

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

MÁJORES DE OMENA TENÓRIO

**PROPRIEDADES DE AGREGADOS RECICLADOS CARBONATADOS PARA  
APLICAÇÃO EM CONCRETO**

Maceió  
2016

MÁJORES DE OMENA TENÓRIO

**PROPRIEDADES DE AGREGADOS RECICLADOS CARBONATADOS PARA  
APLICAÇÃO EM CONCRETO**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em estruturas e construção civil da universidade Federal de Alagoas como um requisito para obtenção do grau de mestre em Estruturas.

Orientador: Paulo César Correia Gomes  
Co-orientador: Sérgio Cirelli Angulo

Maceió  
2016

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecário Responsável: Valter dos Santos Andrade**

T312p Tenório, Májores de Omena.  
Propriedades de agregados reciclados carbonatados para aplicação em concreto /  
Májores de Omena Tenório. – 2016.  
106 f. : il.

Orientador: Paulo César Correia Gomes.  
Coorientador: Sérgio Cirelli Angulo.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil : Estruturas) – Universidade Federal  
de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.  
Maceió, 2016.

Bibliografia: f. 100-106.

1. Agregado reciclado. 2. Concreto. 3. Concreto – Absorção de água.  
4. Carbonatação. I. Título.

CDU: 691.32



Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia – CTEC  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC



**ANÁLISE DE PROPRIEDADES DE AGREGADOS RECICLADOS CARBONATADOS  
PARA APLICAÇÃO EM CONCRETO**

**MÁJORES DE OMENA TENÓRIO**

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 22 do mês de dezembro do ano de 2016.

Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes**  
Orientador – PPGEC/UFAL

**Prof. Dr. Wayne Santos de Assis**  
(Avaliador Interno - PPGEC/UFAL)

**Prof. Dr. Silvia Beatriz Beger Uchôa**  
(Avaliador Externo – PROFNIT/UFAL)

## AGRADECIMENTOS

O quão complicado é agradecer, pois em tanto tempo recebi apoio de muitas pessoas, sejam elas ligadas à minha família, ou seja, elas que formaram comigo uma família ao longo dessa jornada que foi o mestrado, tentarei aqui contemplar a todos que me fizeram alcançar este título;

Primeiramente agradeço a Deus, que por muitas vezes me carregou em seus braços e me fez voltar a vida, inclusive gerando outra vida em mim, meu pequeno João Igor Tenório Pereira Godoy, não consigo separar a ação de Deus da vida do meu pequeno homem que, aliás, é fruto do meu amor com meu marido Igor Godoy Pereira, homem forte e carinhoso que me fez descobrir que posso amar alguém além de mim. Sem vocês nada disso teria graça, somos um laço de quatro nós – Eu, Igor, João e Deus, como costumo falar – “Tudo por vocês” e esse título é por vocês.

Agradeço infinitamente ao papai José Tenório de Barros e mamãe Mariza Farias de Omena Tenório porque sem eles durante este tempo eu teria tropeçado nos problemas e sinceramente desistido, porque além de me darem a chance de nascer deu carinho, educação, caráter e exemplo, e este me arrastou a lugares onde nunca imaginei a eles dedico não só esta conquista, mas todas as outras que já vieram e tantas que virão, enfim amo vocês.

À meus irmãos Meijores de Omena Tenório Calheiros e José Tenório de Barros Filho, pois o apoio que recebi de vocês ao longo de minha vida me fez uma pessoa melhor, sempre tive apoio em qualquer momento, fosse uma passagem para um congresso ou somente um incentivo para publicação, uma comemoração a cada artigo aceito, enfim, vocês são meu abrigo de carinho. Não esquecendo os meus cunhados Geovanni Calheiros e Pollyanna Gomes e meus sobrinhos Geovanna Calheiros, Bernardo Tenório e Beatriz Tenório, através de vocês me sinto realizada e feliz.

E agradeço à meus avós Manoel Marinho de Omena, Cícera Farias de Omena e Josefa Tenório de Barros por todo amor emanado durante cada fase que atravesso, seja boa ou ruim, amo vocês.

À meus tios, tias e primos representados em duas grandes famílias: Tenório e Omena, que infelizmente é impossível de nominar todos.

Aos Professores Dr. Paulo César Correia Gomes e à Professora Dr<sup>a</sup> Silvia Beatriz Berger Uchôa, pela dedicação na realização deste trabalho, que sem sua importante ajuda não teria sido concretizado.

Ao Projeto Casadinho/PROCAD por registro 552300/2011-0; Ao Projeto UNIVERSAL/CNPq 483935/2012-3, e ao apoio através da bolsa CAPES.

Aos funcionários do NPT Cícero, Fábio, Flabel, Sidclei, João Alberto, Marco Antonio, Valdemir e Girlei pelo apoio e ajuda em toda fase do trabalho experimental.

Ao coordenador do Lscat – laboratório de sínteses de catalisadores na pessoa do professor Antônio Osimar, e do técnico Bruno Santos, sem eles não seria possível chegar até aqui.

Ao Instituto Federal de Alagoas na pessoa do professor Phabyanno Rodrigues Lima que gentilmente me auxiliou e me apoiou na finalização deste trabalho.

Ao doutorando do IQB – UFAL, Jaceguai Soares que ativamente auxiliou em todas as etapas, fornecendo apoio através do IQB e apoio pessoal em todo momento.

À meus amigos do mestrado, da Faculdade de Tecnologia de Alagoas que me apoiou sempre, dos meus amigos pessoais e aos amigos que conquistei, meu muito obrigada.

*“É difícil expressar o quão penosa, dolorosa e gostosa é a vida, só sei que dela levo marcas comigo que ninguém poderá apagar; Deus em sua infinita graça e bondade atenuou as dores e muitas vezes passou de expectador assíduo a parte atuante dessa minha caminhada, que repito e ratifico – penosa, dolorosa mas gostosa.”*

## RESUMO

O concreto é um material obtido pela mistura de matérias-primas como cimento, agregados e água, e sua utilização per capita fica atrás somente da água. Devido ao seu grande volume de utilização, apresenta-se como crescente gerador de resíduos e de desperdícios dentro da construção civil. A partir da necessidade de se minimizar estes impactos sobre o meio ambiente com a possibilidade de reutilização dos resíduos de concreto, transformando-os em agregados reciclados graúdos de concreto (ARGC). Estes materiais apresentam-se com alta capacidade de absorção de água e baixa massa específica. Uma alternativa para melhorar esta característica é a utilização da carbonatação acelerada, que age através dos poros da argamassa aderida ao agregado natural, produzindo elementos carbonáticos que reduzem a capacidade de absorção de água e aumentam a massa específica. O objetivo desta pesquisa é analisar as propriedades dos ARGC carbonatados para aplicação em concretos. Para isto foi utilizada uma câmara na qual os ARGC foram submetidos a concentrações de dióxido de carbono. A partir da verificação do impacto da carbonatação nas amostras, analisado em ensaios de caracterização mineralógica, térmicas, microscópicas e físicas, usando como valor de impacto determinante do processo, a capacidade de absorção e massa específica, desenvolveu-se a reprodução dos parâmetros da carbonatação em escala para produção de concretos. Foram produzidos: um concreto de referência, com agregados sem carbonatação, e suas propriedades foram comparadas com as amostras de concreto com ARGC carbonatado, e analisadas suas propriedades no estado fresco e endurecido. O ARGC apresentou, em sua forma não carbonatada, alta absorção e baixa densidade, quando comparados ao agregado natural, em contraponto a carbonatação modificou este quadro com a formação de produtos expansivos a base de carbonatos, que diminuíram a capacidade de absorção de água e aumentaram a densidade do ARGC carbonatado quando comparado ao ARGC sem tratamento. A carbonatação através da câmara mostrou-se um método eficiente neste processo, refletindo no comportamento do ARGC, que apresentou diminuição de 16,5% na capacidade de absorção, 1,53% de aumento na massa específica e a formação de carbonatos entre os poros do ARGC. Os concretos apresentaram abatimento fluido, resistência mecânica de 25 MPa aos 28 dias e uma profundidade de carbonatação média de 12 mm.

**Palavras-chave:** Agregado reciclado de concreto. Carbonatação. Absorção de água. Concretos.



## ABSTRACT

Concrete is a material obtained by mixing raw materials such as cement, aggregates and water, and its per capita utilization is only behind water. Due to its large volume of use, it presents itself as a growing generator of waste and waste in civil construction. From the need to minimize these impacts on the environment with the possibility of reuse of concrete residues, transforming them into recycled concrete aggregates (ARGC). These materials are presented with high water absorption capacity and low specific mass. An alternative to improve this feature is the use of accelerated carbonation, which acts through the pores of the mortar adhered to the natural aggregate, producing carbonate elements that reduce the water absorption capacity and increase the specific mass. The objective of this research is to analyze the properties of the carbonated ARGC for concrete application. For this, a chamber was used in which the ARGC were submitted to concentrations of carbon dioxide. From the verification of the impact of carbonation on the samples, analyzed in mineralogical, thermal, microscopic and physical characterization tests, using as determinant impact value of the process, the capacity of absorption and specific mass, it was developed the reproduction of the carbonation parameters In scale for concrete production. They were produced: a reference concrete, with aggregates without carbonation, and their properties were compared with the samples of concrete with carbonated CGA, and analyzed its properties in fresh and hardened state. The ARGC presented, in its non-carbonated form, high absorption and low density, when compared to the natural aggregate, in contrast carbonation modified this picture with the formation of expansive products based on carbonates, which decreased the water absorption capacity and increased The density of carbonated ARGC when compared to untreated ARGC. Carbonation through the chamber proved to be an efficient method in this process, reflecting the behavior of the ARGC, which showed a decrease of 16.5% in the absorption capacity, a 1.53% increase in the specific mass and the formation of carbonates between the pores Of the ARGC. The concretes presented fluid abatement, mechanical strength of 25 MPa at 28 days and a mean carbonation depth of 12 mm.

Keywords: Recycled concrete aggregate. Carbonation. Water absorption. Concretes.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação do avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no decorrer do tempo.....	22
Figura 2: Esquema do equipamento de TG .....	27
Figura 3: Fluxograma com o resumo das etapas realizadas na parte experimental.....	35
Figura 4: Pilha alongada de base triangular; armazenamento em sacos após obtenção das alíquotas; tonel de armazenamento das alíquotas, respectivamente.....	38
Figura 5: Curva granulométrica do agregado graúdo natural.....	39
Figura 6: Curva granulométrica do agregado miúdo.....	39
Figura 7: Gráfico da Curva granulométrica do ARGC .....	41
Figura 8: Amostras em quatro momentos respectivos: a) após remoção dos agregados sem argamassa aderida, b) pesagem em balança de precisão, c) após a saída da mufla e d) após o resfriamento no dissecador .....	42
Figura 9: Moinho de bolas: a) amostrador contendo as esferas de aço juntamente com a amostra de ARGC, b) amostrador sendo colocado no moinho e c) moinho em funcionamento .....	44
Figura 10: Retirada de amostras para análise microscópica utilizando a micro-retífica.....	44
Figura 11: Difratorômetro de raios x e amostrador encaixado pronto para o ensaio.....	45
Figura 12: Equipamento de Tg usado nos ensaios de caracterização térmica.....	46
Figura 13: Equipamento de BET – Teoria de adsorção multimolecular .....	47
Figura 14: Microscópio eletrônico de varredura e metalizador e evaporador usado na metalização das amostras.....	48
Figura 15: Testes feitos na mesma amostra (ARGC não carbonatado) com energias diferentes: 20KV e 5 KV .....	49
Figura 16: Câmara de carbonatação na sua fase inicial de testes .....	50
Figura 17: Câmara com todos os equipamentos de controle e medição de variáveis .....	51
Figura 18: a) Divisão interna de grades metálicas com telas poliméricas e b) câmara fechada e travada .....	51
Figura 19: Procedimentos utilizados para a produção dos concretos .....	55
Figura 20: Execução dos furos na furadeira de bancada .....	58

Figura 21: a) Equipamento e esquema do ensaio, b) Detalhe do vacuômetro e do registro, instalados em um trecho da mangueira.....	59
Figura 22: Análise termogravimétrica da amostra sem carbonatação.....	72
Figura 23: Gráfico com a representação dos picos de reflexão dos compostos encontrados na amostra 01 .....	74
Figura 24: Gráfico com a representação dos picos de reflexão dos compostos encontrados na amostra 04 .....	75
Figura 25: Gráfico com a representação dos picos de reflexão dos compostos encontrados na amostra 01 .....	76
Figura 26:Gráfico com a representação dos picos de reflexão dos compostos encontrados na amostra 02 .....	77
Figura 27: Seqüência de imagens e suas aproximações reproduzidas pelo microscópio eletrônico de varredura - amostra de agregado natural.....	78
Figura 28: Agregado natural analisado pelo EDS referenciando os elementos químicos por coloração.....	79
Figura 29: Gráfico de EDS dos compostos encontrados no agregado natural .....	80
Figura 30: Imagem do ARGC carbonatado (direita) e não carbonatado (esquerda) obtida pelo microscópio eletrônico de varredura .....	81
Figura 31 – Captura da formação da etringita nos poros do ARGC carbonatado.....	82
Figura 32: ARGC analisado pelo EDS referenciando os elementos químicos por coloração..	83
Figura 33: Pré-molhagem e homogeneização do ARGC .....	85
Figura 34: Visualização da consistência do CAN e ensaio de abatimento.....	86
Figura 35: Visualização da consistência do concreto na betoneira e moldagem dos corpos de prova e vibração na mesa vibratória.....	87
Figura 36: Corpos de prova de CAN ensaiados após aspensão de fenolftaleína para análise de profundidade de carbonatação .....	90
Figura 37: Corpos de prova de CARGCNC ensaiados após aspensão de fenolftaleína para análise de profundidade de carbonatação .....	91
Figura 38: corpo de prova de CARGCNC com reação alcalina central.....	92
Figura 39: Corpos de prova de CARGCC ensaiados após aspensão de fenolftaleína para análise de profundidade de carbonatação .....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Intervalos de temperatura em que ocorrem algumas transformações térmicas nos aglomerantes.....	28
Tabela 2 – Compostos do cimento e suas temperaturas de pico encontrados no DTA.....	28
Tabela 3 - Composição do cimento tipo CPIIF-32.....	36
Tabela 4: Caracterização do agregado natural.....	38
Tabela 5: Resultados de absorção e massa específica do agregado natural e do ARGC não carbonatado.....	62
Tabela 6: Resultados de absorção e massa específica do ARGC carbonatado em concentração de 7% em tempos de exposição de 24 e 48 horas nas condição seca.....	63
Tabela 7 - Resultados de absorção e massa específica do ARGC carbonatado em concentração de 7% em tempos de exposição de 24 e 48 horas nas condição úmida.....	64
Tabela 8: Valores de média, desvio padrão e variância da densidade da repetibilidade das amostras geradas no estudo de condição dos ARGC .....	65
Tabela 9: Resultados de absorção e massa específica do ARGC carbonatado 32% em tempo de exposição de 7 e 14 dias na condição seca e suas respectivas réplicas .....	66
Tabela 10: Resultados da média, desvio padrão e variância das amostras carbonatadas em concentração de 32% e tempo de exposição de 7 e 14 dias na condição seca .....	67
Tabela 11: Resultados de absorção e massa específica dos agregados naturais, reciclados de concreto não carbonatos e reciclados de concreto carbonatados.....	68
Tabela 12: Perda de massa do ARGC .....	70
Tabela 13: Resultado do DRX do ARGCCNC submetido a 1000°C .....	70
Tabela 14: Resultado do DRX do ARGCC_32%_14d submetido a 1000°C.....	71
Tabela 15: Perda e ganho de massa em cada fase da TG do ARGCCNC.....	73
Tabela 16: Tabela com os compostos encontrados na amostra 01 de ARGCCNC.....	74
Tabela 17: Tabela com os compostos encontrados na amostra 04 de agregado reciclado de concreto sem tratamento.....	75
Tabela 18: Tabela com os compostos encontrados na amostra 01 de ARGCC_32%_14D .....	76
Tabela 19: Tabela com os compostos encontrados na amostra 02 de ARGCC_32%_14D .....	77
Tabela 20: Traço de produção dos concretos com AN, ARGCCNC e ARGCC_32%_14dias .....	84

Tabela 21: resultado dos ensaios de abatimento de tronco de cone dos concretos com e sem ARGC .....	87
Tabela 22: valores de resistência mecânica média, desvio padrão e variância dos concretos produzidos com ARGC e com agregado natural .....	88
Tabela 23: resultados dos ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica nos concretos endurecidos.....	94
Tabela 24: valores de permeabilidade ao ar pelo método de Figg e tempo de exclusão de ar .	94

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARC	Agregado reciclado de concreto
ARGC	Agregado reciclado graúdo de concreto
ARGCNC	Agregado reciclado graúdo de concreto não carbonatado
ARGCC	Agregado reciclado graúdo de concreto carbonatado
BET	Teoria da adsorção multimolecular
CAN	Concreto com agregado natural
CARGCNC	Concreto com agregado reciclado graúdo de concreto não carbonatado
CARGCC	Concreto com agregado reciclado graúdo de concreto carbonatado
DRX	Difratometria de raios-x
EDS	Sistema de energia dispersiva
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
RCD	Resíduo de construção e demolição
RC	Resíduo de construção
TG	Termogravimetria

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	4
<b>1.1 Justificativa</b> .....	5
<b>1.2 Objetivos</b> .....	6
<b>1.3 Estrutura da dissertação</b> .....	6
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	8
<b>2.1 2.1 RCD</b> .....	8
<b>2.2 ARC</b> .....	10
2.2.1 Caracterização do ARC .....	13
2.2.1.1 Granulometria, absorção de água e massa específica .....	13
2.2.2 Aplicação em Concreto de ARC .....	15
2.2.3 Técnicas de Tratamento de ARC.....	16
<b>2.3 Processo de Carbonatação</b> .....	18
<b>2.4 Aplicação de Técnicas de ensaios avançados</b> .....	26
<b>3. ESTUDO EXPERIMENTAL</b> .....	32
<b>3.1 Programa experimental</b> .....	32
<b>3.2 Materiais e Métodos</b> .....	36
3.2.1 Agregados reciclados de concreto (ARC) .....	36
3.2.1.1 Origem e processo de beneficiamento do resíduo de concreto (RC).....	36
3.2.1.2 Obtenção do agregado reciclado graúdo de concreto (ARGC) .....	37
<b>3.3 Caracterização dos materiais</b> .....	38
3.3.1 Caracterização física do ARGC.....	40
3.3.2 Caracterização Mineralógica, Térmica e Microscópica do ARGC .....	43
<b>3.4 Processo de Carbonatação</b> .....	49
3.4.1 Câmara de carbonatação .....	49
3.4.2 Procedimento de carbonatação das amostras.....	52

3.4.2.1	Determinação dos parâmetros de ensaio de carbonatação .....	53
<b>3.5</b>	<b>Formulação e produção dos concretos .....</b>	<b>54</b>
<b>3.6</b>	<b>Propriedades dos Concretos .....</b>	<b>55</b>
3.6.1	Estado Fresco.....	55
3.6.2	Estado Endurecido .....	56
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>61</b>
<b>4.1</b>	<b>Determinação de parâmetros do tratamento por carbonatação .....</b>	<b>61</b>
<b>4.2</b>	<b>Caracterização Física do ARGC.....</b>	<b>68</b>
4.2.1	Absorção de água e massa específica .....	68
4.2.2	Perda de Massa – Mufla .....	69
<b>4.3</b>	<b>Caracterização Mineralógica, Térmica e Microscópica.....</b>	<b>71</b>
4.3.1	BET.....	71
4.3.2	TG.....	72
4.3.3	DRX.....	73
4.3.4	MEV/EDS.....	77
<b>4.4</b>	<b>Concretos .....</b>	<b>84</b>
4.4.1	Produção dos concretos .....	84
4.4.2	Estado Fresco.....	87
4.4.3	Estado Endurecido .....	88
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>96</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>98</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A partir do crescimento desordenado da população do planeta e as altas densidades populacionais, iniciadas a partir do ano de 1950, e o desenvolvimento econômico dos centros urbanos, iniciou-se o crescimento da demanda por obras estruturantes e habitacionais, gerando impactos ambientais através de intervenções e da geração de resíduos da construção e demolição (RCD).

O setor da construção civil, mesmo mediante a grande importância dentro do setor econômico, sempre manteve seus processos ligados diretamente a perdas e desperdícios. Ao longo dos anos no Brasil a preocupação com o impacto ambiental e de destinação do que produz em nível de resíduo, foi tomando mais espaço, mas ainda de forma lenta e gradual. Quando estas perdas e desperdícios são comparados a outros setores verifica-se uma dificuldade de quantificação do volume produzido pela construção civil, uma preocupação pertinente e de como minimizar cada vez mais esses desperdícios e agir de forma proativa a destiná-los a novas funções.

Segundo a revista construção de mercado a construção civil cresceu em torno de 74,25% nos últimos 20 anos e a geração de RCD no ano de 2013 foi de mais de 117 mil toneladas/dia, apresentando um crescimento de 4,6% em relação ao ano de 2012 (ABRELPE, 2013).

Os RCD são classificados de acordo com quatro classes: Classe A (RCD recicláveis como os agregados); B (RCD recicláveis para outras destinações como plásticos, papel/papelão, metais, entre outros); C (RCD sem tecnologia disponível para a reciclagem e aproveitamento como gesso) e D (RCD perigosos como tintas, solventes, óleos, fibrocimentos com amianto, entre outros) (CONAMA 307, 2002). A classificação dos resíduos de construção e demolição geralmente é dada como inerte.

A utilização apropriada destes resíduos está diretamente vinculada a um processo de transformação e tratamento, para adequação de suas características a novas aplicações estruturais. Inicialmente o RCD é beneficiado e transformado em RGC e posteriormente em ARGC e para que este agregado graúdo reciclado de concreto (ARGC) alcance as dimensões de reutilização ele é levado a um processo chamado de cominuição, executado com o uso de britadores de mandíbula, impacto, bolas, moinho de martelos dentre outros tipos.

Para que uma segurança de análise seja alcançada normas e recomendações definem critérios adicionais a serem cumpridos pelos agregados, como por exemplo, os valores de absorção de água e massa específica (TENÓRIO, 2007). Pois o agregado reciclado graúdo de concreto (ARGC) obtido destas fontes possui características diferentes de porosidade e absorção de água, quando comparados aos agregados naturais, sendo consequência direta da presença de argamassa aderida ao agregado graúdo natural e de sua natureza heterogênea. Esta argamassa carrega uma porosidade que é diretamente proporcional ao fator água/cimento do concreto antigo (ANGULO, 2005), levando também a uma perda de resistência mecânica (TENÓRIO, 2007).

Como consequência, o concreto produzido com os ARGC apresentará grande variabilidade em suas propriedades, tendendo a ser menos trabalhável, menos resistente, e mais deformável, mais poroso e também mais permeável. Porém, pesquisas apontam bom desempenho técnico e de custos em concretos produzidos com agregados graúdos provenientes de ARGC (TAM, 2008; OIKONOMOU, 2005; KOU, POON e CHAN, 2004; BUYLE-BODIN; SKOCZYLAS; WIRQUIN, 2003).

A melhora deste quadro está sendo buscada com o desenvolvimento de técnicas de melhoramento das propriedades do ARGC, de forma a diminuir sua porosidade e absorção de água e aumentar sua densidade, resultando em um agregado com características mais próximas possíveis das do agregado natural. Assim como fez Katz (2004), com aplicação de sílica ativa e limpeza ultrassônica nos ARGC, verificando diminuição efetiva da absorção de água nos concretos produzidos com os ARGC. Já Tam et al. (2004) aplicaram o processo de carbonatação dos agregados reciclados de concreto, constatando que o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) reagiu com o hidróxido de cálcio, resultando na formação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), reação que ocorre dentro dos poros do ARGC. Tal estudo comprovou a diminuição das taxas de absorção de água do ARGC.

## 1.1 Justificativa

A partir da geração de resíduos de concreto pela construção civil e da necessidade de sua destinação, frente a crescente escassez de recursos naturais como fonte de agregados gera-se a necessidade do desenvolvimento de tratamentos para reutilização destes resíduos como novos materiais agregando valor a sua utilização. Para isto, como uma forma de utilização

destes materiais que possuem uma fonte cimentícia em argamassa, diferenciando em qualidade, quando comparado a outros resíduos como os de cerâmica, onde não seria possível uma aplicação voltada a modificação de base cimentícia com a inserção de qualquer tratamento. O tratamento a base de carbonatação em agregados reciclados de concreto apresenta uma alternativa viável pela natureza destes agregados, por possuírem porosidade que possibilita a reação do dióxido de carbono e a conseqüente melhora das características destes agregados frente a sua utilização. O tratamento dos ARC é um meio para melhor utilização dos mesmos, modificando desde as características microscópicas do ARC, refletindo nas suas propriedades, e a durabilidade dos concretos com estes produzidos.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar as propriedades de agregados reciclados carbonatados para aplicação em concreto.

Os objetivos específicos são:

1. Verificar a relação das características físicas e mineralógicas do agregado reciclado graúdo de concreto e a capacidade de absorção de água;
2. Determinação de parâmetros para aplicação no processo de carbonatação de agregados reciclados graúdos de concreto;
3. Utilização de técnicas para análise microscópica, mineralógica e química das estruturas dos agregados reciclados de concreto carbonatados e não carbonatados;
4. Avaliação de melhoras de propriedades com o uso dos agregados reciclados graúdos de concreto carbonatados.

## **1.3 Estrutura da dissertação**

A dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos:

Capítulo 1: Introdução do trabalho, onde é apresentada uma breve discussão sobre o estado da arte envolvendo generalidades sobre os resíduos e suas características e fontes. Contam também a justificativa do trabalho e os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre o resíduo de construção e demolição (RCD), sua geração e obtenção, características dos agregados reciclados de concreto e tipos de tratamento, carbonatação de agregados reciclados de concreto, revisão bibliográfica sobre técnicas mineralógicas, químicas e microscópicas para análise dos agregados e por fim, revisão bibliográfica englobando o emprego destes agregados em novos concretos e seus métodos de dosagem.

Capítulo 3: Planejamento experimental executado nesta pesquisa, apresentando os métodos empregados nos ensaios, desde os executados nos agregados até a produção e análise dos concretos produzidos com estes, incluindo os procedimentos de carbonatação;

Capítulo 4: Apresentação dos resultados e discussões dos experimentos empregados neste trabalho bem como a comparação entre as propriedades encontradas nos agregados naturais, agregados reciclados graúdos de concreto não carbonatados e agregado graúdo de concreto carbonatado. Bem como apresentação dos resultados dos concretos produzidos com estes;

Capítulo 5: Conclusões do trabalho e sugestões para continuação das pesquisas.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 RCD

Muitos autores referem o termo RCD para resíduos de construção e demolição, já outros citam estes como sendo entulhos. No tocante a definição, existe discordâncias não só quanto a abrangência das frações presentes como também as atividades geradoras dessas frações (ANGULO, 2000). O conceito de RCD proposto por Angulo (2000, p.8) é “todo e qualquer resíduo oriundo das atividades de construção, seja ele de novas construções, reformas, demolições, que envolvam atividades de obra de arte, solos ou resíduos de vegetação”. Já Levy (1997) apud Angulo (2000) propõe um conceito para entulho chamando este como a parcela mineral dos resíduos provenientes das atividades de construção e demolição.

O resíduo da construção e demolição é gerado em várias etapas que ocorrem dentro do ciclo de vida das construções: fase de canteiro, na fase de manutenção e reformas e na fase de demolição de edifícios (PINTO E GONZALES, 2005 *apud* CARELI, MIRANDA E ANGULO, 2009). Na fase de canteiro é decorrente das perdas dos processos construtivos, já na fase de manutenção a geração de resíduo ocorre em partes, a depender do tempo da estrutura, basicamente em correção de patologias, reformas ou modernização do edifício e descarte de componentes comprometidos estruturalmente. A fase de demolição é a que mais gera estes resíduos, já que toda a estrutura será levada a ruptura (JOHN E AGOPYAN, 2000).

Segundo Pinto (1999) as grandes cidades brasileiras têm sua geração de resíduo em 50% advinda de canteiros de obras enquanto que a atividade de demolição e a manutenção são responsáveis pela outra metade.

