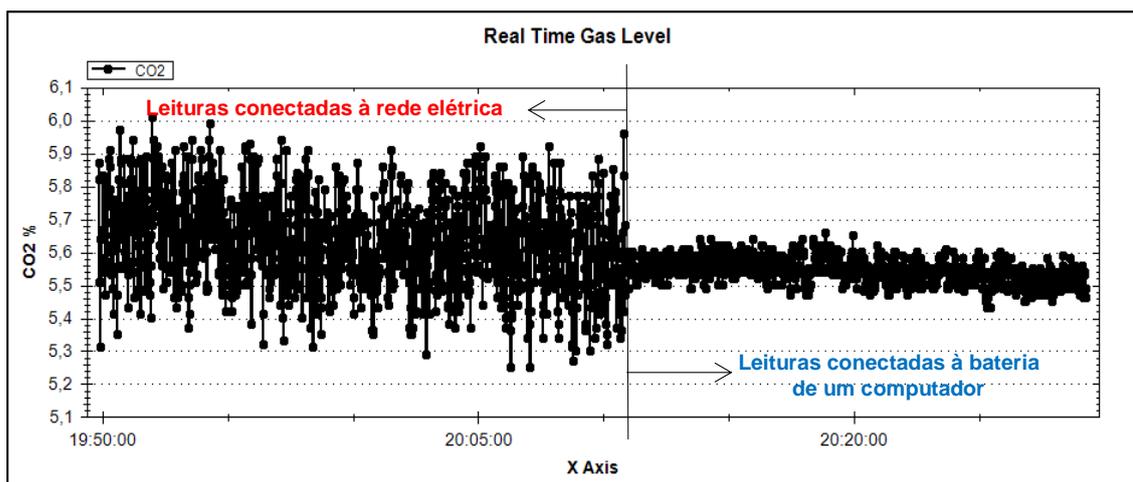


Figura 110: Gráfico de representação da diferença entre as leituras realizadas conectadas à rede elétrica e bateria de um computador pessoal - Fonte: Autor (2015).

A partir deste momento ficou constatado, assim como resolvido o problema. Tal fato explica o motivo de ser realizar avaliações em faixas de 1 hora. Faixa esta que é o limite de durabilidade da bateria do computador utilizado para as leituras.

Outro problema enfrentado e não menos grave foi a explosão da subestação elétrica, a qual alimenta o bloco onde se localiza o laboratório de segurança do trabalho onde foi desenvolvida a pesquisa. Além de deixar de avaliar as concentrações durante 4 dias seguidos, a explosão danificou o computador adquirido para a pesquisa e 3 solenoides, uma de controle de entrada de CO₂, uma de entrada de ar e a de abertura da válvula de saída de ar.

Após a substituição do computador, elemento primordial para continuação da pesquisa, as leituras continuaram a ser realizadas utilizando apenas a bateria como única fonte de energia. A utilização do computador como única fonte de energia gerou um novo problema, como demonstra a Figura 111, porém rapidamente solucionado, e que não interferiu no decorrer da pesquisa.

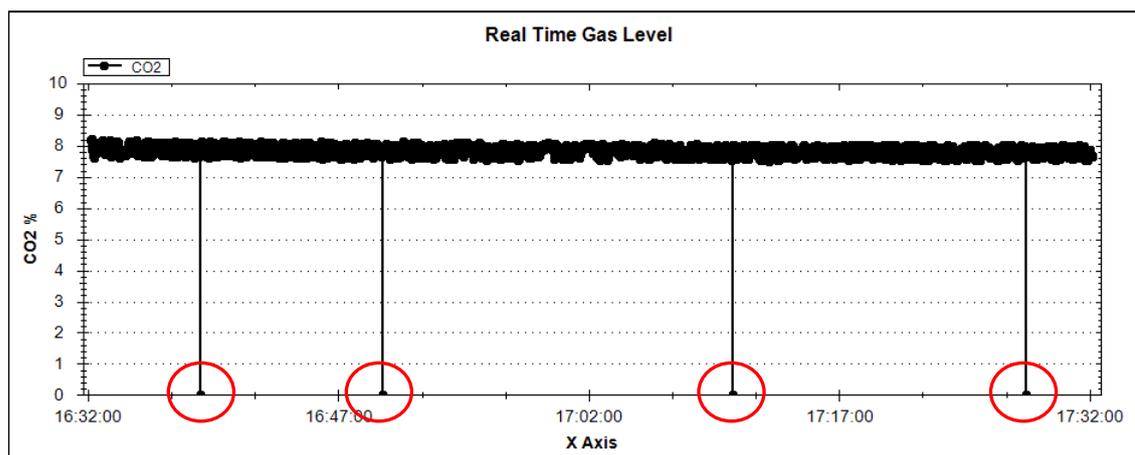


Figura 111: Gráfico da representação do problema ocasionado pela utilização em modo de economia do computador - Fonte: Autor (2015).

O problema foi decorrente da configuração do computador em modo de economia. Para uma maior vida útil da bateria o computador foi configurado para desligar o vídeo após 1 minuto sem utilização. Ao tocar em qualquer tecla do computador o vídeo automaticamente é religado. Neste exato momento de religação o pico de leitura é zero conforme demonstrado no gráfico acima, ou seja, uma interferência eletrônica. Para não interferir na média diária de leitura, o algoritmo foi reprogramado de modo a desprezar este valor zero, nestas circunstâncias.

4.4.4 Medidas de profundidade de carbonatação.

A técnica utilizada para avaliação da carbonatação acelerada no concreto consistiu em submeter os corpos de prova à cura por 28 dias em tanque com água. Após a cura os corpos de prova foram colocados sobre uma bancada de mármore no laboratório de segurança do trabalho onde permaneceram a uma temperatura de $22^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $62\% \pm 5\%$, esse procedimento foi denominado de acondicionamento. Os corpos de prova são cilíndricos com as dimensões de 100mm x 200mm.

Após o acondicionamento no laboratório e antes da colocação dos corpos de prova no interior da câmara de carbonatação os corpos de prova tiveram a base e o

topo selados utilizando cera de parafina, com o objetivo de evitar a entrada de dióxido de carbono e permitir a carbonatação apenas em suas laterais.

A selagem com parafina foi aplicada com um pincel conforme demonstra as Figuras 112a e 112b, após ter sido derretida em um recipiente utilizando um fogão elétrico como demonstra a Figura 113.



Figura 112 a e b: Aplicação de cera de parafina com pincel na base e no topo dos corpos de prova - Fonte: Autor (2015).



Figura 113: Fogão elétrico, pincel, recipiente para parafina e parafina - Fonte: Autor (2015).

