



PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE AGREGADOS RECICLADOS DE
CONCRETO CARBONATADOS

Nathália Rodrigues Julião

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Thiago Melo Grabois

Rio de Janeiro

Julho de 2020

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE AGREGADOS RECICLADOS DE
CONCRETO CARBONATADOS

Nathália Rodrigues Julião

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Thiago Melo Grabois

Aprovada por: Prof. Romildo Dias Toledo Filho

Prof. Thiago Melo Grabois

Prof^a. Camila Aparecida Abelha Rocha

Prof. Oscar Aurelio Mendonza Reales

Dr. Edson Rodrigo Fernandes dos Santos

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2020

Julião, Nathália Rodrigues

Propriedades físico-químicas de agregados reciclados de concreto carbonatados / Nathália Rodrigues Julião – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XIII, 93 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Thiago Melo Grabois

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 85-93.

1. Captura de CO_2 em agregados reciclados 2. Carbonatação acelerada 3. Análise Térmica 4. Propriedades Físicas. I. Toledo Filho, Romildo Dias *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Ao único digno de toda honra e toda glória, meu Deus. Obrigado Senhor por ter me dado força para trilhar esta árdua caminhada, por ter me mostrado que estava ao meu lado mesmo nos momentos mais difíceis, por ter sido o meu consolo nos momentos que pensei em desistir, que não foram poucos. A Tua Palavra é luz para os meus caminhos e o Teu Espírito é a minha força. O Senhor é a razão de mais essa conquista em minha vida. Obrigada pelo Seu amor e misericórdia.

Aos meus pais, José e Karla e à minha irmã Vanessa, que se esforçaram ao longo da vida para que eu tivesse acesso à melhor educação, mesmo nos momentos em que não tinham condições para tal. Obrigado pai por sempre me mostrar que os meus estudos deveriam ser prioridade. Obrigada mãe por todos os dias dedicados a me ensinar as disciplinas ao longo da minha infância, por sempre ter sido tão exigente com resultados, o que me tornou mais responsável e me deu o “gosto” pelos estudos. Agradeço por sempre me acompanharem e me apoiarem, por todo carinho, mas também pelas repreensões. Sem dúvida, essa vitória é de vocês também.

Aos meus avós, Waldir e Lúcia e à minha bisavó Albina, por todo suporte, carinho e atenção.

Aos meus tios e primas por sempre me incentivarem.

Aos meus orientadores Romildo e Thiago, por terem me recebido tão bem e terem me dado a oportunidade de começar a pesquisa de Iniciação Científica no LABEST lá em 2014. Por terem me apoiado durante todos esses anos que estive na pesquisa. Agradeço também por terem aceitado me orientar neste trabalho, mesmo sabendo das dificuldades que teríamos por eu ter me tornado uma aluna em tempo parcial. Sem dúvidas, não poderia ter escolhido pessoas melhores para compartilhar este momento. Obrigado por todo o conhecimento compartilhado e pela paciência que sempre tiveram comigo desde o início. Espero ter correspondido toda a confiança que depositaram em mim.

Aproveito para agradecer em especial ao Thiago, que esteve ao meu lado durante esses 3 anos, por ter me encorajado a continuar em todos os momentos em que estava dando tudo errado e eu pensava em desistir. Complicado demais escolher uma linha de pesquisa com tantas lacunas e dúvidas. Você foi a peça chave em todos os momentos de desespero, desde o forno que passei meses usando mas no fim não serviu para o meu material, nos muitos meses em que fiquei esperando consertar a câmara e em todos os momentos em que juntos ficamos “quebrando a

cabeça” para entender os resultados. Você sempre me fez enxergar que eu não estava sozinha e eu só tenho a lhe agradecer por tudo.

Aos queridos companheiros do NUMATS, por todo apoio. Agradeço em especial a minha querida e eterna amiga Anilé por ter me apoiado todo os dias para finalizar este trabalho, por ter me dado forças e por sempre ter me estendido a mão. Sua amizade é muito preciosa para mim. Agradeço também a Mônica e Rayane que sempre se mostraram dispostas a me ajudar em todos os momentos que precisei. Vocês foram peças essenciais para eu chegar até aqui. Meu eterno muito obrigada!

Aos queridos funcionários do LABEST e NUMATS, por sempre terem me ajudado em tudo. Em especial a Luzidelle que me ajudou demais em todo o processo burocrático quando não podia estar presente por causa do trabalho,

Aos queridos funcionários da limpeza do LABEST e NUMATS. Agradeço, em especial, a Claudinha.

A todos os professores do mestrado em Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, meu agradecimento por todo o conhecimento compartilhado.

Agradeço às minhas amigas Mel e Bruna por sempre terem me incentivado a permanecer realizando esta pesquisa mesmo com a dificuldade de conciliar com o trabalho.

Agradeço também a Camila que está ao meu lado já há alguns bons anos e sempre me ajudou em tudo que eu precisei tanto na pesquisa quanto com sua amizade e ao Edson, por sempre terem me ajudado ao longo da minha jornada na pesquisa científica. Muito bom quando companheiros de trabalho se tornam pessoas que você quer carregar pro resto da vida. Hoje estou muito feliz em terem aceitado fazer parte da minha banca examinadora.

Agradeço também ao Oscar por ter prontamente aceitado participar da minha banca examinadora também.

Ao Laboratório de Metalurgia (LTM) pela permissão de realizar ensaios que enriqueceram minha pesquisa.

Ao CNPq pelo apoio financeiro durante o primeiro ano da minha pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ com parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO CARBONATADOS

Nathália Rodrigues Julião

Julho/2020

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho
Thiago Melo Grabois

Programa: Engenharia Civil

A presente dissertação estuda o processo de captura de gás carbônico (CO_2) em agregados graúdos reciclados de concreto, a partir da reação deste gás com hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), formando carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Os agregados reciclados, provenientes da britagem de blocos de concreto, são submetidos a carbonatação acelerada (concentração de $20 \pm 2\%$ de CO_2), por diferentes tempos de exposição (1, 2, 4, 8, 16 e 24h), em câmara climática com controle de temperatura ($23 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$) e umidade relativa ($60 \pm 5\%$). A captura de CO_2 é determinada por termogravimetria, a partir da massa de gás carbônico normalizada pelo teor de hidróxido de cálcio de cada uma das amostras. A influência da carbonatação nas propriedades dos agregados reciclados de concretos é avaliada por ensaios de absorção de água, massa específica e termogravimetria. Os resultados experimentais demonstraram que uma hora de tratamento resultou no sequestro de gás carbônico, densificação e redução da capacidade de absorção dos agregados reciclados, mas que duas horas de carbonatação acelerada mostrou-se o tempo ideal para otimização dos resultados (sequestro de 25% de CO_2 , redução de 24% na absorção de água e aumento na densidade dos grãos de 3%).

Abstract of Dissertation presented to COPPE / UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF CARBONATED CONCRETE
RECYCLED AGGREGATES

Nathália Rodrigues Julião

July/2020

Advisors: Romildo Dias Toledo Filho
Thiago Melo Grabois

Department: Civil Engineering

This dissertation aims to study the capture process of carbon dioxide (CO_2) in recycled coarse concrete aggregates by reacting that CO_2 gas with calcium hydroxide ($Ca(OH)_2$), forming calcium carbonate ($CaCO_3$). The recycled aggregates, from the crushing of concretes produced in laboratory, are experienced to accelerated carbonation (CO_2 concentration of 20 ± 2 %) during different exposure times (1, 2, 4, 8, 16 and 24h) within a climatic chamber of temperature (23 ± 2 °C) and relative humidity (60 ± 5 %) controls. The carbon capture are assessed from thermogravimetry analysis based on mass of carbon dioxide normalized by the calcium hydroxide content of each sample. In addition, the performance of the treatment are evaluated by water absorption, relative density and thermogravimetry data before and after exposure. The experimental data show that with just one hour of treatment it is already possible to observe an increase in the capture of carbon dioxide, densification and reduced water absorption capacity of the recycled aggregates and that two hours of exposure to the treatment by accelerated carbonation would be the ideal time for optimization of the results (CO_2 capture of 25%, reduced absorption capacity of 24% and increased grains densification of 3%).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1.	Resíduos de Construção e demolição	7
2.2.	Processo de carbonatação natural em estruturas de Concreto.....	12
2.3.	Carbonatação acelerada em concretos produzidos com agregados reciclados .	19
2.4.	Carbonatação acelerada em agregados reciclados	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1.	Materiais.....	34
3.2.	Métodos.....	38
3.2.2.	Teor de pasta aderida.....	41
3.2.3.	Caracterização dos agregados reciclados pré-exposição à carbonatação	42
3.2.4.	Ensaio de carbonatação acelerada	43
3.2.5.	Análise térmica por termogravimetria.....	47
3.2.5.1.	Preparação das Amostras	47
3.2.5.2.	Composição Química por Fluorescência de Raio X (FRX)	49
3.2.5.3.	Método de quantificação dos produtos hidratados por análise térmica.	51
4	INFLUÊNCIA DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO NAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS	57
4.1.	Influência do tempo de carbonatação acelerada nas propriedades físicas dos agregados reciclados	58
4.2.	Determinação dos produtos formados para densificação dos agregados	63
4.3.	Determinação do tempo ótimo de exposição	76
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fases da Carbonatação (THIÉRY, 2005)

Figura 2: Estrutura de concreto armado deteriorada por carbonatação

(Fonte: www.clubedoconcreto.com.br)

Figura 3: *Set-up* da câmara de carbonatação (ZHAN *et al.*, 2013)

Figura 4: O dispositivo de teste de carbonatação acelerada. 1- Câmara de carbonatação; 2- MRCAs e amostras de argamassa; 3- Dessecante; 4- Armazenamento de gás CO₂ ; 5- Válvula; 6- Regulador de vazão; 7- Válvula de segurança; 8- Indutor de umidade e temperatura; 9- Piezômetro; 10- Bomba de vácuo (WANG *et al.*, 2016)

Figura 5: Dimensões das amostras (WANG *et al.*, 2016)

Figura 6: Curvas de TG da pasta de cimento aderida aos agregados reciclados carbonatados e não carbonatados, destacando com a linha tracejada o pico de desidroxilação do CH, descarbonatação do carbonato amorfo e do cristalino (adaptada de ZHANG *et al.*, 2015)

Figura 7: *Set-up* da câmara de carbonatação (XUAN *et al.*, 2016)

Figura 8: Massa específica de concretos produzidos com agregados reciclados carbonatados e não carbonatados aos 28 dias (XUAN *et al.*, 2016)

Figura 9: Resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados carbonatados e não carbonatados aos 28 dias (XUAN *et al.*, 2016)

Figura 10: Programa Experimental

Figura 11: Processo de Britagem. (a) Britador de mandíbulas; (b) Britagem dos resíduos; (c) Fração graúda produzida; (d) Fração miúda produzida. (adaptado de AMARIO *et al.*, 2018)

Figura 12: Brita 1 produzida

Figura 13: Processo de Homogeneização pelo “processo celular” da amostra de 100 kg do lote para estudo. (a) Amostra sendo espalhada para formação da pilha; (b) Pilha de Homogeneização

formada; (c) Armazenamento de todo material em sacos para minimizar o contato com ambiente

Figura 14: Etapas do ensaio de absorção em água por 24hs e massa específica de agregados graúdos segundo NBR NM 53. (a) Estufa de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$; (b) Amostras sendo previamente secas em estufa por 24hs; (c) Amostras submersas em água por 24hs; (d) Retirada de água com auxílio de pano absorvente; (e) Pesagem das amostras secas superficialmente; (f) Pesagem em balança hidrostática

Figura 15: Curvas granulométricas dos agregados naturais (NAT) e do agregado reciclado (ARC) (adaptado de AMARIO et al., 2019)

Figura 16: (a) Câmara climática de carbonatação acelerada; (b) Condições do pré-ensaio de temperatura, umidade e concentração de gás

Figura 17: Configuração das etapas de exposição das amostras através da carbonatação acelerada em câmara climática: (a) Pesagem das amostras pré-secagem; (b) Secagem das amostras até constância de massa; (c) Pesagem das amostras pós-secagem; (d) Amostras posicionadas na câmara de carbonatação; (e) Amostras pesadas pós carbonatação e embaladas em papel filme; (f) Amostras armazenadas em dessecador

Figura 18: Sequência de atividades adotadas a partir do aparato experimental de compressão de leito de partículas para fragmentação dos agregados carbonatados: (a) prensa universal; (b) base, cilindro e pistão utilizados; (c) amostra distribuída no interior do cilindro, antecedendo o processo de fragmentação; (d) posicionamento do pistão; (e) amostra após processo de fragmentação por compressão; (f) seleção visual e retirada de partículas com aparência de areia natural.

Figura 19: Peneiramento da amostra fragmentada. (a) Peneira de 420um posicionada em agitador mecânico; (b) Fração passante na peneira de 420um Passo-a-passo de peneiramento de amostra.

Figura 20: (a) Equipamento de Termogravimetria SDT Q600 da TA Instruments®; (b) Forno Horizontal com amostra suspensa

Figura 21: Termograma Típico com identificação das perdas de massas e dos pontos de interesse: A - início do ensaio após isoterma de 35°C; B - Pico referente à desidratação do $Ca(OH)_2$; C - Pico referente à descarbonatação do $CaCO_3$; D - fim do ensaio

Figura 22: Massa de Gás Carbônico determinadas nas amostras submetidas a diferentes tempos de carbonatação

Figura 23: Incremento na massa das amostras após tratamento por carbonatação acelerada em diferentes tempos de exposição

Figura 24: Absorção de água dos agregados em função do tempo de carbonatação

Figura 25: Massa Específica dos agregados em função do tempo de carbonatação

Figura 26 Curvas de perda de massa (TGA) das amostras de agregados reciclados antes e após carbonatação acelerada

Figura 27: Curva DTG característica de amostra de agregados reciclados após carbonatação acelerada com identificação dos picos do carbonato de cálcio amorfo e cristalino

Figura 28: Curvas DTG das amostras de agregados reciclados antes a após carbonatação acelerada

Figura 29: Teores de carbonato de cálcio amorfo e cristalino nas amostras de agregados reciclados antes a após carbonatação acelerada

Figura 30: Relação dos teores de carbonato de cálcio amorfo e cristalino por tempo de exposição à carbonatação acelerada

Figura 31: Massa de Hidróxido de Cálcio Total (a) e de Carbonato de Cálcio (b) determinadas nas amostras submetidas a diferentes tempos de carbonatação

Figura 32: Massa de gás carbônico normalizada pelo teor de hidróxido de cálcio total em função do tempo de carbonatação

Figura 33: Correlação entre perda de absorção relativa e ganho de massa das amostras carbonatadas e não carbonatadas

Figura 34: Massa de gás carbônico normalizada pelo teor de hidróxido de cálcio total em função da absorção de água das amostras carbonatadas e não carbonatadas

Figura 35: Massa de gás carbônico normalizada pelo teor de hidróxido de cálcio total em função da massa específica das amostras carbonatadas e não carbonatadas

Figura 36: Correlação entre ganho relativo de gás carbônico e teor de CH total em cada amostra carbonatada por diferentes tempos de exposição

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Técnicas de tratamento dos ARC (adaptada de XUAN *et al.*, 2016)

Tabela 2: Classificação dos resíduos segundo NBR 15114/2004 (adaptado de JULIÃO, 2016)

Tabela 3: Classificação dos resíduos segundo Comitê RILEM 121-DRG/1994 (adaptado de JULIÃO, 2016)

Tabela 4: Efeito da carbonatação na composição da pasta de cimento aderida ao agregado reciclado (ZHANG *et al.*, 2015)

Tabela 5: Propriedades Físicas dos agregados (adaptado de ZHANG *et al.*, 2015)

Tabela 6: Quantidade (em massa) de material produzido por fração granulométrica (adaptada de AMARIO *et al.*, 2018)

Tabela 7: Caracterização física dos agregados

Tabela 8: Composição química do CPV ARI, das amostras não carbonatadas e carbonatadas por diferentes tempos de exposição

Tabela 9: Propriedades físicas dos agregados reciclados carbonatados e não carbonatados

Tabela 10: Teores de carbonato de cálcio amorfo e cristalino por amostra

Tabela 11: Teores (em %) obtidos pelo ensaio de termogravimetria

Tabela 12: Sequestro de gás carbônico normalizado e ganho relativo por tempo de exposição

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é grande consumidora de recursos naturais e matérias primas. Além disso, é também responsável pela geração e deposição irregular de resíduos sólidos urbanos no meio ambiente sem nenhum tipo de tratamento prévio. Em virtude deste cenário, inúmeras políticas e incentivos têm sido adotados, nas últimas décadas, seja por empresas privadas seja pelo próprio estado, objetivando com que as atividades sejam desempenhadas promovendo o menor impacto possível.

Devido ao aumento do custo e demanda por aterros e agregados na construção, a reciclagem e reutilização de resíduos de concreto estão se tornando mais importantes para o desenvolvimento sustentável (KONG *et al.*, 2010).

Após a britagem e peneiramento, resíduos de concreto podem ser usados para produção de agregados reciclados, chamados agregados reciclados de concreto (ARC). Entretanto, diversos estudos mostram que os ARC tendem a apresentar qualidade inferior aos naturais, em virtude da heterogeneidade do mesmo, elevada porosidade que confere ao mesmo alta capacidade de absorção de água. Isso se deve principalmente à pasta de cimento aderida ou às fissuras formadas durante a britagem (HIDALGO *et al.*, 2008, POON *et al.*, 2004, TOPÇU, 1997, ZHANG *et al.*, 2015).

Com isso, torna-se necessário melhorar as propriedades dos mesmos para se produzir concretos de melhor qualidade (ZHANG *et al.*, 2015), assim, a comunidade científica têm estudado e proposto diversas metodologias para atingir tal objetivo (KOU *et al.*, 2014, LI *et al.*, 2017, XUAN *et al.*, 2016). A Tabela 1 resume uma boa parte das técnicas que vêm sendo usadas nas últimas décadas com o objetivo de aprimorar as propriedades dos agregados reciclados.

Tabela 1: Técnicas de tratamento dos ARC (adaptada de XUAN *et al.*, 2016)

Tratamento	Metodologia	Resultados
Remoção da argamassa de cimento residual	Pré-imersão em soluções ácidas Método de limpeza ultrassônica Beneficiamento mecânico Beneficiamento térmico-mecânico	Redução da absorção de água dos agregados reciclados e aumento da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos produzidos com os mesmos.
Mudança no método de mistura	Métodos de mistura multi-passos: mistura com dois passos e método de mistura tripla.	Aumento da resistência à compressão dos concretos produzidos com os mesmos.
Revestimento dos agregados	Melhoria da superfície cimentícia através do uso de solução de álcool polivinílico (PVA). Melhoria da superfície cimentícia por meio do uso de pasta de cinza volante e de sílica ativa.	Para o caso da melhoria da superfície orgânica observou-se diminuição da absorção de água e aumento da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos. Já para o caso de superfície cimentícia, observou-se um aumento da absorção de água e da resistência à compressão dos concretos.

Atualmente, é possível encontrar trabalhos na literatura que apresentam resultados promissores para as propriedades dos concretos reciclados (AMARIO, 2019, PEPE *et al.*, 2014, SILVA, 2017) em sua maioria apresentando metodologias que proporcionam melhorias ao concreto em si, entretanto no presente estudo propõe-se uma metodologia de tratamento com o objetivo de proporcionar melhorias ao agregado reciclado e, conseqüentemente, melhora nas propriedades do concreto que o incorpora.

Entretanto, nos últimos anos, uma nova técnica vem sendo estudada e proposta para melhorar a qualidade dos ARC por diversos pesquisadores. A carbonatação acelerada propicia através da reação do hidróxido de cálcio e de CO_2 na forma aquosa que se dissolve na solução do poro da matriz, a formação de carbonato de cálcio, que por sua vez, não é solúvel em água e com isso cristaliza, densificando a microestrutura e reduzindo a porosidade dos agregados reciclados. Além disso, segundo KOU *et al.* (2014), ZHANG *et al.* (2014) e ZHANG *et al.* (2015), tal tratamento além de apresentar custo inferior, é menos impactante ao meio ambiente quando comparado com outras soluções, em virtude da captura de CO_2 realizada pelos agregados reciclados de concreto (LI *et al.*, 2017, WANG *et al.*, 2016).

Além de ser benéfica para a melhoria das propriedades dos agregados reciclados, a captura de CO_2 é também uma alternativa para minimizar o impacto ambiental provocado pelas emissões de gases do efeito estufa no meio ambiente e as conseqüentes mudanças climáticas provocadas. Diversos estudos científicos estimam um aumento entre 0,3 – 6°C na temperatura média da Terra até o final do ano de 2100. Segundo vários cientistas do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), o aquecimento global seria causado pelo excesso dos chamados gases do efeito estufa, lançados pelas atividades humanas na atmosfera desde 1750 e que agora, ultrapassam consideravelmente os valores pré-industriais. Entre os principais gases responsáveis pelo aquecimento global, se encontra o dióxido de carbono, cujas emissões globais

provenientes das atividades humanas ultrapassaram os 32 bilhões de toneladas em 2011 (JUNIOR, 2014).

A indústria cimenteira tem uma parcela significativa de participação nestas emissões de gases estufa, uma vez que, ela colabora com cerca de 5 – 8% das emissões globais de dióxido de carbono considerando o consumo de energia durante o transporte e o processo produtivo até a obtenção do *clínquer*, que por sua vez, seu processo de produção envolve a queima do carbonato de cálcio para a obtenção do óxido de cálcio e conseqüentemente liberação do dióxido de carbono. Ou seja, considerando que o carbonato de cálcio, o óxido de cálcio e o dióxido de carbono têm pesos molares respectivamente iguais a 100, 56 e 44, significa que quando 100 kg de carbonato de cálcio se transformam em óxido de cálcio, 56% se transformará realmente em óxido de cálcio, enquanto que 44% serão emitidas na forma de dióxido de carbono. Se o *clínquer* é composto por aproximadamente 65% de óxido de cálcio e o restante por óxido de silício e outros óxidos metálicos, a produção de 100 kg de *clínquer* corresponde à emissão de aproximadamente 51kg de CO₂ (JUNIOR, 2014).

Com isso, se torna um desafio buscar alternativas para minimizar as emissões dos gases poluentes e conseqüentemente redução do impacto ambiental gerado. Dentre elas, a reincorporação do dióxido de carbono é proposta na presente pesquisa a partir de técnicas de carbonatação acelerada como alternativa para melhoria das propriedades dos agregados reciclados de concreto. O objetivo é compreender a influência do tratamento nas propriedades físicas e químicas dos agregados reciclados, e assim determinar um tempo de exposição otimizado capaz de sequestrar carbono e melhorar as propriedades físicas dos grãos. A fim de alcançar os objetivos propostos foram realizados ensaios de caracterização das matérias-primas antes e após o tratamento de carbonatação acelerada, como: absorção de água por 24 horas e massa específica. Além disso, foram realizados ensaios de termogravimetria para quantificar o teor de CO₂ “sequestrado” pelos agregados.

A estrutura da presente dissertação é composta pelo presente capítulo introdutório, além de uma revisão bibliográfica, metodologia, resultados e conclusões.

O capítulo seguinte apresenta uma revisão bibliográfica que se inicia definindo e apresentando as principais características dos agregados reciclados e suas propriedades. Aborda sobre o processo natural de carbonatação ao qual as estruturas de concreto estão expostas, os efeitos deletérios conhecidos nas estruturas de concreto armado e os fatores que influenciam a cinética da reação e segue, por outro lado, apresentando de forma geral as pesquisas encontradas na literatura que abordam sobre o uso da reação de carbonatação como mecanismo de fixação do CO_2 em materiais cimentícios, bem como do uso da carbonatação acelerada em agregados reciclados para melhoria de suas propriedades. A lacuna do conhecimento sobre o tema é apresentada mostrando exatamente a importância da presente pesquisa.

No terceiro capítulo, apresenta-se todo o programa experimental, incluindo a descrição dos materiais utilizados e os métodos aos quais foram submetidos, além das estratégias adotadas para o tratamento das amostras e discussão dos resultados de sequestro de gás carbônico oriundos da análise térmica por termogravimetria.

No último capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios e como o tempo de exposição influencia nas propriedades físico-químicas dos agregados reciclado, além da determinação dos produtos formados para a densificação dos agregados. E, ao final, propõe-se a estabelecer um tempo ótimo de exposição à carbonatação acelerada, uma vez que o ganho ambiental proporcionado pelo tratamento com a reincorporação do dióxido de carbono emitido no ambiente pela construção civil não pode ser perdido pelo impacto ambiental gerado pelo consumo excessivo de energia. Principalmente, se for levado em consideração que o material abordado no presente estudo tem potencial para ser adotado, em escala, pela indústria da construção civil.