A geração do RCD ocorre em diversas fases: inicialmente a fase de geração advém de perdas no processo construtivo, onde parte dela permanece incorporada no processo construtivo sob a forma de componentes que acabam ficando superdimensionados (FORMOSO et al, 1998 *apud* VIEIRA; MOLIN, 2004), e na etapa de demolição onde ocorre a geração dos resíduos dependendo do prolongamento da vida útil de seus componentes, que por sua vez dependem das tecnologias e materiais utilizados, da existência dos incentivos para que os proprietários realizem modernizações e não demolições, e da existência de

procedimentos eficazes para a reutilização de componentes (JOHN, 2000 *apud* VIEIRA; MOLIN, 2004).

Bossinc *et al* (1996) *apud* John (2000) apresenta estimativas de geração de resíduo em países da Europa Oriental e Alemanha de forma que 2/3 são provenientes de manutenção e demolições e o restante de atividades de construção. Já nos EUA estima-se que apenas 8% dos RCD sejam provenientes de atividade de construção, e que 33% provêm de demolições não residenciais (JOHN, 2000).

Os RCD possuem uma grande variedade e heterogeneidade de composição, já que sua fonte de formação em sua maioria não é conhecida, porém, o objetivo da reutilização deve ser alcançado e suas características melhoradas. Para que sejam utilizados os RCD devem ter suas dimensões reduzidas, através de britagem, que pode ocorrer no chamado circuito aberto ou circuito fechado. No circuito aberto o material passa somente uma vez pelo britador, já no fechado os materiais passam no britador até atingirem seu tamanho máximo desejado para aplicação (BALIISTA, 2003 *apud* HOOD, 2006).

A partir da grande geração destes resíduos gera-se a necessidade que estes sejam beneficiados e reutilizados em novas funções. O beneficiamento destes é feito com equipamentos ligados diretamente a mineração, que são adaptados ou simplesmente utilizados na reciclagem, chamados de britadores. Não existe ainda um tipo específico de britador que seja melhor adequado as condições de geração de resíduo, mais eficiente ou com características diferenciadas a partir deste processo (LIMA, 1999). Existem basicamente três tipos de britadores: os de impacto, os de mandíbulas e os de martelo.

A característica do britador de impacto é a cominuição de partículas grandes confinadas em uma câmara de britagem que são lançadas a partir de um rotor central, chocando-se entre si e entre as paredes da câmara, neste processo a cominuição acontece de forma a não desgastar tanto o material já que a maior parte do impacto ocorre entre as partículas do próprio material. Para este tipo de britador o mais indicado é a utilização para cominuição de resíduos que irão ser reutilizados para uso em pavimentação (HANSEN, 1992 *apud* LIMA, 1999).

Já o britador de mandíbulas rompe as partículas por compressão (esmagamento), e são bastante utilizados como britadores primários, pois mesmo com a possibilidade de marcação de uma dimensão final de saída sua sensibilidade a este controle é pouca, pela característica do processo empregado. Aqui são produzidas muitas partículas finas oriundas da

desagregação dos resíduos pelo esmagamento. Com o uso deste equipamento obtêm-se melhores curvas granulométricas do agregado reciclado para uso em concreto, quando este o resíduos processado é de concreto estrutural (HANSEN, 1992 apud LIMA, 1999).

O britador mais utilizado na fase secundária de geração destes resíduos é o de martelos, a ruptura dos grãos ocorre por impacto de martelos e placas de impacto fixas, neste equipamento são produzidas partículas finas e a saída dele não permite a saída de partículas de tamanho maior.

A escolha do britador e a fase na qual deve ser utilizada respondem muito em que faixa granulométrica o agregado produzido com o resíduo deverá se encaixar, bem da verdade é necessário adequar a característica advinda da fonte do resíduo com seu processo de cominuição, pois após o processo a reutilização do que foi gerado vai depender de sua qualidade e constituição.

A partir do processo de britagem o resíduo será transformado em agregado, e é neste ponto que é separado de acordo com sua formação, pois possuem ampla constituição como solos, materiais cerâmicos, materiais metálicos e materiais orgânicos, concreto, a proporção entre essas fases é variável e depende diretamente da origem deste resíduo (JOHN E AGOPYAN, 2000). Produtos de diferentes origens e natureza podem ser identificados dentro deste material, bem como agregados advindos de estruturas de concreto armado que foram demolidas, na fase de geração do resíduo. A estes agregados dá-se a caracterização de serem nobres, pois apresentam maior resistência mecânica ligada diretamente a sua formação: agregado natural aderido a argamassa de cimento, apresentando alta porosidade e conseqüente baixa massa específica e alta absorção de água.

## **2.2 ARC**

O agregado reciclado de concreto (ARC) é um material obtido a partir do beneficiamento de resíduos de concreto (RC). Segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004) o conceito de agregado reciclado é “material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para aplicação em obras de edificação e infra-estrutura”. De forma que com as informações visuais do RCD não é possível fazer uma classificação de sua composição química e mineralógica, porém pode-se supor que a dureza dos agregados irá certamente alterar a

distribuição das espécies químicas e fases minerais ou cristalinas ao longo das frações granulométricas (ANGULO, 2005). A norma classifica o ARC como classe A, sendo composto em sua fração graúda, de 90%, em massa, de fragmentos de cimento Portland e rochas (NBR 15116, ABNT 2004).

Por sua natureza heterogênea e com argamassa aderida a um agregado natural, suas características microscópicas, físicas e químicas são diversas. O ARC apresenta alta taxa de absorção de água, associada diretamente a porosidade da argamassa aderida ao agregado natural, o que conduz a valores baixos de massa específica, resultando em um agregado que necessita de tratamento para possivelmente ser reutilizado em misturas de concreto. A natureza do agregado reciclado não o faz necessariamente inerte, pois a interação de suas propriedades físicas, térmicas e, às vezes, químicas possuem influência direta no desempenho e durabilidade do concreto (NEVILLE, 1997).

Como exposto por Angulo (2000), os agregados reciclados apresentam a característica de absorção de água, porém não deve ser utilizada como parâmetro único, uma vez que seu valor é resultado de diversas fases do agregado, devendo utilizar uma combinação com outros métodos para conclusões sobre o agregado.

Os valores de densidade do agregado, em comparação com o agregado natural, apresentaram um comportamento esperado, visto a natureza do ARC apresentar argamassa aderida e conseqüentemente uma maior capacidade de absorção de água e menor massa específica, conduzindo a uma qualidade mais baixa quando comparado ao agregado natural (ZHAN *et al*, 2013). Os valores de densidade estão intimamente ligados a porosidade do ARC, presente na matriz do concreto formador, é influenciada pela pasta de cimento hidratada, aderida a sua superfície do agregado, conduzindo a uma capacidade de absorção de água maior do que a de um agregado natural (ÂNGULO, 2005).

Análises feitas através de um microscópio eletrônico de varredura comprovam a existência de muitos poros na superfície do ARGC (TAM ET AL. 2005), comprovando muitas vezes a ligação direta entre porosidade e capacidade de absorção de água do agregado reciclado, podendo ser esta maior quanto maior for a existência de poros, dependendo da condição de conexão destes poros.

Katz (2004) afirma em seu trabalho que a matriz antiga do concreto se fraciona durante o processo de britagem e, o material resultante deste processo possui uma quantidade



elevada de partículas aderidas à sua superfície, impedindo a adesão da nova pasta de cimento, trazendo conseqüências diretas na resistência dos novos concretos.

Frondistou-Yannas (1977) apud Gonçalves (2001) realizou a primeira pesquisa com o ARGC, em substituição total ao agregado graúdo natural, em novos concretos. O ARGC utilizado teve como origem uma laje de concreto com aproximadamente dois anos e dimensão máxima característica de 25,4 mm. O resultado obtido pela pesquisa foi de concretos com resistência 14% mais baixa que a do concreto de referência e diminuição do módulo de elasticidade em torno de 60% em relação ao concreto de referência. Como resultado observou-se a diminuição no módulo de elasticidade.

Segundo Angulo (2005), a porosidade global do concreto com agregados reciclados deve ser atenuada por teores controlados de substituição do agregado natural por agregado de RCD, ou pela redução da porosidade do agregado de RCD através de melhoramentos, tornando sua qualidade compatível, ou muito próxima, a do agregado natural.

Frente as pesquisas dos autores Ravindrarajah et al.(1987), Hansen; Narud (1983), vê-se que alguns defendem que a qualidade de novos concretos não depende da qualidade do ARGC e que o mesmo não influencia na resistência dos concretos, outros afirmam que esta relação é diretamente proporcional, levando a uma conclusão de que a interação de resistência de concretos produzidos com ARGC deve ser feita de forma a analisar parâmetros mais específicos como módulo de elasticidade e capacidade de retração. Concretos produzidos com ARGC necessitam de análise de porcentagem de substituição e definição de tratamento anterior ao uso do ARGC, como a pré-molhagem, por exemplo, diminuindo a interação do agregado com a água de amassamento, compensando parte de sua capacidade de absorção de água.

Leite (2001) propõe que a pré-molhagem seja feita baseada na capacidade de absorção dos agregados reciclados, de forma que a partir da curva de absorção a água deve ser fornecida aos agregados antes da produção do concreto, em um tempo de 10 minutos de contato com o volume de água. A partir disto atenuando a interação do agregado reciclado com a água de amassamento, melhorando a trabalhabilidade e o abatimento do concreto.

### 2.2.1 Caracterização do ARC

No Brasil, os resíduos de concreto correspondem a uma parcela significativa dos RCD, sua reciclagem na forma de agregados é uma alternativa interessante para aumentar a oferta de materiais de construção, podendo ser usados como agregados (GRUBBA, 2009).

#### 2.2.1.1 Granulometria, absorção de água e massa específica

Os agregados reciclados de concreto são materiais diferentes em sua granulometria, capacidade de absorção de água e massa específica, quando comparados aos agregados naturais. Estas características estão intimamente ligadas ao seu processo de obtenção e sua fonte geradora, pois estes vão definir sua constituição, dimensão e forma. A forma dos agregados reciclados de concreto é mais angular do que os agregados naturais e esta característica, juntamente com sua distribuição granulométrica, exerce influência direta no volume de pasta necessário para garantir a plasticidade especificada, para uma determinada mistura de concreto (SIMIELE, 2010; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A dimensão máxima característica do agregado graúdo, está intimamente ligada com a área superficial por unidade de volume, que deve ser coberta pela pasta de cimento para uma dada relação água cimento, sendo quanto maior o  $D_{m\acute{a}x}$  menor a área superficial por unidade de volume, onde devem ser recobertas pela pasta de cimento para uma dada relação a/c (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Lima (1999) os equipamentos e as operações unitárias, aos quais os ARC são submetidos, possuem uma influência direta sobre a classificação e composição, teor de impurezas, granulometria, forma e resistência dos grãos do agregado reciclado. E citou ainda que o peneiramento também influencia na granulometria do ARGC.

Muitos estudos têm observado o comportamento diretamente proporcional da granulometria do ARGC e sua absorção; de forma que a absorção de água é maior quando se tem frações menores de granulometria (POON; CHAN, 2006; HANSEN E NARUD, 1983 APUD TENÓRIO, 2007). Ainda segundo estes autores os maiores valores de absorção são encontrados em grãos de menor tamanho, associando também a quantidade de argamassa aderida ao grão, de forma que quanto mais argamassa aderida maior será sua capacidade de

absorção de água. A presença de argamassa aderida no agregado graúdo traz uma porosidade maior e através dela a absorção se processa com maior facilidade.

A absorção de água é uma medida parcial da porosidade do concreto, pois vazios muito pequenos, como é o caso dos intersticiais, não são passíveis de serem medidos pela absorção (MOREIRA, 2010). A característica de absorção do agregado graúdo reciclado de concreto influencia diretamente na durabilidade do concreto produzido (ANGULO, 2005).

Segundo Carneiro *et al.* (2001) apud Grubba (2009) o comportamento frente a absorção de água é a principal diferença entre os agregados naturais e os agregados reciclados de concreto. O intervalo de valores típicos de absorção do ARGC varia de 2% a 6% para agregados reciclados graúdos e de 4% a 8% para agregados miúdos.

A NBR 15116 (ABNT, 2004) cita requisitos de emprego de ARC em preparo de concretos sem função estrutural, onde o valor de absorção limite para que estes sejam utilizados é de 7% e o teor de fragmentos a base de cimento seja  $\geq 90\%$ .

Em preparos de concreto incorporam-se partículas de diversos tamanhos. Quando a exigência de qualidade deste é maior, é utilizada grande variedade de tamanhos, sendo denominada de brita corrida ou brita graduada. Quando a exigência de qualidade é alta a alternativa é obter um agregado composto com pelo menos dois grupos de tamanho, respeitando o limite imposto por norma que é de 4,8mm máximo para agregado miúdo e 4,8mm mínimo para agregado graúdo (SIMIELE, 2010).

Sim e Park (2011) conseguiram correlacionar à resistência a compressão de argamassas a partir de sua absorção, de forma que obtiveram concretos com substituições de agregados naturais por reciclados e verificaram que em porcentagens de substituição de 100% a resistência a compressão diminuiu cerca de 33%, e uma das razões governantes de sua diminuição foi atribuída a taxa de absorção de água dos agregados reciclados de concreto.

Segundo Tsujino *et al.* (2006) a existência de uma amostra considerável de pasta de cimento no agregado reciclado de concreto é a grande responsável por sua capacidade de absorção de água, característica negativa para estes materiais. Segundo Angulo e John (2005) a porosidade e absorção dos ARGC controlam o comportamento mecânico do concreto produzido com relação água/cimento constantes.

Para Silveira e Nóbrega (2006) o agregado graúdo é a fase que mais influencia a densidade, o módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto, sendo estas propriedades que o concreto apresenta que mais são influenciadas por características físicas,

do que químicas da estrutura do agregado, tais como volume, tamanho, forma, granulometria e distribuição dos poros.

### 2.2.2 Aplicação de ARC em Concreto

As pesquisas desenvolvidas sobre a utilização de ARC em novas misturas mostram em sua maioria uma análise positiva sobre seu comportamento mecânico frente à resistência a compressão, e chamam atenção pela viabilidade técnica demonstrada em torno destas pesquisas, ou seja, a substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados tem sido uma alternativa interessante na produção de novos concretos, indicando uma rota viável para destinação de agregados reciclados de concreto. De fato, estes agregados necessitam de uma atenção a mais antes de sua utilização, alguns procedimentos de ajuste de qualidade são executados a fim de melhorar o desempenho destes agregados (VIEIRA; MOLIN, 2004).

Como o procedimento de pré-molhagem dos agregados proposto pela NBR 15116 (ABNT, 2004) e citada por Leite (2001), na qual a água de absorção dos agregados reciclados de concreto é misturada minutos antes da utilização destes agregados no concreto, este procedimento fez com que o agregado não se utilizasse da água de amassamento existente na constituição do concreto, conduzindo a uma trabalhabilidade maior e a conseqüente melhora no abatimento.

Chen *et al.* (2003) *apud* Vieira; Molin (2004) desenvolveu a produção de concretos com agregados reciclados graúdos de tijolos de concreto, dividindo em dois tipos de interferência no agregado: lavando e não lavando o ARC; o resultado dos concretos na qual os ARC foram lavados foi de obtenção de 90% da resistência à compressão à flexão dos concretos de referência (estes produzidos com agregado graúdo natural). Já o concreto produzido com os ARC não lavados alcançou somente 75% desta resistência. Neste estudo nota-se o quão importante é interferir no comportamento dos ARC a fim de adequá-lo para pertencer a novas matrizes de cimento.

O estudo desenvolvido por Sim; Park (2011) propôs a obtenção de concretos produzidos com diferentes porcentagens de substituição do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado e foi constatado que em substituições acima de 50% a resistência a compressão dos concretos era diminuída e em substituições menores que 50% a resistência aumentou. Concretos produzidos com fatores a/c de 0,77; 0,53 e 0,35 e proporção de

substituição em no máximo 50% apresentaram uma absorção em torno de 5,1% (KATZ, 2004).

Porém Zhan *et al.* (2013) afirmam que a porcentagem máxima de substituição do agregado natural pelo reciclado de concreto deve ser de 20%, ressaltando que não pode haver substituição do miúdo natural em nenhuma porcentagem.

Os autores como Bazuco (1999) apud Gonçalves (2001), Angulo (2000), Leite (2001), Butler (2003), Gómez-Soberón (2003), Katz (2003), Lovato (2007), Cabral (2007), Padamini et al. (2009), Hui-Shenget al. (2009), estudaram o comportamento do concreto com agregados de ARC. Estes estudos têm mostrado que a inserção dos agregados reciclados de concreto altera as propriedades do concreto. Justamente pela existência da argamassa aderida ao agregado natural, que traz ao agregado graúdo reciclado de concreto um comportamento diferenciado mediante as propriedades de absorção, permeabilidade e resistência.

Knaack e Kurama (2011) fizeram a substituição do agregado natural pelo agregado graúdo reciclado de concreto, executando 42 misturas com porcentagens de substituição diferentes. O resultado obtido foi à ocorrência de uma melhora na trabalhabilidade, a depender do método de mistura, e a resistência a compressão e o módulo de elasticidade, em todas as porcentagens, apresentaram pouca variação em relação ao concreto com agregados naturais. Os agregados utilizados foram frações finas e grosseiras do agregado natural e dois tipos de agregados reciclados. Os ARC foram obtidos de duas fontes: a primeira fonte veio de pré-moldados que foram ensaiados a fadiga no laboratório de estruturas da Universidade de Notre Dame. A segunda fonte veio de uma reciclagem de um estaleiro localizado em South Bend, Indiana, este último com muitas substâncias deletérias. A preparação dos agregados foi feita com a lavagem em água natural e secagem em estufa em 110 graus Celsius e um tempo de exposição de 24 horas. O fator água /cimento variou entre 0,3 e 0,5. Os valores do teste de *slump* para o concreto com substituição de 100% ficou em torno de 4 cm.

### 2.2.3 Técnicas de Tratamento de ARC

Os agregados reciclados de concreto possuem em sua constituição mais de 90% de resíduo de concreto, argamassa e pedra natural, e por este motivo é considerado material misto, porém de nobreza ligada diretamente aos materiais de sua composição (GRUBBA, 2009). Com intuito de melhorar as propriedades da superfície destes materiais, técnicas vêm

sendo desenvolvidas objetivando a diminuição da porosidade superficial, ligada diretamente a sua capacidade de absorção de água e a conseqüente melhoria de seu desempenho em novas misturas.

Com base nisto Tam; Tam (2005) utilizaram uma técnica de melhoramento utilizando pasta de silano aplicada à superfície do agregado reciclado de concreto com o intuito de diminuição da porosidade e aumento da densidade dos ARGC; como conseqüência desta utilização verificou-se influência nas propriedades de durabilidade: absorção, profundidade de carbonatação e penetrabilidade de cloretos; estas foram menores quando comparadas com agregados reciclados de concreto sem tratamento.

Já Tsujino *et al.* (2007), fizeram um estudo experimental de tratamento de ARGC propondo duas alternativas de tratamento a base de aplicação de solução química na superfície do agregado, através de processos de molhagem e secagem: utilizando aplicação de óleo mineral a base de parafina, que reage através de reações de saponificação, em presença de íons cálcicos resultando em uma fina camada de sal de metal alcalino sobre a superfície do ARGC; e a utilização de uma solução aquosa a base de silano, gerando uma película polimérica reticulada. Os resultados de maior valor de absorção de água foram os do ARGC sem tratamento, denominado no trabalho de “ARGC de baixa qualidade”, 5,48% sendo diminuído para 1,07% quando passado pelo tratamento a base de silano e reduzido para 3,5% quando submetido ao tratamento com óleo mineral. O comportamento frente ao tratamento dos ARGC a base de silano obteve também uma maior resistência a penetração do dióxido de carbono, quando analisado em processos de carbonatação. Este tratamento mostrou-se eficaz já que o comportamento dos agregados reciclados conseguiu ser controlado.

Katz A. (2004) por sua vez produziu ARGC a partir de três concretos, com fatores água cimento de 0,77, 0,53 e 0,35, britados pelo britador de mandíbulas e peneirados apresentando dimensão final de 4,75 – 19 mm. Os valores de absorção destes ARGC foram de 5,1%, 5,5% e 5,3%, e massa específica foram 2,48 g/cm<sup>3</sup>, 2,41 g/cm<sup>3</sup>, 2,46 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. A proposição do autor para tratamento foi em duas alternativas distintas: usando impregnação de solução de sílica ativa (concentração de 10% e sílica com BET de 25,8 m<sup>2</sup>/g) através de processo de molhagem e secagem, e utilizando-se de um processo de limpeza ultrassônica, que através de equipamento específico faz o processo de molhagem (10 min) e secagem (10 min) retirando todas as partículas aderidas ao ARGC; Ambos com o intuito de melhorar as características do ARGC para reutilizá-lo em novas concretos. Com os

ARGC tratados o autor produziu novos concretos, utilizando areia natural e todo o volume de gráudo utilizando os ARGC tratados nos dois processos e um de referência usando ARGC não tratado, utilizando para o ARGC tratado com sílica um fator a/c de 0,53 e o para o ARGC tratado com limpeza ultrassônica um fator a/c de 0,55. Como resultado o autor observou uma boa trabalhabilidade no concreto produzido com ARGC tratado com sílica, tendo uma consequência da ação da sílica nos poros do ARGC ocupando os vazios e permitindo que a água da mistura fique livre para a trabalhabilidade, sem interferir no fator água/cimento, e a resistência mecânica a compressão apresentou aumento de 30% - 15% nos concretos produzidos com ARGC tratado com sílica e aumento de 7% nos concretos produzidos com ARGC tratados com limpeza ultrassônica.

### **2.3 Processo de Carbonatação**

As alternativas de tratamento e os estudos desenvolvidos a partir a utilização de dióxido de carbono vêm evoluindo e tomando cada vez mais espaço dentro da égide que busca o melhoramento do comportamento dos agregados reciclados de concreto, visando a reutilização destes em novas misturas, unindo a tudo isto também uma compensação ambiental pelas altas taxas de emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera em diversos processos, como na produção do concreto (THIERY *et al.*, 2013). Este processo pode ocorrer de forma natural ou da forma acelerada.

O processo de carbonatação é uma reação química entre hidróxidos de sódio, potássio e cálcio com ácido carbônico, onde o produto desta reação será um carbonato e a consequente redução do pH ligado a solução dos poros do concreto. Ocorre de forma natural em estruturas de concreto, expostas ao ambiente, avançando lentamente através dos poros do concreto endurecido, com um avanço intimamente ligado a facilidade que o CO<sub>2</sub> tem de difundir-se no concreto (POSSAN, 2004).

O progresso da carbonatação somente será possível com o consumo total de Portlandita existente na zona da interface para a formação do carbonato de cálcio, pois o teor remanescente de Portlandita é um dos fatores que restringe a difusão do dióxido de carbono na estrutura porosa da matriz (HELENE, 1993).

A incidência do dióxido de carbono nos agregados é feita em ambientes fechados e suas concentrações excedem as encontradas em ambientes abertos, mas mostra-se uma solução de melhora significativa dos agregados possibilitando assim sua utilização em novas misturas de concreto, substituindo parte dos agregados naturais (ZHAN *et al.*, 2013).

De forma geral pode-se definir o processo de carbonatação como sendo a neutralização da fase líquida intersticial saturada do hidróxido de cálcio e outros compostos da matriz do cimento, já hidratados, pelo dióxido de carbono que precipita como carbonato de cálcio na presença de água em forma de umidade (POSSAN, 2010).

Dentro da matriz da argamassa aderida ao agregado natural tem-se a presença do hidróxido de cálcio, produto da hidratação do cimento, que quando reage com o dióxido de carbono forma um sólido volumoso: o carbonato de cálcio. Outro produto proveniente do cimento é o CSH, composto que ainda não se hidratou a sua reação com o dióxido também produz carbonato de cálcio, porém um subproduto diferente da água é gerado em forma de gel que possui uma baixa relação cálcio/sílica (ZHAN ET AL., 2013).

A produção do carbonato de cálcio através da carbonatação acelerada diminui a porosidade e absorção de água, aumentando a densidade do agregado graúdo reciclado de concreto (ZHAN *et al.*, 2013). Tal processo pode ser demonstrado de acordo com as equações 1 e 2.

$$\text{CSH} + \text{Equação 2}$$

O Carbonato de cálcio em sua forma mineral, aparece no cimento em forma de calcita, vaterita e raramente na forma de aragonita (SMOLCZYK, 1976 *apud* POSSAN, 2010), quando na forma de calcita é a mais estável, e quando na forma de vaterita e aragonita se transforma em calcita no decorrer do tempo (BAROGHEL-BOUNY, 1994 *apud* POSSAN, 2010).

Segundo Stepkowska et al. *apud* Possan (2010) a calcita está presente na camada superficial do cimento hidratado e a relação Mg/Ca influencia a forma do  $\text{CaCO}_3$ , diminuindo a cristalinidade com o aumento dessa relação.

A umidade relativa do ar afeta diretamente a profundidade de carbonatação, quando abaixo de 50% pela ausência de água para dissolução do  $\text{CO}_2$ , e na condição de saturação (100%), pois a difusão é muito pequena. Em muitos estudos os ensaios de carbonatação



acelerada acontecem em umidades relativas compreendidas entre 50% e 85%, sendo 70% a mais utilizada (PAULETTI *et al.*, 2006).

Quando a temperatura da carbonatação fica entre 20°C - 40°C exerce pouca influência no processo, pois neste intervalo a carbonatação ocorre quase que exclusivamente por difusão (PAPADAKIS *et al.*, 1991b *apud* PAULETTI *et al.*, 2006). Por conta disto autores indicam que se inicie a carbonatação em concentração de CO<sub>2</sub> menor que 20%, pois se acredita que em concentrações próximos a saturação (100%) ocorra mudanças estruturais, não ocorrendo em concentrações menores (Pauletti *et al.*, 2006).

Os fatores ambientais possuem grande influência no avanço da frente de carbonatação, porém a maior se dá pelo encaixe das características do material a ser carbonatado, como fator a/c, com as condições de exposição ao CO<sub>2</sub>. De fato verifica-se uma tendência afirmativa sob a idéia de que existe uma concentração de CO<sub>2</sub> na qual conduz uma eficiente penetração do gás no concreto, sem interferir em sua composição estrutural.

Os concretos expostos em ambientes naturais (0,03% a 1% de CO<sub>2</sub>) podem passar até anos para que a carbonatação apresente dados passíveis de análise, sendo diretamente proporcional ao fator água/cimento e da composição química do cimento (PAULETTI *et al.*, 2006).

Existe uma ligação muito grande entre carbono e oxigênio e a porosidade do concreto, de forma que o mesmo parâmetro pode ser utilizado para mensurar a carbonatação do material, já que fatores de porosidade presentes na matriz do concreto, modo de mistura, umidade da mistura e quantidade de água, determinam o comportamento do ARC mediante o processo de carbonatação (TAM *et al.* 2005). A pasta de cimento aderida ao agregado natural, formando o agregado reciclado, é mais porosa do que o agregado aderido a ela, conseqüentemente o conteúdo de cimento é um índice de qualidade do ARGC (TSUJINO *et al.*, 2006).

Em temperaturas favoráveis, átomos e moléculas podem ser bastante móveis em líquidos e sólidos, podendo ocorrer um processo de migração destes de ambientes mais concentrados para ambientes menos concentrados, a este processo dá-se o nome de difusão. Este processo quando ocorre em baixa velocidade em materiais no estado sólido (SHACKELFORD, 2008).

A permeabilidade ao ar dos concretos, quando produzidos com agregados naturais, é governada pela porosidade da pasta de cimento, mas esta relação também leva em

consideração a distribuição destes poros. Para um determinado grau de hidratação a permeabilidade apresenta-se menor em pastas de cimento com relações água/cimento menores, em especial em relações em torno de 0,6; pois nestes casos os poros se tornam segmentados ou descontínuos, é interessante ressaltar que a utilização de agregados com maior porosidade conduz a um concreto mais poroso (NEVILLE, 2013).

A qualidade da difusão do  $\text{CO}_2$  através dos poros do ARGC é direcionada pela matriz do concreto e diretamente proporcional ao modo de mistura utilizada, a umidade da mistura e a quantidade de água utilizada na fabricação do concreto fonte (TAM; GAO; TAM, 2005).