Observa-se nas Figuras 112a e b, que a parafina derretida foi aplicada ao topo e base dos corpos de prova dentro de um molde formado com fita adesiva, com

o objetivo de evitar o escorrimento da parafina pelas laterais das amostras. Após a secagem da parafina o molde de fita adesiva foi retirado restando a capa seladora conforme demonstra a Figura 114, com aproximadamente 3mm de espessura.



Figura 114: Corpo de prova com o topo selado com cera de parafina - Fonte: Autor (2015).

Após a selagem de todos os corpos de prova como demonstra a Figura 115, as amostras foram mapeadas para inserção no interior da câmara de carbonatação.



Figura 115: Corpos de prova selados com cera de parafina aguardando inserção na câmara de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

4.4.4.1 Posição dos corpos de prova no interior da câmara de carbonatação.

Os corpos de prova foram posicionados nas prateleiras A e C, conforme demonstra a Figura 116.

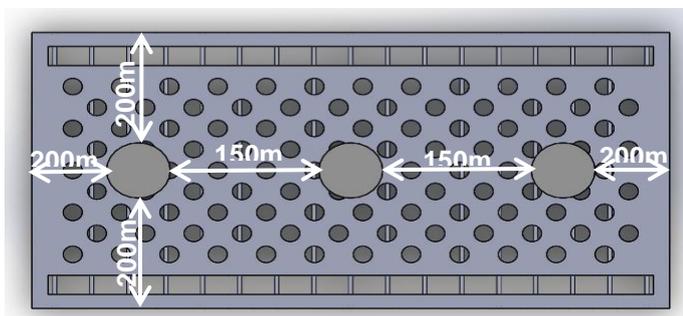


Figura 116: Posição dos corpos de prova nas prateleiras A e C - Fonte: Autor (2015).

A denominação dos corpos de prova nestas prateleiras são: A1, A2, A3, C1, C2 e C3 estão representadas na Figura 117.

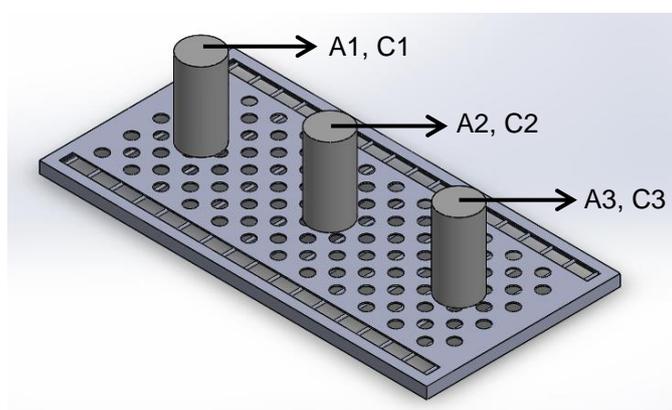


Figura 117: Denominação dos corpos de prova nas prateleiras A e C - Fonte: Autor (2015).

Na prateleira central foram posicionados os corpos de prova como demonstra a Figura 118.

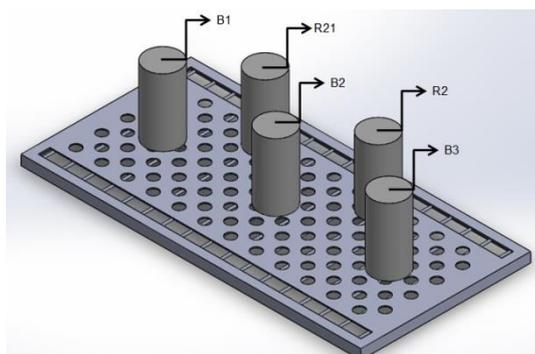


Figura 118: Denominação dos corpos de prova na prateleira B - Fonte: Autor (2015).

Os corpos de prova da prateleira B foram dispostos conforme as distâncias presentes na Figura 119.

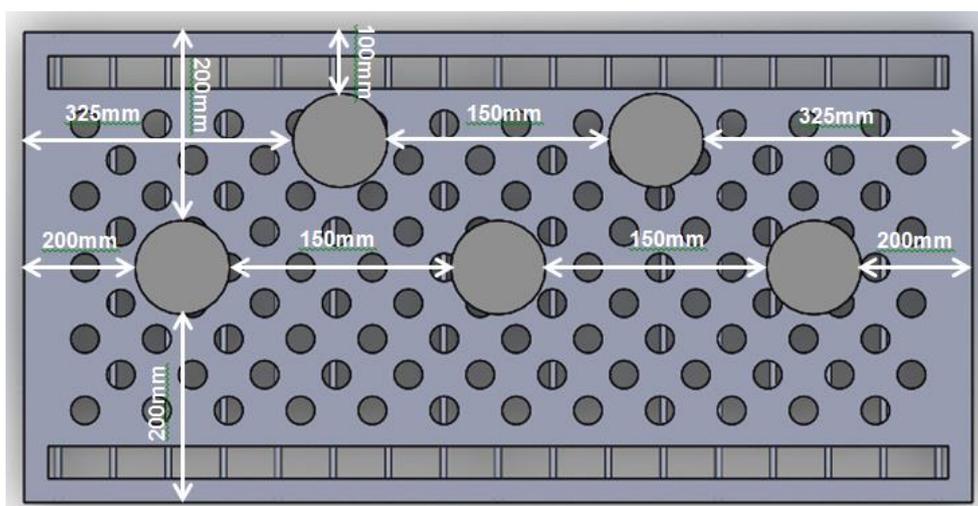


Figura 119: distâncias dos corpos de prova na prateleira B - Fonte: Autor (2015).

Após a inserção dos corpos de prova no interior da câmara de carbonatação conforme ilustra a Figura 120, o próximo passo foi avaliar a profundidade de carbonatação aos 7, 14, 28, 42 e 56 dias de exposição ao dióxido de carbono.



Figura 120: Inserção dos corpos de prova na câmara de carbonatação acelerada -
Fonte: Autor (2015).

4.4.4.2 Medição da profundidade de carbonatação no concreto.

Para cada período determinado de avaliação da profundidade de carbonatação no concreto os corpos de prova foram partidos em dois planos de ruptura, um no sentido transversal conforme demonstram as Figuras 121a e b, em fatias de 50mm, conforme mostrado nas Figuras 28 e 29, e outro no sentido longitudinal, conforme demonstra a Figura 122, formando assim 2 faces para a avaliação da profundidade de carbonatação.