Ao final, apresentam-se as conclusões do estudo juntamente com as sugestões de trabalhos futuros, que são fundamentais para complementar a abordagem proposta ao tema.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta uma revisão acerca da bibliografia relevante aos temas que contextualizaram e motivaram este estudo: (i) a utilização de resíduos da construção como agregados reciclados para concreto e; (ii) a carbonatação. Inicialmente, define-se o que são os resíduos de construção e demolição (RCD) e demonstra-se a abrangência dos diversos estudos relativos ao reaproveitamento desses materiais na construção civil. Em seguida, são apresentados os processos de carbonatação natural de estruturas de concreto e carbonatação acelerada em concretos produzidos com agregados reciclados oriundo do reaproveitamento do RCD. Por fim, os resultados mais recentes de trabalhos sobre carbonatação acelerada em agregados reciclados – tema central deste trabalho – são discutidos, configurando o cenário de atuação da pesquisa proposta.

2.1. Resíduos de Construção e demolição

De acordo com o artigo 2º da Resolução do CONAMA de nº 307/2002, os resíduos da construção civil são resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc., comumente chamados de entulhos de obra, caliça ou metralha. Além disso, a resolução define como agregados reciclados os materiais granulares oriundos do processo de beneficiamento dos resíduos que, por sua vez, possuem aspectos e características técnicas para serem aplicados em obras de edificação, de infraestrutura ou outras obras de engenharia (JULIÃO, 2016).

O Artigo 3º da Resolução CONAMA nº 307/2002, alterada pela Resolução CONAMA nº 348/2004 (Artigo 3º, inciso IV) adota uma classificação para os resíduos da Construção Civil. A NBR 15114 (2004), por sua vez, assume esta mesma classificação que pode ser consultada na Tabela 2.

Tabela 2: Classificação dos resíduos segundo NBR 15114/2004 (adaptado de JULIÃO, 2016)

CLASSE	DEFINIÇÃO
A	Resíduos que podem ser reutilizados ou reciclados como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;
B	Resíduos que podem ser reciclados para outras destinações. Exemplos: plásticos, papéis, metais, vidros e madeiras;
C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;
D	Resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Entretanto, em 29 de Julho de 2015, a Resolução nº 469 altera a redação da Resolução nº 307/2002, excluindo a classe C e alterando a redação da classe B da seguinte forma: “Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso.”

O comitê RILEM 121-DRG (1994) propõe outro tipo de subdivisão dentre os agregados provenientes da reciclagem dos resíduos de construção e demolição, dividindo-os em tipos conforme Tabela 3.

Tabela 3: Classificação dos resíduos segundo Comitê RILEM 121-DRG/1994 (adaptado de JULIÃO, 2016)

TIPO	DEFINIÇÃO
I	São os agregados oriundos de resíduos de materiais cerâmicos, tais como tijolos, telhas e blocos;
II	São os agregados oriundos de resíduos de concreto;
III	São os agregados oriundos da mistura de pelo menos 80% de agregados naturais com materiais dos outros dois grupos, sendo que a quantidade de material do Tipo I deve ser inferior a 10%.

Entretanto, outra classificação também pode ser adotada, utilizada nas usinas de reciclagem, onde os agregados são separados pela cor predominante (RICCI, 2007). O resíduo chamado de cinza é o que possui predominância de materiais cimentícios em sua composição, já os chamados de vermelhos seriam aqueles com predominância de resíduos cerâmicos. Segundo ÂNGULO (2005), a parcela cinza, em tese, pode ser utilizada em componentes à base de cimento como blocos de concreto, calçamento e bases de pavimentação, enquanto a parcela vermelha pode ser empregada em atividades de pavimentação.

A reciclagem dos agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em concretos, argamassas e pastas vem sendo abordada por pesquisadores há muitos anos. Diversos autores já apresentaram revisões bibliográficas extensas sobre propriedades e aplicações relativas ao tema (BEHERA *et al.*, 2014, NIXON, 1978, POON *et al.*, 2007), estudos da

influência da utilização de agregados reciclados de concreto no comportamento mecânico (DUAN *et al.*, 2014, LIMA *et al.*, 2012, MIRANDA *et al.*, 2006, BRITO *et al.*, 2017, SILVA *et al.*, 2014, TOPÇU, 1997, YANG *et al.*, 2017), no comportamento físico (LIMA *et al.*, 2012, Miranda *et al.*, 2006, PEPE *et al.*, 2014, SILVA *et al.*, 2014; TAVAKOLI *et al.*, 2013; TOPÇU, 1997) e na durabilidade de materiais à base de cimento (ARREDONDO-REA *et al.*, 2019, DUAN *et al.*, 2014, MOVASSAGHI, 2006, NAGATAKI *et al.*, 2000, NISHBAYASHI *et al.*, 1988, PEDRO *et al.*, 2017, SILVA *et al.*, 2016, THOMAS *et al.*, 2018, XUAN *et al.*, 2017), assim como a influência da pasta de cimento aderida nas características do agregado reciclado (BRAYMAND *et al.*, 2017, CHEN *et al.*, 2006, JUAN *et al.*, 2009, M. DE JUAN *et al.*, 2004, PEPE *et al.*, 2014, SEO *et al.*, 2014, TAM *et al.*, 2007) entre outros temas. Os diversos estudos apontados demonstram a atualidade e a relevância do assunto, que é abordado desde a década de 1970 pela comunidade científica.

Em relação aos trabalhos de pesquisa mais recentes sobre o uso de agregados reciclados de concreto, a carbonatação acelerada vem sendo abordada como uma alternativa técnica para superar as deficiências e melhorar as propriedades dos mesmos. Entretanto, ainda temos poucas referências de autores que estudaram sobre o assunto. A bibliografia apresenta alguns estudos acerca da carbonatação de agregados reciclados e sua utilização em concretos, comparando a performance dos concretos produzidos com agregados carbonatados e não-carbonatados (LI *et al.*, 2017, LU *et al.*, 2019, PEDRO *et al.*, 2017, SILVA *et al.*, 2015, XUAN *et al.*, 2016, ZHANG *et al.*, 2015) e outros estudos nos quais os autores avaliaram as benefícios proporcionados pela carbonatação aos agregados em si (JIAN *et al.*, 2019, LI *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2015; ZHAN *et al.*, 2014, ZHANG *et al.*, 2015, XUAN *et al.*, 2016). Entretanto, são escassos os estudos na literatura sobre o tema em que os agregados reciclados tenham sido submetidos a algum processo de redução de granulometria para avaliação de suas propriedades.

Para o presente estudo, propõe-se estudar, por termogravimetria, o comportamento de captura de dióxido de carbono quando o agregado reciclado é submetido a diferentes tempos de exposição à carbonatação acelerada e quais os impactos proporcionados nas propriedades físicas do material. O estudo que mais se aproxima ao objetivo proposto no presente trabalho por meio da análise por termogravimetria de agregados reciclados para mensurar os benefícios da carbonatação acelerada foi o de ZHANG *et al.* (2015), que apenas menciona que utilizou pó de pasta de cimento para efetuar a análise por TG, entretanto não evidenciou a metodologia utilizada para atingir tal granulometria por meio de um agregado graúdo. Com isso, ao escolhermos utilizar a tal análise, encontramos dificuldade em estabelecer uma metodologia adequada para a preparação das amostras exatamente pela escassez de bibliografia abordando sobre um possível método de preparação. Decidimos, então, estabelecer uma metodologia teste. Antecedendo a discussão acerca do uso da carbonatação acelerada em agregados reciclados e os possíveis ganhos proporcionados pelo tratamento, vamos ilustrar o processo de carbonatação natural ao qual materiais à base de cimento estão expostos e como tal processo influencia em suas propriedades.

2.2. Processo de carbonatação natural em estruturas de Concreto

O fenômeno da carbonatação natural ocorre em boa parte das estruturas de concreto, uma vez que o composto químico que a desencadeia encontra-se em grandes concentrações nos centros urbanos facilitando com que o fenômeno ocorra já que as estruturas estão expostas ao gás.

A carbonatação é um fenômeno químico em que os produtos de hidratação alcalinos, sendo o hidróxido de cálcio o principal, reagem com o gás carbônico, em presença de umidade, em um processo de dissolução/precipitação, formando produtos à base de carbonato e sílica (JUNIOR, 2014).

A reação de carbonatação ocorre, de forma simplificada, em meio aquoso, de acordo com a equação (1):



Entretanto podemos entender como a mesma ocorre por etapas.

i) Dissolução do hidróxido de cálcio na solução dos poros da matriz cimentícia:

Por apresentar solubilidade em meio aquoso (mesmo que em pouca quantidade, em torno de 0,18%), o hidróxido de cálcio da matriz cimentícia se decompõe em dois íons segundo a equação (2).



ii) Difusão e dissolução de dióxido de carbono gasoso na solução presente nos poros da matriz cimentícia:

O gás carbônico, que por sua vez, penetra nos poros, ao encontrar umidade forma o ácido carbônico segundo a equação (3).



O ácido carbônico também pode ser entendido da seguinte forma:



A dissolução do CO_2 na solução dos poros em contato com o Ca(OH)_2 já dissolvido, provoca a formação de carbonato de cálcio que por sua vez é insolúvel em água e apresenta menor pH, diminuindo o pH da solução nos poros.

iii) E finalmente os íons Ca^{+2} e CO_3^{-2} se combinam formando o carbonato de cálcio e os demais íons formam a água, em um procedimento de neutralização, resumido pela equação 1 (WANG *et al.*, 2016). O carbonato de cálcio por ser insolúvel em água, não se dissolve, mas sim cristaliza, formando uma barreira e precipita densificando a estrutura.

Além da contribuição dada pelo Ca(OH)_2 para a reação de carbonatação, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), silicato tri cálcico não hidratado (C_3S) e silicato bicálcico (C_2S) também

consomem CO₂(KASHEF-HAGHIGHI *et al.*, 2015, MORANDEAU *et al.*, 2014) e sofrem mudanças estruturais devido à reação de carbonatação, entretanto neste caso tais mudanças ocorrem de forma mais lenta do que no caso do hidróxido de cálcio.

A reação de carbonatação cuja contribuição é dada pelo C-S-H pode ser observada na equação 5.



Neste caso, ocorre primeiramente a descalcificação do C-S-H, diminuindo a relação Ca/Si, e posteriormente há a formação do gel de sílica, que por sua vez possui uma estrutura altamente porosa (CASCUDO *et al.*, 2011).

PETER *et al.* (2008) investigaram a influência dos compostos da pasta de cimento no consumo de CO₂, no contexto do processo de carbonatação do concreto. Em seus estudos foram analisados os compostos CH, C-S-H, C₂S e C₃S. De acordo com os resultados apresentados a quantidade de CO₂ consumida pelo CH foi cerca de três vezes maior que a consumida pelo C-S-H, vinte vezes maior que a do C₂S e cinquenta vezes maior que a do C₃S. Estes resultados se devem ao fato do CH estar disponível em grande quantidade na pasta de cimento hidratada (quando se compara ao C₂S e C₃S, por exemplo) e também à sua maior solubilidade se comparado com os outros produtos presentes na pasta de cimento, como o C-S-H por exemplo. Na Figura 1 são mostradas, resumidamente, as fases dos processos descritos anteriormente.

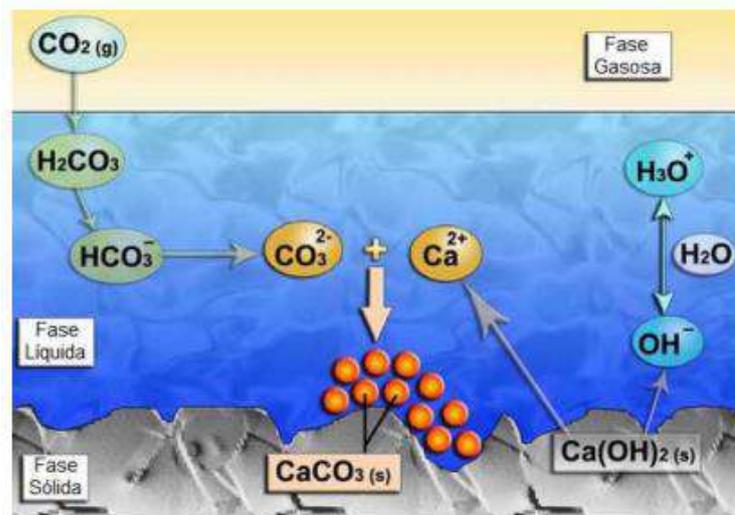
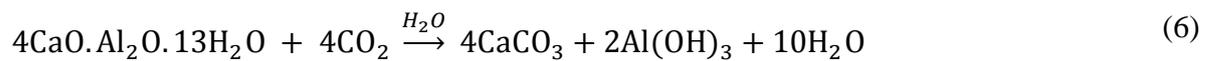


Figura 1: Fases da Carbonatação (THIÉRY, 2005)

A ação do CO_2 também pode ocorrer sobre as fases aluminato (como no C_4AH_x), segundo se pode ver na equação 6 (TAYLOR, 1997).



Durante a carbonatação dos aluminatos, os mesmos são convertidos em C_4AH_x e, posteriormente, em carbonato de cálcio e alumina gel. Considerando o monossulfato (AFm) e a etringita (AFt), eles geram o carbonato de cálcio, gel de alumina e sulfato de cálcio (CASCUDO *et al.*, 2011).

Além de todas as reações apresentadas anteriormente, é sabido que na solução dos poros do concreto são encontrados os álcalis do cimento (sódio e potássio), que por sua vez apresentam baixa solubilidade e são passíveis de sofrer carbonatação também (CASCUDO, 1997). As reações podem ser observadas nas equações 7 e 8.





HOUST *et al.* (2002) afirmou que os sais formados pelas reações 7 e 8 apresentam instabilidade e tendem a começar a reagir rapidamente com o hidróxido de cálcio, formando o carbonato de cálcio disponibilizando novamente os álcalis (Equações 9 e 10) que vão dar continuidade ao processo através das mesmas reações apresentadas anteriormente. Este efeito ocorre pela alta solubilidade dos carbonatos de sódio e potássio em água. Com o baixo kps do carbonato de cálcio, o CO_3^{2-} é removido da fase líquida, gerando mais hidróxidos alcalinos.



A velocidade de carbonatação do hidróxido de sódio e de potássio é maior, em virtude da sua solubilidade em água ser superior ao do hidróxido de cálcio e com isso suas disponibilidades, em meio aquoso, para que a carbonatação ocorra também serão superiores. A grande problemática dessa questão é que eles passam a ser “fornecedores” de íon carbonato para os demais cátions (tais como: magnésio, cálcio, estrôncio, alumínio e ferro) permitindo com que eles também se carbonatem. Com isso torna-se de extrema importância o conhecimento preliminar da quantidade de sódio presente na matriz cimentícia, pois o hidróxido de sódio é solúvel, e mesmo que esteja carbonatado pode ser lixiviado se ele não servir como agente de carbonatação para os demais cátions.

A carbonatação depende de alguns fatores para acontecer, tais como: umidade e temperatura do ambiente, pressão e concentração de CO_2 . A umidade é um fator determinante para este tipo de reação, pois a água é necessária para desencadear a carbonatação e não é consumida durante a mesma (SIMATUPANG *et al.*, 1995). A quantidade de água presente nos poros é determinante na velocidade de reação, uma vez que a falta de umidade impede a mesma, mas por outro lado, a saturação dos poros reduz a velocidade de difusão do gás nos mesmos (LAGERBLAD, 2005).

Em relação à pressão e concentração do gás, ambientes com elevada concentração de CO_2 e pressão tendem a aumentar a velocidade de difusão do gás e, conseqüentemente, a taxa de carbonatação (STUMPP, 2003; FUKUSHIMA, 1988). Com relação à temperatura, segundo PAPADAKIS *et al.* (1991), ela influencia pouco na velocidade da carbonatação. HELENE (1993) observa que na evolução da carbonatação a influência da temperatura na velocidade de carbonatação foi pouco visível para temperaturas entre 25 e 30 °C. Da mesma forma, KULAKOWSKI (2002) aponta que para temperaturas entre 20 e 40 °C não há interferência significativa na velocidade de carbonatação.

Outro fator que influencia a carbonatação é a composição química do cimento utilizado. Cimentos que possuem adições minerais, mesmo proporcionando o refinamento dos poros da matriz e diminuindo assim a porosidade e dificultando a difusão do gás, podem na verdade acelerar a frente de carbonatação ao preponderar o efeito da reserva alcalina (JUNIOR, 2014). O desenvolvimento e progresso da carbonatação só é possível após o consumo de todo o hidróxido de cálcio na zona de interface, devido a formação de uma camada apassivadora de penetração de CO_2 pela presença do carbonato de cálcio, que por sua vez não é solúvel em água. A reação de carbonatação só acontece em meio aquoso, e neste caso, a penetração do gás para dentro da matriz está sendo impedida pela formação desta camada de carbonato, o que prejudica o avanço da carbonatação.

A reação de carbonatação tem sido amplamente estudada, em vista dos efeitos deletérios que ela gera nas estruturas de concreto, principalmente concreto armado, como pode ser observado na Figura 2.



Figura 2: Estrutura de concreto armado deteriorada por carbonatação

(Fonte: www.clubedoconcreto.com.br)

As partes superficiais das estruturas são as mais suscetíveis à carbonatação em virtude da exposição ao gás carbônico e umidade, protegendo assim a região interna da peça.

Os hidróxidos apresentam pH elevado entre 11 e 12, podendo chegar até 13 nos casos de KOH e NaOH. Durante a formação do carbonato de cálcio, ele consome os álcalis da pasta (Ca(OH)_2 e C – S – H), gerando uma redução no pH, já que seu pH é em torno de 10. O pH do concreto, originalmente apresenta valores superiores a 12,5 e após o processo de carbonatação pode chegar a valores inferiores a 8,5 (MEHTA *et al.*, 2008). Tal redução não é causada apenas pela indisponibilidade de CH no meio ou pelo fato do carbonato de cálcio apresentar menor pH, mas sim pela transição de carbonato amorfo por carbonato cristalino. O carbonato amorfo é mais solúvel em água e permite que o pH do concreto permaneça alto, reduzindo apenas com o passar do tempo pela formação de carbonato cristalino.

A redução do pH da matriz cimentícia elimina a camada protetora de óxido de ferro ao redor da armadura, fazendo com que ocorra a despassivação da mesma. Uma vez que a armadura não está mais completamente protegida pela camada protetora, a corrosão é acelerada e

consequentemente o funcionamento estrutural da mesma é comprometido (CHI *et al.*, 2002; TALUKDAR *et al.*, 2012).

Entretanto, a carbonatação não só gera a despassivação da armadura, mas também a microfissuração. Esta microfissuração ocorre devido ao processo de retração diferencial entre a região interna do material cimentício carbonatado e a superfície, principalmente pela formação de novos produtos que ocasionam o aumento de volume, modificando a estrutura dos poros e alterando as condições de penetração dos gases envolvidos no processo. Este fenômeno chama-se retração por carbonatação (HEWLETT, 1998, NEVILLE, 1997).

Importante mencionar que a carbonatação natural a qual as estruturas de concreto estão sujeitas demora anos para acontecer no ambiente, em virtude da concentração de gás carbônico no ambiente ser menor (~0,038%) e a superfície de exposição e profundidade das peças a serem carbonatadas muito maiores. No presente trabalho, sugere-se o tratamento por carbonatação acelerada em agregados reciclados com concentração de gás carbônico de aproximadamente 20%.

2.3. Carbonatação acelerada em concretos produzidos com agregados reciclados

Conforme apresentado no item 2.2, a carbonatação de estruturas de concreto é conhecida por ser um fenômeno que gera efeitos deletérios às mesmas. Entretanto, nos últimos anos, diversos pesquisadores (ROSTAMI *et al.*, 2012, ZHAN *et al.*, 2013, WANG *et al.*, 2016) têm estudado a carbonatação como um procedimento de tratamento de materiais cimentícios quando respeitadas certas condições de exposição impostas. Os resultados obtidos têm sido promissores e mostram que o tratamento pode trazer benefícios ao material do ponto de vista de resistência mecânica e de durabilidade.

ROSTAMI *et al.* (2012) estudou pastas que foram submetidas à carbonatação acelerada durante 2h após 18h de hidratação e concluiu que houve uma melhora da resistência mecânica em 61%

em comparação com as pastas de referência e explicou que este comportamento se deu pela formação de cristais de carbonato de cálcio junto com silicato de cálcio hidrocarbonatado.

ZHAN *et al.* (2013) estudou como a cura em dióxido de carbono poderia melhorar as propriedades dos blocos de concreto produzidos com agregados reciclados. As amostras de concreto foram posicionadas em uma câmara de carbonatação, cujo *set-up* é apresentado na Figura 3, e foi dado um vácuo de -0.5 bar antes da injeção do gás. A pressão do gás no interior da câmara foi mantida em 0.1 bar pelos períodos de 6, 12 e 24hs. Além disso foram colocadas amostras de sílica gel anidra para remover a água evaporada dos corpos de prova.

Os resultados mostraram que durante 24hs, a perda de água aumentou com o tempo de cura. No entanto, a taxa de substituição de agregado teve uma influência discreta no grau de cura por dióxido de carbono. Comparado com o método de cura úmida convencional, a cura por dióxido de carbono melhorou a resistência à compressão dos blocos com ganhos variando de 108% a 151% dentro do tempo de cura de 24 h. Além disso, os valores de retração por secagem dos blocos foram significativamente reduzidos pela cura em CO₂.

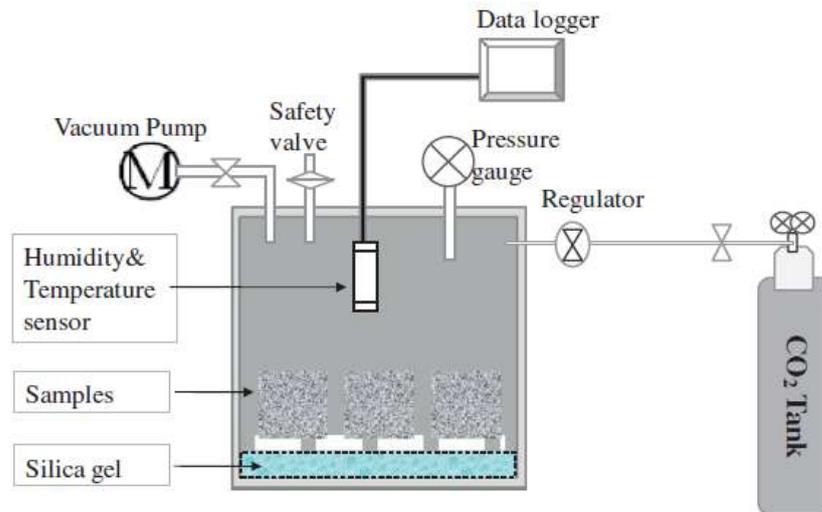


Figura 3: *Set-up* da câmara de carbonatação (ZHAN *et al.*, 2013)

ZHAN *et al.* (2013) também afirma que a produção de blocos de concreto com agregados reciclados submetidos à cura com CO₂ mostra-se como um procedimento potencial para a captura do gás.

WANG *et al.* (2016) estudou como as propriedades de concretos com agregados reciclados produzidos podem ser modificadas pela carbonatação. Para isso, foram produzidos agregados graúdos reciclados modelados de argamassa endurecida velha (MRCA) com diferentes fatores água-cimento. Cada tipo de agregado foi usado para produzir corpos de prova de argamassa que, por sua vez, foram moldados para medir a profundidade e o grau de carbonatação da argamassa velha endurecida.

Após a cura, tanto os agregados reciclados como os corpos de prova de argamassa foram encaminhados para um forno a 40°C onde permaneceram por 24hs. Depois disso, as amostras foram curadas em uma câmara de carbonatação acelerada com concentração de CO₂ de (20 ± 2) %, temperatura de (30 ± 3)°C e umidade relativa de (70 ± 5)%. O *set-up* da câmara de carbonatação utilizado foi similar ao de ZHAN *et al.* (2013), como pode ser visto na Figura 4.

