



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CAPTURA DE CO₂ DE CONCRETOS COM
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DEVIDO À CARBONATAÇÃO**

EDUARDO RIGO

Foz do Iguaçu
2019



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO
(ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CAPTURA DE CO₂ DE CONCRETOS COM
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DEVIDO À CARBONATAÇÃO**

EDUARDO RIGO

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

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Edna Possan

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Giovanna Patrícia Gava Oyamada

Foz do Iguaçu
2019

EDUARDO RIGO

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CAPTURA DE CO₂ DE CONCRETOS COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DEVIDO À CARBONATAÇÃO

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

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Edna Possan
UNILA

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Giovanna Patrícia Gava Oyamada
Unioeste

Prof.^a Dr.^a Kátia Regina Garcia Punhagui
UNILA

Prof. Dr. Alex Neves Junior
UFMT

Foz do Iguaçu, 12 de setembro de 2019.

Catálogo elaborado pela Divisão de Apoio ao Usuário da Biblioteca Latino-Americana
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA

R572

Rigo, Eduardo.

Avaliação do potencial de captura de CO₂ de concretos com resíduos de construção e demolição devido à carbonatação / Eduardo Rigo. - Foz do Iguaçu, PR, 2019.

78 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Foz do Iguaçu-PR, 2019.

Orientador: Edna Possan.

Coorientador: Giovanna Patrícia Gava Oyamada.

1. Carbonatação do concreto. 2. Sequestro de CO₂. 3. Resíduo de construção e demolição. 4. Termogravimetria. 5. Medidas compensatórias. I. Possan, Edna. II. Oyamada, Giovanna Patrícia Gava. III. Universidade Federal da Integração Latino-Americana. IV. Título.

CDU 691.32

À minha família e amigos, de um modo geral,
que acreditaram nesse sonho comigo!

AGRADECIMENTOS

À Deus, que permitiu que eu cursasse esse mestrado, e enfrentasse cada batalha, seja externa ou interna, de cabeça erguida.

Aos meus pais, que em sua humilde paciência e sabedoria, souberam me entender nos momentos ausentes, e que foram meu braço direito e esquerdo quando eu precisei. Agradeço sempre e sempre!

À Josnaldo de Lima Teixeira, que me incentivou, me entendeu e apoiou nesses 2 anos e meio de trabalhos e estresses. E por ser meu porto seguro, mesmo estando a 140 km de distância.

À prof.^a Edna Possan, que além de me orientar com tamanha maestria e conhecimento, tornou-se uma grande amiga e incentivadora para continuar nas pesquisas. E que, em meus momentos de fraqueza soube ser paciente e, principalmente, humana. Serei eternamente grato e nunca esquecerei do que fizeste por mim!

À prof.^a Giovanna Patrícia Gava Oyamada, que além de ter sido minha orientadora na graduação, está novamente presente na minha dissertação de mestrado como co-orientadora, auxiliando com seus vastos conhecimentos em materiais cimentícios e sendo cordial como sempre! Gratidão!

Às colegas de pesquisa Lissandra Mazurana e Isabela de Oliveira Antônio, que em nossos momentos, descontraídos ou não, de laboratório, foram essenciais nos estudos de captura de CO₂, bem como na troca de conhecimentos e de informações entre nossos trabalhos! Agradeço imensamente!

Aos grandes amigos que fiz aqui, em especial ao Márcio Evandro Guimarães e à Andressa Bianco Estruzani, que levarei para a minha vida, independente de onde nossos caminhos nos levem. Nossas “jantas” mensais e nossas conversas nunca serão esquecidas! Minha família em Foz do Iguaçu!

À Universidade Federal da Integração Latino-Americana e ao Parque Tecnológico Itaipu (PTI), que cederam os laboratórios de materiais e de dosagem (LADEMA) para a confecção dos concretos, bem como a câmara de CO₂ onde houve os processos de carbonatação, essenciais para o trabalho. Também, aos técnicos dos laboratórios, em especial à Engenheira Civil Dalila Netto Sella, ao técnico Wagner Pessoa Peixoto, ao técnico Luciano Ari Fiamonzini e ao técnico Andrey Vinícius Netto, que auxiliaram no que fosse preciso, principalmente nas concretagens, análises termogravimétricas e nos reparos da câmara de carbonatação, para que o trabalho em

questão fosse concretizado! Ainda, agradeço à Unila por ceder bolsa de mestrado, essencial para os andamentos das atividades em tempo integral!

Ao laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional, que dispôs suas instalações para a realização de ensaios de caracterização de materiais e ensaios mecânicos dos concretos confeccionados. Também, aos seus servidores, em especial ao técnico Claudinei Dias e ao Engenheiro Civil João Bernardino, que dispuseram períodos nos seus horários de trabalho para me auxiliar nos ensaios mecânicos dos concretos. Sem vocês, esse trabalho não teria chegado onde chegou. Muito obrigado!

Ao Robson Biela da Future, usina de reciclagem de resíduos de construção e demolição, que cedeu os agregados reciclados miúdos e graúdos para a confecção dos concretos e que sempre atendeu prontamente quando solicitado. Muito obrigado!

À Gabriela Leite, Ornella Tonelli, Carlos Henrique Oliveira Rampanelli, João Pedro Bonfim e William de Araújo Thomaz, que dispuseram, em algum momento de suas agendas de estudos, um tempo para auxiliar nas concretagens e moldagens de corpos de prova. Serei grato eternamente pela enorme ajuda que me proporcionaram!

Ao mestrado em Engenharia Civil da Unila, no qual aprendi a desenvolver minha escrita acadêmica e absorver conhecimentos que não tive a oportunidade de vivenciar na graduação. E aos colegas, em especial ao Márcio Evandro Guimarães e Cláudio Neumann Junior (eterno trio de trabalhos nas disciplinas do mestrado) e aos professores do programa, que compartilharam comigo os momentos mais importantes desse período da minha vida.

“Há três métodos para ganhar sabedoria: primeiro, por reflexão, que é o mais nobre; segundo, por imitação, que é o mais fácil; e terceiro, por experiência, que é o mais amargo.”

(Confúcio)

RESUMO

A indústria do cimento é responsável por aproximadamente 7% das emissões globais de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, oriundas, principalmente, do processo de decarbonatação do carbonato de cálcio durante a clínquerização. Em um processo reverso, o concreto e outros materiais a base de cimento capturam CO_2 através do processo de carbonatação. Essa reação ocorre devido ao caráter ácido do dióxido de carbono, que reage com os compostos hidróxidos (de caráter básico) presentes no concreto, produzindo sal e água. Discute-se na literatura que a captura de CO_2 pelo concreto pode ser uma medida de compensação do dióxido de carbono emitido pela produção de cimento. Porém, nos estudos existentes, há divergências quanto à potencialidade de captura de CO_2 tanto durante sua vida útil quanto no período pós-demolição. Devido a essas discordâncias e o contexto de reaproveitamento de resíduos de construção e demolição (RCD), visto que esses são extensamente produzidos pela indústria da construção civil e também capazes de capturar CO_2 , tem-se por objetivo neste estudo a determinação da potencialidade da captura de CO_2 de concretos constituídos com RCD. Para tal, foram produzidos concretos de diferentes relações água/cimento (0,45, 0,55 e 0,65) e teores de substituição de agregados (miúdo e gráudo) natural por agregado reciclado em 0, 50 e 100% em relação ao volume de agregados. O potencial de captura de CO_2 foi avaliado por meio de análise termogravimétrica e da determinação da profundidade de carbonatação, para amostras submetidas à carbonatação acelerada. As etapas do experimento foram: projeto de experimento; caracterização dos materiais e dosagem dos concretos; caracterização dos concretos; carbonatação acelerada; ensaio termogravimétrico (TG e DTG); determinação das emissões de CO_2 ; determinação da captura de CO_2 devido à carbonatação e cálculo do balanço das emissões. Verificou-se que as propriedades mecânicas dos concretos avaliados foram reduzidas e a carbonatação aumentada, conforme se elevou a porcentagem de substituição dos agregados naturais por reciclados de RCD, o que foi favorável para a captura de CO_2 . O potencial de captura de CO_2 nos concretos avaliados variou entre 8 e 54%, sendo os maiores valores provenientes dos concretos com RCD. O ensaio termogravimétrico apresenta-se como uma técnica promissora para determinação do potencial de captura de CO_2 de concretos carbonatados. A determinação da captura de CO_2 a partir da medição da profundidade carbonatada, por empregar parâmetros tabelados ou da literatura, pode apresentar erros maiores nas determinações, porém pode ser uma ferramenta útil na determinação de cenários. O estudo corrobora a pretensão de que a carbonatação de materiais cimentícios pode ser considerada um parâmetro de compensação do CO_2 emitido na indústria do cimento, especialmente quando se incorpora resíduos de construção e demolição à mistura.

Palavras-chave: Carbonatação do concreto. Sequestro de CO_2 . Resíduo de construção e demolição. Termogravimetria. Medidas compensatórias.

ABSTRACT

The cement industry is responsible for approximately 7% of carbon dioxide global emissions into the atmosphere, mainly from decarbonation process of calcium carbonate during the “clinkering”. In a reverse process, concrete and other cement-based materials capture CO₂ through the carbonation process. This reaction occurs due to the carbon dioxide acid character, which reacts with the hydroxide compounds (basic character) present in concrete, producing salt and water. It is argued in the literature that the concrete CO₂ uptake may be a compensation measure of carbon dioxide emissions from cement production. However, in existing studies, there are divergences about the CO₂ uptake potentiality in during life cycle and in the post-demolition period. Due to these discrepancies and the construction and demolition wastes (CDW) reuse context, since these are widely produced by the construction industry and also uptakes CO₂, the objective of the study is determine the CO₂ capture potentiality from concrete constituted with CDW. For this, concrete of different water/cement ratio (0,45, 0,55 and 0,65) and different substitution percentage of natural aggregates by recycled aggregates at 0, 50 and 100% in volume were produced. The CO₂ uptake potentiality was evaluated by thermogravimetric analysis and by carbonation depth of specimens submitted to accelerated carbonation. The experiment steps were: experiment project, materials characterization and concrete dosage, concrete characterization, accelerated carbonation, thermogravimetric test (TG and DTG), CO₂ emissions determination, CO₂ uptake due to carbonation determination and emissions balance. It was observed that the evaluated concretes mechanical properties were reduced, and the carbonation was increased, as the replacement percentage of natural aggregates by CDW increased, which was favorable for CO₂ capture. The CO₂ uptake potential of evaluated concretes varied between 8 and 54% with the highest values coming from concrete with CDW. Thermogravimetric test is a promising technique for determining the CO₂ capture potential of carbonated concretes. The CO₂ uptake determination from measured carbonated depth, by employing tabulated or literature parameters, may present larger errors in the determinations, but can be a useful tool in determining scenarios. The study supports the claim that cementitious materials carbonation can be considered as a CO₂ compensation parameter in the cement industry, especially when incorporating construction and demolition waste into the mix.

Key words: Concrete carbonation. CO₂ uptake. Construction and demolition waste. Thermogravimetry. Compensatory measures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ocorrência da frente de carbonatação ao longo de uma estrutura de concreto (POSSAN, 2010)	13
Figura 2: Captura de CO ₂ em função da área superficial do concreto (FELIX; POSSAN, 2018)	15
Figura 3: Captura de CO ₂ ao longo do tempo (FELIX, POSSAN, 2018)	15
Figura 4: Captura de CO ₂ x consumo de cimento x carbonatação durante o CV da estrutura (POSSAN <i>et al.</i> , 2016)	16
Figura 5: Captura de CO ₂ x produção de cimento (POSSAN <i>et al.</i> , 2017)	16
Figura 6: Seção transversal do material cimentício do agregado reciclado (NG; ELGENSEN, 2018)	17
Figura 7: Potencialidade de captura de CO ₂ de resíduos de construção de demolição (KALIYAVARADHAN; LING, 2017)	18
Figura 8: Profundidade de carbonatação versus tempo de exposição em laboratório de argamassas com substituição total de agregados naturais por agregados reciclados de cerâmica (CRA) e mistos cerâmica-materiais cimentícios (MRA) (ANDRADE <i>et al.</i> , 2018)	18
Figura 9: Relação m ² /m ³ de carbonatação em elementos de mesmo volume e dimensões diferentes	19
Figura 10: Exemplo de curva de análise termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTG) – Cimento CP V ARI	20
Figura 11: Fluxograma dos procedimentos.	22
Figura 12: (a) cimento; (b) agregado miúdo natural; (c) agregado miúdo reciclado; (d) agregado graúdo natural; (e) agregado graúdo reciclado.	24
Figura 13: Equipamento utilizado para o ensaio de granulometria a laser	26
Figura 14: Equipamento utilizado para o ensaio de área específica BET	26
Figura 15: Composição do agregado graúdo reciclado: (a) argamassa; (b) cerâmica vermelha; (c) agregado basáltico; (d) agregado basáltico com aderência de argamassa; (e) cerâmica de revestimento	27
Figura 16: Compostos moídos e composição do agregado graúdo reciclado moído	28
Figura 17: Corpos de prova após a concretagem	30
Figura 18: Corpos de prova em processo de cura úmida	30
Figura 19: Equipamento SONELASTIC, utilizado para a realização do módulo de	

elasticidade dinâmico	32
Figura 20: Prensa hidráulica da marca TIME, usada para realização de ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade estático.....	32
Figura 21: Prensa hidráulica da marca TORSEE, usada para realização de ensaios à compressão axial e tração por compressão diametral	32
Figura 22: Câmara climatizada utilizada para os ensaios de carbonatação.....	33
Figura 23: Painel de controle da câmara climatizada.....	33
Figura 24: Corpos de prova acondicionados para os ensaios de carbonatação	34
Figura 25: Representação esquemática do processo de coleta de alíquotas de amostras.....	35
Figura 26: Representação real do processo de coleta das alíquotas das amostras .	35
Figura 27: Esculpidor <i>Iecron</i>	36
Figura 28: Analisador termogravimétrico	36
Figura 29: Marcação dos pontos de referência de perda de massa, de acordo com a TG e DTG.....	41
Figura 30: Granulometria a laser do cimento	43
Figura 31: TGs (a) e DTGs (b) dos materiais carbonatáveis.....	44
Figura 32: Agregado basáltico com resíduos de argamassa.....	45
Figura 33: Curva granulométrica do agregado miúdo natural.	46
Figura 34: Curva granulométrica do agregado miúdo reciclado.	46
Figura 35: Curva granulométrica do agregado graúdo natural.....	47
Figura 36: Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado.....	47
Figura 37: Massa específica no estado fresco dos concretos confeccionados	49
Figura 38: Curvas de absorção por capilaridade de concretos com substituição de agregados míudos reciclados.....	50
Figura 39: Curvas de absorção por capilaridade de concretos com substituição de agregados graúdos reciclados.	50
Figura 40: Absorção por capilaridade a 72 horas dos concretos com substituição de agregado miúdo	50
Figura 41: Absorção por capilaridade a 72 horas dos concretos com substituição do agregado graúdo	50
Figura 42: Resistência à compressão aos 7 dias	52
Figura 43: Resistência à compressão aos 28 dias	52
Figura 44: Resistência à compressão aos 63 dias	52

Figura 45: Resistência à tração por compressão diametral.	52
Figura 46: Módulo de elasticidade estático aos 28 dias	52
Figura 47: Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias	52
Figura 48: Profundidades de carbonatação em função da relação água/cimento (a) aos 15 dias de exposição e (b) aos 25 dias de exposição	53
Figura 49: TGs (a) e DTGs (b) em função da relação água/cimento 0,45 e substituição por agregado miúdo reciclado.	56
Figura 50: TGs (a) e DTGs (b) em função da relação água/cimento 0,55 e substituição por agregado miúdo reciclado.	56
Figura 51: TGs (a) e DTGs (b) em função da relação água/cimento 0,65 e substituição por agregado miúdo reciclado.	56
Figura 52: TGs (a) e DTGs (b) em função da relação água/cimento 0,45 e substituição por agregado graúdo reciclado.....	57
Figura 53: TGs (a) e DTGs (b) em função da relação água/cimento 0,55 e substituição por agregado graúdo reciclado.....	57
Figura 54: TGs (a) e DTGs (b) em função da relação água/cimento 0,65 e substituição por agregado graúdo reciclado.....	57
Figura 55: TGs (a) e DTGs (b) em função da relação água/cimento 0,55 e substituição por agregado miúdo e graúdo reciclado.	58
Figura 56: Difractogramas de raios-x (a) e curvas DTG (b) dos concretos de referência com a/c 0,65.....	60
Figura 57: Difractogramas de raios-x (a) e curvas DTG (b) dos concretos com 100% de substituição por agregados miúdos com a/c 0,65	60
Figura 58: Difractogramas de raios-x (a) e curvas DTG (b) dos concretos com 100% de substituição por agregados graúdos com a/c 0,65	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis dos concretos produzidos.....	23
Tabela 2: Ensaio de caracterização dos materiais realizados.	25
Tabela 3: Valores de "m" para as relações água/cimento requisitadas	28
Tabela 4: Proporcionamento dos concretos em massa.....	29
Tabela 5: Quantidade de material necessária para 1m ³ de concreto	29
Tabela 6: Ensaio realizado no estado endurecido.	31
Tabela 7: Informações sobre os corpos de prova submetidos a carbonatação.....	34
Tabela 8: Regiões do concreto analisadas por relação água/cimento dos concretos	35
Tabela 9: Dados utilizados na equação.....	38
Tabela 10: Dados de emissões de CO ₂ de agregados naturais encontrados na literatura.	38
Tabela 11: Espectrometria por fluorescência de raios-x do cimento CP V - ARI	44
Tabela 12: Espectrometria por fluorescência de raios-x do agregado miúdo reciclado	44
Tabela 13: Características dos agregados	45
Tabela 14: Porcentagem em massa de cada componente do agregado graúdo reciclado.....	46
Tabela 15: ANOVA para os parâmetros utilizados	47
Tabela 16: Profundidades de carbonatação nas idades aferidas, em mm	53
Tabela 17: Dados da Equação 9 dependentes de fontes externas ao experimento. .	54
Tabela 18: CO ₂ capturado em 15 e 25 dias de carbonatação acelerada e potencial de captura de CO ₂ para 1 m ³ de concreto.....	55
Tabela 19: Valores obtidos de captura de CO ₂ dos concretos através da análise termogravimétrica (%).....	59
Tabela 20: Emissões de CO ₂ estimadas para cada concreto.....	61
Tabela 21: Emissões <i>versus</i> captura de CO ₂ e seus balanços	62
Tabela 22: Resistência à compressão dos concretos confeccionados.....	75
Tabela 23: Resistência à tração por compressão diametral e Módulo de elasticidade estático e dinâmico dos concretos confeccionados.....	75
Tabela 24: Imagens dos corpos de prova à 15 dias de carbonatação acelerada	76
Tabela 25: Imagens dos corpos de prova à 25 dias de carbonatação acelerada	77

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 CONTEXTOS E JUSTIFICATIVA	12
1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	12
2 CAPTURA DE CO₂ DEVIDO À CARBONATAÇÃO DO CONCRETO	13
2.1. CARBONATAÇÃO DO CONCRETO	13
2.2. CAPTURA DE CO ₂	14
2.3. CARBONATAÇÃO E CAPTURA DE CO ₂ EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS COM RCD	17
2.4. FATORES QUE AFETAM A CAPTURA DE CO ₂	19
2.5. CAPTURA DE CO ₂ POR MEIO DE ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA.....	20
3 METODOLOGIA	22
3.1. DEFINIÇÃO DO PROJETO DE EXPERIMENTO (ETAPA 1)	22
3.1.1. Variáveis de estudo	22
3.1.2. Definição do método de dosagem dos concretos.....	24
3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E DOSAGEM DOS CONCRETOS (ETAPA 2).....	24
3.2.1. Seleção dos materiais	24
3.2.2. Caracterização dos materiais	25
3.2.1.1. <i>Descrição dos ensaios de granulometria a laser e área específica BET</i>	<i>26</i>
3.2.1.2. <i>Composição gravimétrica do agregado graúdo reciclado.....</i>	<i>27</i>
3.2.3. Dosagem dos concretos.....	28
3.2.4. Confeção dos concretos	30
3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS (ETAPA 3).....	31
3.3.1. Estado fresco	31
3.3.2. Estado endurecido	31
3.4. CARBONATAÇÃO ACELERADA DOS CONCRETOS (ETAPA 4).....	33
3.5. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG E DTG) (ETAPA 5)	34
3.5.1. Procedimentos de ensaio	34
3.6. DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO ₂ (ETAPA 6).....	37
3.6.1. Emissões da indústria do cimento.....	37
3.6.2. Emissões provenientes dos agregados naturais e reciclados	38
3.6.3. Emissões totais dos concretos	39
3.7. DETERMINAÇÃO DA CAPTURA DE CO ₂ DEVIDO À CARBONATAÇÃO (ETAPA 7)	39

3.7.1. Metodologia considerando a profundidade de carbonatação	39
3.7.2. Metodologia considerando a análise termogravimétrica dos concretos	41
3.8. BALANÇO DE EMISSÕES (ETAPA 8)	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	43
4.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	47
4.3. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS	49
4.4. CARBONATAÇÃO E CAPTURA DE CO ₂	53
4.4.1. Profundidades de carbonatação.....	53
4.4.2. Captura de CO ₂	54
4.4.2.1. Quantidade de CO ₂ capturado (Equação BRE)	54
4.4.2.2. Análise termogravimétrica e potencial de captura de CO ₂	55
4.4.2.3. DRX versus DTG.....	59
4.5. BALANÇO DAS EMISSÕES	61
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
5.1. CAPTURA DE CO ₂	64
5.2. BALANÇO DE EMISSÕES.....	65
5.3. PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO	66
5.4. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS	66
5.5. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	67
REFERÊNCIAS.....	68
APÊNDICE A	75
APÊNDICE B	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTOS E JUSTIFICATIVA

As emissões de CO₂ na atmosfera, em abrangência mundial, chegaram a alarmantes 658 Gton entre 2017 e 2018, sendo que 24,6% dessas emissões correspondem a processos industriais (TONG *et al.*, 2019). A indústria cimenteira é, hoje, considerada uma das mais poluentes no setor da construção, sendo responsável por aproximadamente 7% do total de emissões de CO₂ (JOHN *et al.*, 2018; WBCSD, 2018). Cerca de 50% das emissões são provenientes da calcinação da rocha calcária e 40%, da queima de combustíveis para o processo de clínquerização (HABERT; ROUSSEL, 2009; LIMA, 2010). O restante das emissões advém de processos indiretos, como por exemplo o transporte das matérias-primas (DEJA; ULIASZ - BOCHENCZYK; MOKRZYCKI, 2010).

Considerado um dos gases do efeito estufa (GEE), as emissões de CO₂ a nível mundial provenientes de combustíveis fósseis e processos industriais totalizaram 35,7 bilhões de toneladas em 2014, o que corresponde a um crescimento de 0,5% em relação a 2013 e 59% em relação a 1990 (OLIVIER *et al.*, 2015).

Como as emissões industriais são dependentes do processo produtivo adotado, dos limites normativos para uso de adições e filleres e das legislações ambientais de cada país, o relatório do *GNR Project*, na parte que trata das emissões de CO₂, cita que para a produção de uma tonelada de clínquer, gerou-se 866 kg de CO₂ na produção brasileira, e cerca de 842 kg de CO₂ a nível mundial (WBCSD, 2016). Logo, se faz necessário estudos sobre alternativas para mitigar os impactos negativos dessas emissões.

O documento *Roadmap Cement*, produzido pela *International Energy Agency* (WBCSD, 2018) aponta que, um dos fatores principais para que se mitigue as emissões de CO₂ oriundo do processo de produção do cimento, de modo que haja uma efetiva redução no balanço de emissões é a captura ou armazenamento de carbono, responsável, no documento, por até 56% das medidas mitigadoras mundiais até 2050. Dentro desse processo, pode-se incluir a carbonatação de materiais cimentícios.

O processo de carbonatação no concreto é bastante conhecido na literatura devido ao seu potencial de corrosão do aço em estruturas de concreto armado, reduzindo o pH do concreto e ocorrendo durante todo o ciclo de vida (vida útil + período pós-demolição da estrutura) do concreto (SAVIJA; LUKOVIC, 2016; GANDÍA-ROMERO *et al.*, 2016; XI *et al.*, 2016).