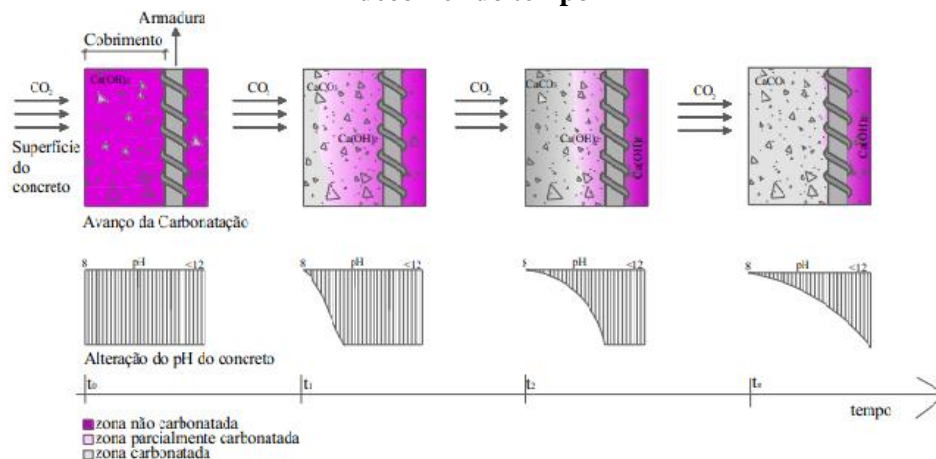
A taxa de difusão do  $\text{CO}_2$  depende de fatores como porosidade total, tamanho e distribuição de poros, quantidade de água, cimento, agregados, cura, idade, temperatura, concentração de  $\text{CO}_2$  e umidade relativa, entre outros fatores (PAPADAKIS *et al.*, 1992; SAETTA; VITALIANI, 2004 *apud* CAFANGE, 2011).

Segundo Cafange (2011) se os poros da pasta de cimento hidratado estiverem preenchidos com água, a difusão será mais lenta ainda, pois quando ocorre através da água se processa quatro ordens de grandeza mais lenta do que através do ar, por outro lado se essa água for insuficiente o dióxido de carbono permanece na forma de gás e não reage com o cimento hidratado. A velocidade de carbonatação depende, em sua maioria, da umidade do concreto e esta varia com a distância a superfície da estrutura.

A carbonatação de estruturas de concreto armado é um dos principais fenômenos químico-físico que pode interferir de forma limitante a vida útil das estruturas de concreto e é um dos principais mecanismos de envelhecimento natural do concreto (CAFANGE, 2011). O concreto é uma mistura com pH básico, em torno de 12,5, a partir e por causa desta característica é formado um mecanismo natural de proteção de armaduras denominado de película passivadora. Esta película é a grande defesa e garantia de que as armaduras não sofreram corrosão (CASCUDO, 1997). O dióxido de carbono, composto ácido, reage com os compostos de caráter básico, hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), em presença de umidade, presentes na fase aquosa do concreto levando ao processo de corrosão generalizada (HELENE, 1998) e diminuição do pH para meados de 8,5 (MEHTA e MONTEIRO, 2008; CASCUDO, 1997). Os mecanismos de ingresso do dióxido de carbono na estrutura de concreto armado são determinados pela porosidade do concreto e ocorrem através do processo de absorção capilar, difusão (CAFANGE, 2011), permeabilidade e por gradiente de pressão (HELENE, 1992).

Segundo Shackelford (2008) a velocidade da difusão de gases em corpos sólidos é menor do que em líquidos, fazendo com que a carbonatação se processe com velocidades consideradas lentas (CASCUDO,1997). A ação dos agentes agressivos destrói essa película, gerando na estrutura o processo de corrosão, que pode ser pontual, quando causada pela presença de cloretos, ou generalizada, quando causada pela ação do dióxido de carbono, sendo conhecida como carbonatação. Geralmente a carbonatação do concreto é a condição essencial para o início da corrosão das armaduras. A redução da alcalinidade do  $\text{Ca(OH)}_2$ , presente na superfície das estruturas também advém do processo de carbonatação (CASCUDO, 1997), este processo pode ser visto na figura 1.

**Figura 1: Representação do avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no decorrer do tempo**



Fonte: Adaptada de CAFANGE (2011)

A carbonatação se inicia a partir da superfície do concreto em direção ao interior do concreto, alterando não só a alcalinidade da mistura como também a estrutura porosa do material, devido à precipitação de carbonatos.

A ação do  $\text{CO}_2$  no concreto gera três zonas diferentes de *frente de carbonatação*, são elas: carbonatada, parcialmente carbonatada e uma não carbonatada. Tal frente pode ser visualizada com a utilização de um indicador apropriado na área recém exposta do concreto, como a solução aquosa-alcóolica de fenolftaleína a uma concentração de 1%, que na zona carbonatada toma uma cor vermelho-carmim na região que permanece alcalina (GENTIL, 2003).

No tempo inicial não existe nenhuma ação do  $\text{CO}_2$  na estrutura, sem zona carbonatada, mas a partir do ingresso do dióxido de carbono na estrutura, através da cadeia de

poros, ocorre a reação deste com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), proveniente do cimento, formando o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (HELENE, 1993).

A diminuição da alcalinidade não é prejudicial para o concreto em si, mas para as estruturas de concreto armado pode se tornar crítica para a corrosão da sua armadura, isto acontece em presença de água, diferença de potencial e acesso ao oxigênio (PAULETTI, 2009; BOHNI, 2005).

A carbonatação é responsável por um aumento pequeno na retração do concreto, e é responsável pela diminuição da permeabilidade do concreto, o tornando mais impermeável à penetração de agentes agressivos, o que não acontece em concretos não carbonatados (ARAÚJO, 2009; TSUJINO *et al.*, 2007; KATZ, 2004).

As reações dos compostos do cimento com as substâncias agressivas, principalmente com o dióxido de carbono, ocorrem lentamente, formando essencialmente carbonato de cálcio e água (THIERY, 2007 *apud* POSSAN, 2010). Segundo Papadakis (1992) *et al.* *apud* Possan (2010) as reações envolvidas nas etapas de carbonatação nos compostos de cimento podem ser resumidas em seis etapas, sendo elas:

- Entrada do  $\text{CO}_2$  por difusão, na fase gasosa, através dos poros do material e posterior dissolução na água dos poros;
- Dissolução do  $\text{Ca(OH)}_2$  sólido na água dos poros e difusão do  $\text{Ca(OH)}_2$  dissolvido das regiões de maior alcalinidade para as de menor alcalinidade;
- Reação entre  $\text{CO}_2$  dissolvido com o  $\text{Ca(OH)}_2$  dissolvido na água dos poros;
- Reação do dióxido de carbono dissolvido com o C-S-H e os compostos não hidratados (C2S e C3S) da pasta de cimento endurecida;
- Redução do volume dos poros devido à precipitação dos produtos de carbonatação;
- Condensação do vapor de água (gerado da reação de carbonatação) nas paredes dos poros do material, em equilíbrio com a temperatura e as condições de umidade relativas do ambiente de exposição.

O cobrimento das estruturas de concreto armado tem um duplo papel de proteção das armaduras, atuando como barreira física, dificultando a chegada dos agentes agressivos na armadura, e por outro uma barreira química, que forma uma película protetora que passiva a armadura, por possuir uma natureza alcalina. Quando esta camada de cobrimento possui baixa permeabilidade a expectativa é de que a corrosão do aço e outros problemas associados a este

não ocorram. A exposição destas estruturas e ciclos de molhagem e secagem aumenta as chances de propagação de micro-fissuras que normalmente pré-existem na zona de transição, isto é, na interface as partículas dos agregados graúdos e a pasta de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os resultados obtidos em ensaios de carbonatação acelerada, em condições no entorno controladas, nunca ocorrerão em situações de degradação, porém a utilização destes ensaios permite a aquisição de informações de durabilidade acerca de um material, antes que este seja amplamente utilizado sem que se tenha uma previsão de seu comportamento ante a carbonatação (PAULETTI *et al.*, 2006).

Como citado por Thiery *et al.* (2013) o processo de carbonatação natural em ARC normalmente é esquecido e somente recentemente começou a ser relatado na literatura (ENGELSEN *et al.*, 2005; KIKUCHI; KURODA, 2011 *apud* THIERY, 2013), pois tanto na estrutura que se usa do concreto em sua vida útil, como após a demolição e sua cominuição e transformação em agregado, estes fragmentos estão expostos a uma atmosfera circundante de CO<sub>2</sub>, que em geral apresenta-se na atmosfera em uma concentração de 0,04%.

How e Lewis (1987) *apud* Pauletti *et al.* (2006) apresentaram em seu trabalho uma correlação entre os ensaios de carbonatação natural e acelerada. Eles desenvolveram a carbonatação em concentração de 4% de CO<sub>2</sub>, temperatura de 23° C e umidade relativa de ar de 50%, e a correlação encontrada é que em um ano de ensaio de carbonatação em ambiente natural, equivale cerca de uma semana em ambiente acelerado.

Shi-Cong *et al.* (2013) executaram ensaios de carbonatação acelerada com ARC, através do uso de uma câmara de carbonatação com 33 litros de capacidade, executando a injeção do CO<sub>2</sub> puro, e com pressão inicial em torno de 0,5 bar e no decorrer do ensaio mantida em 0,1 bar, para tempos de cura de doze em doze horas cumulativas alcançando no máximo 72 horas, o controle de umidade relativa do ar interna da câmara foi feita através de uma cama de sílica gel, que agia no processo de absorção de umidade excessiva que saia dos agregados durante o ensaio. Os resultados obtidos foram diminuição de absorção de água do concreto produzido com os ARC carbonatado e aumento de densidade em todas as situações, e observando-se a relação diretamente proporcional entre tempo de exposição e aumento de densidade e diminuição de absorção de água.

Sim e Park (2011) submeteram ARGC ao tratamento de carbonatação em temperatura de 30°C, concentrações de 10% de CO<sub>2</sub> e com umidade relativa do ar em torno de 60%. Neste caso em específico foram verificados que quanto maior a quantidade de cinzas volantes maior foi a profundidade de carbonatação e que no concreto submetido a carbonatação acelerada aos 28 dias o corpo de prova apresentou uma profundidade de carbonatação de 3 a 11 mm.

Werle *et al.* (2011) avaliaram a resistência do ARC no perfil de carbonatação de concretos produzidos com ARC de diferentes níveis de resistência; para isso produziram três misturas de concreto com resistência a compressão de 18, 37 e 50 MPa, gerando os ARC. Logo após produziram concreto com cada um destes agregados, em substituições ao agregado gráudo basáltico em teores de 25%, 50% e 75%, executando procedimento de pré-molhagem dos ARC em 0%, 25%, 50% e 75%, de acordo com sua capacidade de absorção de água, o cimento usado foi o CPV-ARI e areia quartzoza. Com este concreto curado em tanque de cura saturado com cal durante 63 dias, foi levado a câmara de carbonatação e submetido a concentração de 1% de CO<sub>2</sub>, umidade relativa do ar de 70% ± 5%, em um tempo de exposição de 147 dias. A profundidade de carbonatação foi determinada utilizando-se a aspensão de uma solução com fenolftaleína, logo após que o corpo de prova cilíndrico era rompido. O resultado apresentado pelos concretos mostraram que o ARC produzido com os concretos de maior resistência mecânica (37 MPa e 50 MPa) produziram concretos de comportamento similar aos de referência, com 0% de substituição de ARC, já os concretos produzidos com ARC provenientes de resistência mecânica de 18MPa apresentaram variação significativa quando comparados com os concretos de referência. Neste estudo pode-se inferir que a porosidade do ARC utilizado em novas misturas será decisiva no processo de carbonatação do concreto produzido com este.

Huomo; Takada (1993) *apud* Possan (2004) verificaram o avanço da frente de carbonatação expondo espécimes de concreto a concentrações de CO<sub>2</sub> em teores de 0,07%, 1% e 10%, fixando temperatura e umidade relativa do ar (20°C, 55%). Neste estudo os autores verificaram que quanto maior o teor de CO<sub>2</sub> maior a velocidade de carbonatação.

Kulakowski (2002) *apud* Pauletti *et al.* (2006) submeteu argamassas e concretos à carbonatação acelerada e observou que para concretos com fatores a/c elevada (0,70) a profundidade de carbonatação é menor que em argamassas, e esta em corpos de prova de argamassa cilíndricos (50 mm x 100 mm) e prismáticos (40 x 40 x 160 mm), para as mesmas condições de carbonatação, os cilíndricos apresentaram a profundidade de carbonatação 33%

maior que os corpos de prova prismáticos. Esta diferença, segundo o estudo, se dá pela possível soma de vetores de difusão do CO<sub>2</sub> ao longo do corpo de prova.

## 2.4 Aplicação de Técnicas de ensaios avançados

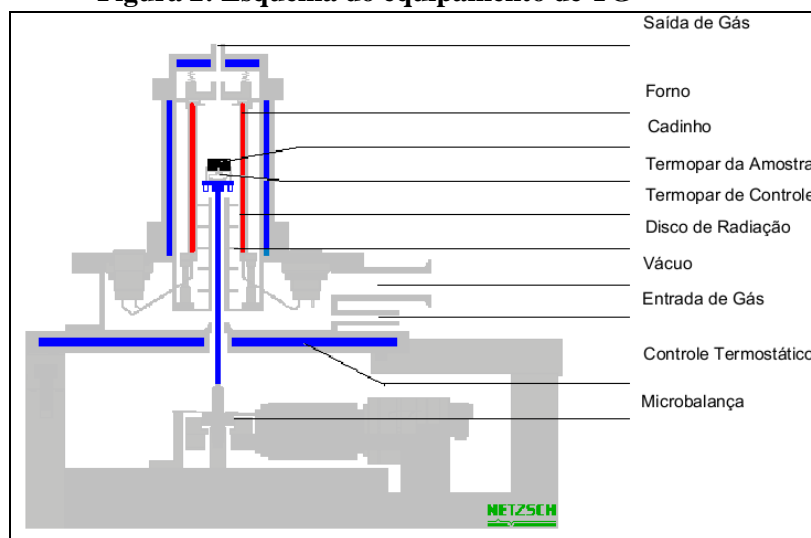
As análises mineralógicas, térmicas e microscópicas possibilitam analisar as características químicas e de microestrutura dos ARC. As análises térmicas permitem medir grandezas físicas de uma amostra quando submetida a um ciclo térmico controlado (HELENE, 2008). A microscopia ajuda na visualização dos elementos mais profundos do material.

- *Termogravimetria (TG)*

A análise térmica é um termo que abrange um grupo de técnicas nas quais uma propriedade física ou química de uma substância, ou de seus produtos de reação, é monitorada em função do tempo ou temperatura, enquanto a temperatura da amostra, sob uma atmosfera específica, é submetida a uma programação controlada. Tal conceito foi proposto pela confederação internacional de análises térmicas (ICTA).

A termogravimetria é uma técnica térmica na qual a mudança da massa de uma substância, ou composto, é medida em função da temperatura enquanto esta é submetida a uma programação em ambiente controlado. Para a interpretação quantitativa da curva TG é preciso que se conheça a composição do material e as possíveis reações que representam os eventos térmicos, bem como a interação dos produtos de transformação. O equipamento que executa o ensaio de TG é composto basicamente por uma micro-balança, um forno, termopares e um sistema de fluxo de gás, como ilustrado na figura 2.

**Figura 2: Esquema do equipamento de TG**



Fonte: Autor desconhecido

A análise termogravimétrica consiste em observar as variações de peso sofridas por uma amostra à medida que aumenta a temperatura. Este ensaio permite avaliar a estabilidade térmica, a velocidade de reação e, em alguns casos, a composição da amostra (HELENE, 2010). O consumo de cada componente presente na amostra pode ser observado pela curva de perda de peso representada em um gráfico temperatura vs peso, o consumo dos compostos presentes nos aglomerantes está demonstrado na tabela 1, proposto por Helene (2010). Esta técnica é utilizada para ratificação dos elementos encontrados, é chamada de análise térmica diferencial (DTA), através dela obtém-se uma precisão razoável para a determinação das substâncias hidratadas, neste ensaio observa-se eventos de endotermia e exotermia, a tabela 2, proposta por Ramachandran (2003) demonstra o resultado do DTA de uma amostra de concreto.



**Tabela 1: Intervalos de temperatura em que ocorrem algumas transformações térmicas nos aglomerantes**

Compostos	Intervalo de Temp. (°C)	Pico DTA
Gesso	75 – 150	Endotérmico
Carbonato de cálcio	550 – 750	Endotérmico
Carbonato de magnésio	400 – 600	Endotérmico
Hidróxido de cálcio	450 – 520	Endotérmico
Hidróxido de magnésio	400 – 420	Endotérmico
Oxalato de cálcio	180 – 900	Exo-endotérmico
Substâncias orgânicas	300 – 500	Endo-exotérmico
Água livre	60 – 120	Endotérmico
Água ligada aos silicatos	150 – 500	Endotérmico
Quartzo	530 – 570	Endotérmico

Fonte: Helene (2010)

**Tabela 2 – Compostos do cimento e suas temperaturas de pico encontradas no DTA**

COMPOSTOS	POSIÇÃO DE PICO (°C)
Cálcio silicato hidratado	130
Sulfoaluminato hidratado	140
Sulfato de cálcio di-hidratado	160
Hidratos amorfos	200-300
Potássio cálcio sulfato hidratado	290
Hidróxido de magnésio	420
Hidróxido de cálcio	560

Fonte: Ramachandran (2003)

Estes compostos estão presentes no cimento e também nos agregados, em diferentes quantidades e comportamento, já que cada produção dos cimentos e concretos possuem características diferentes podendo influenciar em seus compostos.

○ *Teoria da adsorção multimolecular (BET)*

O método BET, ou ainda Teoria da adsorção multimolecular é uma teoria matemática com o objetivo de descrever a adsorção física de moléculas de gás sobre uma superfície sólida. Esta análise, também conhecida como análise da área superficial (ASA), mede a área superficial específica por unidade de massa. Esta análise consiste na medida da penetração (adsorção física) de um gás inerte, como o N<sub>2</sub> e pode ser feita por um único ponto ou por vários pontos da amostra. Para a determinação da área superficial, amostras de sólidos são pré-tratadas aplicando-se a combinação de calor e vácuo ou fluxo de gás para remover contaminações adquiridas da exposição à atmosfera (SILVA *et al.*, 2008)

O sólido é então resfriado sob o vácuo. Um adsorbato (material que foi retido pelo processo de adsorção) normalmente utilizado é o gás nitrogênio que é admitido ao sólido em aumentos controlados. Após cada dosagem de adsorbato, a pressão é equilibrada e a quantidade de gás adsorvido é medida. O volume de gás adsorvido a cada pressão, a uma temperatura constante, define uma isoterma de adsorção, da qual a quantidade de gás exigida para formar uma única camada sobre a superfície externa do sólido e seus poros é determinada. Com a área coberta de cada gás adsorvido conhecida, a área da superfície pode também ser calculada.

À medida que a adsorção continua a espessura da camada adsorvida aumenta. Os fundamentos da técnica analítica são: uma amostra acondicionada em um tubo sob vácuo é resfriada a temperatura criogênica e exposta a um gás de análise sob uma série de pressões controlada com precisão. A cada aumento de pressão o número de moléculas adsorvidas na superfície aumenta.

A pressão na qual o equilíbrio da adsorção ocorre é medida e a lei universal dos gases é aplicada para determinar a quantidade de gás adsorvido. Qualquer micro-poro na superfície é rapidamente preenchido, fazendo com que a superfície livre se torne completamente coberta e finalmente os poros grandes são cheios. O processo deve continuar até o ponto de condensação volumétrica do gás de análise. Em seguida o processo de dessorção deve começar ao passo que a pressão é sistematicamente reduzida resultando na liberação das moléculas adsorvidas. Assim como no processo de adsorção, a variação na quantidade de gás na superfície do sólido é quantificada. Estes dois conjuntos de dados descrevem as isotermas de adsorção e dessorção. As análises das formas das isotermas revelam informações sobre as características da superfície e dos poros do material.

- *Difratometria de raios-x (DRX)*

A difratometria de raios-x corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento, mais particularmente na engenharia e ciência dos materiais, engenharia metalúrgica, química de minas, além de geociências, dentre outros.

Os raios X que atingem o material podem ser espalhados elasticamente, sem perda de energia pelos elétrons de um átomo (dispersão ou espalhamento coerente). O fóton de raios X após a colisão com o elétron muda sua trajetória, mantendo, porém, a mesma fase e energia do fóton incidente. Sob o ponto de vista da física ondulatória, pode-se dizer que a onda

eletromagnética é instantaneamente absorvida pelo elétron e reemitida; cada elétron atua, portanto, como centro da emissão de raios-X (SASAKI; BLEICHER, 2000).

Se os átomos que geram este espalhamento estiverem arranjados de maneira sistemática, como em uma estrutura cristalina, apresentando entre eles distâncias próximas ao do comprimento de onda da radiação incidente, pode-se verificar que as relações de fase entre os espalhamentos tornam-se periódicas e que efeitos de difração de raios X podem ser observados em vários ângulos. A intensidade difratada, dentre outros fatores, é dependente do número de elétrons no átomo; adicionalmente, os átomos são distribuídos no espaço, de tal forma que os vários planos de uma estrutura cristalina possuem diferentes densidades de átomos ou elétrons, fazendo com que as intensidades difratadas sejam, por consequência, distintas para os diversos planos cristalinos (SASAKI; BLEICHE, 2000).

Esta técnica é bastante utilizada na análise de componentes no cimento, que segundo Ramachandran (1999) apresenta uma quantidade de 20% a 25% de hidróxido de cálcio e que irá reagir com o dióxido de carbono do ar, gerando carbonato de cálcio. Os elementos basicamente encontrados em uma amostra de concreto quando submetida ao DRX são a calcita (cálcio carbonatado), dolomito (cálcio magnésio carbonatado), etringita (sulfoaluminato hidratado de cálcio), feldspatos, gipsita (sulfato de cálcio di-hidratado), cimento portland, portlandita (hidróxido de cálcio) e quartzo.

Com o intuito de tornar visível estes compostos que possuem dimensões muito pequenas, impossíveis de serem vistas a olho nu, técnicas e equipamentos microscópicos foram desenvolvidos. Para que a visualização seja aumentada pode-se utilizar uma radiação com comprimento de onda menor que a luz visível como fonte de iluminação do objeto (KESRENBACHK, 1994). Então desta forma um microscópio eletrônico de varredura (MEV) utiliza um feixe de elétrons no lugar de fótons utilizados em um microscópio óptico convencional, permitindo solucionar o problema relacionado com a fonte de luz branca. A energia pode ser comunicada a uma nova partícula carregada por meio de um campo elétrico acelerador.

Assim, sob uma voltagem suficientemente grande, por exemplo, 50 kV, elétrons de comprimento de onda extremamente curto ( $\lambda=0,005\text{\AA}$ ) e, portanto, de poder de resolução potencialmente alto como uma fonte de iluminação, podem ser produzidos. Além disto, devido às suas cargas, os elétrons podem ser focalizados por campos eletrostáticos ou eletromagnéticos e, então, são capazes de formar imagens. Eles possuem, portanto, as

características essenciais necessárias a um microscópio de alta resolução. Como resultado tem-se que os aparelhos modernos permitem aumentos de 300.000 vezes ou mais, para a maior parte de materiais sólidos, conservando a profundidade de campo compatível com a observação de superfícies rugosas.

Através da utilização do MEV obtém-se a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida. Neste equipamento é possível verificar com alta resolução e aparência tridimensional das características micro-estruturais da amostra e também o exame em pequenos aumentos e com grande profundidade de foco, fazendo assim um complemento da imagem ótica.

### 3. ESTUDO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Programa experimental

Para a realização deste estudo foi produzido agregado reciclado graúdo de concreto (ARGC) a partir de corpos de prova de concreto. Com o intuito de melhorar suas características desenvolveu-se o processo de melhoramento a partir da exposição ao dióxido de carbono, em sua fase gasosa, através de uma câmara de carbonatação. O objetivo é fazer com que o ARGC obtenha características mais próximas a de um agregado natural e possa ser utilizado em novas misturas de concreto; para isto os ensaios foram feitos de forma comparativa entre amostras não carbonatadas e carbonatadas.

Primeiramente o agregado reciclado de concreto (ARC) foi obtido por britagem, com britador de mandíbulas, de corpos de prova de concreto advindos de uma obra vertical localizada em Maceió, para serem ensaiados a resistência a compressão no laboratório de estruturas e materiais localizado na Universidade Federal de Alagoas (UFAL). O britador de mandíbulas foi ajustado para obtenção de agregados com dimensão de 12,5 mm. Após o processo de britagem os RC foram peneirados, de forma que todos os agregados retidos na peneira de abertura 4,75 mm a 9,5 mm foram utilizados neste trabalho.

A quantidade total de ARGC produzido foi de 250 kg, que foram separados em alíquotas, de acordo com técnica denominada de pilha de Chevron (FERREIRA *et al.*, 1992 apud ABICHEQUER, 2010, p.14), armazenadas e vedadas em sacos plásticos de aproximadamente 15 kg. Os sacos foram guardados em tonel fechado com tampa. A estes agregados obtidos deu-se o nome de “**ARGC não carbonatado**”. Após o beneficiamento do RC e a obtenção do ARGC não carbonatado foram feitas as caracterizações físicas, mineralógicas, térmicas e microscópicas ARGC não carbonatado, de forma concomitante.

As caracterizações físicas se iniciaram com a determinação da composição granulométrica do ARGC, capacidade de absorção e massa específica e perda de massa na mufla. Os dois primeiros ensaios seguiram os procedimentos de norma para agregados naturais, já que a normatização para agregados reciclados ainda não está definida, e o ensaio de perda de massa seguiu procedimento desenvolvido nesta pesquisa, que levou em consideração as peculiaridades da mufla e das amostras. É importante destacar que nesta etapa os ensaios de comparação entre amostras não carbonatadas e carbonatadas não foram

repetidos para a granulometria, pois o processo de carbonatação não deverá interferir nas características granulométricas (demonstrado na figura 3 – fluxograma dos ensaios com o símbolo circular, aqui usado como truncamento de fluxo).

Para a caracterização mineralógica, térmica e microscópica foram executados os ensaios de BET, TG, DRX e MEV/EDS, neles o ARGC precisou passar por procedimentos de diminuição do tamanho de sua partícula para adequação nos equipamentos utilizados nos ensaios. Para estas reduções foram utilizados o moinho de bolas (pulverização) e a micro-retífica para o corte de fatias dos agregados.

É importante ressaltar que os ensaios de BET e TG, somente foram feitos para amostras não carbonatadas, pelo motivo na houve a indisponibilidade de insumos (demonstrado na figura 3 – fluxograma dos ensaios com o símbolo circular, aqui usado como truncamento de fluxo).

Logo após as caracterizações iniciou-se o processo de carbonatação, que foi executado na câmara de carbonatação (equipamento instrumentado para isto), em concentrações de teste iniciando em 7% iniciais e 24 horas de exposição e sendo variada e analisada em uma próxima fase, onde os valores de absorção de água e massa específica foram determinados a cada variação, a partir daqui o ARGC é chamado de “**ARGC carbonatado concentração\_dias de exposição**”. A cada variação nos tempos e concentrações dentro da câmara o ARGC passou pela fase de Avaliação da caracterização do ARGC sem e com carbonatação. O intuito de testar tempos e concentrações distintas e suas combinações dentro da câmara foi de verificar em qual porcentagem e tempo de exposição o ARGC obteve a capacidade de absorção de água reduzida e o aumento um de massa específica, ao fim desta etapa e de posse do das duas variáveis definidas, ocorreu a reprodução do **ARGC carbonatado.concentração\_dias** de exposição em quantidade maior para as produções de concreto.

Após seleção do ARGC carbonatado foram definidas as dosagens dos concretos, tomando como base os valores de massa específica do ARGC escolhido na etapa de avaliação, com base no estudo de dosagem desenvolvido no trabalho de Tenório (2007).