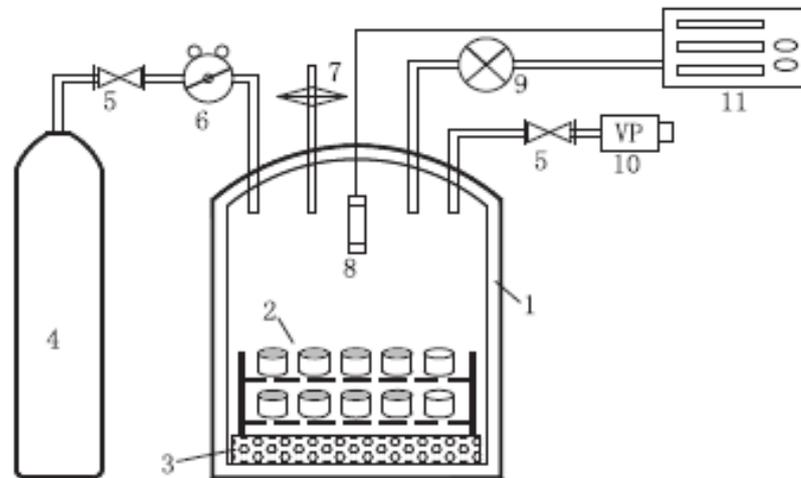


Figura 4: O dispositivo de teste de carbonatação acelerada. 1- Câmara de carbonatação; 2- MRCAs e amostras de argamassa; 3- Dessecante; 4- Armazenamento de gás CO₂ ; 5- Válvula; 6- Regulador de vazão; 7- Válvula de segurança; 8- Indutor de umidade e temperatura; 9- Piezômetro; 10- Bomba de vácuo (WANG *et al.*, 2016)

Tanto os agregados carbonatados como não-carbonatados foram usados na moldagem de lajes de concreto (MRAC) quadradas com dimensões de 120 x 120 x 30 mm, contendo em seu centro uma amostra de MRCA e uma fina camada com espessura de 5 mm de argamassa velha endurecida ao redor, conforme apresentado na Figura 5c. Essas lajes foram submetidas à ensaios de “push-out” para investigar qual efeito na resposta mecânica que a mudança gerada pela carbonatação do agregado proporcionou.

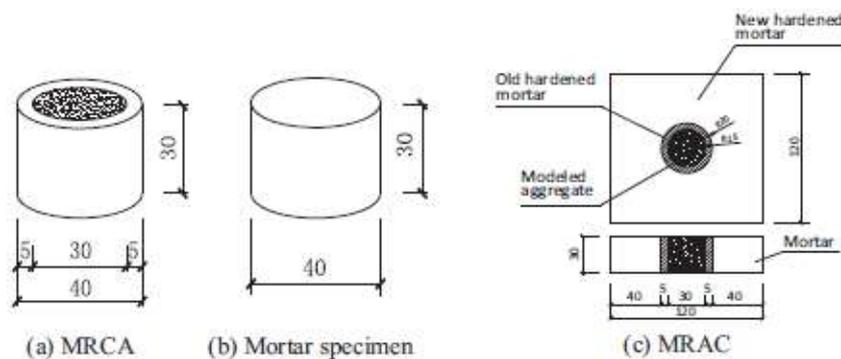


Figura 5: Dimensões das amostras (WANG *et al.*, 2016)

Os resultados do estudo de WANG *et al.* (2016) mostraram que a carbonatação pode melhorar as propriedades interfaciais do concreto MRAC. O efeito é mais significativo quando tanto o fator água-cimento da nova pasta aderida quanto da velha é maior. Para ambos os corpos de prova carbonatados como não carbonatados, um aumento no fator água-cimento da nova e da velha pasta aderida leva a uma redução da carga de pico.

2.4. Carbonatação acelerada em agregados reciclados

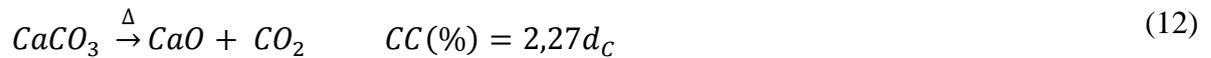
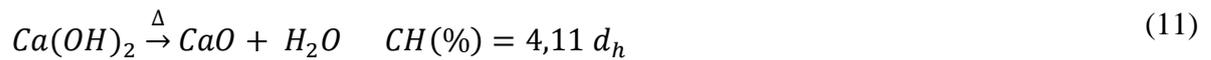
ZHANG *et al.* (2015) afirma que a pasta de cimento aderida aos agregados naturais tem um importante efeito na qualidade dos agregados reciclados de concreto por causa da sua elevada porosidade e baixa resistência em relação ao agregado natural. Com isso os agregados reciclados apresentam propriedades, tais como maior absorção de água, que tendem a prejudicar o desempenho das misturas produzidas com os mesmos em comparação com as produzidas com agregados naturais. Entretanto diversos pesquisadores têm estudado maneiras de melhorar as propriedades dos mesmos e uma das técnicas é a carbonatação acelerada.

Segundo ZHANG *et al.* (2015) durante as reações de carbonatação, o gás carbônico reage com o hidróxido de cálcio e com o C-S-H para formar carbonato de cálcio e sílica gel, que por sua vez preenche os poros da pasta de cimento aderida, com isso a massa específica do agregado aumenta e a absorção de água diminui. Para analisar de fato os ganhos proporcionados pelo tratamento aos agregados reciclados, ZHANG *et al.* (2015) avaliaram as alterações nas propriedades físicas dos agregados carbonatados, resistência a compressão e permeabilidade de argamassas produzidas com os mesmos e por meio de análises térmicas.

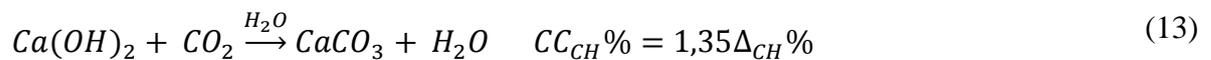
ZHANG *et al.* (2015) utilizaram como materiais de pesquisa agregados graúdos provenientes da compressão de vigas de concreto com resistência à compressão de 30 MPA (G-RCA) e de vigas de concreto com resistência à compressão de 50 Mpa (C-RCA). Como referência, utilizaram agregados proveniente da britagem de cascalho de rio (NA). Os agregados reciclados

G-RCA e C-RCA após serem submetidos a carbonatação receberam as nomenclaturas de G-CI e R-CI respectivamente.

Para efetuar as análises térmicas, ZHANG *et al.* (2015) utilizaram pó de pasta de cimento, entretanto não apresentou a metodologia utilizada para atingir tal granulometria. O pó foi introduzido em um aparelho de termogravimetria pelo intervalo de temperatura de 30 a 1200°C e uma rampa de 10°C/min em uma atmosfera de nitrogênio. A análise por termogravimetria foi conduzida para mensurar a quantidade de carbonato de cálcio e hidróxido de cálcio na pasta de cimento aderida nos agregados reciclados após a carbonatação. A massa de hidróxido de cálcio (CH) e carbonato de cálcio (CC) foram calculadas através da perda de massa nos intervalos de 430-520°C (d_h) e 530-950°C (d_c) segundo as equações 11 e 12 apresentadas abaixo:



A Equação 13 apresenta a quantidade de carbonato de cálcio ($CC_{CH}\%$) gerada pela carbonatação do hidróxido de cálcio que, por sua vez, pode ser calculada baseada no percentual de hidróxido de cálcio ($\Delta_{CH}\%$) presente na pasta de cimento após a carbonatação. A quantidade total de carbonato de cálcio subtraído do $CC_{CH}\%$ é igual a quantidade de carbonato de cálcio gerado pela carbonatação do C-S-H ($CC_{CSH}\%$).



A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos pela análise térmica realizada por Zhang *et al.* (2015). Observa-se que o teor de hidróxido de cálcio foi reduzido após a carbonatação e o teor de carbonato de cálcio aumentou significativamente. Os agregados reciclados com tamanho de partículas menores apresentaram mais carbonato de cálcio gerado pelo C-S-H.

Tabela 4: Efeito da carbonatação na composição da pasta de cimento aderida ao agregado reciclado (adaptado de ZHANG *et al.*, 2015)

Tamanho de partícula (mm)	Não carbonatado (%)		Carbonatado (%)					
	CH	CC	CH	CC	Δ_{CH}	CC_{CH}	CC_{CSH}	$(CC_{CSH})/\Delta_{CH}$
	A	B	C	D	E	F	G	H
0,16-0,315	3,86	17,30	2,22	25,34	1,64	2,22	5,72	72,0
0,315-0,63	4,52	16,85	2,63	24,45	1,89	2,55	5,05	66,5
0,63-1,25	4,32	15,75	1,81	20,95	2,51	3,39	1,81	34,8
1,25-2,50	4,23	16,55	2,38	19,43	1,85	2,50	0,38	13,2

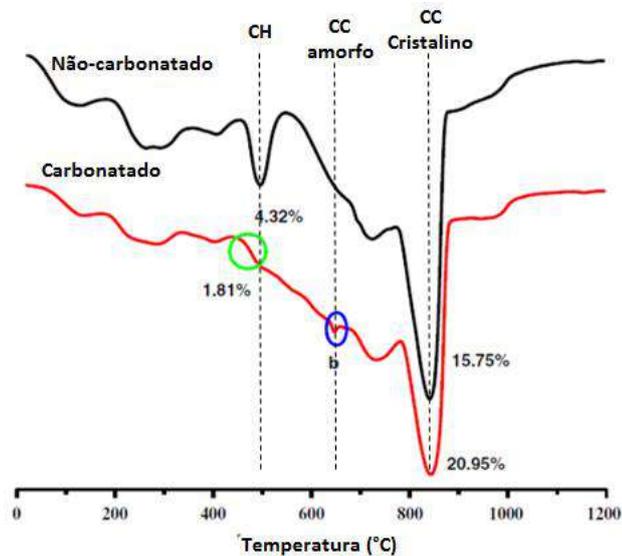


Figura 6: Curvas de TG da pasta de cimento aderida aos agregados reciclados carbonatados e não carbonatados, destacando com a linha tracejada o pico de desidroxilação do CH, decarbonatação do carbonato amorfo e do cristalino (adaptada de ZHANG *et al.*, 2015)

Segundo ZHANG *et al.* (2015), o hidróxido de cálcio na pasta de cimento hidratada aparece como cristais de forma hexagonal que são consumidos na carbonatação, refinando os cristais de hidróxido de cálcio para formar o carbonato de cálcio, que, por sua vez, preenche os poros

na pasta de cimento endurecida aumentando sua massa específica. Os produtos de hidratação encobrem a superfície do hidróxido de cálcio impedindo futuras reações. O hidróxido de cálcio não é completamente carbonatado, o que pode ser observado pelo leve pico em torno de 450-500°C na curva da DTG apresentada na Figura 6. O pico representado pela letra b na figura indica que o carbonato de cálcio com baixa cristalinidade (amorfo) foi decomposto.

Com relação as propriedades físicas apresentadas na Tabela 5, ZHANG *et al.* (2015) afirma que a massa específica aparente do agregado reciclado não carbonatado era de 6,3-7,8% menor que o agregado natural de referência, enquanto que o carbonatado era de 1,9-2,6% menor que o agregado natural de referência. Após a carbonatação, a absorção de água foi reduzida 22,6-28,3%.

Tabela 5: Composição e densidade dos agregados (adaptado de ZHANG *et al.*, 2015)

Propriedades Físicas	Agregado Não-carbonatado			Agregado Carbonatado	
	NA	G-RCA	C-RCA	G-CI	R-CI
Absorção de água (%)	2,35	8,06	8,70	5,78	6,73
Massa Específica (kg/m ³)	2,70	2,53	2,49	2,65	2,63
Valor de britagem (%)	Não mensurado	18,6	17,10	16,90	15,80

XUAN *et al.* (2016) estudou como as propriedades mecânicas dos concretos foram influenciadas ao incorporar agregados reciclados carbonatados. O principal objetivo do estudo era caracterizar as propriedades dos agregados reciclados antes e após o tratamento e investigar a influência no desempenho dos concretos. O tratamento foi realizado em câmara de carbonatação acelerada. Foram usados dois tipos de agregados, um chamado de “novo” (NRCA) por ter sido obtido pela britagem de um lote de 14 m³ de concreto e outro chamado de

“antigo” (ORCA) proveniente da britagem de peças de estruturas de concreto demolidas e armazenadas em laboratório por 1 ano e meio.

Antes de serem submetidas ao tratamento, as amostras foram pré-condicionadas em câmara de secagem a um teor de umidade apropriado para facilitar a carbonatação. Manteve-se a temperatura em 25 ± 3 °C e umidade relativa 50 ± 5 %. As amostras foram colocadas na câmara de carbonatação que por sua vez foi aspirada para -0.6bar antes de iniciar a injeção de CO₂. O *set-up* da câmara é apresentado na Figura 7.

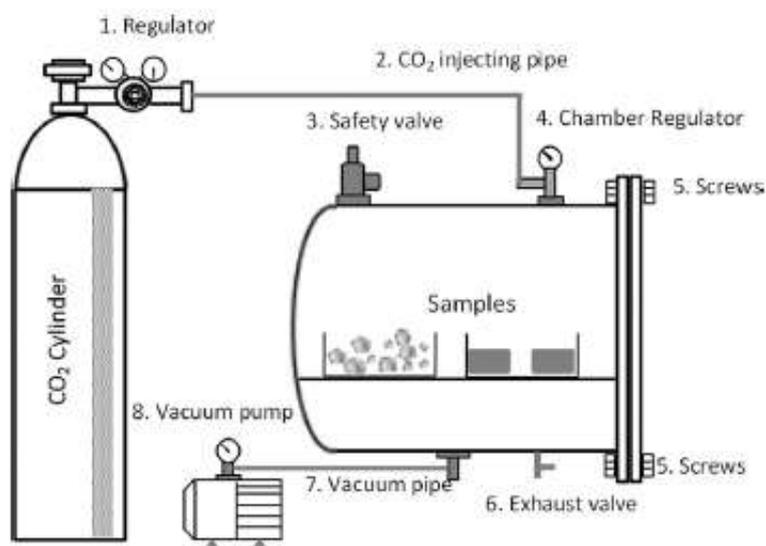


Figura 7: *Set-up* da câmara de carbonatação (XUAN *et al.*, 2016)

XUAN *et al.* (2016) afirma que não há uma medida padrão para averiguar a quantidade de gás sequestrado pelo tratamento e por isso a medição realizada foi com base na perda de massa termogravimétrica assumindo que a mesma está relacionada com a decomposição de carbonato de cálcio. A perda de massa ocorreu na faixa de temperatura de 550 a 850°C e é causada principalmente pela liberação do gás carbônico a partir do carbonato de cálcio. A medição do sequestro se baseou na seguinte equação (14):

$$\%W_{CO_2} = \frac{\Delta M_{CO_2}}{M_{105^\circ C}} \times 100\% \quad (14)$$

Onde:

$M_{105^{\circ}\text{C}}$ é a massa seca da amostra;

ΔM_{CO_2} é a perda de massa entre 550 e 850°C;

$\%W_{\text{CO}_2}$ é a porcentagem de sequestro do gás.

Os resultados obtidos nos ensaios de massa específica mostraram um aumento dos carbonatados em comparação aos não-carbonatados. Enquanto que a absorção de água mostrou que os agregados carbonatados absorvem menos que os não. Observou-se também que os resultados melhoraram com o aumento da pressão imposta ao tratamento. Com relação à porcentagem de sequestro de CO_2 , os resultados obtidos nos agregados “antigos” foram menores devido ao processo de carbonatação natural já ter ocorrido durante a demolição e armazenamento dos mesmos. Após a demolição e britagem das peças de concreto, uma significativa rápida carbonatação dos agregados reciclados ocorre nos primeiros 2 anos devido ao aumento da superfície exposta (XUAN *et al.*, 2016).

Os resultados nos concretos mostram que a densidade dos concretos carbonatados é maior que a dos não carbonatados, o que já era esperado uma vez que a carbonatação aumentou a massa específica dos agregados reciclados, conforme apresentado na Figura 8.

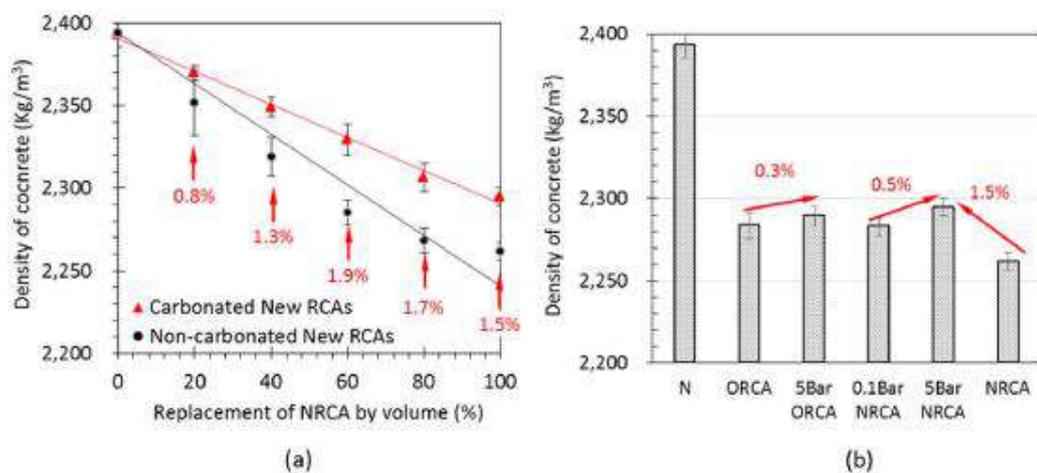


Figura 8: Massa específica de concretos produzidos com agregados reciclados carbonatados e não carbonatados aos 28 dias (XUAN *et al.*, 2016)

Com relação à resistência à compressão observa-se que os resultados dependeram da porcentagem de substituição dos agregados, ao tipo de agregado reciclado usado e a pressão de carbonatação imposta. Pela Figura 9, observamos que a resistência à compressão do novo concreto com 100% de substituição de agregados não carbonatados em comparação ao concreto de referência diminuiu 26,3%, mas quando o teor de substituição foi limitado a 30%, não foi observada redução significativa.

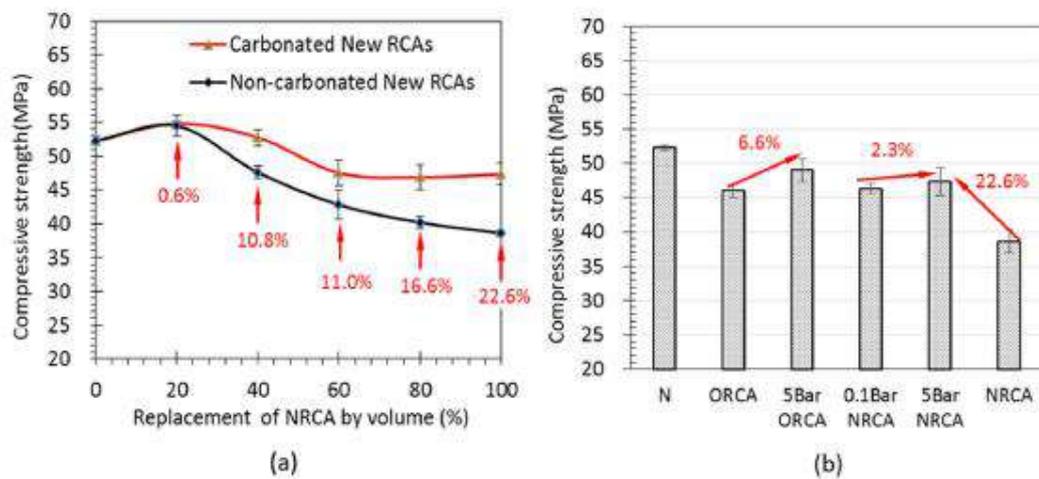


Figura 9: Resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados carbonatados e não carbonatados aos 28 dias (XUAN *et al.*, 2016)

As conclusões do estudo de XUAN *et al.* (2016) foram que os agregados reciclados quando submetidos à carbonatação acelerada tem suas propriedades físicas e mecânicas melhoradas, apresentando redução de absorção de água e aumento de massa específica. Os novos agregados sequestraram em média 7,9kg de CO₂ por tonelada. Os agregados provenientes de estruturas de concreto demolidas apresentaram melhoras menos significativas, uma vez que os mesmos já haviam sido submetidos à uma carbonatação natural parcial durante a demolição e estocagem. Também se concluiu que a pressão de carbonatação tem um impacto inferior na melhora das propriedades dos agregados quando se usa uma duração longa de tratamento de carbonatação. Eles afirmam que a carbonatação total do concreto poderia absorver 50% de CO₂ por massa de cimento e que o produto da reação (CaCO₃) precipita nos poros e densifica toda a

microestrutura, reduzindo a porosidade do agregado reciclado (XUAN *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2015).

FERNÁNDEZ BERTOS *et al.* (2004), KASHEF-HAGHIGHI *et al.* (2015), KOU *et al.* (2014), MORANDEAU *et al.* (2014) e ZHANG *et al.* (2015) concordaram com a conclusão dada por XUAN *et al.* (2016) de que ocorreria uma densificação da microestrutura não ocasionado apenas pelo ganho de CO_2 e H_2O , mas também pela formação de um produto de maior densidade pela reação entre o CO_2 na fase aquosa e do cálcio que é retirado do meio após a carbonatação. O volume sólido deve aumentar cerca de 11,8% baseado na reação (1) e 23% baseado na (5).



ZHANG *et al.* (2015) afirma que a carbonatação não só melhora as propriedades dos agregados reciclados, mas também serve para reduzir o efeito estufa causado pela emissão de dióxido de carbono, uma vez que ao tratar os agregados reciclados desta forma, armazenaria CO_2 nos mesmos.

KOU *et al.* (2014) assim como os demais pesquisadores fez um estudo experimental nas propriedades do concreto preparado com agregados reciclados de argamassa que foram modificados por meio de uma metodologia de cura em CO_2 . O programa experimental se dividiu em duas partes: a primeira focada na caracterização dos agregados e a segunda nas propriedades no estado fresco e endurecido e de durabilidade de concretos preparados com agregados reciclados e com agregados reciclados submetidos à cura em CO_2 . Cerca de 4kg de agregados foram colocados na câmara e foi dado um vácuo de -0.5 bar antes da injeção do gás. A pressão do gás no interior da câmara foi mantida em 0.1 bar pelos períodos de 6, 12, 24, 48 e 72hs. O *set-up* do experimento de cura em CO_2 é o mesmo que o utilizado por ZHAN *et al.*

(2013), diferindo apenas o fato de que ZHAN *et al.* (2013) submeteu corpos de prova de concreto ao tratamento, enquanto que KOU *et al.* (2014) submeteu os agregados reciclados.

Os resultados do estudo de KOU *et al.* (2014) mostraram que a resistência à compressão e tração dos concretos produzidos com agregados reciclados e com agregados reciclados carbonatados foram menores que os do concreto de referência aos 28 dias, entretanto aos 90 dias, a resistência à compressão do concreto com agregado reciclado carbonatado foi a mesma do concreto de referência e a resistência à tração foi levemente superior. Com relação à retração por secagem e resistência à penetração de cloretos, os resultados dos concretos produzidos com agregados reciclados carbonatados foram superiores aos dos concretos produzidos com agregados reciclados não-carbonatados.

Quando não se tem substância carbonatada, o hidróxido de cálcio, que por sua vez apresenta em torno de 0,18% de solubilidade em água, disponibiliza o cálcio, que na presença de cloretos, será consumido muito rápido formando cloreto de cálcio que consegue retirar outros óxidos hidratados na forma de cloreto com mais facilidade. Quando carbonata e diminuiu a disponibilidade de cálcio no meio por estar na forma de carbonato, que é insolúvel em água, ele não vai ser transformado em cloreto de cálcio e por isso se torna mais resistente à íons cloreto, ou seja, a resistência a cloretos após a carbonatação deve-se a solubilidade do produto formado que está consumindo o cálcio, que antes se encontrava na forma de hidróxido.

Segundo KOU *et al.* (2014), os resultados promissores mostram que agregados submetidos à cura em CO₂ podem ser usados na produção de concretos estruturais com durabilidade similar ao de concretos produzidos com agregados naturais.

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo serão apresentados detalhadamente os materiais utilizados na presente pesquisa, incluindo sua preparação e beneficiamento, e os métodos utilizados para análises. Ambos seguindo o programa experimental apresentado na Figura 10.