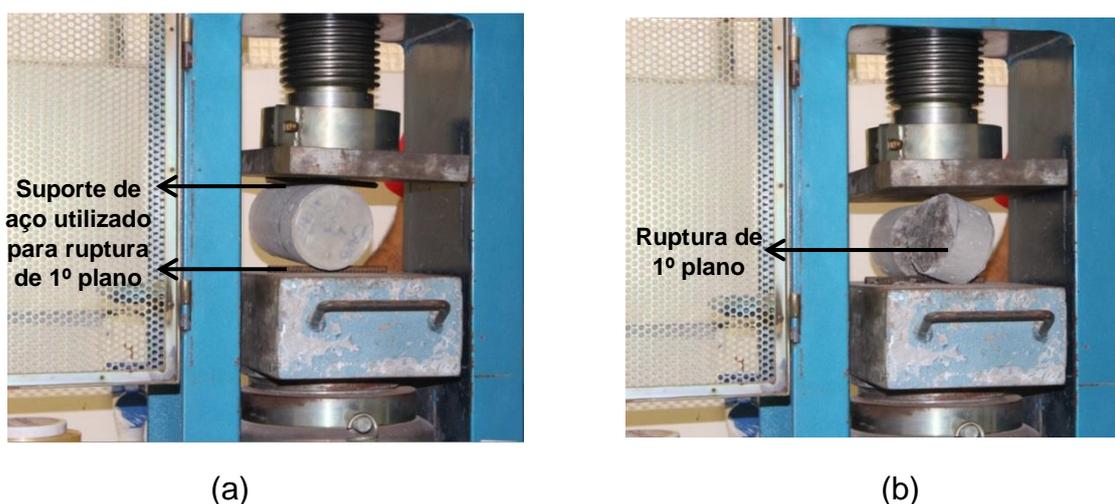


Figura 121: 1º plano de ruptura do corpo de prova: (a) plano transversal; (b) fatia de 50mm - Fonte: Autor (2015).

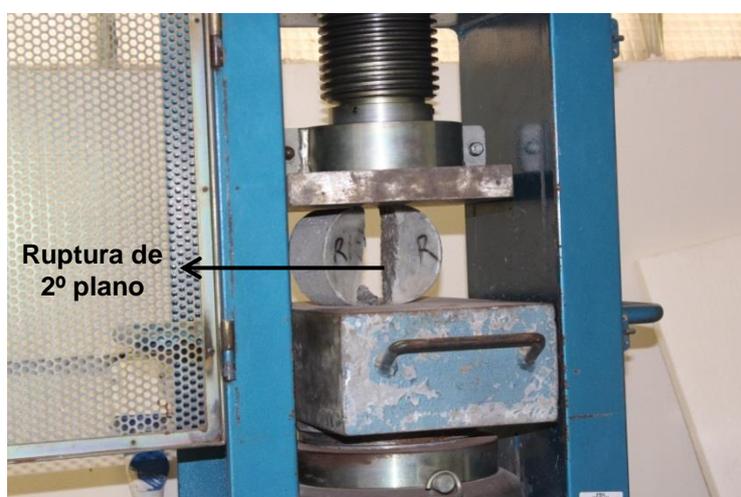


Figura 122: 2º plano de ruptura do corpo de prova: sentido longitudinal - Fonte: Autor (2015).

Após a ruptura, para a fatia de 50mm de cada corpo de prova nas idades determinadas foi aspergida uma solução de 1g de fenolftaleína dissolvido em uma solução de 70ml de álcool e 30 ml de água. Após 30 minutos, tempo detectado para a secagem da solução foi realizada a medição da carbonatação com a utilização de um paquímetro de alta precisão milimétrica, nas laterais longitudinais do corpo de prova rompido.

A Tabela 4 ilustra a profundidade de carbonatação no concreto para as idades de 7, 14, 28, 42 e 56 dias de exposição ao dióxido de carbono. Os resultados apresentados representam a média de 20 medições em cada fatia de acordo com o apresentado na Figura 29b.

Tabela 4: Média das profundidades de carbonatação em cada idade determinada.

Prateleiras	Média das profundidades de carbonatação (mm)				
	Idades (dias)				
	7	14	28	42	56
A	0,00	1,60	2,65	3,35	N.A.
B	0,00	1,55	2,75	3,20	3,72
C	0,00	1,70	2,55	3,50	N.A.

Fonte: Autor (2016).

N.A: Não Avaliado.

Como se observa, as diferenças para as mesmas idades entre as prateleiras, não foram superior a 0,3mm como consta no 42º dia entre as prateleiras B e C.

A Figura 123 demonstra a evolução da profundidade de carbonatação ao longo dos 52 dias de exposição.

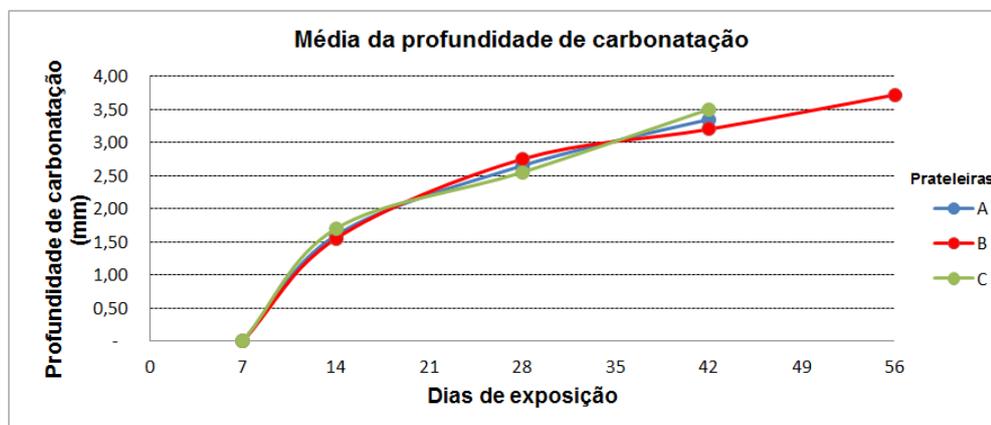


Figura 123: Gráfico das profundidades médias de carbonatação - Fonte: Autor (2015).

A análise da Figura 123 permite avaliar que o comportamento das profundidades de carbonatação para cada prateleira, nas diferentes idades de exposição demonstram repetitividade, ou seja, o comportamento das prateleiras em função da profundidade de carbonatação demonstrou um padrão semelhante e não houve discrepâncias ao longo dos dias de exposição. Outra análise a qual é possível realizar, em função das profundidades médias de carbonatação em cada prateleira é que houve homogeneidade entre o dióxido de carbono e o ar no interior da câmara de carbonatação.