Os concretos foram produzidos logo em seguida, sendo separados com a seguinte nomenclatura:

- Concreto de referência: produzido com agregado natural, chamado de **CAN**;

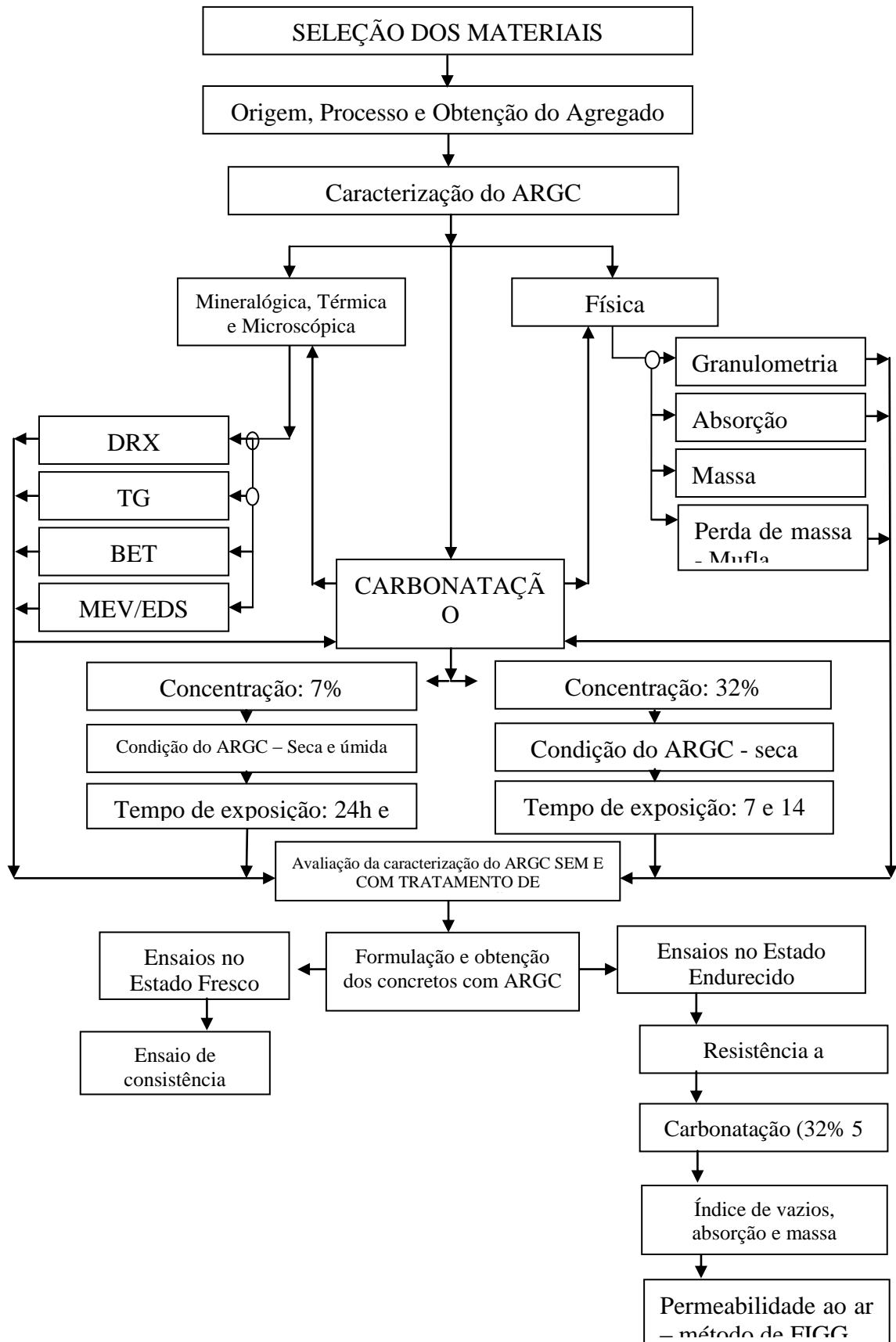
- Concreto com ARGCCnãocarbonatado: produzido com ARGCC não carbonatado, chamado de **CARGCCNC**;
- Concreto com ARGCCcarbonatado: produzido com o ARGCCcarbonatado, chamado de **CARGCC**;

Vale ressaltar que todos os concretos foram produzidos com o mesmo procedimento, citado na metodologia, e respeitando a cada um os valores de massa específica do agregado utilizado na produção.

Após a produção dos concretos foram feitos ensaios em seu estado fresco e endurecido. No primeiro foi determinada a trabalhabilidade do concreto, através do ensaio de abatimento de tronco de cone. No segundo, foram determinadas a resistência a compressão (6 corpos de prova cilíndricos por concreto), índice de vazios (3 corpos de prova cilíndricos por concreto), absorção e massa específica, seguindo os procedimentos de norma e carbonatação do concreto endurecido (3 corpos de prova cilíndricos por concreto), onde os concretos endurecidos foram expostos a concentração selecionada na fase de análise do ARGCC carbonatado e o tempo de exposição foi de 5 dias, procedimento repetido nos três concretos produzidos, e o ensaio de permeabilidade ao ar (1 corpo de prova prismático por concreto), através dos procedimentos determinados pelo método de FIGG.

Para melhor visualização do programa experimental, suas etapas e seu fluxo, é apresentado a seguir um fluxograma, como pode ser visto na figura 3.

Figura 3: Fluxograma com o resumo das etapas realizadas na parte experimental



Fonte: Autor



## 3.2 Materiais e Métodos

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram: cimento CII Z -32 de acordo com a norma NBR – 5732 (1991); agregados miúdos e graúdos naturais: areia lavada e pedra britada de origem granítica, ambos obtidos no mercado de Maceió; agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC), e aditivo superplastificante de terceira geração composto com cadeia de éter policarboxílico modificado com densidade de 1,067 – 1,107 g/cm<sup>3</sup> e teor de sólidos entre 28,5% e 31%, e água da rede de abastecimento da Universidade Federal de Alagoas.

### Agregados Reciclados de Concreto (ARC)

#### 3.2.1 Agregados reciclados de concreto (ARC)

##### 3.2.1.1 Origem e processo de beneficiamento do resíduo de concreto (RC)

Os resíduos utilizados neste estudo foram obtidos a partir de corpos de prova de duas construtoras e transportados para o Laboratório de estruturas e materiais (LEMA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) para controle da resistência à compressão aos 28 dias. O intervalo de resistência desses concretos está compreendido entre 30 e 35 MPa, segundo dados obtidos dos relatórios de resistência destes concretos. O traço do concreto que constitui os corpos de prova é composto pelo cimento CII F-32, onde sua composição está demonstrada na tabela 3.

**Tabela 3 - Composição do cimento tipo CIIIF-32**

NBR 11578/1991	Classe de resistência	CIIIF-32
Clínquer+sulfatos de cálcio	25,32,40	94-90 %
Pozolanas	25,32,40	15-50%
Fíler	25,32,40	6-10%
Determinações químicas	Resíduo insolúvel	≤ 2,5 %
	Perda ao fogo	≤ 6,5 %
	Óxido de magnésio	≤ 6,5%
	Trióxido de enxofre	≤ 4,0 %
	Anidrido Carbônico	≤ 5,0 %
	Teor de material carbonático	6-10 %

Fonte: adaptada da NBR 11578 (ABNT, 1991)

Estes compostos são encontrados no cimento e no clínquer (matéria-prima do cimento). Ao longo do trabalho estes compostos serão encontrados nas análises das amostras contendo cimento.

Após os ensaios de resistência os corpos de prova foram levados novamente a prensa para serem esmagados, com o intuito de geração de pedaços menores para o processo de cominuição, sendo a idade dos concretos no ato do esmagamento de 24 meses.

A próxima etapa foi conduzir os corpos de prova esmagados para o processo de cominuição, neste somente foram usados os pedaços maiores dos corpos de prova, não sendo utilizados os finos gerados no esmagamento.

Para a cominuição foi-se utilizado o britador do tipo mandíbula, onde foi ajustado para produzir partículas com tamanho máximo de 12,5 mm, e executado de forma única vez, ou seja, o material triturado era levado para o peneiramento. Foram gerados em torno de 300 kg de resíduo. Durante o esmagamento do resíduo e a cominuição foram gerados partículas finas, que não foram utilizadas nesta pesquisa. Utilizados apenas os resíduos passantes na peneira de abertura de 12,5 mm e retidos na peneira de 4,75 mm foram utilizados.

### 3.2.1.2 Obtenção do agregado reciclado graúdo de concreto (ARGC)

Os agregados reciclados graúdos de concreto (ARGC) foram obtidos após o processo de cominuição, dos corpos de prova onde os resíduos de concreto foram submetidos ao peneiramento, para a separação do resíduo em partículas com tamanhos compreendidos entre 4,75 mm e 12,5 mm.

Este peneiramento foi executado de forma mecânica, com o auxílio de um vibrador de peneiras mecânico, onde as partículas passantes na peneira 12,5 mm e retidas na peneira 4,75 mm foram utilizadas neste estudo. Isto significa que foi usado no estudo apenas os agregados reciclados de concretos na sua forma graúda, os miúdos foram aqui foram desprezados.

Na seqüência o ARGC (agregado reciclado graúdo de concreto) foi separado, por amostragem seguindo o procedimento em pilhas alongadas, proposto por Chevron (Ferreira et al, 1992 apud Abichequer, 2010), homogeneizado e executado o procedimento de separação de alíquotas, com aproximadamente 15 kg cada. Estas por sua vez foram quarteadas, em equipamento quarteador de porte médio, e armazenadas em sacos plásticos espessos e vedadas, guardadas em um tonel munido com tampa, como mostra a figura 4.

**Figura 4: Pilha alongada de base triangular; armazenamento em sacos após obtenção das alíquotas; tonel de armazenamento das alíquotas, respectivamente**



Fonte: Autor

Todas as alíquotas utilizadas foram inicialmente quarteadas, de forma que nenhuma amostra foi utilizada antes de passar por este procedimento de amostragem.

### 3.3 Caracterização dos materiais

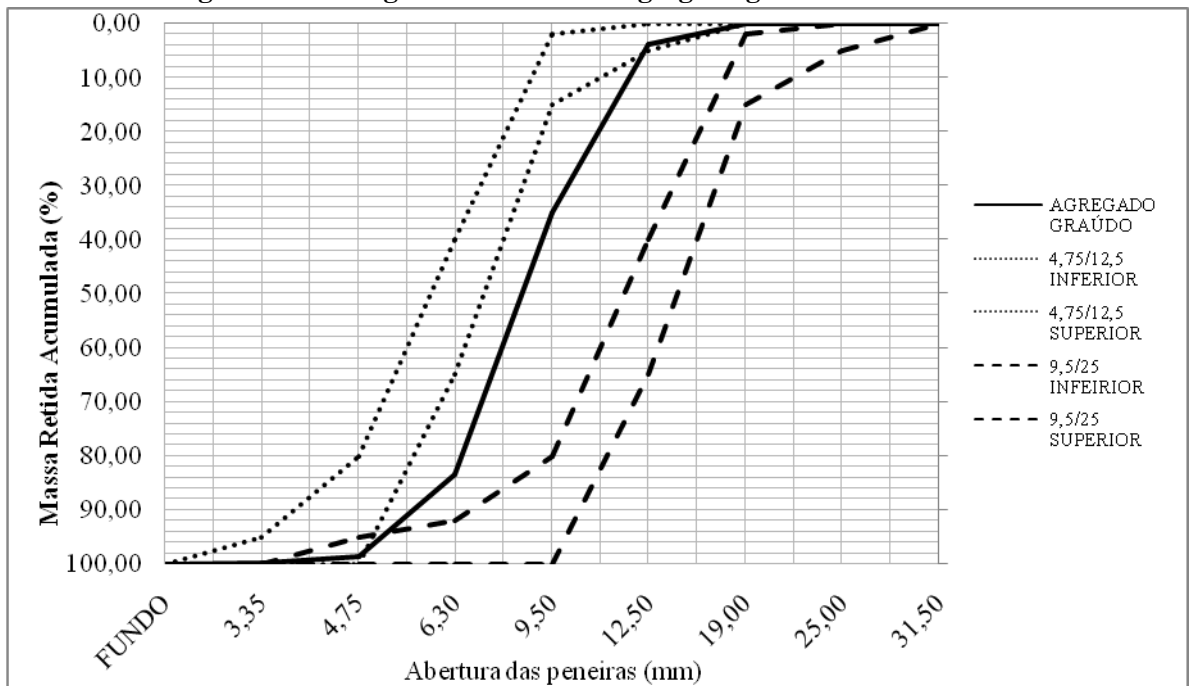
As caracterizações físicas do agregado miúdo natural de terminadas foram: massa específica (NBR NM 52, 2003), massa unitária em estado solto (NBR NM 45, 2006) e composição granulométrica (NBR NM 248, 2003). E as do agregado graúdo natural foram: massa específica e absorção (NBR NM 53, 2003) e composição granulométrica (NBR NM 248, 2003). Os materiais utilizados foram: Cimento CII Z – 32 de acordo com a norma NBR – 5732 (1991); agregados miúdos e graúdos naturais; areia lavada e pedra britada de origem granítica, ambos obtidos no mercado de Maceió; agregados reciclados graúdos de concreto(ARGC), e aditivo superplastificante de terceira geração composto de cadeia de éter policarboxílico modificado com densidade de 1,067 – 1,107 g/cm<sup>3</sup> e teor de sólidos entre 28,5% e 31%, e água. As características dos agregados naturais estão apresentadas na tabela 4 e as curvas granulométricas dos agregados estão apresentadas nas figuras 5 e 6.

**Tabela 4: Caracterização do agregado natural**

Ensaio	Graúdo	Miúdo
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,60	2,63
<b>Índices granulométricos</b>		
Dimensão máxima característica (mm)	12,5	2,36
Módulo de finura	6,33	2,7

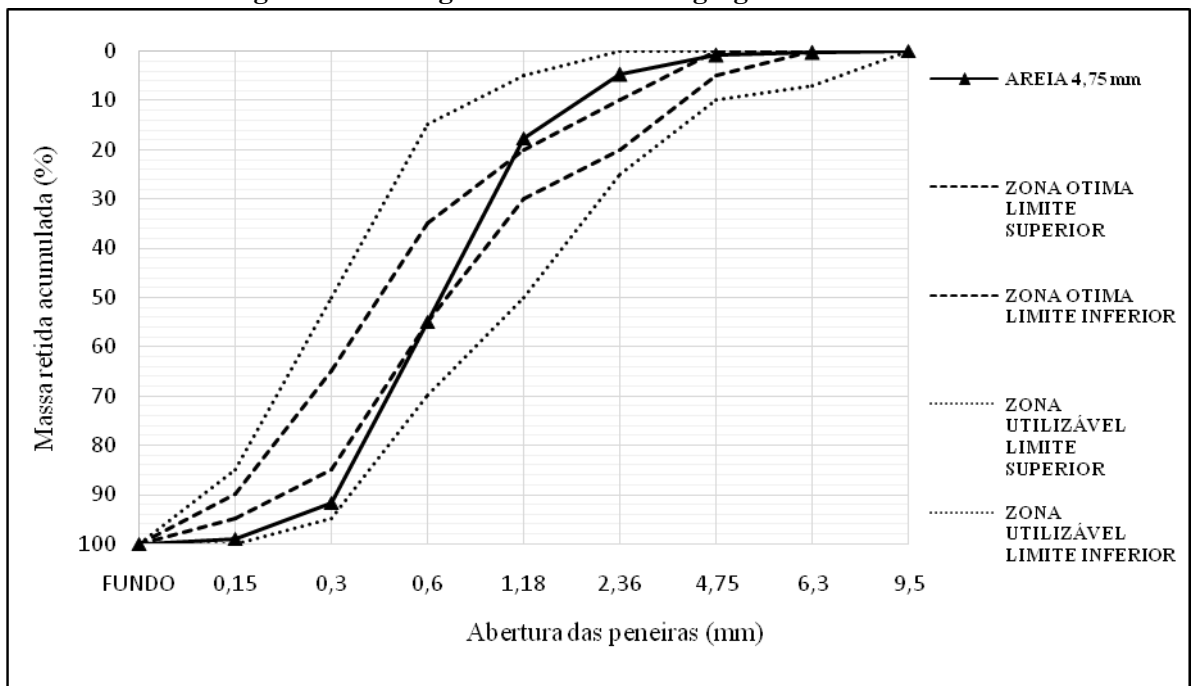
Fonte: Autor

**Figura 5: Curva granulométrica do agregado graúdo natural**



Fonte: Autor

**Figura 6: Curva granulométrica do agregado miúdo**



Fonte: Autor

As características dos ARGC foram determinadas através de ensaios normatizados, levando em consideração algumas adequações nos ensaios, feitas com o intuito de encaixar melhor as características diferenciadas dos agregados reciclados de concreto frente aos agregados naturais, como a inserção de película metálica, com abertura de 75 $\mu$ m, sob cesto apoiador de amostras para o ensaio de absorção, evitando assim perda de massa durante o ensaio, conduzindo a inferir resultados não reais.

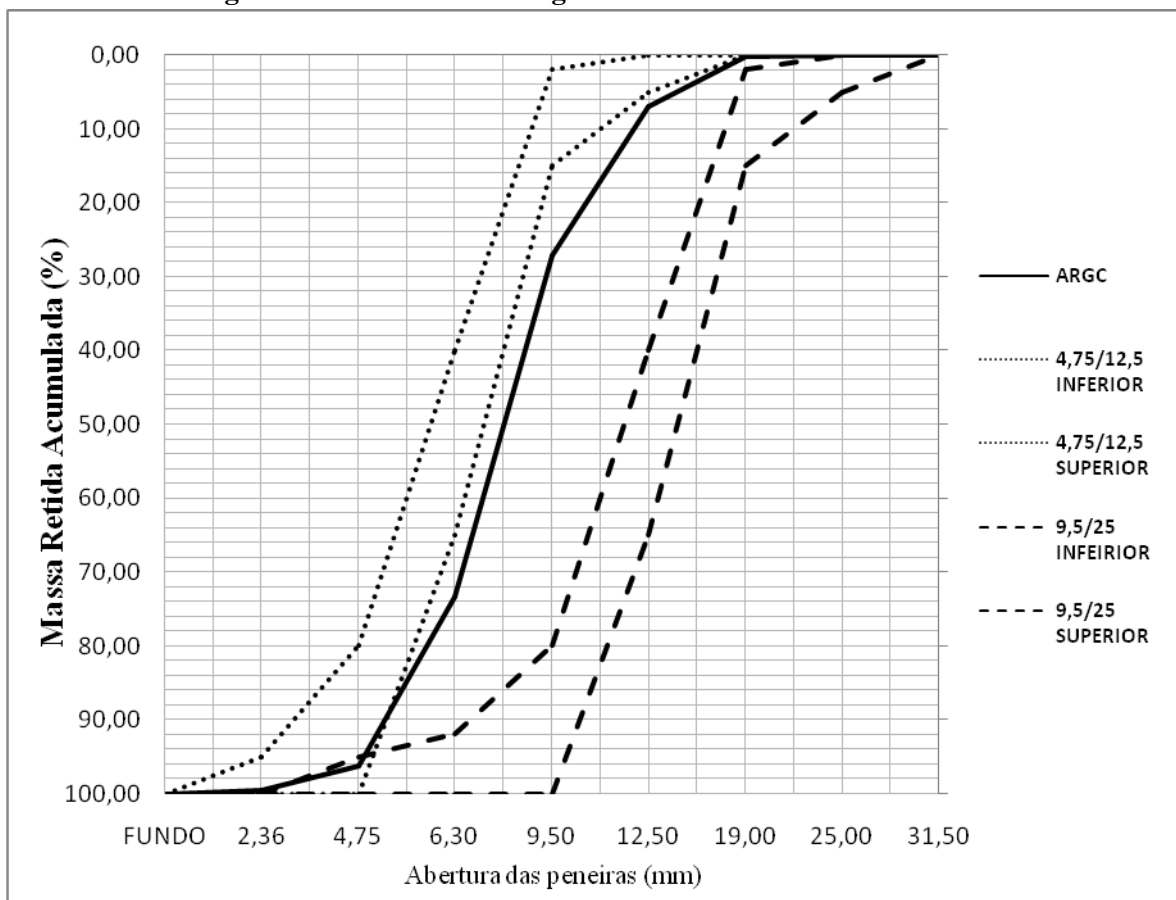
### 3.3.1 Caracterização física do ARGC

A caracterização física dos ARGC foi iniciada com o procedimento de quarteamento das alíquotas com aproximadamente 15 kg cada, produzidas na geração dos ARGC, reduzindo-as para a massa necessária mais próxima exigida em cada ensaio, utilizando para isto o equipamento quarteador de tamanho médio. Os ensaios executados nesta caracterização foram iniciados pela determinação da curva granulométrica, seguidos dos ensaios de absorção e massa específica e perda de massa.

- Granulometria – NBR NM 248 (ABNT, 2003)

A curva granulométrica encontrada para os ARGC encontra-se na figura 7, de forma que o  $D_{m\acute{a}x}$  foi 12,5 mm.

Figura 7: Gráfico da Curva granulométrica do ARGC



Fonte: Autor

A curva granulométrica mostra uma pequena quantidade de material com dimensões abaixo de 4,75 mm, esta ocorrência advém do processo de manipulação necessário dentro do procedimento do ensaio de granulometria, parte da argamassa aderida ao agregado natural desagrega no momento do transporte e da execução do ensaio em questão. O ARGC, com a curva apresentada não se enquadrou em nenhuma faixa superior de utilização, conseqüência de sua natureza reciclada.

- Absorção e massa específica – NBR NM 53 (ABNT, 2003)

Os ensaios de determinação da massa específica e da capacidade de absorção de água dos ARGC foram executados de acordo com os procedimentos constantes na NBR NM 53 (ABNT, 2003), norma desenvolvida para ser aplicada em agregados graúdos naturais. Porém, alguns cuidados foram tomados na execução destes ensaios, fazendo com que existisse uma adequação dos procedimentos para a situação do agregado reciclado; como a utilização de uma tela com abertura de 75 µm, apoiada sob o cesto de amostras, e o cuidado no

procedimento de enxugamento dos agregados, evitando que durante a permanência e manipulação das amostras no ensaio a perda de material decorrente de possíveis desagregações de argamassa dos ARGC não influenciasse em seus valores de absorção de água.

- Perda de massa – Mufla

O ensaio de perda de massa demonstra a relação de perda de massa dos agregados em seus compostos hidratados do cimento. Para este ensaio foi utilizado o equipamento mufla, no qual possui capacidade de elevação de temperatura máxima de 1500°C e espaço pequeno disponível para colocação das amostras.

O procedimento de preparação das amostras para a mufla foi:

- Em uma amostra de 100g foram observadas, a olho nu e retiradas cuidadosamente às partículas que não apresentavam argamassa aderida, ficando as amostras com no mínimo 17g e no máximo 28g, dispostas em recipientes cerâmicos legendados por amostra.
- As massas foram determinadas com uma balança com a resolução até 0,0001;
- Todas as amostras foram colocadas quando a mufla já estava na temperatura de ensaio. O tempo para atingir os 800° C foi de 3,5 horas e para 1000°C foi em torno de 4 horas;
- O tempo de permanência das amostras dentro da mufla foi de exatamente 1 hora;
- Após a retirada da mufla as amostras foram resfriadas em um dessecador, durante 1 hora. Em seguida foram pesadas e anotadas as diferenças de massa.

Algumas etapas dos ensaios podem ser vistos na figura 8.

**Figura 8: Amostras em quatro momentos respectivos: a) após remoção dos agregados sem argamassa aderida, b) pesagem em balança de precisão, c) após a saída da mufla e d) após o resfriamento no dessecador**



Fonte: Autor

### 3.3.2 Caracterização Mineralógica, Térmica e Microscópica do ARGC

A determinação das características mineralógicas, térmicas e microscópicas foi executada respeitando os procedimentos previstos para ensaios em cada equipamento utilizado, que nesta parte necessitou de uma redução do tamanho das partículas e contemplar as que possuíam argamassa aderida ao agregado graúdo natural para que os resultados das análises demonstrassem a diferença entre uma amostra de ARGC antes e depois da carbonatação, já que a ação do dióxido de carbono ocorre através da difusão do gás pelos poros da argamassa aderida.

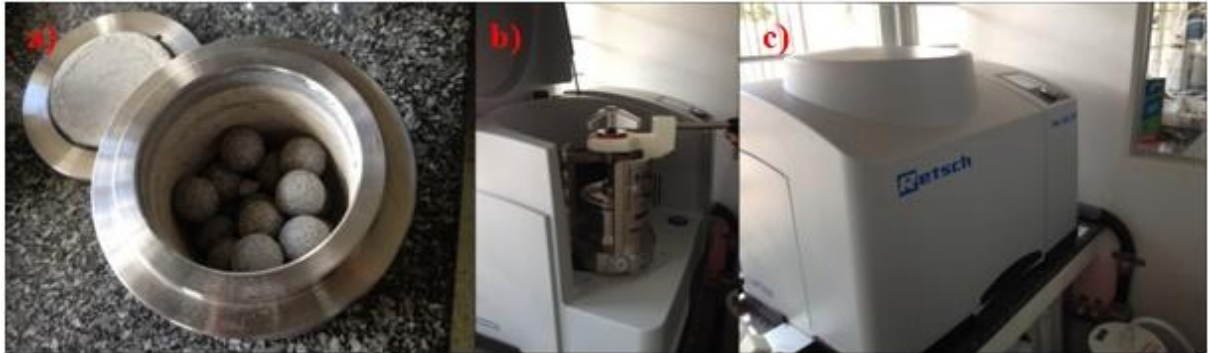
Bem como executado na caracterização física, o primeiro passo nesta etapa foi a redução das alíquotas (aproximadamente 15kg), através do quarteamento, para as quantidades necessárias de amostras a cada ensaio. Nos ensaios de DRX, TG e BET se fizeram necessários a pulverização partículas e nos ensaios de MEV/EDS se fez necessário a retirada de fatias do ARGC, procedimentos que seguem abaixo:

#### I. Pulverização das amostras:

- a. O equipamento utilizado neste ensaio foi o *Planetary Ball Mill PM 100 CM* (*Informações obtidas através do manual técnico da Retsholutions in milling and Sieving*) (figura 10), com as seguintes características:
  - i. Tamanho máximo da partícula de entrada: <10 mm
  - ii. Tamanho da partícula de saída:  $0,1\mu\text{m} < \text{partícula} < 1\mu\text{m}$
  - iii. Velocidade que as esferas atingem na rotação:  $100 - 650 \text{ min}^{-1}$
  - iv. Princípio da redução do tamanho das partículas: através de fricção e impacto de esferas de aço contra as partículas;
- b. Amostra com aproximadamente 100g é colocada no amostrador de moinho de bolas, juntamente com as bolas de aço;
- c. O amostrador é encaixado e travado no moinho para o início do procedimento;
- d. A amostra é deixada em um tempo de 1,5 min, definido a partir da capacidade do equipamento e a experiência do operador técnico.
- e. Logo após as esferas são retiradas com o auxílio de um ímã e o pó é misturado com uma espátula de aço e captado para outro recipiente;
- f. Neste ponto o pó é levado aos amostradores dos equipamentos de DRX, BET e TG;



**Figura 9: Moinho de bolas: a) amostrador contendo as esferas de aço juntamente com a amostra de ARGC, b) amostrador sendo colocado no moinho e c) moinho em funcionamento**



Fonte: Autor

Os ensaios de caracterização mineralógica, térmica e microscópica foram realizados dentro dos parâmetros citados na revisão bibliográfica.

Todos os ensaios desta etapa serão realizados em réplicas, ou seja, duas amostras serão ensaiadas para cada tipo de ensaio, incluindo a amostra de referência (sem carbonatação).

## II. Retirada de fatias dos ARGC – MEV/EDS

Para as análises microscópicas de MEV, as amostras foram retiradas de partes do ARGC com auxílio de uma micro-retífica, como mostra a figura 10. A análise microscópica será precedida pela preparação da amostra do ARGC, que somente nesta etapa, será feita com uma micro-retífica, possibilitando assim melhor visualização microscópica da formação dos carbonatos, decorrentes do processo de carbonatação. Houve a precaução em evitar a contaminação cruzada entre as amostras, de forma que o disco de corte diamantado da micro-retífica foi limpo com álcool isopropílico, a cada nova amostra.

**Figura 10: Retirada de amostras para análise microscópica utilizando a micro-retífica**



Fonte: Autor

- Composição mineralógica

Para determinação da composição mineralógica foi utilizado o equipamento de DRX, utilizando a amostra em seu estado pulverulento, obtida na etapa de pulverização.