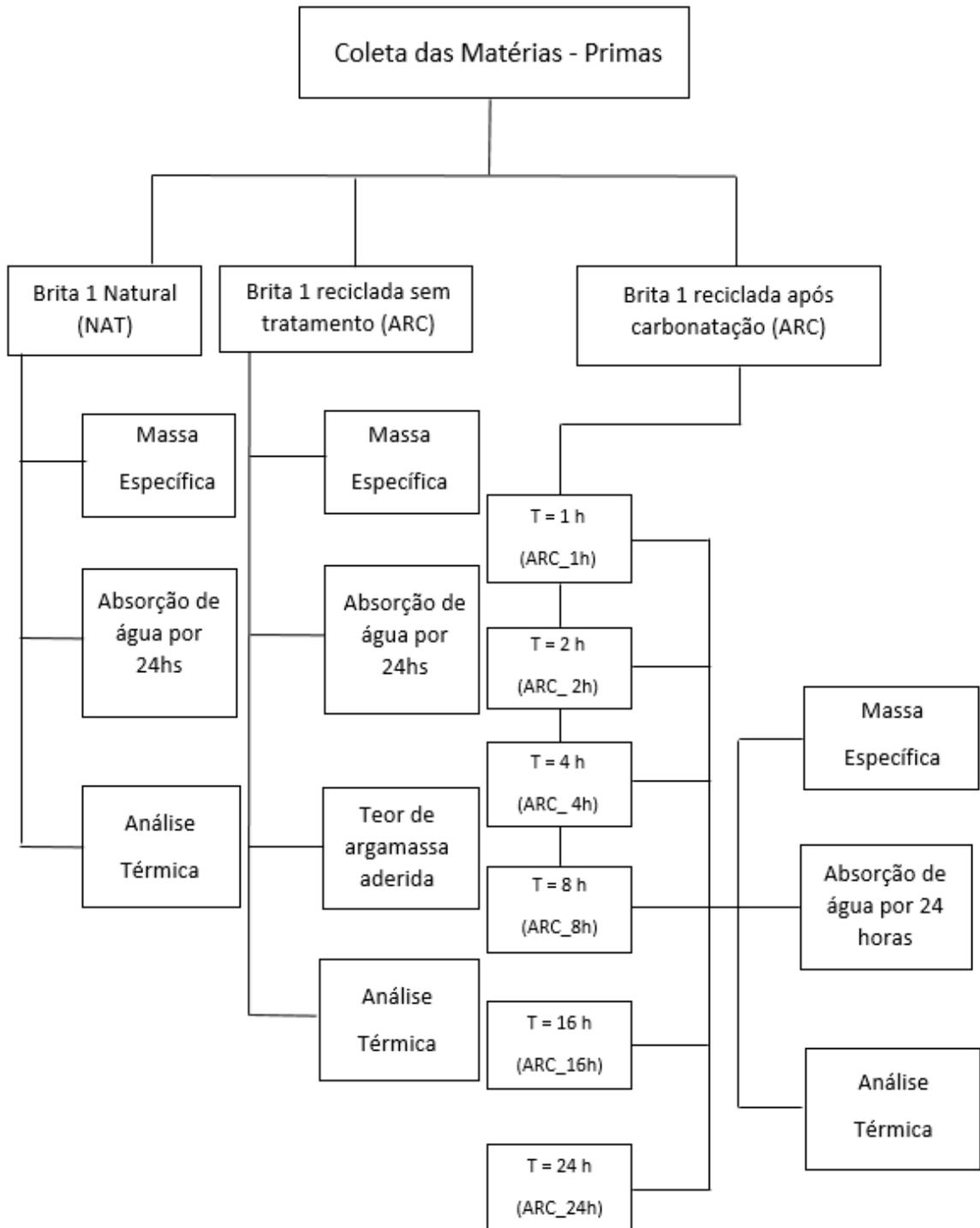


Figura 10: Programa Experimental

3.1. Materiais

Nesse estudo, foram utilizados agregados graúdos reciclados provenientes da britagem de corpos de prova de concretos produzidos e testados no Núcleo de Materiais e Tecnologias Sustentáveis (NUMATS) da COPPE/UFRJ. Os agregados foram beneficiados nas pesquisas de tese de doutorado de RANGEL (2019) e AMÁRIO (2019). Por esta razão, a composição mineralógica dos resíduos de laboratório é completamente conhecida e, além disso, os produtos resultantes do processamento dos mesmos podem ser considerados livres de contaminações.

Corpos de prova de concreto (com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura) foram produzidos com areia natural, agregado graúdo natural com diâmetro máximo de 9,5 mm (NAT), cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) de acordo com a ABNT NBR 5733 (1991) e superplastificante de policarboxilato (Glenium 51). A escolha do uso de agregado com um diâmetro máximo de 9,5 mm teve como objetivo produzir agregados reciclados de concreto com alto teor de pasta de cimento aderida, já que o tratamento com carbonatação acelerada atua na pasta de cimento aderida ao agregado natural nos agregados reciclados. A relação água-cimento foi de 0,6 e o consumo de cimento foi de 353 kg/m³. A desmoldagem dos corpos de prova produzidos foi realizada após 24 horas e a cura ocorreu em uma câmara úmida com umidade relativa do ar de 100% e temperatura de 21°C ± 2°C, durante 28 dias.

O concreto original apresentou resistência à compressão média de 32,8 MPa e módulo de elasticidade de 22,3 GPa aos 28 dias. Em seguida, os corpos de prova foram colocados em uma prensa mecânica e levados à ruptura para ter fragmentos de tamanho apropriado para o estágio de britagem.

A britagem dos fragmentos foi realizada em um britador de mandíbulas modelo Queixada 200 (Figura 11a), que originou em partículas graúdas e miúdas. No entanto, sua separação não é realizada com uma malha de peneira padrão, sendo necessário passar por etapas posteriores

para separação das partículas em agregados miúdos e graúdos de acordo com os tamanhos de definidos em norma de agregados para concreto (ABNT NBR 7211, 2015).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 11: Processo de Britagem. (a) Britador de mandíbulas; (b) Britagem dos resíduos; (c)

Fração graúda produzida; (d) Fração miúda produzida. (adaptado de AMARIO *et al.*, 2018)

Ao final do processo de britagem, as frações miúdas e graúdas foram armazenadas em sacos grandes até o estágio de peneiramento. No processo de peneiramento, utilizou-se um peneirador mecânico industrial (com malhas de 4,75, 9,5 e 19 mm) que por sua vez gerou cinco frações de materiais, com suas respectivas quantidades apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Quantidade (em massa) de material produzido por fração granulométrica

(adaptada de AMARIO *et al.*, 2018)

Fração	Quantidade (Kg)	Percentual (%)
Maior que 19 mm	341	5
Brita 1 (9,5 < ϕ < 19 mm)	2350	33
Brita 0 (4,75 < ϕ < 9,5 mm)	798	12
Areia (150 μm < ϕ < 4,75 mm)	2904	42
< 150 μm	266	4
Perdas	268	4

Após o peneiramento, foi realizada a homogeneização do material pelo "processo celular" (processo de homogeneização por unidade de célula ou conhecido como pilha de homogeneização). Este processo consiste em espalhar pequenas quantidades de material ao longo de uma pilha em camadas, alternadamente da direita para a esquerda e depois da esquerda para a direita, até que todo o material tenha sido espalhado. Depois que a quantidade total de material foi distribuída homogeneamente ao longo do comprimento em várias camadas, o agregado depositado nas extremidades da pilha é coletado e novamente distribuído da mesma maneira ao longo da pilha. As camadas de material são subdivididas em várias seções, chamadas "células", do meio para as extremidades. Após a homogeneização, a secagem de todos os agregados foi realizada sob o sol, com camadas finas de material espalhadas em uma área aberta (AMARIO *et al.*, 2018).

O processamento de todo o material até a fase de homogeneização mencionado anteriormente foram realizados ao longo do programa experimental da tese de doutorado de AMARIO (2019). O presente estudo utilizou apenas a fração de brita 1 (Figura 12), gerada no trabalho anterior,

uma vez que esta foi a fração de agregado graúdo de maior quantidade de material disponível após o processo de britagem. Além disso, esta fração deve contemplar maior quantidade de pasta aderida, que por sua vez é a parte do agregado a ser carbonatada (ZHANG *et al.*, 2015) e, com isso, permite avaliar com maior precisão o método de tratamento proposto aos agregados reciclados.



Figura 12: Brita 1 produzida

Toda a brita 1 foi mantida armazenada em bombonas plásticas fechadas para evitar o contato e troca com meio ambiente. As amostras não estavam totalmente vedadas de tão forma que as trocas pudessem ser desprezadas, mas foram mantidas neste recipiente fechado para minimizar o máximo o contato com o ar. Foi escolhido como lote para esse estudo 100kg de material, que por sua vez foi retirado da parte central do bulk de agregados, uma vez que seria a porção com menor chance de ter sofrido alguma carbonatação. As amostras estavam armazenadas há cerca de dois anos, logo a argamassa aderida presente nos agregados já estava madura com hidratação avançada e, por isso, acredita-se que já havia atingido o teor máximo de CH.

Para garantir que todo o lote de estudo tivesse as mesmas propriedades e que todas as amostras utilizadas posteriormente fossem representativas, foi realizada novamente a homogeneização, conforme Figura 13.



(a)

(b)

(c)

Figura 13: Processo de Homogeneização pelo “processo celular” da amostra de 100 kg do lote para estudo. (a) Amostra sendo espalhada para formação da pilha; (b) Pilha de Homogeneização formada; (c) Armazenamento de todo material em sacos para minimizar o contato com ambiente

3.2. Métodos

Para avaliar as propriedades dos agregados antes de serem submetidos à carbonatação acelerada foram realizados ensaios de caracterização física e química, entre eles: massa específica e absorção (ABNT NBR NM 53, 2009), determinação do teor de pasta de cimento aderida e, posteriormente, análise térmica por termogravimetria. Em seguida, os agregados reciclados foram submetidos ao tratamento de carbonatação acelerada em seis diferentes tempos de exposição e, por fim, os ensaios de caracterização foram realizados novamente nas amostras carbonatadas. A seguir, apresentam-se as etapas detalhadas da metodologia de caracterização experimental.

3.2.1. Massa Específica e Absorção

Os ensaios de massa específica e absorção de água foram realizados de acordo com os procedimentos normativos da ABNT NBR NM 53 (2009). Inicialmente, as amostras foram

secas em uma estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas, conforme apresentado nas imagens das Figuras 14 (a) e (b). Em seguida, foram submersas em água em um Becker por mais 24 horas (Figura 14 (c)). Após este período, retirou-se o excesso de água das amostras com auxílio de um pano absorvente (Figura 14 (d)) afim de secá-las superficialmente e depois foram pesadas para determinar a massa do agregado saturado com superfície seca (Figura 14 (e)). Por fim, o material foi submerso novamente em água, mas, desta vez, para determinação da massa em água do agregado a partir de uma balança hidrostática, conforme apresentado na Figura 14 (f).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 14: Etapas do ensaio de absorção em água por 24hs e massa específica de agregados graúdos segundo NBR NM 53. (a) Estufa de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$; (b) Amostras sendo previamente secas em estufa por 24hs; (c) Amostras submersas em água por 24hs; (d) Retirada de água com auxílio de pano absorvente; (e) Pesagem das amostras secas superficialmente; (f) Pesagem em balança hidrostática

A partir desse procedimento determinou-se a absorção total do agregado reciclado conforme a Equação (15) a seguir:

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (15)$$

Onde, A é a absorção de água do material, dada em percentagem; m é a massa ao ar do material seco em estufa; e m_s é massa ao ar do material saturado com superfície seca.

Da mesma maneira, a partir da Equação (16) determinou-se a massa específica do agregado reciclado:

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (16)$$

Onde, d é massa específica do material seco, em Kg/m³; e m_a é a massa do material imerso em água, a partir da leitura hidrostática.

3.2.2. Teor de pasta aderida

O ensaio para mensurar o teor de pasta aderida às partículas de agregados reciclados foi realizado pelo método de choque térmico (PANDURANGAN et al., 2016). Para realizar este teste, primeiramente, a amostra foi seca em estufa a 60°C até alcançar constância da massa, seguida pelo registro dessa massa. Posteriormente, a amostra foi colocada em água a 5°C durante 10 minutos e encaminhada diretamente para aquecimento a 600°C por duas horas. Em seguida, o material foi novamente colocado em água a 5°C durante 10 minutos. Logo depois, esfregou-se a amostra com o auxílio de um pano para que a pasta se desprendesse da partícula de agregado natural original. A amostra foi peneirada – em peneira com malha de 1,7 mm – e lavada a fim de garantir a remoção de toda a pasta aderida. Finalmente, a amostra final retida na peneira foi seca até massa constante e pesada novamente.

Dessa maneira, o teor de pasta aderida (PD) é simplesmente determinado pela diferença entre a massa inicial (antes do tratamento térmico) e final (após o choque térmico), conforme descrito pela Equação 17 a seguir:

$$PD = (m_i - m_f) \times 100 \quad (17)$$

Onde, PD é teor de pasta aderida, dado em percentagem; m_f é a massa das partículas de agregado ao final do choque térmico, isto é, após a retirada da pasta aderida; e m_i a massa de partículas no início do ensaio.

3.2.3. Caracterização dos agregados reciclados pré-exposição à carbonatação

Na tabela 7 são apresentados as propriedades físicas dos agregados naturais e reciclados antes do tratamento por carbonatação acelerada. Conforme apresentado na seção 3.1, assumiu-se como referência a brita natural (NAT) usada na produção das peças de concreto, que por sua vez, posteriormente foram britadas e geraram os agregados reciclados (ARC).

Tabela 7: Caracterização física dos agregados

Agregado	Nome	Dmax (mm)	D50 (mm)	Massa específica (g/cm³)*	Absorção (%)*	Pasta aderida (%)
Natural	NAT	19	12,5	2,67 ± (0,03)	0.44 ± (0.12)	-
Reciclado	ARC	19	12,5	2,27 ± (0,01)	7.73 ± (0.07)	64.8

* Entre parênteses, o valor do desvio padrão para uma campanha de 3 amostras ensaiadas.

Observa-se, em consonância com a revisão apresentada na seção 2.4, que a absorção de água do agregado reciclado é cerca de 18 vezes maior do que o agregado natural enquanto a massa específica é cerca de 0,4 g/cm³ menor do que o agregado natural. Pela Figura 15 é possível observar que o agregado reciclado apresenta partículas menores que o agregado natural.

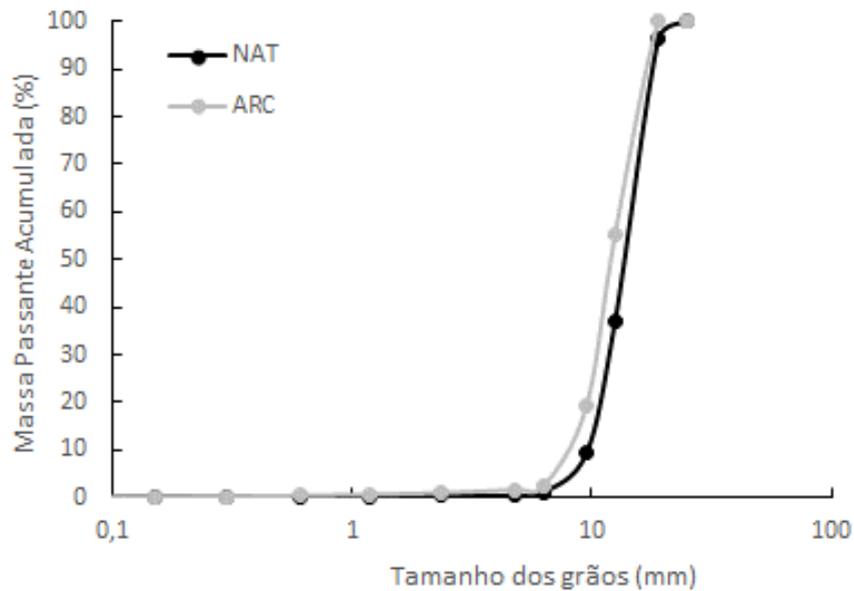


Figura 15: Curvas granulométricas dos agregados naturais (NAT) e do agregado reciclado (ARC) (adaptado de AMARIO *et al.*, 2019)

Esses resultados podem ser explicados em função dos agregados reciclados apresentarem elevado teor de pasta aderida (aproximadamente 65%), que, por sua vez, eleva a porosidade e diminui a densidade do material. Assim, limitando sua utilização em materiais como agregados para concretos (LI *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2014; XUAN *et al.*, 2016).

3.2.4. Ensaio de carbonatação acelerada

A carbonatação acelerada foi realizada em uma câmara climática de carbonatação, modelo Thermotron SM-27-8200, no Laboratório de Carbonatação Acelerada do NUMATS/UFRJ. Na Figura 16 (a) apresenta-se o equipamento, que permite o controle de temperatura e umidade no interior da câmara, além da exposição ao gás carbônico. A pressão de injeção do gás carbônico na câmara foi controlada com o auxílio de um regulador e mantida constante em torno de 1 bar durante todo o período da carbonatação. Segundo manual, tal equipamento não produz nenhum vácuo, mantendo-se na pressão atmosférica.

As condições escolhidas, preliminarmente, para a realização dos ensaios foram adaptadas de estudos recentes realizados em agregados reciclados de concreto (ZHAN *et al.*, 2014, ZHANG *et al.*, 2015), conforme descrito a seguir e ilustrado na Figura 16 (b):

- Temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$;
- Umidade de $60 \pm 5\%$;
- Concentração de CO_2 de $20 \pm 2\%$.



(a)



(b)

Figura 16: (a) Câmara climática de carbonatação acelerada; (b) Condições do pré-ensaio de temperatura, umidade e concentração de gás

A escolha desta faixa de umidade relativa se deu, uma vez que, segundo PAPADAKIS *et al.* (1991), o fenômeno da carbonatação não é perceptível em umidades relativas inferiores a 50%, pois não há água suficiente para que as reações se processem e por outro lado, quando os poros encontram-se saturados, a velocidade de difusão do CO_2 diminui excessivamente. Segundo THIÉRY *et al.* (2007), as maiores velocidades de carbonatação ocorrem em umidades entre

50% e 70%. Em ensaios acelerados de carbonatação, a maioria dos estudos tem adotado a faixa de umidade relativa de $60\pm 5\%$ (THIÉRY *et al.*, 2007; KATZ, 2003; LO *et al.*, 2009).

A fim de garantir que o ensaio fosse iniciado com as condições estabelecidas, a câmara foi acionada por 10 minutos antecedendo a introdução das amostras. Para cada amostra foram utilizadas vinte partículas de agregados reciclados (pesando aproximadamente 340g com teor de pasta aderida de 65%, ou seja, apresentava cerva de 221g de pasta aderida) que, por sua vez, foram previamente secas em estufa até constância de massa, conforme Figura 17 (b). Em seguida, as amostras foram posicionadas no interior da câmara climática, afastadas umas das outras (Figura 17 (d)), onde permaneceram por seis diferentes tempos de exposição. Foram eles: 1, 2, 4, 8, 16 e 24 horas. Concluído o período de exposição, cada amostra foi retirada da câmara, pesadas e conservadas embaladas em papel filme (Figura 17 (e)) e armazenadas em dessecador com sílica ativa (Figura 17 (f)), a fim de conservar as características obtidas na exposição ao CO_2 , evitando o contato com o ar ambiente e impedindo que a reação de carbonatação pudesse ter continuidade. Por fim, as amostras foram retiradas do dessecador e encaminhadas para realização dos ensaios de caracterização física e preparação das amostras para ensaios termogravimétricos.

Os resultados obtidos serão comparados com os dos agregados que não foram submetidos ao tratamento e assim atestar as melhorias proporcionadas pelo processo às propriedades dos agregados reciclados.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 17: Configuração das etapas de exposição das amostras através da carbonatação acelerada em câmara climática: (a) Pesagem das amostras pré-secagem; (b) Secagem das amostras até constância de massa; (c) Pesagem das amostras pós-secagem; (d) Amostras posicionadas na câmara de carbonatação; (e) Amostras pesadas pós carbonatação e embaladas em papel filme; (f) Amostras armazenadas em dessecador

3.2.5. Análise térmica por termogravimetria

No presente trabalho, os ensaios termogravimétricos têm por objetivo quantificar os produtos hidratados e, sobretudo, os de carbonatação presentes na pasta de cimento aderida ao agregado reciclado. Portanto, foi necessário preparar as amostras – separadas em alíquotas de agregados graúdos reciclados de concreto – de maneira que fossem compostas exclusivamente (ou em sua maioria) de material cimentício, além de obter tamanho de partículas adequado para a utilização no equipamento.

Metodologias para desagregar a pasta de cimento do agregado natural são de conhecimento amplo em ciência e tecnologia de agregados, como por exemplo o método de choque térmico. Entretanto, no presente estudo não foi possível utilizar nenhum método que pudesse alterar minimamente o processo de carbonatação acelerada. Diante do exposto, foi necessário estabelecer uma metodologia de preparação das amostras previamente a quantificação por termogravimetria.

3.2.5.1. Preparação das Amostras

Amostras de agregados reciclados foram comprimidas com auxílio de uma prensa Servo controlada Shimadzu modelo UH-F1000kNI (Figura 18 (a)) a partir de um protótipo de ensaio de compressão de leito de partículas apresentado na Figura 18 (b) (FUERTENAU *et al.*, 1996). Conforme apresentado na Figura 18 (d), o procedimento é realizado com um pistão posicionado no centro da mesa da prensa, que se movimenta verticalmente para baixo para quebrar as partículas inseridas no interior de um cilindro de aço. As amostras foram despejadas no interior do cilindro, conforme as Figuras 18 (c). Após realizada a compressão do leito de partículas, as amostras apresentavam – conforme esperado – grãos de tamanho reduzido (Figura 18 (e)). Em seguida, as partículas fragmentadas foram espalhadas em superfície plana para retirada dos fragmentos graúdos, visivelmente identificados como agregado natural fraturado ao final do procedimento (Figura 18 (f)).

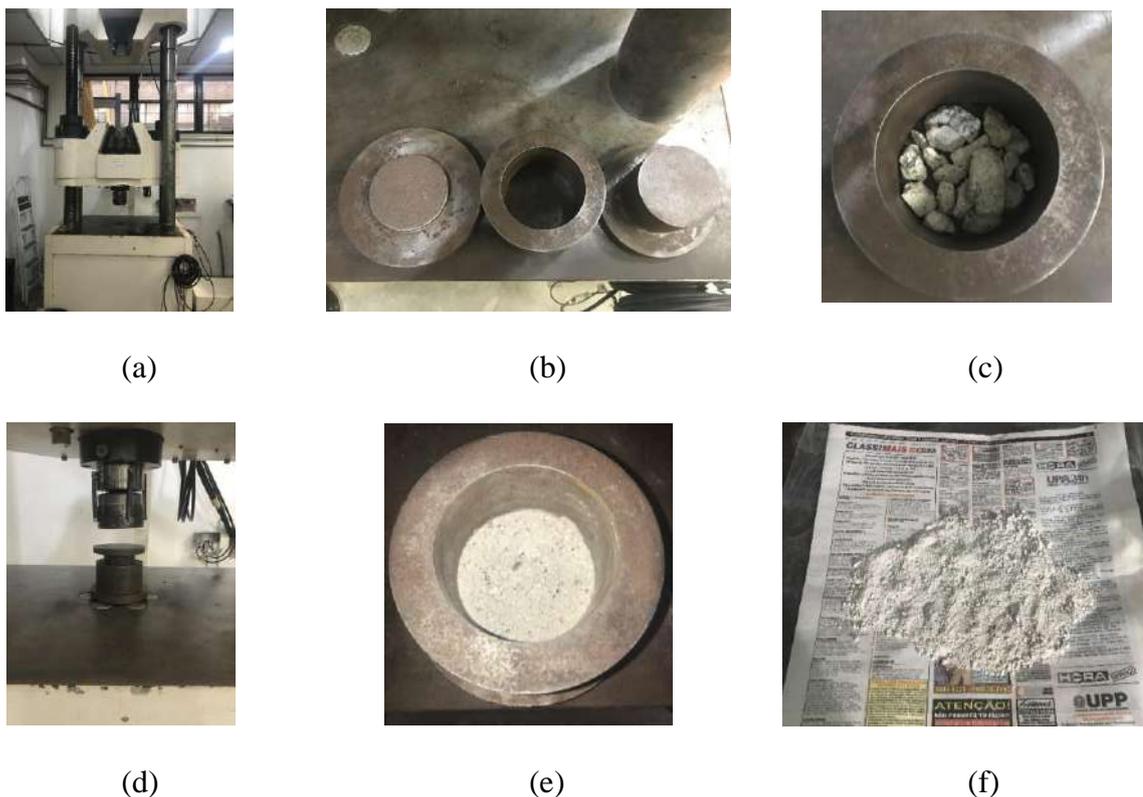


Figura 18: Sequência de atividades adotadas a partir do aparato experimental de compressão de leito de partículas para fragmentação dos agregados carbonatados: (a) prensa universal; (b) base, cilindro e pistão utilizados; (c) amostra distribuída no interior do cilindro, antecedendo o processo de fragmentação; (d) posicionamento do pistão; (e) amostra após processo de fragmentação por compressão; (f) seleção visual e retirada de partículas com aparência de areia natural.