A avaliação do 56º dia foi realizada apenas na prateleira “B” com os corpos de prova A2, B2, R1, C2 e C3. Tal fato se deu pela perda de alguns dos corpos de prova. Na avaliação do 7º dia foram perdidas as amostras A1 e A3. Na avaliação do 14º dia foram perdidas as amostras B3, C1 e R2. Na avaliação do 42º dia foi perdida a amostra B1. A partir deste momento, para a avaliação do 56º dia restaram os corpos de prova A2, B2, R1, C2 e C3. Para a avaliação do 56º dia, os corpos de prova foram posicionados na prateleira B. Na ocasião, os corpos de prova C2, C3 e A2 ocuparam os lugares dos corpos de provas B1, B3 e R2 respectivamente.

Os corpos de prova foram perdidos em função do deslizamento do suporte de aço, utilizado para ruptura de 1º plano o qual causou esmagamento da amostra na prensa, durante a ruptura de primeiro plano, tornando-os inutilizáveis para as avaliações posteriores da profundidade de carbonatação.

Conforme se observa através da Tabela 4, no 7º dia não houve qualquer penetração CO_2 no interior dos corpos de prova, e conseqüentemente não houve carbonatação. A Figura 124 ilustra de forma exemplificativa, a ausência de penetração do CO_2 nos corpos de prova. A coloração rósea representa a área não carbonatada.



Figura 124: Exemplo de corpo de prova não carbonatado aos 7 dias de exposição-

Fonte: Autor (2015).

Já durante a avaliação aos 14 dias de exposição foi detectadas áreas de frente carbonatada em todos os corpos de prova submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada. A Figura 125 demonstra áreas carbonatadas nas 4 (quatro) faces do corpo de prova tomado como exemplo para representação da carbonatação acelerada.

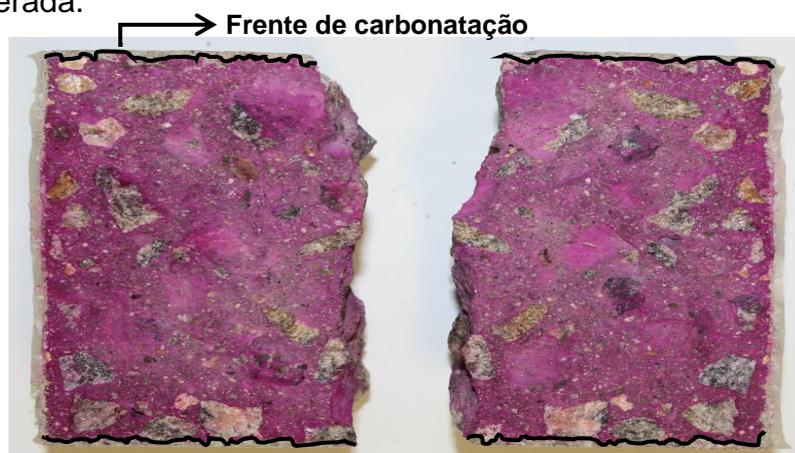


Figura 125: Exemplo de carbonatação acelerada nas 4 faces de um corpo de prova aos 14 dias de exposição- Fonte: Autor (2015).

Aos 28 dias de exposição houve uma progressão na profundidade de carbonatação nas 3 prateleiras da câmara de carbonatação, bem como em todos os corpos de prova submetidos ao ensaio.

A Figura 126, demonstra de forma exemplificativa um corpo de prova com 2 de suas faces carbonatadas. A figura é apresentada de forma ampliada para facilitar a visualização, haja vista a frente de carbonatação avançar de forma milimétrica.



Figura 126: Exemplo de carbonatação acelerada em 2 faces de um corpo de prova aos 28 dias de exposição- Fonte: Autor (2015).

A profundidade de carbonatação no interior dos corpos de prova continuou aumentando em função do tempo de exposição. Aos 42 dias todas as prateleiras constataram um aumento desta profundidade. A Figura 127 exemplifica de forma ampliada para melhor visualizar, a faixa de carbonatação em 2 das faces de um corpo de prova exposto ao CO₂ durante os 42 dias de exposição.

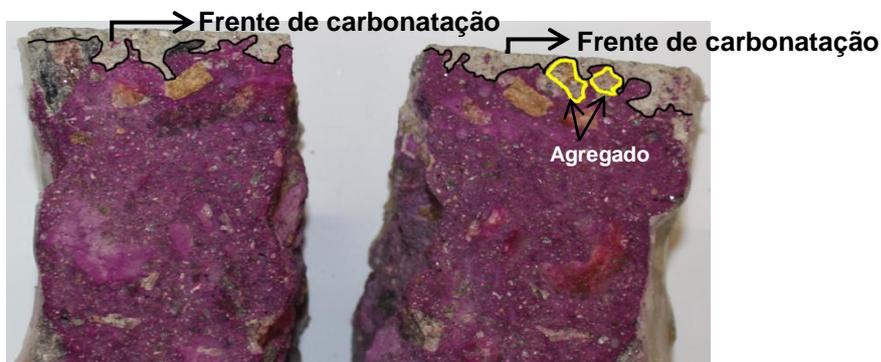


Figura 127: Exemplo de carbonatação acelerada em 2 faces de um corpo de prova aos 42 dias de exposição- Fonte: Autor (2015).

Por fim, aos 56 dias de exposição, os corpos de prova apresentaram um singelo aumento em relação à avaliação realizada aos 42 dias de exposição. A Figura 128 apresenta de forma ilustrativa a profundidade carbonatada em um corpo de prova localizado na prateleira B.

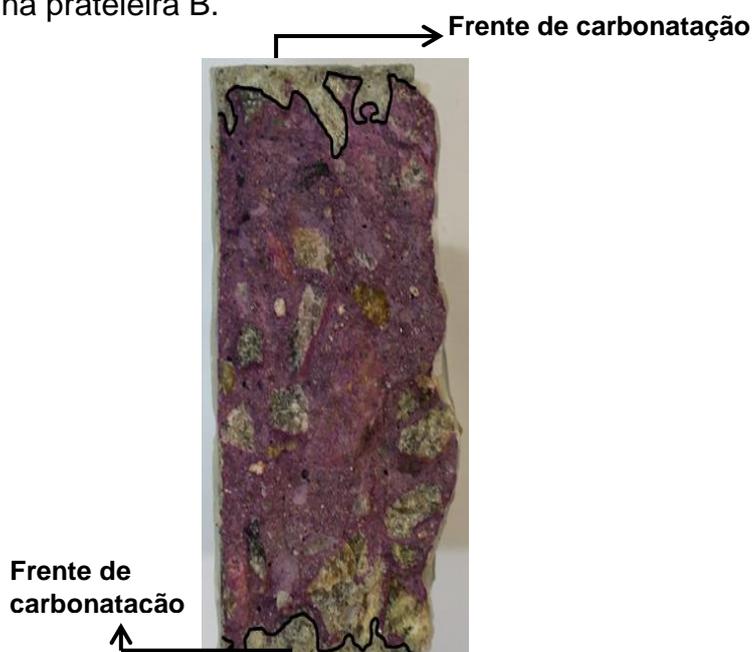


Figura 128: Exemplo de carbonatação acelerada em 2 faces de um corpo de prova aos 56 dias de exposição- Fonte: Autor (2015).