I. O equipamento utilizado no ensaio de DRX possui as seguintes características:

- a. Difratorômetro de raios x – Shimadzu XRD – 6100 (figura 11);

**Figura 11: Difratorômetro de raios x e amostrador encaixado pronto para o ensaio**



Fonte: Shimadzu

- II. A amostra pulverulenta é acomodada no amostrador do difratômetro, com auxílio de uma espátula de aço inox, é importante ressaltar que o operador é quem impõe a força de compactação do pó no amostrador, em nossa pesquisa todos os ensaios de DRX foram executados por um único e experiente operador;
- III. O amostrador é encaixado e travado no difratômetro para o início do ensaio;
- IV. Condições de execução dos ensaios:
  - a. Situação de Medição, tubo de raios-X: target = Cu, tensão = 40,0 (kV), corrente = 30,0 (mA)
  - b. Slits: divergência de fenda = 1,00000 (graus), dispersão de fenda = 1,00000 (graus), receber fenda = 0,30000 (mm)
  - c. Exploração: Eixo rígido = Theta-2 Teta, faixa de varredura = 3,000-60,000, modo de digitalização = Varredura contínua, velocidade de digitalização = 2,0000 (graus / min), campo de amostragem = 0,0200 (graus) e tempo predefinido = 0,60 (s).

V. Ao fim do ensaio a amostra ensaiada é descartada e uma nova amostra do mesmo lote pulverizado é ensaiada, tomando sempre o cuidado de substituir as ferramentas para não haver nenhuma interferência entre amostras.

- Caracterização Térmica

Para a determinação da caracterização térmica foi utilizado o equipamento de TG, através da perda ao fogo (figura 12).

I. O equipamento utilizado no ensaio de TG possui as seguintes características:  
Análise termogravométrica – TGA – 50 series - Shimadzu (figura 12).

**Figura 12: Equipamento de Tg usado nos ensaios de caracterização térmica**



Fonte: Shimadzu

A análise para a variação de massa ocorre na amostra em seu estado pulverulento e é executada em função da elevação da temperatura.

I. Condições de execução dos ensaios:

- a. Este ensaio foi executado tendo como atmosfera o ar com um fluxo de gás de 50 ml/min;

- Caracterização Microscópica

Para uma caracterização microscópica mais completa do ARGC foi-se executado o ensaio de BET - Teoria de Adsorção Multimolecular, ele proporciona uma análise de tamanho e volume dos poros dos ARGC, quantificando também sua área superficial específica, neste trabalho executado com o ARGC em sua condição não carbonatada.

I. O equipamento utilizado no ensaio de BET possui as seguintes características:  
Belsorp - max (figura 13);

- a. Mensuração principal: Volumétrica pelo método de adsorção gasosa + AFSM
- b. Adsorção: N<sub>2</sub>, Ar, Kr, NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>
- c. Distribuição de tamanho de poros de 0,32-500 nm de diâmetro de poro.

**Figura 13: Equipamento de BET – Teoria de adsorção multimolecular**



Fonte: Microtachel (2016)

- II. As condições de execução deste ensaio foram:
  - a. Executado sob uma atmosfera de análise utilizando nitrogênio;
  - b. Amostra pulverulenta com massa inicial de 0,2598g
  - c. Intervalo de equilíbrio de 45 segundos;
  - d. Tempo de ensaio em 12:53:54 h;
  - e. Análise de imersão em temperatura de -195,764 °C.
    - o Morfologia microscópica

Nesta etapa foram executados os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em conjunto com o EDS – detector de raios-x de energia dispersiva (marca: *Oxford instruments*), o uso conjunto destes dois equipamentos proporciona imagens nítidas aumentadas das amostras e a imediata identificação mineral de seus compostos, gerando inclusive um mapeamento da distribuição de elementos químicos por minerais.

- I. O equipamento utilizado no ensaio de MEV possui um módulo que o acopla ao EDS, e que em conjunto necessitam de um equipamento que prepara as amostras, conhecido como metalizador (Figura 14).

**Figura 14: Microscópio eletrônico de varredura e metalizador e evaporador usado na metalização das amostras**



Fonte: Shimadzu (2016)

## II. Condições de execução dos ensaios:

- a. Os ensaios feitos no agregado natural foram executados utilizando a energia de 20 KV do tubo do MEV, e as amostras de AGRC foram executadas com energia de 5 KV, pois após alguns testes detectou-se que as energias precisavam ser diferentes para proporcionar uma melhor visualização dos detalhes das amostras, na figura 15 vê-se um comparativo de teste no ARGC não carbonatado utilizando a energia de 20KV e 5KV, nela percebe-se que com energia mais baixa a visualização fica mais nítida.

**Figura 15: Testes feitos na mesma amostra (ARGC não carbonatado) com energias diferentes: 20KV e 5 KV**



Fonte: Autor

- b. As amostras foram ensaiadas nas condições:
  - i. Agregado natural
  - ii. ARGC não carbonatado
  - iii. ARGC carbonatado\_concentração de CO<sub>2</sub>\_tempo de exposição

### 3.4 Processo de Carbonatação

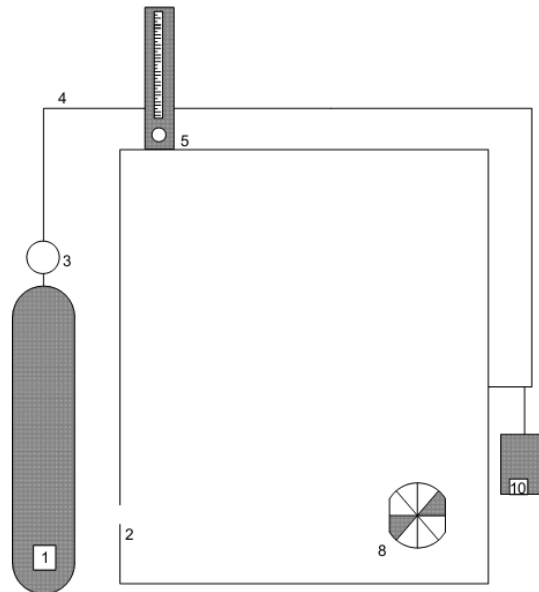
#### 3.4.1 Câmara de carbonatação

Nesta pesquisa a carbonatação foi executada com o auxílio de uma câmara, denominada de *câmara de carbonatação*, constituída em material a base de madeira (compensado) revestida com material em fórmica branca, e afixados ao seu corpo equipamentos de controle e medição de variáveis como: temperatura, concentração de CO<sub>2</sub> e umidade relativa do ar e dispersão da mistura gasosa (Ar + CO<sub>2</sub>).

Esta câmara foi construída para o laboratório de estruturas e materiais da Universidade Federal de Alagoas, em apoio às pesquisas de carbonatação acelerada publicada na

dissertação do então aluno BARROS (2007) e sua montagem inicial podem ser vista disposta na figura 16 abaixo. Nela estão fixados os seguintes itens: (1) Cilindro de CO<sub>2</sub>, (2) Abertura lateral, (3) Válvula de pressão, (4) Tubo capilar em PVC, (5) Rotômetro, (8) Ventilador, (10) Compressor de ar com vazão de 1 l/min.

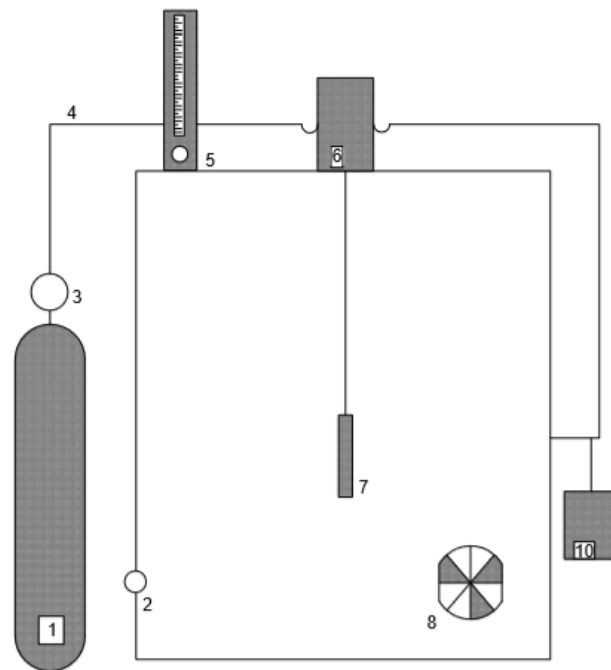
**Figura 16: Câmara de carbonatação na sua fase inicial de testes**



Fonte: Autor

Com a finalidade de controlar mais o processo de carbonatação acelerada executada nesta câmara, foi aplicada em toda a câmara uma vedação a base polimérica, com utilização de silicone, e reforço nas quinas, ao redor das conexões e porta da câmara, aumentando a manutenção da estanqueidade da câmara durante o processo de carbonatação dos ARGC. Com a finalidade de melhorar o controle do processo de carbonatação e obter-se dados mais precisos, como quantidade de CO<sub>2</sub>, foram adicionados a câmara original alguns equipamentos como: registros metálicos para controle de vazão (2,3), medidor de CO<sub>2</sub> (equipamento de aquisição de dados – data logger) temperatura e umidade relativa de ar (6) e seu sensor externo (7) inserido exatamente no centro da câmara, como mostra a figura 17.

**Figura 17: Câmara com todos os equipamentos de controle e medição de variáveis**



Fonte: Autor

A câmara possui internamente uma divisão em três grades metálicas móveis, que foram revestidas com tela polimérica de pequena abertura para que os ARGC apoiados sob elas tivessem acesso a circulação da de gases dentro da câmara, aumentando a eficácia do processo de carbonatação dentro da câmara, a disposição interna da câmara e sua visão travada podem ser vistas na figura 18.

**Figura 18: a) Divisão interna de grades metálicas com telas poliméricas e b) câmara fechada e travada**



Fonte: Autor



A colocação de novos equipamentos de medição na câmara proporcionou maior controle no processo de carbonatação dos ARGC.

### 3.4.2 Procedimento de carbonatação das amostras

O procedimento de carbonatação foi padronizado, através de etapas definidas antes do início dos ensaios, reproduzidas e repetidas em todas as carbonatações, com o intuito de reduzir ao máximo qualquer variável de interferência no comportamento da câmara frente à carbonatação. É importante citar que a carbonatação é um processo que se usa da concentração do gás em questão e do tempo de exposição a este como os dois principais fatores que norteiam este processo, para isto nesta pesquisa a concentração de dióxido de carbono dentro da câmara, expressa em porcentagem, foi determinada com base na quantidade máxima de dióxido de carbono que a câmara suporta com todas as conexões e portas travadas, este valor foi medido com o auxílio de um medidor de CO<sub>2</sub>, que através de *sistema de aquisição de dados (data logger)* forneceu estes valores que foram usados como parâmetro de quantificação a nível percentual.

Os procedimentos realizados para todas as carbonatações foram:

- As alíquotas de ARGC foram retiradas no tonel, onde estavam armazenadas em sacos vedados, e mantidas durante todo o trajeto até a câmara de carbonatação;
- Os sacos foram abertos e os ARGC foram dispostos em três prateleiras, distribuídos uniformemente evitando a existência de agregados sobrepostos, fazendo com que nenhum agregado estivesse em contato com a prateleira. Logo após a câmara era fechada e travada.
- Nos ensaios em que eram feitos vários tempos de carbonatação com a mesma concentração foi-se colocada toda a quantidade de amostra para todos os tempos e concentrações, evitando assim que a porta da câmara fique aberta por muito tempo;
- Após fechamento e travamento da câmara a porta só podia ser aberta novamente ao final do tempo de ensaios;
- Todos os equipamentos foram ligados;
- Inicialmente abriu-se todas as conexões da câmara para que o fluxo da mistura complete o volume da câmara, fazendo com que todo o ambiente das prateleiras seja preenchido com a mistura;

- Quando a porcentagem desejada para a amostra era alcançada, a contagem do tempo de ensaio era iniciada;
- Após o tempo de exposição, foram-se vertidos as prateleiras em bandejas e a amostra armazenada em um saco plástico, diferente do saco onde a amostra estava inicialmente, e da mesma forma deve ser vedado e levado ao ambiente isolado (câmara úmida desativada localizada no LEMA), para ser analisada nos ensaios posteriores.

#### 3.4.2.1 Determinação dos parâmetros de ensaio de carbonatação

Os parâmetros a serem determinados a partir dos ensaios de carbonatação foram: concentração de dióxido de carbono, temperatura do ensaio, umidade relativa do ar, condição do ARGC (seca e úmida) e tempo de exposição do ARGC ao processo de carbonatação. O acompanhamento do comportamento das amostras frente a combinação destes parâmetros expressam, para as condições de carbonatação executadas, o impacto do processo frente ao melhoramento dos ARGC. Os parâmetros temperatura (25°C – 27° C) e umidade relativa do ar (65% - 75%) foram acompanhados considerando que as condições já existentes no ambiente do laboratório estavam dentro destes intervalos, não necessitando de equipamentos de controle, somente medição com o auxílio do termo-higrômetro e o sistema de aquisição de dados(acoplados ao medidor de CO<sub>2</sub>).

Porém a literatura confirma que o principal fator que rege a carbonatação é a difusão do dióxido de carbono e que em faixas de 20° C - 40°C esta é prejudicada segundo Papadakis *et al*, (1991b) apud Pauletti *et al*, (2006) e que também pequenas variações não influenciam significativamente neste processo (NEVILLE,1997). Como exposto por Pauletti *et al* (2006) a umidade relativa do ar para carbonatações aceleradas estão sendo executadas em intervalos de 50% a 85%, sendo a mais utilizada 70%, isto verificado em diversas pesquisas em valores de 50% a 70% (HUOMO; TAKADA, 1993 *apud* POSSAN (2004); HOW; LEWIS, 1987 *apud* PAULETTI *et al*, 2006; SIM; PARK, 2011; THIERY, 2007 *apud* POSSAN, 2010).

Para o parâmetro de concentração de dióxido de carbono foram testadas as condições de umidade do ARGC, seca e úmida com utilização da água de absorção. A condição úmida foi executada de forma que a quantidade de água obtida nos ensaios de absorção foi homogeneizada no ARGC e deixada em tonel, munido com tampa, pelo tempo de 24h. A preparação da condição seca foi executada colocando-se os ARGC dentro da estufa (100°C) e

sendo retirados após 24 horas do início do ensaio e executando o resfriamento, em sala refrigerada a 20°C, por um tempo de 3 horas. As carbonatações seguiram nas duas condições do ARGC, sendo executadas em concentração de 7%, inicial de teste como quantidade mínima, e dois tempos sendo de 24 e 48h.

Todos os ensaios foram feitos respeitando as normas vigentes para determinação da absorção em agregados graúdos NBR NM 53(ABNT, 2003) e seguindo os procedimentos determinados neste trabalho.

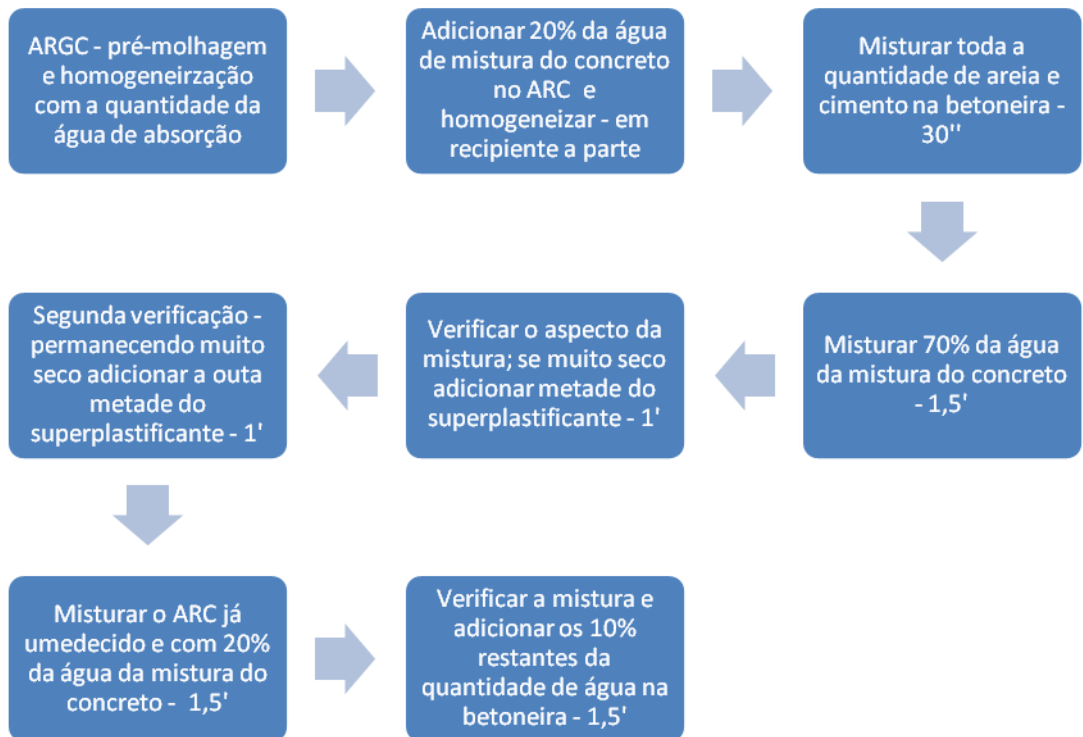
### **3.5 Formulação e produção dos concretos**

Os concretos foram produzidos a partir da observação dos valores de massa específica dos agregados graúdos reciclados de concreto. A dosagem foi feita com base no estudo desenvolvido por TENÓRIO (2007), onde utilizou misturas contendo agregados reciclados visando uma melhor adequação de suas massas específicas, para este estudo utilizou-se o traço com fator a/c 0,50 e teor de argamassa de 0,51, sendo recalculado com os valores com massa específica dos ARGC utilizados neste estudo. Para a produção dos concretos também foi utilizado superplastificante em teor total de 0,2%, calculado em relação a quantidade de cimento em massa, em duas etapas de mistura.

Foram produzidos três concretos, sendo produzido com agregado natural (CAN), agregado graúdo reciclado de concreto carbonatado tratado com CO<sub>2</sub> em concentração de 32% e tempo de exposição de 14 dias (CARGCC) e o agregado graúdo reciclado de concreto não carbonatado (CARGCNC). Os ARGC foram pré-molhados e homogeneizados com a quantidade de água de absorção (encontrado nos ensaios de absorção), sendo este o primeiro passo da produção dos concretos. Deve-se ressaltar que os agregados naturais não passaram por esta etapa, visto sua característica de baixa absorção.

Os procedimentos e a seqüência de mistura dos concretos foram feitos de forma idêntica para as três produções como mostra a figura 19.

**Figura 19: Procedimentos utilizados para a produção dos concretos**



Fonte: Autor

### 3.6 Propriedades dos Concretos

Os ensaios que serão feitos no concreto fresco serão o ensaio de consistência do concreto. A partir deles poderemos obter uma comparação dos concretos produzidos com agregado natural, agregado graúdo reciclado de concreto não carbonatado e agregado graúdo de concreto carbonatado, observando-se assim a interação dos materiais na mistura de concreto no estado fresco.

#### 3.6.1 Estado Fresco

- *Abatimento*

O ensaio de abatimento de tronco de cone foi realizado a luz dos procedimentos expostos na NBR NM 67 (ABNT, 1998).

### 3.6.2 Estado Endurecido

Os corpos de prova moldados, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2007), com o concreto produzido com o ARGC carbonatado (graúdo), serão submetidos ao processo de cura, dentro do tanque de cura localizado no NPT – UFAL, e rompidos na prensa para determinação de sua resistência a compressão, nos tempos de 7 e 28 dias.

- *Resistência Mecânica*

Os ensaios para a determinação da resistência a compressão, do concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto carbonatado, serão executados de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 2007), onde os corpos de prova foram moldados conforme a norma NBR 5738 (ABNT, 2007).

- *Carbonatação*

A carbonatação no concreto endurecido foi aplicada em uma concentração de 32% e um tempo de exposição de 5 dias. O sistema utilizado para a carbonatação acelerada foi o mesmo utilizado na carbonatação dos agregados reciclados de concreto.

- *Profundidade de Carbonatação*

Para analisar a profundidade de carbonatação foram moldados três corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm), desmoldados e curados, por via úmida, durante 28 dias. No 28º dia os corpos de prova foram levados a estufa em temperatura de 100° C, por um período de 24 horas, a fim de retirar toda a umidade adquirida no processo de cura. Após resfriados por três horas, em temperatura ambiente, os corpos de prova foram levados à câmara de carbonatação nas seguintes condições: 32% de concentração de CO<sub>2</sub>, temperatura média de 25°C, umidade relativa do ar média de 65% e tempo de exposição de 5 dias.

Para a visualização da penetração do dióxido de carbono em estruturas é necessário a utilização de um indicador químico de pH. Tal procedimento consiste primeiramente na liberação da superfície na qual será medida a profundidade de carbonatação e logo em seguida a esta fase deve-se borrifar uma solução hidro-alcóolica de fenolftaleína. O CPC-18/RILEM (1988) apud Polito (2006) sugere a utilização de 1 grama de fenolftaleína em álcool etílico de 70% sobre a superfície do concreto. O concreto carbonatado não muda de cor, enquanto o concreto ainda não carbonatado assume a típica cor rosa da fenolftaleína em ambiente alcalino. Este ensaio deve ser executado em uma superfície sem rupturas ou cortes, sendo ortogonal a superfície externa ao concreto, previamente seca e liberada de pó e partículas

soltas sem o uso de água ou abrasivos. A profundidade de carbonatação é medida como a distância da superfície externa do concreto e a margem da região colorida (HELENE, 2010).

A ratificação da carbonatação pode ser feita através de ensaios de difração de raios x, análise térmica diferencial e termogravimetria, onde se pode observar a presença de calcita e aragonita, bem como também a presença de carbonatos de cálcio.

Neste trabalho para expor a área a ser ensaiada utilizou-se a prensa mecânica de rompimento a compressão e o auxílio de uma barra de ferro para direcionar a carga de forma central, com o intuito de analisar a profundidade de carbonatação no centro do corpo de prova.

○ *Índice de vazios e Absorção de água*

Os ensaios de absorção, índice de vazios do concreto endurecido, foram feitos com base no exposto na NBR 9778 (ABNT,2005). Os três tipos de concreto foram submetidos aos mesmos procedimentos dos ensaios, diferindo apenas a idade entre eles. No quadro 1 pode-se verificar as condições dos concretos quando submetidos aos procedimentos de norma.

**Quadro 1 - Condição de idade e forma dos CPs dos concretos submetidos ao ensaio de absorção e índice de vazios**

CONCRETOS	IDADE	FORMA E DIMENSÕES
Concreto com ARGC sem tratamento	54	Cilíndrico 15X15
Concreto com ARGC carbonatado	48	
Concreto com agregado natural	40	

Fonte: Autor

○ *Permeabilidade ao ar – Método de FIGG*

Para a determinação das propriedades de durabilidade foram definidos, também no estado endurecido, os ensaios de permeabilidade ao ar pelo Método de Figg conforme a norma E 413 LNEC (1993).

Foi-se moldado um corpo de prova prismático com dimensões 50 cm x 15 cm x 15 cm para cada concreto estudado. Em uma das faces longitudinais foram executados cinco furos

com profundidade de 4 cm e diâmetro de 6 mm, igualmente espaçados, com auxílio de uma furadeira de bancada (figura 20).

**Figura 20: Execução dos furos na furadeira de bancada**



Fonte: Autor

A cura dos prismas foi feita pela via úmida em tanques de imersão. Após a retirada do tanque de cura, na idade do ensaio, o corpo de prova foi levado à estufa, à temperatura de 105 °C, onde permaneceu por 24 horas. Depois de retirado da estufa, o prisma foi mantido a temperatura ambiente por 24 horas para resfriamento. A execução do ensaio pelo método de Figg consiste em aplicar, com a utilização de agulha (utilizada em coletas sanguíneas), conectada através de mangueira a uma bomba de vácuo, uma pressão de -55 kPa (-413,71 mmHg) no interior do furo, o qual deve estar devidamente vedado com tampão de borracha e silicone. Fecha-se o registro do equipamento de medição, isolando-se o sistema, e então, com cronômetro, é registrado o tempo necessário para o acréscimo de pressão para -50 kPa (-376,10 mmHg), devido à entrada de ar no interior do furo através dos poros do concreto. O tempo assim determinado é denominado tempo de permeabilidade. A leitura da pressão é feita em um vacuômetro instalado num trecho da mangueira, conforme Figura 21 (b). A Figura 21 (a) mostra o equipamento confeccionado para execução do ensaio.

**Figura 21: a) Equipamento e esquema do ensaio, b) Detalhe do vacuômetro e do registro, instalados em um trecho da mangueira**



Fonte: Tenório (2007)

A relação entre o tempo de permeabilidade ao ar do concreto e a classificação do tipo de material cimentício é demonstrado no quadro 2.

**Quadro 2: Classificação do tipo de material cimentício em função do tempo de permeabilidade**

CATEGORIA	TEMPO DE PERMEABILIDADE (s)	INTERPRETAÇÃO	TIPO DE MATERIAL
0	<30	Pobre	Argamassa porosa
1	30-100	Moderada	Concreto ~ 20 Mpa
2	100-300	Boa	Concreto 30-50 Mpa
3	300-1000	Ótima	Concreto bem adensado e bem curado
4	>1000	Excelente	Concreto modificado com polímeros

Fonte: Cather et al., 1984 *apud* Tenório, 2007

A norma LNEC E 413 (1993) possui uma relação matemática chamada de *tempo de exclusão de ar*, que expressa uma relação direta com a proteção de armaduras (Equação 3).

(3)

TEA = tempo de exclusão de ar

t = tempo medido (s)

V = volume do aparelho (ml)

No quadro 3 pode-se verificar a relação de capacidade de proteção das armaduras a partir dos valores de permeabilidade ao ar.



**Quadro 3: Valores correntes da permeabilidade aparente ao ar e índice TEA, para concretos com diferentes capacidades de proteção das armaduras**

<i>Categoria do concreto</i>	<i>Capacidade de proteção</i>	<i>Permeabilidade ao ar</i>	
		<i>Tempo (s)</i>	<i>TEA (s/ml)</i>
0	MÁ	<30	<8
1	FRACA	30-100	8-25
2	RAZOÁVEL	100-300	25-75
3	BOA	300-1000	75-250
4	EXCELENTE	>1000	>250

Fonte: LNEC E 413 (1993)

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Nesta parte do trabalho serão expostos os resultados obtidos nos ensaios com o ARGC sem tratamento e com o ARGC carbonatado. Os resultados serão expostos inicialmente com a carbonatação dos ARGC, logo após com os ensaios de caracterização física e química do ARGC com e sem carbonatação e por fim com a produção dos concretos produzidos com ARGC e seus respectivos ensaios.

### **4.1 Determinação de parâmetros do tratamento por carbonatação**

Como visto, para a definição do processo de carbonatação foi necessário determinar os parâmetros que governariam os ensaios, para isto foram acompanhados os valores de temperatura e umidade relativa do ar, e os parâmetros concentração de CO<sub>2</sub> e tempo de exposição foram escolhidos em valores extremos, levando-se em consideração a capacidade mínima da câmara além zero (7%) e máxima da câmara (32%), os tempos de exposição escolhidos foram o mínimo de 24 horas e máximo de 14 dias, que é o tempo de duração de 23 kg de CO<sub>2</sub> emanados durante o ensaio de forma ininterrupta. Uma análise inicial foi feita em relação à condição de umidade do ARGC, onde neste procedimento foram feitos testes com a concentração mínima de 7% e em tempos de exposição de 24 e 48 horas, executando nas condições seca e úmida do ARGC.

Para a escolha da concentração de dióxido de carbono e do tempo de exposição para a reprodução dos ensaios em maior volume, foram usados os valores de comportamento do ARGC mediante capacidade de absorção de água e variação de massa específica, buscando com estes a redução da capacidade de absorção de água e o aumento da massa específica.

Abaixo seguem as tabelas com dados que mostram os resultados obtidos com as variações de concentração de CO<sub>2</sub>, levando em consideração os valores de referência (agregado natural) (tabela 5).