Não foi possível realizar a coleta do material apenas da faixa superficial carbonatada, logo a amostra resultante da preparação seria uma “amostra média” considerando material carbonatado e possivelmente não carbonatado. Para a conservação das partículas referentes apenas ao material cimentício da pasta aderida, as amostras foram peneiradas para garantir a remoção das partículas de agregado natural, fragmentado pelo processo de compressão de leito. Portanto, adotou-se a peneira com abertura de malha de 420 μm acoplada a um agitador

mecânico (Figura 19 (a) e (b)). Este procedimento de separação de partículas por peneiramento foi realizado no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da COPPE/UFRJ.



(a)



(b)

Figura 19: Peneiramento da amostra fragmentada. (a) Peneira de 420 μ m posicionada em agitador mecânico; (b) Fração passante na peneira de 420 μ m

3.2.5.2. Composição Química por Fluorescência de Raio X (FRX)

As análises de composição química do cimento CPV-ARI, das amostras carbonatadas e não carbonatadas foram realizadas por meio de fluorescência de Raios X (FRX) em um equipamento de modelo EDX-720 da Shimadzu no MicroLab localizado no Laboratório de Estruturas e Materiais Professor Lobo Carneiro (LABEST) da COPPE/UFRJ. Os resultados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Composição química do CPV ARI, das amostras não carbonatadas e carbonatadas por diferentes tempos de exposição

Teores (%)	CPV	ARC	ARC_1h	ARC_2h	ARC_4h	ARC_8h	ARC_16h	ARC_24h
<i>SiO₂</i>	14,31	43,74	50,07	43,45	48,96	45,50	45,08	45,83
<i>CaO</i>	70,40	31,51	27,53	32,12	26,46	29,55	22,54	30,02
<i>Al₂O₃</i>	4,86	14,06	11,84	12,73	14,50	13,61	14,41	12,08
<i>K₂O</i>	0,85	4,37	3,06	4,27	3,35	4,75	5,92	3,29
<i>SO₃</i>	5,19	3,00	2,96	2,35	1,89	3,14	2,53	2,21
<i>Fe₂O₃</i>	3,52	2,48	3,72	3,65	3,91	2,42	4,91	5,25
<i>BaO</i>	0,00	0,63	0,37	0,35	0,00	0,53	0,23	0,16
<i>TiO₂</i>	0,26	0,18	0,19	0,64	0,65	0,20	0,87	0,78
<i>SiO₂</i>	0,42	0,04	0,12	0,18	0,14	0,17	0,19	0,14
<i>Rb₂O</i>	0,00	0,01	0,00	0,05	0,02	0,02	0,04	0,02
<i>MnO</i>	0,11	0,00	0,10	0,08	0,07	0,00	0,09	0,12
<i>CuO</i>	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>ZrO₂</i>	0,00	0,00	0,00	0,04	0,15	0,10	0,10	0,10
<i>Y₂O₃</i>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
<i>ZnO</i>	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
<i>Sc₂O₃</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,03	0,00
<i>ReO₂</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00
<i>Tm₂O₃</i>	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Perda ao Fogo	3,36	10,55	12,28	8,60	8,46	8,09	7,95	8,62

Observa-se, primeiramente, que as amostras apresentam predominância de teores de materiais cimentícios, tais como: SiO_2 , Al_2O_3 e CaO e que os teores diferem de uma amostra para outra o que corrobora para a afirmação que as amostras apresentam diferentes teores de pasta e assim se torna necessário a normalização dos resultados para uma comparação direta entre eles.

Além disso, nota-se a presença de teores elevados de SrO, MnO e Sc_2O_3 . Tais compostos não são comumente encontrados em amostras de materiais cimentícios. Acredita-se que pode ter havido uma contaminação cruzada no processo de obtenção das amostras pela compressão em protótipo de leito de partículas, que por sua vez apresenta fontes metálicas na composição do seu material.

3.2.5.3. Método de quantificação dos produtos hidratados por análise térmica

As análises térmicas diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) das amostras preparadas segundo o procedimento apresentado na seção 3.2.5.1 foram realizadas no equipamento *SDT Q600 TGA/DTA/DSC Simultâneo* da *TA Instruments*® (Figura 20) do Laboratório de Análises Químicas do Núcleo de Materiais e Tecnologias Sustentáveis (NUMATS) da COPPE/UFRJ.

O procedimento e as condições de ensaio são descritos cronologicamente a seguir:

- i. Primeiramente, em torno de 10 mg da amostra são inseridos em um cadinho de platina aberto, que, por sua vez, foi posicionado no interior do equipamento;
- ii. em seguida, a amostra foi submetida a um aquecimento em uma taxa de 10 °C/min, de 23 (\pm 2) °C até 35 (\pm 2) °C, seguida por uma isoterma a 35 °C por 1 hora com o intuito de secar a amostra completamente e eliminar a água não combinada;
- iii. por fim, a amostra foi submetida a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min até alcançar a temperatura de 1000 °C.

Cabe ressaltar que foram realizadas duas campanhas experimentais e todas as análises foram feitas sob uma atmosfera inerte (N₂) com gás de arraste nitrogênio com vazão de 100 mL/min. Não foi possível realizar a análise térmica das matérias primas (cimento e agregado natural)

que foram usadas na produção dos concretos, uma vez que os únicos materiais que tivemos acesso na presente pesquisa foram os agregados reciclados produzidos na campanha experimental da tese de doutorado de AMÁRIO (2019) e RANGEL (2019), os demais materiais utilizados não estavam mais disponíveis.

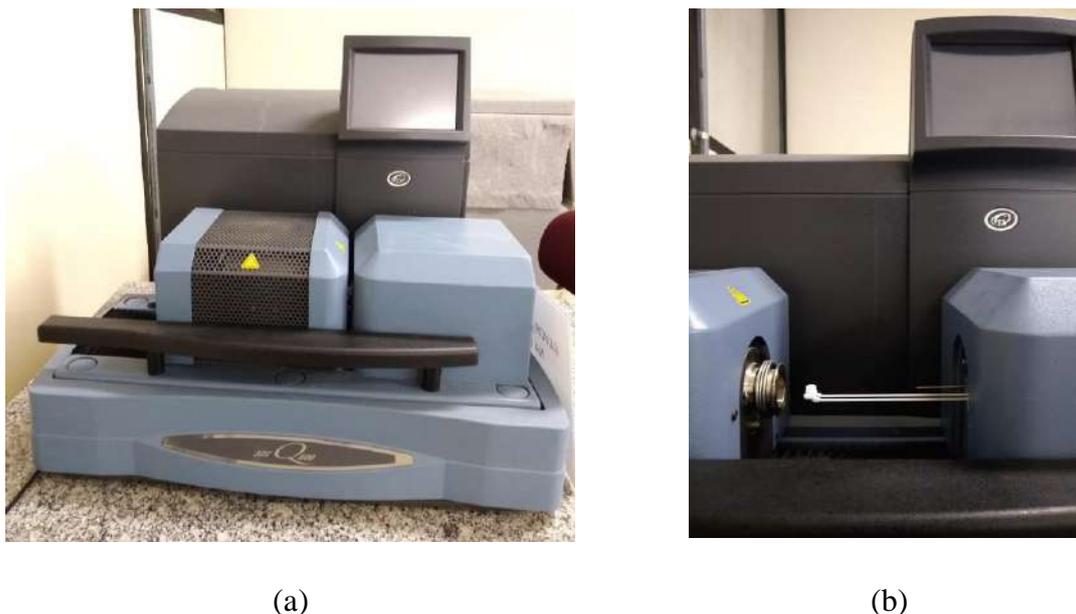


Figura 20: (a) Equipamento de Termogravimetria SDT Q600 da *TA Instruments*®; (b)

Forno Horizontal com amostra suspensa

A Figura 21 apresenta um termograma típico com curva de perda de massa (TG) e derivada da perda de massa (DTG) de uma amostra de pasta de cimento. Na curva TG, observam-se três perdas de massa significativas, que, por sua vez, dão origem a três picos na curva DTG. A primeira perda de massa na curva TG é oriunda da desidratação da etringita (fase AFt), do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e de fases aluminatos. A segunda perda de massa significativa na curva TG se inicia aproximadamente em 390°C e é atribuída à desidratação do hidróxido de cálcio (CH), que resulta em um pico na curva DTG por volta de 420°C. A terceira perda de massa significativa se inicia em torno de 450°C na curva TG e corresponde a um pico na curva DTG por volta de 600°C. Tal perda corresponde à descarbonatação do carbonato de

cálcio (CaCO_3) (TAYLOR, 1997). Com exceção do CH e do CaCO_3 , a perda de massa dos demais compostos hidratados ocorre em faixas de temperatura muito próximas, que se superpõem, dificultando com que os picos possam ser identificados separadamente na análise da curva DTG.

Junior (2014) também quantificou os teores dos produtos de hidratação e carbonatação em matrizes de cimento utilizando os dados da TG e DTG. Segundo o autor pode-se afirmar que:

- (i) entre 50 e 200 °C têm-se a perda de água da decomposição das fases C-S-H e etringita;
- (ii) entre 35 e 450 °C, têm-se a perda de água combinada, incluindo a água perdida da desidroxilação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$;
- (iii) entre 500 e 750 °C, têm-se a perda de CO_2 durante a descarbonatação de CaCO_3 .

Apesar de serem encontradas na bibliografia diversas referências de intervalos de temperatura típicos que ocorre cada fenômeno, no presente estudo, todas as perdas de massa foram obtidas pelas temperaturas de início e fim de cada fenômeno identificadas pelos picos na curva DTG e posteriormente calculadas as perdas de massa na TG, conforme apresentado através das linhas tracejadas no termograma típico da Figura 21. Ou seja, cada amostra foi analisada separadamente, não assumindo um mesmo trecho para todas as amostras.

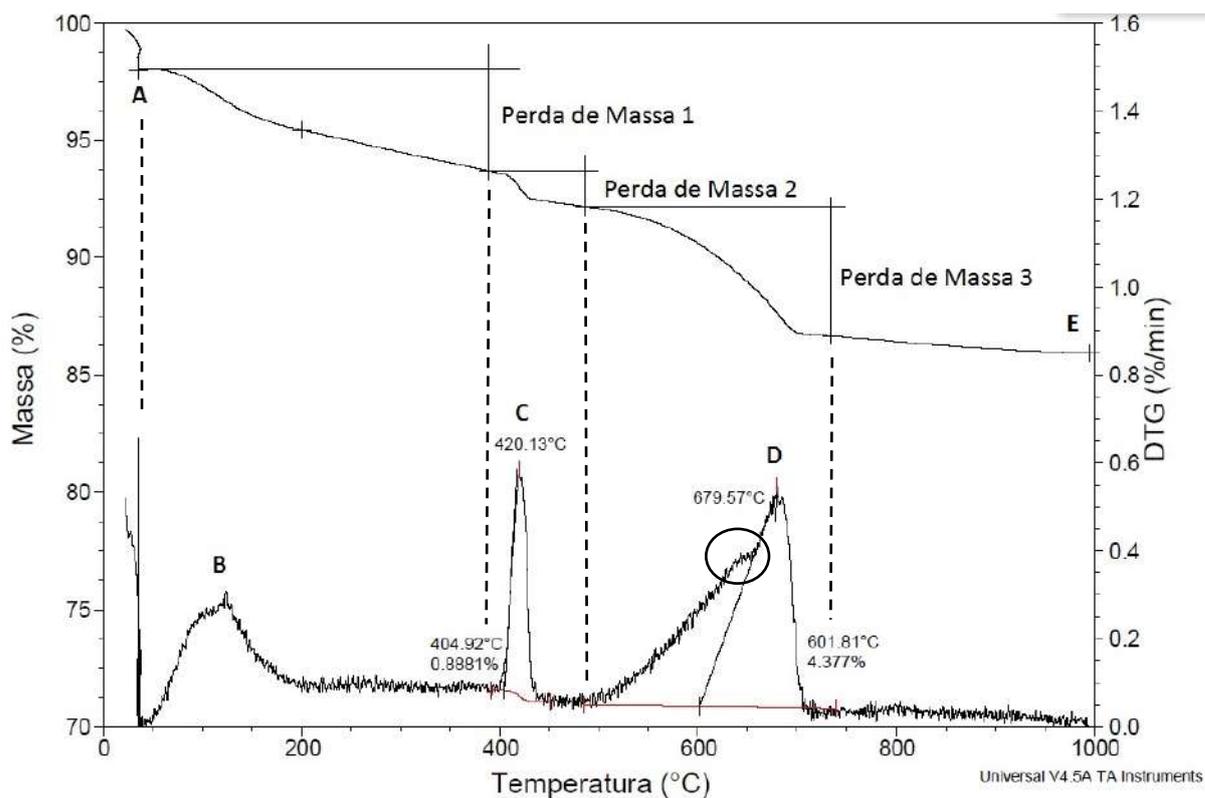
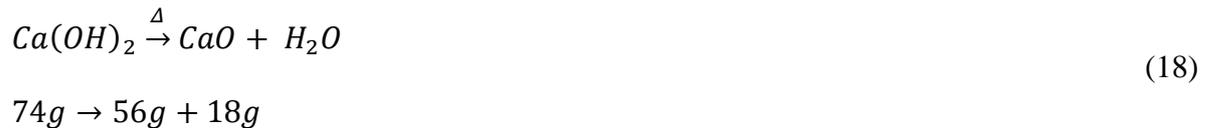


Figura 21: Termograma Típico com identificação das perdas de massas e dos pontos de interesse: A - início do ensaio após isoterma de 35°C; B - Pico da decomposição da etringita e C-S-H; C- pico referente à desidroxilação do $Ca(OH)_2$; D - Pico referente à descarbonatação do $CaCO_3$; E - fim do ensaio

Observa-se no pico de descarbonatação a presença de dois picos referentes a presença de carbonato cristalino (pico D na Figura 21) e amorfo (circulado na Figura 21). As temperaturas de início e fim da desidratação do CH e da descarbonatação do carbonato de cálcio foram obtidas pelos picos na DTG, utilizando o software *TA Instruments Universal Analysis 2000 Version 4.7A*. A perda de massa devido a desidroxilação do CH e a descarbonatação do $CaCO_3$ foram obtidas considerando a perda de massa na curva TG nos intervalos delimitados pelos seus respectivos picos na curva DTG.

Após identificar os pontos de início e fim do pico da desidratação do CH na curva DTG foi possível determinar os pontos correspondentes na curva TG. A referida perda de massa é

calculada pela diferença entre a massa final e inicial na curva TG, o que corresponde a perda de água quimicamente combinada com o CH. Dessa maneira, determinou-se, por estequiometria (apresentada na Equação 19), a partir da quantidade de água perdida no pico em questão (M_{H_2O-CH}), a quantidade de CH (M_{CH-H_2O}) a partir da reação dada pela Equação 18 e dos pesos moleculares a seguir.



$$M_{CH-H_2O} = [M_{H_2O-CH}] \times \left[\frac{74}{18}\right] \tag{19}$$

A fim de obter o teor de gás carbônico perdido foi necessário identificar os pontos de início e fim do pico da descarbonatação do carbonato de cálcio na curva DTG e, posteriormente, determinar os pontos correspondentes na curva TG. A perda de massa calculada pela diferença entre a massa final e inicial em relação trecho em questão na curva TG corresponde a perda de gás carbônico. Em seguida, determinou-se, também por estequiometria (apresentada na Equação 21), a partir de quantidade de gás carbônico perdido ($M_{CO_2-CaCO_3}$), a quantidade de carbonato de cálcio (M_{CaCO_3}) na pasta de acordo com a reação apresentada na Equação 20 e os pesos moleculares.



$$M_{CaCO_3} = [M_{CO_2-CaCO_3}] \times [100/44] \tag{21}$$

Como o objetivo do estudo é avaliar o efeito do da carbonatação acelerada em câmara climática nos agregados reciclados de concreto, os resultados de massa de gás carbônico determinados foram, inicialmente, analisados a partir da Figura 22. Observa-se, de maneira geral, que o tratamento proporcionou sequestro de CO_2 – 16 %, considerando a média dos resultados de

todas as amostras expostas – entretanto, não há uma relação clara com o tempo de exposição submetido.

Atribui-se a esse fato dois pontos particulares: (i) a heterogeneidade do material, que mesmo recoberto com teores elevados de material cimentício, possui agregados naturais graúdos e miúdos em sua composição; e (ii) o processo de obtenção das amostras, que mesmo propondo metodologia de esmagamento e peneiramento dos agregados reciclados a fim de reverter a heterogeneidade do material, não elimina completamente as partículas originais de agregado fragmentado e de areia muito fina que deveriam estar presentes na amostra.

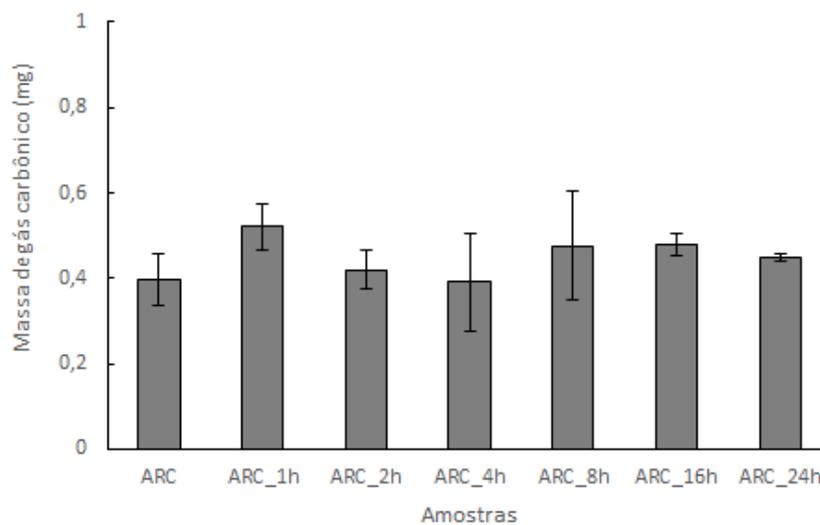


Figura 22: Massa de Gás Carbônico determinadas nas amostras submetidas a diferentes tempos de carbonatação

CAPÍTULO 4

4 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO NAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS

Nos capítulos anteriores foram apresentados os principais motivos para a sugestão do uso do tratamento por carbonatação acelerada como forma de aprimorar as propriedades dos agregados reciclados a serem utilizados em materiais à base de cimento. O primeiro capítulo limitou-se a dar uma introdução ao tema, apresentar a motivação do estudo e como seria estruturada a apresentação do presente documento. No segundo foi apresentada a revisão bibliográfica realizada no tema de resíduos de construção e demolição, carbonatação natural a qual as estruturas de concreto estão expostas e, por fim, abordou-se sobre o uso da carbonatação acelerada em agregados reciclados. No terceiro capítulo foi apresentado de forma minuciosa os materiais e métodos utilizados na campanha experimental e o programa experimental que foi seguido.

O presente capítulo aborda como o tempo de exposição à carbonatação acelerada afeta as propriedades físicas (por exemplo, a capacidade de absorção de água e a massa específica) dos agregados reciclados e, por meio de análise térmica por termogravimetria, determina os produtos formados para *densificação* dos agregados reciclados. Por fim, propõe-se a determinação de um tempo ótimo de carbonatação, que seja capaz de promover melhorias nas propriedades dos agregados reciclados evitando exposições prolongadas em demasia, que geraria mais gasto energético e econômico.

Segundo a literatura, a carbonatação acelerada promove uma redução de capacidade de absorção e aumento de massa específica em virtude da formação de carbonato de cálcio, que por sua vez preenche os poros da pasta de cimento aderida (ZHANG *et al.*, 2015), densificando a microestrutura e aumentando o volume sólido do material (FERNÁNDEZ BERTOS *et al.*,

2004; KASHEF-HAGHIGHI *et al.*, 2015; KOU *et al.*, 2014; MORANDEAU *et al.*, 2014 e ZHANG *et al.*, 2015). De fato, observa-se através da pesagem do material seco em estufa antes e após a carbonatação acelerada que a massa das amostras aumentam após o tratamento conforme apresentado na Figura 23, entretanto esta informação não é suficiente para a conclusão dos resultados, sendo necessário uma investigação mais detalhada dos resultados de absorção e massa específica para medir de forma eficaz o comportamento dos mesmos.

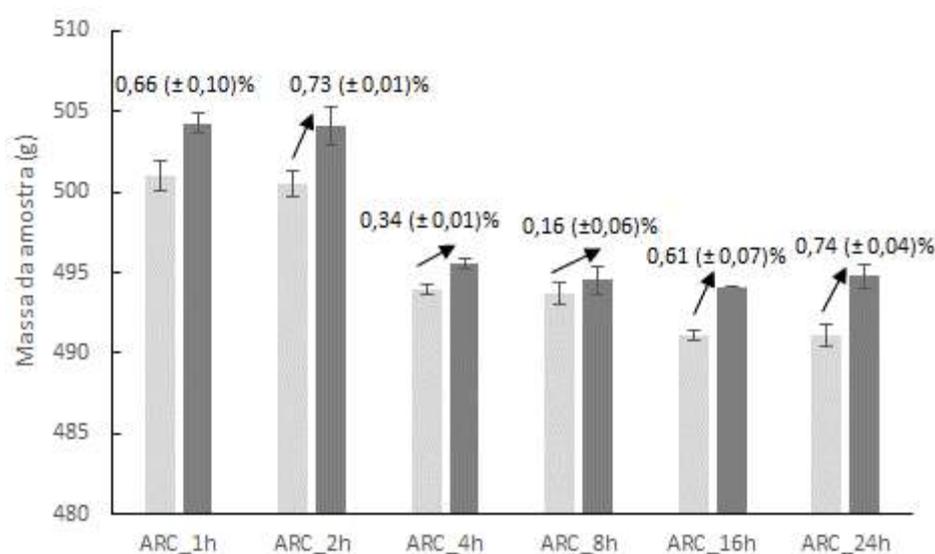


Figura 23: Incremento na massa das amostras após tratamento por carbonatação acelerada em diferentes tempos de exposição

4.1. Influência do tempo de carbonatação acelerada nas propriedades físicas dos agregados reciclados

A Tabela 9 apresenta os resultados de absorção de água e massa específica dos agregados reciclados antes e após a exposição a carbonatação. Para fins de demonstração do elevado teor de absorção de água da amostra de agregado reciclado – ainda sem ser submetido à carbonatação acelerada – em relação ao agregado natural (brita 1, neste caso), ressalta-se seu valor, aproximadamente, 18 vezes maior, conforme apresentado na Tabela 7. Isso se deve em virtude da elevada porosidade promovida pela pasta de cimento aderida ao agregado reciclado.

Após serem submetidas à carbonatação por diferentes períodos de exposição, apesar das amostras recicladas manterem índices de absorção entre 5 e 8 % maiores do que o agregado natural, observou-se claramente uma redução significativa dos teores de absorção de todas as amostras carbonatadas em comparação ao agregado reciclado de referência.

Tabela 9: Propriedades físicas dos agregados reciclados carbonatados e não carbonatados*

Amostra	Absorção (%)	Absorção Relativa (%)	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Específica Relativa (g/cm ³)
ARC	7,73 (± 0,07)		2,27 (± 0,01)	
ARC_1h	6,05 (± 0,06)	- 21,82 (± 1,46)	2,33 (± 0,01)	+ 2,73 (± 0,78)
ARC_2h	5,85 (± 0,13)	- 24,43 (± 0,98)	2,33 (± 0,02)	+ 2,85 (± 1,28)
ARC_4h	6,49 (± 0,06)	- 16,05 (± 1,49)	2,34 (± 0,03)	+ 3,02 (± 2,45)
ARC_8h	6,48 (± 0,01)	- 16,27 (± 0,67)	2,31 (± 0,02)	+ 1,85 (± 0,18)
ARC_16h	6,10 (± 0,20)	- 21,18 (± 1,88)	2,28 (± 0,02)	+ 0,57 (± 0,60)
ARC_24h	6,30 (± 0,10)	- 18,57 (± 0,56)	2,29 (± 0,01)	+ 0,83 (± 1,07)

* Valores de desvio padrão estão apresentados entre parênteses.

Em particular, após uma hora de exposição em câmara de carbonatação acelerada, observou-se que os agregados reciclados obtiveram sua capacidade de absorção reduzida 21,8% ao ser comparado com o agregado reciclado sem ser submetido ao tratamento que, por sua vez, já absorve 7,73% de água em 24 horas.

Após os agregados reciclados permanecerem mais uma hora na câmara de carbonatação, isto é, duas horas de exposição, observou-se redução significativa de 24,4% na capacidade de absorção de água em relação à amostra não carbonatada. Entretanto, em relação à amostra submetida a uma hora de exposição, a redução no resultado de absorção não foi expressiva (apenas 3%).