Tem-se discutido na literatura (JANG *et al.*, 2016; PADE; GUIMARÃES, 2007) que o processo de captura de CO₂ devido à carbonatação do concreto e/ou de seus resíduos pode ser uma medida de compensação do CO₂ emitido pela produção do cimento. Porém, há divergências na literatura quanto à potencialidade de captura do gás tanto durante a vida útil quanto no período pós-demolição. Pade e Guimarães (2007) destacam que o concreto pode absorver 100% do CO₂ emitido na calcinação da rocha calcária se considerada a captura de CO₂ do resíduo do concreto, ou seja, o período pós-demolição da estrutura. Yang, *et al.* (2014) destacam que o sequestro do gás, no período pós-demolição, não excede 10,12% das emissões que foram geradas.

Outros estudos avaliam a captura de CO₂ apenas durante o período de vida útil. Xi *et al.* (2016) estimam a absorção de 44% das emissões de CO₂. Jacobsen e Jahren (2002) estimaram a absorção de 16% do CO₂ emitido pela indústria cimenteira. Gadja (2001) descreve que o índice de absorção do dióxido de carbono pelo concreto é da ordem de 7,6% do que foi emitido.

Além das emissões, a indústria da construção ainda é responsável pela elevada geração de resíduos de construção e demolição (RCD). Segundo dados da União Européia (EUROPEAN COMMISSION, 2016) e da China (DUAN; LI, 2016) são gerados anualmente cerca de 800 milhões e dois bilhões de toneladas de resíduo de construção e demolição nas regiões citadas, respectivamente. No Brasil, em 2017 foi coletado cerca de 45 milhões de toneladas de RCD (ABRELPE, 2018).

O fato de RCD's serem compostos por materiais cimentícios (concretos, argamassas, nata de cimento, entre outros) demonstram que são propensos a capturarem CO₂, quando aplicados diretamente ou incorporados em argamassas e concretos (CAI *et al.*, 2018; ANDRADE *et al.* 2018; SILVA; ANDRADE, 2017; XUAN *et al.*, 2016; KIKUCHI; KURODA, 2011).

Portanto, ao se considerar este fato e o contexto de reaproveitamento de resíduos, justifica-se estudar como ocorre o processo de carbonatação em concretos produzidos com agregados reciclados, de modo a avaliar pontos positivos e negativos da incorporação desses resíduos na composição de concretos e na captura de CO₂.

1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral desse estudo é avaliar o potencial de captura de CO₂ devido à carbonatação de concretos produzidos com ou sem resíduos de construção e demolição (RCD), considerando os períodos de vida útil de projeto (VUP) e de pós-demolição da estrutura.

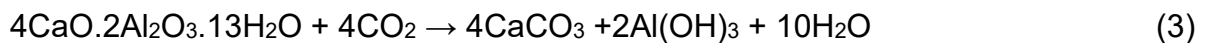
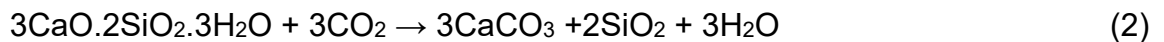
Ainda, o estudo apresenta os seguintes objetivos específicos:

- i) Avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos concretos produzidos;
- ii) Avaliar a profundidade de carbonatação dos concretos confeccionados, em diferentes tempos de exposição.
- iii) Analisar o efeito de diferentes teores de substituições e da relação água/cimento de agregados naturais por reciclados na captura de CO₂ de concretos;
- iv) Calcular e comparar, via metodologia da BRE (*Building Research Establishment*) e por análise termogravimétrica, o potencial de captura de CO₂ do concreto carbonatado;
- v) Avaliar a captura de CO₂ devido à carbonatação no balanço das emissões do concreto.

2 CAPTURA DE CO₂ DEVIDO À CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

2.1. CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

A reação de carbonatação no concreto consiste em reação físico-química entre o hidróxido de cálcio presente no concreto com o CO₂ presente na atmosfera (Equação 1). O principal composto carbonatado pelo dióxido de carbono é o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), porém também são carbonatáveis o hidróxido de potássio (KOH), o hidróxido de sódio (NaOH) e os silicatos alcalinos (Equação 2)(2) e (3)Equação 3).



Sendo o dióxido de carbono um gás de caráter ácido, ao reagir com os hidróxidos, de caráter básico, resulta na formação de sal – na maioria dos casos o carbonato de cálcio (CaCO₃) – e água (Ver Figura 1). Ou seja, o concreto sequestra através dessa reação o CO₂ atmosférico, ocorrendo durante todo o ciclo de vida (vida útil + período pós-demolição da estrutura) do concreto (SAVIJA; LUKOVIC, 2016; XI *et al.*, 2016).

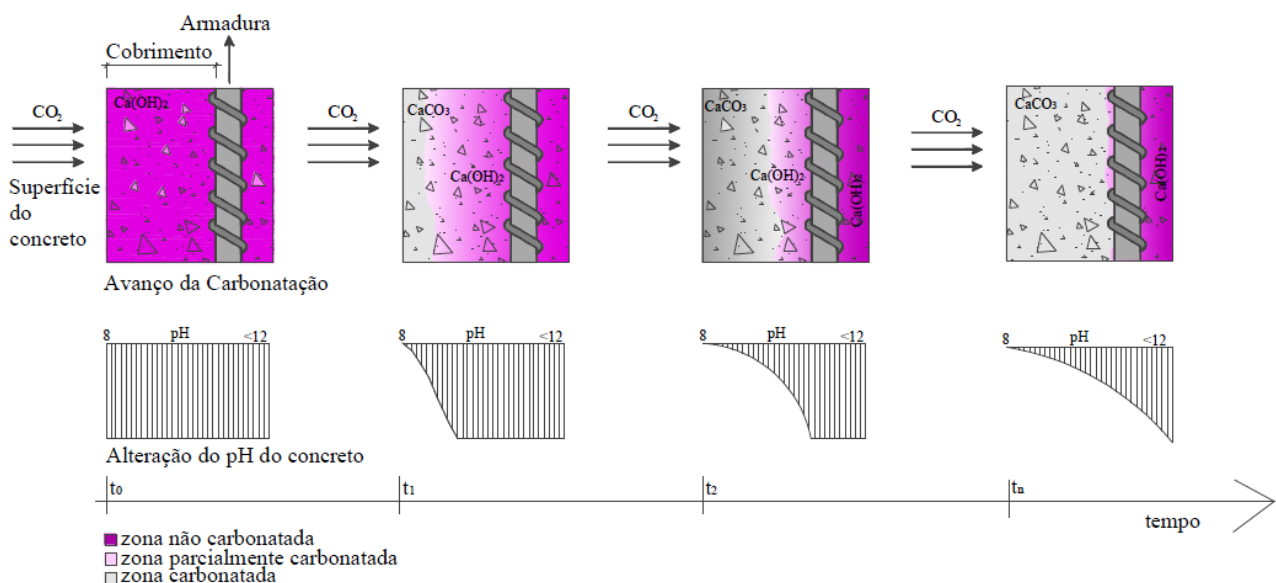


Figura 1: Ocorrência da frente de carbonatação ao longo de uma estrutura de concreto (POSSAN, 2010)

A reação em questão ocasiona a redução de pH da estrutura de concreto, sendo prejudicial para estruturas de concreto armado, visto que pode ocasionar a despassivação da armadura. Porém, quando se considera concretos em período pós-demolição, concretos não armados ou cujo processo de carbonatação não chegue a armadura, a carbonatação pode ser considerada benéfica, visto a sua capacidade de sequestrar CO₂ (ANDRADE *et al.*, 2018; XI *et al.*, 2016; PADE; GUIMARÃES, 2007) e elevar a resistência superficial desse material (LI *et al.*, 2018; GANDÍA-ROMERO *et al.*, 2016).

O fato da reação de carbonatação capturar o CO₂ presente na atmosfera se mostra inversamente proporcional à liberação do gás na produção do cimento no processo de calcinação, o que pode atuar com um agente compensador das emissões associadas à produção de materiais cimentícios (POSSAN *et al.*, 2017).

Como o potencial de captura de CO₂ devido à carbonatação do concreto é fortemente dependente dos fatores que afetam esta reação, estes devem ser levados em conta nas análises/estudos.

2.2. CAPTURA DE CO₂

Os processos de captura de CO₂ da atmosfera são bastante discutidos no âmbito científico. São reconhecidos na atualidade dois tipos de sequestro de carbono: o direto e o indireto (COSTA, 2009; POSSAN *et al.*, 2017). O processo direto consiste em separar e capturar o CO₂ de processos industriais e de produção/consumo de energia para um local de estocagem seguro, mantendo-o isolado, tendo como exemplo a armazenagem geológica (inserção em reservatórios de óleo e gás, camadas de carvão e aquíferos salinos) (SANTOS; RONCONI, 2014; NEVES JUNIOR, 2014). Já no sequestro indireto, o CO₂ é extraído de modo natural, incorporado em reações químicas na qual o dióxido de carbono faz parte na sua composição, tendo como exemplos a reação de fotossíntese em plantas, a dissolução do gás em materiais contendo amina (-NH₂), a cura carbônica de materiais à base de cimento e, por último, a carbonatação de materiais cimentícios, sendo esse último o enfoque do presente trabalho (COSTA, 2009; MELLO *et al.*, 2011; POSSAN *et al.*, 2017).

Em destaque recente, a carbonatação do concreto é ainda pouco difundida como um meio indireto de captura de CO₂, havendo várias divergências na literatura quanto à eficácia e potencialidade, variando potenciais de captura versus emissão pela produção

do cimento entre 7,6% e 100% (GADJA, 2001; JACOBSEN; JAHNREN, 2002; PADE; GUIMARÃES, 2007; YANG *et al.*, 2014; XI *et al.*, 2016).

Como o potencial de captura de CO₂ devido à carbonatação do concreto é fortemente dependente dos fatores que afetam esta reação, estes devem ser levados em conta nas análises/estudos. A literatura (LI *et al.*, 2018; HUANG; CHANG, 2012; HYVERT *et al.*, 2010) destaca que os principais fatores, internos e externos, que influenciam na ocorrência de carbonatação do concreto são a temperatura do ambiente, a umidade, a concentração de CO₂ do local, o revestimento da superfície do concreto, a relação água/cimento da matriz cimentícia, a composição e tipo de cimento utilizado, ciclos de molhagem e secagem da estrutura, ciclos de congelamento e descongelamento e até mesmo a contaminação de agregados utilizados no concreto.

Além destes fatores, Possan e Félix (2018), citam que a área superficial afeta de forma direta a captura de CO₂. Ao se fragmentar o concreto, como ocorre no período pós-demolição de uma estrutura, sua área superficial é elevada consideravelmente, ocasionando um aumento em tendências exponenciais no processo de captura de CO₂, conforme ilustra a Figura 2 e Figura 3.

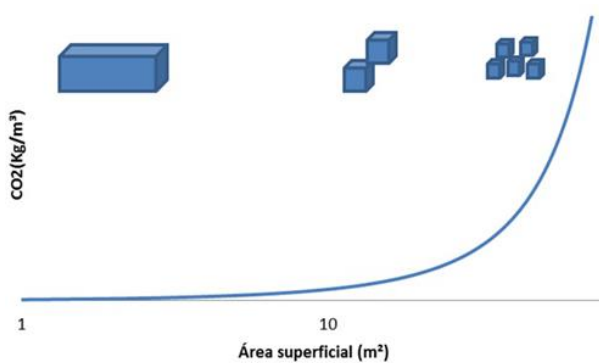


Figura 2: Captura de CO₂ em função da área superficial do concreto (FELIX; POSSAN, 2018)

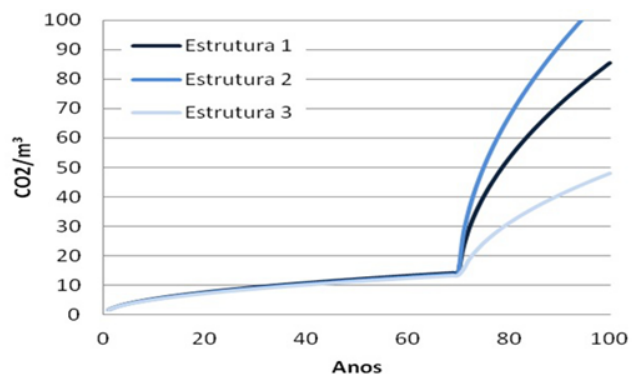


Figura 3: Captura de CO₂ ao longo do tempo (FELIX, POSSAN, 2018)

Na Figura 4, tem-se a representação gráfica da captura de CO₂ em função do consumo de cimento e da carbonatação do concreto durante o ciclo de vida da estrutura. De um modo geral, a resistência à compressão é inversamente proporcional à carbonatação ao longo do tempo, e conseqüentemente menor deveria ser a captura de CO₂.

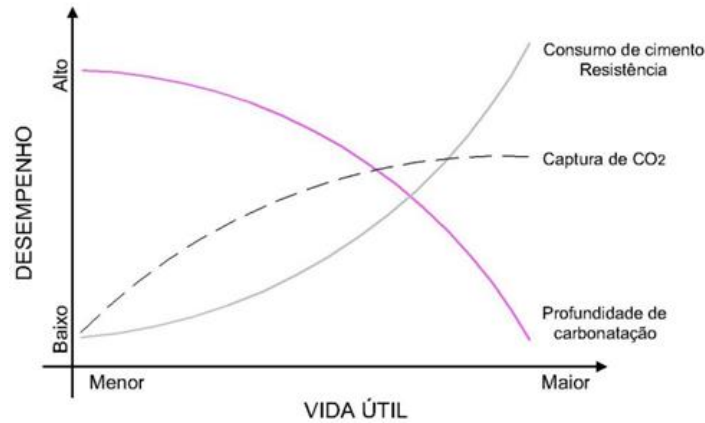


Figura 4: Captura de CO₂ x consumo de cimento x carbonatação durante o CV da estrutura (POSSAN *et al.*, 2016)

Porém, em simulações realizadas por Possan *et al.* (2016), esse efeito não é observado, visto que concretos com maior resistência, por possuírem maior quantidade de CaO disponível para a reação, podem absorver maior quantidade de CO₂ ao longo do tempo (se considerada a demolição). Esta relação pode ser explicada por meio da Equação 4, que representa a etapa de descarbonatação na produção de cimento, onde a quantidade de CO₂ capturada é diretamente proporcional a quantidade de cimento empregado para a produção do concreto. O processo de descarbonatação na produção de cimento e a captura de CO₂ pela carbonatação, é explicada pela Figura 5.

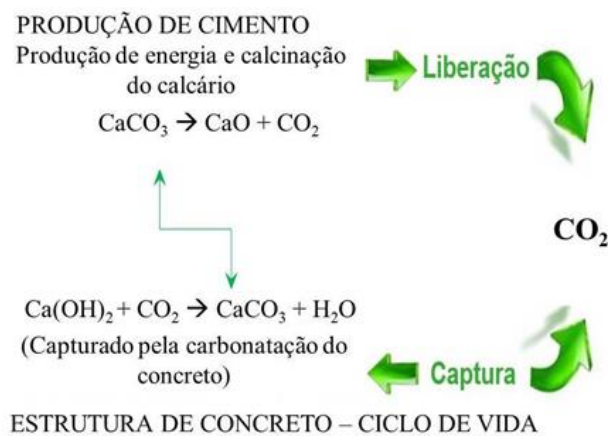


Figura 5: Captura de CO₂ x produção de cimento (POSSAN *et al.*, 2017)

Nota-se que além dos fatores que afetam a carbonatação, no estudo da captura de CO₂ outros fatores também devem ser levados em conta, como a área superficial exposta a ação do CO₂, teor de CaO disponível no cimento, entre outros. Também deve-se tomar em conta a proteção da estrutura.

2.3. CARBONATAÇÃO E CAPTURA DE CO₂ EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS COM RCD

Do mesmo modo como ocorre no concreto convencional, os resíduos de construção e demolição (RCD), compostos por restos de materiais de construção (concretos, argamassas, cerâmicas, pisos, agregados, etc) também possuem capacidade de captura de CO₂, uma vez que boa parte de sua composição é constituída por resquícios de materiais cimentícios, demonstrado esquematicamente pela Figura 6.

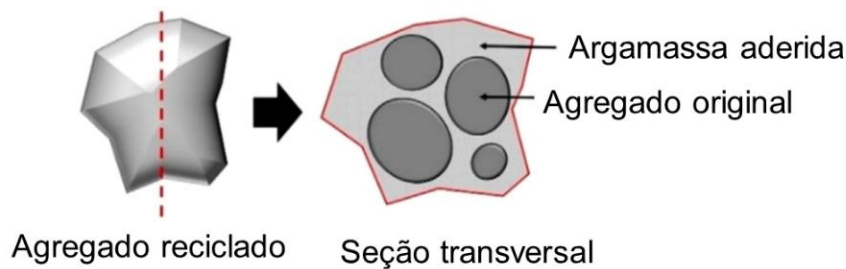


Figura 6: Seção transversal do material cimentício do agregado reciclado (NG; ELGENSEN, 2018)

Kaliyavaradhan e Ling (2017), avaliaram que concretos e argamassas constituídas com RCD podem aumentar a taxa de captura de CO₂, uma vez que a sua aplicação em blocos de concreto proporcionou aumento de aproximadamente 272% na captura anual de CO₂ em relação à blocos sem a sua adição, de modo que, também, esses resíduos possam ser reintegrados, formando produtos de valor agregado, conforme demonstra a Figura 7.

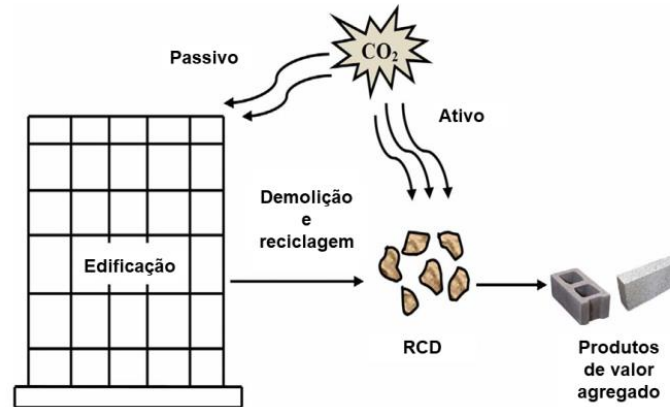


Figura 7: Potencialidade de captura de CO₂ de resíduos de construção de demolição (KALIYAVARADHAN; LING, 2017)

Andrade *et al.* (2018) verificaram que, apesar da substituição de agregado miúdo natural por reciclado demandar maior consumo de água para atingir o índice de consistência e, conseqüentemente, reduzir as propriedades mecânicas e físicas das argamassas, a taxa de CO₂ capturado aumentou consideravelmente, podendo ser verificado na Figura 8 pelo aumento da profundidade de carbonatação natural dos corpos de prova avaliados. Os autores estimaram um potencial de captura de CO₂ de até 170 g.CO₂/m² para as argamassas produzidas com agregado reciclado e de aproximadamente 70 g.CO₂/m² para as de referência. Xuan *et al.* (2016) verificaram que os agregados reciclados de concreto investigados, com tamanho de partícula da ordem de 5-10 mm e menores que 5 mm capturaram 0,81% e 2,15% de CO₂, respectivamente.

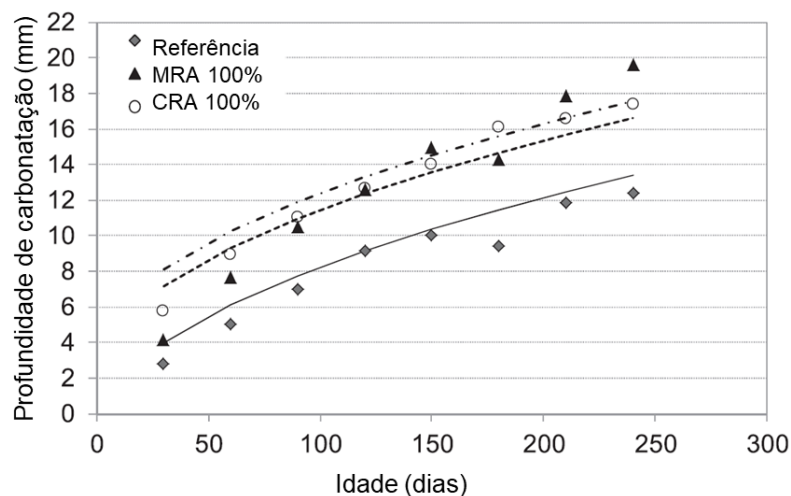


Figura 8: Profundidade de carbonatação versus tempo de exposição em laboratório de argamassas com substituição total de agregados naturais por agregados reciclados de cerâmica (CRA) e mistos cerâmica-materiais cimentícios (MRA) (ANDRADE *et al.*, 2018)

Apesar de já existirem estudos na literatura que abordam o tema de captura de CO₂ devido à carbonatação de concretos com RCD, até o momento não se pode comprovar a influência do agregado reciclado na maior absorção de CO₂, fato que justifica o desenvolvimento deste estudo.

2.4. FATORES QUE AFETAM A CAPTURA DE CO₂

Os principais fatores que afetam a carbonatação dos materiais à base de cimento também afetam a captura de CO₂. Ekolu (2018) e Pauletti, *et al.* (2007) citam que a profundidade de carbonatação é afetada por fatores como:

- a) O ambiente no qual o material cimentício está inserido
 - a. Protegido ou desprotegido de umidade/precipitações;
 - b. De uso domiciliar, comercial ou industrial;
 - c. Temperatura, umidade e teor de CO₂ do local;
- b) Revestimentos no qual o material cimentício foi submetido (tintas, sistemas de impermeabilização, cerâmicas de revestimento);
- c) Características intrínsecas ao processo de produção do material (porosidade, composição granulométrica, tipo de agregado utilizado, tipo de cimento utilizado, extensão do material cimentício)

Além dos fatores acima, discute-se que a área superficial exposta ao CO₂ afeta a captura de CO₂ (POSSAN *et al.*, 2017). Andrade e Sanjuán (2018) relatam que nos estudos de captura, deve ser considerada a relação m²/m³. Ou seja, o fator de forma do material exposto ao CO₂ afeta diretamente a carbonatação, de modo que quanto maior a área exposta, maior será a captura de CO₂ do elemento (Figura 9).

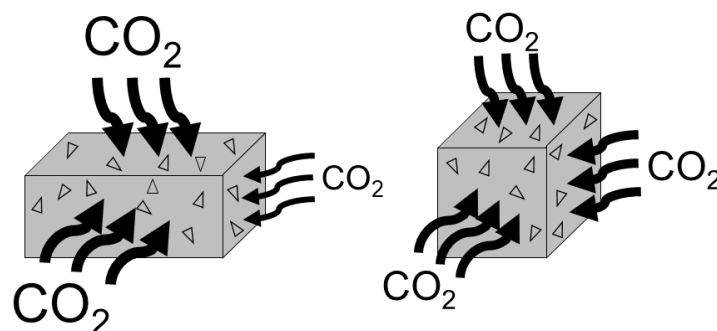


Figura 9: Relação m²/m³ de carbonatação em elementos de mesmo volume e dimensões diferentes

2.5. CAPTURA DE CO₂ POR MEIO DE ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A análise termogravimétrica (TG) é “uma técnica analítica usada para determinar a estabilidade térmica de um material e sua fração de componentes voláteis, monitorando a variação de peso que ocorre quando uma amostra é aquecida a uma taxa constante” (RAJISHA *et al.*, 2011, p.262).

Logo, determina-se, empregando-se um equipamento composto por uma balança, um sistema de aquecimento e um ambiente propício para evitar reações espontâneas (em grande maioria, o uso de fluxo de gás nitrogênio), o quanto um material, independente de sua composição ou natureza, perde em massa ao se aumentar a temperatura da amostra. Ao longo do tempo, da taxa de aumento de temperatura e do(s) componente(s) perdido(s), registra-se um gráfico (Figura 10) apresentando a perda de massa da amostra (SCRIVENER *et al.*, 2016).

No caso de materiais cimentícios, a análise termogravimétrica tem o potencial de analisar fases e compostos de hidratação (RUPASINGHE *et al.*, 2017; GRUYAERT *et al.*, 2010), teor de sulfatos (ZHAO *et al.*, 2018), lixiviação de compostos (ROSENQVIST *et al.*, 2017), potencial de captura de CO₂ (NEVES JUNIOR *et al.*, 2019; MAZURANA *et al.*, 2019), entre outros.