**Tabela 5: Resultados de absorção e massa específica do agregado natural e do ARGC não carbonatado**

<b>AGREGADO NATURAL</b>		<b>g/cm<sup>3</sup></b>
Massa específica do agregado seco (d)		2,61
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca (ds)		2,61
Massa específica aparente (da)		2,61
Absorção de água - A(%)		0,02
<b>AGREGADO NÃO CARBONATADO</b>		<b>g/cm<sup>3</sup></b>
Massa específica do agregado seco (d)		2,60
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca (ds)		2,42
Massa específica aparente (da)		2,31
Absorção de água - A(%)		4,74
<b>REPETIBILIDADE DO ENSAIO</b>		
Massa específica do agregado seco (d)		2,63
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca (ds)		2,47
Massa específica aparente (da)		2,38
Absorção de água - A(%)		4,07

Fonte: Autor

O agregado natural, por sua característica granítica, apresentou menor capacidade de absorção, como esperado e massa específica em valores próximos a do agregado reciclado não carbonatado, este comportamento ocorreu com os valores de massa específica do agregado seco (d), não repetido nos outros valores de massa específica em condição saturada superfície seca e aparente, como exposto na literatura, onde a massa específica dos ARGC são menores do que os agregados naturais. Estes valores serão usados como referência para análise do impacto da carbonatação nas amostras.

Na carbonatação em condição seca e 24 horas de exposição o ARGC (tabela 6) apresentou uma capacidade de absorção 2% menor do que na mesma condição em 48 horas, esta diferença pequena demonstra que na concentração de 7%, na condição seca o ARGC não apresenta impacto significativo na capacidade de absorção do ARGC. Este comportamento se repete para as massas específicas, todas em valores diferindo apenas em na massa específica do agregado seco que, em 48 horas apresentou um aumento de 1%. Com estes resultados vê-se que a utilização da condição seca do ARGC não apresenta impactos significativos na capacidade e massa específica do ARGC.

**Tabela 6: Resultados de absorção e massa específica do ARGC carbonatado em concentração de 7% em tempos de exposição de 24 e 48 horas nas condição seca**

<b>ARGC 7%_24HORAS_CONDIÇÃO SECA</b>		<b>g/cm<sup>3</sup></b>
Massa específica do agregado seco (d)		2,66
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca (ds)		2,46
Massa específica aparente (da)		2,35
Absorção de água - A(%)		4,97
<b>REPETIBILIDADE DO ENSAIO</b>		
Massa específica do agregado seco (d)		2,65
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca (ds)		2,46
Massa específica aparente (da)		2,34
Absorção de água - A(%)		5,03
<b>ARGC 7%_48HORAS_CONDIÇÃO SECA</b>		<b>g/cm<sup>3</sup></b>
Massa específica do agregado seco (d)		2,7
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca (ds)		2,51
Massa específica aparente (da)		2,39
Absorção de água - A(%)		4,71
<b>REPETIBILIDADE DO ENSAIO</b>		
Massa específica do agregado seco (d)		2,66
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca (ds)		2,44
Massa específica aparente (da)		2,32
Absorção de água - A(%)		5,5

Fonte: Autor

Os resultados da condição úmida estão apresentados na tabela 7, em tempos de 24 e 48 horas e concentração de 7%.

**Tabela 7 - Resultados de absorção e massa específica do ARGC carbonatado em concentração de 7% em tempos de exposição de 24 e 48 horas nas condição úmida**

<b>ARGC 7%_24HORAS_CONDIÇÃO ÚMIDA</b>		<b>g/cm<sup>3</sup></b>
Massa específica do agregado seco (d)		1,63
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca (ds)		1,58
Massa específica aparente (da)		1,5
Absorção de água - A(%)		5,34
<b>REPETIBILIDADE DO ENSAIO</b>		
Massa específica do agregado seco (d)		2,64
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca (ds)		2,44
Massa específica aparente (da)		2,33
Absorção de água - A(%)		5,09
<b>ARGC 7%_48HORAS_CONDIÇÃO ÚMIDA</b>		<b>g/cm<sup>3</sup></b>
Massa específica do agregado seco (d)		2,67
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca (ds)		2,46
Massa específica aparente (da)		2,33
Absorção de água - A(%)		5,52
<b>REPETIBILIDADE DO ENSAIO</b>		
Massa específica do agregado seco (d)		2,62
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca (ds)		2,46
Massa específica aparente (da)		2,36
Absorção de água - A(%)		4,17

Fonte: Autor

Já na condição úmida, com concentração de 7% e tempos de 24 e 48 horas, o ARGC apresentou uma redução de 7,7% na sua capacidade de absorção de água quando o tempo de exposição dobrou, e suas massas específicas também apresentaram melhora, mostrando-se em valores maiores, porém deve-se observar que na primeira amostra ensaiada em 24 horas condição úmida os valores de massa específica estão bem abaixo de valores normalmente apresentados por estes materiais, fato que não se observa na amostra de repetibilidade, então infere-se que este comportamento de aumento de massa específica, para comparação de média (tempo 24 horas) não se aplica. Porém, analisando somente a amostra de repetibilidade, observa-se um comportamento constante nos valores de massa específica diferindo somente em 2% na massa específica aparente, o que configura que não houve melhora significativa do comportamento do ARGC frente a carbonatação, quando em sua condição úmida.

A fim de analisar os resultados das réplicas de cada amostra foram calculados os valores de média e coeficiente de variação, como pode ser visto na tabela 8 abaixo.

**Tabela 8: Valores de média, desvio padrão e variância da densidade da repetibilidade das amostras geradas no estudo de condição dos ARGC**

<b>ARGC NÃO CARBONATADO</b>	<b>MÉDIA</b>	<b>DESVIO</b>	<b>COEF. VARIÇÃO</b>
d	2,61	0,02342	0,009
ds	2,45	0,03572	0,015
da	2,34	0,04483	0,019
A(%)	4,40	0,47293	0,107
<b>ARGC 7% 24 HORAS CONDIÇÃO SECA</b>	<b>MÉDIA</b>	<b>DESVIO</b>	<b>COEF. VARIÇÃO</b>
d	2,65	0,00314	0,001
ds	2,46	0,00407	0,002
da	2,34	0,00396	0,002
A(%)	5,00	0,04383	0,009
<b>ARGC 7% 24 HORAS CONDIÇÃO ÚMIDA</b>	<b>MÉDIA</b>	<b>DESVIO</b>	<b>COEF. VARIÇÃO</b>
d	2,13	0,71284	0,335
ds	2,01	0,61145	0,304
da	1,91	0,58440	0,306
A(%)	5,21	0,17879	0,034
<b>ARGC 7% 48 HORAS CONDIÇÃO SECA</b>	<b>MÉDIA</b>	<b>DESVIO</b>	<b>COEF. VARIÇÃO</b>
d	2,68	0,02742	0,010
ds	2,48	0,04325	0,017
da	2,35	0,05467	0,023
A(%)	5,14	0,60418	0,118
<b>ARGC 7% 48 HORAS CONDIÇÃO ÚMIDA</b>	<b>MÉDIA</b>	<b>DESVIO</b>	<b>COEF. VARIÇÃO</b>
d	2,64	0,03780	0,014
ds	2,46	0,00152	0,001
da	2,34	0,02282	0,010
A(%)	4,85	0,95631	0,197

Fonte: Autor

As amostras submetidas a 24 horas de exposição na condição seca apresentaram o menor coeficiente de variação para os dados já os valores massa específica, obtiveram maior coeficiente de variação na condição úmida com tempo de exposição de 24 horas. O valor de absorção para as amostras de testes de condição de umidade do ARGC demonstrou o maior coeficiente de variação na amostra em condição úmida e em tempo de 48 horas.

A partir destes resultados verifica-se que as amostras em sua condição úmida não apresentam valores aproximados a média dos resultados em réplica, os valores do coeficiente de variação destas amostras se apresentaram sempre os maiores do corpo amostral, disto

constata-se a fragilidade do comportamento das amostras mediante a mistura da água de absorção nos agregados antes do processo de carbonatação, já que nesse momento de mistura da água o processo de homogeneização e a condição de temperatura do ambiente influenciam na absorção do ARGC, podendo ser esta a causa do comportamento da amostra em sua condição úmida. A condição seca, por sua vez apresentou menores valores de coeficiente de variação, apresentando assim um melhor comportamento mediante ao processo de carbonatação.

A partir do exposto a definição do parâmetro condição do ARGC foi que todas as amostras serão carbonatadas em sua condição seca. Conduzindo agora os testes para a maior concentração e tempo de exposição, em 32%, 7 e 14 dias, executados em amostra seca, definido na etapa anterior, verificam-se resultados expressivos quanto a diminuição da capacidade de absorção de água, como pode ser visto na tabela 9.

**Tabela 9: Resultados de absorção e massa específica do ARGC carbonatado 32% em tempo de exposição de 7 e 14 dias na condição seca e suas respectivas réplicas**

<b>ARGC 32%_7DIAS_CONDIÇÃO SECA</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>
Massa específica do agregado seco (d)	2,66
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca (ds)	2,47
Massa específica aparente (da)	2,35
Absorção de água - A(%)	4,85
<b>REPETIBILIDADE DO ENSAIO</b>	
Massa específica do agregado seco (d)	2,63
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca (ds)	2,46
Massa específica aparente (da)	2,36
Absorção de água - A(%)	4,32
<b>ARGC 32%_14DIAS_CONDIÇÃO SECA</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>
Massa específica do agregado seco (d)	2,68
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca (ds)	2,52
Massa específica aparente (da)	2,43
Absorção de água - A(%)	3,86
<b>REPETIBILIDADE DO ENSAIO</b>	
Massa específica do agregado seco (d)	2,63
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca (ds)	2,49
Massa específica aparente (da)	2,41
Absorção de água - A(%)	3,49

Fonte: Autor

Quando analisa-se os valores estatísticos associados as massas específicas e absorção verifica-se que os resultados de desvio padrão e variância são bem pequenos, apresentando assim uma estabilidade maior a repetibilidade e uma confiança significativa nos dados encontrados para a concentração de 32%. Enquanto estes dados apresentam-se menores na concentração de 32% verifica-se um valor menor ainda nos resultados estatísticos associados ao aumento do tempo de exposição, como se verifica os valores para 14 dias de exposição (tabela 11). Nestes resultados a variância na capacidade de absorção comparativa aos 7 dias foi de aproximadamente 50%. Conclui-se que os parâmetros que fornecem a maior interferência da carbonatação no ARGC são as amostras em sua condição de agregado seco, concentração de 32% de dióxido de carbono na câmara de carbonatação em 14 dias de exposição ao processo.

Com o intuito de ratificar a escolha das condições expostas acima, os valores de coeficiente de variação foram determinados, para que possa ficar clara, qual a uniformidade dos resultados e qual deles se aproxima mais da média dos valores em cada ensaio, trazendo confiabilidade ao parâmetro na qual vamos fixar (tabela 10).

**Tabela 10: Resultados da média, desvio padrão e variância das amostras carbonatadas em concentração de 32% e tempo de exposição de 7 e 14 dias na condição seca**

<b>ARGC 32% 7 DIAS</b>	<b>MÉDIA</b>	<b>DESVIO</b>	<b>COEF. VARIÇÃO</b>
D	2,64	0,0197	0,007
Ds	2,47	0,0034	0,001
Da	2,36	0,0051	0,002
A(%)	4,58	0,3739	0,082
<b>ARGC 32% 14 DIAS</b>	<b>MÉDIA</b>	<b>DESVIO</b>	<b>COEF. VARIÇÃO</b>
D	2,65	0,032	0,012
Ds	2,51	0,018	0,007
Da	2,42	0,012	0,005
A(%)	3,68	0,263	0,071

Fonte: Autor

Quando se analisa de forma isolada os resultados de massa específica e absorção das amostras carbonatadas em 32% de concentração e tempos de exposição de 7 e 14 dias (tabela 9), fica evidenciado o aumento de massa específica máximo em torno de 2,89% e de absorção em 20%. Porém com a finalidade de observar melhor estes dados, os valores de desvio padrão



e coeficiente de variação foram calculados (tabela 10); o coeficiente de variação mostra uma uniformidade maior nos dados de absorção apresentados nas amostras carbonatadas em 14 dias, apresentando valor abaixo de 0,08, demonstrando uniformidade dos resultados, conseqüentemente uniformidade quanto à repetibilidade dos ensaios e confiabilidade da concentração e tempo de exposição.

## 4.2 Caracterização Física do ARGC

### 4.2.1 Absorção de água e massa específica

Determinados o tempo de exposição e a concentração de dióxido de carbono que será utilizada na câmara de carbonatação, a tabela 11 mostra um resumo destes resultados, onde fica evidente o resultado gerado com a carbonatação dos agregados reciclados de concreto, frente ao agregado natural e o reciclado de concreto não carbonatado.

**Tabela 11: Resultados de absorção e massa específica dos agregados naturais, reciclados de concreto não carbonatos e reciclados de concreto carbonatados**

<b>CONDIÇÃO DO AGREGADO</b>	<i>Concentração de CO<sub>2</sub> na câmara</i>	<i>Tempo de exposição (dias)</i>	<i>Massa específica do agregado seco (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Massa específica do agregado na cond. S.s.s (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Absorção de água (%)</i>
NA	-	-	2,61	2,61	2,61	0,02
ARGCNC	-	-	2,61	2,47	2,38	4,40
ARGCC	32%	14	2,65	2,52	2,44	3,60

Fonte: Autor

A partir destes resultados pode-se analisar que, com base nos ensaios tomados como parâmetro de escolha para uma concentração de dióxido de carbono e tempo de exposição dentro da câmara, os testes feitos com as amostras em concentrações de 32% e tempos de exposição de 14 dias apresentaram comportamento de atenuação de sua capacidade de absorção de água (aproximadamente 20%) e aumento de sua massa específica quando comparado com o agregado natural e o reciclado não carbonatado, alcançando assim o objetivo esperado quando do uso da carbonatação como processo de melhoramento das características de agregados reciclados de concreto.

A massa específica do agregado seco (d) do ARGC apresentou valor igual a do agregado natural, porém deve-se levar em consideração que o ARGC possui em sua constituição a presença de agregado natural, condição que provavelmente conduziu a este comportamento.

O agregado reciclado graúdo de concreto carbonatado (ARGCC) 32% em 14 dias apresentou redução de aproximadamente 30% da capacidade de absorção de água, se comparado com o ARGC carbonatado em 7% em 1 dia. Comparando-o com o ARGC sem tratamento essa redução foi de aproximadamente 20%. Os valores de absorção de água de agregados reciclados de concreto, citado na literatura, com dimensão máxima característica de 12,5 mm e resistência mecânica de 20 MPa é em torno dos 4,5% - 9%, e apresenta um comportamento de diminuição quanto maior for a resistência mecânica, já os valores de massa específica em torno de 2,3 g/cm<sup>3</sup> - 2,5 g/cm<sup>3</sup> (WERLE et al., 2011; TSUJINO et al., 2007; THOMAS et al., 2012). Bem como a NBR 15116 (ABNT, 2004) versa que o valor limite de absorção para o agregado classe A (agregado reciclado graúdo de concreto) para preparo de concreto sem fins estruturais deve ser menor que 7%; observa-se a partir destes resultados que o ARGC carbonatado adequa-se a estes valores, demonstrando melhora de qualidade do ARGC carbonatado.

Os valores de absorção e massa específica do ARGC exposto em concentração de 32% em 14 dias apresentaram valores maiores de massa específica e menores de absorção, comportamento observado também nas outras amostras, de forma que em geral quanto maior o tempo de exposição e a concentração do dióxido de carbono maior serão os valores de massa específica e menores os de absorção de água.

Portanto o comportamento do ARGCC (32% e 14 dias) difere da faixa considerada para os agregados reciclados de concreto, no tocante ao critério de absorção de água e massa específica o que demonstra um impacto positivo do tratamento nestes agregados.

#### 4.2.2 Perda de Massa – Mufla

Os valores de perdas de massa do ARGC, em temperaturas de 800°C e 1000°C estão na tabela 12.

**Tabela 12: Perda de massa do ARGC**

<i>Temperatura</i>	<i>Amostra</i>	<i>M<sub>i</sub> (g)</i>	<i>M<sub>f</sub> (g)</i>	<i>Perdas (g)</i>	<i>Perdas (%)</i>
<b>1000° C</b>	ARGCC_32%_14d	23,843	20,034	3,809	15,97
	ARGCNC	19,187	17,042	2,145	11,18
<b>800° C</b>	ARGCC_32%_14d	27,288	25,139	2,148	7,87
	ARGCNC	29,334	26,389	2,945	10,04

Fonte: Autor

Segundo exposto na revisão da literatura, apresentada anteriormente, em temperaturas de 1000°C grande parte dos compostos hidratados do cimento e o quartzo são consumidos, fazendo com que a perda de massa seja acentuada. Quanto maior for a perda de massa do agregado maior é o indicativo de compostos presentes neste agregado, compostos estes que são o produto da ação do dióxido de carbono nos poros do ARGC.

Na tabela 13 pode-se analisar a composição, através do DRX, da amostra submetida a 1000°C (32% \_ 14dias).

**Tabela 13: Resultado do DRX do ARGCNC submetido a 1000°C**

<b>Nome gráfico</b>	<b>N°</b>	<b>ELEMENTOS</b>
A	<b>1</b>	<i>Quartzo</i>
Q1	<b>4</b>	<i>carbeto de magnésio</i>
H3	<b>6</b>	<i>titânio de silício</i>
P1	<b>7</b>	<i>cloreto de potássio</i>

Fonte: Autor

Na amostra analisada no DRX, após ser submetida a 1000°C na mufla, tem-se a presença de resíduos de quartzo, magnésio, silício e potássio. No resultados de DRX em amostras de ARGC sem tratamento tem-se a presença de mais compostos como o hidróxido de cálcio e elementos hidratados de magnésio, sódio, potássio e silício. A existência destes compostos já é esperada, já que a composição do cimento traz todos esses elementos de forma isolada ou recombinada em sua forma hidratada.

Na tabela 14 pode-se analisar a composição, através do DRX, da amostra submetida a 1000°C (32% \_ 14dias).

**Tabela 14:Resultado do DRX do ARGC\_32%\_14d submetido a 1000°C**

Nome gráfico	Nº	ELEMENTOS
A	1	<i>Quartzo</i>
M3	2	<i>sulfeto de potássio hidrogenado</i>
Q1	9	<i>carbeto de magnésio</i>
P1	11	<i>cloreto de potássio</i>
H3	14	<i>titânio de silício</i>

Fonte: Autor

Como vê-se na tabela 14, o resultado de DRX da amostra de ARGC carbonatada\_32%\_14d, o aparecimento do composto *sulfeto de potássio hidrogenado*, indicando possivelmente que naquela amostra o carbonato de potássio ( $\text{KCaCO}_3$ ) fora consumido e re combinado.

### 4.3 Caracterização Mineralógica, Térmica e Microscópica

As análises mineralógicas e térmicas foram feitas no laboratório de química, localizado na universidade federal de Alagoa - UFAL, e as análises de MEV/EDS foram feitas no laboratório de análises microscópicas, localizado no Instituto federal de Alagoas (IFAL).

#### 4.3.1 BET

O agregado reciclado de concreto não carbonatado (ARGCNC) apresenta uma área BET da ordem de  $2,96 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ , com um diâmetro médio de poros da ordem de  $125,54 \text{ \AA}$  e volume específico de poros de  $0,009298 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ .

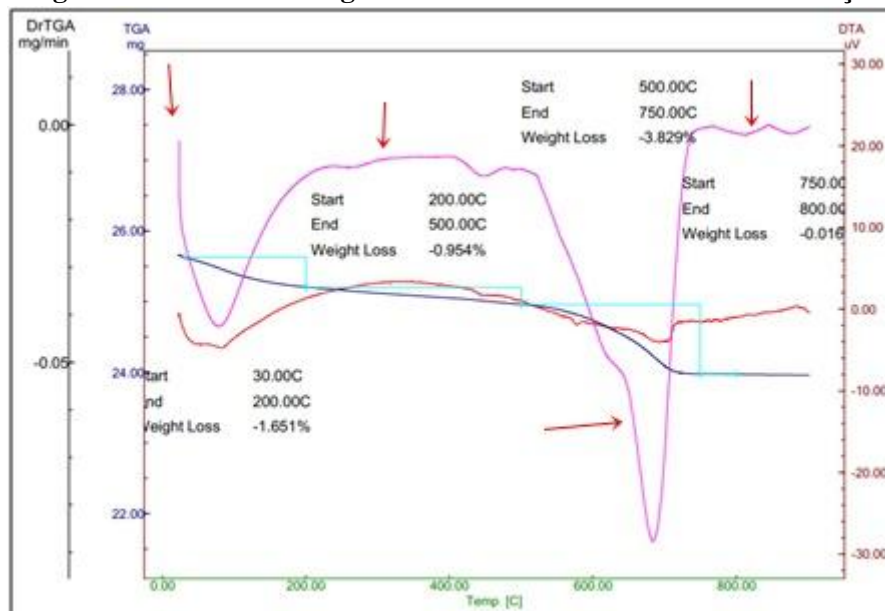
A porosidade do agregado reciclado de concreto aumenta quanto maior for a relação água/cimento e quanto maior for o grau de substituição (Thomas et al., 2012).

Já Xiao et al (2012) foi mais além e citou que quanto maior a porosidade dos agregados reciclados de concreto menor sua resistência ao processo de carbonatação (efeito negativo). Os agregados reciclados trazem, em sua constituição, a porosidade do concreto que o formou, já que sua constituição é agregada natural e argamassa aderidos em um único material.

### 4.3.2 TG

Na análise da termogravimetria temos o comportamento do ARGC não carbonatado frente a seu consumo. Observa-se na figura 22, na curva destacada, dois decaimentos em intervalos de temperatura de 0°C - 100°C e 560°C - 700°C e quatro ascensões em intervalos de temperatura de 100°C - 200°C, 280°C - 400°C, 480°C - 510°C, 700°C - 780°C. Para este comportamento analisa-se as perdas e ganhos e massa da amostra ao longo do ensaio. Na tabela 15 abaixo pode-se ver as perdas que a amostra sofreu e os possíveis compostos que foram consumidos e gerados durante o ensaio.

**Figura 22: Análise termogravimétrica da amostra sem carbonatação**



Fonte: Autor

Nesta tabela 15 correlaciona-se as faixas de temperatura com as perdas e que elemento foi despreendido e/ou consumido naquela faixa.

**Tabela 15: Perda e ganho de massa em cada fase da TG do ARGCNC**

Temperaturas (°C)	Análise dos materiais	% de massa
0 – 100	Perda de água livre + Gesso	10,90
100 – 200	Perda de água adsorvida, e combinada com C-S-H e da etringita e perda de água adsorvida dos argilominerais	0,78
200 – 300	Perda de hidróxido de cálcio + perda de água nas fases exagonais hidratadas do C3A do aglomerante	0,31
400 – 500	Perda de água da Portlandita dos aglomerantes e das hidroxilas + perda de quartzo	1,94
500 – 600	Começam as perdas do carbonato de cálcio e carbonato de magnésio	20
600 – 700		

Fonte:

Nos intervalos de temperatura de perda de massa observa-se uma perda de 20% da amostra, como perda do carbonato de cálcio, e 1,94% na faixa que representa as perdas de hidroxilas, o que representa as perdas do CaOH, ou seja, a carbonatação junto aos hidróxidos de cálcio é possível e provavelmente já iniciada na exposição do concreto usado para a produção do ARGC.

#### 4.3.3 DRX

Os resultados encontrados nos ensaios de DRX serão apresentados em forma de tabela, quantificando e selecionando os compostos encontrados e os gráficos com os picos de reflexão de cada composto.

- *ARCNC*

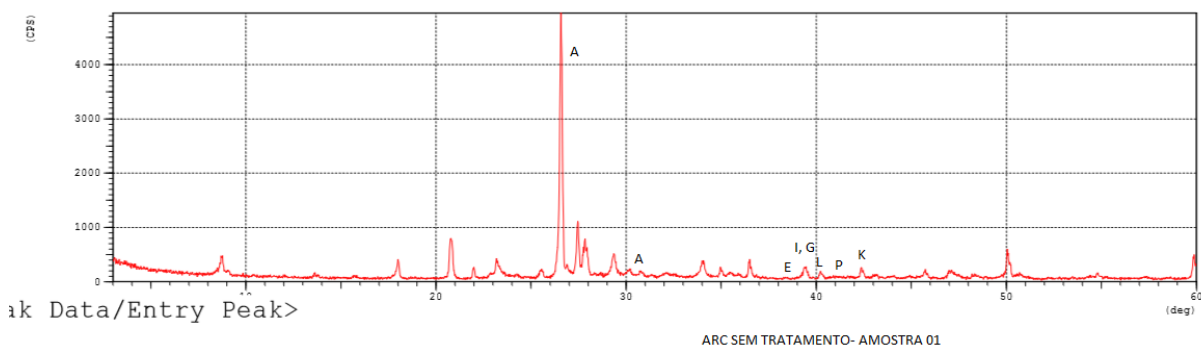
Na tabela 16 podem-se observar alguns compostos, estes possuem seus picos de refração selecionados no gráfico apresentado na figura 25; são compostos encontrados no cimento e seus produtos hidratados, fruto da hidratação já ocorrida quando de sua produção já que estamos tratando de agregados reciclados.

**Tabela 16: Tabela com os compostos encontrados na amostra 01 de ARGCNC**

Nome gráfico	Nº	ELEMENTOS
A	1	<i>Quartzo</i>
E	10	<i>hidróxido de cálcio (portlandita)</i>
G	15	<i>silicato hidratado</i>
I	17	<i>sódio, cálcio, aluminato, silicato</i>
L	23	<i>Silicato de magnésio e potássio Hidróxido de ferro</i>
K	58	<i>hidróxido de aluminato silicato hidratado</i>

Fonte: autor

Um fator a se destacar na composição mineralógica do ARGC em primeira amostra, é a constatação da existência da portlandita na matriz cimentícia do ARGC, bem como a existência de compostos hidróxidos e o quartzo também destacados em picos e representados pelas letras A, E, G, I, L, P e K, e podem ser vistos na figura 23. O quartzo é um dos compostos que mais são encontrados nas amostras, visto que está presente tanto na constituição do agregado natural como na formação da argamassa através do agregado miúdo. Mesmo com a etapa de seleção destas amostras, em retirada de agregados com pouca argamassa aderida (exposta na metodologia), a influência do quartzo permanece ainda muito forte, como pode ser visto na figura abaixo (Figura 23).

**Figura 23: Gráfico com a representação dos picos de reflexão dos compostos encontrados na amostra 01**

Fonte: Autor

Na tabela 17, em última repetição da composição mineralógica do ARGC não carbonatado mais uma vez ratificamos a existência de hidróxidos e silicatos, advindos da

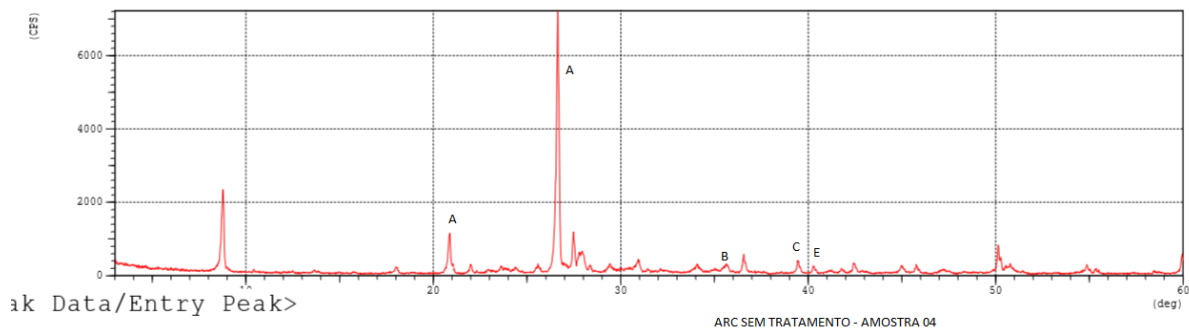
matriz cimentícia. Na figura 24 pode-se analisar os picos de refração dos compostos, evidenciando mais uma vez que o maior pico é do quartzo.

**Tabela 17: Tabela com os compostos encontrados na amostra 04 de agregado reciclado de concreto sem tratamento**

Nome gráfico	Nº	ELEMENTOS
A	1	<i>Quartzo</i>
B	3	<i>hidróxido de potássio</i>
C	7	<i>hidróxido de silicato de alumínio</i>
E	18	<i>silicato hidratado de potássio, alumínio</i>
F	23	<i>sulfato de potássio</i>
G	29	<i>cloreto de potássio</i>

Fonte: Autor

**Figura 24: Gráfico com a representação dos picos de reflexão dos compostos encontrados na amostra 04**



Fonte: Autor

Pode-se analisar que a partir da constituição do agregado reciclado de concreto que é a junção de agregado natural e argamassa, os elementos encontrados nos ensaios de DRX são advindos desta constituição. Em todas as amostras foi encontrado quartzo sempre em quantidade maior que outros compostos, a este comportamento deve-se a constituição da areia, do agregado natural e do próprio cimento. Os outros compostos todos são de presença marcante em cimentos. Algo a se destacar é a presença de *hidróxido de cálcio* ( $\text{CaOH}$ ) na amostra 01, este composto em presença de dióxido de carbono irá se combinar e formar o *carbonato de cálcio* ( $\text{CaCO}_3$ ), como exposto na literatura e discutido na referência bibliográfica.