Observou-se, a partir de quatro horas, que o aumento do tempo de exposição não resultou em benefício adicional ao agregado reciclado no que tange a redução de sua capacidade de

absorção, uma vez que o resultado não apresentou mudança expressiva em relação aos apresentados pelas amostras avaliadas nas duas primeiras horas, apenas em relação à amostra não carbonatada, com uma redução de capacidade de absorção de 16%. Da mesma maneira, a amostra submetida a carbonatação acelerada por oito horas apresentou valores semelhantes as amostras recicladas carbonatadas por quatro horas.

Assim como o resultado das amostras expostas por quatro e oito horas, a amostra exposta por dezesseis horas também não apresentou diferença expressiva de capacidade de absorção em relação às amostras expostas pelas demais horas, apenas em relação à amostra não carbonatada com uma redução da capacidade de absorção de 21%.

Por fim, a amostra submetida por vinte e quatro horas de exposição reduziu em 18,6% a capacidade de absorção de água em relação a amostra não carbonatada, apresentando resultados similares aos obtidos pelas amostras submetidas em todos os demais tempos de exposição.

De maneira geral, a partir da avaliação individualizada dos resultados experimentais expostos acima em cada tempo de exposição a carbonatação acelerada, verificou-se que a capacidade de absorção de água dos agregados reciclados submetidos a este procedimento foi reduzida em média em 20 (± 3) % em comparação ao agregado reciclado antes de ser submetido ao tratamento. Este comportamento foi claramente observado para todos os tempos de carbonatação, conforme apresentado na Figura 24, em que a partir de duas horas de exposição, evidencia-se um platô de resultados de absorção similares até 24 horas de exposição ao gás carbônico.

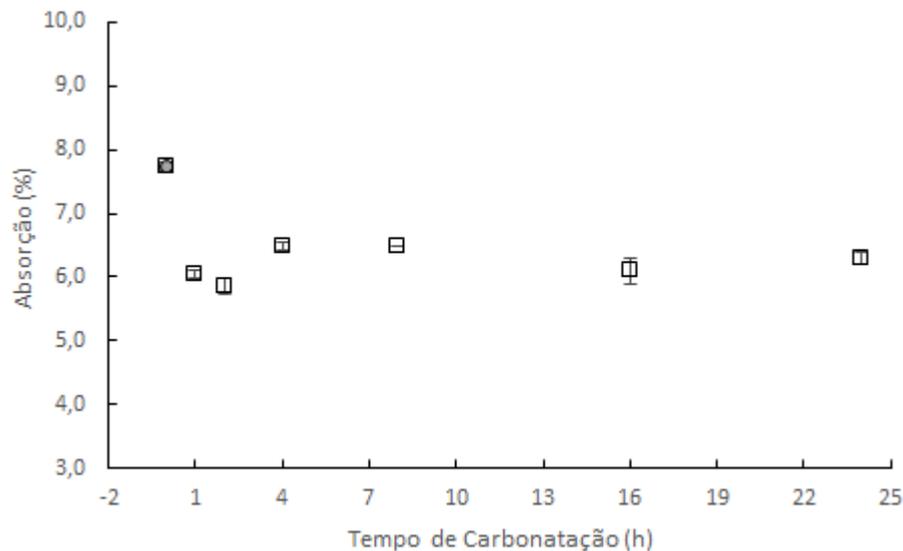


Figura 24: Absorção de água dos agregados em função do tempo de carbonatação

Observa-se pelos resultados apresentados na Tabela 9 que o agregado reciclado – ainda sem ser submetido à carbonatação acelerada – apresenta massa específica cerca de $0,4 \text{ g/cm}^3$ menor que o agregado natural, o que corresponde cerca de 15%, resultado este também em virtude da elevada porosidade promovida pela pasta de cimento aderida ao agregado reciclado.

Após serem submetidas à carbonatação por diferentes períodos de exposição, as amostras recicladas em geral mantiveram massa específicas menores quando comparados ao agregado natural (entre 12 e 15% menor). Entretanto, o aumento dos valores médios de massa específica de todas as amostras carbonatadas em comparação ao agregado reciclado de referência foi evidente.

Após uma hora de exposição em câmara de carbonatação acelerada, foi possível observar que os agregados reciclados tiveram um aumento pouco expressivo no resultado de massa específica; em torno de 2,7%.

Após os agregados reciclados permanecerem mais uma hora na câmara de carbonatação, isto é, duas horas de exposição, observou-se um aumento da ordem de 3% em sua massa específica em relação à amostra não carbonatada. Entretanto, em relação à amostra submetida a uma hora de exposição não foi observado diferença significativa.

A partir de quatro horas de exposição, a massa específica do agregado reciclado não apresentou diferença significativa comparada aos resultados apresentados pelas amostras avaliadas nas duas primeiras horas.

Da mesma forma, o agregado reciclado após ser submetido a oito horas de exposição ao tratamento por carbonatação acelerada apresentou massa específica cerca de 2% maior que o agregado reciclado não carbonatado. No entanto, o resultado é semelhante ao das amostras recicladas carbonatadas por uma, duas e quatro horas.

O agregado reciclado submetido a dezesseis horas de exposição não apresentou diferença significativa de massa específica em relação ao agregado reciclado não carbonatado e nem em relação aos resultados obtidos para os agregados que foram expostos à carbonatação acelerada por uma, duas, quatro e oito horas.

Por fim, o agregado reciclado exposto por vinte e quatro horas também não apresentou diferença significativa de massa específica em relação ao agregado reciclado não carbonatado e nem em relação aos resultados de massa específica obtidos para os agregados expostos à carbonatação acelerada por uma, duas, quatro, oito e dezesseis horas.

Verificou-se, a partir da avaliação individualizada dos resultados experimentais expostos acima em cada tempo de exposição a carbonatação acelerada que a massa específica dos agregados reciclados submetidos a este procedimento não apresentaram diferença significativa pelo método estatístico ANOVA com variação de 5% em comparação ao agregado reciclado que não foi submetido ao tratamento. Entretanto, observa-se uma tendência em todas as amostras após carbonatação apresentando resultados de massa específica em média 2% maiores do que no agregado reciclado antes de ser submetido ao tratamento. Tal comportamento foi observado para todos os tempos de carbonatação, conforme apresentado na Figura 25.

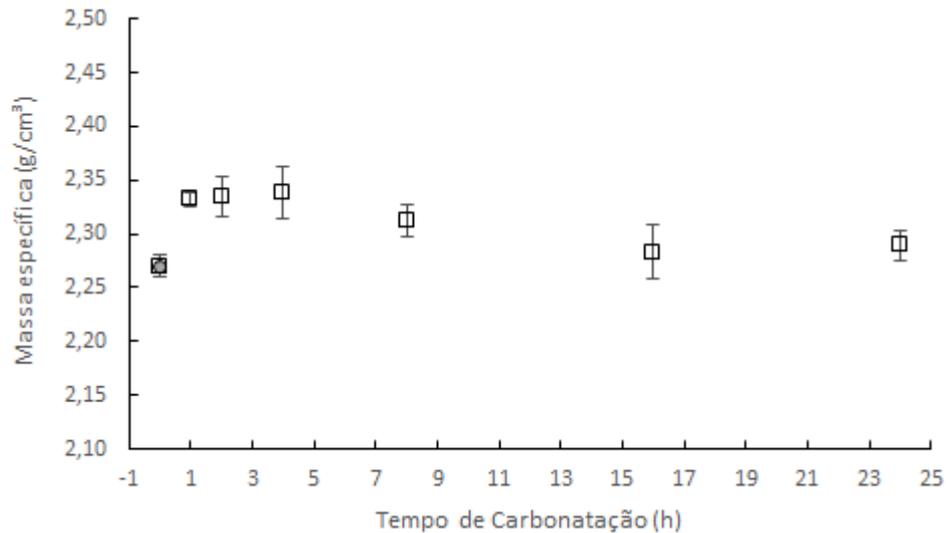


Figura 25: Massa Específica dos agregados em função do tempo de carbonatação

Observa-se que o ganho de massa específica não foi tão significativo quanto a redução de absorção de água, uma vez que o tratamento deve estar proporcionando, de fato, um refinamento de poros, dificultando a permeabilidade em um processo de “colmatação”.

A partir dos resultados apresentados anteriormente, concluiu-se que o agregado reciclado - sem ser submetido ao tratamento por carbonatação acelerada – apresentou capacidade de absorção cerca de 18 vezes maior que o agregado natural (brita 1 natural) e massa específica cerca de 15% menor que o agregado natural.

Em síntese, comparando todos os resultados antes e após o tratamento com CO_2 , observou-se, em uma média entre todos os tempos de exposição, que houve redução de cerca de 20% de capacidade de absorção e aumento de 2% de massa específica, conforme comportamento ilustrado nas Figuras 24 e 25, respectivamente.

4.2. Determinação dos produtos formados para densificação dos agregados

A Figura 26 apresenta as curvas de perda de massa (TGA) obtidas do ensaio de termogravimetria de amostras de agregado reciclado não carbonatadas e amostras de agregado reciclado carbonatadas por diferentes tempos de exposição. Os resultados são apresentados normalizando as massas das curvas (isto é, transformadas em 100%) após serem submetidas a

isoterma de 35°C. Observa-se que as curvas obtidas da TGA apresentaram perdas de massa típicas, ou seja, quando submetidas a certo incremento de temperatura, apresentaram perdas de massas de produtos oriundos de reações químicas de hidratação e carbonatação dos materiais cimentícios em intervalos de temperatura característicos (TAYLOR, 1997).

A partir da análise de todas as curvas de TGA, tanto das amostras carbonatadas como não carbonatadas, foram observadas as perdas de massa características nos mesmos intervalos de temperatura, entretanto, a análise isolada das curvas não se apresentou como solução suficiente para a interpretação das mudanças proporcionadas pelo tratamento por carbonatação acelerada nas amostras de agregados reciclados. Ao comparar a amostra submetida a uma hora de carbonatação e a amostra não carbonatada, concluiu-se que este período proporcionou sequestro de gás carbônico, uma vez que, a perda de massa do pico de descarbonatação foi maior na amostra submetida a uma hora de carbonatação. Em contrapartida, para os demais tempos de carbonatação, analisando isoladamente as curvas apresentadas, não foi possível observar alguma tendência (lógica) de comportamento das amostras em função do tempo de exposição, já que as amostras apresentaram perdas de massa no pico da descarbonatação menores que a da amostra de referência.

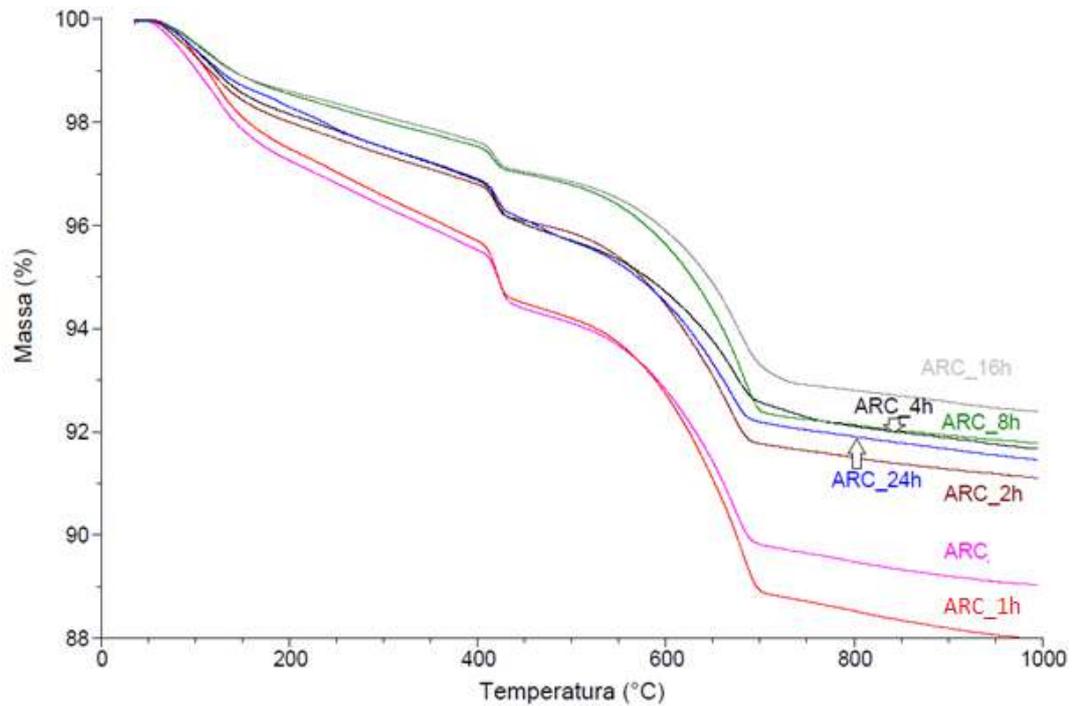


Figura 26: Curvas de perda de massa (TGA) das amostras de agregados reciclados antes e após carbonatação acelerada

A Figura 27 apresenta uma curva DTG característica da amostra de agregado reciclado. Foi realizado o método de deconvolução pelo *software Fityk* para identificação dos picos de descarboxilação do carbonato de cálcio amorfo e cristalino e quantificação das respectivas frações (WOJDYR, 2010). Em vermelho, destaca-se a soma do modelo matemático das deconvoluções. Segundo DWECK *et al.* (2000), na análise termogravimétrica, o carbonato amorfo aparece antes da descarboxilação do carbonato cristalino.

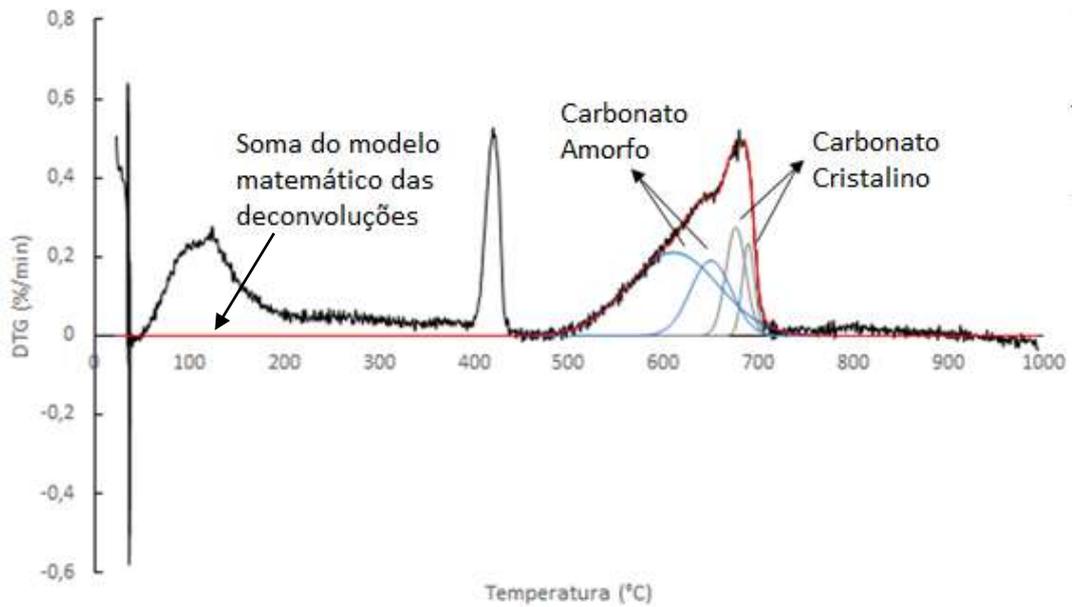


Figura 27: Curva DTG característica de amostra de agregados reciclados após carbonatação acelerada com identificação dos picos do carbonato de cálcio amorfo e cristalino

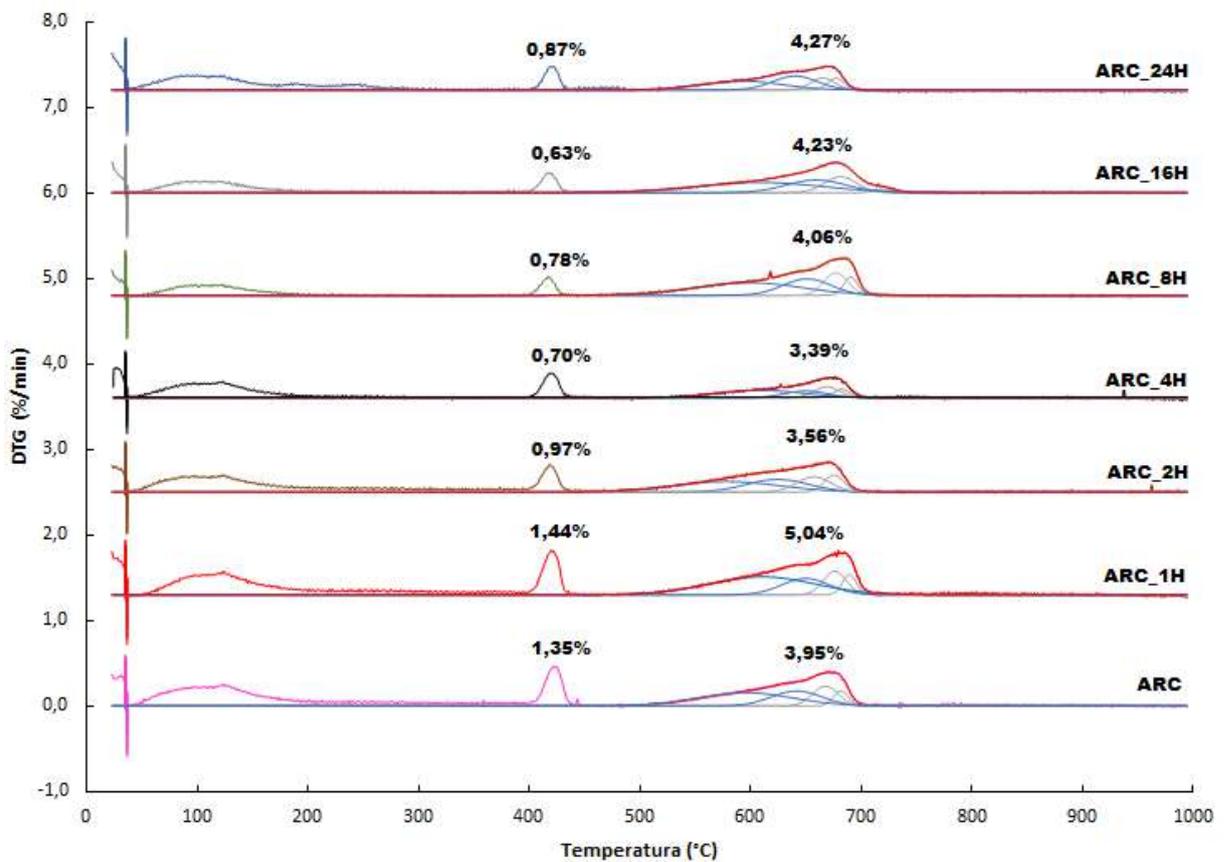


Figura 28: Curvas DTG das amostras de agregados reciclados antes a após carbonatação acelerada

Na Figura 28 são apresentadas as curvas DTG obtidas para todas as amostras de agregado reciclado (isto é, não carbonatadas e carbonatadas por diferentes tempos de exposição). Preliminarmente, destaca-se em todas as amostras o primeiro pico decorrente da perda de água livre durante a isoterma a 35°C e um segundo pico, em aproximadamente 100°C, atribuído a perda de água combinada ao longo da desidratação da etringita, que por sua vez ficou sobreposto ao pico da desidratação do C-S-H que ocorreu à uma temperatura de aproximadamente 100 °C. Entre 400 e 500 °C, observa-se o pico correspondente a desidroxilação do CH e, em aproximadamente 650 °C, o pico correspondente à descarbonatação do CaCO₃. Todos os picos apresentados anteriormente estão de acordo com os encontrados na literatura (TAYLOR, 1997).

Para cada uma das amostras apresentadas na Figura 28, foi realizado o método de deconvolução no pico da descarbonatação do carbonato de cálcio para a obtenção da fração de carbonato amorfo e cristalino, gerando as curvas gaussianas. Em vermelho são apresentadas as curvas referentes as somas dos modelos matemáticos das deconvoluções.

Os teores de carbonato de cálcio amorfo e cristalino de cada amostra, apresentados na Tabela 10, foram obtidos por meio do somatório da área sob as respectivas gaussianas.

Tabela 10: Teores de carbonato de cálcio amorfo e cristalino por amostra

Amostras	Carbonato Amorfo (%)	Carbonato Cristalino (%)	Cristalino/Amorfo (%)
ARC	25,19	74,81	33,67
ARC_1h	22,69	77,31	29,34
ARC_2h	33,58	66,42	50,55
ARC_4h	27,88	72,12	38,65
ARC_8h	24,48	75,52	32,41
ARC_16h	23,32	76,68	30,42
ARC_24h	20,66	79,34	26,03

Observa-se claramente que os teores de carbonato de cálcio amorfo e cristalino variam ao longo das amostras, conforme pode ser notado na Figura 29. As amostras submetidas a pouco tempo de exposição à carbonatação acelerada (até 2h) apresentaram aumento da quantidade de carbonato cristalino, enquanto com o aumento do tempo de carbonatação observa-se uma tendência de formação de carbonato amorfo.

Na Figura 30 é apresentado como a relação entre o teor de carbonato de cálcio cristalino e amorfo se comporta com o aumento do tempo de exposição à carbonatação acelerada. Nota-se que a partir de 2h de exposição há uma tendência de diminuição do teor de carbonato cristalino e formação de amorfo, o que do ponto de vista de resistência mecânica do material seria prejudicial, uma vez que a formação de cristalino proporciona melhorias nesta propriedade. O carbonato amorfo tem maior solubilidade do que na forma cristalina (BREČEVIĀ; NIELSEN, 1989). O acesso à água ao carbonato amorfo pode criar frações supersaturadas. Essa supersaturação faz com que o pH aumente (ZUKOWSKI, 2017).