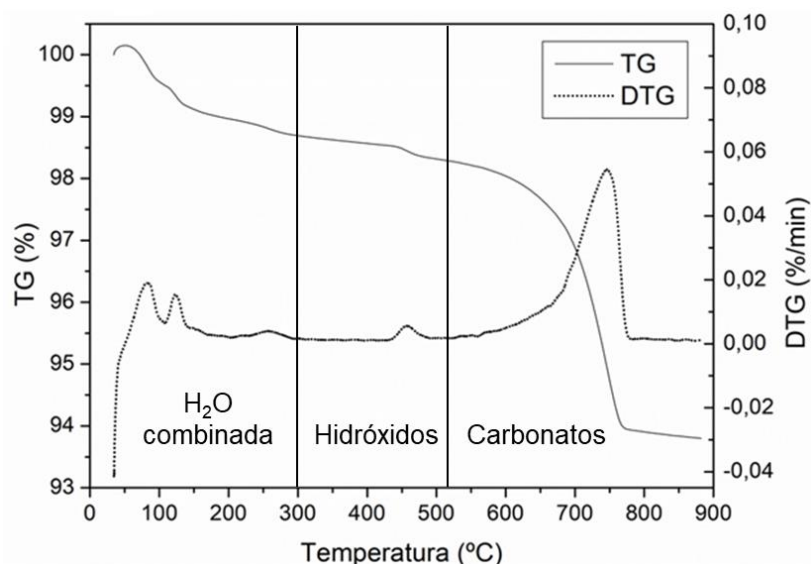


Figura 10: Exemplo de curva de análise termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTG) – Cimento CP V ARI

Os principais fatores de influência nos resultados do ensaio correspondem ao teor de umidade das amostras, o fluxo de nitrogênio do equipamento, a massa da amostra,

o material dos porta-amostras do equipamento (a qual recomenda-se alumina para amostras sólidas e platina, para amostras líquidas), a taxa de aquecimento, a forma de preparo para as amostras e, por fim, o tipo do equipamento (SCRIVENER *et al.*, 2016; FEIST, 2015). Para o estudo de captura de CO₂, deve-se ter cuidado especial no manuseio, estocagem e preparo de amostras, com o intuito de evitar pré-carbonatação.

Nos estudos de carbonatação e captura de CO₂, a análise consta na visualização da proporção existente dos hidróxidos presentes no material não carbonatado e os carbonatos nas amostras carbonatadas. Ou seja, é possível visualizar, com o auxílio da sua curva derivada (DTG), o potencial de captura de CO₂ do material em análise por meio do balanço da massa perdida entre a amostra carbonatada e não carbonatada (NEVES JUNIOR *et al.*, 2019; MAZURANA *et al.*, 2019).

3 METODOLOGIA

O presente estudo possui caráter experimental e conforme fluxograma da Figura 11, foi realizado em oito etapas: i) projeto de experimento; ii) caracterização dos materiais e dosagem dos concretos; iii) caracterização dos concretos; iv) carbonatação acelerada dos concretos; v) análise termogravimétrica (TG e DTG); vi) determinação das emissões de CO₂; vii) determinação da captura de CO₂ devido à carbonatação; e, viii) cálculo do balanço das emissões.

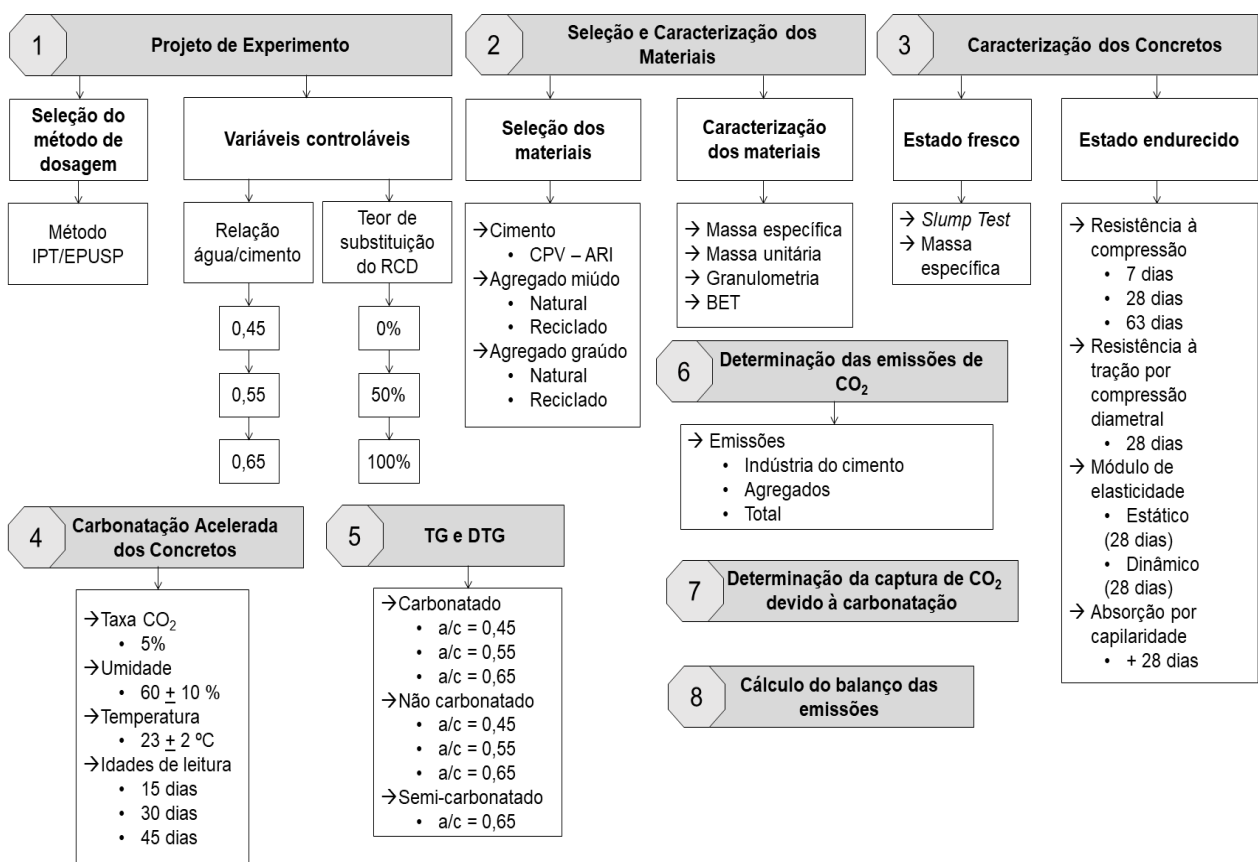


Figura 11: Fluxograma dos procedimentos.

3.1. DEFINIÇÃO DO PROJETO DE EXPERIMENTO (ETAPA 1)

3.1.1. Variáveis de estudo

Foi estabelecido, por meio de disponibilidade de tempo e recursos, a consideração das seguintes variáveis:

- a) A utilização de um único tipo de cimento (CP V ARI), sendo preponderante na escolha o grau de pureza do aglomerante, de modo a avaliar a captura de CO₂ com a menor interferência possível de adições;
- b) A substituição, em volume, dos agregados miúdos e graúdos naturais por reciclados, em três porcentagens (0%, 50% e 100%), com o intuito de avaliar a influência da adição destes na carbonatação dos concretos e nos cálculos posteriores de captura de CO₂;
- c) A consideração de três relações água/cimento para os concretos a serem confeccionados (0,45; 0,55 e 0,65), de modo a avaliar a influência do consumo de cimento na carbonatação dos concretos;

Portanto, ao se considerar as proposições definidas anteriormente, foi possível chegar a 16 combinações de misturas de concretos (Tabela 1).

Tabela 1: Variáveis dos concretos produzidos

Traços	Relação a/c	Teor de substituição (%)	
		Areia	Brita
0% (REF)	0,45	0	0
	0,55		
	0,65		
50 % AM	0,45	50	0
	0,55		
	0,65		
100% AM	0,45	100	0
	0,55		
	0,65		
50% AG	0,45	0	50
	0,55		
	0,65		
100% AG	0,45	0	100
	0,55		
	0,65		
50% AM 50% AG	0,55	50	50

Legenda: "REF"= Referência; "AM"= Agregado miúdo; "AG"= Agregado graúdo.

3.1.2. Definição do método de dosagem dos concretos

Definiu-se, dentre os métodos de dosagem descritos na literatura, que o método IPT/EPUSP, o qual apresenta grande flexibilidade na alteração das características e propriedades físicas dos materiais, bem pela consideração do teor de argamassa do concreto, é suficientemente adequado para a dosagem de concretos com RCD.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E DOSAGEM DOS CONCRETOS (ETAPA 2)

3.2.1. Seleção dos materiais

Devido ao alto grau de pureza, definiu-se a utilização do cimento CPV ARI – 40, visto que, dentre os cimentos disponíveis no mercado, é o que apresenta menor porcentagem de adições. O material (Figura 12(a)) foi adquirido em sacos de 20 kg no comércio local, e o cimento é oriundo de Adrianópolis, região metropolitana de Curitiba/PR.

Os agregados naturais utilizados foram adquiridos na região de Foz do Iguaçu/PR. A areia (Figura 12(b)), de origem quartzosa, é oriunda de jazida do Rio Paraná, localizada em Guaíra/PR e a brita (Figura 12(c)), de origem basáltica, oriunda de pedreira localizada em Foz do Iguaçu/PR.

Os agregados reciclados (Figura 12(d) e (e)) são oriundos de uma central de reciclagem de materiais de obra (caçambas) localizada em Cascavel/PR, e foram cedidos pelo proprietário para a pesquisa. O material reciclado é composto, basicamente, de resíduos argamassados, cerâmicas vermelhas, cerâmicas de revestimento, britas (com ou sem aderência de material argamassado) e, em reduzida quantidade, outros materiais.



Figura 12: (a) cimento; (b) agregado miúdo natural; (c) agregado miúdo reciclado; (d) agregado graúdo natural; (e) agregado graúdo reciclado.

3.2.2. Caracterização dos materiais

Na Tabela 2 apresenta-se os ensaios realizados para a caracterização dos materiais, bem como as normativas e procedimentos adotados nas determinações/análises.

Tabela 2: Ensaios de caracterização dos materiais realizados.

Ensaio	Norma Regulamentadora/ Procedimento	Materiais				
		Areia Natural	Areia Reciclada	Brita Natural	Brita Reciclada	Cimento
Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2003)	x	x			
	NBR NM 53 (ABNT, 2009)			x	x	
	NBR 16605 (ABNT, 2017)					x
Massa unitária	Mattana (2013)					x
	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	x	x	x	x	
Absorção de umidade	NBR NM 30 (ABNT, 2001)	x	x			
	NBR NM 53 (ABNT, 2009)			x	x	
Composição gravimétrica do agregado graúdo	Sem norma				x	
Granulometria	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	x	x	x	x	
Granulometria a laser	ISO 13220 (ISO, 2009) ¹					x
Área específica BET	ISO 9277 (ISO, 2010) ¹					x
Análise termogravimétrica (TG)	ASTM E 2550 (ASTM, 2017) ¹	x	x		x	x
Espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX)	NBR 16137 (ABNT, 2016)		x			x

¹: Norma para ensaios em geral

Os ensaios de caracterização dos agregados foram realizados no Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional (LTCl). Os ensaios de granulometria a laser e de área específica BET do cimento, bem como as análises termogravimétricas dos agregados e do cimento, foram realizados no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da UNILA/PTI. Já os ensaios de espectrometria por fluorescência de Raios-X foram realizados no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas da Universidade Federal do Paraná (UFPR) devido à ausência do equipamento na universidade.

3.2.1.1. Descrição dos ensaios de granulometria a laser e área específica BET

O ensaio de granulometria a laser foi realizado no equipamento da marca CILAS, modelo 1190 (Figura 13). A faixa de leitura dos grãos compreende entre 0,04 e 2500 μm e foram analisadas em líquido (água destilada), sem a presença de dispersante e com índice de obscuração de aproximadamente 25%. Analisou-se três amostras, de modo que houvesse maior proximidade de dados entre as repetições de ensaio.

O ensaio de área específica BET foi realizado no equipamento da marca Quantachrome, modelo NOVA 3200e (Figura 14). Para a desgaseificação da amostra de cimento, foi inserida em um porta amostra de quartzo cerca de 200 mg de cimento, empregou-se vácuo à 40°C por 16 horas, conforme recomenda Scrivener *et al.* (2016). Após o processo de desgaseificação, a amostra foi submetida ao ensaio, no qual o porta amostra é retirado do compartimento de desgaseificação, onde é submetido novamente ao vácuo e ao fluxo de nitrogênio, e imerso no nitrogênio líquido, onde o equipamento faz a leitura da amostra.



Figura 13: Equipamento utilizado para o ensaio de granulometria a laser



Figura 14: Equipamento utilizado para o ensaio de área específica BET

3.2.1.2. Composição gravimétrica do agregado graúdo reciclado

Devido ao tamanho relativo dos componentes do agregado graúdo reciclado, resolveu-se triturar os agregados para fazer a análise. O procedimento de moagem e composição do agregado graúdo para o ensaio de TG e DTG ocorreu da seguinte forma:

- a) Selecionou-se três amostras de 2 kg do agregado graúdo reciclado;
- b) Separou-se, em porcentagem de massa, os materiais de cada amostra conforme sua classificação, conforme a Figura 15;
- c) Fez-se a moagem dos materiais, separadamente, com o auxílio de um almofariz com pistilo cerâmicos, de modo que o material passasse na peneira 0,15 mm (nº 100). Considerou-se o agregado basáltico, com ou sem argamassa aderida, como um único parâmetro (agregado basáltico, apenas), visto que o percentual de aderência de argamassa, em massa, era irrisório em análise visual.

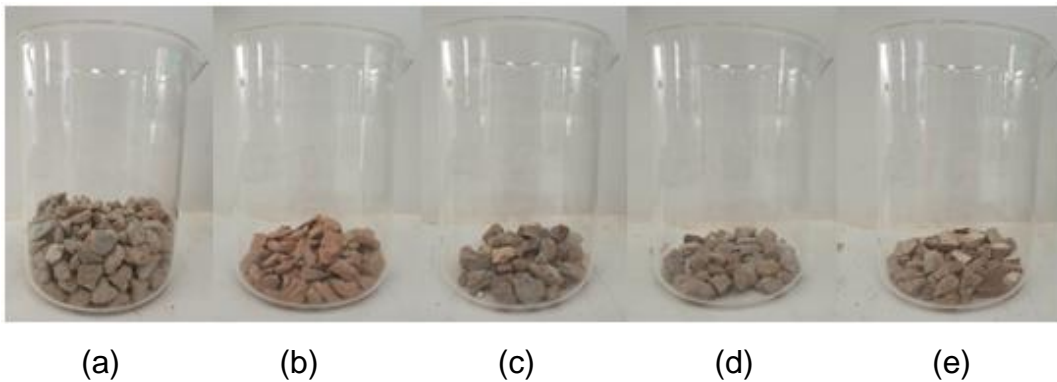


Figura 15: Composição do agregado graúdo reciclado: (a) argamassa; (b) cerâmica vermelha; (c) agregado basáltico; (d) agregado basáltico com aderência de argamassa; (e) cerâmica de revestimento

- d) Cada material foi armazenado em um porta amostra distinto para, após, fazer a proporção em massa do agregado graúdo composto (Figura 16), produto esse que foi ensaiado no analisador termogravimétrico.



Figura 16: Compostos moídos e composição do agregado graúdo reciclado moído

3.2.3. Dosagem dos concretos

A dosagem tendo como base os preceitos do método IPT/EPUSP foi conduzida da seguinte forma:

- a) Estabeleceu-se, para a dosagem, o teor de argamassa (α) e a relação água/materiais secos (H) mais utilizados para a confecção de concretos comerciais na região do estudo, de modo a determinar os valores dos teores de agregados totais (m) para cada relação água/cimento. Os valores encontrados constam na Tabela 3

Tabela 3: Valores de "m" para as relações água/cimento requisitadas

Relação água/cimento	α	m	H
0,45	53%	4,5	8,18%
0,55		5,8	8,09%
0,65		7,1	8,02%

- b) Com a obtenção de "m", através da Equação 5 e da Equação 6, estabeleceu-se o valor do teor de agregados miúdos (a) e graúdos (p), respectivamente.

$$a = \left[\frac{\alpha(1 + m)}{100} \right] - 1 \quad (5)$$

$$p = m - a \quad (6)$$

- c) Por fim, a Tabela 4 mostra as 16 proporções de concretos calculadas, considerando a massa como unidade de proporção. Considerando a quantidade de material utilizada para confeccionar 1 m³ de concreto, obteve-se a Tabela 5.

Tabela 4: Proporcionamento dos concretos em massa

Concretos	Cimento (c)	Areia (a)		Brita (p)		Água (a)
		Natural	Reciclada	Natural	Reciclada	
REF 0,45	1	1,92	---	2,59	---	0,45
REF 0,55	1	2,60	---	3,20	---	0,55
REF 0,65	1	3,29	---	3,81	---	0,65
50%AM 0,45	1	0,96	0,83	2,59	---	0,45
50%AM 0,55	1	1,30	1,13	3,20	---	0,55
50%AM 0,65	1	1,65	1,44	3,81	---	0,65
100%AM 0,45	1	---	1,67	2,59	---	0,45
100%AM 0,55	1	---	2,27	3,20	---	0,55
100%AM 0,65	1	---	2,87	3,81	---	0,65
50%AG 0,45	1	1,92	---	1,29	1,04	0,45
50%AG 0,55	1	2,60	---	1,60	1,29	0,55
50%AG 0,65	1	3,29	---	1,90	1,54	0,65
100%AG 0,45	1	1,92	---	---	2,09	0,45
100%AG 0,55	1	2,60	---	---	2,58	0,55
100%AG 0,65	1	3,29	---	---	3,07	0,65
50%AM 50%AG 0,55	1	1,30	1,13	1,60	1,29	0,55

Tabela 5: Quantidade de material necessária para 1m³ de concreto

Concretos	Cimento (kg)	Areia (kg)		Brita (kg)		Água (kg)	Água de absorção (kg) ¹	Água total ²
		Natural	Reciclada	Natural	Reciclada			
REF 0,45	419,45	803,26	---	1084,29	---	188,75	12,2	201,0
REF 0,55	338,88	882,43	---	1083,05	---	186,38	12,9	199,3
REF 0,65	284,27	936,09	---	1082,20	---	184,77	13,4	198,1
50%AM 0,45	419,45	401,63	350,06	1084,29	---	188,75	35,1	223,8
50%AM 0,55	338,88	441,22	384,56	1083,05	---	186,38	38,0	224,4
50%AM 0,65	284,27	468,04	407,94	1082,20	---	184,77	40,0	224,8
100%AM 0,45	419,45	---	700,11	1084,29	---	188,75	57,9	246,7
100%AM 0,55	338,88	---	769,12	1083,05	---	186,38	63,1	249,5
100%AM 0,65	284,27	---	815,89	1082,20	---	184,77	66,6	251,4
50%AG 0,45	419,45	803,26	---	542,15	437,84	188,75	40,2	228,9

¹ : Água correspondente às absorções dos agregados.

² : Água referente à relação água/cimento dos concretos, mais a água de absorção dos agregados.

Tabela 5 (Continuação...)

Concretos	Cimento (kg)	Areia (kg)		Brita (kg)		Água (kg)	Água de absorção (kg) ³	Água total ⁴
		Natural	Reciclada	Natural	Reciclada			
50%AG 0,55	338,88	882,43	---	541,52	437,33	186,38	40,8	227,2
50%AG 0,65	284,27	936,09	---	541,10	436,99	184,77	41,3	226,0
100%AG 0,45	419,45	803,26	---	---	875,67	188,75	68,1	256,9
100%AG 0,55	338,88	882,43	---	---	874,67	186,38	68,7	255,1
100%AG 0,65	284,27	936,09	---	---	873,98	184,77	69,1	253,9
50%AM 50%AG 0,55	338,88	441,22	384,56	541,52	437,33	186,38	65,9	252,3

3.2.4. Confeção dos concretos

Os 16 concretos foram dosados e confeccionados no Laboratório de Materiais e Dosagem (LADEMA) da UNILA/PTI. A betoneira utilizada possuía capacidade de 250 litros. Foram confeccionados 18 corpos de prova 10x20 (Figura 17 e Figura 18) por concreto produzido, de modo a totalizar 288 amostras.



Figura 17: Corpos de prova após a concretagem



Figura 18: Corpos de prova em processo de cura úmida

Nos concretos de referência e os com composição de agregado graúdo reciclado, a água de absorção dos agregados foram inseridas diretamente na betoneira. Já nos casos com uso de agregado miúdo reciclado, a água de absorção foi previamente inserida no material 15 minutos antes da realização das concretagens, de modo a evitar que o concreto

³ : Água correspondente às absorções dos agregados.

⁴ : Água referente à relação água/cimento dos concretos, mais a água de absorção dos agregados.

ficasse seco ou segregado após o abatimento devido à absorção da água de dosagem.

Os corpos de prova foram moldados (Figura 17) e adensados com o auxílio de um vibrador de imersão. Após 24 horas de cura dentro do molde, foram imersos em água saturada de cal (Figura 18), de modo a realizar cura úmida até a posterior utilização dos corpos de prova para ensaios e análises nas idades requeridas.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS (ETAPA 3)

3.3.1. Estado fresco

Avaliou-se, no estado fresco:

- a) Abatimento de tronco de cone, conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998), fixando como alvo base 110 ± 30 mm.
- b) Massa específica, conforme a NBR 9833 (ABNT, 2009).

3.3.2. Estado endurecido

A Tabela 6 apresenta as propriedades dos concretos avaliadas no estado endurecido, suas normas regentes e a quantidade de corpos de prova que foram utilizados para as avaliações.

Tabela 6: Ensaios realizados no estado endurecido.

Ensaios	Natureza da propriedade	Norma Regulamentadora	Número de CP's por traço	Idades de ensaio
Absorção por capilaridade	Física	NBR 9779 (ABNT, 2012)	3	+ 28 dias
Difração de Raios-X	Mineralógica	---	---	+ 28 dias
Resistência à compressão axial	Mecânica	NBR 5739 (ABNT, 2008)	3 3 3	7 dias 28 dias 63 dias
Resistência à tração por compressão diametral		NBR 7222 (ABNT, 2011)	3	28 dias
Módulo de elasticidade estático		NBR 8522 (ABNT, 2017)	3	28 dias
Módulo de elasticidade dinâmico		ASTM E-1876 (ASTM, 2015)	3	28 dias

O equipamento utilizado para realizar o módulo de elasticidade dinâmico é da marca SONELASTIC, modelo IED (Figura 19). Já as prensas utilizadas para a realização dos ensaios de compressão axial, compressão diametral e módulo de elasticidade estático pertencem ao LTCI da Itaipu Binacional, e são da marca TIME, de origem chinesa e da marca TORSEE, de origem japonesa (Figura 20 e Figura 21).



Figura 19: Equipamento SONELASTIC, utilizado para a realização do módulo de elasticidade dinâmico⁵



Figura 20: Prensa hidráulica da marca TIME, usada para realização de ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade estático



Figura 21: Prensa hidráulica da marca TORSEE, usada para realização de ensaios à compressão axial e tração por compressão diametral

A análise de difração de raios-x (DRX), disponível no PTI, foi realizada nas amostras de referência e com 100% de substituição por agregados miúdos e graúdos reciclados, apenas para concretos com relação água/cimento 0,65 e nas fases carbonatadas (C), semi-carbonatadas (SC) e não carbonatadas (NC). O difratômetro é da marca Panalytical, modelo Empyrean, com radiação $\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$, entre 10° e 80° de 2θ . Os espectros foram interpretados comparando-se com padrões do banco de dados COD (Crystallography Open Database).

As amostras ensaiadas foram aproveitadas das mesmas amostras

⁵ Equipamento do LADEMA/Unila instalado junto ao LTCI/Itaipu via acordo de cooperação técnica.

separadas para a análise termogravimétrica e foram realizadas por spin, com tempo médio de 30 minutos de leitura por amostra.

3.4. CARBONATAÇÃO ACELERADA DOS CONCRETOS (ETAPA 4)

A carbonatação dos concretos foi estudada no modo acelerado, em uma câmara climatizada com controles de temperatura, umidade e taxa de CO₂, da marca BASS, modelo UUC-RH-STD-CO2-1000/2016, conforme a Figura 22 e Figura 23.

Conforme recomendação de Pauletti *et al* (2007), para o ensaio acelerado, adotou-se temperatura de 23 ± 2 °C, taxa de CO₂ de 5% (50.000 ppm) e umidade relativa de 60 ± 10 %.

É importante salientar que os corpos de prova foram submetidos previamente ao sazonalamento, que consiste em regularizar a umidade dos concretos e evitar que ocorra a carbonatação das amostras antes do ensaio em si (PAULETTI *et al.*, 2007). Para isso, os concretos foram previamente secos em estufa a 100 ± 5 °C por 24 horas e após, acondicionados em local protegido e estanque. Por fim, foram inseridos na câmara (Figura 24) e submetidos às condições de umidade e temperatura definidos até obterem as condições ideais (considerou-se 3 dias) para, então, ligar o sensor de CO₂ e iniciar a carbonatação.