Com relação à carbonatação no concreto foi observada nitidamente uma progressão da frente de carbonatação conforme o tempo de exposição quer sejam 7, 14, 28, 42 e 56 dias. Os valores das frentes de carbonatação obtidas nesta pesquisa foram semelhantes aos resultados obtidos por Pauletti (2004), para a concentração de 6% de CO₂, tomando por base o cimento CP I-S e fator a/c 0,55. Vale salientar que a câmara de carbonatação acelerada utilizada por Pauletti (2004) foi projetada e construída em laboratório.

Durante todo o período de ensaio acelerado à carbonatação acelerada do concreto, foram registrados através dos sensores a temperatura e umidade relativa no interior da câmara de carbonatação. A tabela 5 demonstra a média dos valores de temperatura e umidade relativa em todo o período do ensaio de carbonatação acelerada.

Tabela 5: Média da temperatura e umidade relativa em cada idade determinada.

Variáveis	Média da temperatura (°C) e umidade relativa (%)				
	Idades (dias)				
	7	14	28	42	56
Temperatura	26,77	26,98	27,31	25,67	24,81
Umidade relativa	61,3	62,6	61,4	66,5	67,32

Fonte: Autor (2016).

Os valores de temperatura e umidade relativa foram apenas registrados. Não houve controle nestas variáveis por falta de verba financeira destinada a adquirir o sistema de climatização, bem como o sistema de controle da umidade relativa.

CAPÍTULO 5

5 Conclusões

Diante do projeto, foi possível elaborar o memorial descritivo dos materiais a serem utilizados na construção da câmara de carbonatação, bem como definir o local e a forma de materializar sua construção.

A calibração foi realizada de forma satisfatória, a qual permitiu a emissão de um certificado de calibração com padrões rastreáveis internacionalmente e com isso permitiu a veracidade dos dados coletados durante o ensaio de carbonatação acelerada.

O teste de estanqueidade ao qual foi submetido a câmara de carbonatação garantiu que em sua estrutura não há qualquer tipo de vazamento, desta forma relacionado a sua estanqueidade o teste revelou que o gabinete é hermeticamente fechado e portanto, eficaz com relação à sua vedação.

A calibração do sensor principal, assim como a comprovação da estanqueidade, garantiu a eficiência da câmara de carbonatação.

Os dobramentos e ponteamentos durante a construção da câmara de carbonatação foram fatores primordiais para promover rigidez ao gabinete interno bem como contribuir para uma excelente vedação.

Por fim, esta pesquisa cumpriu com todos os objetivos propostos para o seu desenvolvimento, desde o projeto, e construção da câmara de carbonatação, avaliação de sua eficiência através da calibração do dispositivo avaliador de CO₂, submissão do concreto ao ensaio acelerado de carbonatação acelerada, bem como equipar um laboratório de durabilidade.

CAPÍTULO 6

6 Sugestões para trabalhos futuros

O desenvolvimento desta pesquisa possibilita contribuir para diversos estudos relacionados à durabilidade das edificações, com enfoque em carbonatação acelerada. Assim, diante do imenso campo de estudo onde se insere este tema, alguns trabalhos são sugeridos como forma de continuação deste trabalho:

- Dar continuidade ao desenvolvimento do aplicativo referente ao controle, atuação e gerenciamento do ensaio de carbonatação acelerada;
- Realizar um estudo interlaboratorial, que envolva instituições que disponham de câmaras de carbonatação desenvolvidas em laboratório e/ou adquiridas comercialmente;
- Realizar pesquisa de carbonatação acelerada em argamassas e produtos cimentícios;
- Realizar estudo para instalação de climatização e umidificação automatizada na câmara de carbonatação;
- Realizar a medição da profundidade de carbonatação, no perímetro da face do corpo de prova no 1º plano de ruptura, ou seja, no plano transversal como demonstra a Figura 129.

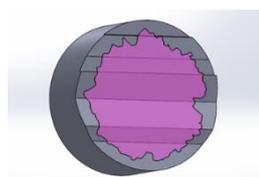


Figura 129: Sugestão de avaliação da profundidade de carbonatação em todo o perímetro da face do corpo de prova no primeiro plano de ruptura - Fonte: Autor (2015).

- Projetar e construir um suporte o qual possa ser acoplado à prensa de compressão, capaz de tornar eficiente a ruptura de primeiro plano, ou seja, a ruptura transversal.

Referências

ABNT (1987) NBR 9778 – *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro.

ABNT (2003) NBR 6118 – *Projetos de estruturas de concreto - procedimento*. Rio de Janeiro.

ABNT (2007) NBR 5739 – *Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.

ABNT (2013) NBR 15575-1 – *Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1 – Requisitos gerais*. Rio de Janeiro.

ABNT (2014) NBR 6118 – *Projetos de estruturas de concreto - procedimento*. Rio de Janeiro.

ACGIH (2014) AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS. ACGIH®. 2014 TLVs® e BEIs® – Baseados na Documentação dos Limites de Exposição Ocupacional (TLVs®) para Substâncias Químicas e Agentes Físicos & Índices Biológicos de Exposição (BEIs®). São Paulo: ABHO. Tradução de: Associação Brasileira de Higienistas Ocupacionais - ABHO.

BAKKER, R. F. M. Chapter Three. In: SCHIESSL, P. ed. Corrosion of steel in concrete. Report of the Technical Committee 60 – CSC. RILEM. London, Chapman & Hall, 1988. p. 35-42.

BARROS, P. G. dos S. (2008): Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Alagoas, 165 p.

BRANCO F., PAULO P., GARRIDO M. (2013): Service life in civil construction. Asociación Latinoamericanad e Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción – ALCONPAT Int. bol n.4.

PADE C.; GUIMARÃES M. (2007): The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective. Cement and Concrete Research. n 37, p. 1348-1356.

DAMTOFT, J. S.; LUKASIK, J.; HERFORT, D.; SORRENTINO, D.; GARTNER, E. M. (2008): Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*. n. 38, p. 115-127.