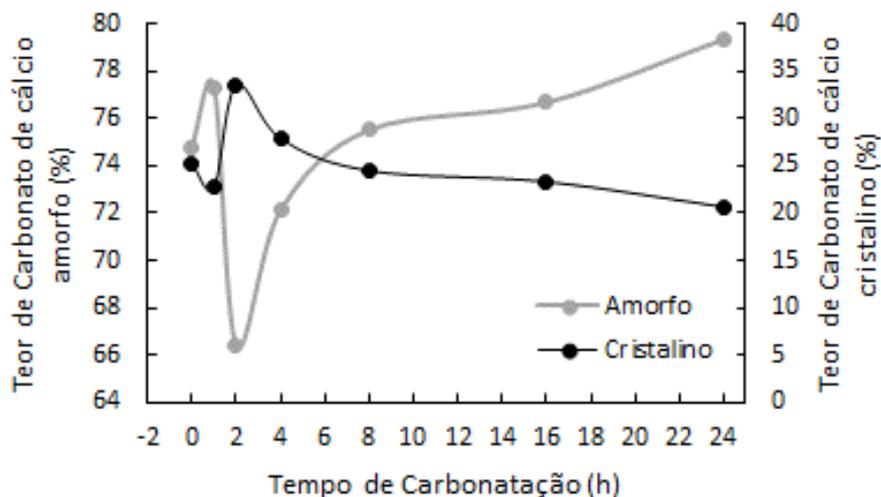


Figura 29: Teores de carbonato de cálcio amorfo e cristalino nas amostras de agregados reciclados antes a após carbonatação acelerada

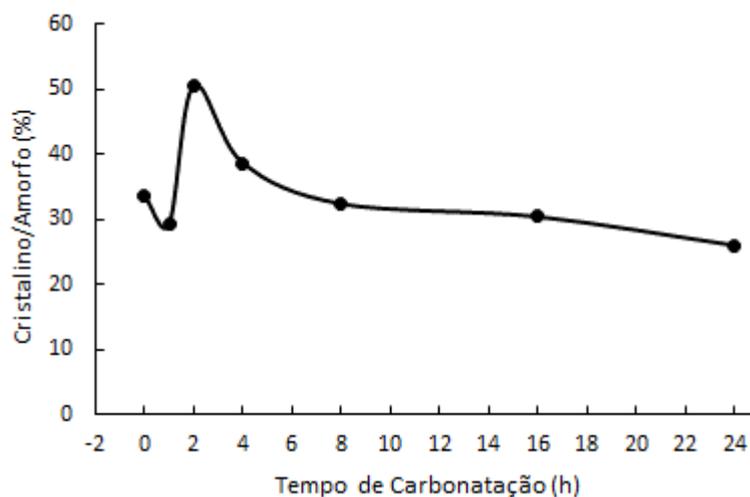
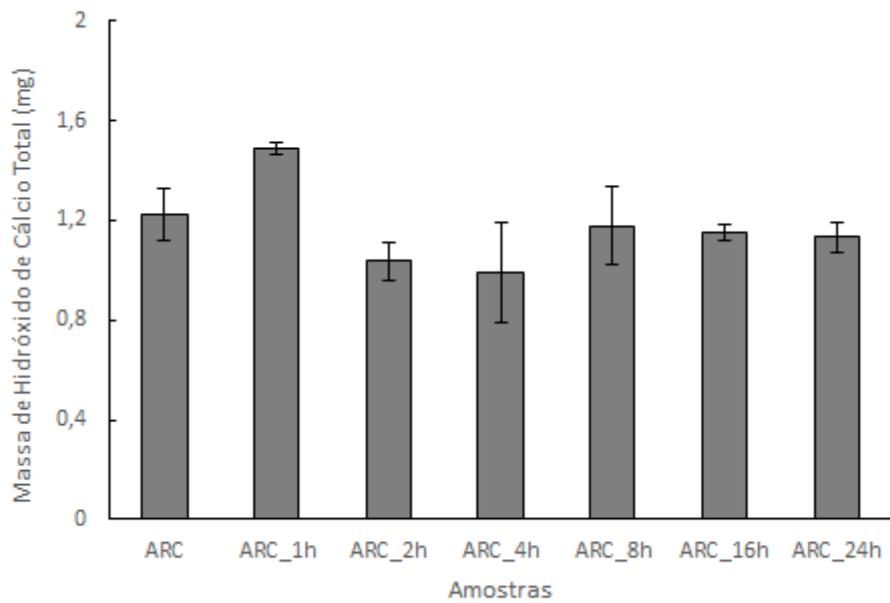


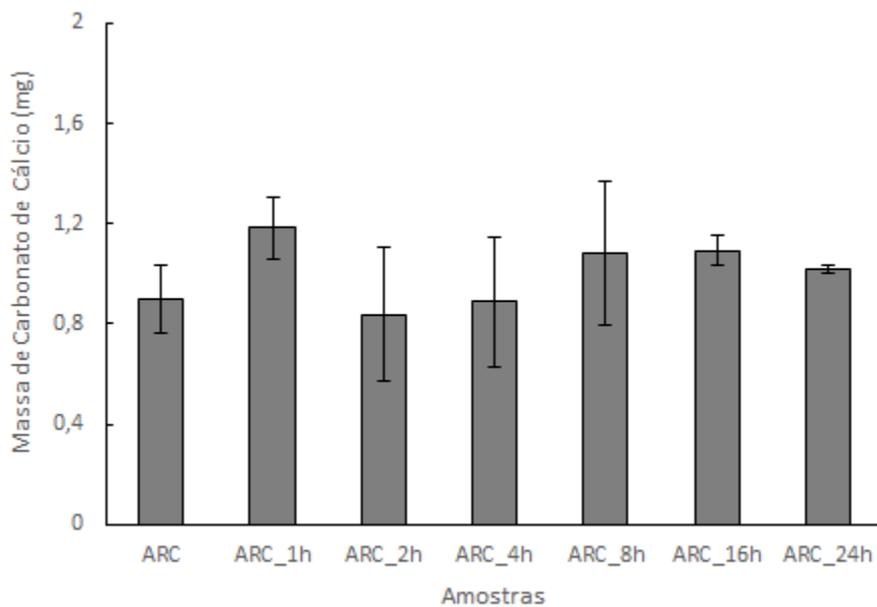
Figura 30: Relação dos teores de carbonato de cálcio amorfo e cristalino por tempo de exposição à carbonatação acelerada

A partir dos picos de desidroxilação do hidróxido de cálcio da Figura 28, observou-se que o teor de hidróxido de cálcio é variável em todas as amostras, o que é ratificado pela Figura 31, que apresenta quantitativamente a massa de hidróxido de cálcio total (obtida pela Equação 22) presente em cada amostra. Este fato isolado não se apresentou como um problema metodológico e, além disso, não seria esperado que todas as amostras tivessem o mesmo teor absoluto de hidróxido, uma vez que, era esperado o consumo de CH na reação de carbonatação proposta

pelo tratamento em questão. O que notou-se, de fato, foi que não seria possível analisar o efeito da carbonatação apenas pelos teores de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio obtidos pelas curvas de DTG (Figura 28), uma vez que amostras que apresentaram maiores teores de CaCO_3 apresentavam também maiores teores de CH total (Figura 31) não associados ao tempo de carbonatação, mas sim por possuírem mais hidróxido de cálcio total disponível para carbonatar. Portanto, a partir desta análise em particular, foi possível identificar alguns pressupostos: (i) ficou evidenciado que as amostras apresentaram quantidades distintas de pasta de cimento em sua composição, provavelmente, em função da metodologia de obtenção das amostras conforme discutido preliminarmente na subseção 3.2.5.1 (ii) conseqüentemente, as diferenças de teores de material cimentício dificultam, em princípio, as análises acerca da eficácia do tratamento no que diz respeito ao tempo de tratamento e; (iii) por fim, para que avaliações qualitativas e quantitativas sejam realizadas com precisão e possam representar o comportamento relacionado as possibilidades de sequestro de CO_2 das amostras carbonatadas, é necessário eliminar a variabilidade de material de origem cimentícia, em questão.



(a)



(b)

Figura 31: Massa de Hidróxido de Cálcio Total (a) e de Carbonato de Cálcio (b) determinadas nas amostras submetidas a diferentes tempos de carbonatação

No contexto apresentado, a fim de estabelecer um cenário onde os resultados das amostras ensaiadas considerem apenas os teores de material cimentício singulares de cada amostra,

optou-se por normalizar as determinações pelo teor de hidróxido de cálcio total de cada amostra conforme apresentado a seguir.

Vale ressaltar que o cimento CPV-ARI utilizado na confecção dos concretos apresenta adição de calcário (aproximadamente 90% de carbonato de cálcio), entretanto não foi possível realizar a análise térmica para a quantificação do teor de carbonato de cálcio pela indisponibilidade de material, conforme já mencionado na seção 3.2.5.3. Além disso, é sabido que o C-S-H também sofre carbonatação e proporciona a formação de carbonato de cálcio, mas esta parcela de contribuição não foi considerada. Assumimos a hipótese de todo carbonato de cálcio ter sido gerado pela carbonatação do CH por ser a fração em maior disponibilidade na pasta e com isso mais suscetível a ser carbonatada, mas vale mencionar que, de fato, existem as contribuições do C-S-H e do calcário presente no cimento de origem.

Considera-se como massa de hidróxido total (M_{CH-TT}) todo o hidróxido de cálcio disponível que, por sua vez, apresenta potencial para carbonatar na presença de CO_2 . Em outras palavras, conforme apresentado na Equação 22, é a soma da massa de $Ca(OH)_2$ obtida por estequiometria a partir da massa de água perdida na desidroxilação do hidróxido de cálcio (M_{CH-H_2O}) – a parcela que não reagiu com o dióxido de carbono (apresentada na Equação 19) – associada a massa de hidróxido de cálcio que reagiu e formou o carbonato de cálcio (M_{CH-CO_2}).

$$M_{CH-TT} = M_{CH-H_2O} + M_{CH-CO_2} \quad (22)$$

Onde a primeira parcela de contribuição é conhecida pelo teor de hidróxido de cálcio obtido no pico de desidroxilação do hidróxido de cálcio (M_{H_2O-CH}), conforme apresentado anteriormente na Equação 19.

E, a segunda parcela é obtida, por estequiometria, a partir do teor de gás carbônico perdido no pico de descarbonatação do carbonato de cálcio ($M_{CO_2-CaCO_3}$), conforme Equação 23:

$$M_{CH-CO_2} = [M_{CO_2-CaCO_3}] \times \left[\frac{74}{44} \right] \quad (23)$$

Por fim, o teor de gás carbônico pode ser normalizado pela determinação do teor de hidróxido de cálcio (M_{CO_2}/M_{CH-TT}) de cada amostra e, dessa maneira, os resultados são analisados quantitativamente excluindo as diferentes quantidades de pasta de cimento de cada amostra como variável e considerando apenas o potencial de carbonatação de cada tempo de exposição em relação a amostra de agregado reciclado de concreto que não foi exposto (ver Tabela 12).

Em complemento, os dados relativos aos teores de massa de água perdida no pico de desidroxilação do hidróxido de cálcio (M_{H_2O-CH}), de massa de gás carbônico perdida na descarbonatação do carbonato de cálcio ($M_{CO_2-CaCO_3}$), de carbonato de cálcio total (M_{CaCO_3-TT}) e de hidróxido de cálcio total (M_{CH-TT}) obtidos pelas análises do ensaio de termogravimetria são apresentadas na Tabela 11. Assim como já relatado anteriormente, por meio dos resultados apresentados na Tabela 11 também é notória a variabilidade dos teores de hidróxido de cálcio entre as amostras.

Observa-se que as amostras submetidas a carbonatação acelerada por uma hora apresentaram um aumento de 8% de massa de gás carbônico quando comparada à amostra que não foi submetida a nenhum tratamento.

Da mesma maneira, as amostras submetidas a duas horas de exposição apresentaram aumento de massa de gás carbônico de cerca de 25% em relação à amostra não submetida a nenhum tratamento e 16% em relação à amostra exposta por apenas uma hora. O comportamento se manteve o mesmo para as amostras submetidas a mais duas e seis horas de exposição, totalizando quatro e oito horas de tratamento, não apresentando diferença significativa de massa de gás carbônico em relação à amostra submetida por apenas duas horas.

Permanecendo por mais oito horas em tratamento, totalizando 16 horas de exposição, a amostra apresentou massa de gás carbônico cerca de 29% maior do que a amostra que não foi submetida

a nenhum tratamento, 19% maior do que a amostra exposta a uma hora e não apresentou diferenças significativas em relação às amostras expostas por duas, quatro e oito horas. Por fim, a amostra submetida a 24 horas de tratamento apresentou resultados similares aos das amostras que ficaram expostas por apenas duas e quatro horas.

Tabela 11: Teores (em %) obtidos pelo ensaio de termogravimetria*

Amostras	M_{CH_TT}	$M_{H_2O_CH}$	$M_{CaCO_3_TT}$	$M_{CO_2_CaCO_3}$
ARC	12,18 ± (1,05)	1,35 ± (0,01)	8,97 ± (1,33)	3,95 ± (0,59)
ARC_1h	14,38 ± (0,59)	1,44 ± (0,19)	11,45 ± (1,86)	5,04 ± (0,82)
ARC_2h	9,97 ± (0,73)	0,97 ± (0,28)	8,08 ± (2,56)	3,56 ± (1,12)
ARC_4h	8,58 ± (1,51)	0,70 ± (0,01)	7,69 ± (2,04)	3,39 ± (0,90)
ARC_8h	10,03 ± (1,35)	0,78 ± (0,11)	9,22 ± (2,46)	4,06 ± (1,08)
ARC_16h	10,15 ± (0,76)	0,63 ± (0,04)	9,60 ± (0,08)	4,23 ± (0,04)
ARC_24h	10,77 ± (0,60)	0,87 ± (0,18)	9,69 ± (0,18)	4,27 ± (0,08)

* Valores de desvio padrão estão apresentados entre parênteses

Tabela 12: Sequestro de gás carbônico normalizado e ganho relativo por tempo de exposição*

Amostras	M_{CO_2} / M_{CH_TT} (%)	Ganho Relativo (%)
ARC	32,38 ± (2,05)	-
ARC_1h	34,94 ± (4,26)	7,90 ± (1,56)
ARC_2h	40,50 ± (8,70)	25,08 ± (0,01)
ARC_4h	39,51 ± (3,58)	22,02 ± (3,14)
ARC_8h	40,44 ± (5,38)	24,89 ± (0,48)
ARC_16h	41,70 ± (0,88)	28,78 ± (0,79)
ARC_24h	39,60 ± (2,92)	22,30 ± (2,39)

* Valores de desvio padrão estão apresentados entre parênteses

A Figura 32 apresenta os resultados de massa de gás carbônico normalizada pelo teor de hidróxido de cálcio total das amostras em função do tempo de carbonatação acelerada ao qual foram submetidas. De maneira geral, ao observar os resultados apresentados para todos os tempos de exposição em comparação à amostra de agregado reciclado que não foi submetida a nenhum tratamento, conclui-se que com apenas uma hora de tratamento a amostra já teve capacidade de sequestrar cerca de 8% de gás carbônico e formar produtos de carbonatação. Portanto, esperava-se que as demais amostras submetidas aos tempos de exposição mais prolongados mantivessem ao menos a mesma capacidade. Esse comportamento, de fato, se manteve como pode ser observado na Figura 32.

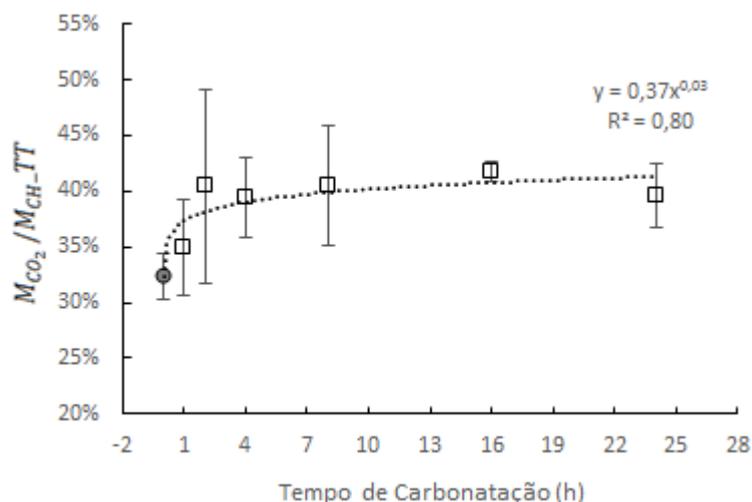


Figura 32: Massa de gás carbônico normalizada pelo teor de hidróxido de cálcio total em função do tempo de carbonatação

Em geral, observa-se, a partir de 2 horas de exposição à carbonatação acelerada, em comparação ao resultado da amostra não submetida ao tratamento, uma espécie de patamar de resultados de sequestro de gás carbônico (de 22% em média) até 24 horas. Essa resposta conduz a suposição de que a partir de 2 horas, nas condições de exposição de temperatura de $23 (\pm 2) ^\circ\text{C}$, umidade de $60 (\pm 5) \%$ e concentração de CO_2 de $20 (\pm 2) \%$, adotadas neste estudo, ocorre a formação de uma camada apassivadora de penetração de CO_2 pela presença do carbonato de cálcio, que por sua vez não é muito solúvel em água. Como a reação de carbonatação só acontece em meio

aquoso, e neste caso, a penetração do gás para dentro da matriz está sendo impedida pela formação desta camada de carbonato até 2h, o que prejudica o avanço da carbonatação para o interior da matriz e, conseqüentemente, o aumento do sequestro de gás para tempos mais longos de exposição ao tratamento.

4.3. Determinação do tempo ótimo de exposição

A partir da análise dos resultados obtidos nos ensaios de massa específica, absorção e termogravimetria, pretende-se nesta seção, promover uma breve discussão estabelecendo algumas correlações capazes de determinar um tempo mínimo ótimo de exposição ao tratamento por carbonatação acelerada em câmara climática.

Os resultados obtidos a partir de ensaios de absorção de água, apresentados na seção 4.1, demonstraram que com apenas uma hora de exposição foi possível reduzir, em média, cerca de 20% da capacidade de absorção de água dos agregados reciclados submetidos ao tratamento em comparação aos agregados reciclados de referência. Além disso, para as amostras submetidas por duas horas ou mais a redução pode chegar a 24 %. Este comportamento foi claramente observado a partir de um patamar de respostas entre uma e 24 horas.

Na Figura 33 propõe-se estabelecer uma correlação entre o ganho de massa proporcionado pela carbonatação acelerada (obtido pela diferença de massa das amostras antes e após o tratamento apresentado na Figura 23) e os resultados de perda de absorção relativa de água de cada amostra, apresentada na Tabela 9. Observa-se uma correlação alta entre os resultados ($R^2 = 0,73$) conforme já discutido na Seção 4.1.

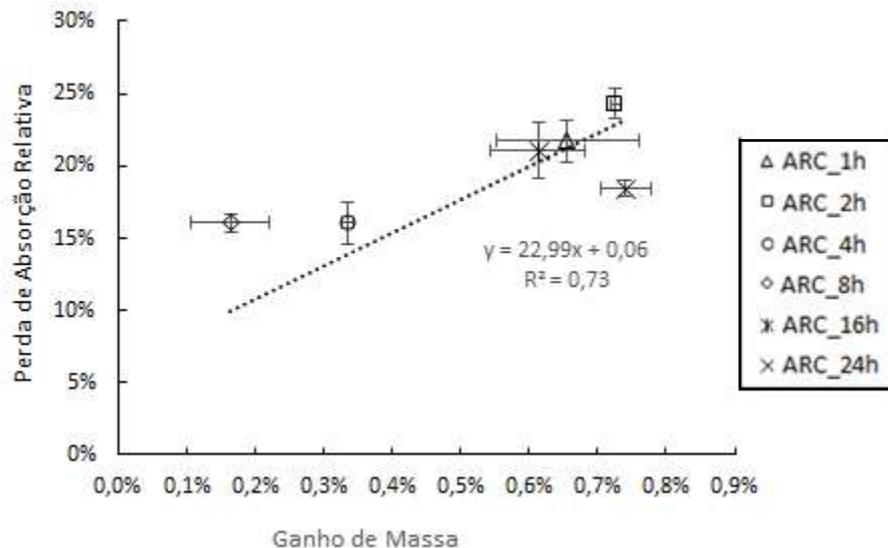


Figura 33: Correlação entre perda de absorção relativa e ganho de massa das amostras carbonatadas e não carbonatadas

Na Figura 34 propõe-se estabelecer uma correlação entre os resultados de massa de gás carbônico normalizada e absorção de água para as amostras carbonatadas ou não. Observa-se, assim como no resultado isolado de absorção de água, que com apenas uma hora de tratamento foi possível modificar o comportamento do material. Observa-se, ainda, uma concentração dos resultados referentes as amostras carbonatadas em destaque à amostra não carbonatada. Há uma relação direta entre o aumento dos produtos de carbonatação e a diminuição da absorção, provocando melhorias nas propriedades físicas do agregado. No entanto, os teores de produtos de carbonatação se mantem, aproximadamente, constantes a partir de duas horas de exposição, não sendo capaz de promover grandes reduções na capacidade de absorção dos agregados para além dos valores em torno de 24%. Os resultados são consistentes em apontar claramente a redução da capacidade de absorção dos agregados, que se mantiveram similares mesmo com determinado aumento dos produtos oriundos das reações de carbonatação.

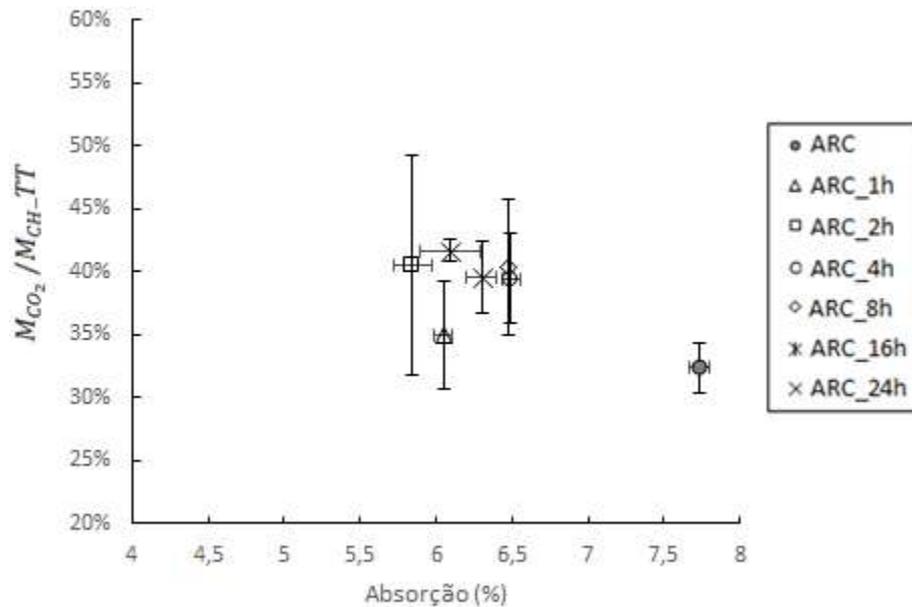


Figura 34: Massa de gás carbônico normalizada pelo teor de hidróxido de cálcio total em função da absorção de água das amostras carbonatadas e não carbonatadas

Os resultados obtidos do ensaio de massa específica, apresentados na seção 5.1, mostraram que com apenas uma hora de exposição ao tratamento foi capaz de aumentar a massa específica dos agregados reciclados em torno de 2% quando comparados ao resultado do agregado reciclado que não foi submetido ao tratamento. Duas horas de exposição proporcionou aumento de 3% de massa específica e esse comportamento foi observado para todos os demais tempos de carbonatação, cujos resultados se mantiveram similares até 24h.

A Figura 35 apresenta a correlação entre a massa de gás carbônico normalizada e a massa específica das amostras. Observou-se, assim como no resultado isolado de massa específica, que apenas uma hora de tratamento promoveu benefícios à *densificação* dos agregados carbonatados com resultados de massa específica superiores ao do agregado que não foi submetido ao tratamento. Vale notar que houve uma concentração dos resultados referentes as amostras que foram submetidas à carbonatação em destaque à amostra que não foi submetida. Assim como mencionado na análise da capacidade de absorção, há uma relação direta entre o aumento dos produtos de carbonatação e o aumento da massa específica permitindo com que

haja melhorias nas propriedades físicas do agregado. No entanto, é possível observar que os teores de produtos de carbonatação se mantem, aproximadamente, constantes para todos os tempos de exposição, e que mais de duas horas não foi capaz de promover incrementos relevantes na massa específica, mantendo aumento em torno de 3%.

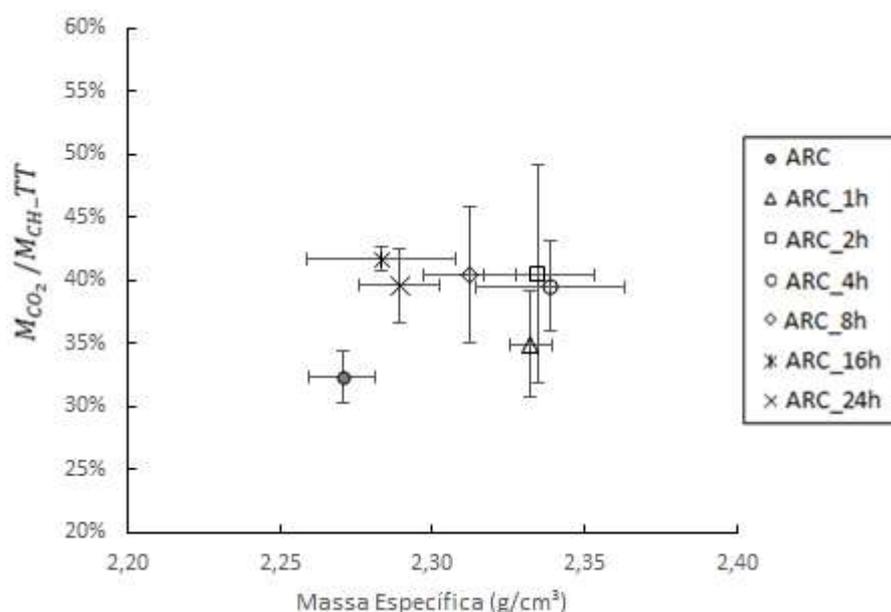


Figura 35: Massa de gás carbônico normalizada pelo teor de hidróxido de cálcio total em função da massa específica das amostras carbonatadas e não carbonatadas

Por fim, considerando os resultados apresentados acima, foi possível concluir que o tempo ótimo de exposição encontra-se em torno de duas horas, uma vez que, após este período, não foram observadas alterações significativas nos resultados de sequestro de gás carbônico (25%), além de ser o tempo no qual o ganho de massa específica (3%) e a redução de absorção de água (24%) dos agregados carbonatados se estabilizou frente às amostras não submetidas ao tratamento de carbonatação acelerada.

Ao observar os resultados obtidos pela análise térmica por termogravimetria, foi possível estabelecer uma correlação entre o ganho de massa proporcionado pela carbonatação acelerada e o teor de hidróxido de cálcio consumido na matriz, conforme apresentado na Figura 35. Tal teor de hidróxido de cálcio consumido na matriz foi obtido por estequiometria a partir do

resultado de ganho relativo de gás carbônico de cada amostra apresentado na Tabela 12. O cálculo foi realizado conforme Equação 23.