Figura 22: Câmara climatizada utilizada para os ensaios de carbonatação



Figura 23: Painel de controle da câmara climatizada



Figura 24: Corpos de prova acondicionados para os ensaios de carbonatação

A forma dos corpos de prova ensaiados, bem como suas dimensões e quantidade por traço estão especificados na Tabela 7:

Tabela 7: Informações sobre os corpos de prova submetidos a carbonatação

Corpos de prova			Leitura
Forma	Dimensão (cm)	Nº CP's por traço	
Cilíndrico ¹	10x10	4	15 dias
		4	25 dias

¹ Corpo de prova obtido por meio do corte transversal de um corpo de prova cilíndrico de 10 x 20 cm.

3.5. ANÁLISE TÉRMOGRAVIMÉTRICA (TG E DTG) (ETAPA 5)

3.5.1. Procedimentos de ensaio

A análise termogravimétrica (TG) e a termogravimetria derivada (DTG) têm como intuito quantificar, através do percentual de perda de massa *versus* temperatura, a proporção carbonatada das amostras expostas à ação do CO₂. Para tal, foram extraídas pequenas alíquotas de argamassa⁶ dos concretos submetidos à carbonatação acelerada de zonas carbonatadas (C), não carbonatadas (NC) e semicarbonatadas (SC), conforme indicado na Tabela 8.

⁶ Apesar de o material de estudo ser concreto, a análise termogravimétrica foi conduzida em argamassa, dada a pequena quantidade de material necessária para o ensaio (aproximadamente 50 miligramas).

Tabela 8: Regiões do concreto analisadas por relação água/cimento dos concretos

Relação água/cimento	Área analisada		
	Carbonatada (C)	Não carbonatada (NC)	Semi- carbonatada (SC)
0,45	x	x	
0,55	x	x	
0,65	x	x	x

Para concretos com relação água/cimento 0,65, também fez-se a análise da região semi-carbonatada (SC), compreendida entre a área carbonatada e não carbonatada. Cabe salientar que a região semi-carbonatada é de difícil coleta, uma vez que se encontra em uma pequena faixa da amostra (Ver Figura 26) e, no caso de concretos, é ainda mais prejudicada devido à presença de agregados graúdos. Por esse motivo, escolheu-se apenas uma relação água/cimento para coletar as amostras, com o intuito de comparar os gráficos TG/DTG obtidos com os das amostras carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC).

A retirada das alíquotas se deu em amostra sem aspensão de indicador químico, sendo tomado como referência das zonas carbonatadas e não carbonatadas do lado “B” do corpo de prova, conforme esquemas apresentados na Figura 25 e Figura 26.

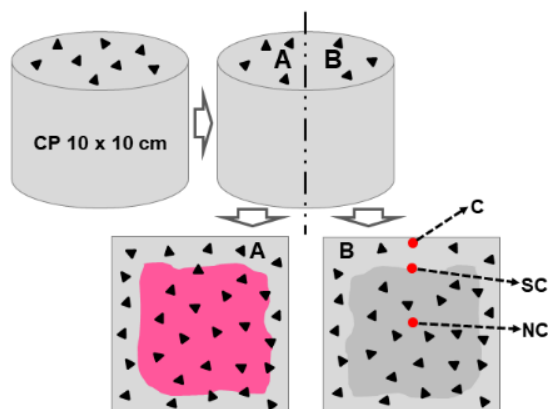


Figura 25: Representação esquemática do processo de coleta de alíquotas de amostras

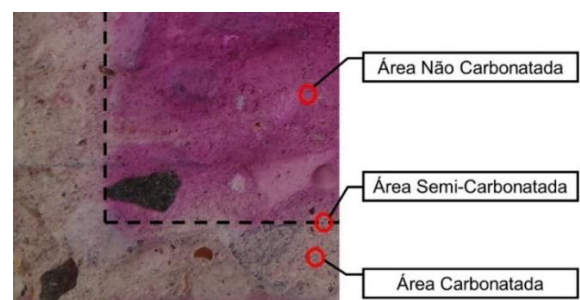


Figura 26: Representação real do processo de coleta das alíquotas das amostras

O procedimento de ensaio decorreu conforme os passos a seguir:

- Após a carbonatação acelerada atingir os tempos definidos de exposição ao CO_2 , dois corpos de prova de cada traço foram retirados da câmara;
- Abriu-se longitudinalmente os corpos de prova, com o auxílio da prensa

hidráulica do LTCl da Itaipu Binacional;

- c) Aplicou-se, com o auxílio de um aspersor, fenolftaleína a 1%, de modo a visualizar as áreas carbonatadas e não carbonatadas dos concretos por meio da diferenciação de pH da área carbonatada (ácida) e não carbonatada (básica) do lado A do corpo de prova;
- d) Retirou-se do lado B do corpo de prova, com o auxílio de um esculpidor *Lecron* (Figura 27), cerca de 80 mg de amostra de cada área avaliada, totalizando 37 amostras.
- e) Imediatamente após a coleta, cada amostra foi armazenada em porta amostras hermeticamente fechado, sendo armazenada em local estanque até a realização do ensaio.
- f) Passou-se a amostra na peneira 0,15mm (nº 100) e inseriu-a no porta amostra de alumina do analisador termogravimétrico.

O equipamento utilizado para a análise térmica (Figura 28) é da marca Percking Elmer, modelo STA 8000, disponível no Laboratório de Materiais e Dosagem (LADEMA) da UNILA/PTI, com faixa de leitura variando entre 15 e 1600 °C.



Figura 27: Esculpidor *lecron*



Figura 28: Analisador termogravimétrico

Utilizou-se como parâmetros de ensaio o uso de cadinho de alumina; a consideração de 50 mg de massa, aproximadamente, para cada amostra, fluxo de nitrogênio de 20 mL.min⁻¹, taxa de aquecimento do equipamento de 20°C.min⁻¹ e intervalo de aquecimento entre 35°C e 900°C

Anteriormente ao ensaio, seguiu-se os procedimentos de remoção da umidade das amostras conforme Scrivener *et al.* (2016), deixando cada uma por 1 hora dentro do equipamento à temperatura de 35°C, de modo a separar a água livre das amostras da água combinada, esta última obtida devido à hidratação da gipsita e etringita.

Estes procedimentos de ensaio foram também efetuados para o cimento utilizado (sem a etapa de remoção da umidade), para o agregado miúdo reciclado (triturado e passado na peneira 0,15 mm) e para o agregado graúdo reciclado, de modo a verificar as suas propriedades e auxiliar nos cálculos de captura de CO₂.

3.6. DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ (ETAPA 6)

Para a determinação do balanço de emissões (Etapa 8), é necessário que se estabeleça quanto cada material dos concretos (cimento e agregados naturais e reciclados) liberam de CO₂ na atmosfera.

3.6.1. Emissões da indústria do cimento

Para a determinação total (desconsiderando emissões referentes à água) das emissões oriundas da produção do cimento, utiliza-se a Equação 7:

$$E_{cim} = (E_{clinker} \cdot \%_{clinker_{cim}}) + (E_{energia} \cdot FE_{energia}) \quad (7)$$

Onde:

E_{cim} = Emissão total da indústria do cimento (kgCO₂/ton);

$E_{clinker}$ = Emissão oriunda da produção de clínquer (kgCO₂/ton);

$\%_{clinker_{cim}}$ = Porcentagem de clínquer do cimento analisado;

$E_{energia}$ = Emissão oriunda da energia elétrica gasta no processo (kWh/ton);

$FE_{energia}$ = Fator de emissão da energia elétrica (kgCO₂/kWh).

Verifica-se que, na Equação 7, que os fatores preponderantes na liberação de CO₂ na indústria do cimento provém da:

- a) Produção de clínquer, na qual envolvem o processo de calcinação (Equação 4) e de aquecimento dos fornos, que se utilizam de materiais orgânicos que liberam CO₂ na sua queima;
- b) Gasto de energia elétrica no processo de produção.

A Tabela 9 mostra os dados obtidos para a inserção na equação, bem como as fontes dos dados.

Tabela 9: Dados utilizados na equação

Variáveis	Valores	Fonte
$E_{clinquer}$	866 kgCO ₂ /ton	(WBCDS, 2016)
$\%_{clinquer\ cim}$	85-95% ¹	NBR 16697 (ABNT, 2018)
$E_{energia}$	109 kWh/ton	(WBCDS, 2016)
$FE_{energia}$	0,08 kgCO ₂ /kwh	(MCTIC, 2016)

¹: Desconsiderando o teor de sulfatos, estimado em 5% para o cimento CP V ARI e os percentuais máximos de filler carbonático que pode ser adicionado a este tipo de cimento no Brasil.

3.6.2. Emissões provenientes dos agregados naturais e reciclados

Considerando que os valores de emissão de CO₂ dos agregados são bastante escassos, especialmente considerando a região de Foz do Iguaçu, resolveu-se considerar índices presentes na literatura de localidades relativamente próximas e de um projeto que está em andamento na universidade, de autoria de Moraes e Punhagui (s/d) ⁷.

Os dados de emissões para agregados naturais encontrados constam na Tabela 10. Como não foram encontrados dados na literatura referente às emissões de CO₂ para o processamento de agregados reciclados de RCD, seja miúdo ou graúdo, prezou-se em utilizar os valores de emissões do agregado graúdo natural, visto que o processo de produção é bastante similar.

Tendo em vista a variabilidade dos dados da literatura, será considerada a mediana como parâmetro de emissões nas estimativas de captura de CO₂.

Tabela 10: Dados de emissões de CO₂ de agregados naturais encontrados na literatura.

Agregado	Valores (kg·CO ₂ /ton)	Local do trabalho	Fonte
Miúdo	4 - 86	Foz do Iguaçu/PR	(MORAES, PUNHAGUI, s/d)*
	9,68	Porto Alegre/RS	(CUNHA, 2016)
	86,1	Rio de Janeiro/RJ	(COSTA, 2012)
Média	46,45		
Mediana	47,84		

* Dados compilados pelos autores no projeto de pesquisa PID1386-2018, cadastrado na PRPPG/Unila

⁷ Dados compilados pelos autores no projeto de pesquisa PID1386-2018, cadastrado na PRPPG/Unila.

Tabela 10 (Continuação...)

Agregado	Valores (kg·CO₂/ton)	Local do trabalho	Fonte
Graúdo	9 - 86	Foz do Iguaçu/PR	(MORAES, PUNHAGUI, s/d)*
	27,41	Porto Alegre/RS	(CUNHA, 2016)
	85,80	Rio de Janeiro/RJ	(COSTA, 2012)
Média	52,05		
Mediana	56,61		

* Dados compilados pelos autores no projeto de pesquisa PID1386-2018, cadastrado na PRPPG/Unila.

3.6.3. Emissões totais dos concretos

O cálculo, portanto, das emissões totais do concreto é obtido pela Equação 8:

$$E_{conc} = (E_{cim} \cdot Q_{cim}) + (E_{amn} \cdot Q_{amn}) + (E_{amr} \cdot Q_{amr}) + (E_{agn} \cdot Q_{agn}) + (E_{agr} \cdot Q_{agr}) \quad (8)$$

Onde:

E_{conc} = Emissão total do concreto (kgCO₂/ton);

E_{cim} = Emissão oriunda da indústria do cimento (kgCO₂/ton);

E_{amn} = Emissão oriunda do agregado miúdo natural (kgCO₂/ton);

E_{amr} = Emissão oriunda do agregado miúdo reciclado (kgCO₂/ton);

E_{agn} = Emissão oriunda do agregado graúdo natural (kgCO₂/ton);

E_{agr} = Emissão oriunda do agregado graúdo reciclado (kgCO₂/ton);

Q_{cim} = Consumo de cimento para produzir 1m³ de concreto (ton);

Q_{amn} = Consumo de agregado miúdo natural para 1m³ de concreto (ton);

Q_{amr} = Consumo de agregado miúdo reciclado para 1m³ de concreto (ton);

Q_{agn} = Consumo de agregado graúdo natural para 1m³ de concreto (ton);

Q_{agr} = Consumo de agregado graúdo reciclado para 1m³ de concreto (ton);

3.7. DETERMINAÇÃO DA CAPTURA DE CO₂ DEVIDO À CARBONATAÇÃO (ETAPA 7)

3.7.1. Metodologia considerando a profundidade de carbonatação

A primeira metodologia consiste na verificação da captura de CO₂ por meio

da profundidade de carbonatação. Presente na normativa BRE EM 15804 (BRE, 2014), a equação para determinar a captura de CO₂ foi adaptada para os materiais presentes nos concretos e está constada a seguir (Equação 9):

$$Cap_{CO_2} = e_c \cdot A \cdot M \cdot [(CaO_{cim} \cdot Q_{cim} \cdot \%C_{cim} \cdot \%CaO_{cim}) + (CaO_{am} \cdot Q_{am} \cdot \%CaO_{am}) + (CaO_{ag} \cdot Q_{ag} \cdot \%CaO_{ag})] \quad (9)$$

Onde:

e_c : profundidade de carbonatação (mm);

M: fração molar química entre CO₂ e CaO, advindo de cálculo estequiométrico (0,786);

A: área da seção transversal exposta ao CO₂ (m²);

Q_{cim} : teor de cimento em 1m³ (kg);

Q_{am} : teor de agregado miúdo reciclado em 1m³ (kg);

Q_{ag} : teor de agregado graúdo reciclado em 1m³ (kg);

CaO_{cim} : quantidade de óxido de cálcio presente no cimento utilizado (%);

CaO_{am} : quantidade de óxido de cálcio presente no agregado miúdo reciclado utilizado (%);

CaO_{ag} : quantidade de óxido de cálcio presente no agregado graúdo reciclado utilizado (%);

$\% C_{cim}$: porcentagem de clínquer presente no cimento (%);

$\% CaO_{cim}$: proporção de óxido de cálcio que carbonata totalmente nas amostras de concreto, referente à quantidade presente no cimento (%);

$\% CaO_{am}$: proporção de óxido de cálcio que carbonata totalmente nas amostras de concreto, referente à quantidade presente no agregado miúdo reciclado (%);

$\% CaO_{ag}$: proporção de óxido de cálcio que carbonata totalmente nas amostras de concreto, referente à quantidade presente no agregado graúdo reciclado (%);

Os valores a serem utilizados na equação vêm da espectrometria por fluorescência de raios-x (FRX) dos materiais, da medição da profundidade de carbonatação dos corpos de prova analisados, bem como a área submetida à carbonatação de cada corpo de prova, e os parâmetros sem informações, serão considerados valores da literatura (Ver Tabela 19).

3.7.2. Metodologia considerando a análise termogravimétrica dos concretos

A presente metodologia, apresentada por Dweck *et al.* (2001), consiste em determinar a captura de CO₂ ao se comparar a quantidade de hidróxidos e carbonatos volatilizados na análise termogravimétrica das amostras carbonatadas e não carbonatadas do material cimentício a ser analisado, bem como os graus de hidratação desse material. Também busca verificar a influência dos materiais da composição do concreto (cimento, agregados, aditivos) na carbonatação das amostras.

A análise em questão é conduzida da seguinte forma:

- Realiza-se a TG e DTG separadamente dos materiais sujeitos à carbonatação que compõem a amostra a ser analisada (cimento, agregados, aditivos),
- Repete-se o processo nos materiais cimentícios⁸ de referência (não carbonatado) e do material submetido à ação de CO₂ (semi-carbonatado⁹ e carbonatado);
- Verifica-se, com o auxílio de um software adequado¹⁰, os pontos nas curvas TG e DTG onde ocorrem a volatilização dos compostos dos materiais e do material cimentício não carbonatados (NC), semi-carbonatados (SC) e carbonatados (C), conforme detalhe da Figura 29.

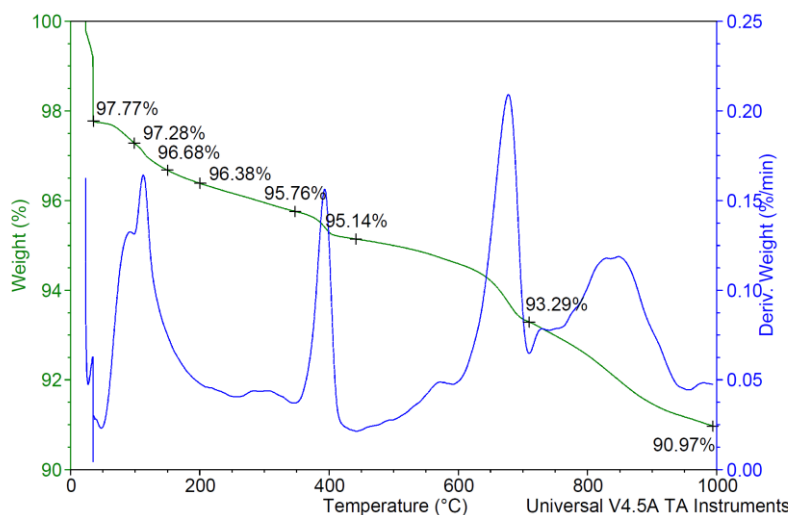


Figura 29: Marcação dos pontos de referência de perda de massa, de acordo com a TG e DTG
Fonte: Notas de aula do Prof. Dr. Alex Neves Junior (2019)¹¹

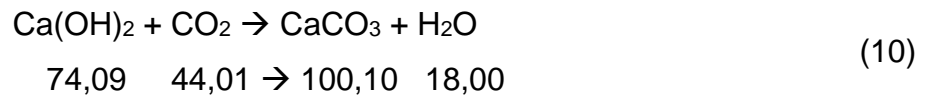
⁸ No estudo em questão, conforme apresentado no item 3.5.1, o material cimentício coletado e analisado por TG e DTG é argamassa.

⁹ Realizado apenas para concretos com água/cimento 0,65.

¹⁰ Por exemplo, o OriginPro® ou softwares dos próprios analisadores termogravimétricos que tenham essa função.

¹¹ NEVES JUNIOR, A. **Introdução à análise térmica**: Notas de aula da disciplina "Emissões e captura de CO₂ em

- d) Em software de tabulação (Ex.: Excel), insere-se os valores obtidos na alínea “c”, tanto para os materiais quanto para os compósitos;
- e) A partir da proporção do concreto, desconsiderando materiais inertes (agregados naturais), definem-se as porcentagens de perda de carbonatos para cada amostra;
- f) Por estequiometria, determina-se a quantidade de CO₂ absorvido na reação de carbonatação do compósito, conforme a Equação 10, que apresenta a massa molar de cada composto da reação de carbonatação



3.8. BALANÇO DE EMISSÕES (ETAPA 8)

O balanço de emissões relaciona a quantidade de CO₂ emitida, considerando todos os materiais utilizados para a sua confecção (exceto o superplastificante e a água), para a produção do concreto com a quantidade de CO₂ absorvida pelos concretos ao longo do tempo.

O balanço é obtido pela Equação 11, por meio de simples subtração entre os dois parâmetros e pela Equação 12, em percentual de CO₂ capturado em relação ao emitido no processo de produção.

$$B_{CO_2} = E_{conc} - Cap_{CO_2} \quad (11)$$

$$Captura_{CO_2}(\%) = \left(\frac{Cap_{CO_2}}{E_{conc}} \right) \cdot 100 \quad (12)$$

Onde:

B_{CO_2} = Balanço de emissões (kg);

E_{conc} = Emissões provenientes dos concretos (kg);

Cap_{CO_2} = Potencial de captura de CO₂ (kg).

$Captura_{CO_2}$ = valor de captura de CO₂ relativo (%).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para o cimento foram obtidos massa específica de $2,99 \text{ g/cm}^3$, massa unitária de 1,01 e área específica BET de $44900 \text{ cm}^2/\text{g}$, considerada elevada, mas que condiz com um cimento de alta resistência inicial. Para a granulometria a laser, obteve-se o gráfico representado na Figura 30, no qual verifica-se que a curva de frequência do cimento é bimodal (dois picos), sendo que a maioria das partículas se concentram no segundo pico do histograma. Além disso, verifica-se que as partículas com diâmetro médio ($v, 0,5$) se encontram em limites inferiores a $13,89 \mu\text{m}$.

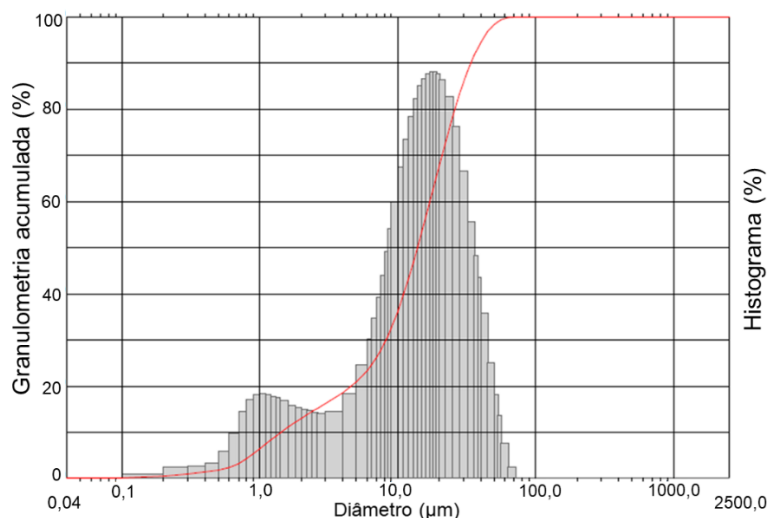


Figura 30: Granulometria a laser do cimento

A análise termogravimétrica dos materiais carbonatáveis (TG), bem como suas curvas derivadas (DTG) e massas residuais (%) estão representadas na Figura 31(a) e (b), respectivamente. Encontrou-se, para a análise realizada, um percentual de 93,8% residual à 900°C para o cimento, de modo que a maior perda de massa da amostra se concentrou entre 570°C e 780°C (aproximadamente 4,23%) que, de acordo com Scrivener *et al.* (2016) e Neves Junior *et al.* (2019), corresponde aos carbonatos (Ponto 4 da Figura 31(b)). Já nos RCDs, além da perda de massa originada pela volatilização dos hidróxidos e carbonatos de cálcio (Pontos 3 e 4 da Figura 31(b)) e do residual de 85,75% e 79,34% para o agregado gráudo e miúdo, respectivamente, é visualizável na DTG, de acordo com Mazurana *et al.* (2019) e Scrivener *et al.* (2016), outros álcalis carbonatáveis existentes em pequenas quantidades, tais como hidróxido de sódio, hidróxido de potássio e hidróxido de magnésio (Pontos 1 e 2 da

Figura 31(b)).

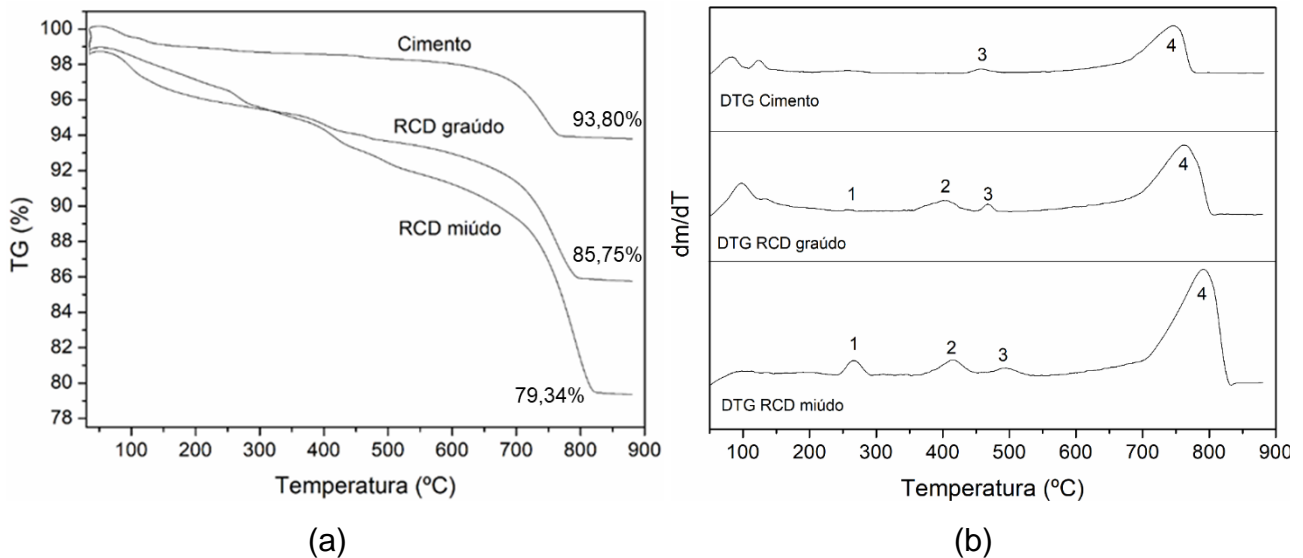


Figura 31: TGs (a) e DTGs (b) dos materiais carbonatáveis

Os dados obtidos na espectrometria por fluorescência de raios-X (FRX) do cimento e do agregado miúdo reciclado são mostrados na Tabela 11 e

Tabela 12. Nota-se que, aproximadamente 3/5 do cimento correspondem à óxido de cálcio, sendo seguido, em menor proporções, por sílica e óxidos de alumínio e ferro. Já no caso do agregado miúdo reciclado, nota-se a forte presença de material silicoso no agregado (66,6%), seguido, em menores proporções, por óxidos de cálcio, alumínio, ferro e magnésio, indicando a presença de materiais cimentícios hidratados e/ou anidros em sua composição.