DRAFT (2010) European Committee for Standardization – FprCEN/TS 12390-12, Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method. Bruxelas, Bélgica.

DRAFT (2012) European Committee for Standardization – CEN EN 12390-X, Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the carbonation resistance class of a concrete. Bruxelas, Bélgica.

FERREIRA, F. G. da S.; HELENE, P. R. do L. (2014): Avaliação da reprodutibilidade do ensaio de carbonatação acelerada a partir de um programa interlaboratorial. Anais, 56º Congresso Brasileiro do Concreto, CBC2014-56CBC0624, Natal, Rio Grande do Norte.

FIGUEIREDO E. P., MEIRA G. (2013): Service life in civil construction. *Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción – ALCONPAT Int. bol n.6.*

FIGUEIREDO, C. R.; NEPOMUCENO, A. A. (2007): Uso do concreto aparente em Brasília: uma abordagem segundo o fenômeno da carbonatação. Disponível em <http://www.repositorio.unb.br> e acessado em 25/12/2014

FIGUEIREDO, E. P. Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In: Isaia, G. C. (Org). *Concreto – Ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: Ed. IBRACON. 2005. Cap. 27, p. 829-855.

GADJA, J. (2001): Absorption of Atmospheric Carbon Dioxide by Portland Cement. *PCA, Chicago, Serial n. 2255, 2001.*

VILLAIN, G.; THIERY M.; PLATRET, G. (2007): Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. *Cement and Concrete Research*. n. 37, p. 1182-1192.

ISAIA, G.C. *Carbonatação do Concreto: uma revisão*. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

KAZMIERCZAK, C.S.; HELENE, P.R.L. Análise e fatores que influenciam a velocidade de carbonatação em estruturas de concreto armado. IBRACON – Reunião anual. Brasília 1993. *Controle de Qualidade do Concreto. Processos construtivos em obras de concreto. Publicação IBRACON 93 dur001*

YANG, K.-H.; SEO, E. A.; TAE, S.-H. (2014): Carbonation and CO₂ uptake of concrete. *Environmental Impact Assessment Review*. n 46, p. 43-52.

LNEC (1993) E 391 Betões: Determinação da resistência à carbonatação. Lisboa.

LOO, Y. H.; CHIN, M. S.; TAN, C. T.; ONG, K. C. G. (1994): A carbonation prediction model for accelerated carbonation testing of concrete. *Magazine of Concrete Research*. V. 46, n. 168, p. 191-200.

McGRATH, P. F. (2005). Accelerated carbonation of concrete protected with cement based coatings. Proc. 3rd. Int. Conf. on Construction Materials: Performance, Innovations, and Structural Implications, CONMAT, Vancouver – Cd room.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. (2014) Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2^a ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 749p.

MEYER, A. investigation on the carbonation of concrete. In: International Symposium on the Chemistry of Cement, 5. Tokyo, 1968. Proceedings. Tokyo, 1969, Part III, v. II/4, p.394- 401. (Supplementary Papers).

MTE (2014) MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. NR 15 – Atividades e operações insalubres. Brasília.

NEPOMUCENO, A. A. Mecanismo de transporte de fluidos no concreto. In: Isaia, G. C. (Org). *Concreto – Ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: Ed. IBRACON. 2005. Cap. 26, p. 793-827.

NUNES, D. G. (2014) Carbonatação acelerada em concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono gráfico. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Maria, 149 p.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS C. G. (1991): Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem. *Chemical Engineering Science*. n 46, p. 1333-1338.

PARROT, L. J. Carbonation of concrete: a review. *Cement and Concrete*, 1987.

PAULETTI, C. (2004): Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 176 p.

RIBEIRO, V. D..(2014): Corrosão em estruturas de concreto armado - Organização. 2 ed., Elsevier, Rio de Janeiro.

RILEM (1999) TC 116-PCD – Permeability of concrete as a criterion of its durability: tests for gas permeability of concrete. Bagnaux.

ROGEAU, P.; GUIRAUDI, P. A durabilidade no contexto normativo europeu. In: Olivier, J. P.; Vichot, A. (Org). Durabilidade do Concreto – Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com ambiente. São Paulo: Ed. IBRACON. 1 ed. 2014. Cap. 7, p. 209-236.

SALOMÃO, M. C. de F.; SILVA, T. J. da. (2008): Ensaio acelerado de carbonatação do concreto, Universidade Federal de Uberlândia

TASCA, M. (2012): Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, 178 p.

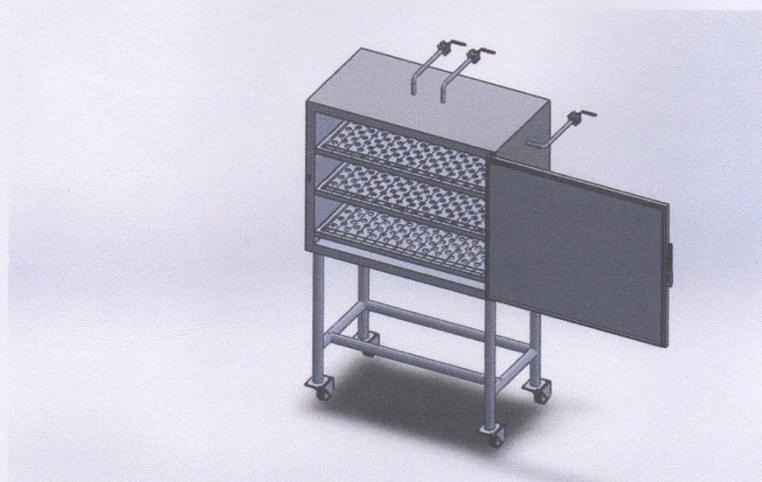
TERZIAN, P.; HELENE, P. (1992): Manual da dosagem e controle do concreto, Pini, São Paulo.

Anexos

Anexo A1- Relatório de procedimento de ensaio de estanqueidade

TESTE DE ESTANQUEIDADE

PRO-011-15-STM – CÂMARA DE CARBONATAÇÃO

**STRONGER - INPEÇÕES**

Avenida Rio Branco N° 251, CEP 59012-000, Ribeira – Natal/RN
Fone: +55 (84) 3346-9373 – www.stronger.eng.br

2015

Apresentação

No decorrer dos séculos, com intensão de prover melhores condições de vida, bem estar social e conhecer novos mundo, a humanidade tem estudado a natureza para melhor compreensão e assim domina-la, criando leis físicas, químicas e Biológicas.

Diante disto, desenvolvendo novas tecnologias e com o avanço no encurtamento de espaço-tempo, o homem tem criado novas Eras, onde a produtividade é fundamental para garantir alimentos, energia e conforto.