A correlação entre os dados é alta ($R^2=1$) o que comprova que a metodologia teste sugerida é válida, uma vez que os resultados se aproximam ao de um método confiável como o de análise térmica por termogravimetria.

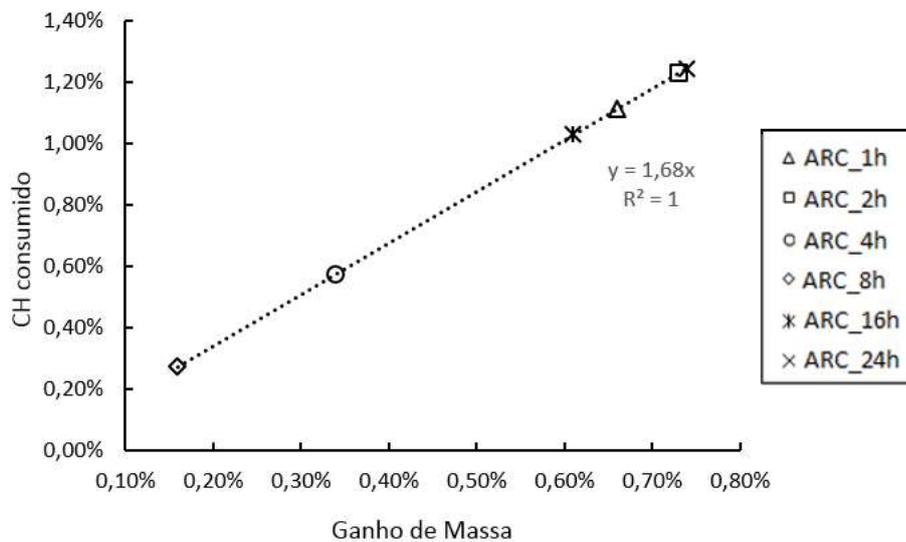


Figura 35: Correlação entre ganho de massa pelo ensaio de carbonatação acelerada e o teor de CH consumido pela matriz em cada amostra carbonatada por diferentes tempos de exposição

É possível correlacionar também o teor de hidróxido de cálcio com o ganho relativo de gás carbônico, como pode ser observado na Figura 36. Observa-se uma correlação alta ($R^2=0,70$) entre os resultados e uma tendência de maiores ganhos relativos de gás carbônico nas amostras que apresentavam menores teores de CH.

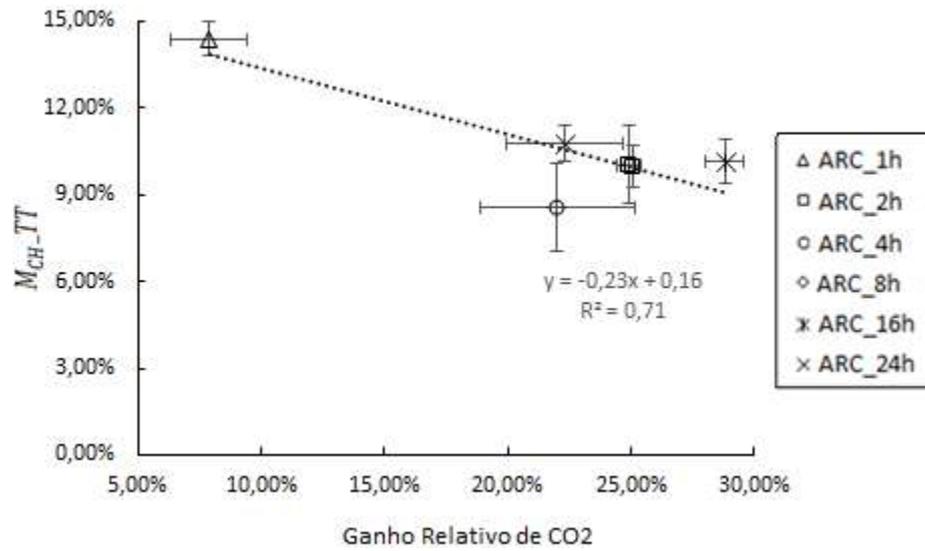


Figura 36: Correlação entre ganho relativo de gás carbônico e teor de CH total em cada amostra carbonatada por diferentes tempos de exposição

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho foi apresentada uma metodologia de tratamento por carbonatação acelerada, em câmara climática, com intuito de aprimorar as propriedades físico-químicas de agregados reciclados de concreto e promover o sequestro de carbono. De maneira geral, foi possível, ao final da análise dos resultados, estipular um tempo ótimo de exposição à carbonatação, capaz de conferir benefícios expressivos em propriedades específicas dos agregados reciclados.

A partir dos resultados apresentados sobre a influência da carbonatação nas propriedades físicas, concluiu-se que com apenas duas horas de exposição houve um aumento de cerca de 3% na densificação dos grãos em relação aos que não foram submetidos ao tratamento. Esse comportamento se manteve para todos os tempos de carbonatação.

Em relação à capacidade de absorção de água, verificou-se também que com apenas uma hora de tratamento foi possível modificar o comportamento do material, reduzindo sua capacidade em cerca de 21% considerando que o agregado reciclado possui capacidade de absorção de 7,7% sem ser submetido a nenhum tratamento. Com duas horas de exposição foi possível observar a maior redução de cerca de 24%. Tal redução se manteve semelhante para todas as amostras até 24 horas de exposição, não conferindo benefício adicional manter a amostra na câmara por mais tempo.

A carbonatação acelerada promove redução de capacidade de absorção e aumento de massa específica em virtude da formação de carbonato de cálcio, que por sua vez preenche os poros da pasta de cimento aderida.

Foi possível notar uma relação direta entre o aumento dos produtos de carbonatação e a diminuição da absorção e aumento da massa específica, provocando melhorias nas propriedades

físicas do agregado. Observou-se que mesmo havendo um certo aumento do produto carbonatado, os resultados se mantiveram aproximadamente constantes na redução da capacidade de absorção e aumento de massa específica dos agregados reciclados a partir de duas horas de exposição.

Já em relação aos resultados obtidos a partir da análise térmica por termogravimetria, primeiramente, conclui-se que com apenas uma hora de tratamento a amostra já teve capacidade de sequestrar cerca de 8% de gás carbônico e formar produtos de carbonatação e com duas horas o comportamento foi potencializado com os grãos sequestrando cerca de 22% de gás carbônico. Para os demais tempos de exposição, não foram observadas diferenças significativas de sequestro de gás carbônico em relação ao resultado obtido em duas horas de exposição. O que indica, nas condições estudadas, ocorre a formação de uma camada apassivadora de penetração de CO_2 pela presença do carbonato de cálcio, que prejudica a penetração do gás para dentro da matriz e, conseqüentemente, o avanço da carbonatação para o interior da matriz. Portanto, conclui-se que manter o agregado reciclado de concreto para além de duas horas na câmara climática não parece ser eficiente.

De maneira geral, considerando o sequestro de 25% de CO_2 , a redução de 24% na absorção de água e aumento na densidade dos grãos de 3%, concluiu-se que duas horas de exposição é o tempo ótimo de carbonatação acelerada (nas condições avaliadas).

Por fim, destaca-se que a metodologia de carbonatação acelerada em câmara climática proposta é uma opção viável e benéfica para o tratamento de agregados reciclados de concreto com o objetivo de aprimorar suas propriedades físico-químicas. E, também, ressalta-se a capacidade de reincorporar parte do dióxido de carbono – emitido em grande escala ao ambiente pela indústria cimenteira – sendo, portanto, uma alternativa para amenizar os impactos gerados pelas emissões de gases do efeito estufa no ambiente.

Sugere-se para futuros trabalhos um estudo aprofundado acerca da densificação proporcionada pelo tratamento nos agregados reciclados, avaliando as alterações micro estruturais, além da realização de microscopia óptica ou eletrônica de varredura para visualizar a frente de carbonatação e asperção de fenolftaleína para mensurar a profundidade de carbonatação. Sugere-se também a realização de campanha experimental alterando a umidade relativa em menores tempos de carbonatação e outra campanha reduzindo a vazão ou o tempo de carbonatação, principalmente para tempos menores que uma hora para entender o porquê da formação de carbonato de cálcio cristalino até este tempo e posterior formação de amorfo. Além disso, avaliar a influência do tratamento nas propriedades mecânicas dos agregados reciclados submetidos à carbonatação acelerada. Dessa maneira, comparando-os com o desempenho de agregados reciclados de referência (não submetidos a nenhum tratamento). Por fim, acredita-se que a caracterização física, mecânica e de durabilidades de concretos produzidos a partir da incorporação de diferentes teores desses agregados estudados deve contribuir para validação da metodologia proposta e uso efetivo dos agregados reciclados carbonatados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 5733. *Cimento Portland de alta resistência inicial*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1991.
- ABNT NBR 7211. *Agregados para concreto - especificação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2015.
- ABNT NBR 15114. *Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2004.
- ABNT NBR NM 53. *Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2009.
- AMARIO, M., 2019, *Propriedades do estado fresco e de longa duração de concretos de resistência normal e alto desempenho contendo agregados de resíduo de concreto de diferentes origens*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- AMARIO, M., RANGEL, C. S., PEPE, M., TOLEDO FILHO, R. D., "Processo de produção de agregados reciclados de concreto: estudo de caso em escala industrial". In: 3º Congresso Luso-Brasileiro Materiais de Construção Sustentáveis, pp. 14–16, Coimbra, Fev. 2018.
- ÂNGULO, S. C., 2005, *Caracterização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados e a Influência de suas Características no Comportamento Mecânico dos Concretos*. Tese* de D. Sc., Escola Politécnica/ USP, São Paulo, SP, Brasil.
- ARREDONDO-REA, S., CORRAL-HIGUERA, R., GÓMEZ-SOBERÓN, J., GÁMEZ-GARCÍA, D., BERNAL-CAMACHO, J., ROSAS-CASAREZ, C., UNGSSON-NIEBLAS, M. "Durability Parameters of Reinforced Recycled Aggregate Concrete: Case Study", *Applied Sciences*, v. 9, n. 4, pp. 617, 2019.
- BEHERA, M., BHATTACHARYYA, S. K., MINOCHA, A. K., DEOLYRA, R., MAITI, S. "Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review", *Construction and Building Materials*, v.

- 68, pp. 501-516, Out. 2014.
- BOTS, P., BENNING, L. G., RODRIGUEZ-BLANCO, J., RONCAL-HERRERO, T., SHAW, S. "Mechanistic Insights into the Crystallization of Amorphous Calcium Carbonate (ACC)", *Crystal Growth & Design*, 2012.
- BRAYMAND, S., ROUX, S., FARES, H., DÉODONNE, K., FEUGEAS, F. "Separation and Quantification of Attached Mortar in Recycled Concrete Aggregates", *Waste and Biomass Valorization*, v. 8, n. 5, pp. 1393–1407, 2017.
- BREČEVIĆ, L., NIELSEN, A. E. "Solubility of amorphous calcium carbonate", *Journal of Crystal Growth*, v. 98, n. 3, pp. 504–510, 1989. ISSN: 0022-0248.
- CHEN, J. J., THOMAS, J. J., JENNINGS, H. M. "Decalcification shrinkage of cement paste", *Cement and Concrete Research*, v. 36, n. 5, pp 801–809, 2005.
- CASCUDO, O., *O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas*, 1 ed., Goiás, 1997.
- CASCUDO, O. , CARASEK, H. "Ação da carbonatação no concreto". In: ISAIA, G. C. (Org.), *Concreto: Ciência e Tecnologia.*, 1 ed.São Paulo: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2011, v. 1, p. 849-885.
- CHI, JM., HUANG, R., YANG, CC. "Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method", *Journal of Marine Science and Technology*, v.10, n. 1, pp. 14-20, 2002.
- S'UT, J. M., HUANG, R., YANG, C. C. "Effects of Carbonation on Mechanical Properties and Durability of Concrete Using Accelerated Testing Method", *Science*, v. 10, n. 1, pp. 14–20, 2002.
- DE JUAN, M., GUTIÉRREZ, P. "Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate". In: *Conference on Use of the Recycled Materials in Building and Structures - RILEM 2004*, pp. 0-9, Nov. 2004.
- DE JUAN, M. S., GUTIÉRREZ, P. A. "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate", *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 2, pp. 872–877, 2009.
- DUAN, Z. H., POON, C. S. "Properties of recycled aggregate concrete made with recycled

- aggregates with different amounts of old adhered mortars", *Materials and Design*, v. 58, pp. 19–29, 2014.
- DWECK, J., SILVA, P. F. F., BUCHLER, P. M., CARTLEDGE, F. K. "Study by thermogravimetry of the evolution of ettringite phase during type II Portland cement hydration", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 69, n. 1, pp. 179–186, 2002. ISBN: 1388-6150.
- DWECK, J., BUCHLER, P. M., COELHO, A. C. V., CARTLEDGE, F. K.. "Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate", *Thermochimica Acta*, v. 346, n. 1–2, pp. 105–113, 2000. ISBN: 0040-6031, ISSN: 00406031.
- FERNÁNDEZ BERTOS, M., SIMONS, S. J. R., HILLS, C. D., & Carey, P. J. "A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂", *Journal of Hazardous Materials*, v. 112, n. 3, pp. 193–205, 2004.
- FUERSTENAU, D. W., GUTSCHE, O., KAPUR, P. C. "Confined particle bed comminution under compressive loads", *International Journal of Mineral Processing*, v. 44, pp. 521–537, 1996.
- FUKUSHIMA, T., "Theoretical investigation on the influence of various factors on carbonation of concrete", *Building research Institute (Japan)*, BRI Research Paper No 127 (ISSN 0453-4972), Japan, 1988.
- HANSEN, T. C., BOEGH, E. "Elasticity and Drying Shrinkage Concrete of Recycled-Aggregate", *ACI Journal Proceedings*, 1985.
- HEWLETT, P.C. *Lea's Chemistry of cement and concrete*. 4 ed. London, Arnold, 1998.
- HIDALGO, A., DOMINGO, C., GARCIA, C., PETIT, S., ANDRADE, C., ALONSO, C. "Microstructural changes induced in Portland cement-based materials due to natural and supercritical carbonation", *Journal of Materials Science*, v. 43, n. 9, pp. 3101–3111, 2008.
- ILKEA, T., YAMANE, S., SAKAMOTO, A. "Strength of concrete containing recycled aggregate concrete", *Proceedings from the Second RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Waste*, 1988.
- JIAN, B., XING, D., ZENG, W., SUN, C. "Carbonation treatment of recycled concrete aggregate : Effect on transport properties and steel corrosion of recycled aggregate

- concrete", *Cement and Concrete Composites*, v. 104, pp. 103360, Jul. 2019.
- JULIÃO, N. R., 2016, *Comportamento Reológico e Mecânico de argamassas contendo resíduos de demolição como agregado miúdo*. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- JUNIOR, A. N., 2014. *Captura de CO₂ em materiais cimentícios através da carbonatação acelerada*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- KASHEFHAGHIGHI, S., SHAO, Y., GHOSHAL, S. "Mathematical modeling of CO₂ uptake by concrete during accelerated carbonation curing", *Cement and Concrete Research*, v. 67, pp. 1–10, 2015.
- KATZ, A. "Properties of Concrete Made With Recycled Aggregate from Partially Hydrated Old Concrete", *Cement and Concrete Research*, New York, v. 33, n. 5, p. 703-711, 2003.
- KONG, D., LEI T., ZHENG, J., MA, C., JIANG, J. "Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 5, pp. 701–708, 2010.
- KOU, S. C., ZHAN, B. J., POON, C. S. "Use of a CO₂ curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates", *Cement and Concrete Composites*, v. 45, pp. 22–28, 2014.
- LAGERBLAD, B. "Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – State of the art", *Swedish Cement and Concrete Research Institute*, v. 2005, n.2, pp. 47, 2007.
- LI, L., POON, C. S., XIAO, J., XUAN, D. "Effect of carbonated recycled coarse aggregate on the dynamic compressive behavior of recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, v. 151, pp. 52–62, 2017.
- LI, Y., ZHANG, S., WANG, R., ZHAO, Y., MEN, C. "Effects of carbonation treatment on the crushing characteristics of recycled coarse aggregates", *Construction and Building Materials*, v. 201, pp. 408–420, 2019.
- LIMA, P. R. L., LEITE, M. B. "Influence of CDW Recycled Aggregate on Drying Shrinkage of Mortar", *Open Journal of Civil Engineering*, v. 2, n. 2, pp. 53–57, 2012.
- LO, T. Y. "The Effect of High Temperature Curing on the Strength and Carbonation of Pozzolanic Structural Lightweight Concretes", *Construction and Building Materials*, v.

- 23, p. 1306-1310, 2009.
- LU, B., SHI, C., CAO, Z., GUO, M., ZHENG, J. "Effect of carbonated coarse recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete", *Journal of Cleaner Production*, v. 233, pp. 421–428, 2019.
- MEHTA, P. K, MONTEIRO, P. J. M. *Concrete, Microstructure, Properties and Materials*, 3 ed. IBRACON, 2008. (In Portuguese)
- MIRANDA, L. F. R., SELMO, S. M. S. "CDW recycled aggregate renderings: Part I – Analysis of the effect of materials finer than 75µm on mortar properties", *Construction and Building Materials*, v. 20, n. 9, pp. 615–624, 2006.
- MORANDEAU, A., THIÉRY, M., DANGLA, P. "Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties", *Cement and Concrete Research*, v. 56, pp. 153–170, 2014.
- MOVASSAGHI, R., 2006. *Durability of Reinforced Concrete Incorporating Recycled Concrete as Aggregate (RCA)*, M.Sc. Dissertation, University of Waterloo, Ontario, Canada.
- NAGATAKI, S., GOKCE, A., SAEKI, T. "Effects of recycled aggregate characteristics on the performance parameters of recycled aggregate concrete", *Proceedings of The fifth canmet/ACI International Conference on Durability of Concrete*, v. 192, pp. 51–71, 2000.
- NEVILLE, AM., *Propriedades do concreto*, 2.ed.2, São Paulo: Pini, Rev. Atual, 1997
- NISHBAYASHI, S., YAMURA, K. "Mechanical properties and durability of concrete from recycled coarse aggregate prepared by crushing concrete", *Proceedings of the Second International Rilem Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*, pp. 652–659, 1988.
- NIXON, P. J. "Recycled concrete as an aggregate for concrete - a review", *Matériaux et Construction*, v. 11, n. 5, pp. 371–378, 1978.
- PANDURANGAN, K., DAYANITHY, A., OM PRAKASH, S. "Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, v. 120, pp. 212–221, 2016.
- PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. "Fundamental Modeling and

- Experimental Investigation of Concrete Carbonation", *ACI Materials Journal*, v. 88, n. 4, p. 363-373, 1991.
- PEDRO, D., DE BRITO, J., EVANGELISTA, L. "Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties", *Construction and Building Materials*, v. 154, pp. 294-309, Nov. 2017.
- PEPE, M., TOLEDO FILHO, R. D., KOENDERS, E. A. B., MARTINELLI, E. "Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete", *Construction and Building Materials*, v. 69, pp. 124–132, 2014.
- POON, C. S.; CHAN, D. "The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong", *Resources, Conservation and Recycling*, v. 50, n. 3, pp. 293–305, 2007.
- POON, C. S., SHUI, Z. H., LAM, L., FOK, H., KOU, S. C. "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete", *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 1, pp. 31–36, 2004.
- RANGEL, C. S., 2019, *Desempenho Mecânico, estrutural e durabilidade de concretos de resistência normal e alta resistência produzidos com agregados reciclados de diferentes origens*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- RICCI, G., 2007, *Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e de demolição para pavimentação*. Dissertação* de M. Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- ROSTAMI, V., SHAO, Y., BOYD, A. J., HE, Z. "Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing", *Cement and Concrete Research*, v. 42, n. 1, pp. 186–193, 2012.
- SAETTA, A.V.; SCHREFLER, B.A.; VITALINI, R.V. "The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials", *Cement and Concrete Research*, v.23, n.4 pp. 761-772, 1993.
- SEO, D. S., CHOI, H. B. "Effects of the old cement mortar attached to the recycled aggregate surface on the bond characteristics between aggregate and cement mortar", *Construction and Building Materials*, v. 59, pp. 72–77, 2014.
- SILVA, J. B., 2017, *Comportamento sob altas temperaturas de concretos com agregados*

- reciclados de concreto*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SILVA, R. V., DE BRITO, J., DHIR, R. K. "Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production", *Construction and Building Materials*, v. 65, pp. 201–217, 2014.
- SILVA, R. V., NEVES, R., DE BRITO, J., DHIR, R. K. "Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete", *Cement and Concrete Composites*, v. 62, pp. 22–32, 2015.
- SILVA, R. V., BRITO, J. De, DHIR, R. K. "Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes", *Construction and Building Materials*, v. 105, pp. 400–415, 2016.
- SIMATUPANG, M. H., HABIGHORST, C., LANGE, H., NEUBAUER, A. "Investigations on the influence of the addition of carbon dioxide on the production and properties of rapidly set wood-cement composites", *Cement and Concrete Composites*, v. 17, n. 3, pp. 187–197, 1995.
- STUMPP, M. J., 2003, "*Carbonatação de Concretos com Altos Teores de Adições Minerai e de Cal Hidratada*". Dissertação* de M.Sc., UFSM/ PPGEC, Santa Maria, RS, Brasil.
- TAM, V. W. Y., TAM, C. M., LE, K. N. "Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches", *Resources, Conservation and Recycling*, v. 50, n. 1, pp. 82–101, 2007.
- TALUKDAR, S., BANTHIA, N., GRACE, JR. "The effects of structural cracking on carbonation progress in reinforced concrete: is climate change a concern?". In: *3rd International Conference on the Durability of Concrete Structures*, Queen's University Belfast, Sep. 2012.
- TAVAKOLI, D., HEIDARI, A., KARIMIAN, M. "Properties of concretes produced with waste ceramic tile aggregate", *Asian Journal of Civil Engineering*, v. 14, n. 3, pp. 369–382, 2013.
- TAYLOR, H. F. W. *Cement chemistry*. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.
- THIERY, M. "Investigation of the Carbonation Front Shape on Cementitious Materials: effects of the chemical kinetics", *Cement and Concrete Research*, v. 37, p. 1047-1058, 2007.

- THIÉRY, M, 2005, "*Modélisation de la carbonatation atmosphérique des bétons - Prise en compte des effets cinétiques et de l'état hydrique*". Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, França..
- THOMAS, J., THAICKAVIL, N. N., WILSON, P. M. "Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates", *Journal of Building Engineering*, v. 19, pp. 349–365, Abr. 2018.
- TOPÇU, İ. B. "Physical and mechanical properties of concrete produced with waste concrete", *Cement and Concrete Research*, v. 27, n. 12, pp. 1817–1823, 1997.
- WANG, C., XIAO, J., ZHANG, G., LI, L. "Interfacial properties of modeled recycled aggregate concrete modified by carbonation", *Construction and Building Materials*, v. 105, pp. 307–320, 2016.
- WOJDYR, M. "Fityk: A general-purpose peak fitting program", *Journal of Applied Crystallography*, v. 43, n. 5 PART 1, pp. 1126–1128, 2010. ISBN: 0021889810030, ISSN: 00218898.
- XUAN, D., ZHAN, B., POON, C. S. "Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Composites*, v. 65, pp. 67–74, 2016.
- XUAN, D., ZHAN, B., POON, C. S. "Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Composites*, v. 84, pp. 214–221, 2017.
- YANG, S., LEE, H. "Mechanical properties of recycled aggregate concrete proportioned with modified equivalent mortar volume method for paving applications", *Construction and Building Materials*, v. 136, pp. 9–17, 2017.
- ZHAN, B., POON, C. S., LIU, Q., KOU, S., SHI, C. "Amental study on CO₂curing for enhancement of recycled aggregate properties", *Construction and Building Materials*, v. 67, pp. 3–7, 2014.
- ZHAN, B., POON, C., SHI, C. "CO₂ curing for improving the properties of concrete blocks containing recycled aggregates", *Cement and Concrete Composites*, v. 42, pp. 1–8, 2013.
- ZHANG, J., SHI, C., LI, Y., XIE, Z. "Performance Enhancement of Recycled Concrete

Aggregates through Carbonation", *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 5, Mar. 2015.

ZHANG, J., SHI, C., LI, Y., PAN, X., POON, C. S., XIE, Z. "Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar", *Construction and Building Materials*, v. 98, pp. 1–7, 2015.

ZUKOWSKI, B., 2017, *Design and characterization of strain hardening curauá fiber cement-based composites*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.