Tabela 11: Espectrometria por fluorescência de raios-x do cimento CP V - ARI

CaO (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	SrO (%)	P ₂ O ₅ (%)	MnO (%)	P.F. (%)
61,6	17,8	5,6	4,2	3,4	2,6	0,9	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	2,90

Legenda: P.F.= Perda ao fogo

Fonte: UFPR, 2019

Tabela 12: Espectrometria por fluorescência de raios-x do agregado miúdo reciclado

SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	TiO ₂ (%)	K ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	MnO (%)	ZrO ₂ (%)	SrO (%)	P.F. (%)
66,6	8,2	5,8	5,7	2,0	1,1	0,5	0,3	0,3	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	9,33

Legenda: P.F.= Perda ao fogo

Fonte: UFPR, 2019

Os resultados de caracterização física dos agregados naturais e reciclados estão dispostos na Tabela 13. Observa-se que os agregados reciclados apresentaram

menor massa específica que os agregados naturais. Conforme relatado por Andrade *et al.* (2018), isto deve-se a presença de materiais com menores massas específicas, tais como cerâmicas e argamassas, que tendem a ter maior porosidade. Conseqüentemente, a absorção de água dos agregados reciclados foi superior aos naturais (em torno de 7%).

Tabela 13: Características dos agregados

Ensaio	Materiais			
	Areia Natural	Areia Reciclada	Brita Natural	Brita Reciclada
Massa específica (g/cm ³)	2,66	2,32	2,94	2,37
Massa unitária (g/cm ³)	1,50	1,17	1,57	1,16
Absorção (%)	0,85	7,5	0,5	7

Na Tabela 14 apresentam-se os resultados da composição gravimétrica do agregado graúdo reciclado. Observa-se que, 72,5% da amostra é constituída por materiais porosos, sendo 48% de argamassas, 15,42% de cerâmica vermelha e 9,08% de cerâmica de revestimento. 25,13% da amostra é constituída por agregado basáltico, sendo que 10,65% possuem argamassa aderida às partículas em pequena quantidade (Figura 32).



Figura 32: Agregado basáltico com resíduos de argamassa

Conforme relatado por Ng e Elgensen (2018), os agregados graúdos reciclados tipicamente apresentam-se com argamassas aderidas às partículas, uma vez que estes encontravam-se imersos na matriz do concreto antes do processamento.

Tabela 14: Porcentagem em massa de cada componente do agregado graúdo reciclado

Materiais	Amostra 1 (%)	Amostra 2 (%)	Amostra 3 (%)	Média (%)	Desvio Padrão
Argamassa	49,59	49,87	44,54	48,00	3,00
Cerâmica vermelha	16,24	13,69	16,33	15,42	1,50
Agregado basáltico	13,82	13,62	16,00	14,48	1,32
Agregado basáltico (com argamassa aderida)	11,28	10,74	9,93	10,65	0,68
Cerâmica de revestimento	8,18	10,87	8,78	9,08	1,41
Outros	0,89	1,8	4,42	2,37	1,83
Total (%)	100,00				

A composição apresentada no agregado graúdo de RCD tem influência nas propriedades físico-mecânicas dos concretos produzidos com esse material, uma vez que este possui apenas 1/4 de agregado basáltico na composição total, sendo o restante composto por materiais porosos e de menor resistência que o basalto.

As curvas granulométricas dos agregados miúdos são apresentadas na Figura 33 e na Figura 34 e dos agregados graúdos na Figura 35 e na Figura 36.

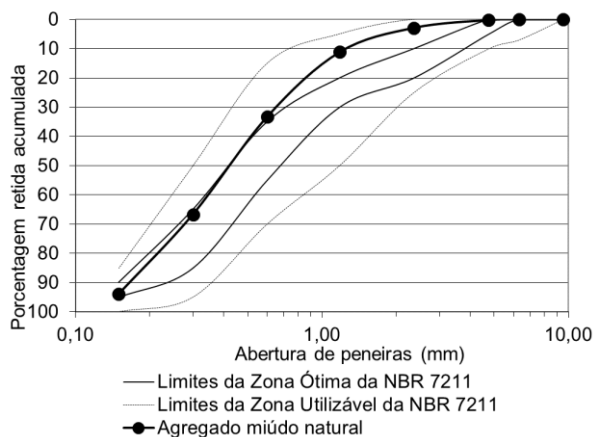


Figura 33: Curva granulométrica do agregado miúdo natural.

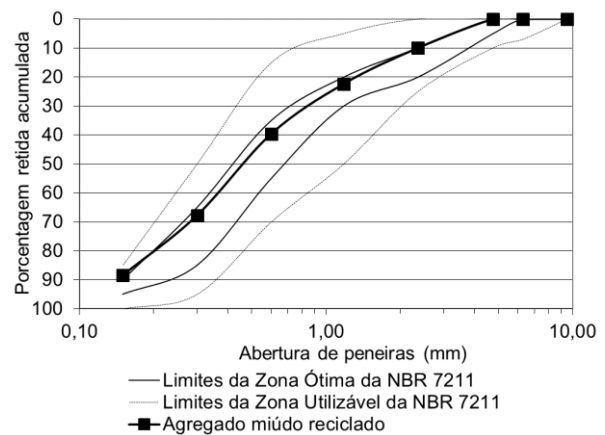


Figura 34: Curva granulométrica do agregado miúdo reciclado.

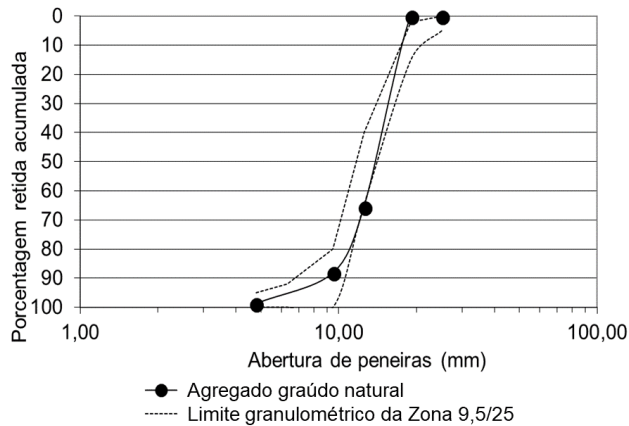


Figura 35: Curva granulométrica do agregado graúdo natural.

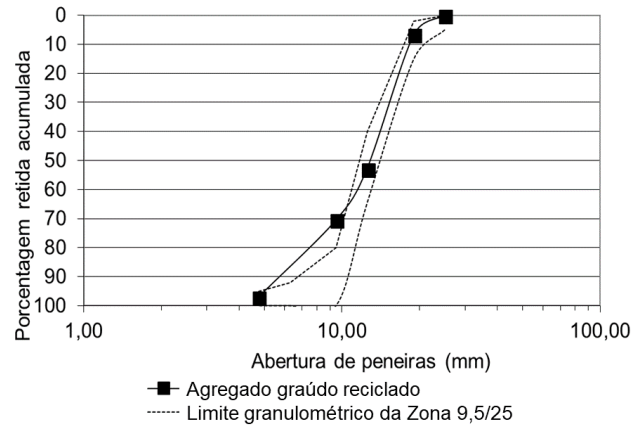


Figura 36: Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado.

Observa-se que o agregado miúdo natural se enquadrou nos limites da zona utilizável da NBR 7211 (ABNT, 2019) e o agregado miúdo reciclado nos limites da zona ótima, sendo, portanto, adequadas para o uso em concretos de acordo com a normativa brasileira. O mesmo ocorre para o agregado graúdo natural e, apesar de o agregado graúdo reciclado possuir dimensão máxima característica maior (25 mm) que a do agregado graúdo natural (19 mm), prezou-se em utilizá-la nos concretos.

4.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Conduziu-se, com o intuito de validação dos resultados, bem como obter um nível de significância de 95% (p -valor menor que 0,05), o método de análise de variância (ANOVA) para as propriedades dos concretos avaliadas (Tabela 15). Das combinações avaliadas, apenas três não possuem influência estatística, sendo que as demais variáveis analisadas apresentam o nível de significância requerido.

Tabela 15: ANOVA para os parâmetros utilizados

Variável de resposta	Variável controlada	SS	DF	MS	F-test	p-valor
Absorção por capilaridade	Tipo de agregado	0,04908	1	0,04908	6,158	0,017889
	Teor de substituição	3,97154	2	1,98577	249,128	0,000000
	Relação a/c	3,75170	2	1,87585	235,338	0,000000
	Tipo de agregado* Teor de substituição	1,38127	2	0,69063	86,644	0,000000
Absorção por capilaridade	Tipo de agregado* Relação a/c	0,10017	2	0,05009	6,284	0,004563
	Teor de substituição * Relação a/c	1,64557	4	0,41139	51,612	0,000000
	Tipo de agregado* Teor	0,82981	4	0,20745	26,026	0,000000

Variável de resposta	Variável controlada	SS	DF	MS	F-test	p-valor
	de substituição* Relação a/c					
	Error	0,28695	36	0,00797		
Massa específica	Tipo de agregado	0,0151	1	0,0151	34,7	0,000001
	Teor de substituição	0,2472	2	0,1236	284,9	0,000000
	Relação a/c	0,0593	2	0,0297	68,3	0,000000
	Tipo de agregado* Teor de substituição	0,0097	2	0,0048	11,1	0,000171
	Tipo de agregado* Relação a/c	0,0056	2	0,0028	6,4	0,004184
	Teor de substituição * Relação a/c	0,0714	4	0,0178	41,1	0,000000
	Tipo de agregado Teor de substituição * Relação a/c	0,2703	4	0,0676	155,7	0,000000
	Error	0,0156	36	0,0004		
Resistência à compressão	Tipo de RCD	243,4	1	243,4	95,82	0,000000
	Teor de substituição	3425,5	2	1712,7	674,24	0,000000
	Relação a/c	4999,0	2	2499,5	983,96	0,000000
	Idade	2015,4	2	1007,7	396,70	0,000000
	Tipo de RCD*Teor de substituição	200,8	2	100,4	39,52	0,000000
	Tipo de RCD*Relação a/c	51,1	2	25,6	10,06	0,000098
	Teor de substituição (%) * Relação a/c	514,6	4	128,6	50,64	0,000000
	Relação a/c*Idade	91,8	4	22,9	9,03	0,000002
	Error	274,3	108	2,5		
Módulo de elasticidade estático	Tipo de agregado	8,47	1	8,47	4,28	0,045692
	Teor de substituição	958,14	2	479,07	242,42	0,000000
	Relação a/c	276,40	2	138,20	69,93	0,000000
	Tipo de agregado* Teor de substituição	80,43	2	40,22	20,35	0,000001
	Tipo de RCD*Relação a/c	5,94	2	2,97	1,50	0,236102
	Teor de substituição*Relação a/c	235,75	4	58,94	29,82	0,000000
	Tipo de RCD* Teor de substituição* Relação a/c	443,98	4	110,99	56,17	0,000000
	Error	71,14	36	1,98		
Profundidade de carbonatação	Tipo de RCD	86,47	1	86,47	213,78	0,000000
	Teor de substituição	777,49	2	388,75	961,08	0,000000
	Relação a/c	1321,26	2	660,63	1633,25	0,000000
	Tempo exposição CO ₂	313,73	1	313,73	775,62	0,000000
	Tipo de RCD* Teor de substituição	43,59	2	21,79	53,88	0,000000
	Tipo de RCD* Relação a/c	35,40	2	17,70	43,76	0,000000
	Teor de substituição* Relação a/c	229,33	4	57,33	141,74	0,000000
	Tipo de RCD*Tempo	0,58	1	0,58	1,43	0,232772

Variável de resposta	Variável controlada	SS	DF	MS	F-test	p-valor
	exposição CO₂					
	Teor (%)*Tempo exposição CO ₂	11,29	2	5,64	13,95	0,000002
	Relação a/c *Tempo exposição CO ₂	34,83	2	17,41	43,05	0,000000
	Error	101,93	252	0,40	Error	101,93

4.3. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

A massa específica dos concretos consta na Figura 37. Pode-se observar uma tendência de decréscimo da massa específica dos concretos conforme se eleva o teor de substituição dos agregados. Essa redução é explicada pela menor massa específica dos agregados reciclados em relação aos agregados naturais, ocasionando essa redução e o aumento da porosidade dos concretos, visto que os RCDs são compostos majoritariamente por materiais argamassados, cerâmicas vermelhas e de revestimento, altamente porosos.

Essa mesma tendência de decréscimo é visualizada também conforme se aumenta a relação água/cimento, que novamente se deve à redução da massa específica dos concretos conforme se reduz o consumo de cimento, uma vez que os agregados naturais e reciclados possuem massa específica inferior que a massa específica do cimento (Tabela 13).

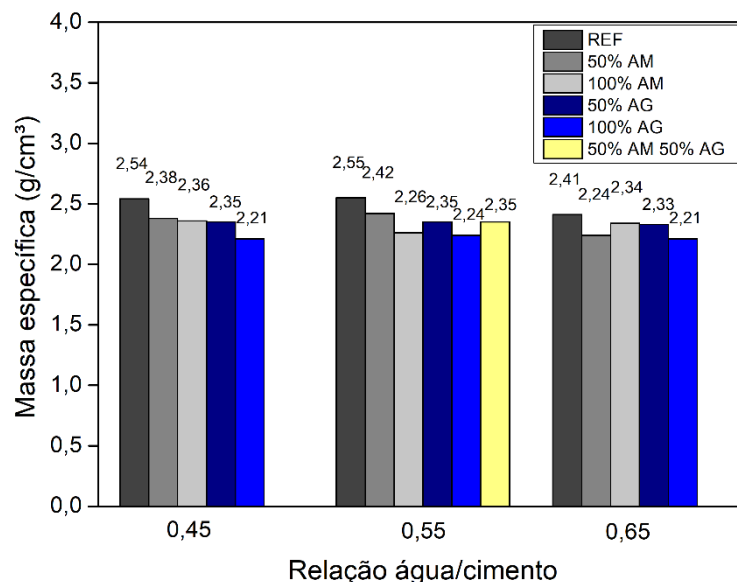


Figura 37: Massa específica no estado fresco dos concretos confeccionados

As curvas de absorção por capilaridade ao longo do período de ensaio são apresentadas na Figura 38 e Figura 39, de acordo com o seu teor de substituição, bem como os valores obtidos após 72 horas de ensaio na Figura 40 e na Figura 41. Por meio da

visualização dos gráficos, de modo inverso às massas específicas no estado fresco, pode-se notar um relativo aumento na absorção conforme se aumenta o teor de substituição dos agregados, indicando que os concretos com RCD, de modo geral, são mais porosos, o que consequentemente pode facilitar a entrada do CO₂ nesses concretos, fato corroborado nos trabalhos de Andrade *et al.* (2018) e Mazurana *et al.* (2019).

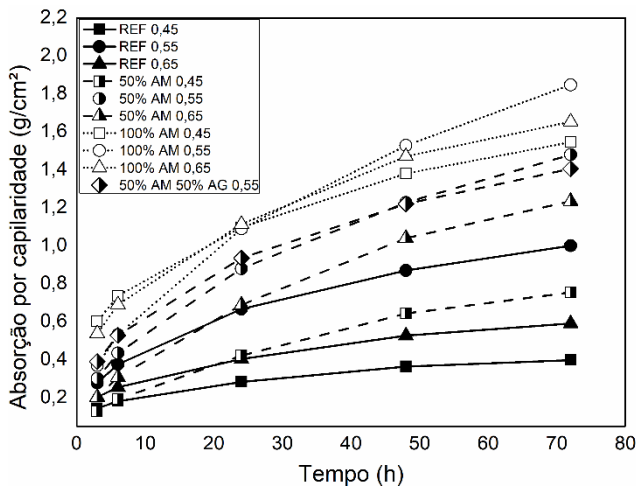


Figura 38: Curvas de absorção por capilaridade de concretos com substituição de agregados miúdos reciclados.

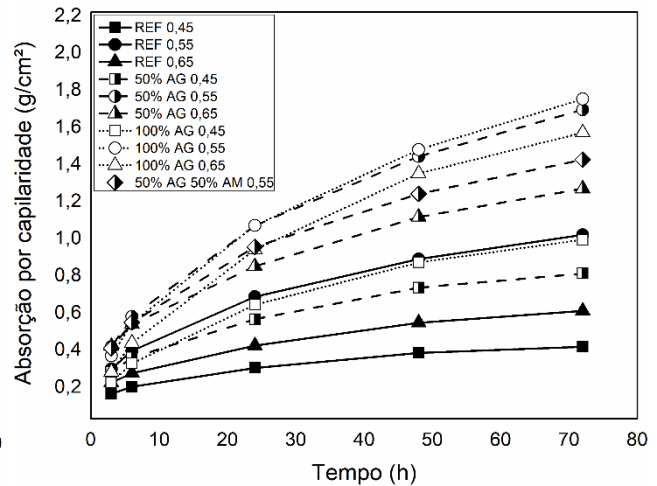


Figura 39: Curvas de absorção por capilaridade de concretos com substituição de agregados graúdos reciclados.

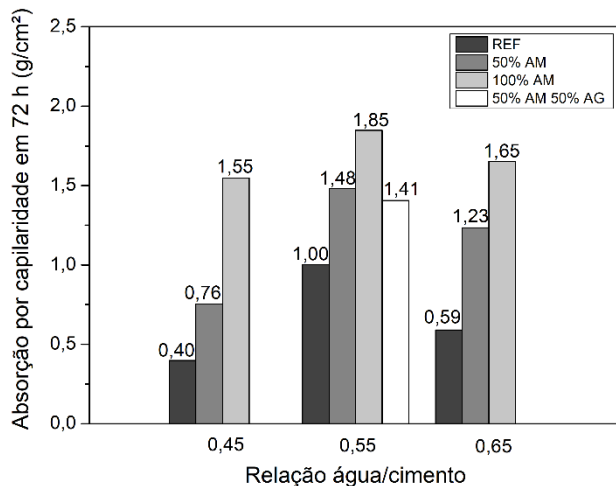


Figura 40: Absorção por capilaridade a 72 horas dos concretos com substituição de agregado miúdo

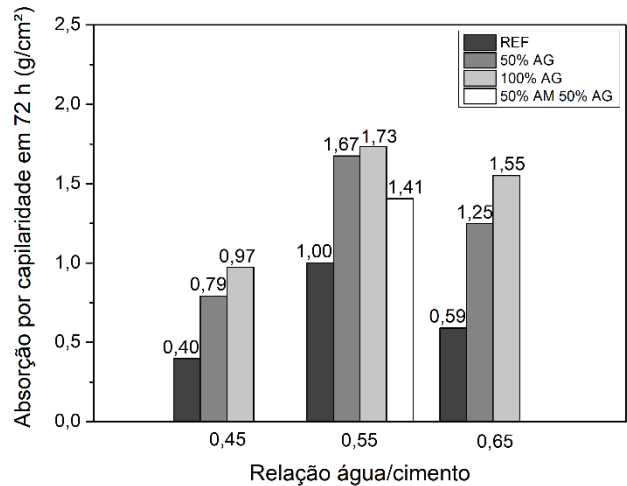


Figura 41: Absorção por capilaridade a 72 horas dos concretos com substituição do agregado graúdo

Outro fator que pode ser interpretado ao analisar os gráficos é que o concreto com substituição de 50% de agregados miúdos e graúdos naturais por reciclados pouco alterou sua absorção em relação aos concretos que houveram apenas substituição de 50% de agregado miúdo, mas reduziu significativamente em relação ao com 50% substituição de agregado graúdo, o que indica que o agregado miúdo reciclado, devido ao seu alto teor de finos, ocasionou a redução do índice de vazios do concreto em questão.

Logo, o impacto da substituição de 50% de agregado graúdo natural por reciclado ocasiona um aumento no teor de argamassa do concreto, conforme a Tabela 14, mas mantém ainda um bom teor de agregado graúdo, conferindo bom desempenho a mistura.

Os efeitos ocasionados pela relação água/cimento nos resultados obtidos indica que, em um modo geral, os concretos, com relação água/cimento igual a 0,55 absorveram mais água que os concretos com consumo de cimento maior ($a/c = 0,45$) e menor ($a/c=0,65$). Pode-se relacionar tais dados, destoantes, com a forma de adensamento dos concretos com relação água/cimento 0,65, que devido às condições de produção (vibração) e ambientais (temperatura do dia e umidade¹²), obtiveram índice de compactidade maiores que os concretos com relação água/cimento 0,55. Outro fator relevante a ser considerado é a troca de lotes dos agregados dos concretos com $a/c=0,55$ devido ao término do lote anterior, influenciando nas propriedades desses corpos de prova em relação aos concretos com $a/c=0,45$ e $a/c=0,65$.

Os dados de resistência à compressão aos 7, 28 e 63 dias estão presentes na Figura 42, Figura 43 e Figura 44, respectivamente, bem como a resistência à tração por compressão diametral na Figura 45, e os módulos de elasticidade estático e dinâmico na Figura 46 e Figura 47, respectivamente. Os valores numéricos das propriedades mecânicas encontram-se no Apêndice A (Tabela 22 e Tabela 23). Verifica-se nessas propriedades que todas seguem uma tendência de decréscimo nas propriedades mecânicas, tanto em relação à relação água cimento quanto ao teor de substituição de agregados naturais por RCD.

Essa tendência pode ser explicada pela redução da massa específica e, conseqüentemente, aumento da porosidade desses materiais no caso do teor de substituição por RCD, bem como a redução do consumo de cimento quando relacionado à relação água/cimento. Outro fator relevante, no caso dos concretos com substituição por agregado graúdo reciclado, é a presença de apenas, aproximadamente, 25% de agregado basáltico nesse material, e 75% de outros materiais com propriedades mecânicas e massas específicas menores que a do basalto (Tabela 14), fator esse bastante relevante para a redução dessas propriedades. No caso dos concretos com substituição por agregado miúdo reciclado, pode ser validado pela presença de 33,4% de outros compostos não-silicosos de menor massa específica, fato verificado no FRX do agregado miúdo reciclado (Tabela 12) e visualizado, de modo semelhante, por Mazurana *et al.* (2019) em argamassas com esse tipo de agregado.

¹² Os concretos com relação água cimento 0,45 e 0,65 foram confeccionados em fevereiro de 2019 (verão), época que em Foz do Iguaçu as temperaturas são elevadas, assim como o teor de umidade. Já os concretos com relação água/cimento 0,55 foram confeccionados em abril de 2019 (outono), mês onde ocorre queda da temperatura e de umidade na região.