Enquadrando-se nestas condições globais, a Stronger e sua equipe de engenharia, vem desempenhando papeis de desenvolvimento de tecnologias, nos bastidores da grande logística que envolve o crescimento produtivo da humanidade e principalmente do Brasil, como desenvolvimento de projetos, inspeção de equipamentos, manutenção, execução de projetos e consultoria em Engenharia.

É com grande responsabilidade e engenheirando com qualidade que a empresa STM - Stronger (mais forte) Tecnologia e Manutenção vem proporcionar mais um serviço do ramo da Engenharia Mecânica.

OBJETIVO → 03

INFORMAÇÕES BÁSICAS → 03

LAUDO → 04

CONCLUSÕES → 05

1. Objetivo:

Este teste tem como objetivo verificar as condições herméticas da câmara de carbonatação acelerada e apontar se o equipamento esta apto ou não para entrar em funcionamento atendendo aos requisitos de normas, operação e resistência dos materiais.

2. Informações básicas:**a. Dados gerais:**

Objeto técnico: Teste de Estanqueidade.

Equipamentos: Câmara de Carbonatação.

Data do Teste: 12/10/2015

b. Responsabilidade técnica:

Empresa Responsável: STM – Stronger Tecnologia e Manutenção

CNPJ: 18.071.932/0001.90

Eng. Responsável: Lindemberg Soares da Silva

Confea/Crea-RN: 211119725-4

c. Dados do solicitante:

Nome: Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

Processo CNPQ: 488337/2013-5

Dissertação de Mestrado Discente: Cleber Medeiros Lucena

LAUDO DE ESTANQUEIDADE N° PRO-011-15-STM**DADOS DO SOLICITANTE:**

Nome: Marcos Alyssandro Soares dos Anjos
Processo CNPQ: 488337/2013-5
Dissertação de Mestrado Discente: Cleber Medeiros Lucena

DADOS DO ENSAIO DE ESTANQUEIDADE:

MÉTODO: Por queda de pressão
TEMPO DE EXECUÇÃO: 90 minutos
TEMPO DE PRÉ-ENSAIO: 15 minutos

EQUIPAMENTO TESTADO:

EQUIPAMENTO: Câmara de carbonatação acelerada.
FABRICANTE: Protótipo Científico
MODELO: PROT-V01
VOLUME INTERNO: 0.048 m³.

EQUIPAMENTOS UTILIZADOS:

EQUIPAMENTO: Compressor de Ar por diafragma com regulagem de pressão.

FABRICANTE: NC
MODELO: NC
POTÊNCIA: NC

EQUIPAMENTO: MANÔMETRO DIGITAL

FABRICANTE: TUB
MODELO: TUBPRESS 1000
CAPACIDADE: 0,0 A 16 kgf/cm².
TAG: PIV 9202

RESULTADOS:

VÁLVULAS: ESTANQUE
RESEVATORIO: ESTANQUE
TUBULAÇÕES: ESTANQUE
CONEXÕES: ESTANQUE

05. Conclusões

A STM – STRONGER TECNOLOGIA E MANUTENÇÃO garante a qualidade do teste e dos resultados, de acordo com as Normas e baseado nos melhores fundamentos de engenharia teóricos e prático, concluímos que no equipamento não há vazamentos e que o mesmo se encontra estanque e apto para entrar em funcionamento.



Natal, 12 de dezembro de 2015

Lindemberg Soares da Silva
Engenheiro Mecânico
Crea: 2111097254

5

Anexo A2- Certificado de estanqueidade**CERTIFICADO DE
ESTANQUEIDADE**

Certificamos que o equipamento denominado de **CÂMARA DE CARBONATAÇÃO ACELERADA**, projetada e construída em laboratório, foi considerada estanque em seu **RESERVATÓRIO, VÁLVULAS, TUBULAÇÕES E CONEXÕES**, através de teste realizado como demonstra o laudo nº **PRO-011-15-STM**.

Natal, 12 de Dezembro de 2015.

Lindemberg Soares da Silva
Engenheiro Mecânico
CONFEA/CREA-RN: 2111097254.

Anexo A4- Certificado de rastreabilidade do cilindro padrão de calibração laboratorial.

Consignor

Scientific and Technical Gases Ltd

Units 1 & 2, Speedwell Road
Parkhouse Industrial Estate East
Newcastle-Under-Lyme
Staffordshire, ST5 7RG. UK
T: +44 1782 566897
F: +44 1782 564906



Certificate Of Composition S098677 - 31

Part Code: 6812377

15ppm H₂S, 50ppm CO, 2% CO₂, 2.5% CH₄, 18% O₂ // N₂ 112I

Customer: Draeger Safety AG & Co KGaA
Customer Order Number: D34NB4300513693

Cylinder No: 030295
Cylinder Valve: C10
Gross Weight: 1.5
Nett Weight: 0.12

<u>Component</u>	<u>Requested Values</u>	<u>Certified Values</u>
Hydrogen Sulphide	15 ppm	15 ppm
Carbon Monoxide	50 ppm	50 ppm
Carbon Dioxide	2 %	2 %
Methane	2.5 %	2.5 %
Oxygen	18 %	18 %
Nitrogen	Balance	Balance

• Pressure: 1000 psi Volume: 1.55 ltr Size: 112DA

Please note all units are in mol % and mixture accuracy +/- 10%
Relative Mixtures traceable to standards calibrated at the National
Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, England The UK
National Physical Laboratory (NPL) Standards are internationally
recognised and directly equivalent to the USA N.I.S.T Standards.

Manufactured Date: 04/08/2015

Valid Until: 04/08/2017

UN 1956 Compressed Gas N.O.S.

(Hydrogen Sulphide, Nitrogen Mixture)

Certified By: Frank Williams

All Gas Mixtures that are quoted with a balance of Air contain 20.9% (+/-2%) Oxygen relative to the overall Gas Mixture

The gases contained in this cylinder are not breathing gases.

DO NOT INHALE

Anexo A5- Pré-teste em caixa de isopor.

O primeiro teste realizado de forma real, utilizou uma caixa de isopor como demonstra a Figura 1, com dimensões 400mm de comprimento x 300mm de largura x 350mm de profundidade.



Figura 1: Caixa de isopor utilizada para o primeiro teste real com a utilização de CO₂ – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).

Na ocasião as mangueiras de sucção e retorno foram inseridas no interior da caixa de isopor através de furos laterais. Após a fixação as mangueiras foram conectadas aos filtros, a minibomba de vácuo e ao sensor, conforme demonstra a Figura 2.