○ *ARGCC\_32%\_14D*

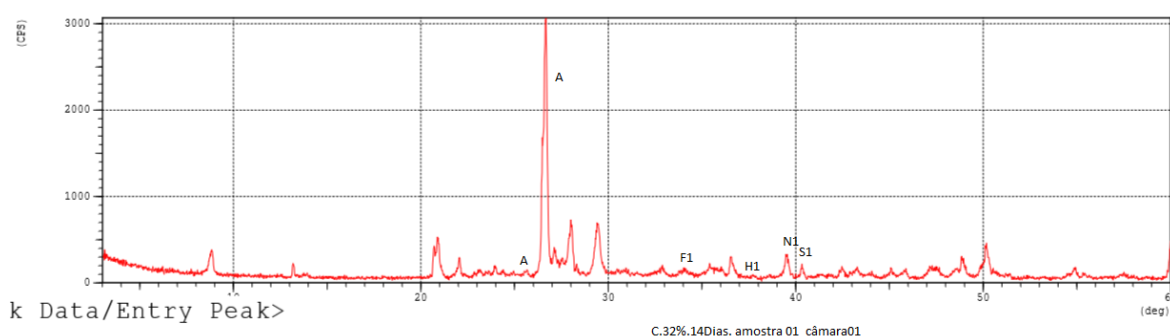
Os compostos encontrados na caracterização mineralógica do ARGCC\_32%\_14 dias amostra 01 são apresentados na tabela 18, onde os picos dos compostos são apresentados na figura 25. O destaque destes compostos analisados é a repetição de um pico mais intenso do quartzo, como analisado em outras amostras sem carbonatação e a formação de novos compostos, não encontrados em amostras não carbonatadas, o grande destaque a ser feito nesta caracterização é a formação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), produto da carbonatação do hidróxido de cálcio ( $\text{CaOH}$ ) gerado dentro dos poros da matriz cimentícia da argamassa, comportamento que era esperado dentro do processo de carbonatação executado, como ferramenta de melhora das características de capacidade de absorção e aumento de massa específica.

**Tabela 18: Tabela com os compostos encontrados na amostra 01 de ARGCC\_32%\_14D**

Nome gráfico	Nº	ELEMENTOS
A	1	<i>Quartzo</i>
F1	4	<i>Carbonato de cálcio</i>
H1	12	<i>hidróxido de magnésio</i>
N1	36	<i>hidróxido de silício aluminato hidratado</i>
S1	51	<i>carbontado de cálcio I</i>

Fonte: Autor

**Figura 25: Gráfico com a representação dos picos de reflexão dos compostos encontrados na amostra 01**



Fonte: Autor

Nos resultados da execução da réplica observa-se a formação de uma quantidade diferente de silicatos, frutos do produto da carbonatação executada com estas amostras (tabela 19). Os picos de reflexão destes compostos são apresentados na figura 26, nela pode-se

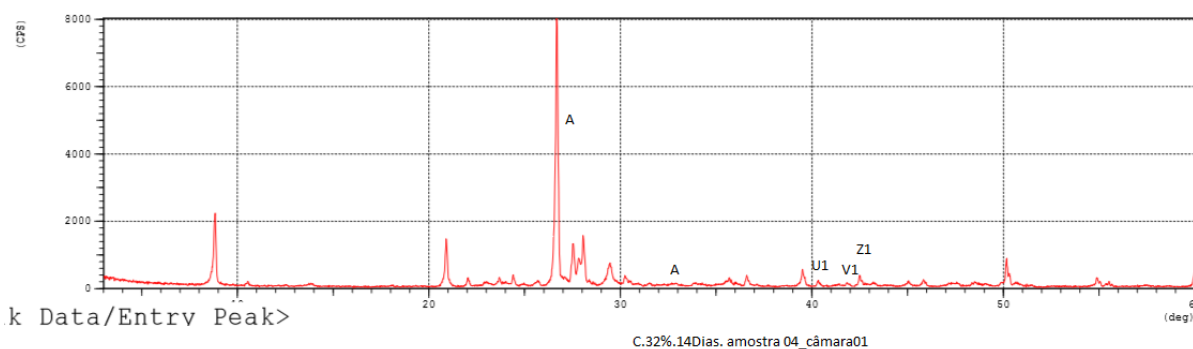
observar o comportamento de reflexão dos compostos minerais, sendo o maior pico repetindo-se o quartzo, como esperado e discutido anteriormente.

**Tabela 19: Tabela com os compostos encontrados na amostra 02 de ARGCC\_32%\_14D**

Nome gráfico	Nº	ELEMENTOS
A	1	<i>Quartzo</i>
U1	22	<i>Silicato de magnésio</i>
V1	30	<i>silicato de magnésio, cálcio, alumínio</i>
Z1	36	<i>silicato de cálcio aluminato</i>

Fonte: Autor

**Figura 26: Gráfico com a representação dos picos de reflexão dos compostos encontrados na amostra 02**



Fonte: Autor

As amostras carbonatadas em 32% 14 dias apresentaram a formação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (Amostra 01), composto resultante da carbonatação do hidróxido de cálcio ( $\text{CaOH}$ ). A consequência desse processo é que parte dos poros existentes na estrutura do ARGCC sem tratamento é preenchida com a geração do carbonato de cálcio, diminuindo assim a capacidade de absorção e aumentando a massa específica, já que o peso do carbonato de cálcio é maior que do hidróxido de cálcio; comportamento evidenciado nos ensaios de determinação de massa específica e absorção de água.

#### 4.3.4 MEV/EDS

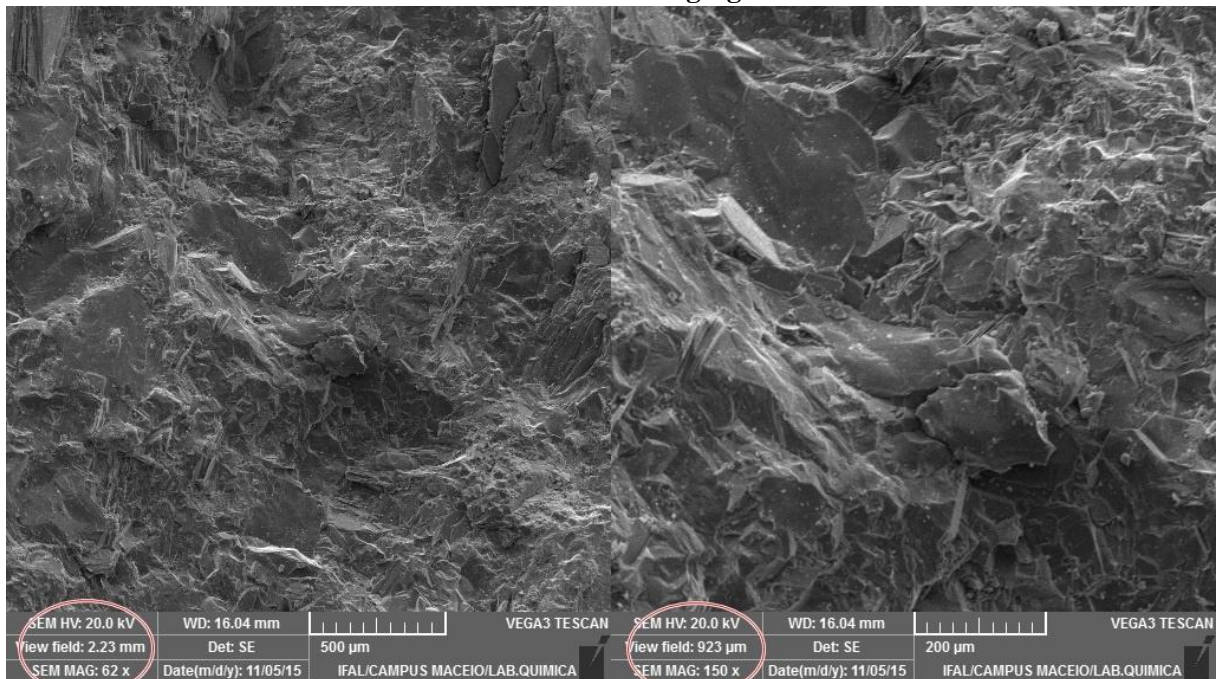
As análises através da microscopia eletrônica de varredura foram feitas a partir de uma parte de uma amostra obtida por quarteamento, como exposto no capítulo 3 deste trabalho. O

intuito destas análises é conseguir trazer a olho nu, ao máximo possível, o impacto da carbonatação nos agregados reciclados, como diminuição da porosidade e a possível formação cristalina de algum composto do cimento e os produtos de sua carbonatação. Nesta parte do trabalho também será demonstrado os resultados das análises de EDS, onde será possível mapear, no campo da amostra, os compostos existentes e quantificá-los percentualmente, ratificando todos os resultados anteriormente encontrados neste trabalho em ensaios anteriores como DRX, TG, BET e caracterizações físicas.

○ *Agregado natural*

A figura 27 mostra as imagens obtidas para o agregado natural; este agregado natural foi obtido a partir da retirada da argamassa do ARGC utilizado neste estudo, esta retirada foi somente mecânica, ou seja, não houve nenhuma intervenção química para esta retirada. Para esta visualização o objetivo é demonstrar a característica microscópica do agregado natural que forma o ARGC.

**Figura 27: Seqüência de imagens e suas aproximações reproduzidas pelo microscópio eletrônico de varredura - amostra de agregado natural**

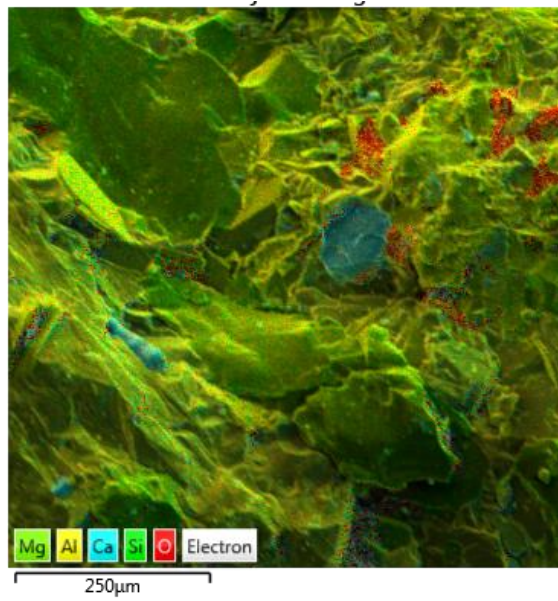


Fonte: Autor

Utilizando o MEV/EDS foi identificada uma estrutura sem poros visíveis, até a aproximação máxima executada neste estudo, e uma estrutura de cristais em forma lamelar em sua grande maioria. Na análise de EDS foram encontrados magnésio, alumínio, cálcio,

silício, ferro e oxigênio, como mostrado na figura 28, a existência destes compostos no agregado natural se deve pelo resquício dos compostos de cimento existentes na argamassa que estava aderida na superfície do agregado.

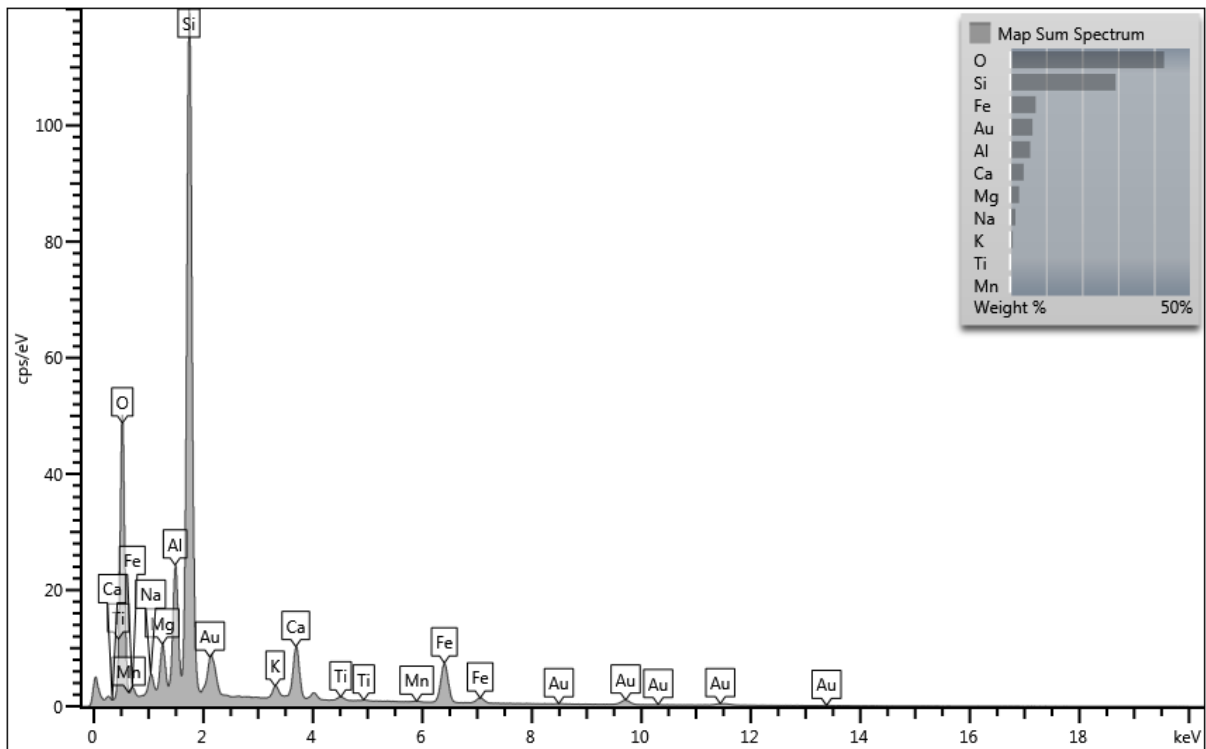
**Figura 28: Agregado natural analisado pelo EDS referenciando os elementos químicos por coloração**



Fonte: Autor

Pela distribuição dos compostos no agregado natural, observa-se que pouco cálcio foi encontrado, refletindo-se no gráfico de EDS com um percentual máximo de aproximadamente 3%. Vale ressaltar que este mapeamento é superficial, não levando em consideração a constituição interna deste material. No gráfico do EDS tem-se a distribuição percentual dos elementos (figura 29). Os compostos químicos encontrados em maior quantidade nestes agregados são os feldspatos  $((K,Na)(Si,Al)_4O_8)$  (MOTA *et al.*, 2009) e o quartzo ( $SiO_2$ ).

**Figura 29: Gráfico de EDS dos compostos encontrados no agregado natural**



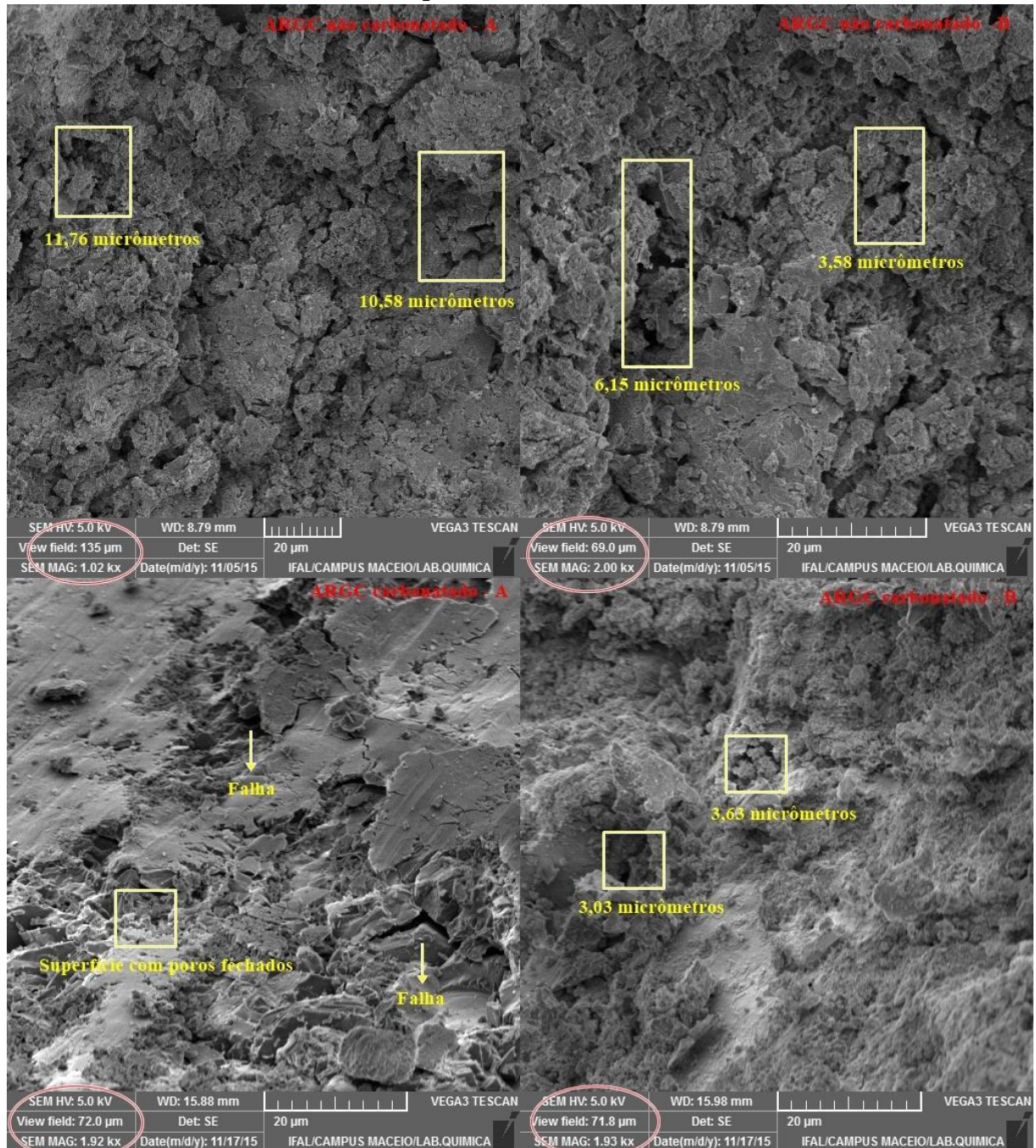
Fonte: Autor

Na distribuição dos compostos vê-se a maior quantidade de compostos sendo oxigênio e silício, formadores do quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) como era de se esperar, através da literatura exposta na referência, que a maior quantidade formadora do agregado natural fosse de quartzo.

○ *ARGC carbonatado e não carbonatado*

As imagens de MEV obtidas dos ARGC demonstram a existência de poros formados pela descontinuidade da argamassa aderida ao agregado natural, essa porosidade dá ao ARGC uma maior capacidade de absorção de água e menor massa específica, interferindo negativamente no comportamento deste agregado em misturas de concreto. Na figura 30 tem-se o comparativo das duas amostras, carbonatadas e não carbonatadas.

**Figura 30: Imagem do ARGC carbonatado (direita) e não carbonatado (esquerda) obtida pelo microscópio eletrônico de varredura**



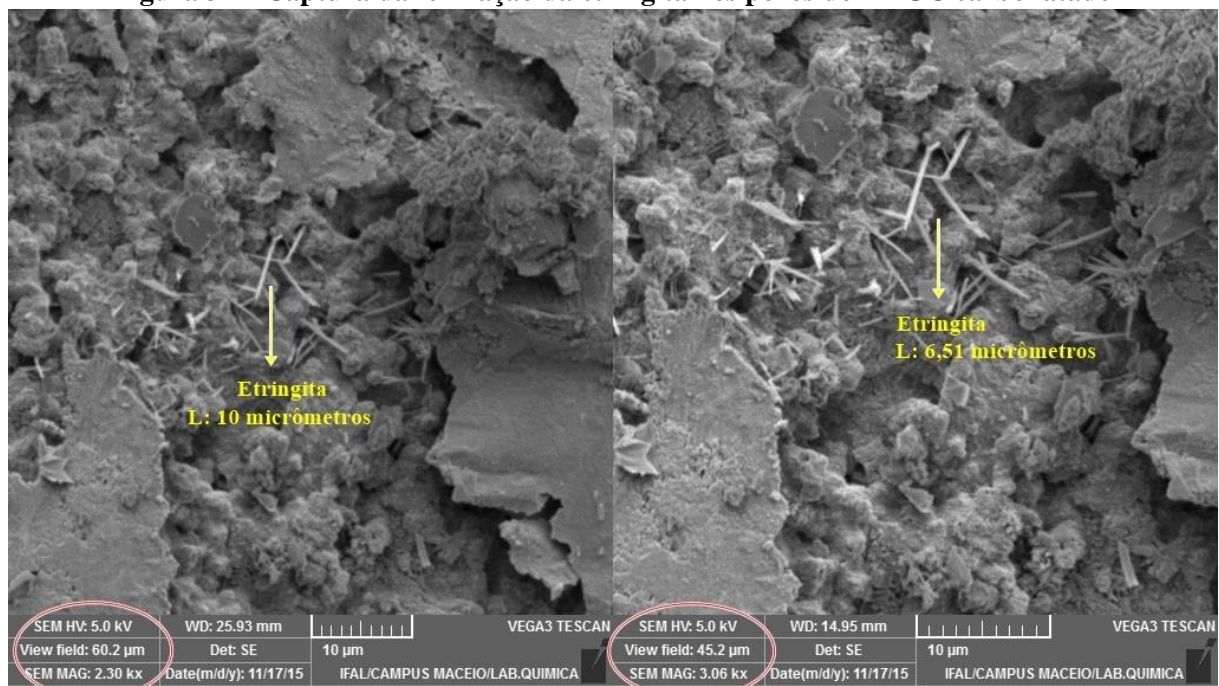
Fonte: Autor

Na imagem acima alguns detalhes são importantes, na amostra não carbonatada os poros existentes alcançam tamanho máximo de 11,76 μm (abertura do poro) e uma característica marcante de comunicação entre estes poros, o que aumenta a sua capacidade de absorção. Na amostra não carbonatada – A vê-se nitidamente uma seqüência de poros

distribuídos ao longo de toda a amostra e em sua maioria comunicando-se com outros poros menores, aumentando a capacidade de pequenos poros para poros de maior capacidade, a existência e distribuição destes poros ratificam os valores de absorção encontrados nos ensaios feitos neste trabalho, valores de absorção de 5%, bem como os valores de massa específica. Já na amostra *ARGC carbonatado – A* observa-se a existência de falhas na argamassa aderida ao agregado natural, porém a quantidade e distribuição de poros é bem menor, podendo visualizar várias superfícies da amostra na qual estes poros estão bem pequenos e muitos de tão pequenos não são contemplados pela escala de visualização. Na amostra *ARGC carbonatado – B* o poro de maior abertura possui 3,63  $\mu\text{m}$ , com característica pouco comunicada. Neste comparativo é possível observar o resultado da carbonatação dos ARGC, onde houve diminuição de abertura de poros e fechamento da maioria destes.

Na figura 31 é possível destacar a formação da etringita, composto em forma cilíndrica cristalina, produto da hidratação do cimento.

**Figura 31 – Captura da formação da etringita nos poros do ARGC carbonatado**



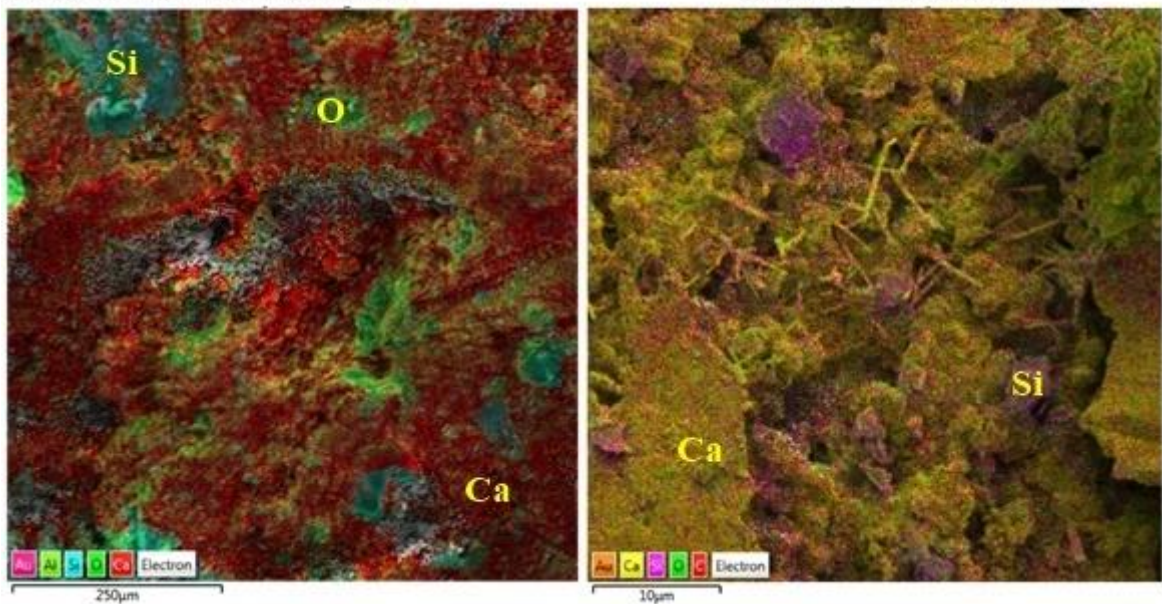
Fonte: Autor

A captura da formação cristalina da etringita, que possuem uma morfologia em agulha prismática, composta pela cristalização de soluções saturadas com íons de cálcio e hidroxila (MEHTA; MONTEIRO, 2008, pg.218), ou seja, como visto na composição mineralógica a

existência de compostos hidratados de cálcio. Comprova os resultados obtidos com a análise de DRX, onde o composto foi encontrado nas análises. O resultado desta formação advém da hidratação dos compostos do cimento, e na aproximação que foi utilizada neste trabalho o comprimento máximo destes cristais foi de 10  $\mu\text{m}$ .

Utilizando o EDS consegue-se mapear a presença dos compostos que aparecem em maior quantidade: oxigênio, cálcio, silício, como esperado (figura 32).

**Figura 32: ARGC analisado pelo EDS referenciando os elementos químicos por coloração**



Fonte: Autor

Os compostos presentes no cimento CPIIF-32, cimento utilizado na produção do concreto origem do ARGC, são o clínquer, composto por  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{AlO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Blanco-Varela et al, 1997 apud Gobbo, 2003), sulfato de cálcio, pozolanas e fíler calcário. Na análise de EDS estes compostos foram evidenciados com a presença de seus elementos formadores, como o cálcio, por exemplo, aparecendo aqui nesta amostra com 30%. Destaca-se a porcentagem maior de cálcio se comparado com a amostra de agregado natural, justificado pela presença de cimento na argamassa, possuindo como principal matéria-prima o calcário.

Com as imagens do MEV é possível verificar a existência de poros e a distribuição visual destes na superfície dos agregados, comparando os agregados naturais e reciclados com e sem tratamento. Consegue-se analisar a presença dos compostos indicados no DRX, destacando a porcentagem de aproximadamente 40% de cálcio e 50% de oxigênio, juntamente



com carbono que são os elementos formadores do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) encontrado no DRX *amostra 01*, discutido anteriormente.

## 4.4 CONCRETOS

### 4.4.1 Produção dos concretos

#### ○ *Dosagem dos concretos*

A densidade média dos agregados graúdos reciclados de concreto carbonatados ficou em torno de  $2,63 \text{ kg/dm}^3$  e dos não carbonatados em torno de  $2,61 \text{ kg/dm}^3$ . A massa específica da areia foi tomada como sendo  $2,63 \text{ kg/dm}^3$ , a massa específica do cimento (CPIIE-32)  $3,1 \text{ kg/dm}^3$  (NBR NM 23) e a massa específica do agregado natural  $2,7 \text{ g/cm}^3$ . A tabela 20 apresenta os valores de do estudo de dosagem feito para produção dos concretos com agregado natural, ARGC não carbonatado e ARGC carbonatado\_32%\_14dias, nestes dados os valores de massa específica foram utilizados como parâmetros de modificação do traço proposto por Tenório (2007), baseado exatamente neste parâmetro e nos valores de massa específica apresentados nos ensaios anteriores que o estudo de dosagem foi feito.