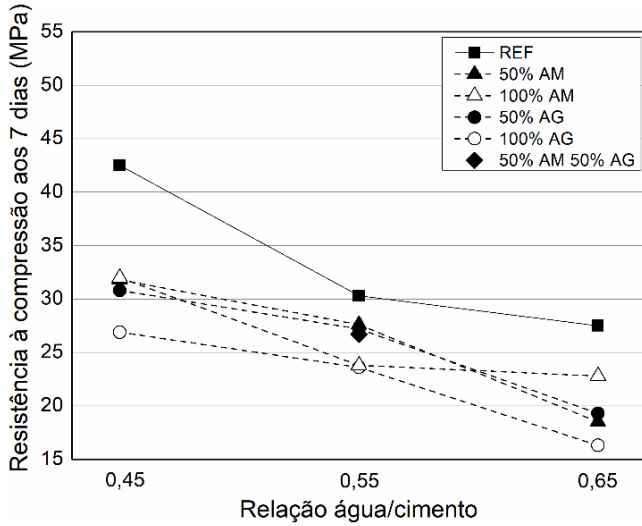


Figura 42: Resistência à compressão aos 7 dias

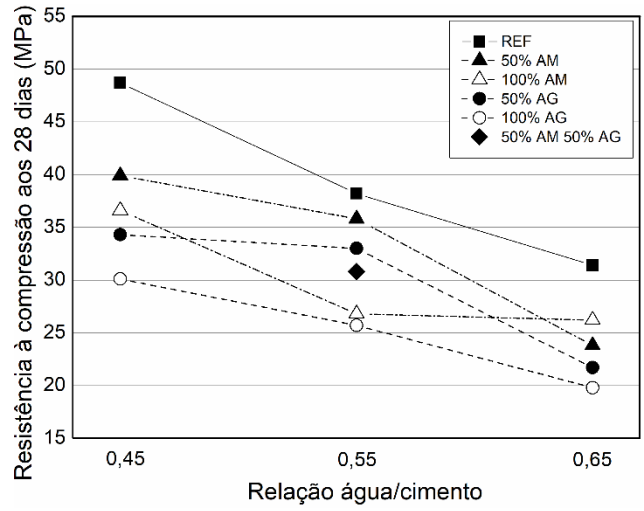


Figura 43: Resistência à compressão aos 28 dias

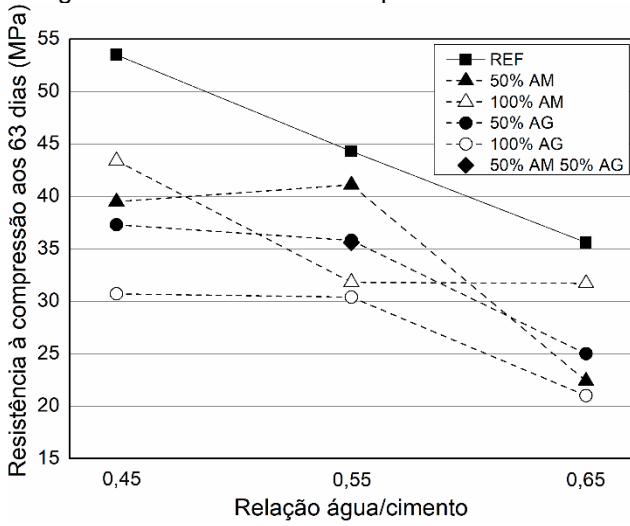


Figura 44: Resistência à compressão aos 63 dias

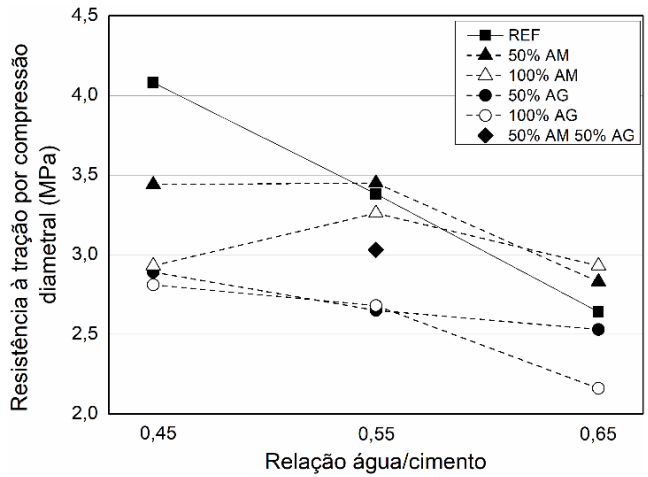


Figura 45: Resistência à tração por compressão diametral.

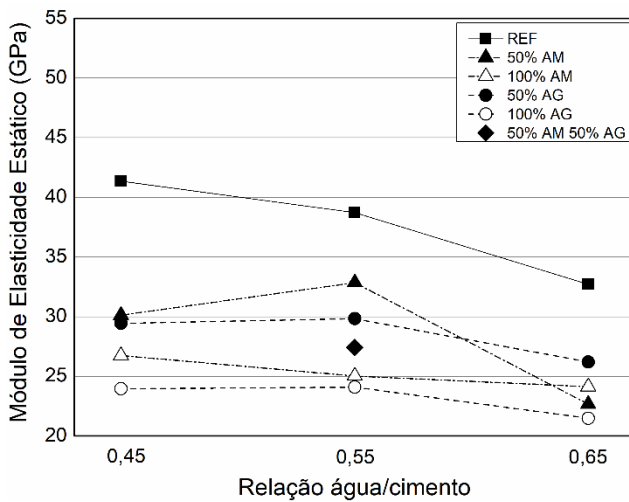


Figura 46: Módulo de elasticidade estático aos 28 dias

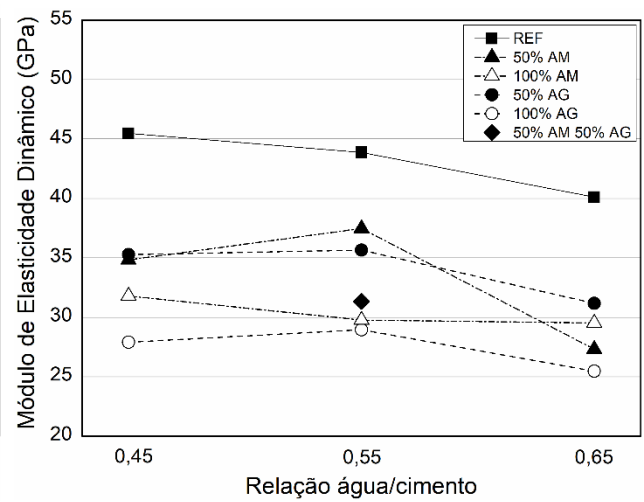


Figura 47: Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias

4.4. CARBONATAÇÃO E CAPTURA DE CO₂

4.4.1. Profundidades de carbonatação

As profundidades de carbonatação aferidas após cada idade de ensaio estão presentes na Tabela 16, bem como na Figura 48 (a) e (b) em forma de gráfico, sendo que as imagens dos corpos de prova carbonatados estão presentes no Apêndice B (Tabela 24 e Tabela 25). Verifica-se, nesse caso, uma tendência de aumento na profundidade conforme se aumenta o teor de substituição, variando entre 7,9% e 128% nos concretos com RCD, em relação aos concretos de referência aos 15 dias de exposição e entre 14,11% e 141% aos 25 dias, explicado pela maior porosidade dos materiais conforme se aumenta o teor de substituição, comprovado pela absorção por capilaridade (Item 4.3).

Tabela 16: Profundidades de carbonatação nas idades aferidas, em mm

Concretos	Relação água/cimento					
	0,45		0,55		0,65	
	15 dias	25 dias	15 dias	25 dias	15 dias	25 dias
REF	2,85	3,55	4,17	5,60	5,89	8,61
50% AM	5,57	8,32	6,55	7,71	12,29	17,10
100% AM	6,51	8,56	8,63	10,66	9,48	11,43
REF	2,85	3,55	4,17	5,60	5,89	8,61
50% AG	4,05	6,05	6,71	8,18	9,94	13,22
100% AG	3,08	4,54	7,83	9,81	8,34	11,31
REF	---	---	4,17	5,60	---	---
50% AM 50% AG	---	---	4,50	6,39	---	---

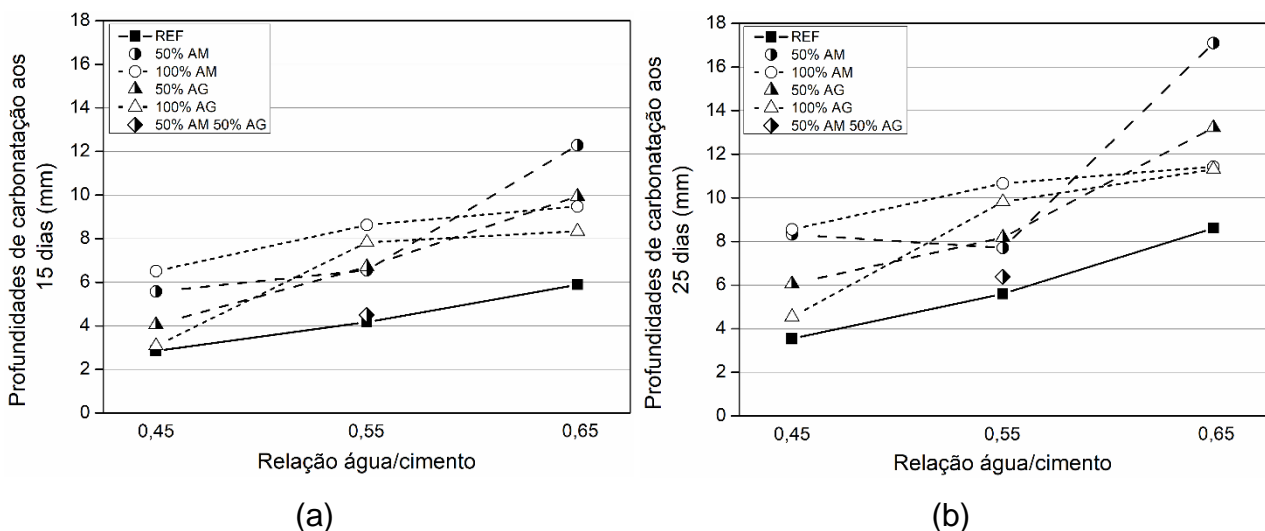


Figura 48: Profundidades de carbonatação em função da relação água/cimento (a) aos 15 dias de exposição e (b) aos 25 dias de exposição

Essa tendência de crescimento é encontrada também quando aumenta-se a relação água/cimento, exceto em um caso específico aos 25 dias, onde o concreto com relação água/cimento 0,55 e 50% de substituição de agregados reciclados miúdos carbonatou menos que os concretos com relação água/cimento 0,45 e 0,65 (Figura 48(b)). Esse destoamento pode ser explicado pela diferença no período de concretagem¹³, que pode ter influenciado no processo de confecção do concreto.

4.4.2. Captura de CO₂

4.4.2.1. Quantidade de CO₂ capturado (Equação BRE)

Para a Equação 9, considerou-se para as variáveis, além dos consumos de materiais da Tabela 5 e a área da superfície igual a 1m³, os valores presentes na Tabela 17:

Tabela 17: Dados da Equação 9 dependentes de fontes externas ao experimento.

Variáveis	Valor considerado	Origem dos dados
CaO _{cim}	61,6%	FRX do cimento (Ver Tabela 11)
CaO _{am}	8,2%	FRX do agregado miúdo reciclado (Ver Tabela 12)
CaO _{ag}	5,7%	Valor de “CaO _{am} ” relacionado com os resíduos obtidos na TG dos agregados miúdos e graúdos reciclados ¹⁴ .
%C _{cim}	90%	Valor médio obtido na NBR 16697 (ABNT, 2018) sem a consideração de sulfatos (Ver Tabela 9).
%CaO _{cim}	75%	Andrade <i>et al.</i> (2018)
%CaO _{am}	35%	You <i>et al.</i> (2011)
%CaO _{ag}	24,5%	Valor de “%CaO _{am} ” relacionado com os resíduos obtidos na TG dos agregados miúdos e graúdos reciclados ¹⁵ .

Os valores de CO₂ capturados em 15 e 25 dias de carbonatação acelerada, bem como o potencial de captura de CO₂, estão presentes na Tabela 18

Observa-se, nesse caso, que o CO₂ capturado em 15 e 25 dias tende a crescer conforme se aumenta o teor de substituição, em relação aos concretos de referência. O mesmo é observado conforme se aumenta a relação água/cimento, explicado pelo maior teor de materiais carbonatáveis nos concretos com substituição de agregados. Tal fato pode ser corroborado, de modo análogo, nos trabalhos de Mazurana *et al.*(2019),

¹³ Em torno de 1 mês e meio de diferença em relação aos concretos com relação água/cimento 0,45 e 0,65, na qual houve a transição de verão para outono e, conseqüentemente, mudanças climáticas na região.

¹⁴ Regra de três entre o valor obtido na FRX do agregado miúdo reciclado (8,2%) e os valores residuais da TG do agregado miúdo reciclado (79,34%) e do agregado graúdo reciclado (85,75%).

¹⁵ Regra de três entre o valor obtido para a porcentagem carbonatável para o agregado miúdo reciclado (35%) e os valores residuais da TG do agregado miúdo reciclado (79,34%) e do agregado graúdo reciclado (85,75%).

Andrade *et al.* (2018) e You *et al.* (2011).

Tabela 18: CO₂ capturado em 15 e 25 dias de carbonatação acelerada e potencial de captura de CO₂ para 1 m³ de concreto.

Concretos	CO ₂ capturado em 15 dias (kg.CO ₂ /m ²)	CO ₂ capturado em 25 dias (kg.CO ₂ /m ²)	Potencial de captura de CO ₂ (kg.CO ₂ /m ³)
REF 0,45	3,91	4,87	137,08
REF 0,55	4,62	6,20	110,75
REF 0,65	5,48	8,00	92,90
50%AM 0,45	8,08	12,06	144,98
50%AM 0,55	7,82	9,21	119,43
50%AM 0,65	12,55	17,46	102,11
100%AM 0,45	9,96	13,09	152,88
100%AM 0,55	11,06	13,66	128,10
100%AM 0,65	10,55	12,72	111,31
50%AG 0,45	5,75	8,58	141,89
50%AG 0,55	7,76	9,45	115,55
50%AG 0,65	9,71	12,92	97,70
100%AG 0,45	4,51	6,66	146,70
100%AG 0,55	9,42	11,81	120,35
100%AG 0,65	8,54	11,59	102,50
50%AM 50%AG 0,55	5,58	7,94	124,23

No caso do potencial de captura de CO₂ verifica-se uma redução no potencial conforme se aumenta a relação água/cimento, visto que houve redução no consumo de cimento desses concretos. No caso do teor de substituição, os valores são levemente elevados, uma vez que os agregados reciclados possuem materiais cimentícios em sua composição, elevando o potencial pela maior presença de materiais carbonatáveis, fato esse também verificado por Andrade *et al.* (2018) em argamassas.

4.4.2.2. Análise termogravimétrica e potencial de captura de CO₂

As curvas de termogravimetria, em sua apresentação, foram divididas em relação a sua água/cimento (0,45; 0,55; 0,65) e em relação à sua substituição (agregado miúdo, agregado graúdo, agregado miúdo e graúdo), de modo que fosse possível avaliar focando-se no teor de substituição de agregados reciclados e no tipo de substituição.

A Figura 49 (a e b), Figura 50 (a e b), Figura 51 (a e b), Figura 52 (a e b), Figura 53 (a e b), Figura 54 (a e b) e Figura 55 (a e b), mostram as curvas TGs e DTGs em função da relação água/cimento 0,45, 0,55 e 0,65 das amostras carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC) dos concretos confeccionados.

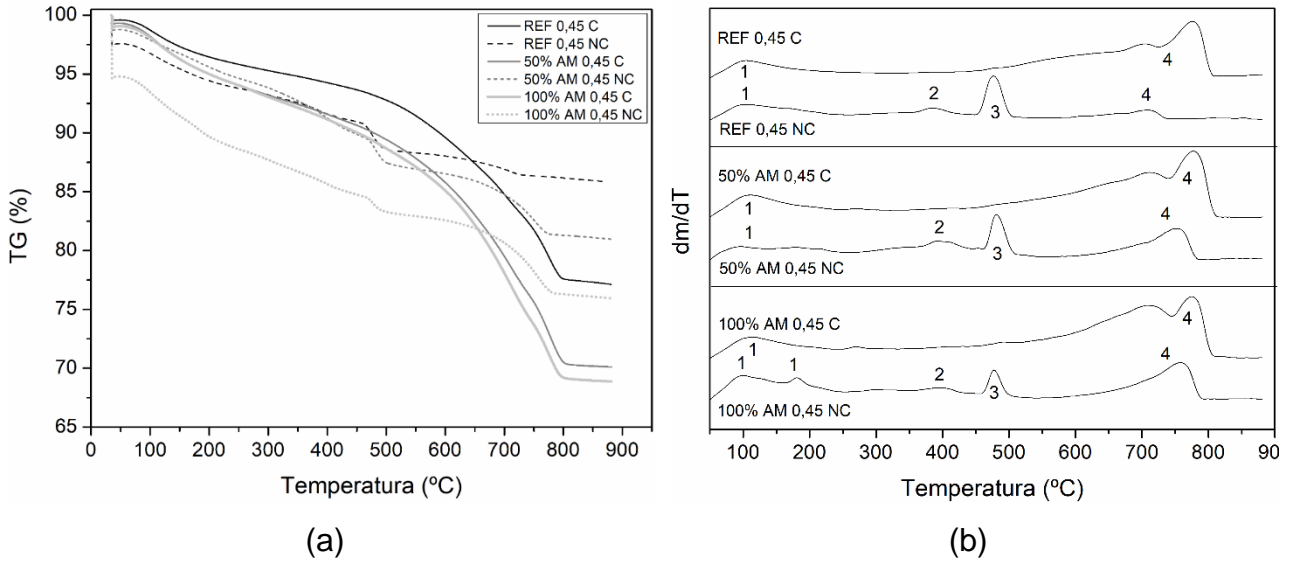


Figura 49: TGs (a) e DTGs (b) em função da relação água/cimento 0,45 e substituição por agregado miúdo reciclado.

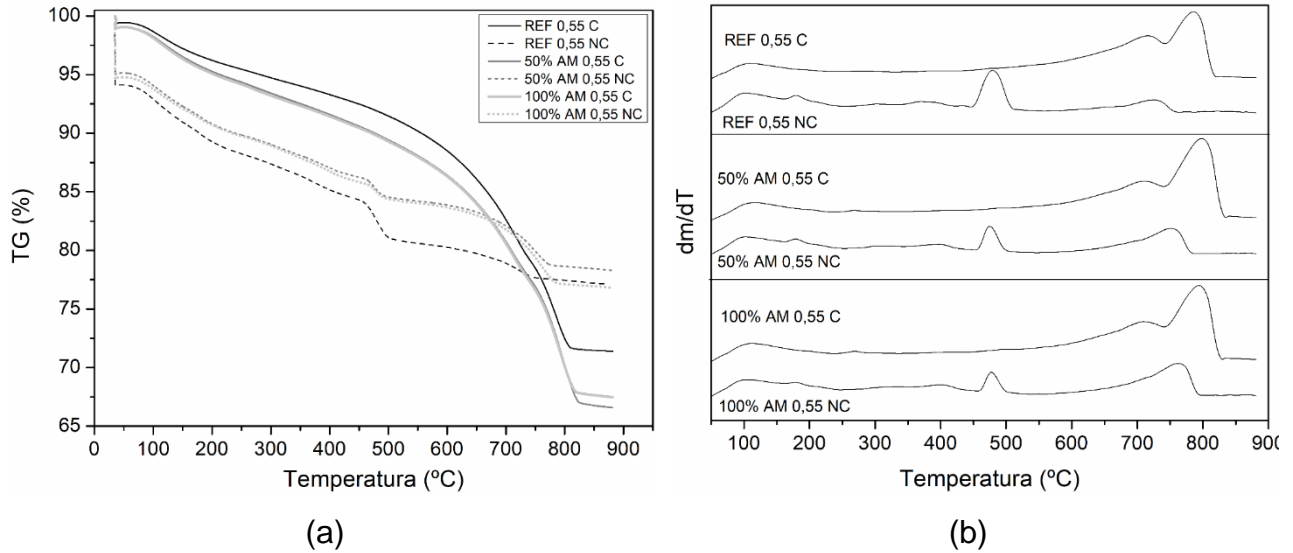


Figura 50: TGs (a) e DTGs (b) em função da relação água/cimento 0,55 e substituição por agregado miúdo reciclado.

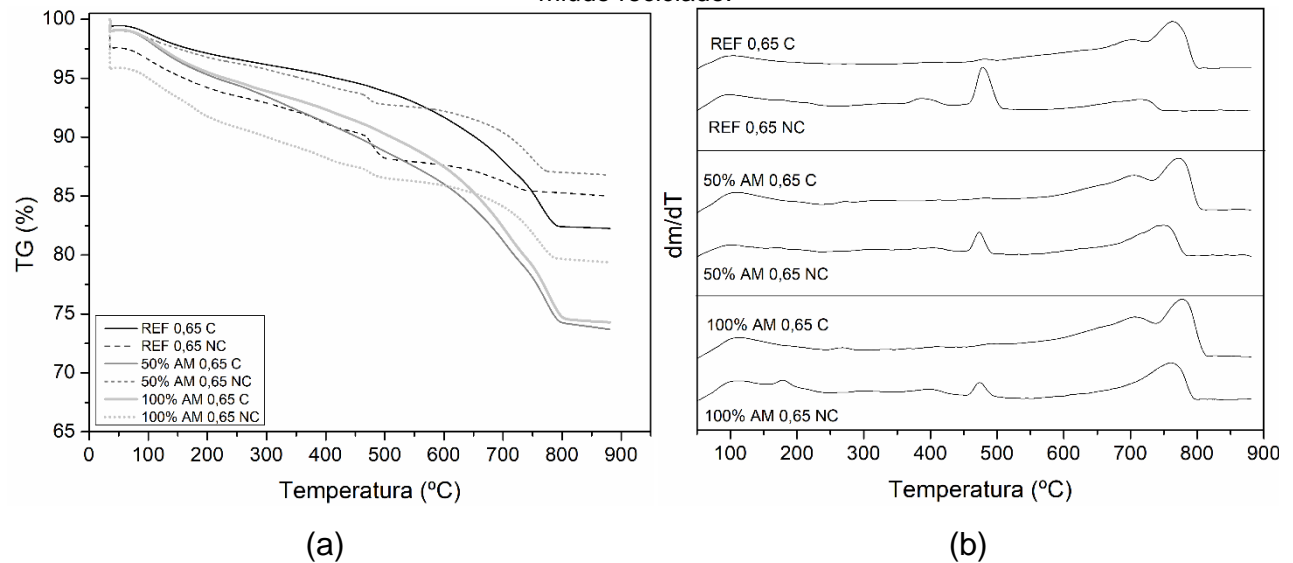


Figura 51: TGs (a) e DTGs (b) em função da relação água/cimento 0,65 e substituição por agregado miúdo reciclado.

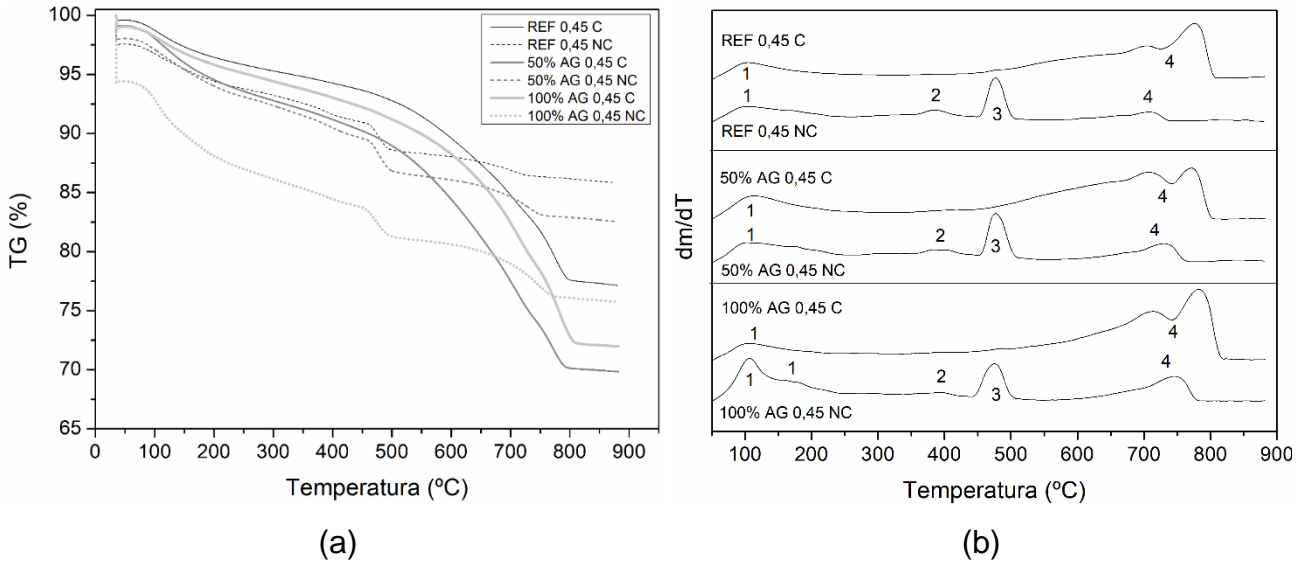


Figura 52: TGs (a) e DTGs (b) em função da relação água/cimento 0,45 e substituição por agregado graúdo reciclado.