Figura 2: Instalação dos dispositivos avaliadores de CO₂ – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).

O interior da caixa de isopor contou ainda com a instalação de um ventilador como demonstra a Figura 3, para homogeneização do ar durante o processo de avaliação.

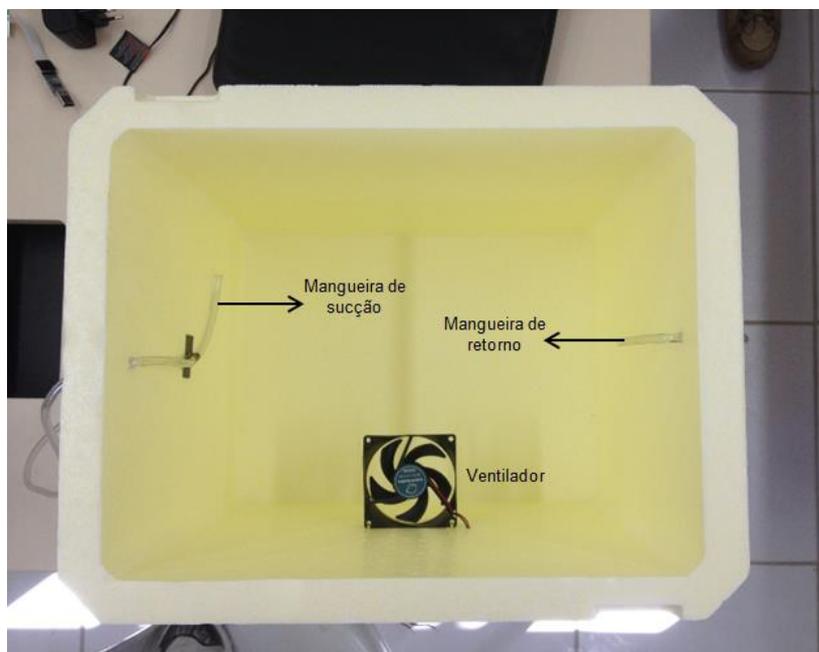


Figura 3: Instalação de ventilador no interior da caixa de isopor – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).

O próximo passo foi conectar o sensor ao computador, conforme demonstra a Figura 4 e realizar a leitura sem a presença do gás para ter certeza que o resultado seria próximo de 0 (zero). Após 40 minutos de leitura, o tempo que foi julgado ser suficiente para a resposta do sensor a avaliação próxima de 0 (zero) não ser alterada, foi injetado CO_2 no interior da caixa de isopor até uma concentração de 20%. O teste teve duração de 6 horas e foi observado uma perda significativa na concentração de CO_2 em torno de 5%, o que foi atribuído à porosidade do isopor, bem como a fresta existente entre o corpo da caixa e sua tampa em todo o perímetro.

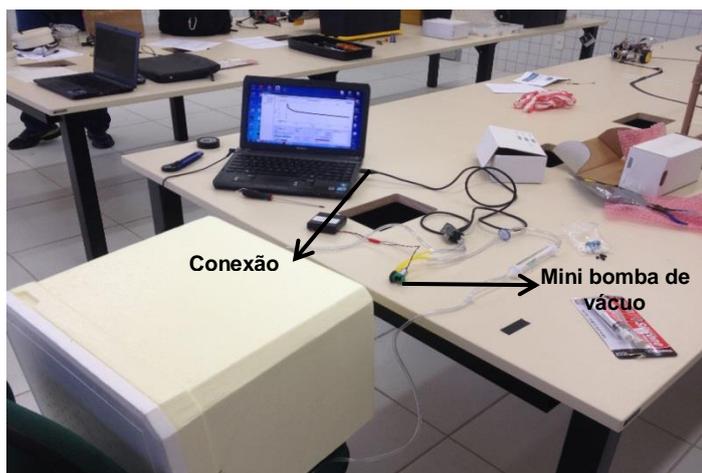


Figura 4: Conexão do sensor ao computador – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).

Para ratificar o que se pensava sobre a porosidade e a fuga do CO_2 pela tampa da caixa de isopor, o próximo passo foi submeter a caixa ao máximo possível de concentração CO_2 . O cilindro de CO_2 foi posicionado ao lado da caixa como demonstra a Figura 5, e foi injetado o dióxido de carbono. O tempo que levou entre o fechamento do cilindro de CO_2 e o fechamento da caixa de isopor permitiram que o máximo de concentração possível no interior fosse de 80%.



Figura 5: Injeção de CO_2 no interior da caixa de isopor – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).

Após a injeção do CO₂ a caixa de isopor foi lacrada com fita adesiva transparente, como demonstra a Figura 6, a partir deste momento iniciou-se a tomada de leituras segundo a segundo.



Figura 6: Caixa de isopor lacrada com fita adesiva transparente – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).

Ao final do terceiro dia de avaliação, as suspeitas de que a caixa de isopor em função de sua porosidade não apresenta as melhores condições de estanqueidade para o CO₂ foram confirmadas quando a avaliação chegou ao seu valor 0 (zero) de concentração, como demonstra o Figura 7.

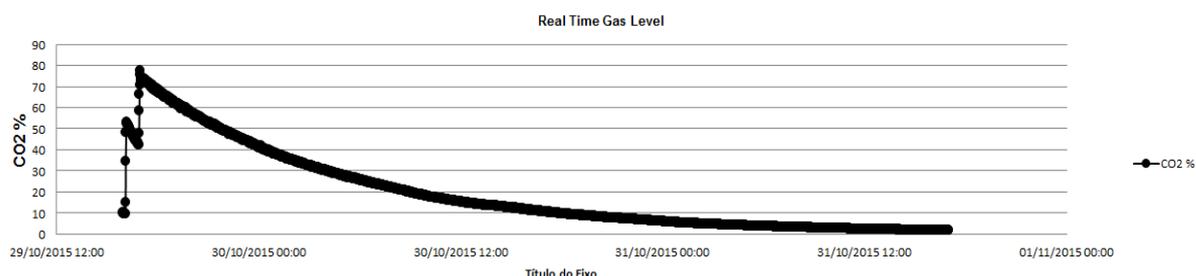


Figura 7: Gráfico do histórico de leitura no interior da caixa de isopor – modelo experimental - Fonte: Autor (2015).

Mesmo a caixa de isopor não tendo dado a resposta esperada, o teste foi considerado satisfatório, pois permitiu avaliar o desempenho do sensor segundo a segundo, e comprovar que o algoritmo desenvolvido apresentou uma resposta satisfatória de interação com o software do sensor, assim como apresentou boa resposta ao seu primeiro teste com a variável temperatura, discutido anteriormente.