**Tabela 20: Traço de produção dos concretos com AN, ARGCNC e ARGC\_32%\_14dias**

Traço	Relação a/c	Materiais em volume ( $\text{dm}^3$ )				Materiais em massa ( $\text{kg/m}^3$ )				Teor de Arg.
		Água	Cimento	Agre. miúdo	Agre. graúdo	Água	cimento	Agre. miúdo	Agre. Graúdo	
CARGCC	0,50	200	132	268	400	200	410	705	1052	0,51
CARGCNC	0,50	200	132	268	400	200	410	705	1044	0,51
CAN	0,50	200	132	268	400	200	410	705	1080	0,51

Fonte: Autor

#### ○ *Preparação dos ARGC e NA*

Na produção de concretos usando agregados reciclados foi feita a preparação dos agregados em relação a sua capacidade de absorção de água, com o objetivo de evitar a absorção da água de amassamento pelo agregado reciclado, foi-se executado o processo de pré-molhagem, como previsto na NBR 15116 (ABNT, 2004) ou seja, a água de absorção

(definida em porcentagem no ensaio de absorção), foi misturada no agregado reciclado e homogeneizado, como se pode ver na figura 33.

**Figura 33: Pré-molhagem e homogeneização do ARGC**



Fonte: Autor

O intuito da execução deste processo é fornecer água, em sua capacidade de absorção, para o agregado reciclado de concreto, visto sua natureza porosa e capacidade alta de absorção. O processo de homogeneização atua de forma a distribuir essa água uniformemente na amostra de ARGC, evitando assim o acúmulo de água em camadas superiores da amostra.

○ *Concreto produzido com Agregado natural – CAN*

Na figura 34 pode-se observar o concreto já misturado e a execução do ensaio de abatimento. O aspecto de consistência do concreto foi de uma mistura pouco fluida e bastante uniforme.

Figura 34: Visualização da consistência do CAN e ensaio de abatimento



Fonte: Autor

- *Concreto produzido com agregado reciclado de concreto não carbonatado-CARGCNC*

Na figura 35 pode-se observar a visualização do concreto da moldagem dos corpos de prova sob a mesa de vibração e o aspecto do concreto produzido no ato da mistura. A mistura se mostrou homogênea e coesa, apresentando as características no estado fresco e endurecido citadas abaixo.

**Figura 35: Visualização da consistência do concreto na betoneira e moldagem dos corpos de prova e vibração na mesa vibratória**



Fonte: Autor

#### 4.4.2 Estado Fresco

- *Abatimento*

Para os concretos foram realizados ensaios de abatimento de tronco de cone, para medição da trabalhabilidade e consistência, executado a luz da norma NBR NM 67 (1998). A tabela 21 traz os resultados do concreto produzido com agregado natural (CAN), concreto com ARGCC sem tratamento (CARGCNC) e concreto com ARGCC carbonatado em 32% e 14 dias de exposição (CARGCC\_32%\_14d).

**Tabela 21: resultado dos ensaios de abatimento de tronco de cone dos concretos com e sem ARGCC**

Concreto	Abatimento (cm)
<i>CAN</i>	6,6
<i>CARGCNC</i>	16,3
<i>CARGCC 32%14d</i>	16,3

Fonte: Autor

O concreto CAN foi o que apresentou menor abatimento, com aspecto bastante seco no momento da produção, isto se deve ao processo de pré-molhagem na qual o agregado natural não fora submetido, como os concretos produzidos com o ARGC, já que a capacidade de absorção destes agregados é muito baixa e a água fornecida neste processo, a água de absorção, seria em quantidade desprezível. Os dois concretos com ARGC sem e com carbonatação se comportaram de forma análoga, apresentando valores de concreto fluido, sendo auxiliados pela existência da fase de pré-molhagem, anteriormente discutida.

#### 4.4.3 Estado Endurecido

##### ○ Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão média e os respectivos coeficientes de variação estão mostrados na tabela 22. Os concretos produzidos apresentaram resistências em valores acima de 25 MPa quando analisados em 28 dias de cura.

**Tabela 22: valores de resistência mecânica média, desvio padrão e variância dos concretos produzidos com ARGC e com agregado natural**

Concreto	Resistência à compressão (Mpa)		Desvio padrão		Coeficiente de variação (%)	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
CAN	23	33	1,27	2,16	5,52	6,54
CARGCNC	23	29	1,54	0,38	6,69	1,31
CARGCC_32%_14D	17	25	0,97	1,78	5,70	7,12

Fonte: Autor

O concreto CAN, concreto de referência, produzido com o mesmo procedimento dos concretos com ARGC, apresentou resistência à compressão maior que 30 MPa e os concretos produzidos com agregados reciclados obtiveram valores mínimos de 25 MPa, quando analisados em idades de 28 dias. A produção do concreto de referência, quanto a sua resistência, pode ter sido afetada pelo fato que os agregados naturais foram misturados depois do início da produção, procedimento que se aplica somente aos concretos produzidos com agregados reciclados. Evidencia-se neste estudo, que mesmo com substituições de 100% do agregado gráudo natural pelo ARGC a resistência mecânica não houve elevada interferência. Porém o concreto que obteve menor coeficiente de variação foi o produzido com ARG não

carbonatado em 28 dias, já o concreto produzido com ARGC carbonatado apresentou menor coeficiente de variação em tempo de 7 dias. O comportamento do CARGCC\_32%\_14D demonstrou-se favorável a resistência mecânica, indicando interação não danosa entre o tratamento com o dióxido de carbono e a resistência mecânica dos concretos produzidos com estes.

Hansen; Narud (1993) apud Leite (2001) citam que é difícil manter a uniformidade na produção de concretos com ARGC, pois estes possuem sempre taxas de absorção bem maiores que as dos agregados naturais.

- *Carbonatação e Profundidade de carbonatação*

Os concretos foram submetidos ao processo de carbonatação acelerada, com concentração de 32% e tempo de exposição de 5 dias. A umidade relativa do ar no momento do ensaio ficou em torno de 65% - 75%. Os corpos de prova de todos os concretos foram submetidos aos mesmos procedimentos de rompimento e exposição ao CO<sub>2</sub> dentro da câmara de carbonatação, sendo a idade a única diferença entre eles.

- *Concreto com Agregado natural (CAN)*

O comportamento do indicador de pH nas faces internas centrais dos corpo de provas do CAN, pode ser visto na figura 36, a borda sem coloração possui profundidade compreendida entre 11 e 19 mm. A reação central em cor roxa de intensidade alta indica presença de composto com alto pH, como o do concreto que gira em torno de 12,5. Este comportamento de profundidade ao longo das superfícies expostas do corpo de prova se deve a penetração do dióxido de carbono, a qual o concreto fora submetido durante 5 dias e 32% de concentração.

**Figura 36: Corpos de prova de CAN ensaiados após aspersão de fenolftaleína para análise de profundidade de carbonatação**



Fonte: Autor

○ *Concreto com ARGC sem tratamento (CARGCNC)*

Já dois dos corpos de prova do CARGCNC ensaiados à profundidade de carbonatação apresentaram fraca e descontínua coloração nas bordas internas, como pode ser visto na figura 37.

**Figura 37: Corpos de prova de CARGCNC ensaiados após aspersão de fenolftaleína para análise de profundidade de carbonatação**



Fonte: Autor

Um dos corpos de prova de CARGCNC apresentou uma profundidade de carbonatação máxima de 42,43 mm e como pode ser visto na figura 38, ocorreu uma reação central com o indicador, mostrando que nesse caso específico a penetração do dióxido de carbono não atingiu o centro deste corpo de prova.



**Figura 38: corpo de prova de CARGCNC com reação alcalina central**

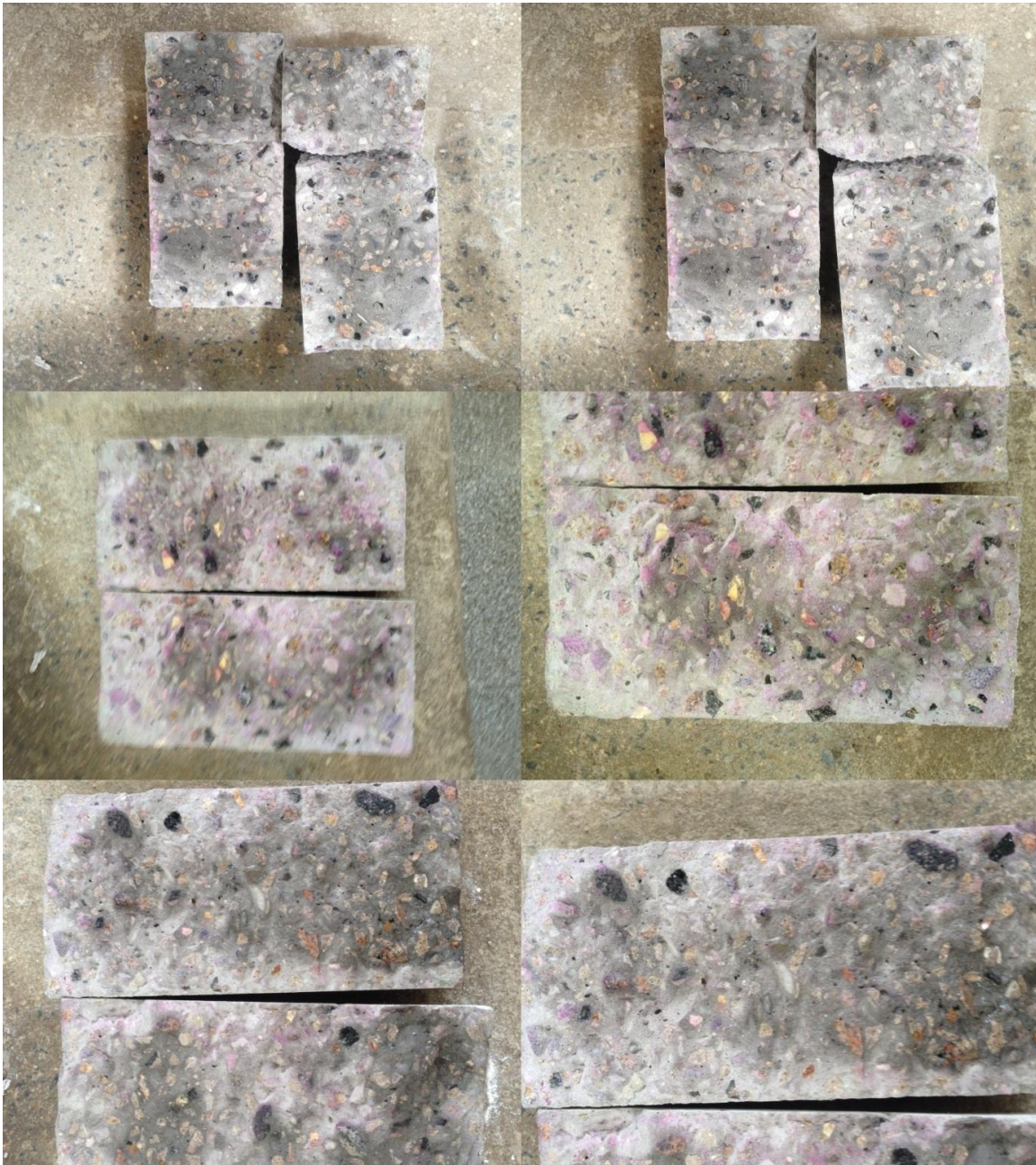


Fonte: Autor

o *Concreto com ARGCC carbonatado (CARGCC)*

Nos corpos de prova do CARGCC 32%\_14D não observou-se reação alcalina em nenhuma das regiões expostas para o ensaio de profundidade de carbonatação (figura 39). Pontos isolados e pequenos em coloração rosa foram observados, porém em ocorrência de no máximo três pontos em cada corpo de prova, sendo assim desconsiderados pela pequena dimensão. Este comportamento foi esperado já que a estrutura do CARGCC 32%\_14D possui agregados porosos, facilitando assim a penetração do dióxido de carbono pela estrutura de poros do concreto produzido com o ARGCC. A interação do CO<sub>2</sub>, a qual o ARGCC foi exposto, foi percebida nitidamente neste ensaio já que não houve reação básica em nenhuma região, demonstrando que o pH entrou na zona considerada ácida, perdendo sua característica básica.

**Figura 39: Corpos de prova de CARGCC ensaiados após aspersão de fenolftaleína para análise de profundidade de carbonatação**



Fonte: Autor

○ *Índice de vazios e absorção*

Na tabela 23 estão expostos os valores de absorção de água e índice de vazios dos concretos endurecidos, os valores demonstram uma tendência esperada do CARGCC, apresentando menores valores de absorção e índice de vazios entre as amostras. De fato a natureza dos ARGCCNC traz uma porosidade maior, refletindo maiores valores de índice de

vazios e consecutivamente maior capacidade de absorção de água, levando ao CARCNC refletir estas características em seu comportamento endurecido. O comportamento do CAN reflete o exposto na literatura, com valores de absorção em torno de 5%.

**Tabela 23: resultados dos ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica nos concretos endurecidos**

CONCRETOS	IDADE	ABSORÇÃO (%)	ÍNDICE DE VAZIOS (%)
CAN	40	5,2%	16,7%
		5,2%	17,0%
CARGCC	48	9,5%	27,1%
		9,1%	27,8%
CARGNC	54	9,6%	28,2%
		9,6%	29,6%

Fonte: Autor

○ *Permeabilidade ao ar – Método de Figg*

Os ensaios de permeabilidade foram realizados nas idades de 160 dias para o concreto com agregado natural, 175 dias para o concreto com agregado reciclado sem tratamento e 168 dias para o concreto com agregado reciclado carbonatado. Foram produzidos três concretos e um corpo de prova moldado a cada concreto, os valores medidos em cada furo e suas respectivas médias e desvio padrão estão descritos na tabela 24.

**Tabela 24: valores de permeabilidade ao ar pelo método de Figg e tempo de exclusão de ar**

Concreto	Idade (dias)	TEMPO DE PERMEABILIDADE (s)							
		Furos					Média	Desvio Padrão	TEA (s/ml)
		1	2	3	4	5			
CAN	160	4,67	10,80	10,59	12,14	10,99	9,84	2,95	2,43
CARGC	175	8,03	8,82	7,17	7,46	6,79	7,66	0,79	1,89
CARGCC	168	4,93	4,74	6,95	6,87	6,40	5,98	1,06	1,48

Fonte: Autor

A partir da tabela 24 pode-se analisar que a diferença máxima ocorrida entre as medidas dos furos no mesmo corpo de prova atingiu os 62%, valor obtido pelos dados de permeabilidade apresentados pelo concreto produzido com agregado natural. De fato a análise dos valores de desvio padrão mostram que neste concreto houve um desvio máximo de 2,95 s,

conotando um comportamento disperso da média entre os valores. O concreto com agregado natural, apresentando uma idade de 160 dias, é o que apresenta melhor desempenho, visto que é o concreto de referência. Já o concreto produzido com ARGC carbonatado apresenta uma melhora significativa se comparado com o concreto produzido com ARGC sem tratamento.

O ensaio de permeabilidade ao ar fornece informações importantes relacionadas à estrutura de poros do concreto endurecido, e a norma E 413 (LNEC, 1993) indicam mais um parâmetro a ser analisado através do cálculo do tempo de exclusão de ar (TEA), que juntamente com o tempo de permeabilidade ao ar expressa a capacidade do concreto de proteger as armaduras. De acordo com a tabela 24, os três concretos ensaiados se enquadram na classificação de má capacidade de proteção de armaduras.

Pela correlação proposta por Cather *et al* (1984) *apud* Tenório (2007) o concreto ensaiado se enquadra na condição de correlação positiva para uma argamassa porosa.

O comportamento esperado para o concreto produzido com agregado reciclado, frente a permeabilidade ao ar, é de um material bastante permeável visto a porosidade maior, pois a natureza do ARGC carrega uma característica porosa da matriz da argamassa, porém o concreto com ARGC carbonatado já apresenta uma permeabilidade maior que o concreto com agregado natural e menor que o do concreto com agregado reciclado sem tratamento.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram estudadas as características de agregados reciclados de concreto produzidos a partir do beneficiamento de corpos de prova, analisados em testes de compressão de uma obra vertical localizada na cidade de Maceió. Estes agregados foram submetidos a ensaios de caracterização física, mineralógica, térmica e microscópica de forma comparativa entre três condições: natural, reciclado sem carbonatação e reciclado carbonatado. A este processo de carbonatação foram definidos parâmetros de análise de comportamento mediante a variação das características a serem melhoradas perseguidas com a execução da carbonatação acelerada. De posse disto três concretos foram analisados a fim de obter-se uma visão exploratória da reutilização destes agregados reciclados de concreto carbonatados em novas misturas com características estruturais. Para tanto ensaios de caracterização no estado fresco e endurecido foram executados. As conclusões apresentadas na seqüência referem-se ao programa experimental desenvolvido na pesquisa.

- Para a capacidade de absorção de água e massa específica dos ARGC o processo de carbonatação mostrou-se eficiente para melhora do desempenho destes agregados.
- Os valores de perda de massa observadas na mufla demonstraram que a carbonatação desenvolveu compostos expansivos em seus poros, com perdas de massa em valores maiores quando os agregados submetidos a carbonatação;
- Na análise mineralógica, compostos hidratados do cimento apresentaram produtos carbonáticos ratificando o observado no ensaio anterior de perda de massa. Nesta análise foi possível quantificar e observar o produto da reação entre dióxido de carbono e os compostos hidratados;
- Os resultados encontrados nas análises térmicas e microscópicas também ratificaram a formação de carbonatos sendo explícitas diretamente nos valores de absorção e massa específica, onde inclusive pode-se observar a formação de cristais de etringita nas imagens em aproximações maiores;
- Quando da produção de novos concretos utilizando estes agregados carbonatados, em referência ao concreto produzido com agregados naturais, o desempenho foi de uma mistura resistente, em seu estado endurecido, porém, apresentando resistência abaixo da apresentada em concretos convencionais utilizando agregados naturais. A este fato

principal deve-se a característica da inserção do procedimento de pré-molhagem, com água de absorção, antes da produção das misturas, interação esta que influencia diretamente a relação a/c do concreto, podendo não ser a carbonatação o motivo direto responsável. Já nas misturas em seu estado fresco observa-se uma correlação de consistência aceitável para lançamento em sistema de bombeamento, próprio de misturas fluidas;

- Quanto à exposição dos concretos a uma nova carbonatação, a fim de analisar a possível resistência a uma degradação futura gerada pela penetração natural do CO<sub>2</sub> em ambientes construídos, as misturas com agregados carbonatados apresentaram baixa resistência a esta penetração, indicando um cuidado no processo de reutilização destes quanto em misturas de fator a/c acima de 0,60;
- O comportamento dos concretos endurecidos mediante a penetração de ar, quando comparados com valores da literatura, fica abaixo do desempenho esperado por uma mistura de concreto estrutural, porém apresentando valores de absorção de água e índice de vazios melhorados com o processo de carbonatação, demonstrando uma resposta positiva dos ARGC ao processo de melhoramento de suas características;
- O comportamento do concreto endurecido em relação a permeabilidade ao ar demonstrou que a porosidade dos ARGC interfere nas misturas nas quais são utilizados. De fato é interessante levar em consideração que no processo de mistura do concreto os ARGC podem ter se desgastado, levando a uma capacidade um pouco maior de permeabilidade ao ar;

Para finalizar, resumidamente, a carbonatação contribuiu efetivamente para a modificação da estrutura dos poros dos agregados reciclados de concreto, diminuindo seu volume e a comunicação entre eles, refletindo diretamente na capacidade de absorção de água e em seus valores de massa específica. O efeito químico gerado pela carbonatação é estatisticamente significativo quando executadas em concentrações e em tempos de exposição maiores.

Desta forma, a carbonatação apresenta-se uma solução eficiente na modificação das características dos agregados reciclados de concreto, e inicia em seus procedimentos um caminho de reutilização completo de resíduos de concreto.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE – **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil- 2013**

AMGARTEN, Dione Rodrigues. **Determinação do volume específico de poros de sílicas cromatográficas por dessorção de líquidos em excesso** – Dissertação, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2006.

ANGULO, Cirelli Sérgio. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados** - Dissertação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

\_\_\_\_\_. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos** – Tese, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ARAÚJO, Fernanda Wanderley C. **Estudo da repassivação da armadura em concretos carbonatados através da técnica de realcalinização química**. São Paulo, 2009. 162p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica** – Julho 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23 – Cimento Portland e outros materiais em pó** – 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45 – Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios** – 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52 – Agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente**. - 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53 – Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água** – 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone** – 1998

\_\_\_\_\_. **NBR 15113 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação** – Julho, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova** – 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 5732 – Cimento Portland comum** – 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739 – Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos** – 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778 – Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica – 2005.**

\_\_\_\_\_. **NBR 15116 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos – Setembro, 2004.**

BLEICHER, Lucas; SASAKI, José M.–**Introdução à difração de raios-x em cristais –** Apostila, Universidade Federal do Ceará, 2000.

BÖHNI, H. (Ed.) **Corrosion in reinforced concrete structures.** Cambridge: Woodhead, 2005, 248p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução no 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, no 136, 17 de julho de 2002. Seção I, p.95-96.

CAFANGE, Daniele M.P.J – **Estudo de métodos e medidas auxiliares para o controle da resistência à carbonatação de concretos estruturais de cimento Portland.** São Paulo, 2011. 374p. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

CARMONA, Thomas GARCIA – **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação.** São Paulo, 2005. 89p. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

CARELI, Élcio Duduchi; MIRANDA, Leonardo Fagundes Rosemback; ANGULO, Sérgio Cirelli – **A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008.** Porto Alegre, 2009.

CARVALHO CHUST, Roberto; FILHO, Jasson R.F – **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado.** São Carlos - São Paulo: Edusfcar, , 2010. 367p.

CASCUDO, Oliveira - **O controle da corrosão em armaduras de concreto - inspeção e técnicas eletroquímicas.** Goiânia - Goiás: PINI-UFG, 1997. 237 p.

CHEN, How-Ji *et al.* – **Use of building rubbles as recycled aggregates.** Cement and concrete research, Departamento of civil engineering. Taiwan, 2003.

FILHO, Juarez Hoppe – **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: Mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** São Paulo, 2008. 318p. Tese de doutorado (Doutorado em engenharia) Escola politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de engenharia e construção civil, 2008.

GENTIL, V. **Corrosão.** Rio de Janeiro: LTC, 2005.



GONÇALVES, Micheli Silveira. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos.** São Leopoldo - Rio Grande do Sul, 2011. 112p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2011.

GONÇALVES, Rodrigo Dantas Casillo. **Agregados reciclados de resíduos de concreto – um novo material para dosagens estruturais.** São Carlos – São Paulo, 2001. 127 p. Dissertação (Mestrado em estruturas) – Escola de engenharia de São Carlos, 2001.

GRUBBA, David Christian Regis Pereira – **Estudo de comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária.** São Carlos – São Paulo, 2009. 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, 2009.

HANSEN, T.; NARUD, H – **Strenght of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate.** Concrete international – Desing and construction, v5, n.1 - Janeiro, 1983.

HATTGE, Alex Fabiano – **Estudo comparativo sobre a permeabilidade das alvenarias em blocos cerâmicos e alvenarias em blocos de concreto** – Porto alegre, 2004. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

HELENE, Paulo e CARMONA, Antonio – **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** São Paulo – PINI, 1992.

HOOT, Rogério da Silva Scott – **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação** – Porto Alegre, 2006. 149p. Dissertação, Universidade federal do Rio Grande do Sul, 2006.

JOHN, Vanderley M.; AGOPYAN, Vahan – **Reciclagem de resíduos da construção** – São Paulo, 2000.

KATZ, Amnon – **Treatments for the improvement of recycled aggregate** – 2004

KNAACK, A.M; KURAMA, Y.C - **Design of Normal Strength Concrete Mixtures with Recycled Concrete Aggregates** – 2011

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. LNEC E 413: **Betões – Determinação da Permeabilidade ao Ar e à Água (Método de Figg).** Portugal: LNEC, 1993.

LEITE, Mônica Batista – **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduo da construção e demolição.** Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de engenharia, Porto Alegre, 2001.

LIMA, José Antônio Ribeiro de. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** São

Paulo: USP, 1999. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 1999.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 3ª.ed. São Paulo: Editora Pini, 2008.

MIRANDA, Leonardo Fagundes Rosembach; ANGULO, Sérgio Cirelli; CARELI, Élcio Duduchi -**A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008**. Porto Alegre, 2009.

NEVILLE, A.M – **Tecnologia do concreto**. Porto Alegre: Editora Bookman, 2013.

PAULETTI, Cristiane – **estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. Porto Alegre, 2009. 232p. Tese (Doutorado em engenharia civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

PAULETI, Cristiane et al. – **Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil**. Ambiente Construído, Porto Alegre, 2006.

POLITO, G - **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. Belo Horizonte, 2006. 191p. Monografia (Graduação em especialista de avaliação e perícia) – Universidade Federal de Minas Gerais. 2006.

POSSAN, Edna – **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Porto Alegre, 2010. 221p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

RAMANATHAN, L.V.**Corrosão e seu controle**. São Paulo: HEMUS,2007. 339 p  
RESOLUÇÃO N° 307 – CONAMA – 2002.

RAVINDRARAJAH et al. – **Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete**. Revista concrete Reserch, v.37, n.130 – Março, 1987.

RODRIGUES, V. Guilherme & MARGCHETTO, Otávio – **Análises Térmicas** – Apostila, Universidade Federal de Santa Catarina.

SASAKI, José Marcos; BLEICHER, Lucas – **Introdução a difração de raios-x em cristais** – Apostila, Universidade do Ceará, 2000.

SHACKELFORD, James F. - **Introdução à ciência dos materiais para engenheiros** – Editora Pearson - São Paulo, 2008.

SHI-CONG, Kou; BAO-JIAN, Zhan; CHI-SUN, Poon – **Use of a CO<sub>2</sub> curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates** – China, 2013.

SILVA, Janiciara Botelho; RODRIGUES, José Augusto Jorge; NONO, Maria do Carmo de Andrade – **Caracterização de materiais catalíticos** – Apostila, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2008.

SIM, Jongsung; PARK, Cheolwoo – **Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate** – Israel, 2011.

SIMIELE, Daniel – **Aproveitamento de resíduos de concreto na confecção de peças para pavimento intertravado de concreto**. Ilha Solteira, 2010. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2010.

TAM, Vivian W.Y et al. – **Carbonation around near aggregate regions of old hardened concrete cement paste** – China, 2004.

TABOADA-GONZÁLEZ, IRIS et al. - Prediction of the mechanical properties of structural recycled concrete using multivariable regression and genetic programming. **Construction and building materials** – Espanha, 2015.

TENÓRIO, Jonathas Judá Lima – **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais** – Dissertação, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

THIERY, M et al. – **Carbonation kinetics of a bed of recycled concrete aggregates: a laboratory study on model materials** – França, 2013.

THOMAS, C et al. – **Durability of recycled aggregate concrete** – Espanha, 2012.

TSUJINO et al. – **Application of conventionally recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment** – Japão, 2007.

UCHÔA, S.B.B **Inibição de corrosão em concreto armado: eficiência e comportamento do sistema tiouréia/molibdato de sódio**. Maceió, 2007. 218p. Tese (Doutorado em química e biotecnologia) – Instituto de química e biotecnologia, Universidade Federal de Alagoas. 2007.

VIEIRA, Geilma Lima; MOLIN, Denise Carpena Coutinho Dal – **Viabilidade Técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduo de construção e demolição**. Porto Alegre, 2004.

WERLE, Ana Paula et al. – **Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto** – Ambiente construído, São Paulo, 2011. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução no 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, no 136, 17 de julho de 2002. Seção I, p.95-96.

ZHAN, Baojian *et al* – **Experimental study on CO<sub>2</sub> curing for enhancement of recycled aggregate properties** – China, 2013.

ZORDAN, Sérgio Eduardo – **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. Campinas, São Paulo, 1997. 156p. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Faculdade de engenharia civil – departamento de hidráulica e saneamento, 1997.