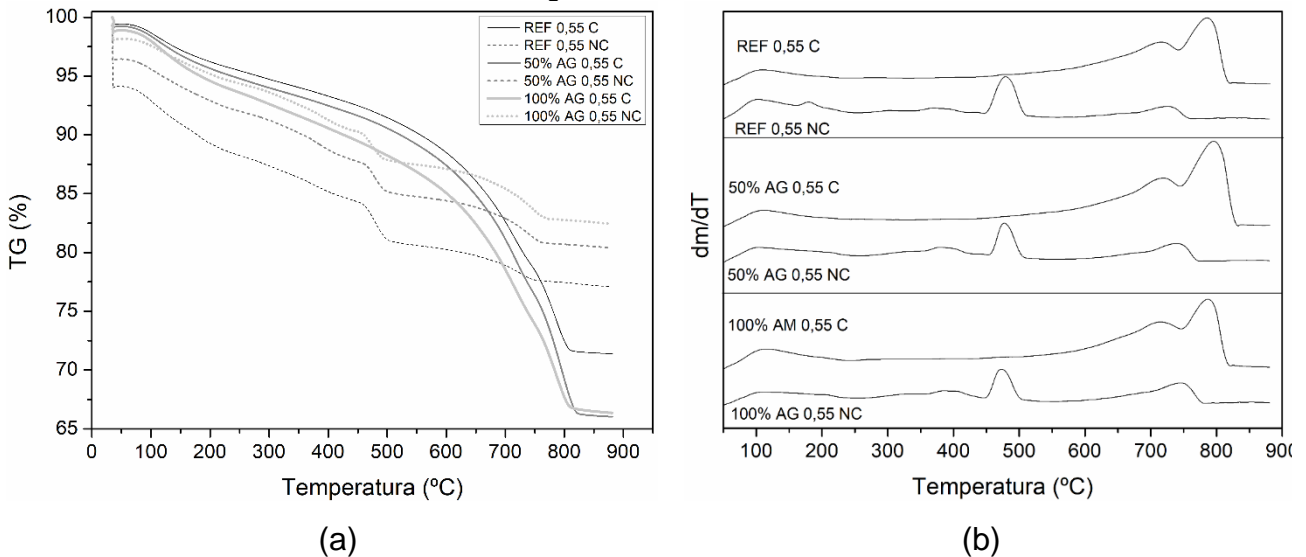


Figura 53: TGs (a) e DTGs (b) em função da relação água/cimento 0,55 e substituição por agregado graúdo reciclado.

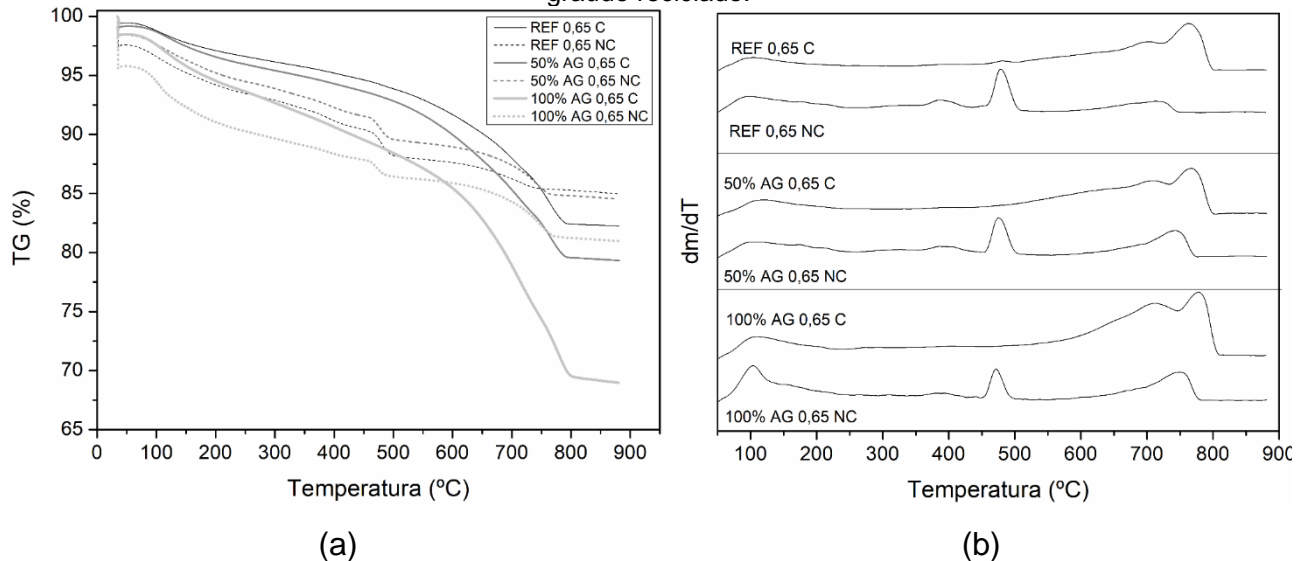


Figura 54: TGs (a) e DTGs (b) em função da relação água/cimento 0,65 e substituição por agregado graúdo reciclado.

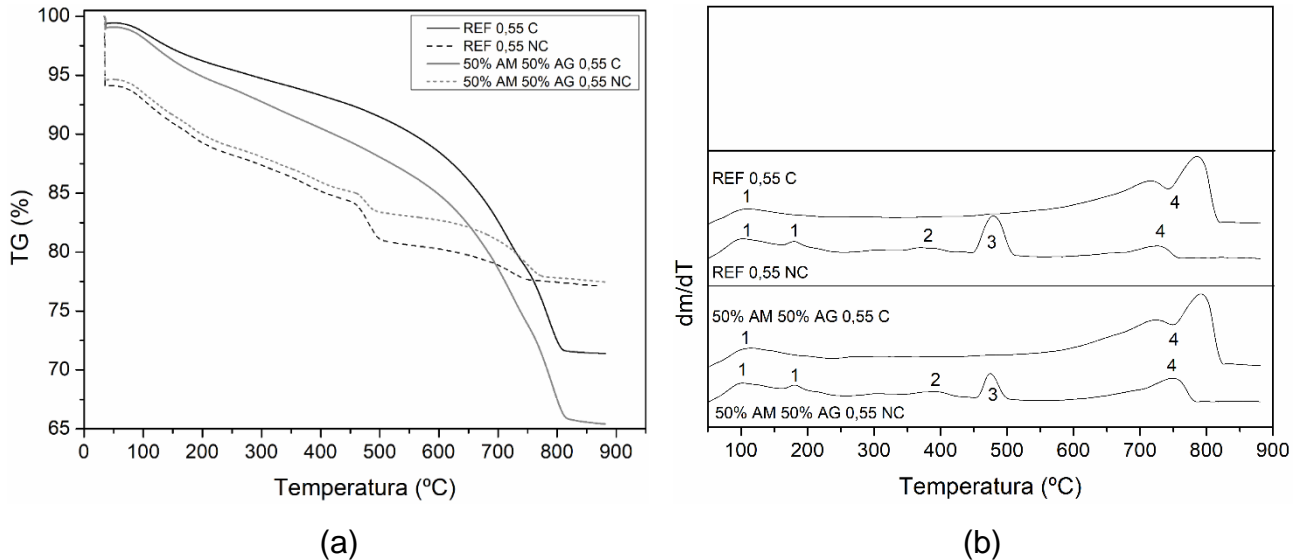


Figura 55: TGs (a) e DTGs (b) em função da relação água/cimento 0,55 e substituição por agregado miúdo e graúdo reciclado.

Avaliando tais gráficos, pode-se identificar as fases de água combinada (Ponto 1 das DTGs), que corresponde à água dos compostos hidratados iniciais (gipsita, etringita e tobermorita). Há também a fase que corresponde à decomposição de outros álcalis carbonatáveis nas amostras não carbonatadas (NC) (hidróxido de sódio, hidróxido de potássio e hidróxido de magnésio), conforme comentado no item 4.1. e passíveis de carbonatação (Ponto 2 das DTGs). Por fim, a última fase correspondente à volatilização do hidróxido de cálcio, presente nas amostras não carbonatadas e de potencial para a futura carbonatação (Ponto 3 das DTGs) e a fase correspondente ao grupo de hidroxilas estruturais (as quais podem ser consideradas carbonatos), mais a fase de formação de carbonato de cálcio (Ponto 4 das DTGs) (NEVES JUNIOR *et al.*, 2019; MAZURANA *et al.*, 2019; SVINNING *et al.*, 2008; GABROVŠEK *et al.*, 2005)

Percebe-se, ao analisar as TGs e DTGs, que os concretos apresentaram maior perda de massa ao longo do aumento de temperatura, em relação às suas referências, conforme se aumentava o teor de substituição de agregados naturais por reciclados. Além disso, verificou-se que os concretos com relação água/cimento 0,55 apresentaram menor massa residual e que as amostras com relação água/cimento 0,65 apresentaram maior massa residual.

Outro fator a se avaliar é que, ao analisar o Ponto 1 de amostras não carbonatadas nas quais houve substituição de agregado graúdo natural por reciclado (Figura 49(b), Figura 51(b), Figura 52(b), Figura 54(b)), é possível visualizar que a 1 hora à 35°C recomendada por Scrivener *et al.* (2016) não foi suficiente para retirar toda a água livre das amostras. Uma avaliação mais adequada desse método deve ser revista para

concretos com agregados reciclados incorporados.

Os valores obtidos de captura de CO₂ pelo método de Dweck *et al.*(2001), através da análise termogravimétrica, estão dispostos na Tabela 19. Pode-se verificar que os valores de captura de CO₂ aumentaram conforme se aumentava o teor de substituição de agregados, sejam miúdos ou graúdos. Porém, essa mesma tendência não foi encontrada ao se comparar tais resultados com o aumento da relação água/cimento, uma vez que os valores de captura de CO₂ em concretos com relação água/cimento 0,55 foi superior aos concretos com relação água/cimento 0,45 e 0,65. Analisando tais resultados, pode-se induzir que as condições de produção e da temperatura e umidade do ambiente onde os concretos foram confeccionados, bem como a diferença de lote dos agregados reciclados que foram utilizados nos concretos com relação água/cimento 0,55 podem ter ocasionado os valores encontrados.

Tabela 19: Valores obtidos de captura de CO₂ dos concretos através da análise termogravimétrica (%)

Traços	Relação água/cimento		
	0,45	0,55	0,65
REF	13,88%	21,26%	8,40%
50% AM	29,18%	42,99%	19,16%
100% AM	36,97%	53,73%	27,47%
REF	13,88%	21,26%	8,40%
50%AG	24,51%	40,67%	10,42%
100% AG	28,03%	42,21%	35,24%
REF	---	21,26%	---
50% AM 50% AG	---	48,01%	---

4.4.2.3. DRX versus DTG

Com o intuito de confirmar os ensaios de termogravimetria, fez a difração por raios-x dos concretos com relação água/cimento 0,65 das dosagens de referência e com 100% de substituição por agregado miúdo reciclado e graúdo reciclado. Pode-se verificar, ao analisar tais gráficos, que as DTGs condizem com o que foi obtido nos DRXs, visto que, de modo análogo, demonstram a formação de carbonato de cálcio nas amostras carbonatadas (C) e semi-carbonatadas (SC) (Ponto 4 nas DTGs) e a presença de hidróxido de cálcio nas amostras não carbonatadas (NC) e semi-carbonatadas (SC) (Ponto 3). Ainda, visualiza-se a formação de carbonato de magnésio na DTG do concreto com 100% de substituição de agregado miúdo (Ponto 5), provavelmente oriundo dos álcalis carbonatáveis (Ponto 2) e que contribuem com a presença de carbonatos no DRX.

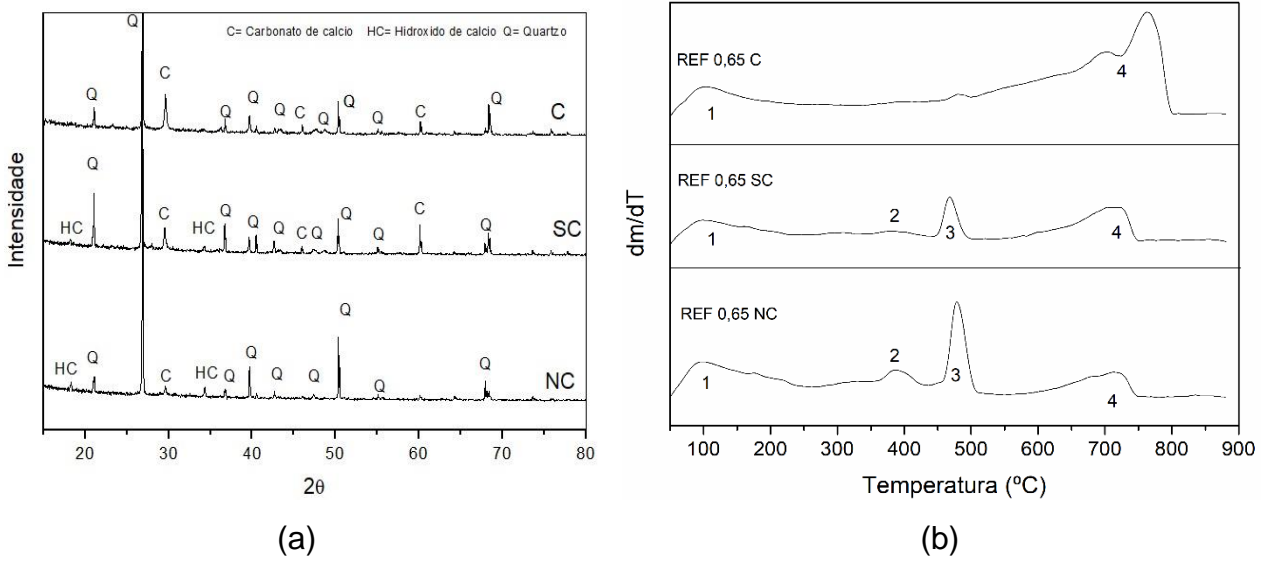


Figura 56: Difratogramas de raios-x (a) e curvas DTG (b) dos concretos de referência com a/c 0,65

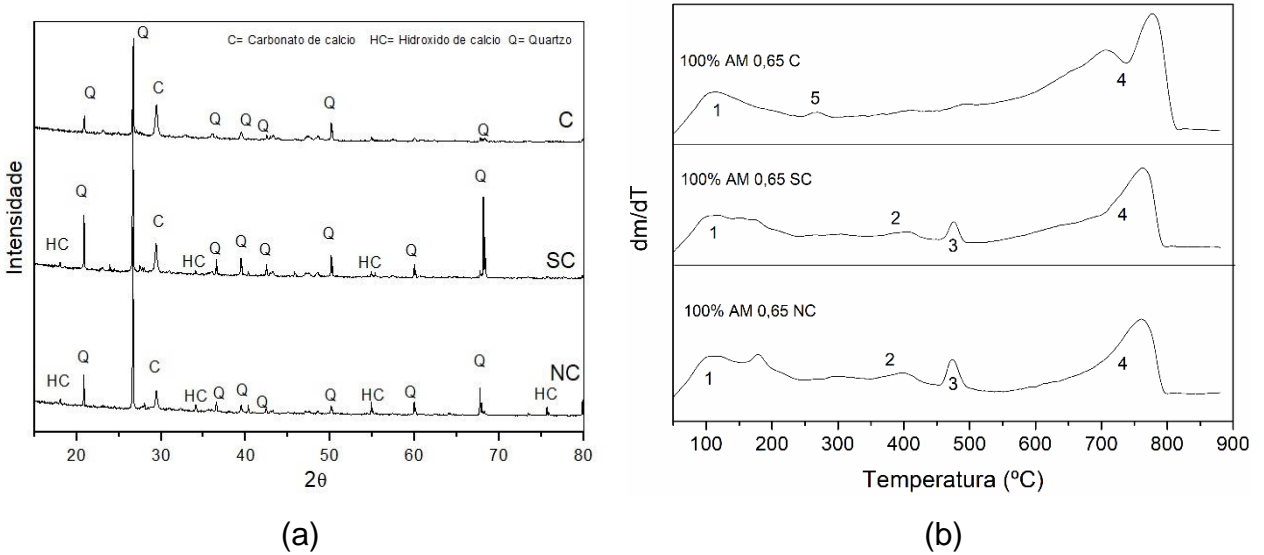


Figura 57: Difratogramas de raios-x (a) e curvas DTG (b) dos concretos com 100% de substituição por agregados miúdos com a/c 0,65

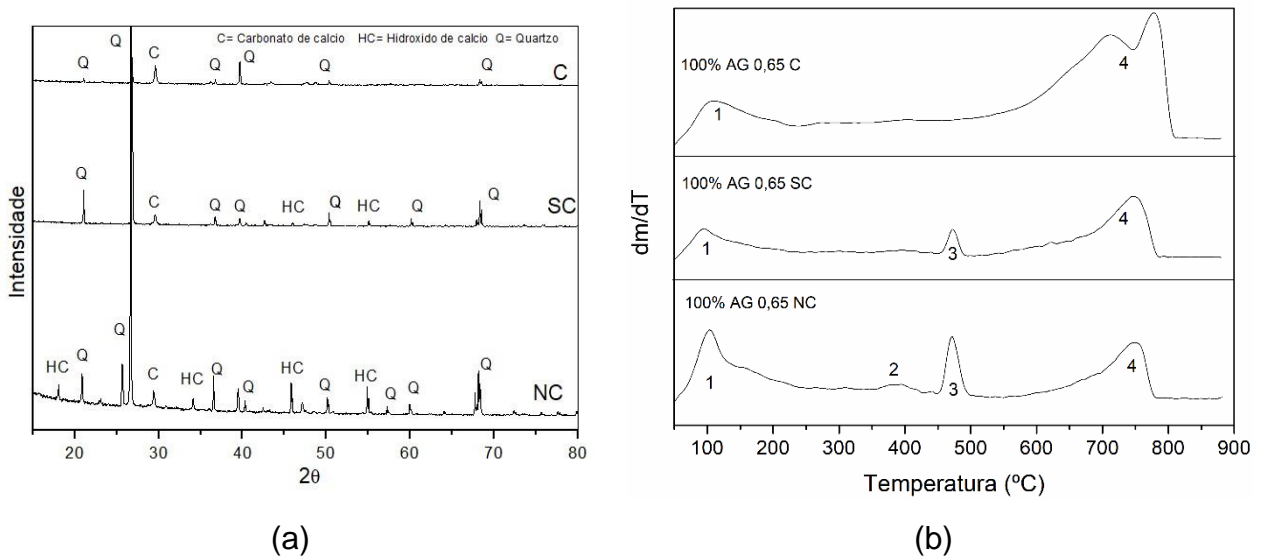


Figura 58: Difratogramas de raios-x (a) e curvas DTG (b) dos concretos com 100% de substituição por agregados graúdos com a/c 0,65

4.5. BALANÇO DAS EMISSÕES

Para realizar o balanço das emissões, faz-se necessário contabilizar as emissões totais para cada tipo de concreto. Tem-se na Tabela 20 as emissões totais estimadas para cada concreto confeccionado. Inseriu-se os valores da Tabela 9 para as emissões do cimento considerando-se 90% de clínquer, visto que é a média entre os valores presentes na NBR 16697 (ABNT, 2018), desconsiderando o teor de sulfatos e adições recorrentes nos cimentos CP V ARI. Para as emissões referentes aos agregados, considerou os valores estabelecidos na Tabela 10.

Tabela 20: Emissões de CO₂ estimadas para cada concreto

Concretos	Emissões cimento (kg.CO ₂ /m ³)	Emissões agregado miúdo natural (kg.CO ₂ /m ³)	Emissões agregado graúdo natural (kg.CO ₂ /m ³)	Emissões agregado miúdo reciclado (kg.CO ₂ /m ³)	Emissões agregado graúdo reciclado (kg.CO ₂ /m ³)	Emissões totais (kg.CO ₂ /m ³)
REF 0,45	330,58	38,43	61,38	0,00	0,00	430,39
REF 0,55	267,08	42,22	61,31	0,00	0,00	370,61
REF 0,65	224,04	44,78	61,26	0,00	0,00	330,08
50%AM 0,45	330,58	19,21	61,38	19,82	0,00	430,99
50%AM 0,55	267,08	21,11	61,31	21,77	0,00	371,27
50%AM 0,65	224,04	22,39	61,26	23,09	0,00	330,79
100%AM 0,45	330,58	0,00	61,38	39,63	0,00	431,59
100%AM 0,55	267,08	0,00	61,31	43,54	0,00	371,93
100%AM 0,65	224,04	0,00	61,26	46,19	0,00	331,49
50%AG 0,45	330,58	38,43	30,69	0,00	24,79	424,48
50%AG 0,55	267,08	42,22	30,66	0,00	24,76	364,71
50%AG 0,65	224,04	44,78	30,63	0,00	24,74	324,19
100%AG 0,45	330,58	38,43	0,00	0,00	49,57	418,58
100%AG 0,55	267,08	42,22	0,00	0,00	49,52	358,81
100%AG 0,65	224,04	44,78	0,00	0,00	49,48	318,30
50%AM 50%AG 0,55	267,08	21,11	30,66	21,77	24,76	365,37

Verificou-se, na Tabela 20, que as maiores emissões se concentram nos concretos com maior relação água/cimento, indicando que a indústria cimenteira possui a maior contribuição para as emissões de CO₂ dos concretos. Também verificou-se um leve acréscimo nos valores totais de emissões em concretos com substituição de agregado miúdo natural por reciclado, indicando que o processo de beneficiamento do agregado miúdo reciclado tem influência no aumento das emissões.

A seguir, tem-se os valores de balanço de emissões, considerando a captura de CO₂ pela Equação da BRE e pela análise termogravimétrica (Tabela 21). Observa-se que os valores de balanço de emissões da análise térmica são bem distintos dos valores obtidos pela Equação 9 (BRE), obtendo-se, desde valores até 5 vezes menores até valores bem semelhantes. Porém, vale salientar que a captura de CO₂ pela BRE é baseada, em grande parte, em dados da literatura e os resultados obtidos pela análise termogravimétrica foram obtidos em ensaios práticos com esses concretos. Logo, dados da BRE podem ser subestimados ou superestimados, sendo que pela TG/DTG, os valores de captura de CO₂ são obtidos *in loco* ao se analisar as curvas TG e DTG das amostras carbonatadas e não carbonatadas, tomando-se os cuidados necessários de coleta das amostras e também de calibragem do analisador termogravimétrico.

Tabela 21: Emissões versus captura de CO₂ e seus balanços

Concretos	Emissões dos concretos (kg.CO ₂ /m ³)	Captura de CO ₂ (kg.CO ₂ /m ³)		Balanço de emissões (%)*	
		BRE	TG/DTG	BRE	TG/DTG
REF 0,45	430,39	137,08	39,80	31,85	9,25
REF 0,55	370,61	110,75	49,10	29,88	13,25
REF 0,65	330,08	92,90	15,26	28,14	4,62
50%AM 0,45	430,99	144,98	50,82	33,64	11,79
50%AM 0,55	371,27	119,43	71,06	32,17	19,14
50%AM 0,65	330,79	102,11	28,76	30,87	8,70
100%AM 0,45	431,59	152,88	94,94	35,42	22,00
100%AM 0,55	371,93	128,10	130,24	34,44	35,02
100%AM 0,65	331,49	111,31	69,38	33,58	20,93
50%AG 0,45	424,48	141,89	33,19	33,43	7,82
50%AG 0,55	364,71	115,55	50,03	31,68	13,72
50%AG 0,65	324,19	97,70	12,08	30,14	3,73
100%AG 0,45	418,58	146,70	57,01	35,05	13,62
100%AG 0,55	358,81	120,35	80,78	33,54	22,51
100%AG 0,65	318,30	102,50	64,29	32,20	20,20
50%AM 50%AG 0,55	365,37	124,23	31,60	34,00	8,65

* Considerando as emissões totais relacionadas à produção do concreto

Considerando que na base de dados mais recentes da literatura, os valores de captura de CO₂ de concretos variam entre 4,61% e 37,06% do CO₂ emitido na sua vida útil em relação às emissões totais (ZHANG *et al.*, 2017; XI *et al.*, 2016; LEE, WANG, 2016; KUITTINEN, 2016; YANG *et al.*, 2014; HASSELBACH, THOMAS, 2014; ANDERSSON *et al.*, 2013; PADE, GUIMARÃES, 2007; JACOBSEN, JAHNREN, 2002; GADJA, 2001), os

valores obtidos na Tabela 21 são compatíveis dentro desse limite, sendo, portanto, mais uma contribuição para os estudos de captura de CO₂, visto que o assunto é recente e carece de bases bibliográficas.

Ainda, de acordo com Possan (2019), a Associação Europeia do Cimento (Cembureau) enviou ao IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) uma proposta para considerar como base a reabsorção de CO₂ de 25% do que foi emitido pela indústria cimenteira. Logo, os valores obtidos na Tabela 21 para os concretos com substituição de agregados naturais por reciclados encontram-se bem próximos desse valor, colaborando para atingir esse parâmetro. Contudo, concretos sem RCD apresentam valores bastante inferior ao parâmetro, devendo-se ter cautela em relação ao emprego e adoção desses valores como medida compensatória.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No estudo em questão, o qual buscou avaliar a captura de CO₂ de concretos com a substituição de agregados naturais por RCD em sua composição, obteve-se as seguintes conclusões.

5.1. CAPTURA DE CO₂

Os valores obtidos pela equação da BRE (Equação 9) variaram entre 3,91 e 12,55 kg.CO₂/m² para a exposição ao CO₂ aos 15 dias de exposição e entre 4,87 e 17,46 kg.CO₂ aos 25 dias, que correspondem ao concreto de referência e água/cimento 0,45 (valor mínimo) e ao concreto com 50% de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo de RCD e relação água/cimento 0,65 (valor máximo) nos dois casos de exposição. Pela equação BRE os valores de potencial de captura de CO₂ variaram entre 92,90 kg.CO₂/m³ e 152,88 kg.CO₂/m³, correspondentes ao concreto de referência com relação água/cimento 0,65 (menor valor) e ao concreto com 100% de substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo de RCD e relação água/cimento 0,55. Já os valores obtidos de potencial de captura de CO₂ por análise termogravimétrica variaram entre 15,26 kg.CO₂/m³ e 130,24 kg.CO₂/m³. De modo análogo à equação da BRE, os concretos responsáveis pelo valor mínimo de captura de CO₂ são os mesmos. Já no caso dos valores máximos de potencial de captura de CO₂, o teor de substituição de agregados dos concretos são os mesmos (100% de substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos de RCD), alterando-se somente a relação água/cimento (0,45 para o valor máximo obtido pela equação da BRE e 0,55 para o valor máximo obtido por TG/DTG). Portanto, nos dois casos analisados (Equação da BRE e análise termogravimétrica), os valores de potencial de captura de CO₂ são proporcionais ao aumento do teor de agregados reciclados no concreto, uma vez que se aumenta o teor de materiais carbonatáveis na mesma medida.

Nas análises termogravimétricas, foi possível visualizar os compostos possíveis de serem carbonatados (hidróxidos de cálcio e outros álcalis carbonatáveis) nas amostras não carbonatadas (NC) e os compostos já carbonatados (carbonato de cálcio) nas amostras carbonatadas (C). Apesar da proporcionalidade entre o aumento do teor de RCD e o aumento da captura de CO₂, o mesmo não ocorreu no aumento da relação

água/cimento, visto que os concretos com relação $a/c= 0,55$, de modo geral, apresentaram maiores potenciais de captura de CO_2 que os concretos com relação água/cimento 0,45 e 0,65. Isso pode ser explicado devido às condições de produção e da temperatura e umidade do ambiente onde os concretos foram confeccionados, bem como a diferença de lote dos agregados reciclados que foram utilizados nos concretos com relação água/cimento 0,55.

Na equação da BRE (Equação 9), apesar desta depender de dados dos materiais carbonatáveis dos concretos (cimento, agregado miúdo e graúdo reciclados), pode-se subestimar ou superestimar os dados de captura de CO_2 , uma vez que muitos dados utilizados na equação são obtidos da literatura, que podem divergir do real. Já na análise termogravimétrica, as perdas referentes aos álcalis carbonatáveis (no caso da amostra não carbonatada) e dos carbonatos (na amostra carbonatada) são encontradas facilmente ao se analisar a TGs e a DTGs, de modo que, com apenas cálculos estequiométricos (Equação 10), a quantidade de CO_2 capturada é obtida, sendo um valor mais próximo da realidade do que o obtido pela Equação 9. Contudo, é importante salientar que as equações são ferramentas importantes para simulações, e que o uso combinado das duas técnicas é importante para os estudos da área.

5.2. BALANÇO DE EMISSÕES

Os valores de emissões de CO_2 considerados, que são oriundos das emissões da produção do cimento (considerando a descarbonatação e uso de combustíveis fósseis), mais as oriundas do processo de beneficiamento de agregados, variou entre 330,08 $kg.CO_2/m^3$ e 431,59 $kg.CO_2/m^3$, correspondentes ao concreto de referência com relação água/cimento 0,65 (menor valor) e ao concreto com 100% de substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo de RCD e relação água/cimento 0,45 (maior valor).

Logo, considerando condições perfeitas dos materiais totalmente carbonatáveis, é possível capturar entre 28,14% e 35,42% do CO_2 emitido, quando considerada a captura de CO_2 pela Equação da BRE e entre 4,62% e 35,02% quando considerada a captura de CO_2 pela análise termogravimétrica. Ao se analisar trabalhos de outros pesquisadores, os valores encontrados são compatíveis com os disponibilizados na literatura e estão próximo do valor base estabelecido pela Associação Europeia do Cimento (Cembureau) de 25% de captura de CO_2 do emitido pela indústria do cimento (POSSAN, 2019), especialmente os concretos com substituição de agregados naturais por agregados de RCD.

5.3. PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO

Os valores obtidos para a profundidade de carbonatação variaram entre 2,85 mm e 12,29 mm aos 15 dias de exposição, e entre 3,55 mm e 17,10 mm aos 25 dias. Verificou-se, ainda, que os menores valores de profundidade de carbonatação, nas duas idades de exposição, ocorreram para o concreto de referência com relação água/cimento de 0,45 e os maiores são correspondentes aos concretos com 50% de substituição do agregado miúdo e relação água/cimento 0,65.

De forma inversa às propriedades mecânicas, a profundidade de carbonatação é diretamente proporcional ao teor de substituição de agregados naturais por reciclados, e também diretamente proporcional à relação água/cimento. Pelo fato dos RCDs, tanto miúdo quanto graúdo, serem materiais com alta porosidade, facilitam a entrada de CO₂ pela matriz cimentícia, carbonatando com maior intensidade do que em relação aos concretos de referência. Também é importante ressaltar que os agregados reciclados contém materiais com potencial de carbonatação em sua composição, de modo que, associado com o elevado índice de vazios, colaboram para o aumento da profundidade de carbonatação.

5.4. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

Observou-se, de um modo geral, que a substituição de agregados naturais por reciclados reduziu as propriedades físicas e mecânicas dos concretos avaliados. No caso da absorção por capilaridade, o aumento da absorção variou entre 40% e 288%, indicando que o RCD, nos concretos avaliados, aumenta a porosidade e, conseqüentemente, facilita a entrada de CO₂ no material cimentício. No caso do aumento da relação água/cimento, notou-se que a absorção por capilaridade aumentou entre as relações água/cimento 0,45 e 0,55, mas decaiu entre 0,55 e 0,65, devido à maior compactidade dos concretos com a maior relação água/cimento.

As propriedades mecânicas, em sua grande maioria (exceto casos específicos), reduziram conforme se aumentou o teor de substituição dos agregados naturais por agregados de RCD, bem como a relação água/cimento, devido à redução da massa específica desses concretos e à redução no consumo de cimento, respectivamente.

Verificou-se, inclusive, que a resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos com substituição do agregado graúdo natural por reciclado reduziram significativamente, fato este explicado pelo baixo teor de agregado basáltico (em torno de 25%) frente aos outros componentes do RCD (argamassas, cerâmica vermelha e cerâmica de revestimento). Em menor intensidade, esse efeito é também verificado nos concretos com substituição de agregado miúdo reciclado, visto que, de acordo com a FRX do material, aproximadamente 66% dos compostos do agregado miúdo são silicosos e os 34% restantes são compostos por óxidos, de propriedades físicas e mecânicas inferiores às da areia natural.

5.5. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a realização dos seguintes trabalhos:

- a) Estudo da influência do revestimento de materiais cimentícios (tintas, cerâmicas de revestimento, massas de regularização, etc...) na captura de CO₂.
- b) Avaliação da influência do tipo de cimento utilizado nos concretos na captura de CO₂, de modo a avaliar a influência de adições (pozolanas, fillers, escórias de alto forno) na carbonatação dos concretos;
- c) Análise da influência da utilização do cimento LC³ na captura de CO₂ de materiais cimentícios;
- d) Avaliação da captura de CO₂ em argamassas, visto que a disponibilidade de trabalhos sobre esse material ainda é pequena na bibliografia;
- e) Avaliação da captura de CO₂ de concretos com RCD submetidos a carbonatação natural;
- f) Avaliação da captura de CO₂ de concretos sem RCD.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E1876**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. West Conshohocken (EUA), 2015

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E 2550**: Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry. West Conshohocken (EUA), 2017

ANDERSSON, R.; FRIDH, K.; STRIPPLE, H.; HAGLUND, M. Calculating CO₂ Uptake for Existing Concrete Structures during and after Service Life. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 20, p.11625-11633, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil: 2017**. 2018. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2019..

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão dos corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16137**: Ensaio não destrutivos - Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ANDRADE, C; SANJUÁN, M. Updating Carbon Storage Capacity of Spanish Cements. **Sustainability**, v. 10, n. 12, p.1-15, 17 dez. 2018.

ANDRADE, J.J.O.; POSSAN, E.; SQUIAVON, J.Z.; ORTOLAN, T.L.P. Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 161, p.70-83, 2018.

BRE. **Global, Product Category Rules for Type III environmental product declaration of construction products**. EN 15804:2012+A1:2013. PN514. 2014

CAI, J.; WANG, S.; XIAO, Z. A study on the CO₂ capture and attrition performance of construction and demolition waste. **Fuel**, v. 222, p.232-242, 2018.

COSTA, B.L.C. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. 2012. 208 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

COSTA, I.V.L. **Análise do potencial técnico do sequestro geológico de CO₂ no setor petróleo no Brasil**. 2009. 95f. Dissertação (Mestrado em planejamento energético) – Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

- CUNHA, I.B. **Quantificação das emissões de CO₂ na construção de unidades residenciais unifamiliares com diferentes materiais**. 2016. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- DEJA, J.; ULIASZ-BOCHENCZYK, A.; MOKRZYCKI, E. CO₂ emissions from Polish cement industry. **International Journal Of Greenhouse Gas Control**, v. 4, n. 4, p.583-588, 2010.
- DUAN, H.; LI, J.. Construction and demolition waste management: China's Lessons. **Waste Management & Research**, Londres, v. 34, n. 5, p.397-398, 2016.
- DWECK, J.; SILVA, P. F. F. ; BUCHLER, P.M. ; CARTLEDGE, F. K. Estudo por Termogravimetria da Evolução das Fases de Tobermorita e Etringita durante a Hidratação de Cimento Portland Composto Tipo II. In: 45º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2001, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2001.
- EKOLU, S. O. Model for practical prediction of natural carbonation in reinforced concrete: Part 1-formulation. **Cement And Concrete Composites**, v. 86, p.40-56, fev. 2018.
- EUROPEAN COMISSION. **Resource Efficient Use of Mixed Wastes**. 2016. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/mixed_waste.htm#intro>. Acesso em: 10 jun. 2017.
- FELIX, E. F.; POSSAN, E. Balance emissions and CO₂ uptake in concrete structures: simulation based on the cement content and type. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 1, p.135-162, 2018.
- FEIST, M. Thermal analysis: basics, applications, and benefit. **Chemtexts**, v. 1, n. 1, 24 fev. 2015.
- GABROVŠEK, R.; VUK, T.; KAUČIČ, V. Evaluation of the Hydration of Portland Cement Containing Various Carbonates by Means of Thermal Analysis. **Acta Chimica Slovenica**, Ljubljana, v. 2, n. 53, p.159-165, dez. 2005.
- GAJDA, J. Absorption of atmospheric carbon dioxide by portland cement concrete. **PCA, R & D**, Chicago. Serial n. 2255a, 2001.
- GANDÍA-ROMERO, J.M.; CAMPOS, I.; VALCUENDE, M.; GARCÍA-BREIJO, E.; MARCOS, M.D.; PAYÁ, J.; SOTO, J. Potentiometric thick-film sensors for measuring the pH of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 68, p.66-76, 2016.
- GRUYAERT, E.; ROBEYST, N.; BELIE, N. Study of the hydration of Portland cement blended with blast-furnace slag by calorimetry and thermogravimetry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 102, n. 3, p.941-951, 2010.
- HABERT, G.; ROUSSEL, N. Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. **Cement And Concrete Composites**, v. 31, n. 6, p.397-402, 2009.

HASELBACH, L.; THOMAS, A. Carbon sequestration in concrete sidewalk samples. **Construction and Building Materials**, v. 54, p.47-52, 2014.

HUANG, N.M.; CHANG, J.J.; LIANG, M.T. Effect of plastering on the carbonation of a 35-year-old reinforced concrete building. **Construction and Building Materials**, v. 29, p.206-214, 2012.

HYVERT, N.; SELIER, A.; DUPRAT, F.; ROUGEAU, P.; FRANCISCO, P. Dependency of C–S–H carbonation rate on CO₂ pressure to explain transition from accelerated tests to natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 11, p.1582-1589, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 9277**: Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption - BET method. Genebra, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 13320**: Particle size analysis - Laser diffraction methods. Genebra, 2009.

JACOBSEN, S.; JAHREN, P. Binding of CO₂ by Carbonation of Norwegian OPC Concrete', CANMET. In: **ACI International conference on sustainability and concrete technology**: Lyon. 2002.

JANG, J.; KIM, H.J.; KIM, H.J.; LEE, H.K. Review on recent advances in CO₂ utilization and sequestration technologies in cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 127, p.762-773, 2016.

JOHN, V. M.; PUNHAGUI, K.R.G.; QUATTRONE, M.; REIS, D.C. Potencial de mitigação de CO₂ de materiais cimentícios na fase de uso. In: XVII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENTAC. 2018, Foz do Iguaçu. **Anais....**São Paulo: ANTAC, 2018.

KALIYAVARADHAN, S. K.; LING, T. Potential of CO₂ sequestration through construction and demolition (C&D) waste—An overview. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 20, p.234-242, 2017.

KIKUCHI, T.; KURODA, Y. Carbon dioxide uptake in demolished and crushed concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 9, n. 1, p.115-124, 2011.

KUITTINEN, M. Does the use of recycled concrete lower the carbon footprint in humanitarian construction? **International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment**, v. 7, n. 5, p.472-488, 2016.

LEE, M-G.; KANG, D.; JO, H.; PARK, J. Carbon dioxide utilization with carbonation using industrial waste-desulfurization gypsum and waste concrete. **Journal of material Cycles and waste management**, v. 18, n. 3, p.407-412, 2016.

LI, D.; CHEN, B.; SUN, H.; MEMOM, S.A.; DENG, X.; WANG, Y.; XING, F. Evaluating the effect of external and internal factors on carbonation of existing concrete building structures. **Construction and Building Materials**, v. 167, p.73-81, abr. 2018.

LIMA, J. A. R. **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas**. 2010. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MALTA, J.O.; SILVA, V.S.; GONÇALVES, J.P. Argamassa contendo agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 1, n. 2, p.176-188. 2013.

MATTANA, A. J. **Estudos de cales hidratadas de mercado – caracterização química, física e comportamento reológico da pasta**. 2013. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia da Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MAZURANA, L.; BITTENCOURT, P.R.S.; SCREMIN, F.R.; MILANI, K.C.; NEVES JUNIOR, A.; POSSAN, E. Determination of CO₂ capture in rendering mortars produced with recycled construction and demolition waste by thermogravimetry. In: IX SIMPÓSIO DE ANÁLISE TÉRMICA, 9., 2019, Goiânia. **Anais...** Goiânia: SIAT, 2019. p. 1-6.

MELLO, M. R.; PHANON, D.; SILVEIRA, G.Q.; LLEWELLYN, P.I.; RONCONI, C.M. Amine-modified MCM-41 mesoporous silica for carbon dioxide capture. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 143, n. 1, p.174-179, 2011.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E COMUNICAÇÃO - (MCTIC). **Terceira Edição das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**, 2016. Disponível em: <https://sirene.mctic.gov.br/portal/export/sites/sirene/backend/galeria/arquivos/2018/10/11/Estimativas_3ed.pdf>. Acesso em 21 jun 2019.

NG, S.; ENGELSEN, C. J. Construction and demolition wastes. **Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete**, p.229-255, 2018.

NEVES JUNIOR, A.; DWECK, J; TOLEDO FILHO, R.D.; ELLIS, B.; LI, V. Determination of CO₂ capture during accelerated carbonation of engineered cementitious composite pastes by thermogravimetry. **Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry**, p.1-13, 30 mar. 2019.

NEVES JUNIOR, A. **Captura de CO₂ em Materiais Cimentícios através da Carbonatação Acelerada**. 2014. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

OLIVIER, J.G.J.; JANSSENS-MAENHOUT, G.; MUNTEAN, M.; PETERS, J.A.H.W. **Trends in global CO₂ emissions**. 2015. Disponível em: <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news_docs/jrc-2015-trends-in-global-co2-emissions-2015-report-98184.pdf>. Acesso em 22 maio 2017.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D.C.C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 4, p.7-20, 2007.

- PADE, C.; GUIMARÃES, M. The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 9, p.1348-1356, 2007.
- POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto armado em ambiente urbano**. 2010. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- POSSAN, E.; FELIX, E. F.; THOMAZ, W. A. CO₂ uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, n. 1, 2016
- POSSAN, E.; THOMAZ, W.A.; ALEANDRI, G.A.; FELIX, E.F.; SANTOS, A.C.P. CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: A case study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 6, p.147-161, 2017.
- POSSAN, E. Captura de CO₂ em materiais cimentícios. **Revista Ibracon Concreto e Construções**, São Paulo, v. 1, n. 95, p.72-78, set. 2019.
- RAJISHA, K.R.; POTHAN, L.A.; THOMAS, S. Thermomechanical and spectroscopic characterization of natural fibre composites. **Interface Engineering of Natural Fibre Composites for Maximum Performance**, p.241-274, 2011.
- ROSENQVIST, M.; BERTRON, A.; FRIDH, K.; HASSANZADEH, M. Concrete alteration due to 55 years of exposure to river water: Chemical and mineralogical characterization. **Cement and Concrete Research**, v. 92, p. 110–120, 2017.
- RUPASINGHE, M.; SAN NICOLAS, R.; MENDIS, P.; SOFI, M.; NGO, T. Investigation of strength and hydration characteristics in nano-silica incorporated cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, p.17-30, jul. 2017.
- SAVIJA, B.; LUKOVIC, M. Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. **Construction and Building Materials**, v. 117, p.285-301, 2016.
- SANTOS, T.C.; RONCONI, C.M. Captura de CO₂ em Materiais Híbridos. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 1, p.112-130, 2014.
- SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. Boca Raton, FL. Broken Sound Parkway NW. CRC Press. 2016.
- SILVA, S. R.; ANDRADE, J. J. O. Investigation of mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 153, p.704-715, 2017.
- SVINNING, K.; HØSKULDSSON, A.; JUSTNES, H. Prediction of compressive strength up to 28 days from microstructure of Portland cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 2, p.138-151, fev. 2008.

TONG, D.; ZHANG, Q.; ZHENG, Y.; CALDEIRA, K.; SHEARER, C.; HONG, C.; QIN, Y.; DAVIS, S.J. Committed emissions from existing energy infrastructure jeopardize 1.5 °C climate target. **Nature**, v. 572, n. 7769, p.373-377, 1 jul. 2019.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry**. 2018. Disponível em: <<https://www.wbcسد.org/contentwbc/download/4586/61682/>>. Acesso em: 26 jun. 2019.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **GNR Project: Reporting CO₂**. 2016. Disponível em: <<https://www.wbcسدcement.org/GNR-2016/>>. Acesso em: 26 jun. 2019.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C.S. Development of a new generation of eco-friendly concrete blocks by accelerated mineral carbonation. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p.1235-1241, 2016.

XI, F.; DAVIS, S.J.; CIAIS, P.; CRAWFORD-BROWN, D.; GUAN, D.; PADE, C.; SHI, T.; SYDDALL, M.; LV, J.; LANZHU, J.; BING, L.; WANG, J.; WEI, W.; YANG, K.-H.; LAGERBLAD, B.; GALAN, I.; ANDRADE, C.; ZHANG, Y.; LIU, Z. Substantial global carbon uptake by cement carbonation. **Nature Geoscience**, v. 9, n. 12, p.880-883, 2016.

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

YOU, K.-S.; LEE, S.-H.; HWANG, S.-H.; AHN, J.-W. Effect of CO₂ Carbonation on the Chemical Properties of Waste Cement: CEC and the Heavy Metal Adsorption Ability. **Materials Transactions**, v. 52, n. 8, p.1679-1684, 2011.

ZHANG, L. N.; LI, F. C.; YU, X. Life Cycle Assessment of CO₂ Emission of Concrete Considering Carbonation and Structural Element Types. **Key engineering materials**, v. 730, p.375-379, 2017.

ZHAO, G.; LI, J.; SHAO, W. Effect of mixed chlorides on the degradation and sulfate diffusion of cast-in-situ concrete due to sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 181, p.49-58, ago. 2018.

APÊNDICE A—PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CONCRETOS CONFECCIONADOS

Tabela 22: Resistência à compressão dos concretos confeccionados

Concretos	Resistência à compressão (MPa)		
	7 dias	28 dias	63 dias
REF 0,45	42,5	48,7	53,5
REF 0,55	30,3	38,2	44,3
REF 0,65	27,5	31,4	35,6
50%AM 0,45	31,8	39,9	39,5
50%AM 0,55	27,6	35,8	41,1
50%AM 0,65	18,5	23,8	22,4
100%AM 0,45	32,0	36,6	43,4
100%AM 0,55	23,8	26,8	31,8
100%AM 0,65	22,8	26,2	31,7
50%AG 0,45	30,8	34,3	37,3
50%AG 0,55	27,2	33,0	35,8
50%AG 0,65	19,3	21,7	25,0
100%AG 0,45	26,9	30,1	30,7
100%AG 0,55	23,6	25,7	30,4
100%AG 0,65	16,3	19,8	21,0
50%AM 50%AG 0,55	26,7	30,8	35,6

Tabela 23: Resistência à tração por compressão diametral e Módulo de elasticidade estático e dinâmico dos concretos confeccionados

Concretos	Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias (MPa)	Módulo de Elasticidade aos 28 dias (GPa)	
		Estático	Dinâmico
REF 0,45	4,08	41,36	45,48
REF 0,55	3,38	38,72	43,87
REF 0,65	2,64	32,71	40,11
50%AM 0,45	3,44	30,12	34,83
50%AM 0,55	3,45	32,85	37,48
50%AM 0,65	2,83	22,66	27,32
100%AM 0,45	2,93	26,74	31,79
100%AM 0,55	3,26	25,02	29,77
100%AM 0,65	2,93	24,13	29,52
50%AG 0,45	2,89	29,44	35,27
50%AG 0,55	2,65	29,83	35,66
50%AG 0,65	2,53	26,20	31,18
100%AG 0,45	2,81	23,95	27,90
100%AG 0,55	2,68	24,09	28,95
100%AG 0,65	2,16	21,48	25,46
50%AM 50%AG 0,55	3,26	27,43	31,33

**APÊNDICE B– IMAGENS DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS À
CARBONATAÇÃO ACELERADA APÓS APLICAÇÃO DE FENOLFTALEÍNA**

Tabela 24: Imagens dos corpos de prova à 15 dias de carbonatação acelerada


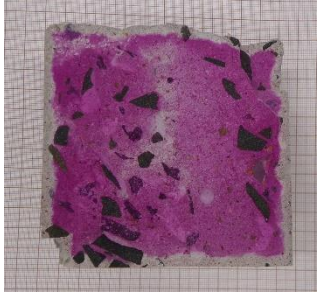
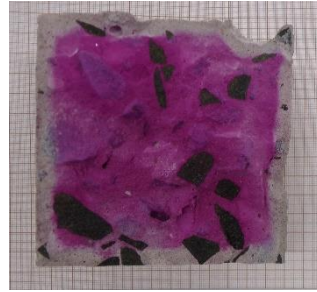



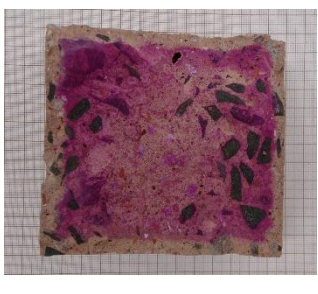





Concretos (15 dias)	0,45	0,55	0,65
REF (0%)			
50% AM			
100% AM			
50% AG			

Tabela 24 (Continuação...)





Concretos (15 dias)	0,45	0,55	0,65
100% AG			
50% AM 50% AG	---		---

Tabela 25: Imagens dos corpos de prova à 25 dias de carbonatação acelerada

















Concretos (25 dias)	0,45	0,55	0,65
REF (0%)			
50% AM			

Tabela 25 (Continuação...)

Concretos (25 dias)	0,45	0,55	0,65
100% AM			
50% AG			
100% AG			
50% AM 50% AG	---		---